



Universidade Federal do Piauí
Centro de Ciências da Natureza
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

Abordagem Multiobjetivo para Alocação de Monitores de Qualidade de Energia Elétrica em Sistemas de Distribuição

Sávio Mota Carneiro

Número de Ordem PPGCC: M001
Teresina-PI, 20 de fevereiro de 2018

Sávio Mota Carneiro

**Abordagem Multiobjetivo para Alocação de Monitores de
Qualidade de Energia Elétrica em Sistemas de
Distribuição**

Dissertação (Mestrado) apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da UFPI (área de concentração: Sistemas de Computação), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Ciência da Computação.

Universidade Federal do Piauí - UFPI

Centro de Ciências da Natureza

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

Orientador: Ricardo de Andrade Lira Rabêlo

Teresina-PI

20 de fevereiro de 2018

Sávio Mota Carneiro

Abordagem Multiobjetivo para Alocação de Monitores de Qualidade de Energia Elétrica em Sistemas de Distribuição/ Sávio Mota Carneiro. – Teresina-PI, 20 de fevereiro de 2018-

40 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Ricardo de Andrade Lira Rabêlo

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí - UFPI

Centro de Ciências da Natureza

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, 20 de fevereiro de 2018.

1. Algoritmos Genéticos. 2. Alocação de Monitores. 3. Qualidade de Energia Elétrica.

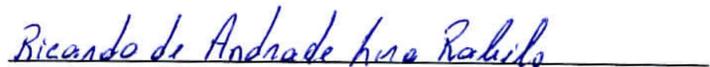
CDU 02:141:005.7

**“Abordagem Multiobjetivo para Alocação de Monitores de Qualidade
de Energia Elétrica em Sistemas de Distribuição”**

SÁVIO MOTA CARNEIRO

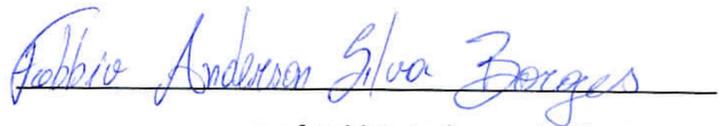
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências da Natureza da Universidade Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Aprovada por:



Prof. Ricardo de Andrade Lira Rabêlo

(Presidente da Banca Examinadora)



Prof. Fabbio Anderson da Silva Borges

(Examinador Externo)



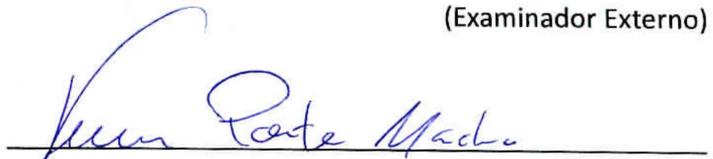
Prof. Hermes Manoel Galvão Castelo Branco

(Examinador Externo)



Prof. Rogério Andrade Flauzino

(Examinador Externo)



Prof. Vinícius Ponte Machado

(Examinador Interno)

Teresina, 20 de fevereiro de 2018

*Aos meus pais, familiares e amigos,
por sempre estarem comigo em todos os momentos.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus que me deu energia e sabedoria para concluir todo este trabalho.

Agradeço aos meus pais que me incentivaram todos os anos de minha vida.

Agradeço ao meu orientador e amigo, Ricardo de Andrade Lira Rabêlo, por todos os conselhos, pela paciência e ajuda nesse período.

Agradeço ao Prof. Hermes Manoel Galvão Castelo Branco pelos embates e debates tão necessários para o amadurecimento de uma ideia.

Aos meus amigos por propiciarem momentos de alegria e carinho ao longo destes anos.

Aos professores que sempre estiveram dispostos a ajudar e contribuir para um melhor aprendizado.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que fizeram parte desta etapa decisiva em minha vida.

*Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas.
Muito conhecimento, que se sintam humildes.
Leonardo da Vinci*

Resumo

Dentre os distúrbios de Qualidade da Energia Elétrica, destacam-se, entre os mais relevantes e de maior ocorrência, os afundamentos de tensão, pois além da sua natureza estocástica, o que torna difícil o seu monitoramento, causam enormes prejuízos às concessionárias e consumidores. O monitoramento constante é essencial para identificar os distúrbios existentes, no entanto os custos envolvidos inviabilizam o monitoramento completo do sistema, assim apenas um número reduzido de monitores está disponível, devendo serem instalados em posições estratégicas para cobrir a maior quantidade de eventos possíveis. Desta forma, percebe-se que a determinação dos pontos de instalação dos equipamentos é um fator crucial para o sucesso do plano de monitoramento. Este trabalho apresenta uma abordagem para a resolução do problema de alocação de monitores de qualidade de energia elétrica considerando vários aspectos do problema como a cobertura topológica, os afundamentos de tensão ocorridos, porém não monitorados e o custo total dos equipamentos instalados. Para contemplar os diversos aspectos mencionados, a abordagem proposta é baseada em um modelo de otimização multiobjetivo. O *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)* foi empregado para resolução desse problema de otimização multiobjetivo devido a sua eficiência ao lidar com problemas de natureza combinatória. A abordagem proposta utiliza o Método das Posições de Falta para determinar os pontos de vulnerabilidade no Sistema de Distribuição para cada tipo de falta: monofásica, bifásica (fase-fase e fase-fase-terra) e trifásica. Dessa forma, a abordagem permite obter uma Matriz de Tensão Durante a Falta que representa o comportamento do sistema, considerando todos os tipos de faltas possíveis. A abordagem apresentada foi testada nos sistemas de 13, 34 e 37 barras do IEEE, simulados no software *DigSILENT Power Factory 15.1*. Os resultados obtidos permitem ao usuário a tomada de decisões sobre a quantidade e localização dos monitores que devem ser instalados, de forma a se adequar a realidade financeira da concessionária e evitar gastos desnecessários que não se traduzem em melhoria na capacidade de monitoramento. Desta forma, a concessionária pode adotar uma estratégia de monitoramento que leva em conta o número de afundamentos não cobertos, o custo total do monitoramento, a ambiguidade topológica, o total de cargas não monitoradas e a extensão da área de monitoramento.

Palavras-chaves: Algoritmos Genéticos, Alocação de Monitores, Qualidade de Energia Elétrica.

Abstract

Among disturbances of Power Quality, the most relevant and with greatest rate of occurrence are voltage sags, as in addition to their stochastic nature, which makes monitoring difficult, they cause great losses to power supplies and to customers. Constant monitoring is an essential part of identifying the existing disturbances. However, the costs involved make the monitoring of the complete system infeasible, in such a way that only a reduced number of monitors are available, which need to be installed in strategic positions in order to cover the greatest number of possible events. Thus, it is possible to notice that determining the installation positions of the equipment is a crucial factor to the success of the monitoring plan. This work presents an approach for solving the problem of allocating monitors of power quality, considering various aspects of the problem, such as topological coverage, voltage sags that have happened but have not been monitored and total cost of equipment installed. In order to meet all mentioned aspects, the proposed approach is based on a multi-objective optimization model. The Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II was adopted to solve this multiobjective problem due to its efficiency in dealing with combinatorial problems. The proposed approach uses the Fault Position Method to determine the vulnerability points in the Distribution System for each type of fault: single-phase, two-phase (LL and LLG) and three-phase (LLL and LLLG). Thus, the approach allows to obtain a Voltage Matrix During Fault that represents the behavior of the system, considering all types of possible faults. The approach was submitted to IEEE 13, 34 and 37-bus distribution systems, which were simulated using DigSILENT Power Factory 15.1 software. The results allow the user to make decisions regarding the amount and the position of the monitors to be installed, in such a way as to seek adequacy to the financial reality of the power supplies' and as to avoid unnecessary costs that would not result in improvements in monitoring performance. This way, the power utility can adopt a monitoring strategy that takes into account the number of non-covered sags, the total monitoring cost, the topological ambiguity, the total monitored charges and the size of the monitoring area.

Keywords: Genetics Algorithms, Monitors Allocation, Power Quality.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fluxograma do algoritmo do método das posições de falta.	6
Figura 2 – Exemplo de aplicação do método das posições de falta para construção da MTDF de um sistema elétrico fictício de 6 barras.	7
Figura 3 – Etapas do funcionamento de um AG convencional.	8
Figura 4 – Ilustração da representação de um cromossomo.	8
Figura 5 – Fronteira de Pareto para um problema com dois objetivos.	10
Figura 6 – Procedimento de seleção do NSGA-II.	11
Figura 7 – Comparação entre a representação unifilar do sistema de teste do IEEE de 13 barras (a) e a sua representação na estrutura de árvore (b).	12
Figura 8 – Exemplo da representação de um esquema de alocação de monitores de QEE em um sistema de distribuição fictício com seis barras (a) e o cromossomo ou vetor de alocação X correspondente (b).	13
Figura 9 – Exemplo de aplicação prática das regras apresentadas no SD de 13 barras do IEEE. As regiões em destaque evidenciam a aplicação de cada uma das regras definidas.	15
Figura 10 – Exemplo de obtenção do vetor de afundamentos não monitorados U	17
Figura 11 – Fluxograma do funcionamento da abordagem proposta.	20
Figura 12 – Representação unifilar do circuito alimentador IEEE de 13 barras.	22
Figura 13 – Representação unifilar do circuito alimentador IEEE de 34 barras.	23
Figura 14 – Representação unifilar do circuito alimentador IEEE de 37 barras.	25
Figura 15 – Representação gráfica da MTDF do circuito alimentador IEEE de 13 barras para faltas monofásicas fase A.	27
Figura 16 – Representação gráfica da MC do circuito alimentador IEEE de 13 barras, considerando o limiar de tensão igual a 0,6 p.u.	27
Figura 17 – Mapeamento das posições do cromossomo com as barras do SD.	29
Figura 18 – Localização e área de abrangência dos monitores presentes na solução de nº 8 para cada tipo de falta considerado.	30
Figura 19 – Gráfico representando o custo do monitoramento pela qualidade da cobertura topológica no circuito alimentador IEEE de 34 barras, considerando o limiar de tensão igual a 0,9 p.u.	31
Figura 20 – Mapeamento das posições do cromossomo com as barras do SD.	33
Figura 21 – Fronteira de Pareto obtida para o limiar de 0,9 p.u. no circuito alimentador IEEE de 37 barras.	34
Figura 22 – Mapeamento das posições do cromossomo com as barras do SD.	34

Lista de tabelas

Tabela 1 – Cargas conectadas às barras do circuito alimentador IEEE de 13 barras.	22
Tabela 2 – Cargas modeladas com parâmetros distribuídos no circuito alimentador IEEE de 13 barras.	23
Tabela 3 – Cargas conectadas às barras do circuito alimentador IEEE de 34 barras.	23
Tabela 4 – Cargas modeladas com parâmetros distribuídos no circuito alimentador IEEE de 34 barras.	24
Tabela 5 – Cargas conectadas às barras do circuito alimentador IEEE de 37 barras.	25
Tabela 6 – Parâmetros utilizados no NSGA-II.	26
Tabela 7 – Algumas soluções retornadas pela abordagem para os limiares de 0,9 e 0,6 p.u. no circuito alimentador do IEEE de 13 barras.	28
Tabela 8 – Barras vulneráveis a afundamentos de tensão quando um monitor é instalado na Barra 634.	29
Tabela 9 – Algumas soluções retornadas pela abordagem para os limiares de 0,9 e 0,6 p.u. no circuito alimentador do IEEE de 34 barras.	32
Tabela 10 – Algumas soluções retornadas pela abordagem para os limiares de 0,9 e 0,6 p.u. no circuito alimentador do IEEE de 37 barras.	35

Lista de abreviaturas e siglas

AG	Algoritmos Genéticos
FP	Fronteira de Pareto
FDP	Função de Densidade de Probabilidade
LKC	Lei de Kirchhoff das Correntes
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MC	Matriz de Cobertura
MTDF	Matriz de Tensão Durante a Falta
MPF	Método das Posições de Falta
NSGA-II	<i>Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II</i>
POM	Problemas de Otimização Multiobjetivo
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SD	Sistema de Distribuição
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração
VTLD	Variações de Tensão de Longa Duração

Lista de símbolos

$A(X)$	Vetor de ambiguidade
a_i	i -ésimo elemento do vetor $A(X)$
b_i	i -ésima barra do sistema
$D(X)$	Vetor de descendentes
d_i	i -ésimo elemento do vetor $D(X)$
D_{total}	Total de descendentes do sistema
e	Limiar da tensão remanescente observada no sistema
F	Barra em falta
$f_1(x)$	Função objetivo de custo do monitoramento
$f_2(x)$	Função objetivo da qualidade da cobertura topológica
$f_3(x)$	Função objetivo da cobertura de afundamentos
k	Barra em observação
$L(X)$	Vetor de cargas
l_i	i -ésimo elemento do vetor L
L_{total}	Total de carga do sistema
MC_e	Matriz de Cobertura dado um limiar e
$mc_{e_{ij}}$	(i,j) -ésimo elemento da MC_e
$MTDF$	Matriz de Tensão Durante a Falta
$MTDF^T$	Matriz de Tensão Durante a Falta transposta
$mtdf_{ij}^T$	(i,j) -ésimo elemento da MTDF transposta
n	Número de barras do sistema
N_{pop}	Tamanho da população no AG
P	Vetor de custos de instalação dos monitores

p_i	i -ésimo elemento do vetor P
P_t	População pai de uma geração t no NSGA-II
Q_t	População filha de uma geração t no NSGA-II
R_t	População auxiliar de uma geração t no NSGA-II
TF	Conjunto dos tipos de faltas
U	Vetor de afundamentos não monitorados
u_i	i -ésimo elemento do vetor U
V	Vetor de observabilidade
\bar{V}	Vetor de vulnerabilidade
w_1	Peso da cobertura de cargas no cálculo da qualidade topológica
w_2	Peso da cobertura de descendentes no cálculo da qualidade topológica
w_3	Peso da ambiguidade no cálculo da qualidade topológica
X	Vetor de alocação
x_i	i -ésimo elemento do vetor X
$Z_{(k,F)}$	Impedância de curto-circuito da barra k dada uma falta em F
$Z_{(F,F)}$	Impedância de curto-circuito da barra F dada uma falta em F

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1	Qualidade de Energia Elétrica	4
2.2	Variações de Tensão de Curta Duração	4
2.3	Método de Posição de Falta	5
2.4	Algoritmos Genéticos	7
2.5	Otimização Evolutiva Multiobjetivo	9
3	ABORDAGEM PROPOSTA	12
3.1	Representação Computacional do Sistema de Distribuição	12
3.2	Aspectos Relacionados à Cobertura Topológica	13
3.3	Aspectos Relacionados à Cobertura dos Afundamentos de Tensão	14
3.4	Formulação do Problema de Otimização Multiobjetivo	18
3.4.1	Custo do Monitoramento	18
3.4.2	Qualidade da Cobertura Topológica	18
3.4.3	Número de Afundamentos Não Cobertos	19
3.5	Fluxograma da Abordagem Proposta	20
4	SISTEMAS ELÉTRICOS UTILIZADOS	21
4.1	Circuito alimentador IEEE de 13 barras	21
4.2	Circuito alimentador IEEE de 34 barras	21
4.3	Circuito alimentador IEEE de 37 barras	23
5	RESULTADOS	26
5.1	Circuito alimentador IEEE de 13 barras	28
5.2	Circuito alimentador IEEE de 34 barras	31
5.3	Circuito alimentador IEEE de 37 barras	33
6	CONCLUSÕES	36
6.1	Publicações	37
	REFERÊNCIAS	38

1 Introdução

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) estão sujeitos a diversos tipos de distúrbios elétricos (BOLLEN; GU, 2006; DUGAN et al., 2012). Dentre esses, os afundamentos de tensão são considerados uns dos mais sérios problemas de Qualidade de Energia Elétrica (QEE), pois, além de serem difíceis de monitorar, devido a sua natureza estocástica (CEBRIAN; ALMEIDA; KAGAN, 2010; ESPINOSA-JUÁREZ; HERNANDEZ, 2007), são os eventos mais frequentes no sistema elétrico (BOLLEN; GU, 2006; GUPTA; FRITZ, 2016), causando enormes prejuízos financeiros aos consumidores pelo mau funcionamento de equipamentos ou pela parada do processo industrial (BRANCO et al., 2015).

Diante disso, o acompanhamento constante da QEE é essencial para identificar os distúrbios existentes e corrigir possíveis falhas no plano de monitoramento desses eventos. Uma forma de realizar esse acompanhamento é por meio da instalação de equipamentos capazes de monitorar a qualidade de energia no Sistema de Distribuição (SD). No entanto, o monitoramento completo de um SD possui um alto custo envolvido e por razões práticas e econômicas a sua aplicação pode ser inviável (KEMPNER; OLESKOVICZ; SANTOS, 2014).

Como alternativa, o monitoramento pode ser realizado considerando apenas alguns pontos estratégicos do sistema, conseqüentemente novos problemas surgem com essa abordagem, por exemplo: a determinação da quantidade e localização desses pontos de monitoramento. Por questões técnicas e operacionais, no contexto da QEE, não há nenhum conhecimento prévio sobre os locais em que os monitores devem ser instalados de forma a proporcionar a melhor visão geral da situação enfrentada pelo SEP (BRANCO et al., 2015).

Para solucionar esse problema, várias metodologias de alocação de monitores de QEE em SEP's estão presentes na literatura. Por exemplo, os autores de (ESPINOSA-JUAREZ; HERNANDEZ; OLGUIN, 2009) propuseram uma abordagem de alocação de monitores capaz de garantir uma cobertura completa dos afundamentos de tensão. Para isso, utilizaram uma matriz de alcançabilidade dos monitores, obtida por meio da solução de expressões analíticas. Em (ALMEIDA; KAGAN, 2011), os autores empregaram Algoritmos Genéticos e Teoria de Conjuntos Fuzzy para determinar o número mínimo e a localização dos monitores necessários para cobrir afundamentos e elevações de tensão em um SD. Já em (LIAO et al., 2016), os autores desenvolveram uma metodologia de alocação otimizada baseada no Método do Gradiente e Enxame de Partículas, integrando a topologia da rede e experiências históricas no processo de busca por meio de árvores geradoras. Outra abordagem proposta pelos autores Hong e Chen (2011), faz uso de um

Algoritmo Genético melhorado em conjunto com algoritmo de clusterização *K-means* modificado para determinar a localização dos monitores na rede.

Com base nessa revisão de literatura, um aspecto identificado em todos os trabalhos foi a necessidade de sempre fornecer soluções com o menor custo possível, desconsiderando a relação custo/benefício existente entre o investimento a ser realizado e a qualidade do monitoramento resultante desse investimento. Como consequência, soluções que demandam um investimento um pouco maior em termos financeiros, mas que, em contrapartida, possuem uma relação custo/benefício maior ou igual a solução de menor custo podem ser desprezadas.

Este trabalho apresenta uma abordagem multiobjetivo para resolução do problema de alocação de monitores de QEE em sistemas de distribuição, considerando os aspectos topológicos, os afundamentos de tensão e o custo de monitoramento. A abordagem implementada utiliza o Método das Posições de Falta (MPF) (CONRAD; LITTLE; GRIGG, 1991) para determinar os pontos de ocorrência dos afundamentos de tensão no SD. Contudo, não foram consideradas apenas a ocorrência de curtos, mas sim de todos os tipos de faltas: monofásicas, bifásicas (fase-fase e fase-fase-terra) e trifásicas, com a finalidade de garantir a observabilidade total dos eventos ocorridos no SD (DAS, 2016). Dessa forma, objetiva-se fornecer soluções que maximizem a qualidade da cobertura topológica do sistema, minimizem a quantidade de afundamentos de tensão não monitorados e minimizem os custos do monitoramento. O algoritmo *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) (DEB et al., 2002) foi escolhido para a resolução do problema multiobjetivo devido a sua eficiência com problemas de natureza combinatória.

A abordagem apresentada foi testada nos sistemas de 13, 34 e 37 barras do IEEE (KERSTING, 1991), simulados no software *DigSILENT Power Factory 15.1* (GMBH, 2013), e, como resultado, a metodologia fornece um conjunto de soluções otimizadas considerando simultaneamente os diversos aspectos de modo a permitir uma análise mais criteriosa do custo/benefício de cada cenário proposto. As principais contribuições deste trabalho são:

- A construção de um modelo de alocação capaz de garantir a cobertura total dos afundamentos de tensão considerando os diversos tipos de falta ocorrida no SD; e
- O estabelecimento de uma metodologia de alocação otimizada de monitores que facilita a tomada de decisão guiada pelo orçamento disponível para investimento da concessionária. Além do mais, a abordagem ao considerar diversos aspectos permite uma análise mais elaborada da relação custo/benefício na definição de um plano de monitoramento para os distúrbios de QEE.

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma: o [Capítulo 2](#) apresenta

alguns dos fundamentos teóricos necessários para o entendimento deste trabalho. O [Capítulo 3](#) detalha o funcionamento da abordagem desenvolvida. Na sequência, o [Capítulo 4](#) descreve os sistemas elétricos utilizados nos testes. Em seguida os resultados obtidos são discutidos no [Capítulo 5](#). Finalizando a dissertação, o [Capítulo 6](#) apresenta as conclusões e os trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo, os conceitos fundamentais para o entendimento da abordagem proposta são apresentados. Iniciando, os conceitos básicos sobre Qualidade de Energia Elétrica e Variações de Tensão de Curta Duração são discutidos na [seção 2.1](#) e [seção 2.2](#). Em seguida, o Método das Posições de Falta, utilizado no cálculo de afundamentos de tensão, é detalhado na [seção 2.3](#). Finalizando, na [seção 2.4](#) e [seção 2.5](#) são conceituados os Algoritmos Genéticos e a Otimização Evolutiva Multiobjetivo, respectivamente.

2.1 Qualidade de Energia Elétrica

Um dos principais objetivos de um SD é o fornecimento de energia elétrica aos consumidores de forma confiável e ininterrupta. Embora as concessionárias planejem suas operações visando esse objetivo, o SD está sujeito a imprevistos que impactam diretamente na qualidade da energia elétrica fornecida ([SALLAM; MALIK, 2011](#)).

Tecnicamente a satisfação dos consumidores em relação à QEE fornecida está condicionada ao cumprimento dos seguintes requisitos ([EMANUEL; MCNEILL, 1997](#)):

- A energia elétrica deve estar continuamente disponível;
- A tensão fornecida deve possuir uma forma de onda senoidal com amplitude e frequência constante e iguais aos valores nominais;
- Nos sistemas trifásicos deve haver uma simetria perfeita: as tensões das fases devem ser senoidal idênticas, defasadas 120 graus em relação à outra.

Existem vários distúrbios que podem interferir nesses requisitos e conseqüentemente na QEE, são eles: Transitórios, Desequilíbrios de Tensão, Flutuações de Tensão, Distorções de Tensão, Variações de Tensão de Longa Duração e Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) ([DUGAN et al., 2012](#)).

2.2 Variações de Tensão de Curta Duração

O conceito de QEE está intimamente ligado a garantia dos níveis adequados de tensão e corrente às cargas dos clientes. Uma boa QEE é verificada quando se tem qualidade da tensão somada à qualidade da corrente elétrica. Define-se a tensão ideal como sendo um sinal senoidal com amplitude e frequência constantes e iguais aos valores estabelecidos em normas como a [IEEEStd1159 \(2009\)](#) e [Distribuição \(2013\)](#). Já a corrente ideal é um sinal

senoidal, também com amplitude e frequência constantes, e iguais aos valores nominais especificados em normas como as citadas anteriormente (BRANCO et al., 2015).

Existem vários distúrbios que podem interferir na QEE, tais como: Desequilíbrios de Tensão, Distorções de Tensão, Flutuações de Tensão, Transitórios, Variações de Tensão de Longa Duração (VTLD) e Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD). Neste trabalho, as VTCD's e, mais especificamente, os afundamentos de tensão são analisados por serem os mais frequentes e os que causam maiores prejuízos aos consumidores (BOLLEN; GU, 2006; GUPTA; FRITZ, 2016).

As VTCD's são fenômenos associados às variações dos valores quadráticos médios ou RMS (do inglês *Root Mean Square*) das tensões, caracterizadas pela permanência do nível de tensão fora da faixa nominal durante um intervalo de tempo superior a 0,5 ciclos e inferior a um minuto. Essas variações podem ser designadas de acordo com a duração dos eventos como: instantâneas (0,5 a 30 ciclos), momentâneas (30 ciclos a 3 s) ou temporárias (3 s a 1 min). Como principais causas desses distúrbios tem-se as condições de falta, energização de grandes cargas, tais como a partida de grandes motores, e a perda intermitente de conexões nos cabos do sistema (MAHELA; SHAIK; GUPTA, 2015).

Avaliando a amplitude da tensão, as VTCD's podem ser classificadas como:

- *Afundamento de tensão*: Destaca-se como o distúrbio mais significativo nas redes elétricas (BOLLEN, 2000; SINGH; CHANDRA; AL-HADDAD, 2014). Consiste na redução do valor da tensão eficaz de 10% a 90% da tensão nominal. Como consequência, esses distúrbios podem causar problemas em vários tipos de equipamentos, tais como: computadores, componentes microprocessados, controladores lógico programáveis (CLP's) e outros.
- *Elevação de tensão*: Caracteriza-se pelo aumento do valor da tensão eficaz do sistema na ordem de 10% a 80% da tensão nominal. Pode ocorrer em qualquer fase de um circuito trifásico durante a ocorrência de um curto-circuito, porém não são eventos tão comuns como os afundamentos de tensão;
- *Interrupção de curta duração*: De menor ocorrência, as interrupções são eventos locais caracterizados pela redução a níveis críticos do valor da tensão eficaz (inferior a 10% da tensão nominal).

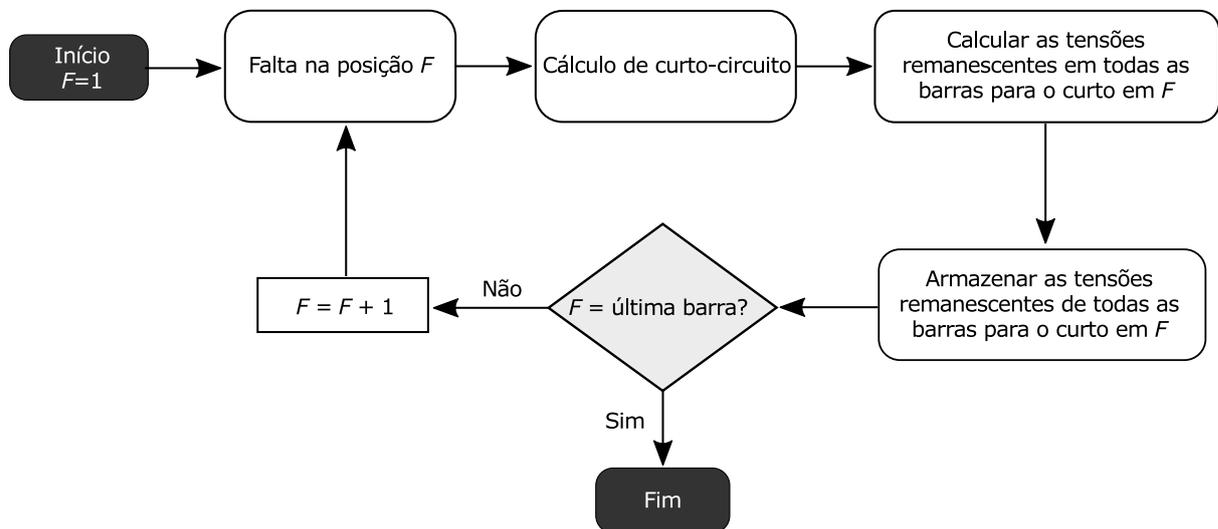
2.3 Método de Posição de Falta

O Método de Posição de Falta (CONRAD; LITTLE; GRIGG, 1991) foi proposto para o cálculo de afundamentos de tensão em sistemas de transmissão de grande porte. Este método consiste na simulação de um curto-circuito em cada uma das barras do

sistema (uma por vez), seguido do cálculo das tensões remanescentes em todas as demais barras. Desta forma, é possível determinar os afundamentos de tensão em todo o sistema elétrico sob análise, para qualquer situação de falta em um nó (ou barra) do sistema.

A Figura 1 ilustra o fluxograma do algoritmo do método das posições de falta, conforme o qual, a cada posição de falta F (geralmente uma barra do sistema) é simulada uma situação de curto-circuito e as tensões em todas as outras barras do sistema são calculadas e armazenadas. O algoritmo é executado até que todas as posições das faltas sejam contempladas, ou seja, até que tenha sido realizado o cálculo do curto-circuito em todas as barras desejadas.

Figura 1 – Fluxograma do algoritmo do método das posições de falta.

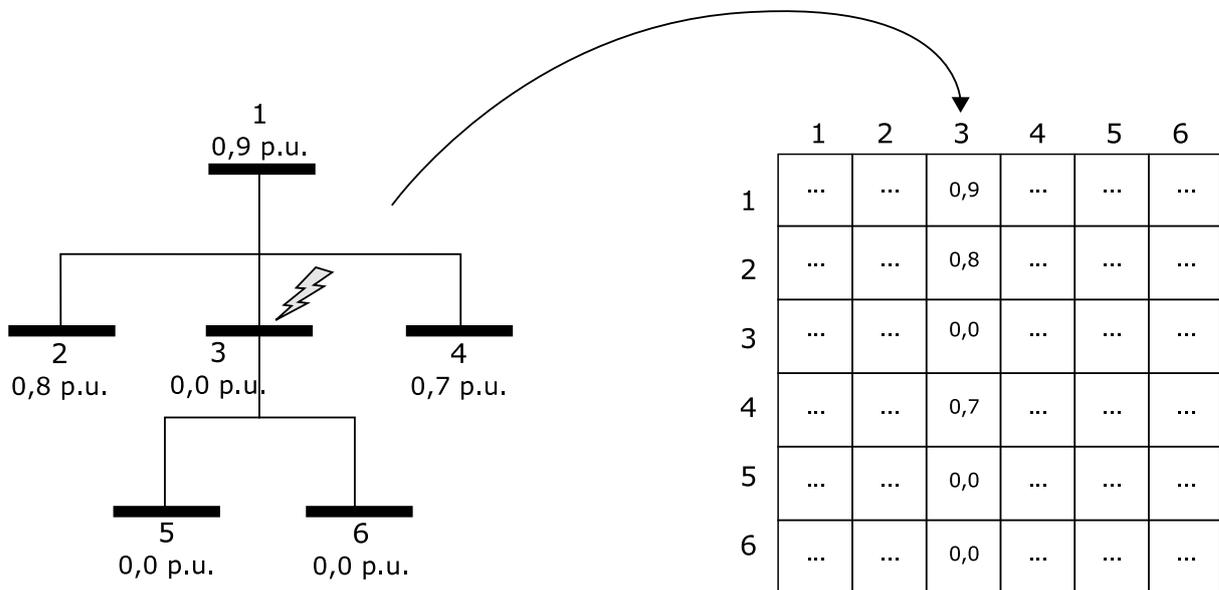


De posse das tensões remanescentes, é construída a Matriz de Tensões Durante a Falta (MTDF), na qual as colunas possibilitam determinar as áreas afetadas¹ pelas faltas aplicadas em cada uma das barras e as linhas possibilitam determinar a área de vulnerabilidade² de cada barra. A Figura 2 apresenta um exemplo de construção da MTDF para um sistema elétrico fictício de 6 barras. No exemplo, uma falta foi aplicada na barra de número 3 e as tensões remanescentes foram copiadas para a terceira coluna da matriz, o que ilustra a área afetada pela barra. Do exposto, percebe-se que a ocorrência de uma falta na barra 3 implica em afundamento de tensão nas barras 2, 3, 4, 5 e 6.

¹ A área afetada por uma barra k de um sistema elétrico de potência qualquer, é dada por toda a região em que, caso ocorra uma falta na barra k , ocorrerá afundamento de tensão com intensidade suficiente para afetar a operação dos equipamentos conectados ao sistema (OLGUIN; BOLLEN, 2003).

² A área de vulnerabilidade de uma barra k é dada por toda a região em que, caso ocorra uma falta, acarretará em um afundamento de tensão na barra k com intensidade suficiente para afetar a operação de equipamentos conectados a mesma (OLGUIN; BOLLEN, 2003).

Figura 2 – Exemplo de aplicação do método das posições de falta para construção da MTDF de um sistema elétrico fictício de 6 barras.



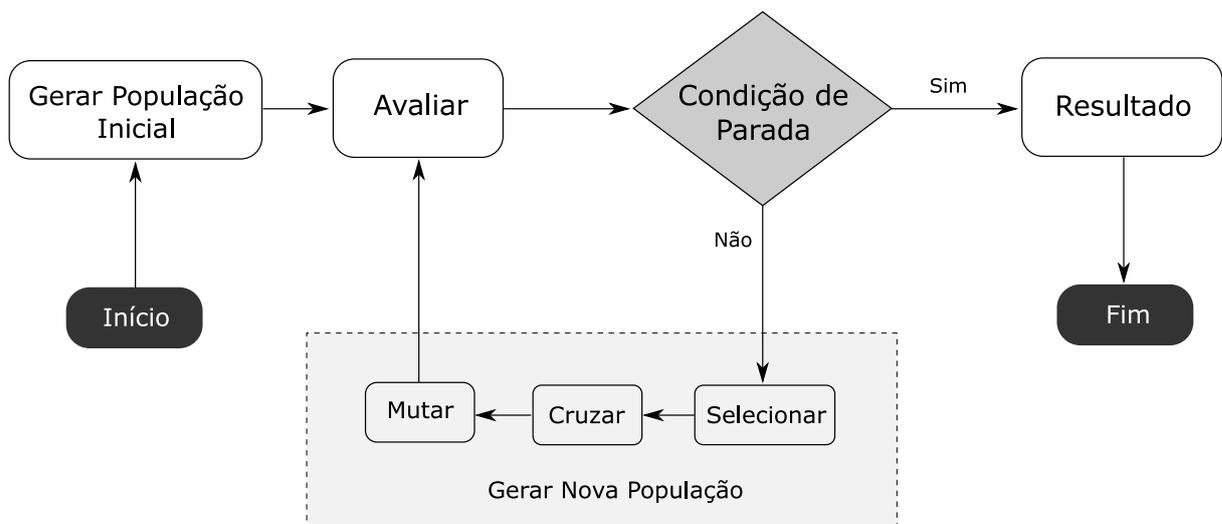
2.4 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AG) são uma classe de algoritmos da Computação Evolucionária que são inspirados nos mecanismos de seleção natural e genética para resolver problemas por meio do emprego de estratégias de busca paralela, estruturada e randômica (GOLDBERG, 1989). Um AG convencional pode ter o seu funcionamento explicado por meio das etapas ilustradas na Figura 3 e descritas a seguir:

1. *Gerar a População inicial*: Conjunto inicial de soluções que podem ser geradas aleatoriamente ou baseadas no conhecimento de um especialista;
2. *Avaliar*: Cada solução é submetida a uma função de avaliação (*fitness*) de modo a associar a qualidade do indivíduo;
3. *Condição de Parada*: Algum critério de parada é avaliado para determinar se o algoritmo deve ser encerrado ou se uma nova população deve ser gerada. Comumente são usados como critérios: a verificação do número máximo de iterações, a detecção de estagnação do processo de evolução, a qualidade das soluções já obtidas, entre outras;
4. *Seleção*: Escolha dos indivíduos baseados no *fitness*, sendo que os mais aptos possuem maiores chances de serem selecionados;
5. *Cruzamento*: Recombinação das soluções selecionadas visando a criação de novos indivíduos que possuam características dos pais;

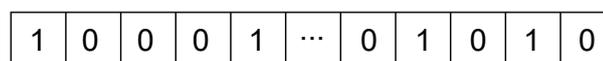
6. *Mutação*: Realização de pequenas alterações nos novos indivíduos objetivando introduzir/manter a diversidade no intuito de reduzir a chance de estagnação do processo de otimização;
7. *Resultado*: Ao final, os melhores indivíduos são retornados como solução para o problema.

Figura 3 – Etapas do funcionamento de um AG convencional.



A modelagem da solução geralmente é realizada por meio da representação de um indivíduo. Cada indivíduo possui um código genético chamado de cromossomo, normalmente o cromossomo de um indivíduo é representado por meio de um vetor de *bits*, conforme ilustrado na [Figura 4](#).

Figura 4 – Ilustração da representação de um cromossomo.



A população de um AG é um conjunto de indivíduos selecionados durante cada iteração do algoritmo. O tamanho da população pode influenciar diretamente no desempenho de um AG. Populações muito pequenas não são capazes de garantir a diversidade de soluções necessárias para o bom desempenho do processo de otimização, devido a uma baixa exploração do espaço de busca. Já uma população muito grande, pode levar a uma degradação da performance do AG pela quantidade de indivíduos a serem avaliados em cada geração e pelos recursos computacionais despendidos.

2.5 Otimização Evolutiva Multiobjetivo

Problemas práticos do mundo real exigem tomadas de decisões que envolvem a análise simultânea de vários critérios concorrentes. Em determinadas situações podem existir várias soluções que atendam aos critérios analisados sem, contudo, ser possível afirmar qual é a melhor em comparação às demais. Sendo assim, quando o processo de escolha envolve critérios concorrentes, a priorização de um critério pode acarretar prejuízo em relação aos demais critérios e a tomada de decisão deve envolver a análise do custo/benefício relativo à escolha de uma solução. Esses tipos de problemas são denominados como Problemas de Otimização Multiobjetivos (POM).

Um POM envolve um número de funções objetivos que devem ser maximizadas ou minimizadas visando buscar um conjunto de soluções ótimas para o problema estudado. Conforme o autor em [Deb \(2001\)](#), as soluções ótimas de um POM podem ser definidas por meio do conceito de dominância, apresentado a seguir:

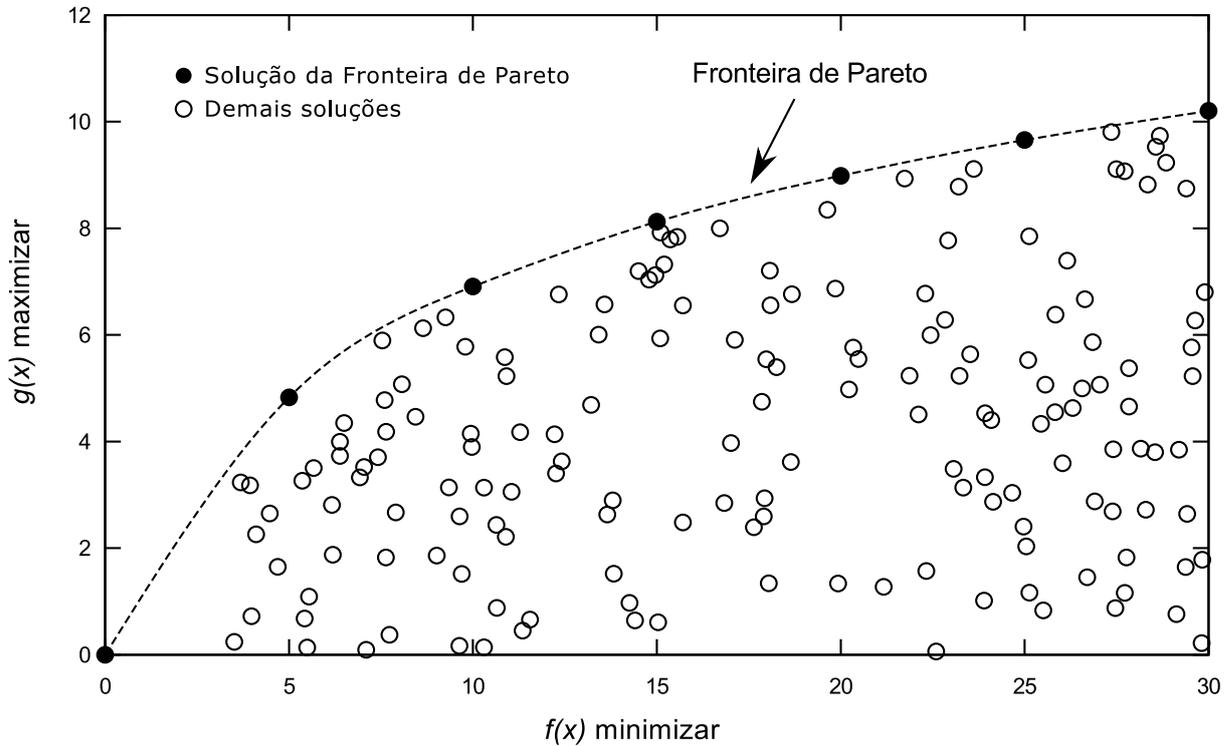
Definição 1 *Uma solução x_1 é dita dominante de outra solução x_2 se ambas as seguintes condições forem satisfeitas:*

1. *A solução x_1 não é pior que x_2 em todos os objetivos;*
2. *A solução x_1 é melhor do que x_2 em pelo menos um objetivo.*

Seguindo a definição apresentada, uma solução será ordenada conforme sua dominância em relação as demais para formar a fronteira de não dominância ou Fronteira de Pareto (FP) ([MIETTINEN, 2012](#); [KUNG](#); [LUCCIO](#); [PREPARATA, 1975](#)). Para exemplificar, considere um problema multiobjetivo qualquer com duas funções objetivos definidas: $f(x)$ e $g(x)$, onde deseja-se minimizar a primeira e maximizar a segunda. A FP desse problema pode ser visualizada na [Figura 5](#), em que as soluções pertencentes à fronteira estão representadas em vermelho.

Existem na literatura vários métodos para encontrar as soluções pertencentes à FP de um POM, tais como: Otimização por Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization*), Procedimento Aleatório Adaptativo Guloso (*Greedy Randomized Adaptative Procedure - GRASP*) ([FEO](#); [RESENDE, 1989](#)), Algoritmos Meméticos (*Memetic Algorithms*) ([MOSCATO, 1989](#)), Busca Tabu (*Tabu Search*) ([GLOVER, 1989](#)), Busca por Dispersão (*Scatter Search*) ([GLOVER, 1977](#)), Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*) ([KIRKPATRICK](#); [VECCHI, 1983](#)), Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization*) ([EBERHART](#); [KENNEDY, 1995](#)), Busca de Vizinhança Variável (*Variable Neighbourhood Search - VNS*) ([MLADENOVIĆ](#); [HANSEN, 1997](#)) e Algoritmos Genéticos (*Genetics Algorithms*) ([GOLDBERG, 1989](#)).

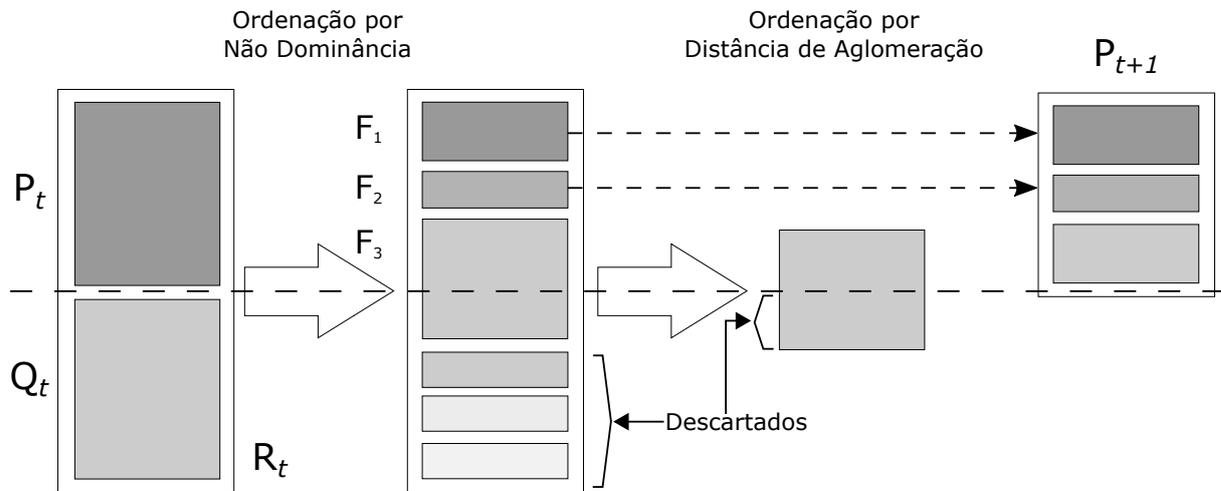
Figura 5 – Fronteira de Pareto para um problema com dois objetivos.



Dentre todas as técnicas desenvolvidas, um dos algoritmos que se destaca é o Algoritmo Genético de Ordenação Não Dominante II (*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II*). A ideia básica do NSGA-II é encontrar um conjunto de indivíduos não dominados em relação ao restante da população e apontar este conjunto como o de nível de dominância mais alto. Em seguida repetir o mesmo procedimento com o restante da população, separando-a em vários níveis de não dominância. O NSGA-II também introduz o conceito de distância de aglomeração (*crowding distance*), objetivando favorecer as soluções que sejam mais bem distribuídas ao longo da FP, preservando a diversidade das soluções e evitando uma possível convergência prematura para um ótimo local. A [Figura 6](#) ilustra o procedimento básico do NSGA-II, que será explanado a seguir.

O primeiro passo do NSGA-II é a inicialização de uma população inicial ($P_{t=0}$), aleatória com tamanho N_{pop} . Em seguida, aplica-se os operadores de seleção, cruzamento e mutação para gerar uma população filha ($Q_{t=0}$), também de tamanho N_{pop} . Uma população auxiliar ($R_{t=0}$), com tamanho $2N_{pop}$, é formada com a junção das duas populações. A população auxiliar é então ordenada por níveis de dominância e, em seguida, os indivíduos da fronteira de cada nível são inseridos seguindo uma ordem crescente dos níveis na nova população P_{t+1} até que esta atinja o tamanho N_{pop} . Caso a fronteira do último nível a ser inserido tenha mais indivíduos que o necessário para completar a nova população de tamanho N_{pop} , realiza-se a ordenação dos indivíduos desse nível por distância de

Figura 6 – Procedimento de seleção do NSGA-II.



Fonte: Adaptado de (DEB et al., 2002)

aglomeração. Somente os melhores indivíduos deste último nível, suficientes para completar o tamanho da nova população, serão inseridos. O restante dos indivíduos do último nível será descartado juntamente com o restante dos indivíduos que não foram inseridos na nova população. Sobre a nova população P_{t+1} é feita a seleção, cruzamento e mutação para que esta dê origem a sua prole, Q_{t+1} . O processo continua até que sejam atingidas as condições de parada. Ao final do algoritmo, os indivíduos do primeiro nível de dominância representam as soluções do problema.

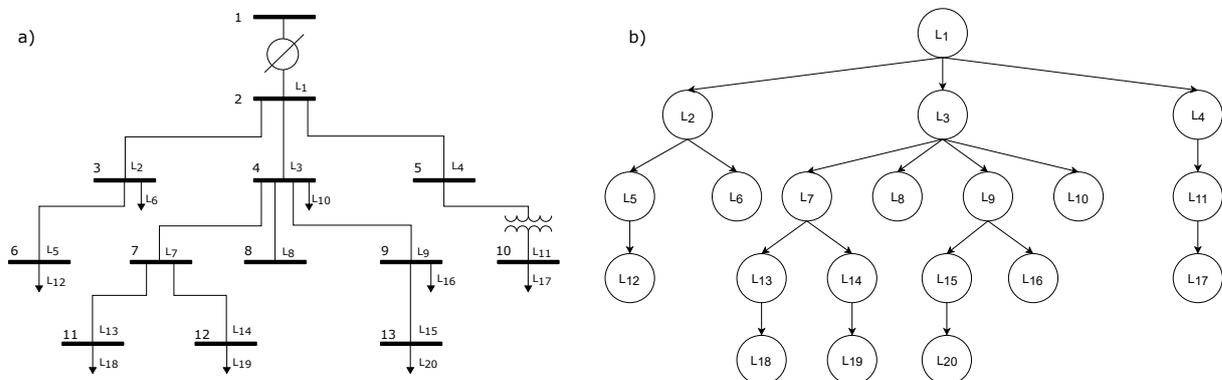
3 Abordagem Proposta

Este capítulo apresenta a abordagem proposta para a alocação otimizada de monitores de QEE em sistemas de distribuição. Todas as etapas da abordagem são detalhadas, iniciando pela representação computacional adotada para os SDs na [seção 3.1](#). Logo após, são definidos os aspectos considerados na cobertura topológica e de afundamentos na [seção 3.2](#) e [seção 3.3](#), respectivamente. A formulação do problema de otimização multiobjetivo é definida na [seção 3.4](#). Por fim, o fluxograma completo da abordagem proposta é apresentado na [seção 3.5](#).

3.1 Representação Computacional do Sistema de Distribuição

A resolução de um POM por meio do algoritmo NSGA-II necessita, primeiramente, da definição de uma estrutura adequada para a representação computacional do problema. Nesta abordagem a estrutura de dados de árvore ([HOPCROFT, 1983](#)) foi escolhida para a representação do SD. Essa escolha foi baseada na equivalência existente entre um SD e a estrutura de árvore, como pode ser verificado na [Figura 7](#). Para exemplificar, pode-se estabelecer as seguintes relações: as barras de um sistema podem ser associadas aos nós de uma árvore, as ligações entre as barras podem ser vistas como as arestas que conectam os nós e a presença de hierarquia entre os diversos níveis do sistema é a característica primordial de uma árvore. A eficiência apresentada por essa estrutura na representação de um SD já foi explorada por outros autores em trabalhos existentes na literatura como o visto em ([WON; MOON, 2008](#)).

Figura 7 – Comparação entre a representação unifilar do sistema de teste do IEEE de 13 barras (a) e a sua representação na estrutura de árvore (b).



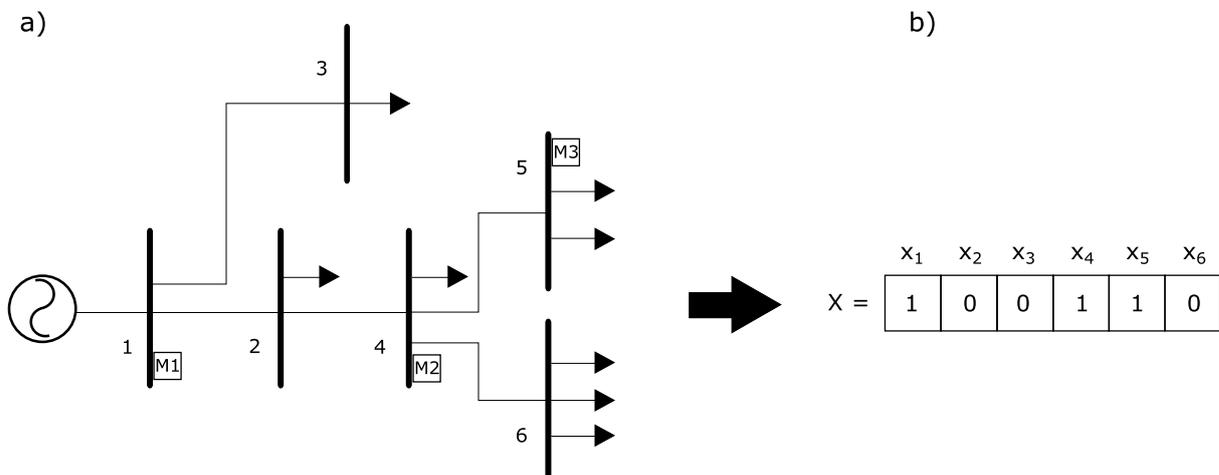
Outra representação necessária ao se trabalhar com Algoritmos Genéticos é a de uma solução. Nesta abordagem, as barras são consideradas como ponto de instalação dos

monitores de QEE. Assim, a indicação se uma determinada barra b_i é monitorada ou não é realizada por meio do vetor de alocação (X), que possui um elemento para cada barra existente no SD. Portanto, o vetor de alocação possui tamanho igual ao número de barras do sistema de distribuição. Os valores possíveis para o vetor de alocação foram definidos como sendo 0 (zero) ou 1 (um), no qual o primeiro representa a ausência de um monitor na barra correspondente e o segundo representa a situação contrária, conforme a [Equação 3.1](#).

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{se existe um monitor instalado na barra } b_i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.1)$$

Computacionalmente, essa expressão pode ser vista como um vetor de elementos binários representando um cromossomo. Para facilitar o entendimento da [Equação 3.1](#), considere o sistema de distribuição fictício com seis barras ilustrado na [Figura 8 \(a\)](#). Nessa figura, os monitores são representados pelos quadrados e foram alocados nas barras de número 1, 4 e 5. O vetor de alocação $X = [1, 0, 0, 1, 1, 0]$, para este exemplo, é apresentado na [Figura 8 \(b\)](#).

Figura 8 – Exemplo da representação de um esquema de alocação de monitores de QEE em um sistema de distribuição fictício com seis barras (a) e o cromossomo ou vetor de alocação X correspondente (b).



3.2 Aspectos Relacionados à Cobertura Topológica

Tradicionalmente a escolha dos melhores pontos para o monitoramento da QEE em um SD é realizada com base no conhecimento especialista adquirido pelos engenheiros (profissionais e pesquisadores) ao longo de anos de prática, considerando: a topologia do sistema, a forma como o evento de interesse se manifesta e a forma como este se propaga no sistema ([BRANCO et al., 2015](#)).

Ao se desenvolver uma abordagem de alocação não supervisionada, o conhecimento especialista deve ser traduzido em regras que permitam a realização de uma análise quantitativa. Assim, algumas regras podem ser usadas para auxiliar a definição dos pontos de instalação dos monitores no sistema, conforme apresentado a seguir, extraídas de [Won et al. \(2006\)](#):

Regra 1: Se existem n linhas conectadas a uma barra, então existem n pontos possíveis de instalação para os monitores. Porém, somente é necessário conhecer as correntes de $(n-1)$ destas linhas, já que a corrente de uma das linhas pode ser computada conhecendo-se todas as outras (Lei de Kirchhoff das Correntes - LKC ([NILSSON, 2008](#))). A situação em que não se consegue determinar todas as correntes nas linhas conectadas a um determinado nó é conhecida como ambiguidade topológica.

Regra 2: É preponderante instalar monitores nas derivações das cargas, uma vez que a maioria dos prejuízos causados pelos problemas de QEE aparece nas cargas dos consumidores, tornando esses locais importantes pontos de monitoramento.

Regra 3: Os monitores devem ser instalados em ramais com muitos descendentes, o que possibilita monitorar uma área maior. Com base nesta regra, os monitores tendem a ser instalados em pontos próximos a fonte de energia.

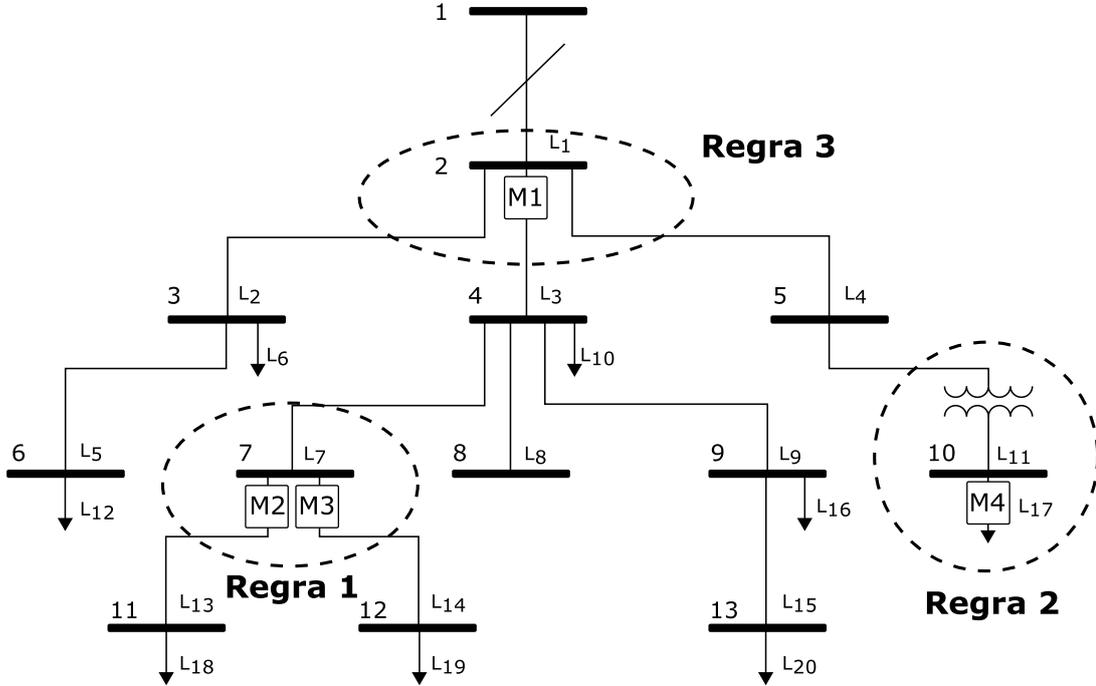
A aplicação prática dessas três regras pode ser visualizada na [Figura 9](#), na qual é possível constatar que a alocação dos monitores M2 e M3 obedecem a *Regra 1*, pois, das três linhas conectadas à Barra 7, duas possuem monitores instalados, podendo a corrente da terceira linha ser auferida por meio da aplicação da LKC. A *Regra 2* pode ser observada na alocação do monitor M4, onde o equipamento foi instalado em uma derivação de carga. E a *Regra 3* pode ser verificada na alocação do monitor M1, na qual o equipamento foi instalado no local do sistema onde existe o maior número de descendentes.

3.3 Aspectos Relacionados à Cobertura dos Afundamentos de Tensão

O cálculo de afundamentos de tensão, empregado nesta abordagem, utiliza como base o Método de Posição de Falta apresentado na Subseção 2.3. O MPF foi aplicado para cada um dos tipos de falta: monofásicas, bifásicas (FF e FFT) e trifásicas (FFF e FFFT), com a finalidade de garantir a observabilidade total dos eventos ocorridos no SD. Desta forma, existe uma MTDF correspondente para cada tipo de falta considerada.

A MTDF deve ser transposta para que a alocação seja realizada observando-se área de vulnerabilidade do sistema. Em seguida, um limiar (e) deve ser definido para a construção da Matriz de Cobertura (MC_e), que possui as mesmas dimensões da MTDF e indica em quais pontos do SD ocorrem afundamentos de tensão para o limiar definido.

Figura 9 – Exemplo de aplicação prática das regras apresentadas no SD de 13 barras do IEEE. As regiões em destaque evidenciam a aplicação de cada uma das regras definidas.



A construção da MC_e é realizada atribuindo-se o valor 1 às posições correspondentes a valores abaixo do limiar e o valor 0 às posições com valores iguais ou acima do limiar, conforme Equação 3.2:

$$mc_{e_{ij}} = \begin{cases} 1, & \text{se } mtdf_{ij}^T < e \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.2)$$

sendo que $mtdf_{ij}^T$ é o elemento i da $MTDF^T$ e e é o limiar para indicar abaixo de qual valor da magnitude de tensão o monitor de qualidade de energia deve passar a registrar as ocorrências.

Para determinar o número de afundamentos de tensão cobertos por um conjunto de monitores, basta realizar o produto interno entre a MC_e e o vetor de alocação (X), conforme Equação 3.3, o que irá resultar no vetor de observabilidade (V), no qual as posições com valores maiores que zero representam as quantidades de afundamentos de tensão detectados pelos monitores alocados, considerando o limiar estabelecido.

$$V = MC_e \cdot X \quad (3.3)$$

Contudo, é importante ressaltar que nem todas as posições do vetor V com valor igual a zero implicam, necessariamente, em afundamentos de tensão não monitorados. Um

elemento v_i pode ser igual a zero porque todos os elementos de uma linha da matriz MC_e são iguais a zero também, o que resulta de não haver afundamentos de tensão naquela linha da matriz MC_e com valores abaixo do limiar estabelecido. Portanto, é fundamental garantir que esta situação não influencie na determinação da quantidade de afundamentos de tensão que não são percebidos por um arranjo de monitores. Esta garantia pode ser obtida pela multiplicação da matriz MC_e por um vetor que possua todas as posições iguais a 1, como mostra a [Equação 3.4](#). O resultado possibilita afirmar que se alguma posição do vetor de vulnerabilidade (\bar{V}) for igual a zero é devido ao fato desta linha da matriz MC_e ter todos os elementos iguais a zero, indicando que nenhuma barra sofre afundamento de tensão (considerando o limiar de estudo) quando um curto-circuito for realizado na barra de igual posição do vetor \bar{V} .

$$\bar{V} = MC_e \cdot 1 \quad (3.4)$$

Dispondo dos vetores V e \bar{V} , o número de barras do SD nas quais os afundamentos de tensão podem ser monitorados, considerando o cenário de localização fornecido por X , é dado pela [Equação 3.5](#), formando o vetor de afundamentos não monitorados (U):

$$u_i = \begin{cases} 1, & \text{se } v_i = 0 \text{ e } \bar{v}_i > 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.5)$$

na qual as posições com valor igual a 1 indicam as barras em que ocorrem afundamentos de tensão que não serão observados por nenhum monitor instalado. Esse procedimento deve ser realizado para cada tipo de falta considerado, resultando em um número igual de vetores de afundamentos não monitorados (U^{MonA} , U^{MonB} , U^{MonC} , U^{BiFFAB} , U^{BiFFAC} , U^{BiFFBC} , $U^{BiFFTAB}$, $U^{BiFFTAC}$, $U^{BiFFTBC}$, U^{TriFFF} e $U^{TriFFFT}$).

Caso fosse considerada apenas uma MTDF, obtida por meio de agregações das demais, tais como as realizadas em ([CARNEIRO et al., 2016](#)), alguns eventos podem deixar de serem monitorados devido ao perfil médio das tensões ser maior do que os dos afundamentos mais severos. Por outro lado, caso fosse considerada apenas a MTDF do caso mais severo, como em ([KEMPNER, 2016](#)), a quantidade de monitores necessários pode ser sobredimensionada. Desta forma, a utilização de um vetor para cada tipo de falta é fundamental para garantir a cobertura total dos eventos ocorridos com a menor quantidade de equipamentos possível.

A fim de ilustrar o processo explicado anteriormente, considere o exemplo da [Figura 10](#) em que um sistema fictício de três barras foi utilizado. A [Figura 10 a\)](#) apresenta a multiplicação da MC pelo vetor X resultando no vetor de observabilidade V , conforme a [Equação 3.3](#). Em seguida na [Figura 10 b\)](#) a mesma MC é multiplicada por um vetor com todas as posições iguais a 1 resultando no vetor de vulnerabilidade \bar{V} , conforme a

Equação 3.4. Por fim, na Figura 10 c) o vetor de afundamentos não monitorados (para um determinado tipo de falta), U , é obtido pela aplicação da Equação 3.5 sobre os vetores V e \bar{V} .

Figura 10 – Exemplo de obtenção do vetor de afundamentos não monitorados U .

$$\begin{array}{l}
 \text{a) } \begin{array}{c} \overbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}^{MC} \cdot \begin{array}{c} \overbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}}^X \\ \\ \end{array} = \begin{array}{c} \overbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{bmatrix}}^V \end{array} \\
 \text{b) } \begin{array}{c} \overbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}^{MC} \cdot \begin{array}{c} \overbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}}^1 \\ \\ \end{array} = \begin{array}{c} \overbrace{\begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix}}^{\bar{V}} \end{array} \\
 \text{c) } \begin{array}{c} \overbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{bmatrix}}^V \\ \\ \end{array} \quad \begin{array}{c} \overbrace{\begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix}}^{\bar{V}} \\ \\ \end{array} = \begin{array}{c} \overbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}}^U \end{array}
 \end{array}$$

Da Figura 10, percebe-se que foram alocados dois monitores, um na primeira e outro na segunda barra, conforme representado pelo vetor de alocação X . Analisando as colunas da MC verifica-se que um monitor instalado na primeira barra do sistema é capaz de perceber eventos ocorridos nas duas primeiras barras. Já um monitor instalado na segunda barra percebe apenas os eventos ocorridos na própria barra de instalação. Por fim, caso o ponto de instalação seja na terceira barra, todo o sistema será monitorado.

Os valores 1, 2 e 0 do vetor de observabilidade V indicam o número de equipamentos sensibilizados durante a ocorrência de uma falta na primeira, segunda e terceira barra, respectivamente. E os valores 2, 3 e 1 do vetor de vulnerabilidade \bar{V} indicam o número de afundamentos causados em decorrência de uma falta na primeira, segunda e terceira barra, respectivamente. A análise conjunta dos vetores V e \bar{V} possibilita a identificação das barras em que acontecem afundamentos e não existem monitores capazes de registrar esses eventos. Assim, a terceira linha do vetor \bar{V} indica que durante uma falta na terceira barra, um afundamento ocorre no sistema, porém o valor da mesma linha no vetor V é igual a zero, indicando que nenhum equipamento foi sensibilizado, ficando claro que o afundamento ocorrido não foi percebido pelo esquema de alocação (dado pelo vetor X), conforme indica o vetor de afundamentos não monitorados U .

3.4 Formulação do Problema de Otimização Multiobjetivo

A abordagem proposta tem como objetivo realizar a alocação de monitores de QEE visando minimizar o custo, maximizar a qualidade da cobertura topológica do sistema e minimizar o número de afundamentos de tensão não monitorados. Assim, para cada um dos três objetivos foi formulada uma função de avaliação conforme descrito a seguir.

3.4.1 Custo do Monitoramento

O custo da instalação dos monitores em cada um dos possíveis pontos de monitoramento é dado pelo vetor de custos P , conforme a [Equação 3.6](#) a seguir:

$$p_i = \text{custo de instalação do monitor na barra } i \quad (3.6)$$

Já o custo total do monitoramento do sistema é determinado pela multiplicação entre o vetor de alocação e o vetor de custos. Portanto, a primeira função objetivo pode ser expressa pela [Equação 3.7](#):

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot x_i \quad (3.7)$$

em que n é o número de barras do sistema.

3.4.2 Qualidade da Cobertura Topológica

Para a formulação desta função de avaliação, foi necessário estabelecer uma forma de mensurar cada uma das regras apresentadas na [seção 3.2](#). Assim, para a *Regra 1* tem-se que uma barra b_i é dita ambígua se não for possível determinar as correntes de todas as linhas a ela conectadas, conforme a [Equação 3.8](#):

$$a_i = \begin{cases} 0, & \text{se } b_i \text{ pode ter sua corrente determinada} \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.8)$$

Desta forma, a ambiguidade total de um SD com n barras, dado um arranjo de monitores X , é expressa por:

$$A(X) = \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i \quad (3.9)$$

Para a *Regra 2* temos que se a quantidade de carga existente em uma barra b_i é dada por l_i , o total de cargas monitoradas em um SD, dado um arranjo de monitores X , é expresso por:

$$L(X) = \sum_{i=1}^n l_i \cdot x_i \quad (3.10)$$

Neste modelo, considerou-se o somatório das potências das cargas conectadas nas três fases como a carga total conectada à barra b_i . As cargas distribuídas nas linhas foram consideradas como pertencentes às barras de origem da linha.

Por fim, a *Regra 3* é mensurada pela extensão da área que pode ser monitorada a partir de uma barra b_i , ou seja, pela quantidade de descendentes de uma barra b_i somada a própria barra, aqui denotada por d_i . Desta forma, a área total monitorada de um SD, dado um arranjo de monitores X , é expressa por:

$$D(X) = \sum_{i=1}^n d_i \cdot x_i \quad (3.11)$$

A função objetivo que avalia a qualidade da cobertura topológica de um SD, dado um arranjo de monitores X , é composta pela combinação da [Equação 3.9](#), [Equação 3.10](#) e [Equação 3.11](#) e seu valor foi normalizado no intervalo de 0 a 1, conforme a [Equação 3.12](#):

$$f_2(X) = \frac{L(X)}{L_{total}} * w_1 + \frac{D(X)}{D_{total}} * w_2 + \left(1 - \frac{A(X)}{n}\right) * w_3 \quad (3.12)$$

em que, L_{total} é o total de carga existente no SD, D_{total} é o total de descendentes do SD, n é o número de barras do SD e w_1 , w_2 e w_3 representam pesos, com $w_1 + w_2 + w_3 = 1$.

3.4.3 Número de Afundamentos Não Cobertos

Para a definição da terceira função objetivo ([Equação 3.13](#)), basta realizar o somatório dos elementos de todos os vetores U^i s, obtidos conforme descrito na [seção 3.3](#). Ou seja, a terceira função objetivo leva em conta os vetores de afundamentos não monitorados para cada tipo de falta considerado, $TF = (U^{MonA}, U^{MonB}, U^{MonC}, U^{BiFFAB}, U^{BiFFAC}, U^{BiFFBC}, U^{BiFFTAB}, U^{BiFFTAC}, U^{BiFFTBC}, U^{TriFFF}, U^{TriFFFT})$.

$$f_3(x) = \sum_{i \in TF} \sum_{j=1}^n u_{ij} \quad (3.13)$$

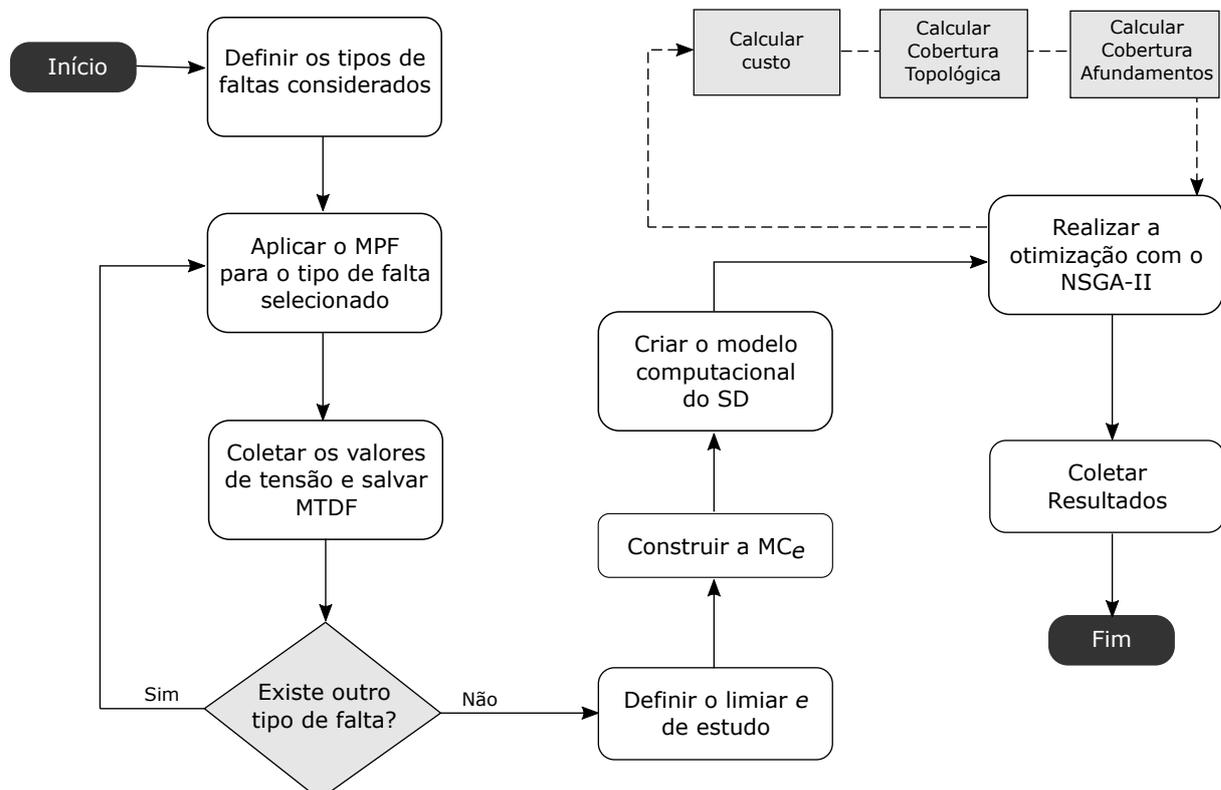
Logo, a função objetivo do POM é definida pela [Equação 3.14](#).

$$\begin{aligned} & \text{minimize } (f_1(x)) \\ & \text{maximize } (f_2(x)) \\ & \text{minimize } (f_3(x)) \end{aligned} \quad (3.14)$$

3.5 Fluxograma da Abordagem Proposta

A [Figura 11](#) ilustra o funcionamento de toda abordagem. Inicialmente os tipos de faltas que serão considerados no estudo devem ser definidos. Para cada tipo de falta o MPF é aplicado. Os valores de tensão remanescentes são coletados e ao final da iteração existirá uma MTDf para cada tipo de falta estudada. Na sequência o limiar e é definido e a MC_e é construída. O módulo de otimização, constituído pelo NSGA-II, recebe como entrada a MC_e gerada e o Modelo Computacional do SD, conforme descrito na [seção 3.1](#), de modo a obter as soluções pertencentes à Fronteira de Pareto, que são retornadas para o usuário ao final da execução. De posse das soluções da Fronteira de Pareto, a concessionária pode adotar uma estratégia de monitoramento que leva em conta o número de afundamentos não cobertos, o custo total do monitoramento, a ambiguidade topológica, o total de cargas monitoradas e a extensão da área de monitoramento.

Figura 11 – Fluxograma do funcionamento da abordagem proposta.



4 Sistemas Elétricos Utilizados

Os sistemas de distribuição de teste de 13, 34 e 37 barras do IEEE ([KERSTING, 1991](#)) foram utilizados nos experimentos realizados com a abordagem proposta. A modelagem dos sistemas foi realizada no software de simulação *DIg SILENT Power Factory 15.1* objetivando a realização dos ensaios de curtos-circuitos e posteriormente a obtenção da MTFD. Importa ressaltar, que para todos os sistemas modelados a potência informada de cada carga é o somatório das potências em todas as fases. A descrição sucinta de cada um dos sistemas é dada nas seções seguintes.

4.1 Circuito alimentador IEEE de 13 barras

O circuito alimentador IEEE de 13 barras ([KERSTING, 1991](#)) utilizado neste trabalho pode ser visualizado por meio do seu diagrama unifilar na [Figura 12](#). Apesar deste alimentador ser pequeno, apresenta algumas características interessantes para o propósito, como:

- É um alimentador curto que opera com tensão nominal de 4,16 kV bastante carregado;
- Possui linhas aéreas e subterrâneas;
- Cargas modeladas como concentradas e como distribuídas; e
- As cargas são desequilibradas.

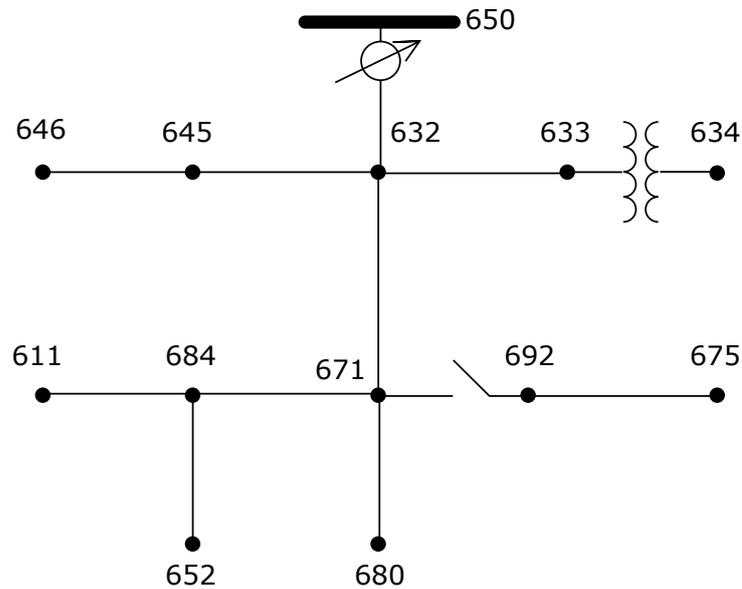
A [Tabela 1](#) apresenta as cargas conectadas às barras do circuito alimentador IEEE de 13 barras. Já a [Tabela 2](#) apresenta as cargas distribuídas ao longo dos trechos.

4.2 Circuito alimentador IEEE de 34 barras

O circuito alimentador IEEE de 34 barras, representado pelo seu diagrama unifilar na [Figura 13](#), é um alimentador real localizado no Arizona EUA ([KERSTING, 1991](#)), no qual é possível evidenciar as seguintes características:

- Opera com tensão nominal de 24,9 kV;
- É um sistema com linhas muito longas e é bastante carregado;
- Apresenta um transformador abaixador para um pequeno trecho que opera com tensão nominal de 4,16 kV;

Figura 12 – Representação unifilar do circuito alimentador IEEE de 13 barras.



Fonte: (KERSTING, 1991)

Tabela 1 – Cargas conectadas às barras do circuito alimentador IEEE de 13 barras.

Barra	Potência (kW)
634	400
645	170
646	230
652	128
671	1155
675	613
692	170
611	170
Total	3266

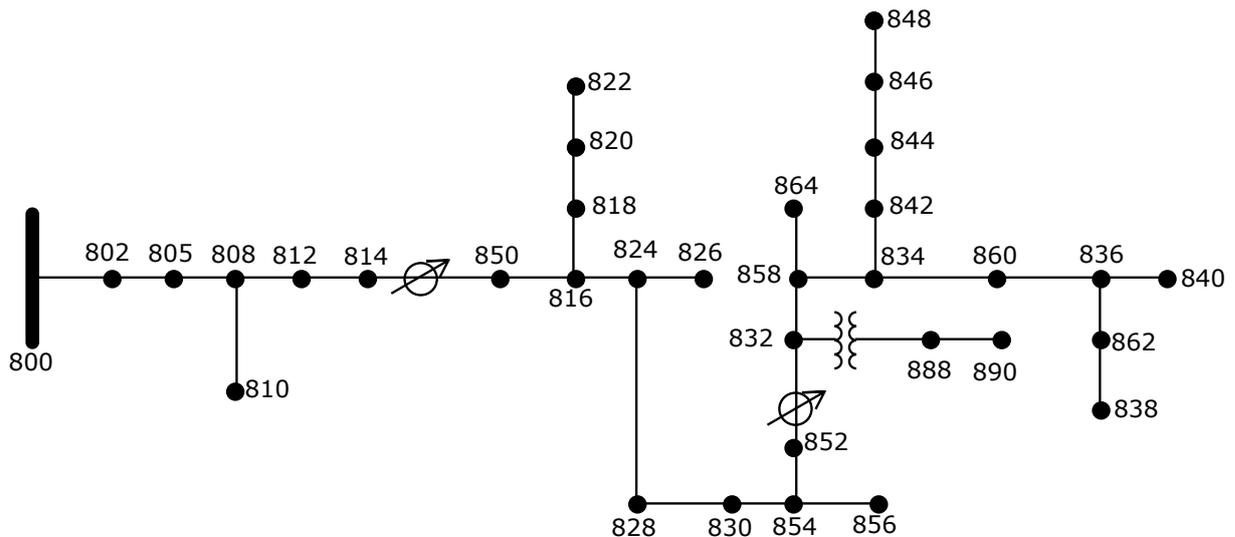
- O circuito apresenta poucas ramificações laterais;
- Cargas modeladas como concentradas e como distribuídas; e
- As cargas são desequilibradas.

A Tabela 3 apresenta as cargas conectadas às barras do circuito alimentador IEEE de 34 barras, enquanto a Tabela 4 discrimina as cargas modeladas com parâmetros distribuídos circuito alimentador.

Tabela 2 – Cargas modeladas com parâmetros distribuídos no circuito alimentador IEEE de 13 barras.

Barra Origem	Barra Destino	Potência (kW)
632	671	200
Total		200

Figura 13 – Representação unifilar do circuito alimentador IEEE de 34 barras.



Fonte: (KERSTING, 1991)

Tabela 3 – Cargas conectadas às barras do circuito alimentador IEEE de 34 barras.

Barra	Potência (kW)
860	60
840	27
844	405
848	60
890	450
830	45
Total	1047

4.3 Circuito alimentador IEEE de 37 barras

O circuito alimentador IEEE de 37 barras é um alimentador real localizado na Califórnia EUA (KERSTING, 1991), seu diagrama unifilar é apresentado na Figura 14. Algumas de suas características são:

- Opera com tensão nominal de 4,8 kV;

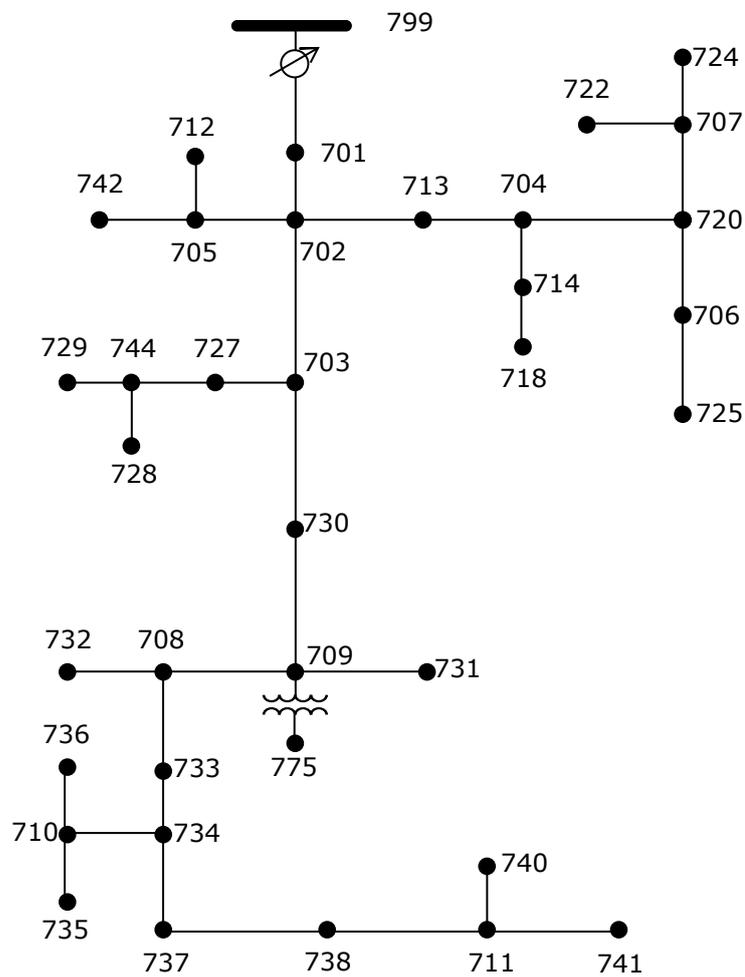
Tabela 4 – Cargas modeladas com parâmetros distribuídos no circuito alimentador IEEE de 34 barras.

Barra Origem	Barra Destino	Potência (kW)
802	806	55
808	810	16
818	820	34
820	822	135
816	824	5
824	826	40
824	828	4
828	830	7
854	856	4
832	858	15
858	864	2
858	834	32
834	860	146
860	836	82
836	840	40
862	838	28
842	844	9
844	846	45
846	848	23
Total		722

- Todas as linhas são subterrâneas;
- O circuito é relativamente ramificado; e
- As cargas são bastante desbalanceadas.

A [Tabela 5](#) apresenta as cargas conectadas às barras do circuito alimentador IEEE de 37 barras. Diferente dos demais sistemas, este não possui cargas distribuídas ao longo dos trechos.

Figura 14 – Representação unifilar do circuito alimentador IEEE de 37 barras.



Fonte: (KERSTING, 1991)

Tabela 5 – Cargas conectadas às barras do circuito alimentador IEEE de 37 barras.

Barra	Potência (kW)	Barra	Potência (kW)	Barra	Potência (kW)
701	630	727	42	736	42
712	85	728	126	737	140
713	85	729	42	738	126
714	38	730	85	740	85
718	85	731	85	741	42
720	85	732	42	742	93
722	161	733	85	744	42
724	42	734	42		
725	42	735	85		
Total					2457

5 Resultados

Para fins de validação, a abordagem proposta neste trabalho foi testada nos circuitos alimentadores apresentados na [Capítulo 4](#). Por motivo de simplificação, em todos os testes foi considerado que o custo de instalação dos monitores em qualquer barra é o mesmo e com valor unitário. Essa simplificação em nada prejudica a validação da abordagem e ainda facilita a identificação da quantidade de monitores necessários. O comportamento de cada SD, em face as ocorrências de faltas, foi simulado no software DigSILENT Power Factory 15.1. Em todas as simulações a impedância de falta considerada foi igual a 0 ohms (curto-circuito franco).

A [Figura 15](#) ilustra a MTDF do circuito alimentador IEEE de 13 barras, obtida por meio da aplicação do MPF considerando a ocorrência de faltas monofásicas na fase A. Cada elemento da MTDF é representado por um esquema gráfico associado a cores, através de uma escala de grau correspondente à intensidade das VTCDs manifestadas em p.u. A [Figura 16](#) representa a Matriz de Cobertura da MTDF da [Figura 15](#) considerando o limiar de tensão igual a 0,6 p.u., as áreas escuras representam as barras afetadas por afundamentos.

Foram utilizados valores iguais para os pesos w_1 , w_2 e w_3 da [Equação 3.12](#), no valor de 0,33. O algoritmo de otimização utilizado foi o NSGA-II ([DEB et al., 2002](#)) e os seus parâmetros foram ajustados conforme a [Tabela 6](#) por meio de experimentações.

Tabela 6 – Parâmetros utilizados no NSGA-II.

Parâmetro	Valor
Tamanho da população	500
Número máximo de iterações	500
Método de seleção	Torneio de 16
Método de <i>crossover</i>	<i>Single Point</i>
Probabilidade de <i>crossover</i>	85%
Método de mutação	<i>Bit Flip</i>
Probabilidade de mutação	1%

Nos experimentos foram realizados estudos de alocação considerando afundamentos menos severos, com limiar e igual a 0,9 p.u., e afundamentos mais severos, com limiar e igual a 0,6 p.u. Os resultados obtidos em cada SD são apresentados nas próximas seções.

5.1 Circuito alimentador IEEE de 13 barras

A [Tabela 7](#) contém algumas soluções extraídas ao final do estudo de alocação no circuito alimentador de 13 barras e a [Figura 17](#) o mapeamento das posições do cromossomo com as barras do SD. Ao analisar as soluções com o limiar e igual 0,9 p.u. é possível constatar que apenas um único monitor é suficiente para cobrir todos os afundamentos de tensão (solução n° 1), no entanto, a qualidade da cobertura topológica da solução com apenas um monitor é baixa (0,186). Isso deve-se ao fato de que a cobertura topológica é diretamente proporcional ao número de monitores alocados, assim soluções com um número menor de monitores levam a um menor custo, porém representam uma baixa qualidade de cobertura. A decisão de qual critério será priorizado passa pela disponibilidade financeira da concessionária e pelo grau de eficiência desejado, devendo essa solução de compromisso ser realizada pelo analista ao final do estudo.

Já para o limiar e igual a 0,6 p.u. a solução com apenas um monitor (solução n° 7) não é capaz de cobrir todos os afundamentos ocorridos, deixando quatro eventos sem monitoramento no SD, e ainda possui a pior qualidade topológica da amostra (0,186). Nesta configuração de limiar, o número mínimo de equipamentos necessário a cobertura de todos os afundamentos são dois (solução n° 8), apresentando um ganho de 52,15% na cobertura topológica da solução com um monitor.

Tabela 7 – Algumas soluções retornadas pela abordagem para os limiares de 0,9 e 0,6 p.u. no circuito alimentador do IEEE de 13 barras.

N°	Limiar	Solução	Custo	Afundamentos não monitorados	Cobertura Topológica
1	0,9 p.u.	0000100000000	1	0	0,186
2	0,9 p.u.	0101100000000	3	0	0,490
3	0,9 p.u.	0101100100000	4	0	0,629
4	0,9 p.u.	1101100100100	6	0	0,794
5	0,9 p.u.	1101100100110	7	0	0,869
6	0,9 p.u.	1101101110110	9	0	0,930
7	0,6 p.u.	0000100000000	1	4	0,186
8	0,6 p.u.	0001100000000	2	0	0,283
9	0,6 p.u.	0101100000000	3	0	0,490
10	0,6 p.u.	0101100100000	4	0	0,629
11	0,6 p.u.	1101100100100	6	0	0,794
12	0,6 p.u.	1101101110110	9	0	0,930

A [Figura 18](#) apresenta o local de instalação dos monitores da solução n° 8, juntamente com a área de abrangência de cada um deles de acordo com o tipo de falta considerado. Ao analisá-la é possível verificar o motivo pelo qual não se deve considerar apenas um tipo de falta no MPF. Tomando como exemplo a falta trifásica (caso mais

Figura 17 – Mapeamento das posições do cromossomo com as barras do SD.

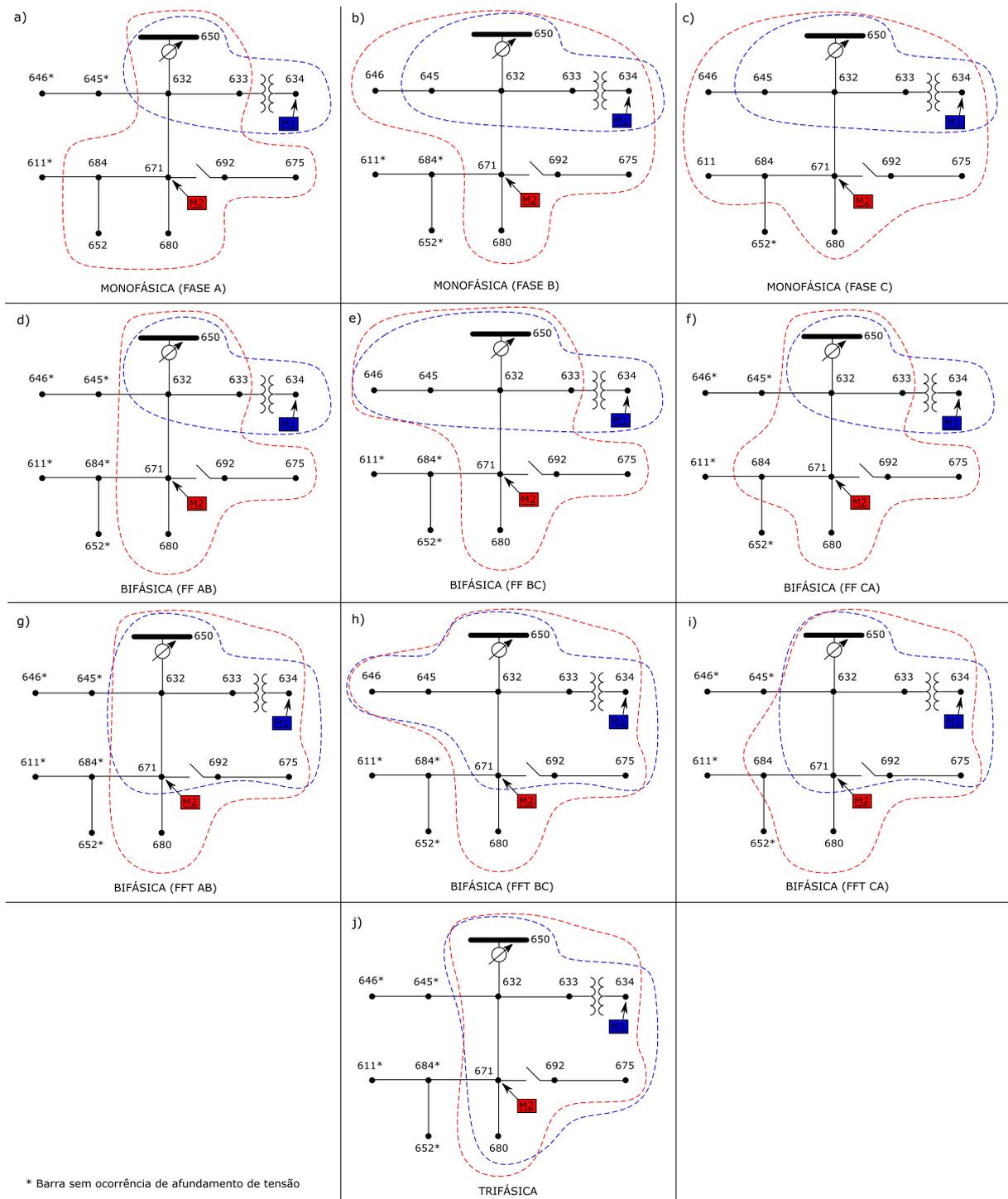
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
650	632	633	634	671	680	692	675	645	646	684	611	652

severo), ilustrada na [Figura 18 j](#)), ambos os monitores cobrem as mesmas barras do SD, o que poderia levar a falsa convicção de que a utilização de apenas um dos dois monitores seria suficiente para a cobertura total do sistema. No entanto, se apenas o monitor instalado na Barra 671 fosse considerado, as faltas ocorridas na Barra 634, para os casos: monofásica (fase A), bifásica (FF fase AB), bifásica (FF fase BC) e bifásica (FF fase CA) não seriam detectadas. No outro caso, considerando somente o monitor instalado na Barra 634, o monitoramento deixará de cobrir os afundamentos ocorridos conforme a [Tabela 8](#):

Tabela 8 – Barras vulneráveis a afundamentos de tensão quando um monitor é instalado na Barra 634.

Barras	Tipo de Falta
652, 671, 675, 680, 684 e 692	Monofásicas (fase A)
646, 671, 675, 680 e 692	Monofásicas (fase B)
611, 646, 671, 675, 680, 684 e 692	Monofásicas (fase C)
671, 675, 680 e 692	Bifásicas (FF fase AB e fase BC)
671, 675, 680, 684 e 692	Bifásicas (FF fase CA)
680	Bifásicas (FFT fase AB e fase BC)
680 e 684	Bifásicas (FFT fase CA)

Figura 18 – Localização e área de abrangência dos monitores presentes na solução de nº 8 para cada tipo de falta considerado.



5.2 Circuito alimentador IEEE de 34 barras

No circuito alimentador de 34 barras, para ambos os limiares considerados, apenas um monitor é suficiente para realizar a cobertura de todos os afundamentos. A [Tabela 9](#) apresenta algumas soluções para este circuito e a [Figura 20](#) o mapeamento das posições do cromossomo com as barras do SD.

Analisando a qualidade da cobertura topológica, percebe-se que à medida que o número de monitores aumenta, o ganho evidenciado vai reduzindo até chegar ao ponto em que o investimento necessário não justifica o benefício alcançado. Isso fica claro ao se comparar a taxa de aumento da cobertura topológica das soluções 1 e 2, onde o incremento de um monitor traz o ganho de aproximadamente 83,33%. Já nas soluções 5 e 8, com o incremento de 14 monitores esse ganho é de apenas 9,06%, esse mesmo comportamento é possível de ser observado quando o limiar e igual 0,6 p.u. Portanto, por meio da abordagem proposta é possível não só identificar um conjunto de soluções otimizadas para um monitoramento como também detectar a existência de zonas de saturação, facilitando a tomada de decisões e evitando o desperdício de recursos que não se traduzem em ganho real na qualidade do monitoramento.

Essa constatação fica mais clara ao analisar o gráfico da [Figura 19](#), onde é possível verificar três grupos de soluções. No primeiro encontram-se as soluções compostas de 0 a 9 monitores e possuem um ganho considerável na Qualidade da Cobertura Topológica. No segundo grupo, composto por soluções com 10 a 25 equipamentos, esse ganho fica menor em relação ao grupo anterior, porém ainda pode ser considerado. No terceiro e último grupo, com soluções acima de 25 monitores, o ganho envolvido já não é mais perceptível.

Figura 19 – Gráfico representando o custo do monitoramento pela qualidade da cobertura topológica no circuito alimentador IEEE de 34 barras, considerando o limiar de tensão igual a 0,9 p.u.

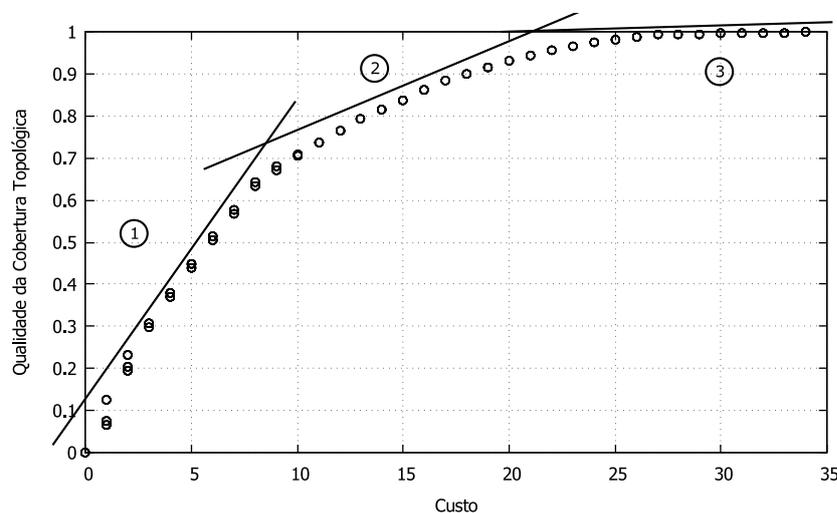


Figura 20 – Mapeamento das posições do cromossomo com as barras do SD.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
800	802	806	808	812	814	850	816	824	828
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
830	854	852	832	758	834	842	844	846	848
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
810	818	820	822	826	856	864	888	890	860
			31	32	33	34			
			836	840	862	838			

5.3 Circuito alimentador IEEE de 37 barras

No último circuito analisado, a cobertura total dos afundamentos de tensão é obtida com dois monitores para o limiar e de 0,9 p.u. e com quatro monitores para o limiar e de 0,6 p.u. A [Tabela 10](#) apresenta algumas soluções para este circuito e a [Figura 22](#) o mapeamento das posições do cromossomo com as barras do SD.

Ao analisar a [Tabela 10](#) é importante observar que soluções com o mesmo custo podem levar a situações completamente diferentes. Um caso possível pode ser visto nas soluções de nº 12, 13 e 14, em que todas possuem custo igual a dois, porém o número de afundamentos não monitorados varia de maneira substancial, saindo de 16 para a situação de ocorrência de 90 eventos não monitorados, sem apresentar ganhos consideráveis na qualidade da cobertura topológica.

Outro ponto importante são as soluções diferentes, mas que possuem os mesmos valores de afundamentos não monitorados e cobertura topológica, como nos casos das soluções de nº 18, 19 e 20, o que possibilita a concessionária selecionar soluções cuja logística seja mais viável para as equipes de instalação.

Nos dois casos analisados anteriormente, fica evidente a importância da localização dos equipamentos no SD para a correta resolução do problema. Ou seja, não basta apenas descobrir a quantidade mínima de monitores necessários, mas sim localizar os pontos exatos de instalação de cada monitor no sistema.

A [Figura 21](#) representa a Fronteira de Pareto retornada pelo algoritmo de otimização para o limiar de tensão de 0,9 p.u. A sua análise permite constatar que as soluções com menor custo estão situadas ao lado direito do gráfico, na parte de cima estão as soluções com melhor cobertura de afundamentos e as com melhor cobertura topológica possuem cor

mais próxima ao amarelo. É possível ainda realizar uma análise em conjunto dos objetivos, por exemplo, as soluções com menor custo e melhor cobertura de afundamentos estão no canto superior direito e que não existe solução que consiga ter um baixo custo com uma alta cobertura topológica, o que já era esperado pela formulação do problema.

Figura 21 – Fronteira de Pareto obtida para o limiar de 0,9 p.u. no circuito alimentador IEEE de 37 barras.

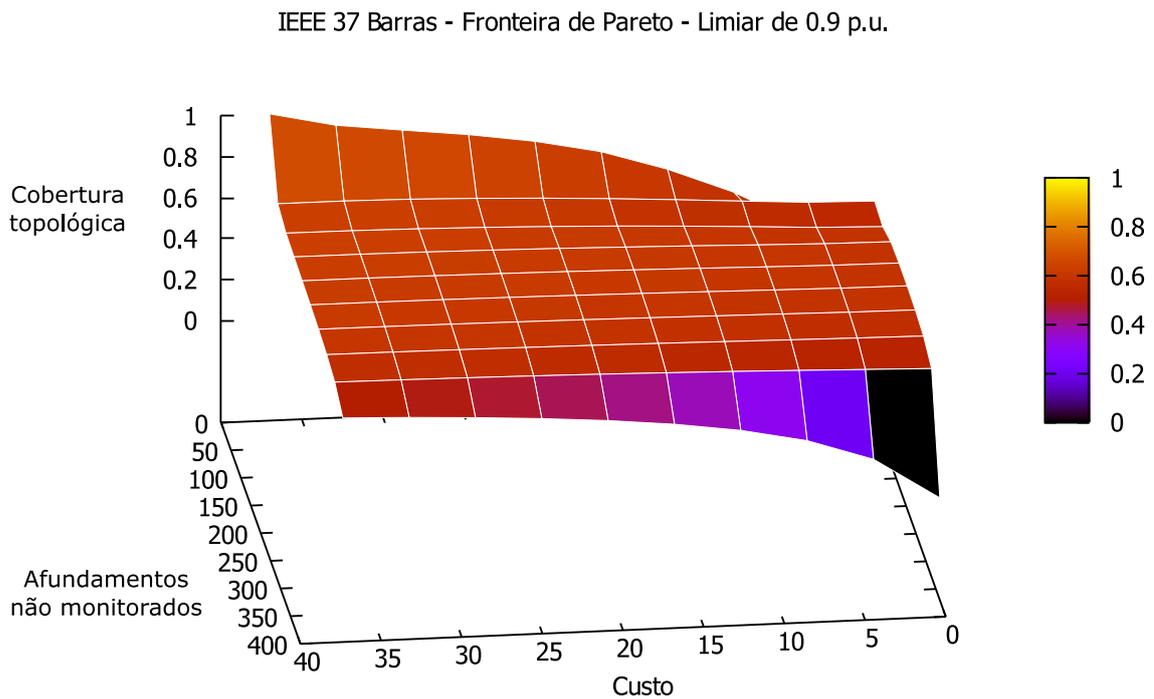


Figura 22 – Mapeamento das posições do cromossomo com as barras do SD.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
701	702	703	704	705	706	707	708	709	710
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
711	712	713	714	718	720	722	724	725	727
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
728	729	730	731	732	733	734	735	736	737
	31	32	33	34	35	36	37		
	738	740	741	742	744	775	799		

6 Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma abordagem para alocação de monitores de qualidade de energia elétrica para sistemas de distribuição por meio da aplicação de técnicas de otimização multiobjetivo visando fornecer soluções que maximizem a cobertura topológica do sistema, minimize a quantidade de afundamentos de tensão não monitorados e minimize os custos do monitoramento.

Inicialmente foram levantados os motivos do desenvolvimento desta pesquisa, abordando a importância da alocação de monitores para o monitoramento da QEE e apresentando a fundamentação teórica necessária. Na metodologia proposta foi evidenciada a necessidade de se considerar todos os tipos de faltas na aplicação do Método da Posição de Faltas para obtenção das Matrizes de Tensões Durante a Falta, apresentando casos onde a agregação ou consideração de apenas um tipo de falta levam a falhas no monitoramento dos eventos. Estas MTDF's foram utilizadas para determinar a quantidade de afundamentos monitorados por um dado arranjo de monitores. Já a quantidade de monitores do arranjo determina o custo. Para resolver o modelo multiobjetivo proposto utilizou-se o algoritmo NSGA-II.

A discussão dos resultados apresentados permitiu observar as vantagens da abordagem proposta frente às outras propostas encontradas na literatura. Devido à adoção de um modelo de otimização multiobjetivo, os resultados obtidos ilustram um conjunto de soluções com a quantidade e o ponto de instalação dos monitores, o custo, o número de afundamentos não monitorados, a cobertura topológica e o limiar para a construção da Matriz de Cobertura. Dessa forma, a concessionária pode traçar uma estratégia de monitoramento considerando os diversos objetivos (ou critérios) associados ao problema. A decisão de qual critério será priorizado passa pela disponibilidade financeira da concessionária e pelo grau de eficiência desejado, devendo essa solução de compromisso ser realizada pelo analista ao final do estudo.

Vale ressaltar que, a abordagem proposta não se limita a identificar um conjunto de soluções otimizadas para o monitoramento, mas permite, também, detectar a existência de zonas de saturação, com o intuito de evitar desperdício de recursos que não se traduzam em ganho real na qualidade do monitoramento. Portanto, esta abordagem permite uma maior flexibilidade e economicidade no estabelecimento do plano de monitoramento.

Outro ponto de destaque foi a possibilidade de identificar soluções diferentes, mas que possuem a mesma cobertura topológica e cobertura afundamentos de tensão, ou seja, arranjos de monitores diferentes que satisfazem igualmente os critérios estabelecidos no estudo, possibilitando que a concessionária escolha o plano de monitoramento cuja soluções

sejam logisticamente mais viáveis para as equipes de campo.

Uma limitação da metodologia proposta está na consideração apenas da ocorrência de curtos-circuitos francos, que causam uma severidade maior no SD e por consequência reduz o número de monitores necessários, mas que podem não ser suficientes para observar eventos que tenham uma impedância de falta diferente de 0 ohms. Como trabalho futuro, pretende-se estender a abordagem para englobar, na formulação da cobertura de afundamentos, a ocorrência de diferentes valores de impedância de falta, ampliando a diversidade de eventos cobertos no SD.

6.1 Publicações

Abaixo são listadas as publicações que foram geradas a partir do trabalho desenvolvido para a elaboração desta dissertação:

Artigos completos em periódicos:

- **CARNEIRO, S. M.**; RICARDO DE A. L.; BRANCO, H. M. G. C. A Multi-objective Approach for Optimized Monitoring of Voltage Sags in Distribution Systems. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, v.29, 2018.
- **CARNEIRO, S. M.**; ALVES, A. J. DE O.; RICARDO DE A. L.; BRANCO, H. M. G. C.; LIMA FILHO, J. DE R. Abordagem Baseada em Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo e no Método de Monte Carlo para Monitoramento Otimizado de Afundamentos de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. *Learning and Nonlinear Models*, v.14, p.44 - 57, 2016.

Trabalhos completos publicados em anais de congressos:

- **CARNEIRO, S. M.**; RABELO, RICARDO DE A. L.; BRANCO, H. M. G. C. An Approach Based on Multi-Objective Evolutionary Algorithm and Monte Carlo Method for Optimized Monitoring of Voltage Sags in Electricity Distribution Systems. In: *IEEE International Conference On Systems, Man, And Cybernetics*, 2017, Banff.
- **CARNEIRO, S. M.**; ALVES, A. J. O.; RABELO, R. A. L.; BRANCO, H. M. G. C. Uma abordagem para o Monitoramento Otimizado de Afundamentos de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. In: *XXI Congresso Brasileiro de Automática*, 2016, Vitória, ES.

Referências

- ALMEIDA, C.; KAGAN, N. Using genetic algorithms and fuzzy programming to monitor voltage sags and swells. *IEEE Intelligent Systems*, v. 26, n. 2, p. 46–53, March 2011. ISSN 1541-1672. Citado na página 1.
- BOLLEN, M. H. *Understanding power quality problems*. [S.l.]: IEEE press New York, 2000. v. 3. Citado na página 5.
- BOLLEN, M. H.; GU, I. *Signal processing of power quality disturbances*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006. v. 30. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 5.
- BRANCO, H. M. et al. Optimized allocation of power quality monitors in transmission systems: A multiobjective approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 64, p. 156–166, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 1, 5 e 13.
- CARNEIRO, S. M. et al. Abordagem baseada em algoritmo evolutivo multiobjetivo e no método de monte carlo para monitoramento otimizado de afundamentos de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica. *Learning and Nonlinear Models*, v. 14, p. 44–57, 2016. Citado na página 16.
- CEBRIAN, J. C.; ALMEIDA, C. F. M.; KAGAN, N. Genetic algorithms applied for the optimal allocation of power quality monitors in distribution networks. In: *14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–10. ISSN 1540-6008. Citado na página 1.
- CONRAD, L.; LITTLE, K.; GRIGG, C. Predicting and preventing problems associated with remote fault-clearing voltage dips. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IEEE, v. 27, n. 1, p. 167–172, 1991. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 5.
- DAS, J. *Power system analysis: short-circuit load flow and harmonics*. [S.l.]: CRC press, 2016. Citado na página 2.
- DEB, K. *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001. v. 16. Citado na página 9.
- DEB, K. et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 2, 11 e 26.
- DISTRIBUIÇÃO, P. de. Módulo 8—qualidade da energia elétrica. *Agência Nacional de Energia Elétrica—ANEEL*, 2013. Citado na página 4.
- DUGAN, R. et al. *Electrical Power Systems Quality, Third Edition*. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2012. ISBN 9780071761567. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 4.
- EBERHART, R. C.; KENNEDY, J. A new optimizer using particle swarm theory. In: NEW YORK, NY. *Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science*. [S.l.], 1995. v. 1, p. 39–43. Citado na página 9.

- EMANUEL, A. E.; MCNEILL, J. A. Electric power quality. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 22, n. 1, p. 263–303, 1997. Citado na página 4.
- ESPINOSA-JUÁREZ, E.; HERNANDEZ, A. A method for voltage sag state estimation in power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 22, n. 4, p. 2517–2526, 2007. Citado na página 1.
- ESPINOSA-JUAREZ, E.; HERNANDEZ, A.; OLGUIN, G. An approach based on analytical expressions for optimal location of voltage sags monitors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 24, n. 4, p. 2034–2042, 2009. Citado na página 1.
- FEO, T. A.; RESENDE, M. G. A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *Operations research letters*, Elsevier, v. 8, n. 2, p. 67–71, 1989. Citado na página 9.
- GLOVER, F. Heuristics for integer programming using surrogate constraints. *Decision Sciences*, Wiley Online Library, v. 8, n. 1, p. 156–166, 1977. Citado na página 9.
- GLOVER, F. Tabu search-part i. *ORSA Journal on computing*, INFORMS, v. 1, n. 3, p. 190–206, 1989. Citado na página 9.
- GMBH, D. Digsilent powerfactory 15.1. 2013. 2013. Citado na página 2.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. 1st. ed. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989. ISBN 0201157675. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 9.
- GUPTA, G.; FRITZ, W. Power quality monitoring by advanced mathematical tools: A survey. In: *1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 5.
- HONG, Y. y.; CHEN, Y. Y. Placement of power quality monitors using enhanced genetic algorithm and wavelet transform. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 5, n. 4, p. 461–466, April 2011. Citado na página 1.
- HOPCROFT, J. E. *Data structures and algorithms*. [S.l.]: Addison-Wesley Boston, MA, USA:, 1983. v. 175. Citado na página 12.
- IEEESTD1159. Ieee recommended practice for monitoring electric power quality. *IEEE Std 1159-2009 (Revision of IEEE Std 1159-1995)*, p. c1–81, June 2009. Citado na página 4.
- KEMPNER, T. R. *Análise da robustez e da sensibilidade de sistemas de distribuição para a alocação otimizada de medidores frente às variações de tensão de curta duração*. Dissertação (mathesis) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016. Citado na página 16.
- KEMPNER, T. R.; OLESKOVICZ, M.; SANTOS, A. Q. Optimal allocation of monitors by analyzing the vulnerability area against voltage sags. In: *16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 536–540. ISSN 1540-6008. Citado na página 1.
- KERSTING, W. Radial distribution test feeders. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 6, n. 3, p. 975–985, 1991. Citado 5 vezes nas páginas 2, 21, 22, 23 e 25.

- KIRKPATRICK, S.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. *science*, Washington, v. 220, n. 4598, p. 671–680, 1983. Citado na página 9.
- KUNG, H.-T.; LUCCIO, F.; PREPARATA, F. P. On finding the maxima of a set of vectors. *Journal of the ACM (JACM)*, ACM, v. 22, n. 4, p. 469–476, 1975. Citado na página 9.
- LIAO, H. et al. Optimisation framework for development of cost-effective monitoring in distribution networks. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 10, n. 1, p. 240–246, 2016. Citado na página 1.
- MAHELA, O. P.; SHAIK, A. G.; GUPTA, N. A critical review of detection and classification of power quality events. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 41, p. 495–505, 2015. Citado na página 5.
- MIETTINEN, K. *Nonlinear multiobjective optimization*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. v. 12. Citado na página 9.
- MLADENOVIĆ, N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 24, n. 11, p. 1097–1100, 1997. Citado na página 9.
- MOSCATO, P. On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial arts: Towards memetic algorithms. *C3P Report Caltech concurrent computation program*, v. 826, p. 1989, 1989. Citado na página 9.
- NILSSON, J. W. *Electric circuits*. [S.l.]: Pearson Education India, 2008. Citado na página 14.
- OLGUIN, G.; BOLLEN, M. H. Stochastic assessment of unbalanced voltage dips in large transmission systems. *IEEE Power Tech Conference Proceedings*, 2003. Citado na página 6.
- SALLAM, A.; MALIK, O. *Electric Distribution Systems*. [S.l.]: Wiley, 2011. (IEEE Press Series on Power Engineering). Citado na página 4.
- SINGH, B.; CHANDRA, A.; AL-HADDAD, K. *Power quality: problems and mitigation techniques*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014. Citado na página 5.
- WON, D.-J. et al. A new algorithm to locate power-quality event source with improved realization of distributed monitoring scheme. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 21, n. 3, p. 1641–1647, 2006. Citado na página 14.
- WON, D.-J.; MOON, S.-I. Optimal number and locations of power quality monitors considering system topology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 23, n. 1, p. 288–295, 2008. Citado na página 12.