

Caio Marco dos Santos Junqueira

Um Algoritmo para Alocação Ótima de Detectores de Afundamentos de Tensão

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática – CEEI
Programa de Pós-Graduação

Orientador: Benemar Alencar de Souza
Orientadora: Núbia Silva Dantas Brito

Campina Grande, Paraíba
13 de Março de 2017

Caio Marco dos Santos Junqueira

Um Algoritmo para Alocação Ótima de Detectores de Afundamentos de Tensão

Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática – CEEI
Programa de Pós-Graduação

Orientador: Benemar Alencar de Souza
Orientadora: Núbia Silva Dantas Brito

Campina Grande, Paraíba
13 de Março de 2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- J95a Junqueira, Caio Marco dos Santos.
Um algoritmo para alocação ótima de detectores de afundamentos de tensão /
Caio Marco dos Santos Junqueira. – Campina Grande, 2017.
81 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de
Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2017.
"Orientação: Prof. Dr. Benemar Alencar de Souza, Profa. Dra. Núbia Silva
Dantas Brito".
Referências.
1. Energia Elétrica - Distribuição. 2. Afundamento de Tensão – Energia
Elétrica. 3. Transformada *Wavelet* Discreta – Energia Elétrica. 4. Matriz de
Observabilidade. 5. *Binary Particle Swarm Optimization*. 6. *Alternative Transient
Program*. I. Souza, Benemar Alencar de. II. Brito, Núbia Silva Dantas. III. Título.

CDU 621.3.095.2(043)

**"UM ALGORÍTMO PARA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE DETECTORES DE AFUNDAMENTO
DE TENSÃO"**

CAIO MARCO DOS SANTOS JUNQUEIRA

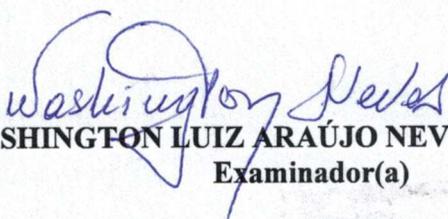
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 09/03/2017



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



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



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



**HELON DAVID DE MACEDO BRAZ, D.Sc., UFPB
Examinador(a)**

CAMPINA GRANDE - PB

Agradecimentos

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

Aos professores orientadores Benemar Alencar de Souza e Núbia Silva Dantas Brito por tornarem possível o desenvolvimento e conclusão desse trabalho, além da amizade, compreensão, paciência, experiência e conhecimento. Ao professor Wellinsílvio Costa dos Santos por ter me incentivado a continuar na pesquisa e ter me orientado desde o curso de graduação. Aos professores membros da banca Washington Luíz Araújo Neves e Helon David de Macêdo Braz pela contribuição com sugestões e conhecimentos. Aos funcionários da COPELE, em especial Ângela, pela disposição e colaboração.

Aos meus amados avós, Estevão Rocha e Joana Severo e pais, Francisca Lúcia e Manoel Junqueira que sempre procuraram me oferecer a melhor educação possível e sempre me incentivaram e deram força para que eu seguisse adiante.

Às minhas irmãs, Cora Coralina e Camila Junqueira, por me darem o exemplo da luta diária em busca dos objetivos da vida.

À minha namorada, Thaís Gomes, por compreender minhas ausências e cuidar tão bem de mim.

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

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

Finalmente à CAPES, que proporcionou o suporte financeiro para a realização deste trabalho.

*‘Um dia aprendi que os sonhos existem
para se tornarem realidade. E, desde aquele dia,
já não durmo para descansar.
Simplesmente durmo para sonhar.
(Walt Disney)*

Resumo

Um algoritmo para alocação ótima de detectores de afundamentos de tensão (AT) é apresentado nesta dissertação. O algoritmo utiliza a Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) para a detecção de AT e o conceito de Matriz de Observabilidade Topológica (MOT) para avaliar o desempenho dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) quando submetidos à tais distúrbios. Para resolver o problema de alocação ótima dos dispositivos detectores de AT, utilizou-se o método *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO). Adicionalmente, apresenta-se uma metodologia de criação de uma base de dados para geração automática de AT. O algoritmo foi avaliado considerando-se dois sistemas: um sistema-teste do IEEE e um SDEE que simula um alimentador real da cidade de Boa Vista-PB, os quais foram simulados no *software Alternative Transient Program* (ATP). Os resultados obtidos indicaram que o algoritmo é capaz de detectar AT em todo o sistema, fazendo o uso da instalação de detectores em poucas barras, o que indubitavelmente, reduzirá o custo do sistema de monitoramento.

Palavras-chave: Afundamentos de Tensão, Transformada *Wavelet* Discreta, Matriz de Observabilidade, *Binary Particle Swarm Optimization*, *Alternative Transient Program*.

Abstract

An algorithm for optimal placement of voltage sags (VS) detectors is presented in this dissertation. The algorithm uses the Discrete Wavelet Transform (DWT) for VS detection and the Topological Observability Matrix (TOM) concept to evaluate the performance of the Electric Power Distribution Systems (EPDS) when subjected to such disturbances. In order to solve the problem of optimal placement of the VS detecting devices, the Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) method was used. Additionally, a methodology for the creation of a database for automatic VS generation is presented. The algorithm was evaluated considering two systems: an IEEE test system and a EPDS that simulates a real feeder in Boa Vista-PB city, which were simulated in the Alternative Transient Program (ATP) software. The results indicate that the algorithm is capable of detecting VS throughout the system, using the installation of detectors in a few buses, which will undoubtedly reduce the cost of the monitoring system.

Keywords: Voltage Sags, Discrete Wavelet Transform, Topological Observability Matrix, Binary Particle Swaem Optimization, Alternative Transient Program.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Prejuízos médios por evento em alguns segmentos dos EUA devido aos AT	16
Figura 2 – Arquitetura do Sistema Elétrico com destaque para o SDEE	26
Figura 3 – Principais distúrbios do SDEE	27
Figura 4 – Curva CBEMA	30
Figura 5 – Curva ITI	30
Figura 6 – Taxa anual da amplitude e duração dos AT e interrupções	31
Figura 7 – Afundamento de tensão e suas características	32
Figura 8 – A Transformada <i>Wavelet</i> Discreta (TWD)	33
Figura 9 – Energia dos coeficientes de detalhe e aproximação do sinal da Figura 7	34
Figura 10 – Sistema de monitoramento de QEE.	35
Figura 11 – Exemplo de Vetor-Alocação Binário	36
Figura 12 – Matriz de tensões remanescentes e Matriz de Observabilidade	37
Figura 13 – Exemplo de Preenchimento da matriz T	38
Figura 14 – Construção da matriz MOT do exemplo hipotético	38
Figura 15 – Exemplo de um Vetor-Restrição	39
Figura 16 – Combinações de instalação dos medidores em um sistema de 4 barras	40
Figura 17 – Movimentação de uma partícula pelo método do PSO	41
Figura 18 – Fluxograma do método do BPSO	44
Figura 19 – Diagrama unifilar do sistema de 13 barras do IEEE	45
Figura 20 – Diagrama unifilar do alimentador de Boa Vista-PB	46
Figura 21 – Processo de construção da base de dados	47
Figura 22 – Leitura dos arquivos .dat	48
Figura 23 – Fluxograma do método de detecção de AT	49
Figura 24 – Detecção de um AT para o sinal da Figura 7	50
Figura 25 – Construção da Matriz de observabilidade	50
Figura 26 – Construção da Matriz de Observabilidade Topológica	51
Figura 27 – Análise estatística da convergência do BPSO para o sistema de 13 barras do IEEE	52
Figura 28 – Análise estatística da convergência do BPSO para o sistema de 90 barras	52
Figura 29 – Fluxograma do algoritmo proposto	53
Figura 30 – Convergência do BPSO para o sistema de 4 barras	55
Figura 31 – Alocação ótima e área aproximada de monitoramento para o sistema de 4 barras	55
Figura 32 – Formulação do problema de otimização para o sistema desequilibrado de 13 barras.	57

Figura 33 – Convergência do BPSO para o sistema de 13 barras	58
Figura 34 – Área aproximada de monitoramento do sistema da solução ótima encontrada para cada fase	59
Figura 35 – Convergência do BPSO para uma das simulações do cenário 1	61
Figura 36 – Convergência do BPSO para uma das simulações do cenário 5	62
Figura 37 – Convergência do BPSO para uma das simulações do cenário 9	63
Figura 38 – Área aproximada de monitoramento das barras 1, 2, 15 e 56	64
Figura 39 – Área aproximada de monitoramento das barras 1, 2, 3, 35, 58 e 68	66
Figura 40 – Configuração das cruzetas	73
Figura 41 – Estruturas dos postes	73
Figura 42 – MOT para o sistema de 13 barras (Fase A)	76
Figura 43 – MOT para o sistema de 13 barras (Fase B)	76
Figura 44 – MOT para o sistema de 13 barras (Fase C)	77
Figura 45 – MOT do cenário 5 (Colunas 1 a 45)	78
Figura 46 – MOT do cenário 5 (Colunas 46 a 90)	79
Figura 47 – MOT do cenário 10 (Colunas 1 a 45)	80
Figura 48 – MOT do cenário 10 (Colunas 46 a 90)	81

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resumo da revisão bibliográfica	24
Tabela 2 – Variáveis de simulação para criação da base de dados	47
Tabela 3 – Parâmetros do BPSO	54
Tabela 4 – Parâmetros do AT e do BPSO para o sistema de 13 barras	57
Tabela 5 – Resultados para a variação do carregamento do sistema	60
Tabela 6 – Resultados para a variação no tipo de falta	62
Tabela 7 – Resultados para a variação na resistência de falta	63
Tabela 8 – Resultados para a variação no limiar de detecção	65
Tabela 9 – Comprimentos dos trechos do alimentador	74
Tabela 10 – Cargas distribuídas ao longo do alimentador	75

Lista de abreviaturas e siglas

QEE	Qualidade de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração
AT	Afundamentos de Tensão
EUA	Estados Unidos da América
TWD	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta
BPSO	<i>Binary Particle Swarm Optimization</i>
MRA	<i>Monitoring Reach Area</i>
BB	<i>Branch and Bound</i>
STEE	Sistema de Transmissão de Energia Elétrica
GAMS	<i>General Algebraic Modeling System</i>
AG	Algoritmo Genético
ET	Elevação de Tensão
CF	Conjuntos <i>Fuzzy</i>
FMRA	<i>Fuzzy Monitoring Reach Area</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
TMRA	<i>Topological Monitoring Reach Area</i>
MOI	<i>Monitor Overlapping Index</i>
QBPSO	<i>Quantum-inspired Binary Particle Swarm Optimization</i>
AV	Algoritmo dos Vagalumes
GD	Geração distribuída
CBEMA	<i>Computer Business Equipment Manufacturer Association</i>
ITI	<i>Information Technology Industry</i>
TP	Transformador de Potencial
TC	Transformador de Corrente
A/D	Analógico/Digital
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
MO	Matriz de Observabilidade
MOT	Matriz de Observabilidade Topológica
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
AWG	<i>American Wire Gauge</i>

Lista de símbolos

$\$$	Dólar
c_j	Coefficientes de aproximação na escala j
d_j	Coefficientes de detalhe na escala j
$g(k)$	Filtro passa-baixa na amostra k
$h(k)$	Filtro passa-alta na amostra k
$\downarrow 2$	Subamostragem por dois
$s(k)$	Sinal original na amostra k
ξ_d	Energia dos coeficientes de detalhe
ξ_c	Energia dos coeficientes de aproximação
m	Número do medidor
C_{TP}	Custo do Transformador de potencial
C_{TC}	Custo do Transformador de corrente
C_{CAD}	Custo dos cartões de aquisição de dados,
C_{DSP}	Custo do processador de sinais digitais,
$C_{Sis.Com.}$	Custo do sistema de comunicação com a central
$C_{Software}$	Custo com o software
$V_{AlocBin}$	Vetor Alocação-Binário
i	Posição no Vetor Alocação-Binário
$mo(i, j)$	Elemento da linha i e coluna j da Matriz de Observabilidade
MOT	Matriz de Observabilidade Topológica
$\&$	Operador lógico 'AND' ou 'E'
T	Matriz Topologia
$t(i, j)$	Elemento da linha i e coluna j da matriz T
F_{obj}	Função objetivo
min	Função de minimização
n	Número de barras do sistema
$c_{inst.}(i)$	Custo da instalação do medidor i
$V_{restricção}$	Vetor-Redundância
$\vec{x}_i(t)$	Vetor posição atual da partícula i
$\vec{x}_i'(t + 1)$	Vetor próxima posição da partícula i
$\vec{v}_i(t)$	Vetor velocidade atual da partícula i
$\vec{P}_{ibest}(t)$	Vetor melhor experiência da partícula i
$\vec{G}_{best}(t)$	Vetor melhor experiência do grupo
$v_i(t + 1)$	Vetor movimentação para a próxima posição da partícula i
c_1 e c_2	Coefficientes de aceleração
w	Termo de inércia
r_1 e r_2	Variáveis aleatórias uniformemente distribuídas no intervalo de 0 a 1
$Rand()$	Variável aleatória entre 0 e 1
z	Variável aleatória entre 0 e 1
w_1	Termo de inércia inicial
w_2	Termo de inércia final
$MAXiter$	Número máximo de iterações
$iter$	Iteração atual

$v_{ij}(t+1)$	Variação da posição da partícula i na posição j
$v'_{ij}(t+1)$	Nova variação da posição da partícula i na posição j
$x_{ij}(t+1)$	Próxima posição da partícula i na posição j
Ω	Ohms
®	Registrado
$I_{sobreposição}$	Índice de sobreposição
n_{barras}	Número de barras

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivos	17
1.3	Contribuições	17
1.4	Organização do texto	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Um breve histórico	19
2.2	Trabalhos mais relevantes	19
2.3	Síntese Bibliográfica	23
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
3.1	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica	25
3.2	Afundamentos de Tensão	28
3.3	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta	31
3.4	Medidores de QEE	33
3.5	Alocação ótima de medidores de QEE	35
3.5.1	Vetor-Alocação Binário	36
3.5.2	Matriz de Observabilidade	36
3.5.3	Matriz de Observabilidade Topológica	37
3.5.4	Função Objetivo e restrição	39
3.6	<i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO)	41
3.6.1	<i>Binary Particle Swarm Optimization</i> (BPSO)	42
4	CRIAÇÃO DA BASE DE DADOS	45
5	ALGORITMO PROPOSTO	48
6	RESULTADOS	54
6.1	Sistema-teste hipotético	54
6.2	Sistema-teste do IEEE	55
6.3	Sistema-teste de Boa Vista-PB	59
6.3.1	Carregamento do sistema	60
6.3.2	Tipo de falta	61
6.3.3	Resistência de falta	63
6.3.4	Variação no limiar de detecção de AT	64

7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
	REFERÊNCIAS	68
	APÊNDICES	71
	APÊNDICE A – CONFIGURAÇÃO DO ALIMENTADOR DE BOA VISTA-PB	72
	APÊNDICE B – MATRIZES DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	76

1 Introdução

O crescimento contínuo da demanda por energia elétrica aliado à exigência crescente dos consumidores por um produto de **qualidade** cada vez melhor, tem requerido do setor elétrico, investimentos em sua melhoria do sistema, em particular, na área de distúrbios relacionados com Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Segundo [Dugan et al. \(2004\)](#), um problema de QEE é definido como qualquer problema na tensão, corrente ou variação na frequência que resulte na falha ou má operação dos equipamentos do consumidor.

No Brasil, a normatização da QEE é incumbência da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Historicamente, o fato de destaque se deu em 2008, quando a ANEEL elaborou os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST), os quais atualmente, estão divididos em dez módulos responsáveis por normatizar e padronizar as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE). Dentre eles, o Módulo 8 é dedicado exclusivamente aos aspectos relacionados com a QEE, como ([ANEEL, 2016](#)):

- A qualidade do produto, onde são estabelecidos os parâmetros relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda da tensão.
- A qualidade do serviço prestado, onde são estabelecidos os procedimentos relativos aos indicadores de continuidade e aos tempos de atendimento.

O Módulo 8 apresenta também, a caracterização dos diversos distúrbios, dentre os quais destacam-se aqui nesta dissertação, a classe denominada de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD), cujo estudo é de extrema importância para o setor, pois são considerados os distúrbios observados com mais frequência pelos consumidores.

1.1 Motivação

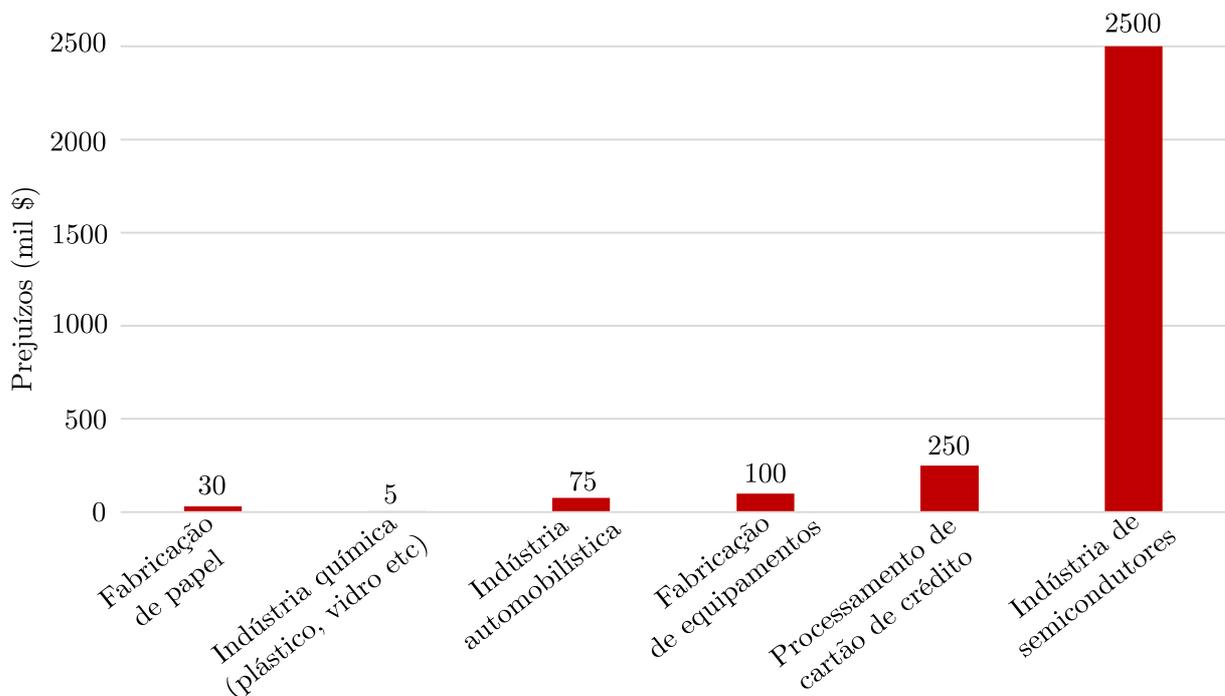
As VTCD são classificadas em interrupção, afundamento de tensão e elevação de tensão, sendo caracterizadas por sua intensidade e duração. Nesta dissertação, o foco são os Afundamentos de Tensão (AT) e a razão dessa escolha foi devido ao fato desses distúrbios serem considerados um dos mais prejudiciais aos clientes, principalmente no setor industrial ([BOLLEN; QADER; ALLAN, 1998](#)).

Os AT caracterizam-se pela redução no valor eficaz da tensão durante um curto período de tempo, sendo causados normalmente, por energização de cargas, curtos-circuitos,

partida de grandes motores e energização de transformadores. A ocorrência de um AT, dependendo de sua intensidade e duração, pode sensibilizar de forma indevida os dispositivos de proteção e provocar danos graves aos consumidores.

As indústrias de processamento contínuo, por exemplo, realizam suas operações durante "turnos corridos", com o objetivo de otimizar os custos para o desenvolvimento dos processos. A ocorrência de AT pode afetar esse processo e como consequência, prejuízos decorrentes devido à baixa produção, desperdícios, custos de reinício do processo, diminuição da vida útil dos equipamentos, etc. podem vir a ocorrer. Para corroborar esse fato, apresentam-se na Figura 1, os valores médios dos prejuízos por evento registrado como AT, em diferentes segmentos dos Estados Unidos da América (EUA).

Figura 1 – Prejuízos médios por evento em alguns segmentos dos EUA devido aos AT



Fonte: (SALIM et al., 2014)

Portanto, em um mundo cada vez mais dependente de eletricidade, o estudo das causas e consequências desse fenômeno constitui sem dúvida, um tema atual e importante. Neste sentido, uma das formas de minimizar os prejuízos decorrentes dos AT seria a detecção imediata do fenômeno seguida da sua extinção. Idealmente, isso exigiria monitoramento contínuo em todas as barras do sistema, entretanto, a redundância dos dados, o espaço para armazenamento e, principalmente, o custo do sistema de monitoramento, tornam essa opção inviável. Logo, a busca por técnicas de otimização que forneçam estimativas da quantidade mínima de detectores de AT e os locais ótimos de sua instalação

constitui uma linha de pesquisa importante e atual para o setor elétrico. E essa foi a motivação principal desta pesquisa.

1.2 Objetivos

Esta dissertação de mestrado teve como:

- Objetivo geral: propor um algoritmo para estimar a quantidade mínima de dispositivos capazes de detectar AT e seus locais ótimos de instalação, baseando-se na área de observabilidade do AT para cada medidor instalado. O objetivo foi combinar um método de detecção de AT baseado na transformada *wavelet* discreta (TWD) com o método *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO) para formular um algoritmo capaz de detectar AT em situações de faltas (ou curtos-circuitos) em qualquer parte do SDEE.
- Objetivos específicos:
 - Estudar o fenômeno AT;
 - Avaliar o estado da arte em relação ao tema: alocação ótima de medidores de QEE;
 - Combinar a transformada *wavelet* discreta (TWD) com o método *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO);
 - Desenvolver uma metodologia para construção automática de bases de dados de AT.

1.3 Contribuições

Presume-se como principais contribuições desta pesquisa para o estado da arte:

1. Modelagem de AT considerando diferentes parâmetros (resistência de falta, carregamento do sistema, tipo de falta e limiar de detecção);
2. Desenvolvimento de uma metodologia para construção automática de base de dados de AT;
3. Desenvolvimento de um algoritmo alternativo para alocação de detectores de AT.

1.4 Organização do texto

A dissertação foi organizada em sete capítulos, incluindo este capítulo introdutório conforme a seguir.

-
- Capítulo 2: apresentação da revisão bibliográfica dos trabalhos mais relevantes para o desenvolvimento da dissertação;
 - Capítulo 3: apresentação dos conceitos básicos referentes ao problema de otimização tratado, tais como: principais características dos AT, detecção do AT, características dos medidores de QEE, alocação ótima desses medidores e a técnica de otimização utilizada;
 - Capítulo 4: processo de construção automática de bases de dados de AT;
 - Capítulo 5: processo de desenvolvimento do algoritmo proposto;
 - Capítulo 6: apresentação e análise dos resultados obtidos;
 - Capítulo 7: apresentação das conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

Para o desenvolvimento desta dissertação, uma análise minuciosa do estado da arte foi realizada em relação ao tema **alocação ótima de medidores de QEE** para algumas das VTCD (AT e elevação de tensão), cujo resumo é apresentado ao longo deste capítulo.

2.1 Um breve histórico

Idealmente, uma operação de monitoramento de QEE demandaria a instalação de medidores em todas as barras do sistema, o que do ponto de vista prático é inviável devido à várias razões dentre as quais, destacam-se: a dificuldade de instalação em alguns pontos e a inviabilidade econômica. A análise do estado da arte revelou que vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos nessa área visando minimizar tais problemas.

Do ponto de vista matemático, esse problema é considerado como sendo um problema de otimização denominado de "alocação ótima de medidores de QEE", que tem como objetivo principal determinar as posições (ou locais) mais sensíveis em relação às ocorrências mais frequentes no sistema, que são: AT, harmônicos e transitórios. Ao final, espera-se que o sistema possa ser completamente monitorado utilizando apenas um número reduzido de medidores alocados em pontos estratégicos (também denominados de "pontos ótimos" no jargão da área de otimização), o que seguramente resultará em redução de custos.

Apresenta-se a seguir, uma análise crítica dos trabalhos considerados mais relevantes para o desenvolvimento desta dissertação.

2.2 Trabalhos mais relevantes

Olguin e Bollen (2003) apresentaram um estudo sobre AT e propuseram um método baseado na técnica denominada *Monitoring Reach Area* (MRA), que informa a área da rede de transmissão que pode ser observada a partir de uma posição específica do medidor. Segundo esse método, se o AT estiver dentro da MRA, o evento é detectado pelo medidor. O problema foi tratado como sendo de otimização linear inteira e o método de *Branch and Bound* (BB) foi utilizado. Esse método divide o espaço de solução em espaços menores para facilitar a resolução do problema. Observou-se que: i) uma solução errada pode ser encontrada se houver um erro na seleção dos ramos nos primeiros estágios; ii) o método não foi aplicado a um SDEE; iii) considerou-se apenas AT provocados por faltas

monofásicas.

Eldery, El-Saadany e Salama (2004) propuseram um conceito denominado *Covering and Packing* para alocação ótima de medidores de QEE em Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica (STEE) frente às cargas não-lineares e AT. Os autores desenvolveram uma resolução para o problema, onde a partir da informação de algumas variáveis do sistema (tensões e correntes) e da topologia da rede, foi possível calcular as outras variáveis através de premissas relacionadas com a Lei de Ohm. Desta forma, cada variável do sistema seria medida ou calculada pelo menos uma vez, permitindo que o sistema fosse completamente observável. O problema foi considerado como sendo de otimização linear inteira e o *software General Algebraic Modeling System* (GAMS) foi utilizado para resolver o problema de alocar medidores de QEE em pontos estratégicos do sistema. A função objetivo considerou os custos relacionados com a instalação do medidor em determinado ponto e as restrições considerou a observabilidade e a redundância das soluções encontradas. O método foi validado com dois STEE: um de 6 (seis) barras e outro de 30 barras.

Olguin, Vuinovich e Bollen (2006) propuseram um trabalho semelhante ao de Olguin e Bollen (2003), utilizando o mesmo sistema, ou seja, um STEE. O trabalho utilizou o método de otimização BB e um algoritmo genético (AG) para explorar o espaço de soluções, analisando as mais adequadas para a avaliação dos AT.

Almeida e Kagan (2007) propuseram um método baseado no trabalho de **Olguin, Vuinovich e Bollen (2006)** para monitoramento de AT e elevação de tensão (ET) em STEE. Foram consideradas faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas para construir uma matriz binária denominada de **Matriz de Observabilidade**, que se assemelha ao conceito de MRA. As simulações iniciais utilizaram as características de um AG clássico, mas a função objetivo e a função de penalização (restrição) eram distorcidas por uma constante presente na função de avaliação, o que não favorecia a convergência do método. A teoria dos Conjuntos *Fuzzy* (CF) foi também utilizada para garantir a convergência do método. Com isso, a função objetivo e as restrições puderam ser controladas e parametrizadas de acordo com os interesses de avaliação.

Reis et al. (2007) utilizaram o método de otimização BB para realizar alocação ótima de medidores de QEE. Porém, diferentemente dos outros autores, o método foi desenvolvido no MATLAB[®] para determinar todas as soluções ótimas para um custo mínimo, possibilitando sua adaptação a casos especiais. No trabalho, os autores aplicaram um fator de redundância para diferenciar as soluções ótimas encontradas. Desta forma, para uma mesma quantidade de medidores de QEE, uma solução com um fator de redundância maior garantiria uma maior confiabilidade do sistema. As tensões e correntes foram monitoradas e a presença de harmônicos e AT foram simulados. Além disso, o método apresentou soluções para um custo de instalação do medidor igual para todos os locais,

para um custo variável de instalação e com medidores já instalados na rede. O trabalho, entretanto, limitou-se aos STEE.

Em [Hagbin e Farjah \(2009\)](#) utilizaram o conceito de MRA proposto por [Olguin e Bollen \(2003\)](#), combinado com a técnica denominada FMRA (*Fuzzy Monitoring Reach Area*) e considerando como parâmetros: a entrada (área que o medidor consegue detectar AT), a fronteira (região limite) e a saída (região que o medidor não consegue detectar AT) baseados na área de monitoramento de cada medidor instalado. Os autores apresentaram o conceito de *Observation Index* (índice de observação) para guiar a escolha dentre as soluções com a mesma quantidade de medidores, o qual foi definido como sendo a combinação de três fatores: capacidade de detectar os AT mais severos, capacidade de registrar a menor média dos AT e a capacidade de não perder nenhum AT mínimo. Os autores aplicaram ainda o AG para realizar a alocação ótima dos medidores e utilizaram um sistema-teste de 118 barras do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Também neste caso, os autores limitaram-se aos STEE e desconsideraram a topologia do sistema.

Em [Espinosa-Juarez, Hernandez e Olguin \(2009\)](#), propuseram um método de alocação ótima de medidores baseado no conceito de MRA. O método BB foi utilizado, por meio do uso pacote de otimização YALMIP. No trabalho, os autores introduziram um novo conceito de **Matriz de Observabilidade** a partir de expressões analíticas que definem em que região, nas barras e ao longo da linha, que um medidor consegue detectar AT. Para validação do método, utilizaram-se dois STEE do IEEE (24-barras e 118-barras). Observou-se que: i) o conceito de MRA não garante a detecção de AT ao longo da linha; ii) a nova **Matriz de Observabilidade** conseguiu detectar AT tanto nas barras como ao longo da linha. iii) a quantidade de medidores encontrada para os resultados utilizando a nova **Matriz de Observabilidade** foram maiores que os obtidos a partir do conceito da MRA.

[Ibrahim et al. \(2012a\)](#) afirmaram que o uso do conceito de MRA não é suficiente para identificar os locais mais apropriados para a alocação de medidores de QEE. Por isso, o conceito de TMRA (*Topological Monitor Reach Area*) foi apresentado, no qual a topologia do sistema é levada em conta durante a alocação dos medidores. Os autores introduziram também, o conceito de *Monitor Overlapping Index* (MOI) para escolha da melhor solução ótima, indicando qual delas resultará no monitoramento do sistema mais confiável. Outros conceitos relacionados a AT são apresentados. A alocação ótima dos medidores foi realizada via AG. Para validação, foram usados um STEE de 30 barras e um SDEE de 34 barras do IEEE. O trabalho foi um dos primeiros que apresentaram uma solução para alocação de medidores de QEE tanto para STEE como para SDEE. Os autores consideraram apenas faltas monofásicas.

[Ibrahim et al. \(2012b\)](#) utilizaram os resultados de [Ibrahim et al. \(2012a\)](#) para

definição da função objetivo e das restrições e realizaram um estudo comparativo de três métodos de otimização para alocação ótima de medidores de QEE: AG, *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO) e *Quantum-inspired Binary Particle Swarm Optimization* (QBPSO). Os testes foram realizados em: i) SDEE radial de 34 barras do IEEE desequilibrado; ii) SDEE de 69 barras do IEEE equilibrado; iii) STEE de 118 barras equilibrado do IEEE. Ao final, constatou-se que o método QBPSO apresentou os melhores resultados em termos de convergência e valor da solução ótima. Porém, devido ao uso de números complexos na sua formulação, sua implementação é mais complexa que os métodos BPSO e AG.

Ai et al. (2013) utilizaram o método de otimização denominado de algoritmo dos vagalumes (AV), para resolver o problema de alocação ótima de medidores de QEE, que se baseia nas atividades sociais do vagalume, onde cada um deles produz um padrão de iluminação único, relacionado com a função objetivo. Os autores utilizaram as mesmas restrições e função objetivo de **Ibrahim et al. (2012b)**. Faltas trifásicas, bifásicas-terra e monofásicas foram simuladas em um STEE de 118 barras. Apesar da convergência rápida do método, o valor da função objetivo foi maior que o valor encontrado no trabalho de **Ibrahim et al. (2012b)**.

Kempner, Oleskovicz e Santos (2014) utilizaram o método das posições de falta para analisar o desempenho de um SDEE para alguns tipos de curto-circuito (faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas). No trabalho, as tensões de falta em cada barra foram obtidas a partir das tensões antes da falta e das matrizes impedância de sequência positiva, negativa e zero para cada tipo falta. As barras mais expostas (barras que sofreram a maior quantidade de AT para as faltas simuladas) foram priorizadas na escolha da alocação ótima de detectores de AT. Os autores usaram o método BB e o SDEE de 37 barras do IEEE para validação. Um diferencial no trabalho foi o estudo de sensibilidade realizado em relação à influência da variação do limiar de detecção.

Blanco-Solano, Petit-Suárez e Ordóñez-Plata (2015) estudaram o impacto da reconfiguração dinâmica do sistema (*dynamic network reconfiguration*). Os autores basearam-se no método de **Ibrahim et al. (2012b)** e consideraram a inserção de fontes renováveis (fotovoltaicas e eólicas) para resolver o problema de alocação ótima de detectores de AT. O conceito de TMRA foi utilizado e, a partir dele, uma nova matriz foi construída com base nos dados de entrada da geração distribuída (GD). Os cenários foram construídos pelas combinações de alta e baixa geração fotovoltaica, alta e baixa geração eólica e ausência de GD. Além disso, o tempo de operação, em horas, foi levado em consideração na construção da nova matriz. Foram simuladas faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra, trifásicas e trifásicas-terra. Os autores aplicaram AG e validaram o método em um SDEE de 32 barras. Constatou-se que: i) com a reconfiguração dinâmica, o número de medidores aumentou; ii) utilizando o conceito de TMRA, os medidores não conseguiram

detectar AT em todo o sistema para os cenários em que houve a inserção de uma GD.

2.3 Síntese Bibliográfica

Análise pormenorizada do estado da arte mostrou que:

- O problema de alocação ótima de medidores de QEE é um assunto ainda incipiente.
- A maioria dos trabalhos encontrados aplica-se aos STEE e consideraram como variável o tipo de falta, desconsiderando por exemplo a influência: da resistência de falta, do carregamento do sistema e da variação do limiar de detecção de AT.
- O método BPSO apresenta uma formulação matemática mais simples que a do QBPSO e pode ser utilizado em problemas de alocação ótima de medidores de QEE.

Ao final, a revisão bibliográfica apontou uma oportunidade em desenvolver um algoritmo alternativo para alocação de detectores de AT baseado no conceito da TMRA, utilizando o BSPO como método de otimização. Além da possibilidade de se fazer um estudo de sensibilidade do método em relação a variação de alguns parâmetros : resistência de falta, variação do limiar de detecção, tipo de falta e carregamento do sistema.

Um resumo da revisão bibliográfica, com a adição do método proposto nesta dissertação, é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo da revisão bibliográfica

Autor	Distúrbio		Sistema		M. de Otimização / software						
	AT	ET	T	D	BB	AG	CF	BPSO	QBPSO	GAMS	AV
Olguin et al., 2003	X	-	X	-	X	-	-	-	-	-	-
Eldery et al., 2004	X	-	X	-	-	-	-	-	-	X	-
Olguin et al., 2006	X	-	X	-	X	X	-	-	-	-	-
Almeida et al., 2007	X	X	X	-	-	X	X	-	-	-	-
Reis et al, 2007	X	-	X	-	X	-	-	-	-	-	-
Espinosa et al., 2009	X	-	X	-	X	-	-	-	-	-	-
Hagbin et al., 2009	X	-	X	-	X	X	-	-	-	-	-
Ibrahim et al, 2012a	X	-	X	X	-	X	-	-	-	-	-
Ibrahim et al, 2012b	X	-	-	X	-	X	-	X	X	-	-
Ai et al, 2013	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-	X
Kempner et al, 2014	X	-	-	X	X	-	-	-	-	-	-
Blanco-Solano et al, 2015	X	-	-	X	-	X	-	-	-	-	-
Método Proposto	X	-	-	X	-	-	-	X	-	-	-

Fonte: Produzido pelo autor

3 Fundamentação Teórica

Este capítulo descreve um resumo dos assuntos mais importantes para o desenvolvimento desta dissertação. Inicialmente, apresentam-se os fundamentos básicos sobre os SDEE, em seguida sobre os AT, a transformada *wavelet* discreta, as características de um medidor de QEE, a alocação ótima de medidores de QEE e finalmente, sobre o método BPSO.

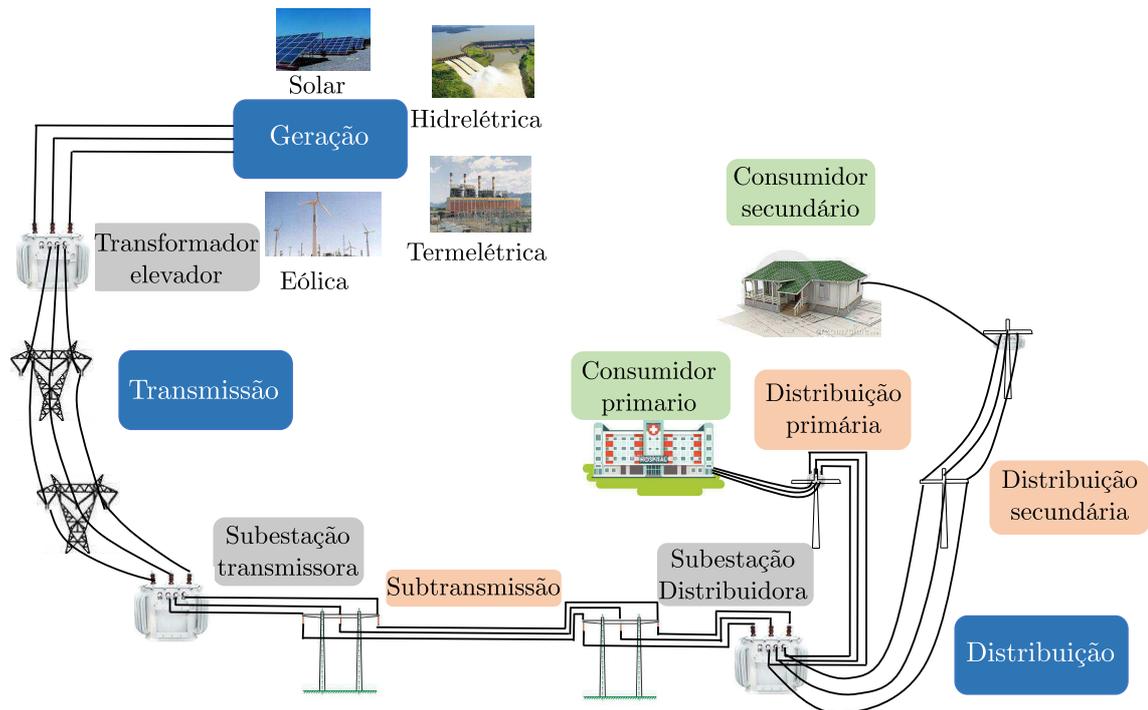
3.1 Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

O SDEE constitui uma subdivisão do sistema elétrico, cujas interligações se confundem com a própria topografia das cidades, ramificando-se ao longo de ruas e avenidas, sendo responsável por conectar o sistema de transmissão ou geradoras de pequeno porte ao consumidor final. O SDEE é composto por fios condutores, transformadores e vários equipamentos responsáveis por controlar, medir e proteger as redes elétricas. Um SDEE típico divide-se nos seguintes segmentos ([ABRADEE, 2016](#)):

- Subtransmissão: responsável por suprir as subestações de distribuição a partir das subestações de subtransmissão. As linhas da subtransmissão são todas trifásicas a três condutores e operam com tensão entre 69kV e 138kV.
- Distribuição primária: comumente denominadas de "rede de média tensão" ou "alimentadores". São visualizadas facilmente nas ruas e avenidas das cidades, compostas por três fios aéreos condutores e operam com tensão entre 2,3kV a 44kV. Alguns estabelecimentos de grande porte são supridos diretamente da distribuição primária.
- Distribuição secundária: responsável pelo suprimento de energia elétrica às residências e pequenos comércios. São comumente denominadas de "redes de baixa tensão" e localizam-se nos mesmos postes da rede de média tensão, porém, em uma altura inferior e operam com tensão entre 110 e 440V.

Apresenta-se na Figura 2 o SEP, destacando as divisões do SDEE.

Figura 2 – Arquitetura do Sistema Elétrico com destaque para o SDEE



Fonte: Produzido pelo autor

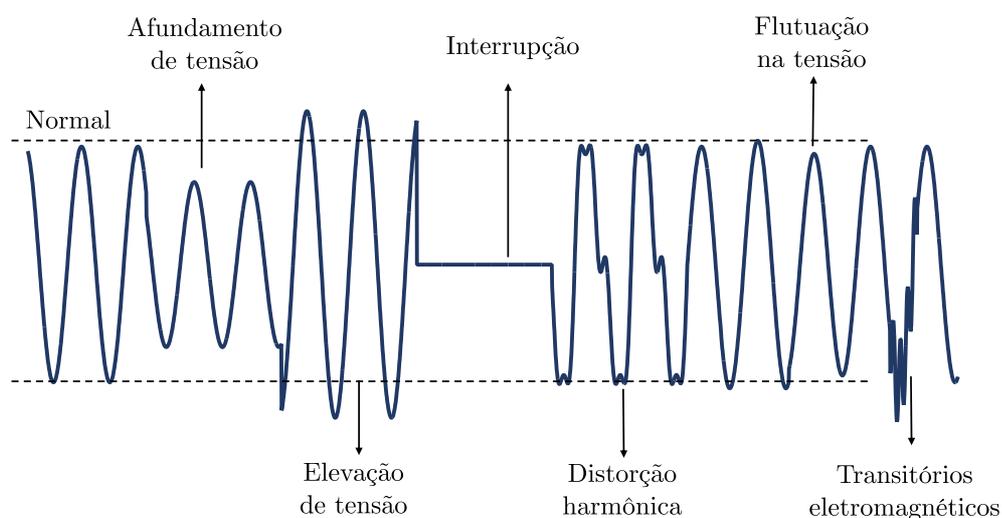
As principais configurações do SDEE são: radial, anel e reticulado. No Brasil, a configuração radial é predominante, a qual caracteriza-se por possuir operação e expansão fácil, porém não possui continuidade de serviço alta. É composta por um tronco trifásico estendido e ramais trifásicos ou monofásicos (SOUZA, 1997). A configuração radial pode ser dividida em: simples, seccionado, interligado e seletivo. A primeira é a mais simples e as demais se diferenciam pela confiabilidade do sistema. A última é aplicada para os consumidores de grande porte, que são normalmente ligados ao alimentador primário, tais como: hospitais, indústrias, centrais eletrônicas.

Na prática, o SDEE está sujeito a várias perturbações que podem comprometer os indicadores de QEE do sistema, dentre as quais destacam-se (Figura 3)(PAULILLO,)::

- **Interrupção:** caracteriza-se pela perda do fornecimento de energia elétrica durante um curto período de tempo, com a tensão apresentando valores inferiores a 0,1 pu.
- **Afundamento de tensão :** ocorre quando o valor medido é no mínimo, 10% inferior ao valor da tensão nominal de regime permanente.
- **Elevação de tensão** ocorre quando o valor medido é no mínimo, 10% superior ao valor da tensão nominal.

- **Flutuação na tensão:** corresponde às variações dos valores eficazes da tensão de fornecimento na faixa compreendida entre 0,95 a 1,05 pu.
- **Distorção harmônica:** neste caso, o sinal de tensão não apresenta uma característica puramente senoidal com amplitude e frequência constantes. Os consumidores que causam distorção harmônica prejudicam a todos que estão conectados na mesma rede.
- **Transitórios eletromagnéticos :** fenômeno que ocorre com frequência no SDEE e pode durar períodos curtos ou longos. Eles são classificados de acordo com sua duração e intensidade:
 - Transitórios impulsivos: mudança repentina nas condições de regime permanente na forma de onda da tensão e/ou corrente, normalmente causada por descargas atmosféricas. Um transitório impulsivo é caracterizado pelo seu tempo de aumento e decaimento. Como exemplo, um transitório impulsivo $1,2\mu s \times 50\mu s$ com 2000V, aumenta de zero até seu valor de pico de 2000V em $1,2\mu s$ e decai a um valor médio do seu pico em $50\mu s$.
 - Transitórios oscilatórios: fenômeno decorrente da eliminação de faltas, energização ou desligamento de linhas de transmissão, chaveamento de cargas e banco de capacitores. São divididos conforme a frequência em alta (maiores de 500kHz), média (entre 5kHz e 500kHz) e baixa (menor de que 5kHz), com duração de 0,3ms a 50ms.

Figura 3 – Principais distúrbios do SDEE



Fonte: Produzido pelo autor

Para evitar ou pelos menos mitigar os prejuízos causados pelos distúrbios, é necessário inserir no SDEE, um sistema de proteção, que deve atender aos seguintes requisitos (GIGUER, 1998):

- Sensibilidade: o sistema de proteção deve ser sensível aos distúrbios presentes no SDEE.
- Rapidez: as sobrecorrentes devem ser eliminadas o mais rápido possível, de modo a evitar que o defeito interfira no funcionamento de outros componentes.
- Seletividade: apenas a parte defeituosa do sistema deve ser isolada.
- Economia: o sistema de proteção deve ser economicamente viável.
- Segurança: o sistema de proteção não deve atuar em uma situação sem defeito e nem deve deixar de atuar para uma situação defeituosa.

Nos SDEE, o alimentador primário possui equipamentos de proteção, os quais devem ser coordenados de modo que apenas o equipamento de proteção mais próximo do distúrbio atue, isolando apenas a parte do sistema sob defeito, de modo a garantir a seletividade da proteção (BARROS, 2009).

3.2 Afundamentos de Tensão

Os afundamentos de tensão (AT) são os distúrbios mais frequentes no sistema e sua ocorrência, combinada com a sensibilidade dos equipamentos modernos, têm causado prejuízos financeiros significativos, além de comprometer os índices de satisfação dos consumidores em relação aos serviços oferecidos pelas empresas prestadoras de serviços de distribuição de energia elétrica (comumente denominadas de distribuidoras ou concessionárias).

Os AT são definidos como uma diminuição entre 0,1pu e 0,9pu da tensão eficaz, durante um período compreendido entre um ciclo da frequência fundamental e um minuto (ANEEL, 2016). Se o distúrbio apresentar uma tensão eficaz inferior a 0,1pu ele é classificado como sendo uma interrupção. Os AT são normalmente, decorrentes de faltas e chaveamentos de cargas pesadas e classificam-se conforme sua duração em:

- Momentâneo: entre um ciclo e três segundos;
- Temporário: entre três segundos e um minuto.

Dependendo das características da falta e do sistema elétrico, uma falta pode provocar: i) um AT; ii) interrupção de tensão nas linhas sob falta; iii) elevação de tensão

nas linhas sãs. Além disso, devido ao acoplamento eletromagnético existente entre as linhas, a ocorrência de uma falta pode provocar AT nas linhas circunvizinhas.

Dentre os efeitos da ocorrência dos AT, destacam-se os desligamentos de processos industriais relacionados à sensibilidade dos computadores utilizados nesse setor. Na prática, a representação clássica da tolerância dos equipamentos frente aos AT é normalmente realizada por meio de curvas de sensibilidade, cujo eixo da abscissa representa a duração e o eixo da ordenada, a intensidade do AT.

Em 1978, com o objetivo de analisar a sensibilidade de equipamentos eletrônicos, Thomas Key desenvolveu uma curva de tolerância de vários computadores frente às variações de tensão, tanto em magnitude quanto em duração, denominada curva CBEMA (*Computer Business Equipment Manufacturer Association*). Tais curvas apresentam os limites máximo e mínimo que a tensão de alimentação pode variar, sem que os equipamentos eletrônicos sofram desligamentos ou algum dano (Figura 4). As três regiões representam:

- Região A - região de operação normal: os equipamentos não sofrem alteração em seu funcionamento.
- Região B - região de susceptibilidade: probabilidade de ocorrência de danos permanentes aos equipamentos.
- Região C - região de sensibilidade: probabilidade de ocorrência de desligamentos dos equipamentos.

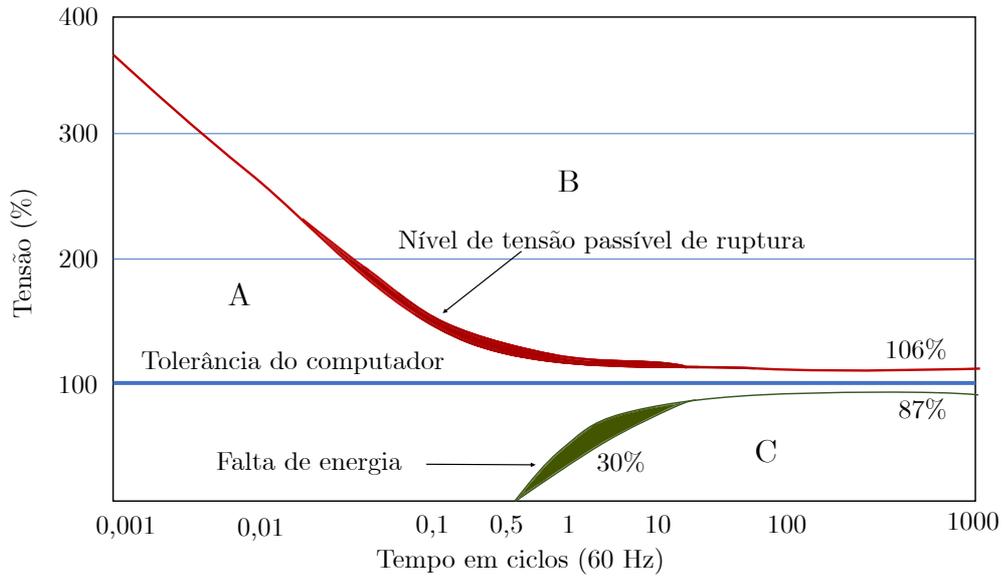
Em 2000, algumas modificações foram realizadas na faixa de amplitude em relação à curva CBEMA. Além disso, a duração passou a ser considerada em segundos. A nova curva, denominada Curva ITI (*Information Technology Industry*) passou a ser a mais indicada na análise de sensibilidade de equipamentos eletrônicos, a qual é apresentada na Figura 5.

Como se vê, para uma curta duração, um determinado equipamento não sofre prejuízos em sua operação quando submetido aos AT. Segundo o EPRI (2003), cerca de 90% dos eventos relacionados aos AT possuem tensão remanescente entre 0,5pu e 0,85 pu por um período menor que 2 segundos (Figura 6).

A análise do estado da arte mostrou que a amplitude e a duração não conseguem caracterizar completamente um AT, devido a ocorrência de transitórios nos seus instantes iniciais (ocorrência da falta) e finais (atuação da proteção e eliminação da falta). Esse fato é apresentado na Figura 7, na qual são apresentadas as características de um AT sem a atuação da proteção.

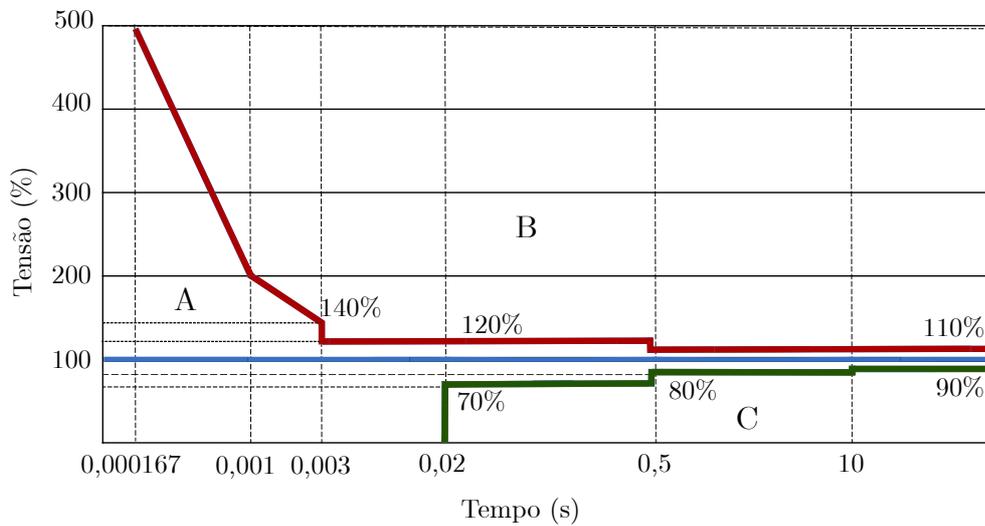
Devido às suas características particulares (aleatoriedade do fenômeno, presença de transitórios nos instantes iniciais, redução do valor eficaz da tensão e permanência

Figura 4 – Curva CBEMA



Fonte: Adaptado de ANSI/IEEE (1987)

Figura 5 – Curva ITI

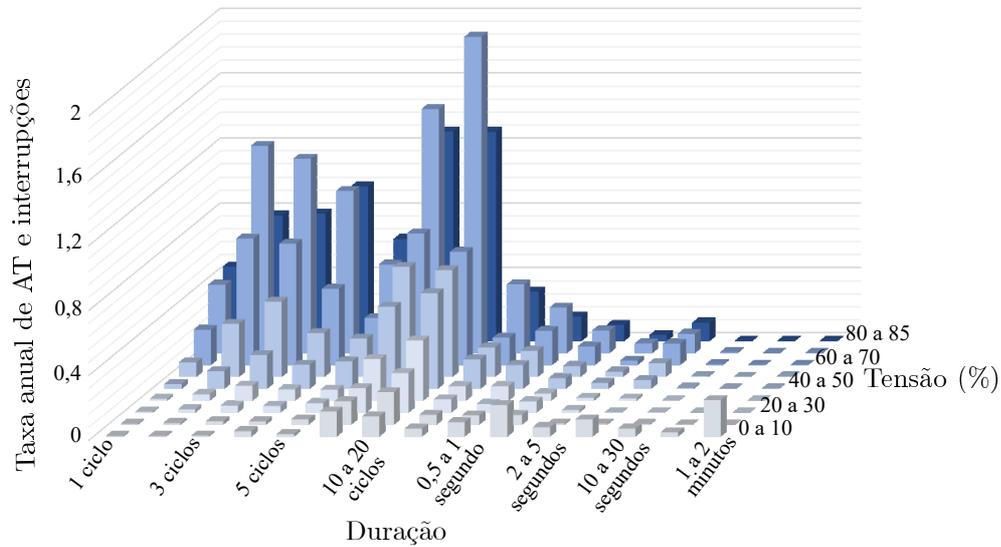


Fonte: Adaptado de ITIC (2000)

nesse valor por mais de um ciclo e menos de um minuto) e às dos sistemas elétricos (por exemplo, acoplamento eletromagnético existente entre as linhas), o processo de detecção de AT não é uma tarefa trivial. Entretanto, segundo Costa, Souza e Brito (2010), um AT pode ser detectado em vários pontos, considerando um único local de monitoramento.

Após análise da bibliografia especializada, selecionou-se nesta dissertação, a trans-

Figura 6 – Taxa anual da amplitude e duração dos AT e interrupções



Fonte: Adaptado de EPRI (2003)

formada *wavelet* discreta (TWD) para executar essa tarefa, cujos fundamentos são apresentados na seção a seguir.

3.3 Transformada *Wavelet* Discreta

A base matemática da transformada *wavelet* discreta (TWD) foi introduzida em 1992, por I. Daubechies (1992), que pôde ser implementada de forma rápida e eficiente usando o conceito de banco de filtros proposto por Mallat (1989). Matematicamente, os filtros são representados, conforme a seguir:

$$c_j(k) = \sum_n g(n - 2k)c_{(j-1)}(n), \quad (3.1)$$

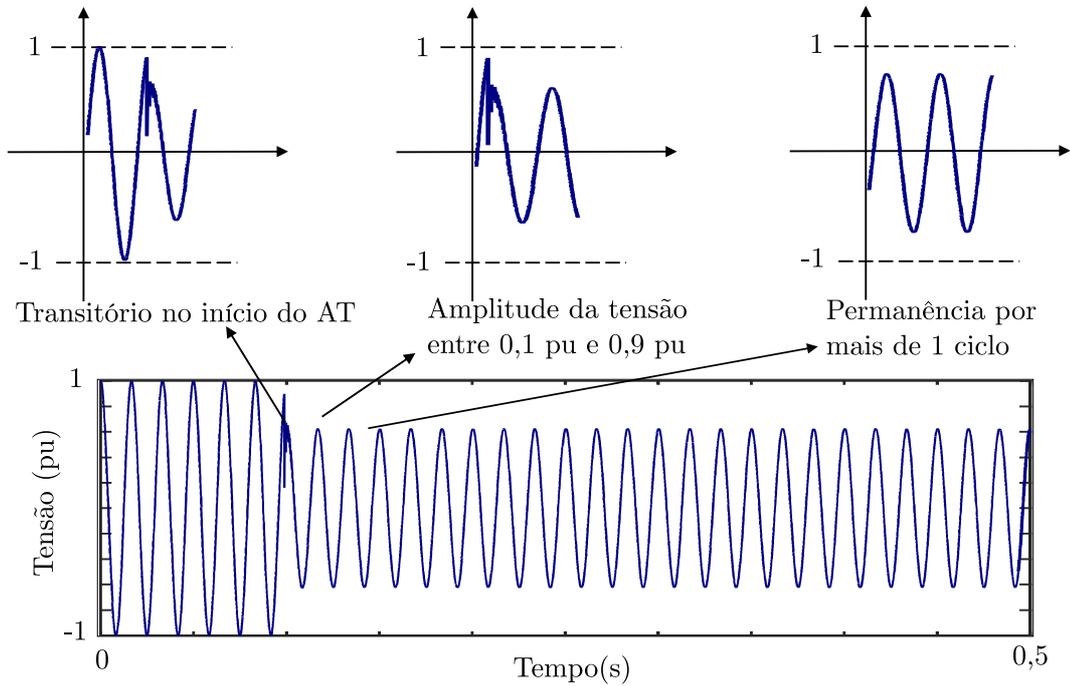
$$d_j(k) = \sum_n h(n - 2k)c_{(j-1)}(n), \quad (3.2)$$

sendo:

c_j e d_j - os coeficientes de aproximação e de detalhe da escala j , respectivamente;
 $g(k)$ e $h(k)$ - os filtros passa-baixa e passa-alta, respectivamente (COSTA; SOUZA; BRITO, 2006).

As equações 3.1 e 3.2 representam um processo de filtragem digital, seguido de uma subamostragem por um fator de dois ($\downarrow 2$). Como consequência, o número de amostras dos coeficientes de aproximação e detalhe é igual à metade do sinal original. Esse processo

Figura 7 – Afundamento de tensão e suas características



Fonte: Produzido pelo autor

é apresentado na Figura 8, tomando como exemplo o sinal da Figura 7 e considerando apenas a primeira escala do processo de decomposição.

A análise do estado da arte mostrou que os coeficientes de detalhe vêm sendo usados extensivamente na detecção de transitórios (sinais de alta frequência), os quais entretanto, podem ser confundidos com os ruídos normalmente presentes no sistema. Visando minimizar a influência do ruído, alguns autores (Costa, Souza e Brito (2006), Costa, Souza e Brito (2010), Santos et al. (2016)) têm usado o conceito de energia dos coeficientes de detalhe. Matematicamente, as energias dos coeficientes de detalhe e de aproximação são definidas, respectivamente, como:

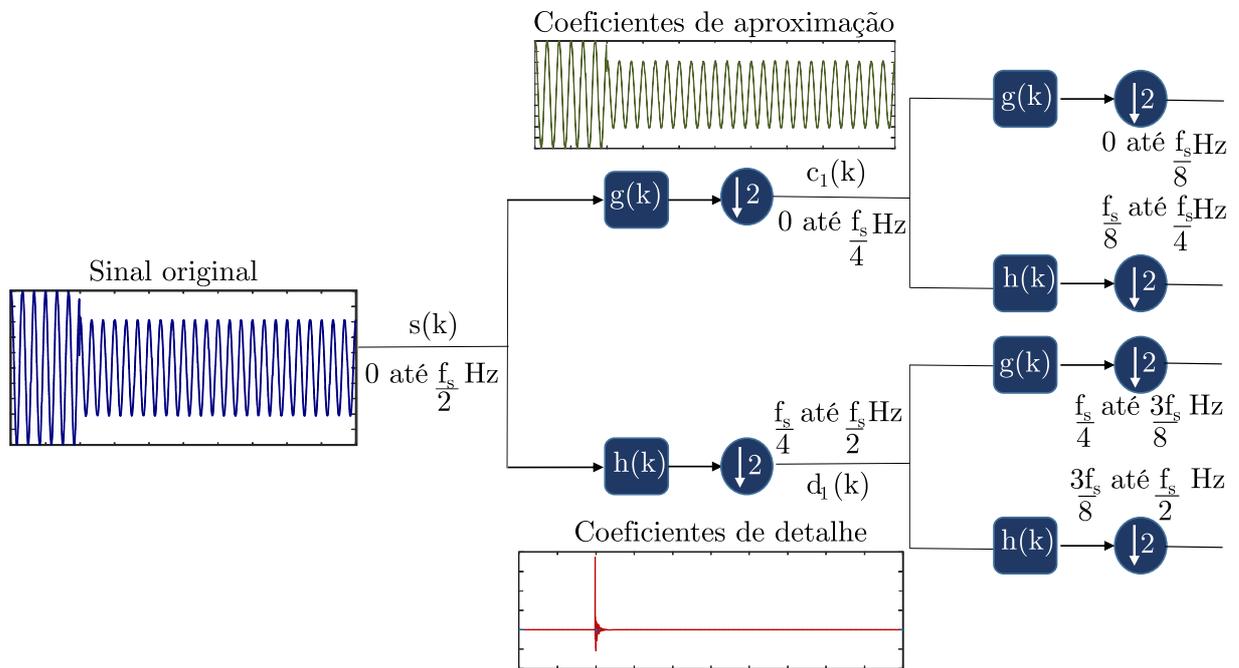
$$\xi_d = \sum_{k=1}^{k + \frac{\Delta k_{ciclo}}{2j}} |d_j^2(k)|^2, \quad (3.3)$$

$$\xi_c = \sum_{k=1}^{k + \frac{\Delta k_{ciclo}}{2j}} |c_j^2(k)|^2, \quad (3.4)$$

sendo:

ξ_d - a energia dos coeficientes de detalhe;

ξ_c - a energia dos coeficientes de aproximação.

Figura 8 – A Transformada *Wavelet* Discreta (TWD)

Fonte: Produzido pelo autor

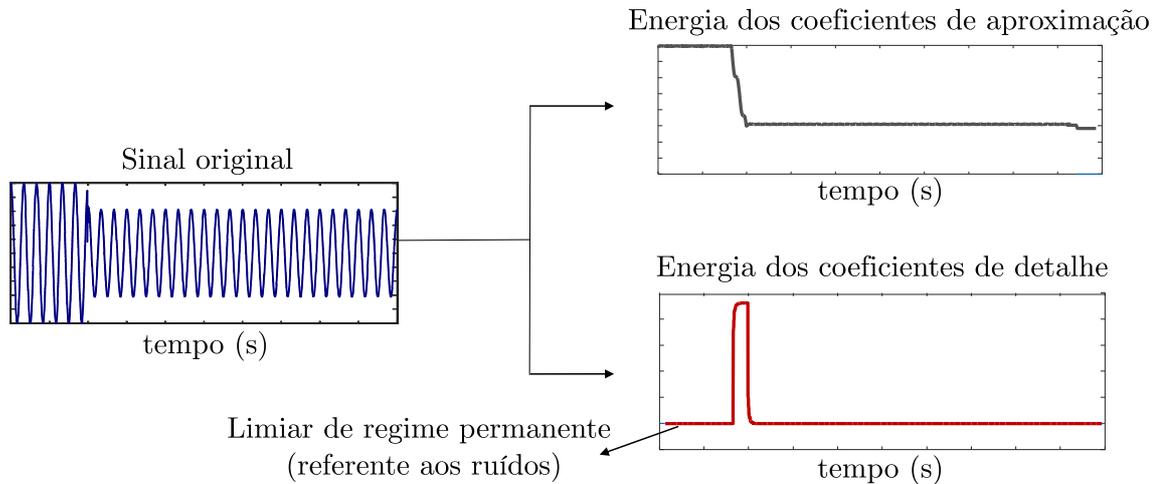
Por se tratar do somatório dos coeficientes de detalhe de um período ao quadrado, a energia desses coeficientes referentes ao ruído é de baixa amplitude quando comparada aos transitórios. Felizmente, a influência do ruído pode ser eliminada a partir da adoção de um limiar de regime permanente, acima do qual um transitório é detectado.

No caso da energia dos coeficientes de aproximação, ela relaciona-se com os componentes de baixa frequência do sinal. Para um AT, no qual ocorre redução na amplitude do sinal de tensão, observa-se também uma diminuição na energia dos coeficientes de aproximação. Essas energias são apresentadas na Figura 9 para o sinal da Figura 7, considerando um limiar de 15% na energia dos coeficientes de detalhe para a detecção de transitórios.

3.4 Medidores de QEE

Os medidores de QEE são equipamentos que capturam os sinais de tensão e corrente provenientes dos transformadores de potencial (TP) e de corrente (TC), respectivamente, os quais adequam o nível dos sinais para os aparelhos de medição. Em seguida, o sinal analógico é convertido em um sinal digital (conversão A/D) por meio do uso de cartões de aquisição de dados, utilizando uma taxa de amostragem e resolução adequadas para cada aplicação (ELDERY; EL-SAADANY; SALAMA, 2004). Logo após, o sinal

Figura 9 – Energia dos coeficientes de detalhe e aproximação do sinal da Figura 7



Fonte: Produzido pelo autor

digital é processado em computadores ou DSP (*Digital Signal Processors*) para detectar, classificar e localizar os distúrbios referentes à QEE. Os resultados dessa última etapa, denominada Etapa de Diagnóstico, são enviados via internet para o centro de operação do sistema, para caso necessário, ações sejam tomadas.

A comunicação com o sistema de desempenho de segurança e análise de dados é feita pela intranet corporativa (DUGAN et al., 2004), que restringe o acesso aos conteúdos e informações ao grupo interno da concessionária de energia elétrica. Um diagrama esquemático de um sistema de monitoramento padrão de QEE é apresentado na Figura 10 .

Segundo Dugan et al. (2004), o custo relacionado a cada medidor de QEE é computado da seguinte forma:

$$C(m) = C_{TP} + C_{TC} + C_{CAD} + C_{DSP} + C_{Sis.Com} + C_{Software}, \quad (3.5)$$

sendo:

m - o número do medidor,

C_{TP} - o custo do TP,

C_{TC} - o custo do TC,

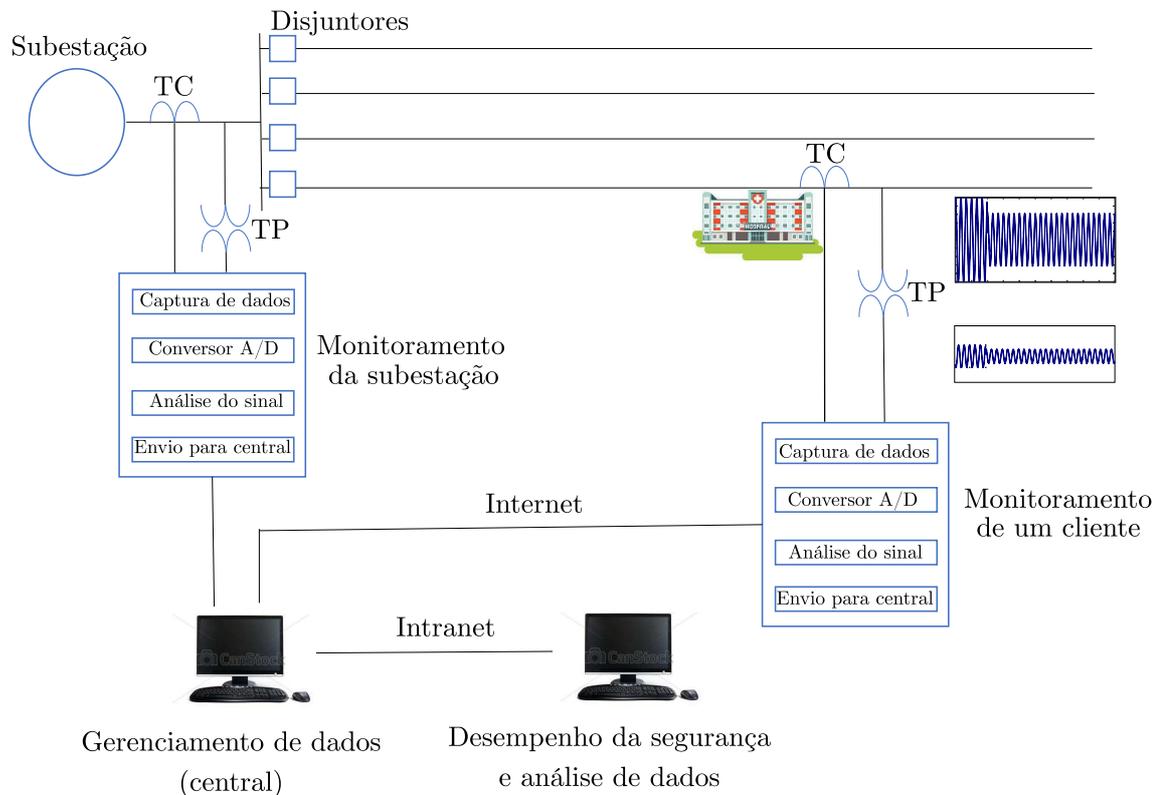
C_{CAD} - o custo dos cartões de aquisição de dados,

C_{DSP} - o custo do processador de sinais digitais,

$C_{Sis.Com.}$ - o custo do sistema de comunicação com a central e

$C_{Software}$ - o custo com o software para detecção, classificação, interface gráfica, sistema de operação etc dividido pela quantidade de medidores do sistema (só é necessário a compra

Figura 10 – Sistema de monitoramento de QEE.



Fonte: Adaptado de [Dugan et al. \(2004\)](#)

de um software para todo o sistema).

Portanto, o uso de técnicas de alocação de medidores de QEE em pontos estratégicos do sistema constitui uma ação crucial para redução dos custos de um sistema de monitoramento.

3.5 Alocação ótima de medidores de QEE

O método proposto para resolver o problema de alocação de detectores de AT baseou-se no trabalho de [Olguin e Bollen \(2003\)](#), no qual se discute as seguintes questões:

- Quantos medidores precisam ser instalados?
- Onde os medidores precisam ser instalados?

A resposta a estas perguntas requer o uso das definições, apresentadas a seguir.

3.5.1 Vetor-Alocação Binário

Esse vetor representa a resposta ao problema de alocação ótima de medidores de QEE e indica o número de medidores necessários para monitorar um SDEE, bem como em quais barras devem ser instalados.

O Vetor-Alocação Binário é definido conforme a equação abaixo:

$$V_{AlocBin}(i) = \begin{cases} 1, & \text{para a instalação do medidor na barra } i \\ 0, & \text{para a não-instalação do medidor na barra } i. \end{cases} \quad (3.6)$$

Apresenta-se na Figura 11, um exemplo hipotético para um sistema de 4 (quatro) barras, no qual é sugerida a instalação de medidores nas barras 3 e 4.

Figura 11 – Exemplo de Vetor-Alocação Binário



Fonte: Produzido pelo autor

3.5.2 Matriz de Observabilidade

Com o objetivo de mapear o desempenho de um SDEE em relação aos AT:

- Define-se uma matriz contendo as informações dos valores de tensão em cada uma das barras, para eventos simulados em todas as barras (faltas, por exemplo). Para cada falta em determinada fase do sistema, uma análise nas tensões em todas as barras dessa fase é feita. Cada linha dessa matriz representa a posição do defeito (barra do sistema) e cada coluna, as tensões remanescentes nas barras.
- Adota-se um limiar, abaixo do qual um AT deve ser detectado.
- Define-se uma matriz binária denominada **Matriz de Observabilidade** (MO). Cada elemento dessa matriz é definido conforme equação abaixo:

$$mo(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{quando um defeito na barra } i \text{ faz com que a} \\ & \text{tensão na barra } j \text{ seja menor do que o limiar adotado} \\ 0, & \text{quando um defeito na barra } i \text{ faz com que a} \\ & \text{tensão na barra } j \text{ seja maior ou igual ao limiar adotado.} \end{cases} \quad (3.7)$$

Apresenta-se na Figura 12, as matrizes para um exemplo hipotético de 4 barras, considerando um limiar fixo de 0,9pu.

Figura 12 – Matriz de tensões remanescentes e Matriz de Observabilidade

	Tensão remanescente					Matriz de observabilidade			
Falta na barra 1	0,14	0,14	0,13	0,11	→	1	1	1	1
Falta na barra 2	0,91	0,13	0,12	0,11		0	1	1	1
Falta na barra 3	0,94	0,42	0,33	0,13		0	1	1	1
Falta na barra 4	0,98	0,91	0,91	0,11		0	0	0	1

Fonte: Produzido pelo autor

A primeira linha da MO mostra que para uma falta na barra 1, todas as barras do sistema hipotético sofreram um AT. A primeira coluna mostra que a barra 1 só consegue detectar um AT quando a falta acontece na própria barra 1. Para as outras linhas e colunas da MO, segue-se o mesmo raciocínio.

3.5.3 Matriz de Observabilidade Topológica

Uma das limitações do trabalho de [Olguin e Bollen \(2003\)](#) para o problema de alocação ótima de medidores de QEE reside no fato da MO garantir que os AT sejam detectados apenas nas barras do sistema, sem garantia ao longo da linha ([ESPINOSA-JUAREZ; HERNANDEZ; OLGUIN, 2009](#)). Para contornar esse problema, [Ibrahim et al. \(2012a\)](#) propuseram o uso de uma nova matriz, denominada **Matriz de Observabilidade Topológica** (MOT), na qual cada elemento é definido de acordo com a equação a seguir:

$$MOT = MO \& T, \quad (3.8)$$

sendo:

& - o operador lógico 'AND' ou 'E' ;

T - a matriz Topologia de mesma dimensão da MO.

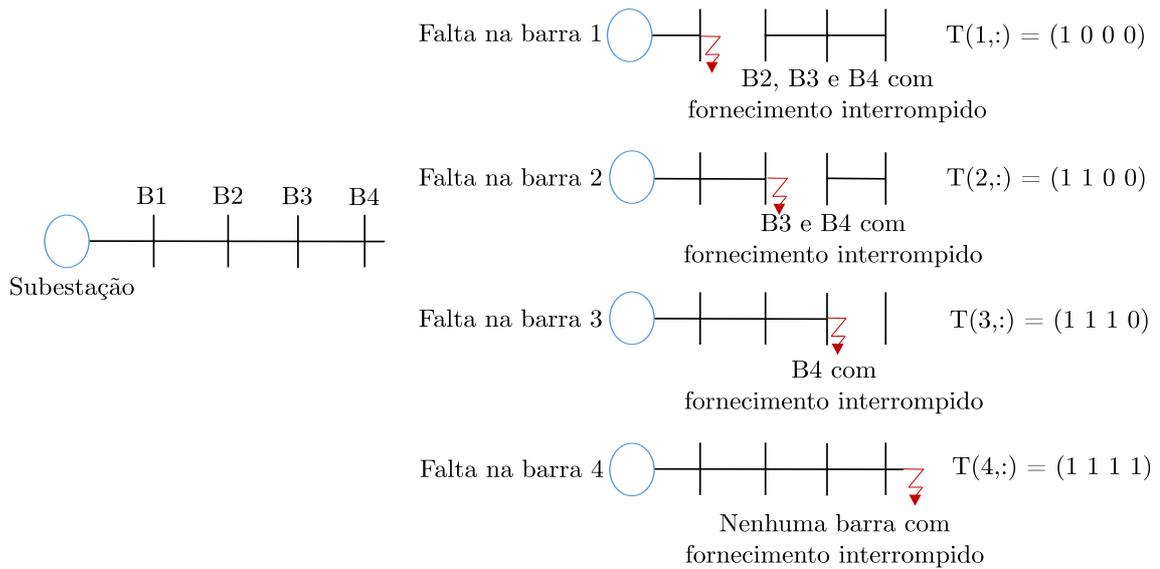
A matriz T baseia-se na Teoria dos Grafos, onde os caminhos são compostos por uma sequência de vértices (nós) e um conjunto de arestas (linhas). Um vértice inicial é conectado com um vértice final por meio de uma aresta na sequência. Durante uma falta, a barra que está sob falta tem a sua aresta separada das outras e o vértice passa a não ser mais conectado por esta aresta ([IBRAHIM et al., 2012a](#)).

A matriz T apresenta informação sobre a topologia do sistema. Ela é preenchida com 1's ou 0's dependendo da conexão do barramento da subestação com as outras barras. Cada linha da matriz T representa a posição da falta simulada, enquanto cada coluna apresenta se a barra j teve ou não o fornecimento interrompido pela falta na barra i . O elemento $t(i, j)$ é preenchido com 1 na barra onde ocorreu a falta (barra i) e nas barras à

montante da barra sob falta. Para as barras à **jusante** da barra sobre falta, o elemento $t(i, j)$ é preenchido com 0.

O preenchimento da matriz T para um sistema radial de 4 barras hipotético com um único fornecimento de energia elétrica (subestação) é apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Exemplo de Preenchimento da matriz T



Fonte: Produzido pelo autor

A MOT para o exemplo hipotético, é apresentado na Figura 14:

Figura 14 – Construção da matriz MOT do exemplo hipotético

MO					T					MOT			
1	1	1	1		1	0	0	0	=	1	0	0	0
0	1	1	1	&	1	1	0	0		0	1	0	0
0	1	1	1		1	1	1	0		0	1	1	0
0	0	0	1		1	1	1	1		0	0	0	1

Fonte: Produzido pelo autor

O aumento do número de 0's está diretamente relacionado com o aumento na quantidade de medidores para detectar AT em todo sistema, porém, essa metodologia garante a detecção de AT tanto nas barras como ao longo da linha. O conceito da MOT possibilitou o desenvolvimento de pesquisas nos temas de alocação ótima de medidores de QEE tanto nos STEE como nos SDEE, haja visto que a topologia do sistema passa a ser considerada.

3.5.4 Função Objetivo e restrição

Em um problema de alocação ótima de medidores de QEE, o objetivo principal consiste em determinar a posição de instalação dos equipamentos de modo que o número de medidores seja mínimo. Neste trabalho, a função objetivo foi definida conforme a seguir:

$$F_{obj} = \min \sum_{i=1}^n c_{inst.}(i) V_{AlocBin}(i), \quad (3.9)$$

sendo:

n - o número de barras do sistema;

$c_{inst.}(i)$ - o custo da instalação do medidor i ;

$V_{AlocBin}(i)$ - o Vetor-Alocação Binário (subseção 3.6.1) na posição i .

Em problemas de AT, a principal restrição é a escolha da posição dos medidores, a qual é comumente formulada da seguinte forma: independente do lugar que se tenha AT no SDEE, pelo menos um medidor deve ser capaz de detectá-lo. Neste sentido, um vetor denominado $V_{restrição}$, também conhecido como **Vetor-Redundância**, é definido:

$$V_{restrição} = MOT_{[n \times n]} V_{AlocBin}^t_{[n \times 1]} \geq [1]_{[n \times 1]}. \quad (3.10)$$

Esta inequação apresenta a quantidade de medidores que são, de acordo com o Vetor-Alocação Binário, capazes de monitorar os AT nas barras que correspondem a sua posição. Um exemplo de Vetor-Restrição, considerando o Vetor-Alocação Binário (Figura 11) e a MOT (Figura 14), é apresentado na Figura 15.

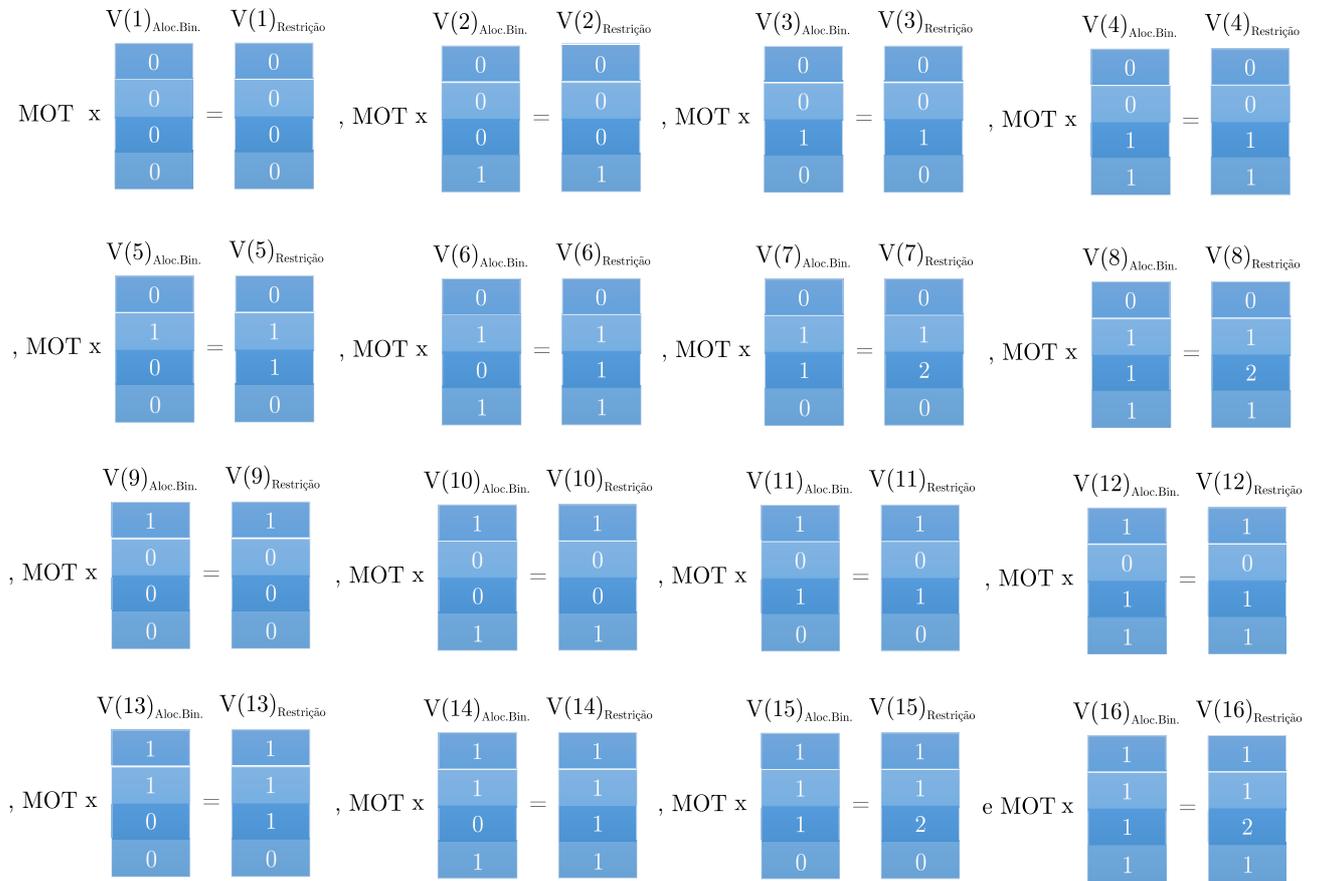
Figura 15 – Exemplo de um Vetor-Restrição

MOT		$V_{AlocBin}^t$	x	=	$V_{Restrição}$																								
<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 100px; height: 100px;"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> </table>	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1		<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 50px; height: 100px;"> <tr><td>0</td></tr> <tr><td>0</td></tr> <tr><td>1</td></tr> <tr><td>1</td></tr> </table>	0	0	1	1			<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 50px; height: 100px;"> <tr><td>0</td></tr> <tr><td>0</td></tr> <tr><td>1</td></tr> <tr><td>1</td></tr> </table>	0	0	1	1
1	0	0	0																										
0	1	0	0																										
0	1	1	0																										
0	0	0	1																										
0																													
0																													
1																													
1																													
0																													
0																													
1																													
1																													

Fonte: Produzido pelo autor

Como se vê, os AT nas barras 1 e 2 não podem ser detectados com os medidores instalados nas posições do Vetor-Alocação Binário (Figura 11). Uma forma de obter a solução desse problema é por meio da busca exaustiva de todas as situações possíveis de instalação de medidores. Por exemplo, um sistema de 4 (quatro) barras resulta em um total de 16 (2^4) combinações distintas de alocação. Esse problema é apresentado na Figura 16, na qual são apresentadas todas as combinações possíveis de instalação, assim como o $V_{Restrição}$ associado a cada uma delas.

Figura 16 – Combinações de instalação dos medidores em um sistema de 4 barras



Fonte: Produzido pelo autor

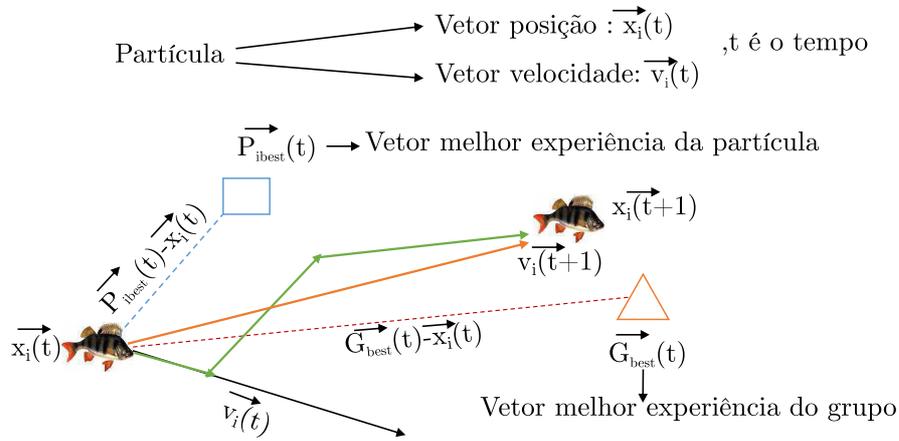
Conforme apresentado na Figura 16, apenas as soluções $V(14)_{Aloc.Bin}$ e $V(16)_{Aloc.Bin}$ satisfazem a restrição do problema. Por apresentar uma solução com uma quantidade menor de medidores (3) e considerando o custo da instalação de cada medidor como sendo o mesmo, a solução $V(14)_{Aloc.Bin}$ é considerada a solução ótima para o sistema de 4 (quatro) barras hipotético.

Na prática, o método de busca exaustiva é inviável, visto que se torna uma tarefa demorada e susceptível a erros. Portanto, os problemas reais dessa categoria requerem o uso de métodos de otimização numérica, dentre os quais selecionou-se nesta dissertação o método *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO), cujos fundamentos são apresentados na seção 3.6.

3.6 Particle Swarm Optimization (PSO)

O método *Particle Swarm Optimization* (PSO), proposto em 1995 no trabalho de Kennedy e Eberhart (1995), baseia-se no comportamento de um conjunto de pássaros, abelhas ou peixes, onde cada indivíduo é representado por um vetor referente a sua posição atual ($\vec{x}_i(t)$). A movimentação desse indivíduo para a próxima posição ($\vec{x}_i(t+1)$) vai depender da sua velocidade atual ($\vec{v}_i(t)$), definido como sendo a variação de sua posição, da melhor experiência desse indivíduo ($\vec{P}_{ibest}(t)$) e da melhor experiência do grupo de indivíduos ($\vec{G}_{best}(t)$). O processo de movimentação de uma partícula pelo PSO é apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Movimentação de uma partícula pelo método do PSO



Fonte: Produzido pelo autor

Matematicamente, o PSO é descrito a partir das equações a seguir.

$$v_i(t + 1) = wv_i(t) + c_1r_1(P_{ibest}(t) - x_i(t)) + c_2r_2(G_{best}(t) - x_i(t)), \quad (3.11)$$

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1), \quad (3.12)$$

sendo:

c_1 e c_2 - os coeficientes de aceleração;

w - o termo de inércia;

r_1 e r_2 - variáveis aleatórias uniformemente distribuídas no intervalo de 0 a 1.

O valor do termo de inércia (w) representa um parâmetro importante do método PSO, devido ao fato dele afetar diretamente a convergência e o espaço de exploração do método (KHANESAR; TESHNEHLAB; SHOOREHDELI, 2007). Conforme se observou

na literatura especializada, diferentes fórmulas têm sido utilizadas para computar o termo de inércia, como por exemplo:

$$w = 0,5 + \frac{Rand()}{2}, \quad (3.13)$$

sendo:

$Rand()$ - uma variável aleatória entre 0 e 1 (EBERHART; SHI, 2001); e

$$z = 4z(1 - z), \quad (3.14)$$

$$w = (w_1 - w_2) \left(\frac{MAXiter - iter}{MAXiter} \right) + w_2z, \quad (3.15)$$

sendo:

z - uma variável aleatória entre 0 e 1;

w_1 - o termo de inércia inicial;

w_2 - o termo de inércia final;

$MAXiter$ - o número máximo de iterações;

$iter$ - a iteração atual (FENG et al., 2007). Essas duas aproximações apresentaram a melhor eficiência e a melhor precisão na aplicação do método do PSO, respectivamente Bansal et al. (2011).

3.6.1 Binary Particle Swarm Optimization (BPSO)

O método BPSO, uma versão do PSO, é utilizado quando o espaço de solução consiste em vetores compostos por 1 (um) ou 0 (zero). Como o problema de otimização desta dissertação consiste em alocação (bit 1) ou não-alocação (bit 0) de um detector em determinada barra do SDEE, o método BPSO se ajusta perfeitamente.

A diferença principal entre os métodos BPSO e PSO consiste no cálculo da velocidade, que no método BPSO é computada via função sigmoial e a nova posição por meio de probabilidade. A formulação matemática para o método BPSO é apresentada nas equações a seguir.

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1r_1(P_{ibest}(t) - x_i(t)) + c_2r_2(G_{best}(t) - x_i(t)), \quad (3.16)$$

$$v'_{ij}(t+1) = sig(v_{ij}(t+1)) = \frac{1}{1 + e^{-v_{ij}(t)}}, \quad (3.17)$$

$$x_{ij}(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{se } r < \frac{1}{1 + e^{-v_{ij}(t)}} \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (3.18)$$

sendo:

i - o número da partícula;

j - a posição no vetor da partícula i ;

r - uma variável aleatória uniformemente distribuída no intervalo de 0 a 1.

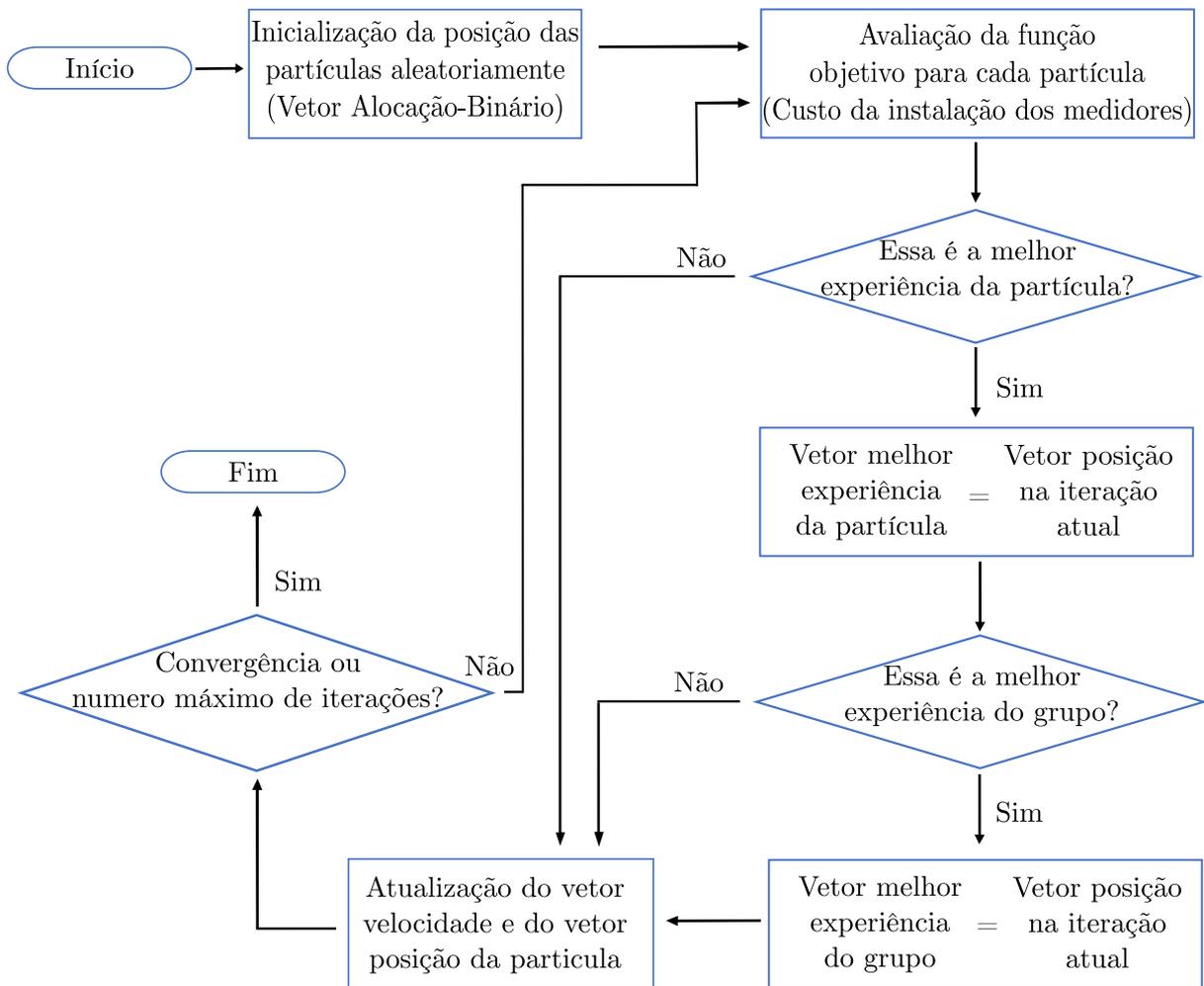
Segundo [Khanesar, Teshnehlab e Shoorehdeli \(2007\)](#), o método BPSO apresenta as seguintes dificuldades na escolha do termo de inércia:

- Valores de w maiores que 1 (um) resultam em aumento da probabilidade dos bits da partícula mudarem para 1.
- Valores de w entre -1 (menos 1) e 1 (um) resultam em velocidade igual a 0 (zero) ao longo do tempo.
- Valores de w menores que -1 (menos 1) resultam em aumento da probabilidade dos bits da partícula mudarem para 0.

Na prática, a escolha do melhor valor de w depende do problema. No capítulo 5 desta dissertação, um procedimento para escolha do valor de w é apresentado.

O fluxograma do método do BPSO utilizado nesta dissertação é apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Fluxograma do método do BPSO



Fonte: Produzido pelo autor

4 Criação da base de dados

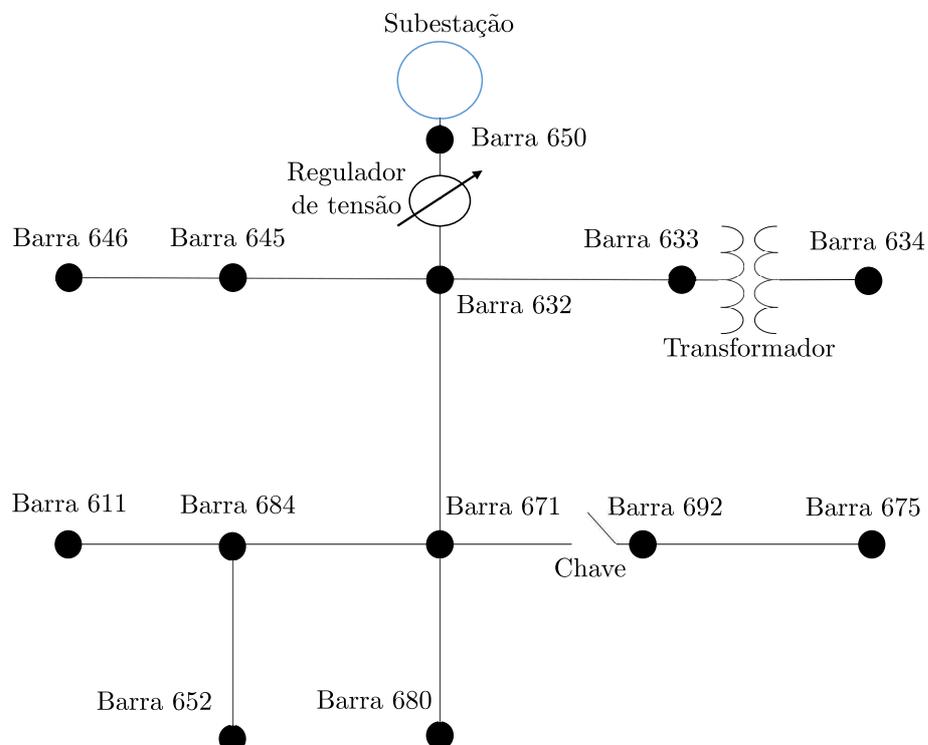
Para teste e validação do algoritmo proposto, construiu-se uma base de dados que gera AT automaticamente, a qual baseou-se na metodologia proposta por [Souza et al. \(2005\)](#), resumida abaixo:

- Seleção do sistema elétrico a ser simulado;
- Seleção do *software* para a simulação dos sistemas elétricos e dos distúrbios;
- Seleção das variáveis de simulação;
- Simulação dos distúrbios.

Nesta dissertação foram utilizados os sistemas-testes apresentados a seguir.

- Um SDEE de 13 barras desequilibrado do IEEE (Figura 19) ([IEEE, 2000](#)).

Figura 19 – Diagrama unifilar do sistema de 13 barras do IEEE



Fonte: Adaptado de [IEEE \(2000\)](#)

Tabela 2 – Variáveis de simulação para criação da base de dados

Variáveis de Simulação	Especificação
Resistência de falta	0,5 Ω , 1 Ω e 5 Ω
Carregamento (%)	25, 50, 75 e 100
Tipo de Falta	AT, AB, ABT, ABC
Limiar de detecção	0,9pu, 0,8pu, 0,7pu e 0,6pu

que tem como objetivos: simular cada caso; apagar os arquivos que não são de interesse para aplicação; converter os dados fornecidos pelo ATP em um arquivo .dat e renomear os arquivos de forma padronizada.

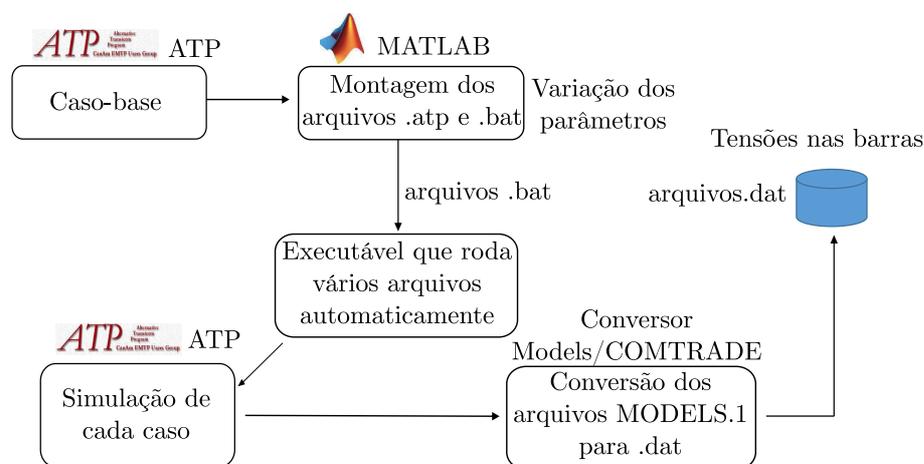
Para cada caso, uma nomenclatura foi estabelecida com o objetivo de identificar as condições ocorridas nos casos simulados. Como exemplo, tem-se:

fAT__BAR50_C25_R0,5,

que significa: aplicação de uma falta monofásica na fase A, na barra 50, considerando carregamento do sistema de 25% e resistência de falta de 0,5 Ω .

Esse processo é resumido na Figura 21, onde os arquivos .dat apresentam as tensões em todas as barras para os diversos cenários simulados. Esses arquivos são carregados em outra rotina no MATLAB®, que tem como objetivos: detectar em quais barras ocorreram AT e servir de base para a formulação do problema de otimização, descritos com mais detalhes no próximo capítulo.

Figura 21 – Processo de construção da base de dados



Fonte: Produzido pelo autor

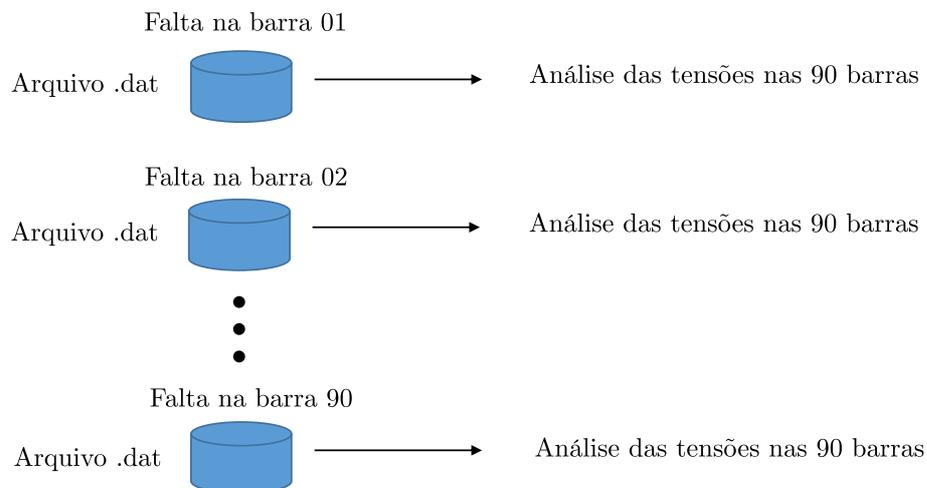
5 Algoritmo proposto

Após a conclusão das etapas de revisão bibliográfica, fundamentação teórica e criação da base de dados, elaborou-se a metodologia para implementação do algoritmo proposto, a qual é descrita em etapas. É importante esclarecer que a partir desta seção o termo "medidor" será substituído por "detector".

1. Leitura dos arquivos .dat provenientes da base de dados:

Esta etapa consiste em ler os arquivos .dat provenientes da base de dados. Cada arquivo .dat refere-se a um tipo de falta em uma determinada barra do sistema. No sistema-teste de Boa Vista-PB, por exemplo, cada cenário requer 90 arquivos .dat, referente à aplicação de falta nas 90 barras. Ao final, cada arquivo .dat apresentará as tensões remanescentes em todas as barras (Figura 22).

Figura 22 – Leitura dos arquivos .dat



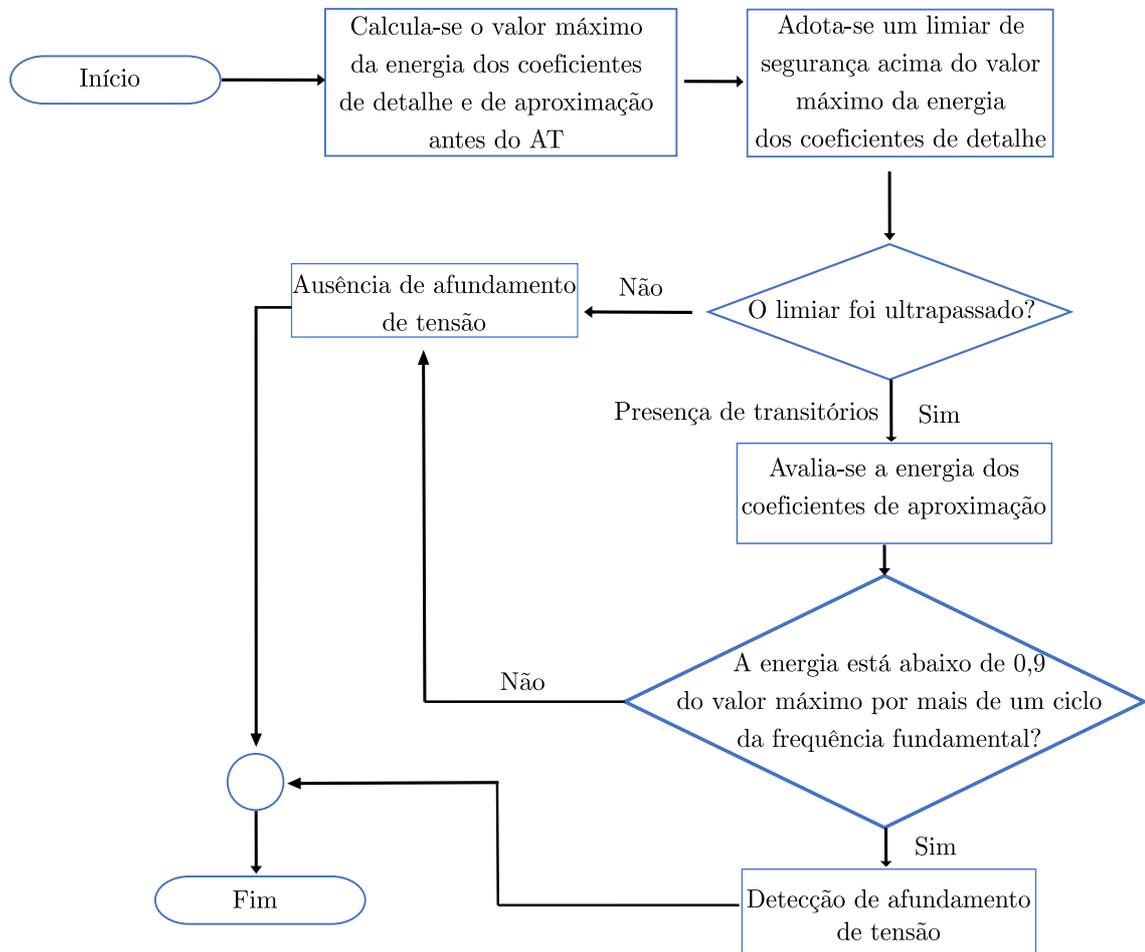
Fonte: Produzido pelo autor

2. Aplicação da TWD para detectar AT adotando um limiar escolhido:

Esta etapa consiste em aplicar a TWD para detecção dos AT. Para execução desta etapa, aplicou-se o método proposto por [Costa, Souza e Brito \(2010\)](#), que utilizou informações provenientes das energias dos coeficientes *wavelet* de aproximação e detalhe, cujo fluxograma é apresentado na Figura 23. Resumidamente, o método consiste em ler os arquivos .dat gerados, analisar as tensões remanescentes em todas as barras, verificar se o limiar adotado (0,9pu, 0,8pu, 0,7pu e 0,6pu) foi ultrapassado

e por fim, detectar a ocorrência de AT. Um exemplo da aplicação desta etapa para o sinal da Figura 7 é apresentado na Figura 24.

Figura 23 – Fluxograma do método de detecção de AT



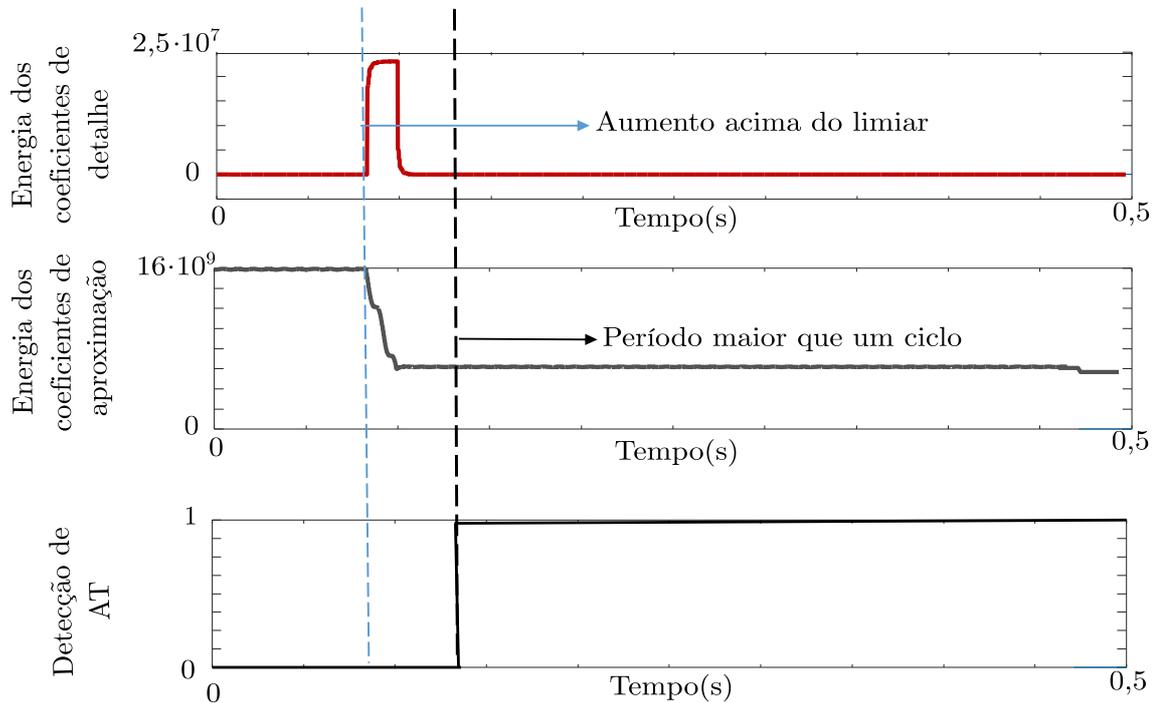
Fonte: Produzido pelo autor

3. Construção da MO do sistema:

Esta etapa consiste em calcular a matriz MO do sistema elétrico, a qual apresenta o desempenho do sistema para cada cenário simulado. Ela é uma matriz quadrada com dimensão igual a quantidade de barras do sistema. Para o sistema-teste de Boa Vista-PB, por exemplo, ela resultará em uma matriz com 90 linhas (localização da falta) e 90 colunas (tensões remanescentes em cada barra após a ocorrência da falta). Uma rotina desenvolvida no MATLAB[®] pelo autor desta dissertação escreve a matriz MO em um arquivo no formato .txt (Figura 25).

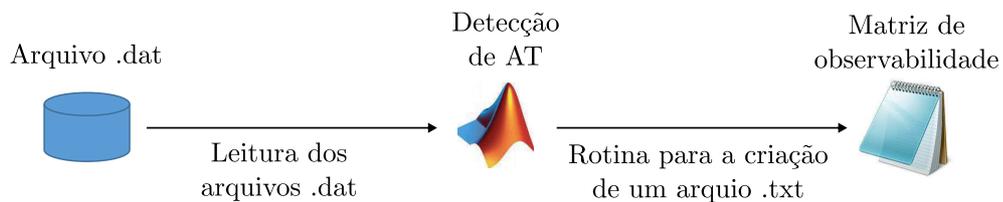
4. Construção da MOT:

Figura 24 – Detecção de um AT para o sinal da Figura 7



Fonte: Produzido pelo autor

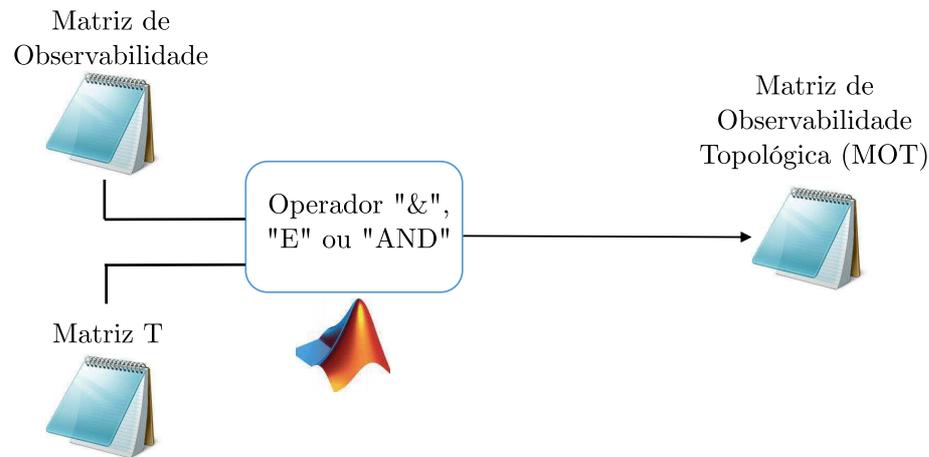
Figura 25 – Construção da Matriz de observabilidade



Fonte: Produzido pelo autor

Esta etapa consiste em calcular a matriz MOT do sistema elétrico, também uma matriz quadrada com dimensão igual a quantidade de barras do sistema. Para isso, inicialmente se constrói a matriz T manualmente e por meio da aplicação da equação 3.8, constrói-se a matriz MOT. Também neste caso, uma rotina desenvolvida no MATLAB[®] pelo autor desta dissertação, escreve a matriz MOT em um arquivo no formato .txt (Figura 26).

Figura 26 – Construção da Matriz de Observabilidade Topológica



Fonte: Produzido pelo autor

5. Leitura da matriz MOT para a implementação na rotina BPSO:

Essa etapa consiste em ler a matriz MOT de cada cenário, a qual será usada como restrição do problema de otimização (equação 3.10), resolvido via método BPSO, cuja rotina foi implementada no MATLAB[®] e desenvolvida também, pelo autor desta dissertação.

6. Escolha do melhor termo de inércia:

Essa etapa consiste em realizar uma análise estatística simples para cada sistema-teste, visando avaliar o valor de w que resultará na função objetivo com menor valor. Para isso, uma análise da convergência do método BPSO considerando 20 simulações para cada valor de w , com um intervalo de 0,1 entre os valores, foi realizada. A faixa de valores escolhida baseou-se na tendência de ocorrência de mais 0 (zero) do que 1 (um) no Vetor-Alocação Binário, ou seja, $w < -1$ (capítulo 3).

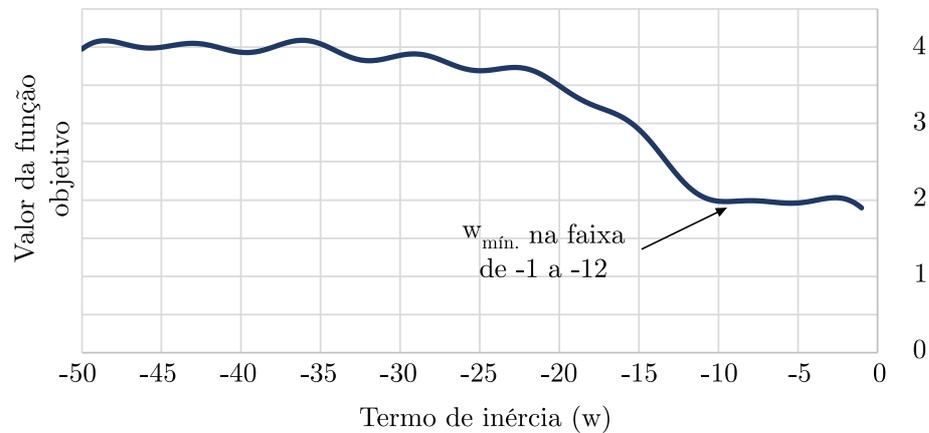
Essa análise é apresentada na Figura 27 para o sistema-teste do IEEE e na Figura 28, para o sistema-teste de Boa Vista-PB. As curvas foram obtidas utilizando a ferramenta *cftool* do MATLAB^{Br}, considerando o ajuste pela soma de senos com 6 (seis) termos. Para todos os cenários simulados, utilizou-se o termo de inércia $w = -12$.

As curvas foram obtidas utilizando a ferramenta *cftool* do MATLAB[®], considerando o ajuste pela soma de senos com 6 (seis) termos. Para todos os cenários simulados, utilizou-se o termo de inércia $w = -12$.

7. Escolher a melhor solução.

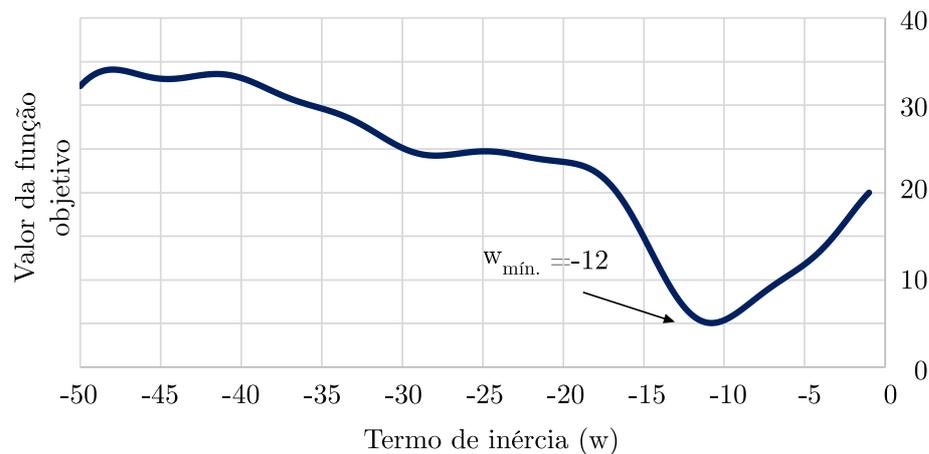
Como a rotina desenvolvida para realizar a alocação ótima de detectores de AT pode resultar em várias soluções com a mesma quantidade de medidores, para diferenciá-las, dois conceitos foram utilizados:

Figura 27 – Análise estatística da convergência do BPSO para o sistema de 13 barras do IEEE



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 28 – Análise estatística da convergência do BPSO para o sistema de 90 barras



Fonte: Produzido pelo autor

- a) **Índice de sobreposição** \rightarrow representa a redundância de cada solução, sendo definido como o somatório de todos os elementos (1's e 0's) do Vetor Redundância (associado ao Vetor-Alocação Binário) dividido pela quantidade de barras no sistema,

$$I_{\text{sobreposição}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{barras}}} \frac{V(i)_{\text{Restrição}}}{n_{\text{barras}}}, \quad (5.1)$$

sendo:

n_{barras} - o número de barras do sistema.

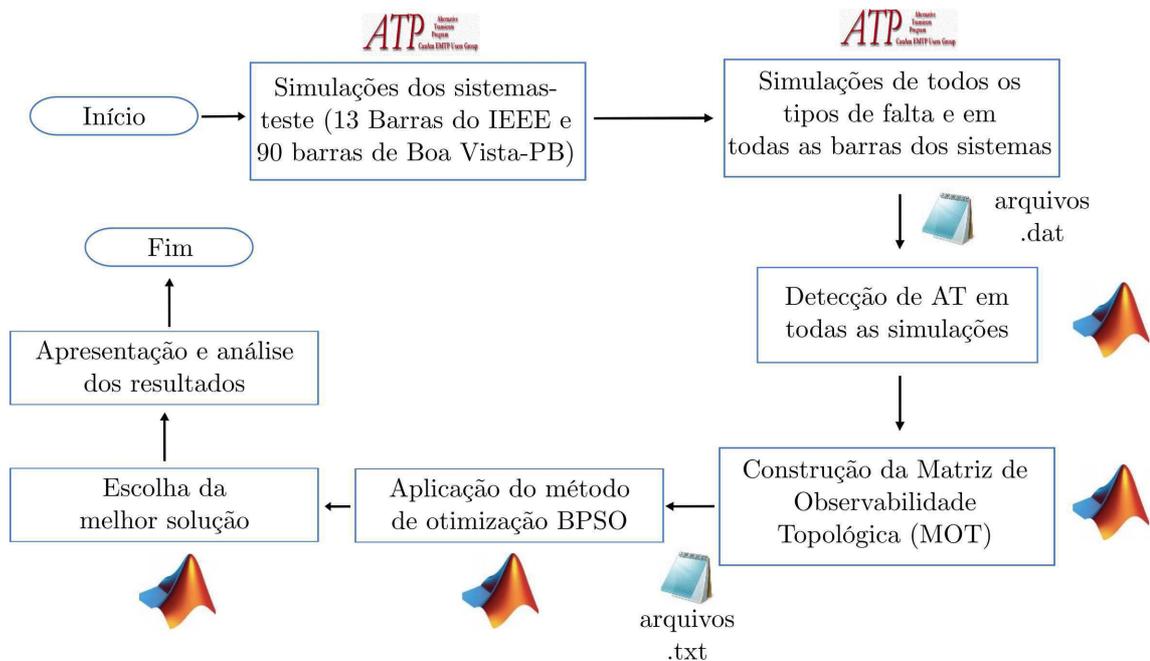
Quanto menor seu valor, menores serão a quantidade de dados gerada e o uso

da memória para processamento dos medidores que irão monitorar o sistema.

- b) **Índice de importância** → representa o grau de importância de cada barra selecionada e baseia-se na matriz T . Nesse contexto, para o sistema-teste de Boa Vista, por exemplo, a barra 01 é considerada a mais importante (Figura 20), visto que um rompimento do condutor nessa barra resultará em interrupção do fornecimento de energia para todas as demais barras do sistema. O índice de importância é usado apenas para os casos em que a solução apresentar a mesma quantidade de medidores e o mesmo índice de sobreposição. Caso contrário, esse índice é omitido.

Um resumo do algoritmo proposto é apresentado no fluxograma da Figura 29.

Figura 29 – Fluxograma do algoritmo proposto



Fonte: Produzido pelo autor

6 Resultados

O algoritmo desenvolvido nesta dissertação foi aplicado em 3 (três) SDEE: o sistema-teste hipotético, descrito no capítulo 3; o sistema desequilibrado de 13 barras do IEEE e o sistema equilibrado de 90 barras de Boa Vista-PB.

Inicialmente, utilizou-se o sistema-teste hipotético para validar o algoritmo proposto. Posteriormente, realizou-se um estudo no sistema-teste do IEEE e por fim, no sistema-teste de Boa Vista-PB.

6.1 Sistema-teste hipotético

No capítulo 3, foram apresentados os conceitos básicos para se desenvolver a formulação matemática do problema de alocação ótima de detectores de AT, tomando como exemplo o sistema-teste hipotético. Como se constatou, a matriz MOT (Figura 14) foi utilizada no processo de busca exaustiva da solução que atendesse a restrição do problema (Figura 16). Ao final, o processo indicou a instalação dos detectores nas barras 1, 2 e 4.

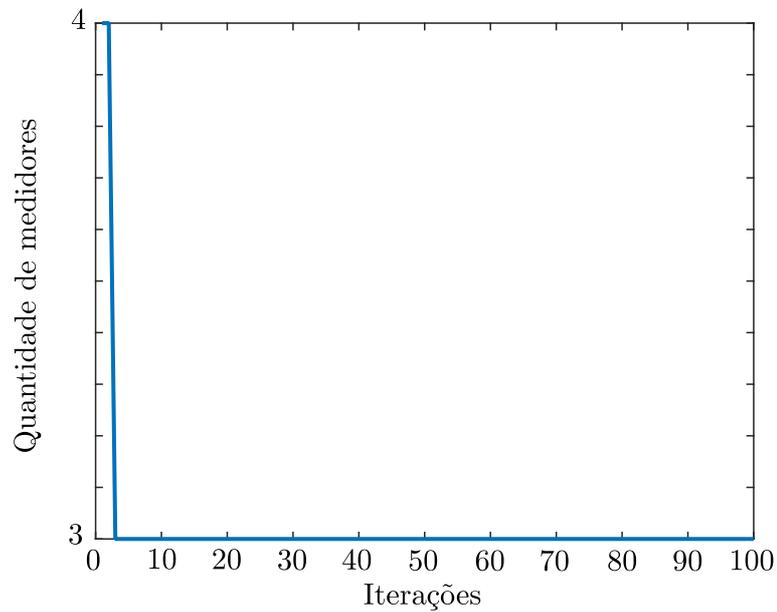
Para resolver o problema considerando o sistema-teste hipotético, via algoritmo proposto nesta dissertação, inicialmente adotaram-se os parâmetros apresentados na Tabela 3, cujos critérios de escolha foram os seguintes: i) o valor do termo de inércia baseou-se na análise estatística realizada no capítulo 5; ii) uma população pequena foi escolhida devido ao espaço de busca com apenas 16 possibilidades distintas; iii) o custo de instalação de um detector em cada barra foi considerado como sendo unitário.

Tabela 3 – Parâmetros do BPSO

Termo de inércia (w) = -12
Coefficientes de aceleração (c_1 e c_2) = 2
População (número de indivíduos) = 5
Número de iterações = 100

Ao final, o algoritmo proposto convergiu em menos de 10 iterações (Figura 30) e quatro indivíduos apresentaram a mesma solução ótima, sendo exatamente a mesma solução do método por busca exaustiva.

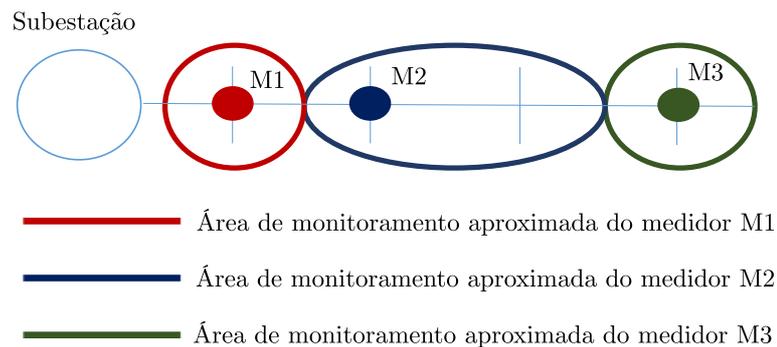
Figura 30 – Convergência do BPSO para o sistema de 4 barras



Fonte: Produzido pelo autor

O sistema-teste hipotético com os detectores instalados nas barras 1, 2 e 4, assim como a área aproximada de monitoramento de cada detector, baseada nas barras sob AT que os detectores conseguem detectar, é apresentada na Figura 31.

Figura 31 – Alocação ótima e área aproximada de monitoramento para o sistema de 4 barras



Fonte: Produzido pelo autor

6.2 Sistema-teste do IEEE

Esta etapa do estudo teve como objetivo avaliar o desempenho do algoritmo proposto quando aplicado a um sistema desequilibrado (Figura 19). Além das barras, o

o sistema é composto por um transformador, um regulador de tensão e uma chave. As linhas apresentam sete configurações diferentes, podendo ser: monofásicas (uma), bifásicas (duas), trifásicas (duas), aéreas (uma) ou subterrâneas (uma). Para cada configuração, um espaçamento entre os condutores, uma distância vertical, um raio médio geométrico, uma resistência de terra e um diâmetro do condutor são considerados IEEE (2000). As cargas do sistema são desequilibradas e as fases são dispostas como segue:

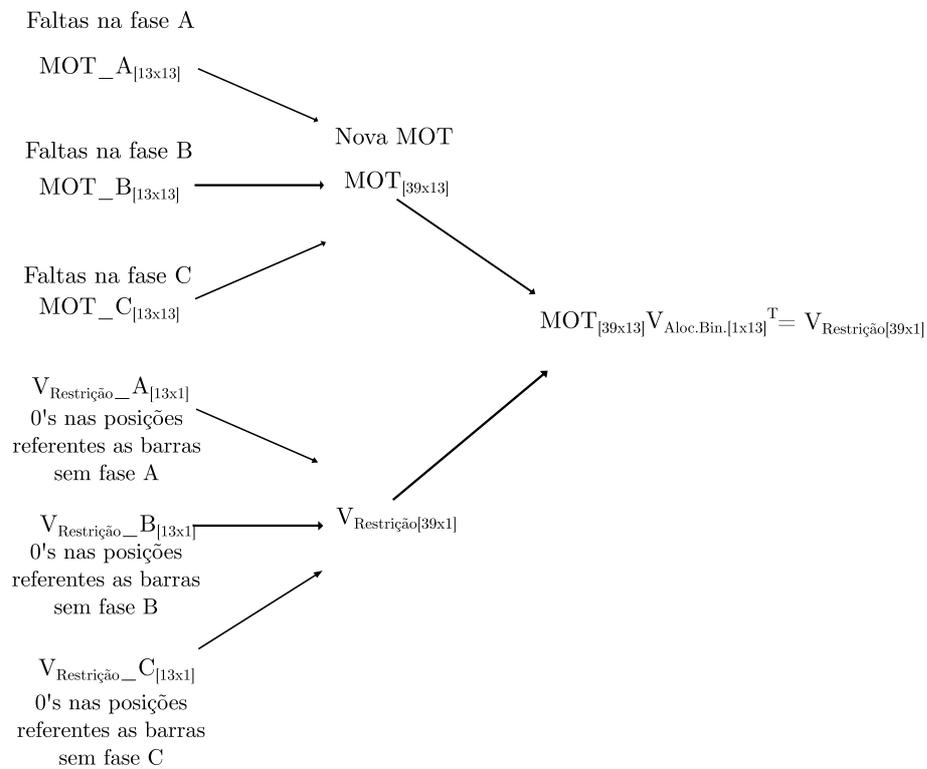
- Fase A: com exceção das linhas 632-645, 645-646 e 684-611, todas as outras possuem fase A.
- Fase B: com exceção das linhas 671-684, 684-652 e 684-611, todas as outras possuem fase B.
- Fase C: com exceção da linha 684-652, todas as outras possuem fase C.

Nas simulações, foram consideradas faltas monofásicas nas fases A, B e C, o que resultou em três cenários para análise). Para construir a matriz MOT, as seguintes proposições foram feitas:

1. Cada cenário de falta monofásica requer a construção de duas matrizes: a MO e a matriz T .
2. Nas barras com ausência fase, a simulação não foi realizada na fase em questão. Por exemplo, a barra 645 não possui a fase A, logo, não se realizou simulação de falta nessa barra.
3. Se a barra não possui uma das fases, as tensões nesta fase para qualquer falta simulada em outro local será igual a 0 (zero). Logo, a coluna da MO referente a essa fase será preenchida com 0's (zeros).
4. Se a barra não possui uma das fases e não houve simulação, as tensões remanescentes em todos os lugares, permanecem as mesmas. Logo, a linha da MO referente a essa fase será preenchida com 0's (zeros).

As MO e matrizes T , ambas de ordem 13x13, formam três matrizes MOT (equação 3.8) distintas, que se unem para formar uma nova matriz MOT, de dimensão 39x13. O Vetor-Redundância, de dimensão 39x1 (13 para cada fase), apresenta 0's nos locais referentes às barras onde não foram simulados as faltas monofásicas e 1's, caso contrário. Todas as matrizes MOT obtidas após as simulações, são detalhadas no Apêndice B. Apresenta-se na Figura 32, a formulação do problema de otimização para o sistema-teste do IEEE.

Figura 32 – Formulação do problema de otimização para o sistema desequilibrado de 13 barras.



Fonte: Produzido pelo autor

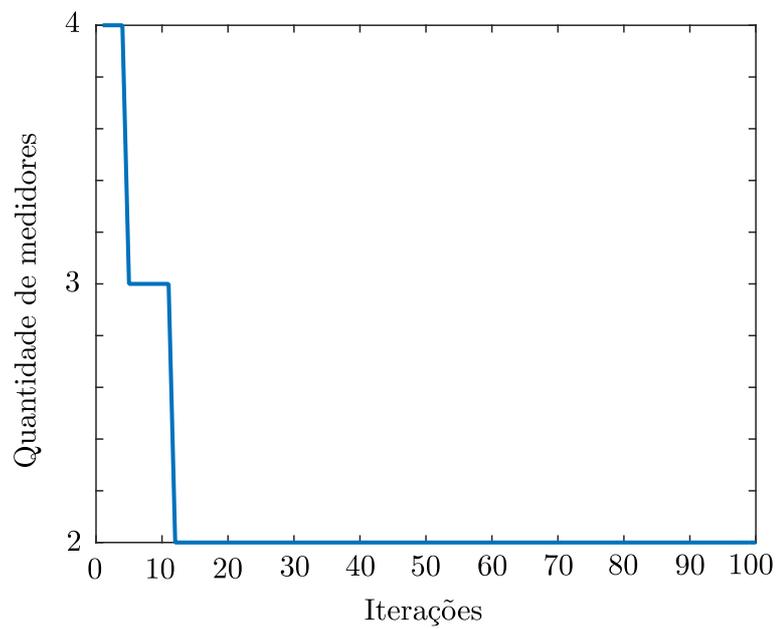
Tabela 4 – Parâmetros do AT e do BPSO para o sistema de 13 barras

Parâmetros do AT	Parâmetros do BPSO
Resistência de Falta = $0,5\Omega$	Termo de inércia (w) = -12
Tipo de Falta = monofásica	Coefficientes de aceleração (c_1 e c_2) = 2
Carregamento (%) = 100	População (número de indivíduos) = 100
Limiar de detecção = 0,9 pu	Número de iterações = 100

Para esse sistema, as características do AT e os parâmetros do método BPSO foram definidos conforme apresentado na Tabela 4.

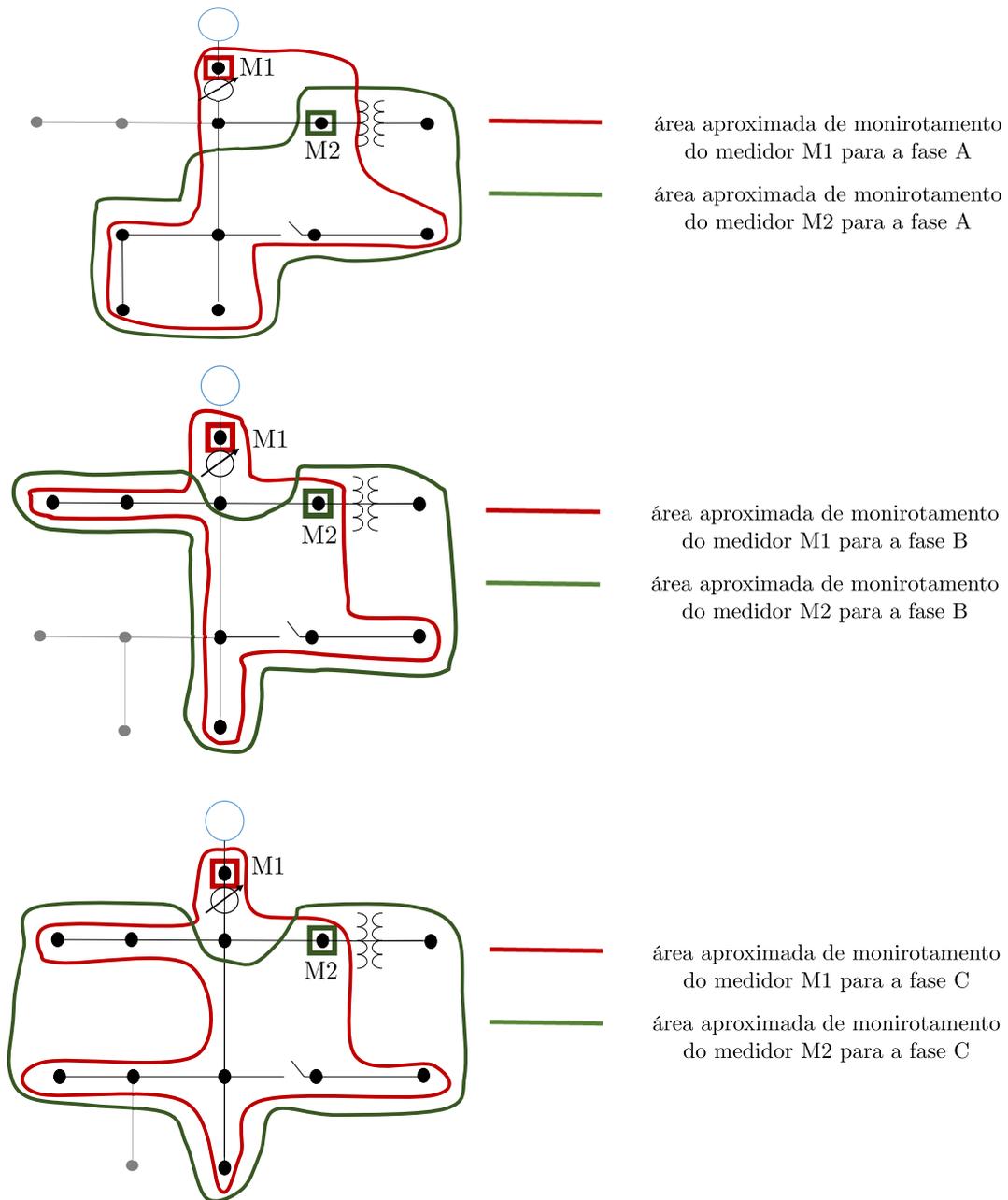
Ao final, o algoritmo proposto convergiu para a solução ótima em torno de 10 (dez) iterações (Figura 33) e forneceu como solução ótima, alocar 2 (dois) detectores nas barras 650 e 633. O esquema do sistema-teste do IEEE com: os detectores instalados, a solução ótima encontrada e a área estimada de monitoramento de cada detector (baseada nas barras sob AT que os detectores conseguem detectar para cada fase) é apresentado na Figura 34.

Figura 33 – Convergência do BPSO para o sistema de 13 barras



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 34 – Área aproximada de monitoramento do sistema da solução ótima encontrada para cada fase



Fonte: Produzido pelo autor

6.3 Sistema-teste de Boa Vista-PB

O sistema de 90 barras equilibrado foi utilizado para análise de sensibilidade dos parâmetros descritos na Tabela 2. Algumas considerações foram feitas para a validação do algoritmo proposto:

1. Os parâmetros relacionados ao método BPSO foram mantidos constantes: termo de inércia, coeficientes de aceleração, população (número de indivíduos) e o número de iterações (Tabela 4).
2. A restrição do problema para todos os cenários, considera que cada barra do sistema precisa ser monitorada por pelo menos dois detectores, com exceção da barra 1, visto que a ocorrência de uma falta nessa barra não pode ser detectada em qualquer outra barra do sistema. Essa mudança foi feita porque se um detector apresentar algum problema, outro detector será capaz de detectar um AT.
3. Foram realizadas 50 simulações para cada cenário.
4. Devido ao fato do sistema ser equilibrado, faltas monofásicas foram aplicadas apenas na fase A e faltas bifásicas, apenas nas fases A e B.

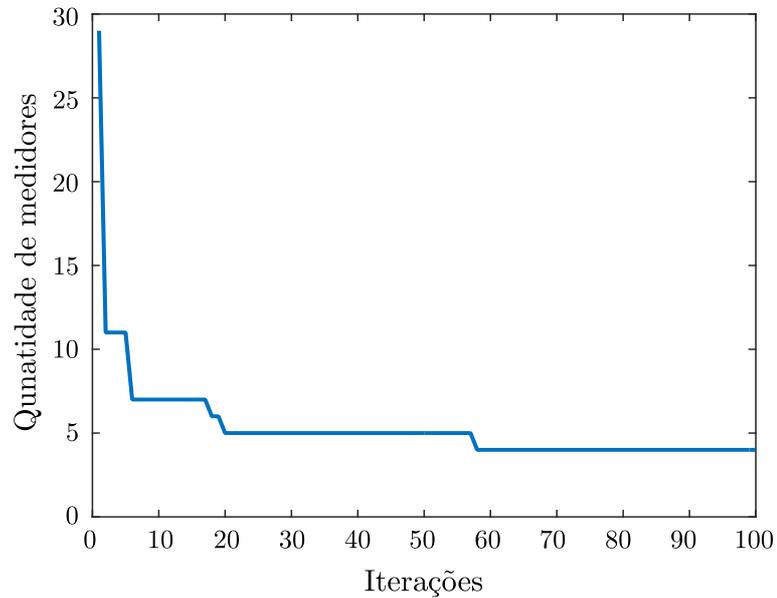
6.3.1 Carregamento do sistema

Para avaliar a influência do carregamento do sistema, aplicaram-se faltas monofásicas, com resistência de falta de $0,5\Omega$ e limiar de detecção de 0,9pu. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5. Na Figura 35 é apresentada a convergência do método BPSO para uma das simulações (dentre as 50) para o cenário 1.

Tabela 5 – Resultados para a variação do carregamento do sistema

Cenário	Carregamento (%)	Número de soluções encontradas	Melhor solução encontrada	$I_{sobreposição}$ (Melhor solução)
1	100	90	B1, B2, B23 e B58	2,41
2	75	132	B1, B2, B26 e B62	2,47
3	50	128	B1, B2, B31 e B64	2,53
4	25	144	B1, B2, B31 e B62	2,58

Figura 35 – Convergência do BPSO para uma das simulações do cenário 1



Fonte: Produzido pelo autor

Conforme mostrado na Tabela 5, a variação do carregamento: i) não influenciou na quantidade de detectores; ii) influenciou na alocação dos detectores; iii) influenciou no número de soluções obtidas. Quanto maior o carregamento do sistema, menor o número de soluções obtidas e menor o $I_{sobreposição}$.

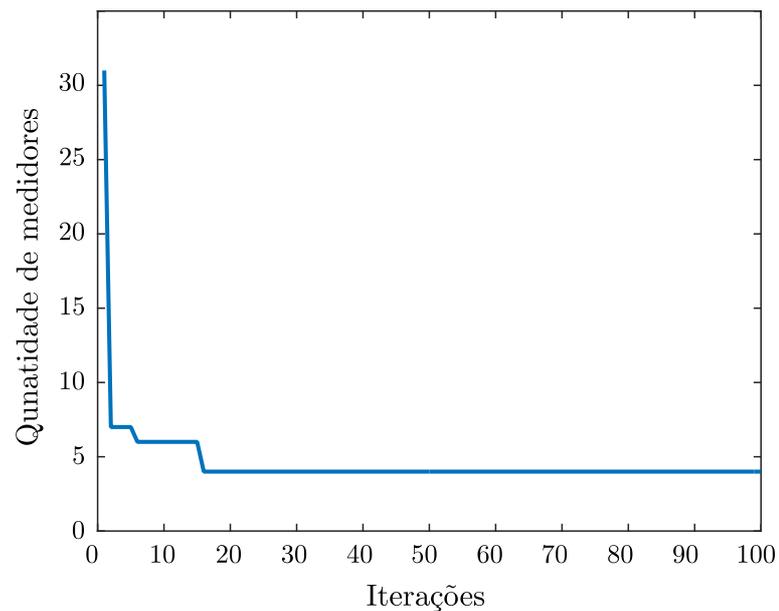
6.3.2 Tipo de falta

Para avaliar a influência do tipo de falta, considerou-se: resistência de 5Ω entre a fase e a terra; resistência de $0,0001\Omega$ entre fases; carregamento de 100% e limiar de detecção de 0,9pu. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6 e na Figura 36, a convergência do método BPSO para uma das simulações para o cenário 5.

Tabela 6 – Resultados para a variação no tipo de falta

Cenário	Tipo de falta	Número de soluções encontradas	Melhor solução encontrada	$I_{sobreposição}$ (Melhor solução)
5	AT	80	B1, B2, B15 e B56	2,25
6	AB	129	B1, B2, B15 e B25	2,46
7	ABT	114	B1, B2, B15 e B26	2,45
8	ABC	136	B1, B2, B28 e B59	2,44

Figura 36 – Convergência do BPSO para uma das simulações do cenário 5



Fonte: Produzido pelo autor

Conforme mostrado na Tabela 7, a variação do tipo de falta: i) não influenciou na quantidade de detectores; ii) influenciou na alocação dos detectores. iii) influenciou no número de soluções obtidas.

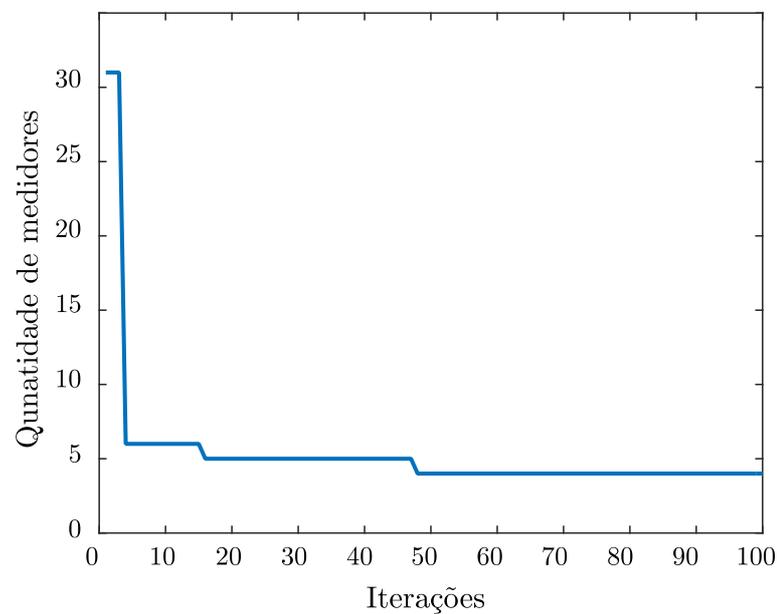
6.3.3 Resistência de falta

Para avaliar a influência do valor da resistência de falta, considerou-se: i) carregamento de 100%; ii) faltas monofásicas; iii) limiar de detecção de 0,9pu. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 7 e na Figura 37, a convergência do método BPSO para uma das simulações para o cenário 9.

Tabela 7 – Resultados para a variação na resistência de falta

Cenário	Resistência de falta	Número de soluções encontradas	Melhor solução encontrada	$I_{sobreposição}$ (Melhor solução)
1	0,5 Ω	90	B1, B2, B23 e B58	2,41
9	1 Ω	116	B1, B2, B37 e B59	2,39
5	5 Ω	80	B1, B2, B15 e B26	2,25

Figura 37 – Convergência do BPSO para uma das simulações do cenário 9

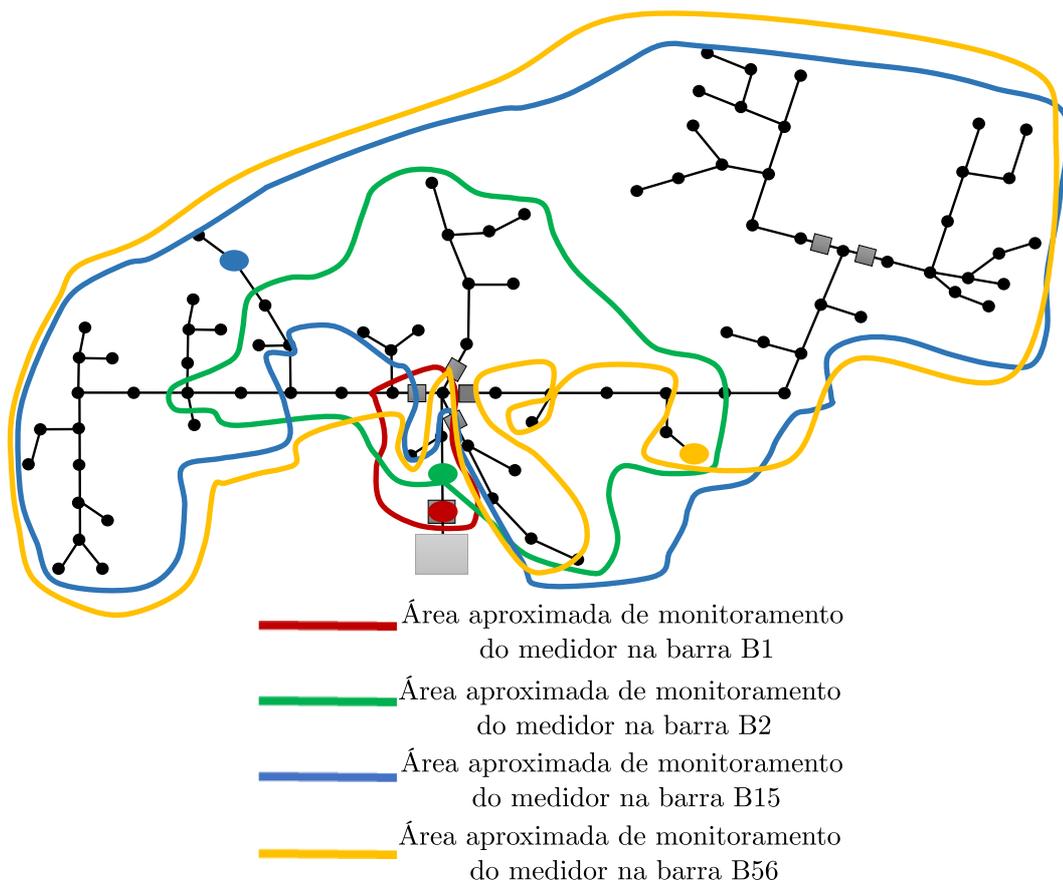


Fonte: Produzido pelo autor

Conforme mostrado na Tabela 7, a variação do valor da resistência de falta: i) não influenciou na quantidade de detectores; ii) influenciou na alocação dos detectores; iii) influenciou no número de soluções obtidas.

Todas as melhores soluções obtidas foram testadas para todos os cenários, com o objetivo de escolher aquela que satisfaz às situações de falta. Para os três parâmetros analisados, a solução com menor índice de sobreposição foi escolhida, que corresponde ao cenário 5. O local de instalação, assim como a área estimada de monitoramento de cada detector, baseada nas barras sob AT que os detectores conseguem detectar, é apresentada na Figura 38.

Figura 38 – Área aproximada de monitoramento das barras 1, 2, 15 e 56



Fonte: Produzido pelo autor

6.3.4 Variação no limiar de detecção de AT

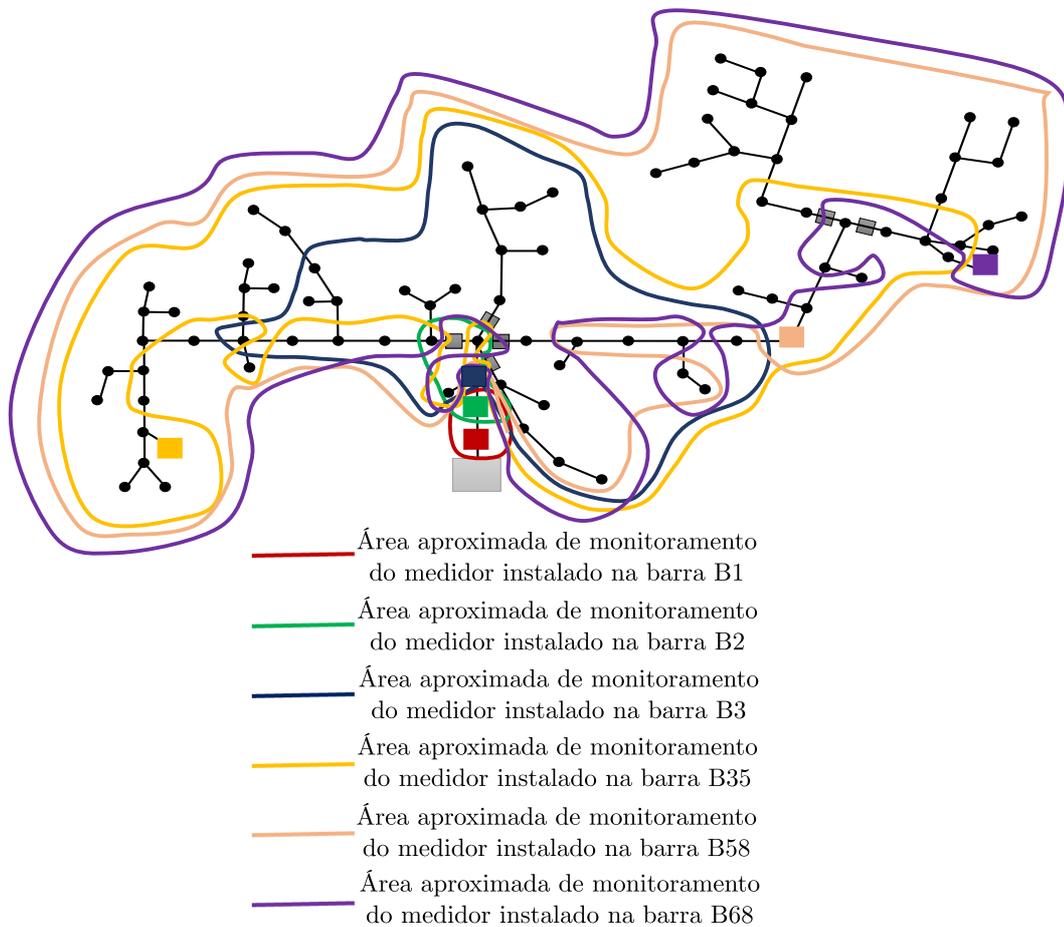
Devido à alta ocorrência de AT entre 0,5pu e 0,85pu, uma análise de sensibilidade em relação a variação no limiar de detecção de AT foi realizada. Como cenários, considerou-se: carregamento de 100%, faltas monofásicas e uma resistência de falta de 5Ω . Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8 e como se pode concluir, redução no limiar de detecção resulta em aumento na quantidade de detectores, ou seja, à medida que o limiar de detecção diminui, a área de observabilidade dos detectores também diminui. Além disso, $I_{sobreposição}$ aumenta à medida que o limiar de detecção diminui.

Tabela 8 – Resultados para a variação no limiar de detecção

Cenário	Limiar de detecção	Número de soluções encontradas	Melhor solução encontrada	$I_{sobreposição}$ (Melhor solução)
5	0,9 pu	80	B1, B2, B15 e B26	2,25
10	0,8 pu	8	B1, B2, B3 B35, B58 e B68	2,79
11	0,7 pu	2	B1, B2, B3, B4 B11, B15, B47, B56 e B57	3,64
12	0,6 pu	1	B1, B2, B3, B5, B12, B15, B32, B34, B45 B56, B57, B68 e B71	4,94

O local de instalação, assim como a área estimada de monitoramento de cada detector, baseada nas barras sob AT que os detectores conseguem detectar, para um limiar de detecção de 0,8pu, é apresentada na Figura 39. As matrizes MOT dos cenários 5 e 10 são apresentadas no Apêndice B.

Figura 39 – Área aproximada de monitoramento das barras 1, 2, 3, 35, 58 e 68



Fonte: Produzido pelo autor

Análise minuciosa dos resultados encontrados, mostrou que as barras 1 e 2 estão inclusas na solução de todos os cenários e a explicação é a seguinte: i) a ocorrência de uma falta nessas barras resultará em interrupção do fornecimento de todas as demais barras do sistema; ii) as tensões remanescentes das demais barras apresentaram valores abaixo de 0,1pu, valores que não seriam detectados como AT;

Alguns detectores foram capazes de detectar AT em locais distantes do seu ponto de instalação, evitando um número elevado de detectores e diminuindo o custo do sistema de monitoramento. Com exceção da barra 1, os AT em cada barra do sistema foram detectados por pelo menos dois detectores, satisfazendo a restrição do problema de otimização (Figuras 38 e 39).

7 Considerações finais

Devido à aleatoriedade da ocorrência dos afundamentos de tensão (AT) e sabendo que a sua principal causa está relacionada às faltas nos sistemas elétricos, a alocação ótima de detectores de QEE representa, sem dúvida, uma opção vantajosa, visto que pode resultar em redução de custos para as empresas de energia elétrica. Neste sentido, esta dissertação apresentou a formulação matemática de um novo algoritmo para resolver o problema de alocação de detectores em pontos estratégicos do sistema.

Para avaliar os parâmetros que caracterizam os AT, construiu-se uma base de dados automática para a geração de arquivos referentes às tensões remanescentes de forma rápida, eficiente e sem erros.

O algoritmo fez uso da Matriz de Observabilidade Topológica, o que possibilitou uma análise apurada das tensões remanescentes do sistema, considerando todos os cenários de falta simulados. Como ferramenta para resolução do problema de otimização, o algoritmo utilizou o método *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO), cuja escolha foi justificada pela simplicidade de implementação e obtenção rápida de ótimos locais. Os resultados obtidos mostraram que a alocação de detectores de AT em pontos estratégicos possibilitou redução no número de equipamentos e, conseqüentemente, no custo relacionado ao sistema de monitoramento.

Uma contribuição deste trabalho, que se considera relevante para o estado da arte, foi a análise de sensibilidade realizada, o qual avaliou a influência de parâmetros importantes de um AT, por exemplo: resistência de falta, carregamento do sistema, tipo de falta e limiar de detecção.

Como trabalhos futuros desta pesquisa, sugere-se:

- Analisar o algoritmo com a atuação do sistema de proteção;
- Avaliar a influência da geração distribuída na alocação ótima de detectores;
- Alocar medidores em pontos estratégicos capazes de detectarem e classificarem outros distúrbios de QEE, como: elevação de tensão, faltas de alta impedância, presença de harmônicos, energização de banco de capacitores, energização de transformadores etc.;
- Avaliar o algoritmo em tempo real;

Referências

- ABRADEE. <http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia>, acessado em 01/08/16. *Setor de Distribuição - A distribuição de Energia*, 2016. Citado na página 25.
- AI, W. L. et al. Application of binary firefly algorithm for optimal power quality monitor positioning. In: *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2013 IEEE 7th International*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 386–390. Citado na página 22.
- ALMEIDA, C. F. M.; KAGAN, N. Metodologia para a monitoração eficiente de variações de tensão de curta duração em sistemas elétricos de potência. *Dissertação de Mestrado*, Mar 2007. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 46.
- ANEEL. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 28.
- ANSI/IEEE. Ieee recommended practice for emergency and standby power systems for industrial and commercial applications. *ANSI/IEEE Std 446-1987*, p. 1–272, Feb 1987. Citado na página 30.
- BANSAL, J. C. et al. Inertia weight strategies in particle swarm optimization. In: *Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC), 2011 Third World Congress on*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 633–640. Citado na página 42.
- BARROS, A. C. Detecção e classificação de faltas de alta impedância em sistemas elétricos de potência usando lógica Fuzzy. *Dissertação de Mestrado*, may 2009. Citado na página 28.
- BLANCO-SOLANO, J.; PETIT-SUÁREZ, J. F.; ORDÓÑEZ-PLATA, G. Optimal placement of voltage sag monitors in smart distribution systems: Impact of the dynamic network reconfiguration. In: *2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 361–365. Citado na página 22.
- BOLLEN, M. H. J.; QADER, M. R.; ALLAN, R. N. Stochastic and statistical assessment of voltage dips. In: *Tools and Techniques for Dealing with Uncertainty (Digest No. 1998/200), IEE Colloquium on*. [S.l.: s.n.], 1998. p. 5/1–5/4. Citado na página 15.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. Detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão baseadas na transformada wavelet. 2006. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. Uma técnica de diagnóstico em tempo real de distúrbios transitórios baseada na transformada wavelet para uso em registradores digitais de perturbação. In: *Tese de Doutorado*. [S.l.: s.n.], 2010. Citado 3 vezes nas páginas 30, 32 e 48.
- DUGAN, R. C. et al. Electrical power systems quality. 2004. Citado 3 vezes nas páginas 15, 34 e 35.

- EBERHART, R. C.; SHI, Y. Tracking and optimizing dynamic systems with particle swarms. In: *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No.01TH8546)*. [S.l.: s.n.], 2001. v. 1, p. 94–100 vol. 1. Citado na página 42.
- ELDERY, M. A.; EL-SAADANY, F.; SALAMA, M. M. A. Optimum number and location of power quality monitors. In: *Harmonics and Quality of Power, 2004. 11th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 50–57. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 33.
- EPRI. Distribution system power quality assessment: Phase ii. voltage sag and interruption analysis. project manager a sundaram. pp5-17. *Electric Power Research Institute*, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 31.
- 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*, v. 24, n. 4, p. 2034–2042, Oct 2009. ISSN 0885-8977. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 37.
- FENG, Y. et al. Chaotic inertia weight in particle swarm optimization. In: *Second International Conference on Innovative Computing, Informatio and Control (ICICIC 2007)*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 475–475. Citado na página 42.
- GIGUER, S. Proteção de sistemas de distribuição. In: *Porto Alegre: Sagra*. [S.l.: s.n.], 1998. Citado na página 28.
- HAGHBIN, M.; FARJAH, E. Optimal placement of monitors in transmission systems using fuzzy boundaries for voltage sag assessment. In: *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–6. Citado na página 21.
- IBRAHIM, A. A. et al. A new approach for optimal power quality monitor placement in power system considering system topology. *PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY*, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 37.
- IBRAHIM, A. A. et al. Optimization methods for optimal power quality monitor placement in power systems: A performance comparison. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, v. 4, n. 1, Mar 2012. Citado 3 vezes nas páginas 21, 22 e 46.
- I.DAUBECHIES. Ten lectures on wavelets. In: *Philadelphia, USA: CBMS-NSF Regional Conference Series, SIAM*. [S.l.: s.n.], 1992. Citado na página 31.
- IEEE. <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>. acessado em 07/02/2017. In: *IEEE Power Engineering Society*. [S.l.: s.n.], 2000. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 56.
- ITIC. Disponível em: <http://www.itic.org>. acessado em fevereiro de 2017. *Technical Commitee 3 (TC3) of the Information Technology Industry Council*, Feb 2000. Citado na página 30.
- KEMPNER, T. R.; OLESKOVICZ, M. A robustez de um sistema de distribuição e a alocação de medidores de qualidade da energia elétrica frente aos afundamentos de tensão. In: *Dissertação de Mestrado*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado na página 46.

- KEMPNER, T. R.; OLESKOVICZ, M.; SANTOS, A. Q. Optimal allocation of monitors by analyzing the vulnerability area against voltage sags. In: *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 536–540. ISSN 1540-6008. Citado na página [22](#).
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 1995. v. 4, p. 1942–1948 vol.4. Citado na página [41](#).
- KHANESAR, M. A.; TESHNEHLAB, M.; SHOOREHDELI, M. A. A novel binary particle swarm optimization. In: *Control Automation, 2007. MED '07. Mediterranean Conference on*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas [41](#) e [43](#).
- MALLAT, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 11, n. 7, p. 674–693, Jul 1989. ISSN 0162-8828. Citado na página [31](#).
- OLGUIN, G.; BOLLEN, M. H. J. Optimal dips monitoring program for characterization of transmission system. In: *Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 4, p. 2490 Vol. 4. Citado 4 vezes nas páginas [19](#), [21](#), [35](#) e [37](#).
- OLGUIN, G.; VUINOVICH, F.; BOLLEN, M. H. J. An optimal monitoring program for obtaining voltage sag system indexes. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 21, n. 1, p. 378–384, Feb 2006. ISSN 0885-8950. Citado na página [20](#).
- PAULILLO, G. Qualidade de energia elétrica. In: *O Setor Elétrico*. [S.l.: s.n.]. Citado na página [26](#).
- REIS, D. C. S. et al. Um algoritmo branch and bound para o problema da alocação Ótima de monitores de qualidade de energia elétrica em redes de transmissão. *Dissertação de Mestrado*, Aug 2007. Citado 2 vezes nas páginas [20](#) e [46](#).
- SALIM, A. et al. Voltage sags cost estimation for malaysian industries. In: *International Conference Power and Energy-PECON*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado na página [16](#).
- SANTOS, W. C.; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. de. Uma revisão de modelos clássicos de faltas de alta impedância para efeito de melhoramento. *Dissertação de Mestrado*, sep 2011. Citado 5 vezes nas páginas [46](#), [72](#), [73](#), [74](#) e [75](#).
- SANTOS, W. C. et al. High impedance fault identification on distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, PP, n. 99, p. 1–1, 2016. ISSN 0885-8977. Citado na página [32](#).
- SOUZA, B. A. Distribuição de energia elétrica. sep 1997. Citado na página [26](#).
- SOUZA, B. A. et al. Construção automática de base de dados. In: *XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. [S.l.: s.n.], 2005. Citado na página [45](#).

Apêndices

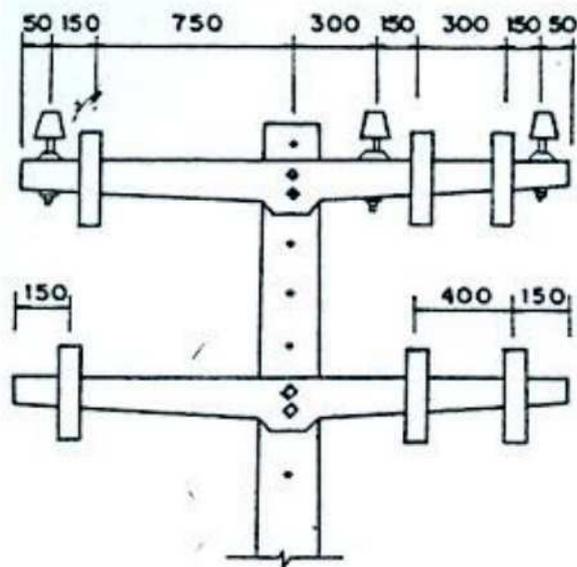
APÊNDICE A – Configuração do alimentador de Boa Vista-PB

Um dos sistemas utilizados para a simulação das faltas foi o sistema de distribuição equilibrado de 90 barras de Boa Vista-PB. Foram necessárias informações sobre as características espaciais e elétricas do alimentador. A modelagem foi feita, considerando (SANTOS; BRITO; SOUZA, 2011):

- Tensão de linha do alimentador de 13,8 kV;
- Linhas trifásicas não transpostas a parâmetros distribuídos e constantes com a frequência;
- Trechos compostos pelo cabo 4AWG (*American Wire Gauge*);
- Cargas de pontos próximos ao longo do alimentador, agrupadas em uma única barra, resultando em um alimentador com 90 barras;
- Fator *skin* para os cabos de 0,33;
- Resistividade de terra de $350\Omega\text{m}$;
- Modelo de impedância constante para as cargas;
- Cargas modeladas como circuitos RL paralelos conectados entre cada fase de cada barra e a terra;
- Fator de potência médio de 0,955;

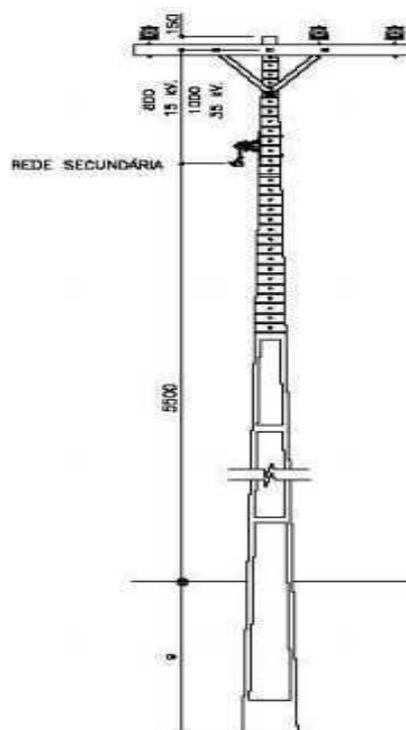
As configurações do alimentador são apresentadas nas Figuras 40 e 41 e nas Tabelas 9 e 10.

Figura 40 – Configuração das cruzetas



Fonte: Santos, Brito e Souza (2011)

Figura 41 – Estruturas dos postes



Fonte: Santos, Brito e Souza (2011)

Tabela 9 – Comprimentos dos trechos do alimentador

De	Para	Comprimento (m)	De	Para	Comprimento (m)
SE	1	430	55	56	1000
1	2	430	54	57	2000
2	3	900	57	58	2000
3	4	1900	58	59	1200
3	5	1500	59	60	2000
5	6	1000	60	61	2000
5	45	2000	59	62	1100
5	50	1300	62	63	2500
5	38	2000	62	64	1100
6	7	2000	64	65	2000
7	8	1000	65	66	2000
7	9	1000	66	67	1400
6	10	1500	67	68	1400
10	11	1500	66	72	1200
11	12	1500	72	69	1200
12	13	1500	72	70	1800
12	14	1800	70	71	1800
14	15	1800	66	73	2500
15	16	2000	73	74	2500
11	17	1700	74	75	2000
17	18	1700	74	77	2100
18	19	2000	75	76	2500
18	20	1500	64	78	2000
20	21	1500	78	79	2000
21	22	1000	79	80	2300
21	23	1200	80	81	1500
18	24	1300	81	84	1500
24	25	1200	81	82	2000
25	26	1000	82	83	2000
26	27	500	80	85	2400
26	28	600	85	86	3000
25	29	1300	86	87	1600
29	37	1500	87	88	3000
37	36	1500	86	89	1200
29	30	1500	85	90	2000
30	31	1500	38	39	1500
31	35	1100	39	42	1200
31	32	1200	39	40	1000
32	33	1000	40	43	1100
32	34	1500	43	44	1000
50	51	1200	40	41	1600
51	52	1200	45	46	600
51	53	1200	45	47	2000
53	54	1200	47	48	2000
54	55	1000	48	49	2400

Fonte: Santos, Brito e Souza (2011)

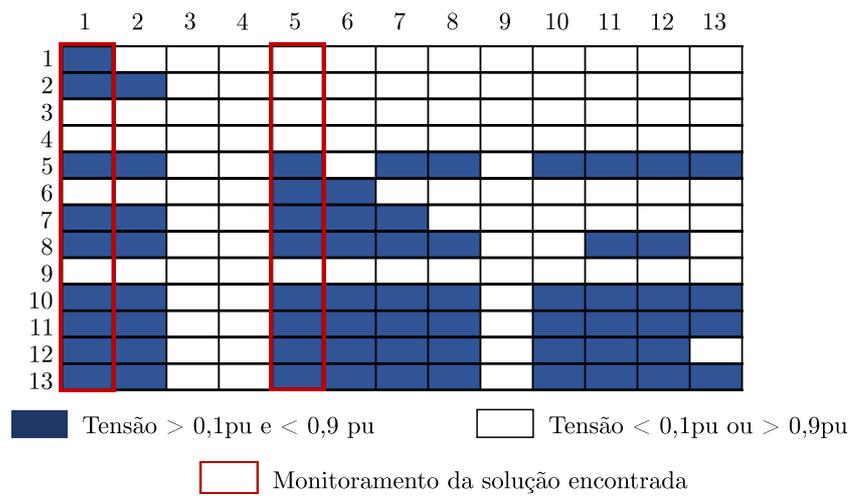
Tabela 10 – Cargas distribuídas ao longo do alimentador

Barra	Carga (kVA)	Barra	Carga (kVA)
1	0	46	20
2	0	47	15
3	75	48	25
4	285	49	15
5	502,5	50	1245
6	35	51	150
7	10	52	20
8	15	53	0
9	30	54	0
10	15	55	10
11	30	56	5
12	5	57	0
13	10	58	0
14	10	59	20
15	10	60	80
16	20	61	315
17	30	62	35
18	15	63	45
19	40	64	30
20	15	65	60
21	15	66	45
22	35	67	25
23	30	68	5
24	30	69	10
25	15	70	15
26	15	71	25
27	15	72	10
28	5	73	25
29	60	74	25
30	10	75	15
31	10	76	25
32	15	77	25
33	15	78	100
34	5	79	20
35	15	80	90
36	35	81	5
37	15	82	15
38	360	83	15
39	0	84	75
40	0	85	30
41	55	86	10
42	20	87	25
43	20	88	5
44	15	89	5
45	45	90	5

Fonte: Santos, Brito e Souza (2011)

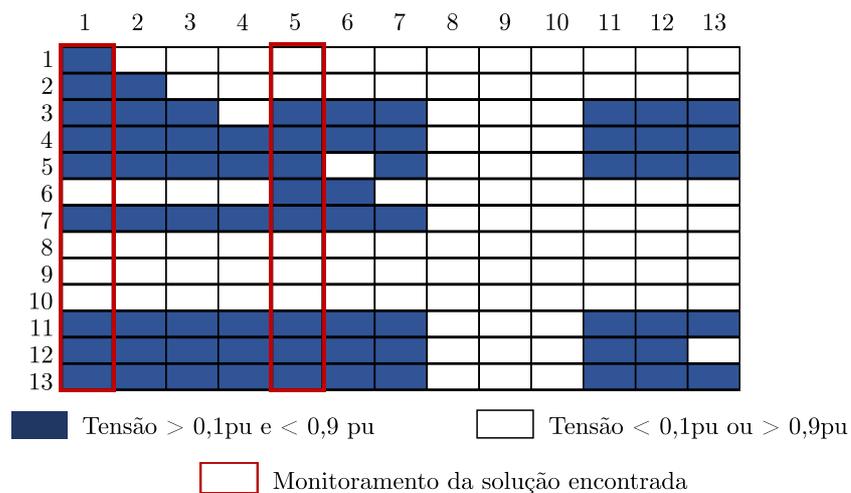
APÊNDICE B – Matrizes do problema de otimização

Figura 42 – MOT para o sistema de 13 barras (Fase A)



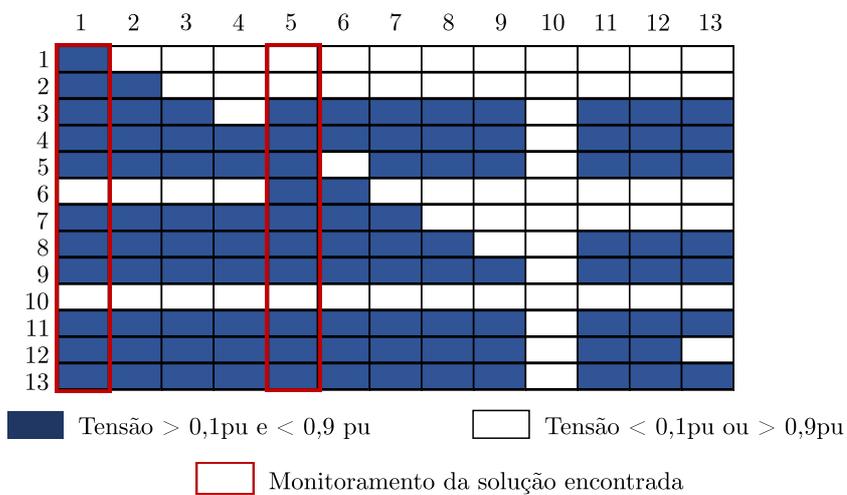
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 43 – MOT para o sistema de 13 barras (Fase B)



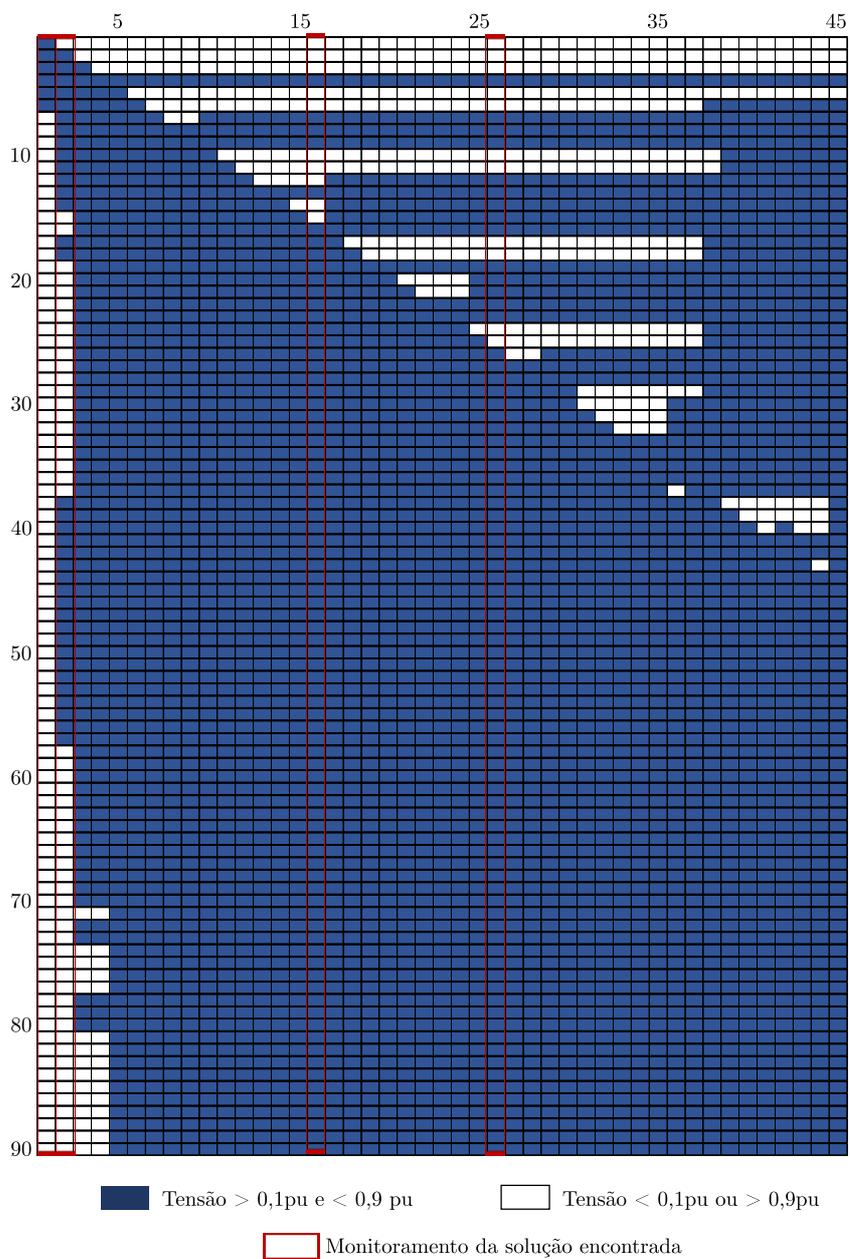
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 44 – MOT para o sistema de 13 barras (Fase C)



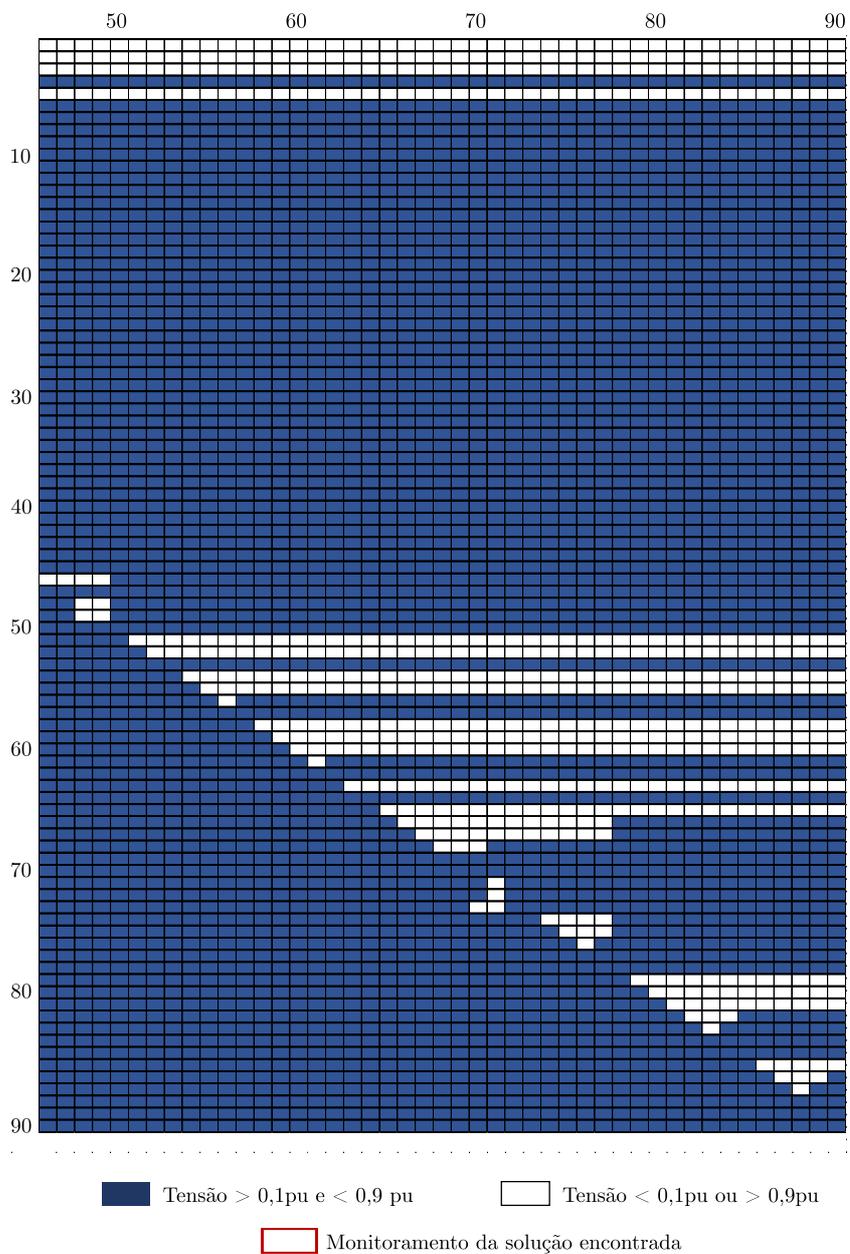
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 45 – MOT do cenário 5 (Colunas 1 a 45)



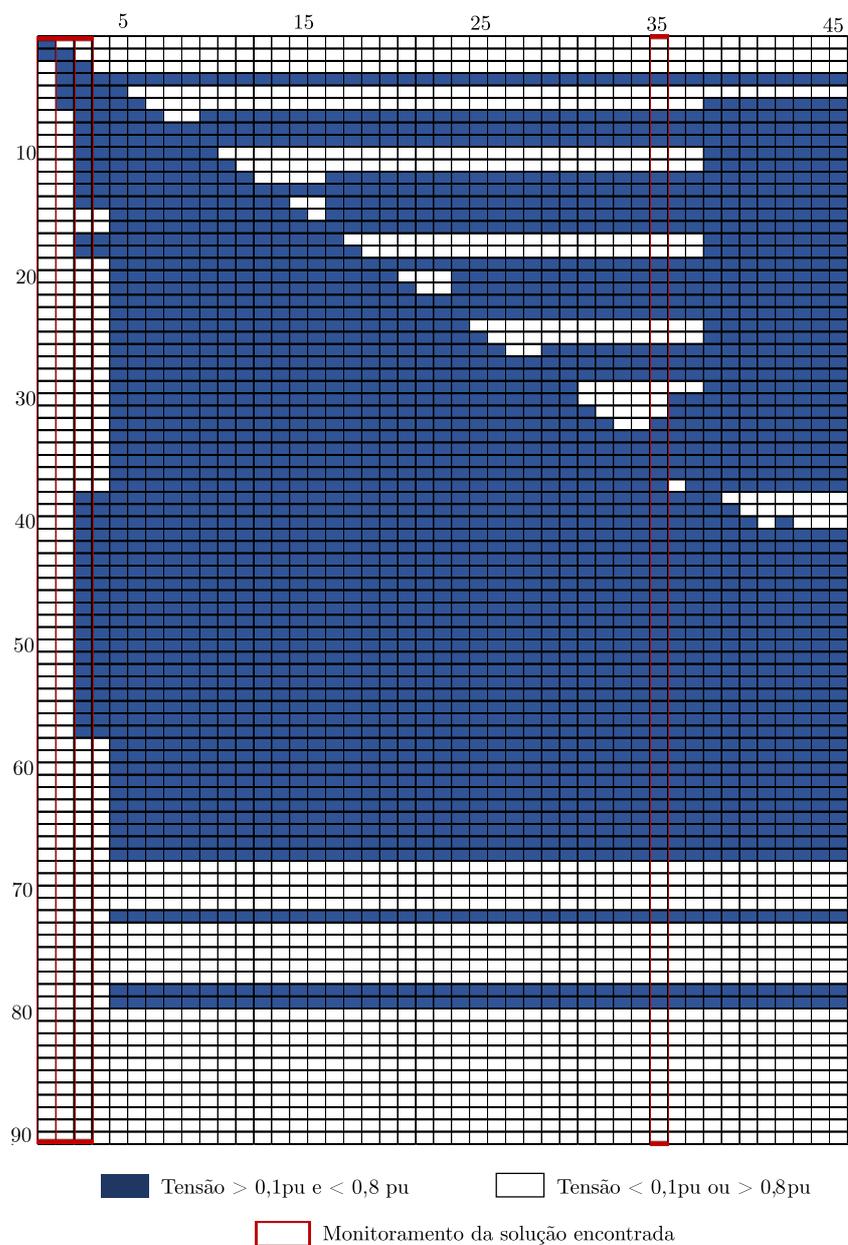
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 46 – MOT do cenário 5 (Colunas 46 a 90)



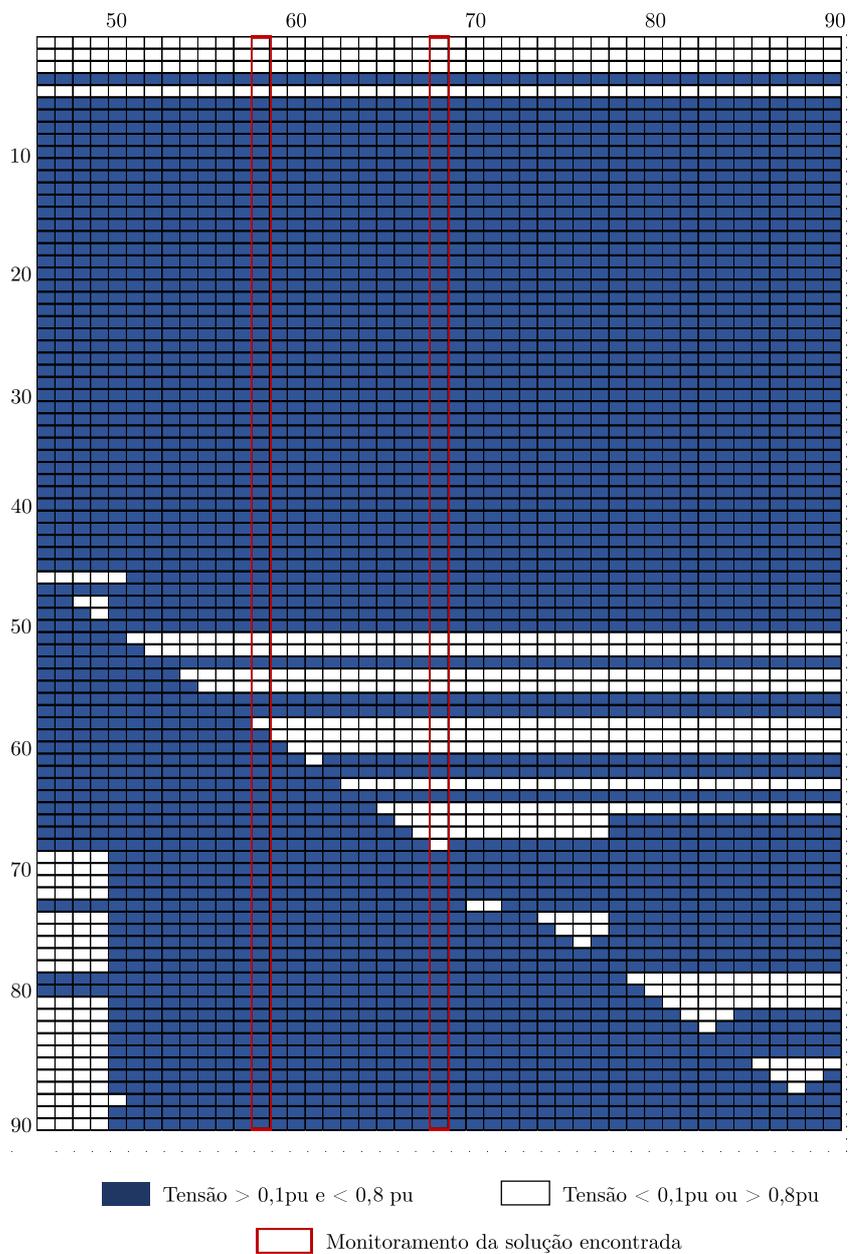
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 47 – MOT do cenário 10 (Colunas 1 a 45)



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 48 – MOT do cenário 10 (Colunas 46 a 90)



Fonte: Produzido pelo autor