



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas  
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Alocação Ótima de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição  
de Energia Elétrica: Abordagem para Redes Monofásicas e Trifásicas**

Miguel Monteiro Costa

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

JOÃO MONLEVADE

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Alocação Ótima de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição de  
Energia Elétrica: Abordagem para Redes Monofásicas e Trifásicas

Miguel Monteiro Costa

Trabalho apresentado ao  
Departamento de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Ouro  
Preto como parte dos requisitos  
exigidos para a obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Engenharia  
Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Carlos  
Henrique N. R. Barbosa

JOÃO MONLEVADE

2016

C837a Costa, Miguel Monteiro.  
Alocação ótima de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica: abordagem para redes monofásicas e trifásicas [manuscrito] / Miguel Monteiro Costa. - 2016.

90f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Engenharia Elétrica. 2. Capacitores. 3. Energia elétrica - redes de distribuição. 4. Otimização. I. Barbosa, Carlos Henrique Nogueira de Resende. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621.311

Catálogo: [ficha@sisbin.ufop.br](mailto:ficha@sisbin.ufop.br)



**ANEXO IV - ATA DE DEFESA**

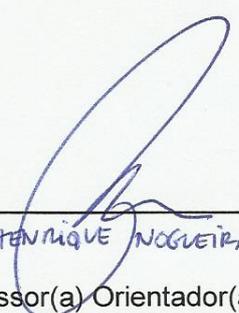
Aos 11 dias do mês de agosto de 2016, às 10 horas, no bloco C deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo formando Miguel Monteiro Costa, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Carlos Henrique Nogueira de R. Barbosa, Wilingthon Guerra Zvietcovich e Juan Carlos Galvis Manso.

O candidato apresentou a monografia intitulada: Alocação Ótima de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica: Abordagem para Redes Monofásicas e Trifásicas. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela APROVAÇÃO do candidato, com a nota média 9,2, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo formando.

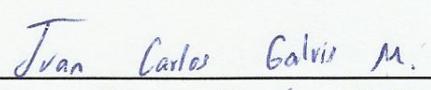
Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

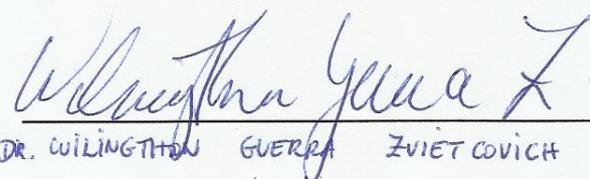
Banca Examinadora	Nota
CARLOS HENRIQUE NOGUEIRA DE RESENDE BARBOSA	9,2
JUAN CARLOS GALVIS MANSO	9,0
WILINGTHON GUERRA ZVIETCOVICH	9,4
<b>Média</b>	

João Monlevade, 11 de AGOSTO de 2016.

  
\_\_\_\_\_  
DR. CARLOS HENRIQUE NOGUEIRA DE R. BARBOSA  
Professor(a) Orientador(a)

  
\_\_\_\_\_  
MIGUEL MONTEIRO COSTA  
Aluno (a)

  
\_\_\_\_\_  
DR. JUAN CARLOS GALVIS MANSO  
Professor(a) Convidado(a)

  
\_\_\_\_\_  
DR. WILINGTHON GUERRA ZVIETCOVICH  
Professor(a) Convidado(a)



---

**ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE**

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Alocação Ótima de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica: Abordagem para Redes Monofásicas e Trifásicas” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 11 de agosto de 2016.

*Miguel Monteiro Costa*

---

Nome completo do(a) aluno(a)

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder mais esta conquista.

Ao professor Dr. Carlos Henrique N. R. Barbosa pela competência e disposição em me orientar neste trabalho.

À minha família e amigos por todo apoio e incentivo.

À minha namorada Ana Luisa por todo companheirismo e apoio.

E a todos os meus professores, que certamente contribuíram muito com a minha formação.

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Apresentação do Problema</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b>	<b>1</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>2</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>MODELAGEM DE ELEMENTOS DE REDE</b>	<b>6</b>
<b>3.1</b>	<b>Capacitores de Potência</b>	<b>6</b>
3.1.1	Estrutura básica de capacitores	6
3.1.2	Características dos Bancos de Capacitores em Redes de Distribuição Primária	7
3.1.2.1	Configuração de Instalação	8
3.1.3	Metodologia usada por empresas de distribuição	9
3.1.4	Modelagem do Banco de Capacitor	10
<b>3.2</b>	<b>Modelagem das Cargas</b>	<b>10</b>
3.2.1	Modelo ZIP Polinomial	11
<b>3.3</b>	<b>Modelagem das linhas</b>	<b>12</b>
<b>3.4</b>	<b>Fluxo de Potência - Método de Varredura</b>	<b>13</b>
3.4.1	Método de Varredura em Redes Monofásicas	14
3.4.2	Método de Varredura em Redes Trifásicas	17
<b>4</b>	<b>MODELO MATEMÁTICO PARA O PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO</b>	<b>19</b>
<b>4.1</b>	<b>Função Objetivo para o Problema de Alocação de Bancos de Capacitores</b>	<b>19</b>
<b>4.2</b>	<b>Restrições para o Problema de Alocação de Bancos de Capacitores</b>	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>ESTRATÉGIAS DE OTIMIZAÇÃO</b>	<b>23</b>
<b>5.1</b>	<b>Particle Swarm Optimization - PSO</b>	<b>23</b>
5.1.1	Codificações	27
5.1.2	PSO aplicada ao Problema de Alocação de Bancos de Capacitores	28
5.1.3	Exemplo Aplicado envolvendo a PSO	29
<b>5.2</b>	<b>Variable Neighborhood Search - VNS</b>	<b>30</b>
5.2.1	VNS aplicada ao Problema de Alocação de Bancos de Capacitores	32
5.2.2	Exemplo Aplicado envolvendo a VNS	32
<b>6</b>	<b>TESTES E RESULTADOS</b>	<b>35</b>

<b>6.1</b>	<b>Implementação e Validação dos Métodos Utilizados</b>	<b>35</b>
6.1.1	Implementação e Validação do Método de Varredura	35
6.1.2	Implementação e Validação da PSO	35
6.1.3	Implementação e Validação da VNS	36
<b>6.2</b>	<b>Redes Usadas como Sistemas Teste</b>	<b>37</b>
<b>6.3</b>	<b>Sistema de 34 Barras</b>	<b>40</b>
<b>6.4</b>	<b>Sistema de 70 Barras</b>	<b>50</b>
<b>6.5</b>	<b>Sistema de 222 Barras</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>63</b>
7.1	Sugestões de Trabalhos Futuros	63
	Referências	64

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Triângulo de Potências . . . . .	1
Figura 2 – Representação de um capacitor . . . . .	6
Figura 3 – Bancos de Capacitores . . . . .	7
Figura 4 – Fluxo reativo do alimentador . . . . .	9
Figura 5 – Continuação - Fluxo reativo do alimentador . . . . .	10
Figura 6 – Modelo de Linha Curta . . . . .	13
Figura 7 – Modelo Trifásico de Linha Curta . . . . .	13
Figura 8 – Rede de distribuição radial típica . . . . .	14
Figura 9 – Fluxo de Potência . . . . .	14
Figura 10 – Fluxograma do Método de Varredura . . . . .	16
Figura 11 – Fluxograma do Modelo Completo . . . . .	22
Figura 12 – Algoritmo do Método PSO . . . . .	26
Figura 13 – Exemplo de solução na simulação "Alocação 1". Sistema de 10 barras .	27
Figura 14 – Exemplo de solução na simulação "Alocação 4". Sistema de 10 barras .	27
Figura 15 – Exemplo de representação da variável 'Posição' para a PSO . . . . .	28
Figura 16 – Exemplo de representação da variável 'Velocidade' para o método PSO	28
Figura 17 – Vetor inicial para a 'Posição' das partículas . . . . .	29
Figura 18 – Vetor 'fitness' para a iteração 1 . . . . .	29
Figura 19 – Variáveis $G_{best}$ e $G_{best\_fitness}$ para a iteração 1 . . . . .	30
Figura 20 – Funcionamento da VNS . . . . .	32
Figura 21 – Solução Inicial . . . . .	33
Figura 22 – Soluções Vizinhas . . . . .	33
Figura 23 – Soluções Vizinhas Válidas . . . . .	34
Figura 24 – Solução corrente atualizada . . . . .	34
Figura 25 – Rede Trifásica de 34 barras . . . . .	38
Figura 26 – Rede Monofásica de 70 barras . . . . .	39
Figura 27 – Soluções encontradas para cada método, na simulação 'Alocação 1' para a rede de 34 barras. Solução da PSO em vermelho e da VNS em azul .	41
Figura 28 – Soluções encontradas para cada método, na simulação 'Alocação 2' para a rede de 34 barras. Solução da PSO em vermelho e da VNS em azul .	41
Figura 29 – Soluções encontradas para cada método, na simulação 'Alocação 3' para a rede de 34 barras. Solução da PSO em vermelho e da VNS em azul .	41
Figura 30 – Soluções encontradas para cada método, na simulação 'Alocação 4' para a rede de 34 barras. Solução da PSO em vermelho e da VNS em azul .	42
Figura 31 – Perfis de Tensão encontrados para a fase A, para a rede de 34 Barras .	43
Figura 32 – Perfis de Tensão encontrados para a fase B, para a rede de 34 Barras .	44

Figura 33 – Perfis de Tensão encontrados para a fase C, para a rede de 34 Barras . . . . .	45
Figura 34 – Comportamento da Função Objetivo, na simulação 'Alocação 1' para a PSO, para o sistema de 34 Barras . . . . .	49
Figura 35 – Comportamento da Função Objetivo, na simulação 'Alocação 1' para a VNS, para o sistema de 34 Barras . . . . .	49
Figura 36 – Soluções encontradas para cada método, na simulação 'Alocação 1' para a rede de 70 barras. Solução da PSO em vermelho e da VNS em azul . . . . .	51
Figura 37 – Soluções encontradas para cada método, na simulação 'Alocação 2' para a rede de 70 barras. Solução da PSO em vermelho e da VNS em azul . . . . .	52
Figura 38 – Soluções encontradas para cada método, na simulação 'Alocação 3' para a rede de 70 barras. Solução da PSO em vermelho e da VNS em azul . . . . .	53
Figura 39 – Soluções encontradas para cada método, na simulação 'Alocação 4' para a rede de 70 barras. Solução da PSO em vermelho e da VNS em azul . . . . .	54
Figura 40 – Perfis de Tensão encontrados para a rede de 70 barras . . . . .	56
Figura 41 – Perfis de Tensão encontrados para a rede de 222 Barras . . . . .	61
Figura 42 – Função Easom . . . . .	66
Figura 43 – Função EggHolder . . . . .	66
Figura 44 – Função Griewank . . . . .	67
Figura 45 – Comportamento da Função Objetivo, na simulação 'Alocação 2' para a PSO, para o sistema de 34 Barras . . . . .	68
Figura 46 – Comportamento da Função Objetivo, na simulação 'Alocação 2' para a VNS, para o sistema de 34 Barras . . . . .	69
Figura 47 – Comportamento da Função Objetivo, na simulação 'Alocação 3' para a PSO, para o sistema de 34 Barras . . . . .	69
Figura 48 – Comportamento da Função Objetivo, na simulação 'Alocação 3' para a VNS, para o sistema de 34 Barras . . . . .	70
Figura 49 – Comportamento da Função Objetivo, na simulação 'Alocação 4' para a PSO, para o sistema de 34 Barras . . . . .	70
Figura 50 – Comportamento da Função Objetivo, na simulação 'Alocação 4' para a VNS, para o sistema de 34 Barras . . . . .	71
Figura 51 – Comportamento da Função Objetivo na rede de 70 barras, para a PSO na simulação 'Alocação 1' . . . . .	71
Figura 52 – Comportamento da Função Objetivo na rede de 70 barras, para a VNS na simulação 'Alocação 1' . . . . .	72
Figura 53 – Comportamento da Função Objetivo na rede de 70 barras, para a PSO na simulação 'Alocação 2' . . . . .	72
Figura 54 – Comportamento da Função Objetivo na rede de 70 barras, para a VNS na simulação 'Alocação 2' . . . . .	73

Figura 55 – Comportamento da Função Objetivo na rede de 70 barras, para a PSO na simulação 'Alocação 3' . . . . .	73
Figura 56 – Comportamento da Função Objetivo na rede de 70 barras, para a VNS na simulação 'Alocação 3' . . . . .	74
Figura 57 – Comportamento da Função Objetivo na rede de 70 barras, para a PSO na simulação 'Alocação 4' . . . . .	74
Figura 58 – Comportamento da Função Objetivo na rede de 70 barras, para a VNS na simulação 'Alocação 4' . . . . .	75

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Tensões admissíveis para BCs em redes primárias de acordo com a NBR 5282 . . . . .	7
Tabela 2 – Custo dos Bancos de Capacitores . . . . .	19
Tabela 3 – Parâmetros da PSO para as simulações na rede de 34 barras . . . . .	40
Tabela 4 – Parâmetros da VNS para as simulações na rede de 34 barras . . . . .	40
Tabela 5 – Estruturas de Vizinhança para a rede de 34 barras . . . . .	40
Tabela 6 – Análise das Perdas para a rede de 34 Barras . . . . .	46
Tabela 7 – Custos para a rede de 34 barras sem a inserção dos bancos de capacitores	46
Tabela 8 – Análise Financeira das simulações feitas para a rede de 34 barras . . .	47
Tabela 9 – Condições de Simulação para a Rede de 34 Barras . . . . .	48
Tabela 10 – Acertos em 10 tentativas, para as simulações na rede de 34 barras . . .	48
Tabela 11 – Análise Estatística para as simulações na rede de 34 barras . . . . .	48
Tabela 12 – Parâmetros da PSO para as simulações na rede de 70 barras . . . . .	50
Tabela 13 – Parâmetros da VNS para as simulações na rede de 70 barras . . . . .	50
Tabela 14 – Estruturas de Vizinhança para a rede de 70 barras . . . . .	50
Tabela 15 – Análise das Perdas para a rede de 70 Barras . . . . .	55
Tabela 16 – Custos para a rede de 70 barras sem a inserção dos bancos de capacitores	57
Tabela 17 – Análise Financeira das simulações feitas para a rede de 70 barras . . .	57
Tabela 18 – Condições de Simulação para a Rede de 70 Barras . . . . .	58
Tabela 19 – Acertos em 10 tentativas, para as simulações na rede de 70 barras . . .	58
Tabela 20 – Análise Estatística para as simulações na rede de 70 barras . . . . .	58
Tabela 21 – Estruturas de Vizinhança para a rede de 222 Barras . . . . .	59
Tabela 22 – Solução encontrada pela PSO para a rede de 222 Barras . . . . .	59
Tabela 23 – Solução encontrada pela VNS para a rede de 222 Barras . . . . .	60
Tabela 24 – Análise Financeira para a rede de 222 Barras . . . . .	62
Tabela 25 – Perdas de potência ativa nas linhas para a rede de 222 Barras . . . . .	62
Tabela 26 – Dados das Linhas para a rede Trifásica de 10 Barras, em $\Omega$ . . . . .	76
Tabela 27 – Continuação - Dados das Linhas para a rede Trifásica de 10 Barras, em $\Omega$	76
Tabela 28 – Dados das Barras para a rede Trifásica de 10 Barras . . . . .	76
Tabela 29 – Dados das Linhas para a rede Trifásica de 34 Barras, em $\Omega$ . . . . .	77
Tabela 30 – Continuação - Dados das Linhas para a rede Trifásica de 34 Barras, em $\Omega$	78
Tabela 31 – Dados das Barras para a rede Trifásica de 34 Barras . . . . .	79
Tabela 32 – Dados das Linhas para a rede Monofásica de 70 Barras, em $\Omega$ . . . . .	80
Tabela 33 – Dados das Barras para a rede Monofásica de 70 Barras . . . . .	81
Tabela 34 – Dados das Linhas para a rede Monofásica de 222 Barras, em $\Omega$ . . . . .	82

Tabela 35 – Continuação - Dados das Linhas para a rede Monofásica de 222 Barras, em $\Omega$ . . . . .	83
Tabela 36 – Continuação - Dados das Linhas para a rede Monofásica de 222 Barras, em $\Omega$ . . . . .	84
Tabela 37 – Dados das Barras para a rede Monofásica de 222 Barras . . . . .	85
Tabela 38 – Continuação - Dados das Barras para a rede Monofásica de 222 Barras	86
Tabela 39 – Continuação - Dados das Barras para a rede Monofásica de 222 Barras	87

# Resumo

Valores inadequados de tensão nas barras e elevadas perdas elétricas nas linhas são problemas recorrentes em redes de distribuição de energia elétrica. Este trabalho propõe a inserção de bancos de capacitores, de capacidades fixas, nestas redes, de modo a minimizar estas condições indesejadas. São aplicadas duas meta-heurísticas como estratégias de otimização: a Otimização por Nuvem de Partículas e a Busca em Vizinhança Variável, que têm a função de indicar em quais barras os bancos devem ser instalados e quais as capacidades dos mesmos. Será verificada também a eficiência de cada um destes métodos de otimização. A função objetivo para o problema de alocação de bancos de capacitores envolve os custos dos bancos, bem como o das perdas elétricas. A modelagem desenvolvida neste trabalho é aplicável em redes monofásicas e trifásicas, de distribuição primária de energia elétrica, onde foram usadas como sistemas teste duas redes monofásicas (de 70 e 222 barras) e uma rede trifásica (de 34 barras).

***Palavras-chave:*** Bancos de Capacitores, Otimização por Nuvem de Partículas, Busca em Vizinhança Variável.

# Abstract

Inadequate bus voltage values and large electrical losses in lines are recurring problems in distribution systems. This paper proposes the allocation of capacitor banks, fixed capacities, in these systems in order to minimize these undesirable conditions. Two meta-heuristics are applied as optimization strategies: the Particle Swarm Optimization (PSO), and the Variable Neighborhood Search (VNS), which are intended to indicate at which buses the capacitor banks should be installed and their capacities. The efficiency of each of these optimization methods is also verified. The objective function for the allocation of capacitor banks problem involves the costs of the banks, as well the electrical losses. The model developed in this paper is applicable in single-phase and three-phase primary distribution systems, in which will be used as test systems two single-phase networks (70 and 222 bars) and a three-phase network (34 bars).

**Keywords:** Capacitor Banks, Particle Swarm Optimization, Variable Neighborhood Search.

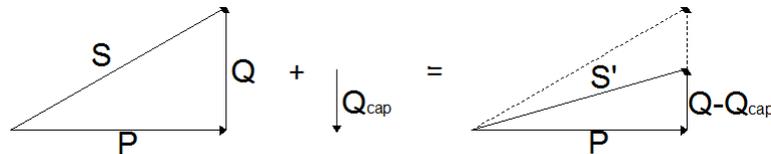
# 1 Introdução

## 1.1 Apresentação do Problema

A compensação reativa é uma técnica bastante comum empregada em redes de distribuição de energia elétrica. Tal prática tem por finalidade mitigar situações operacionais indesejadas nestas redes a exemplo de níveis de tensão nas barras excessivamente baixos ou elevados índices de perdas de potência ativa nos trechos. Como outras formas de minimizar estes problemas, são exemplos a inserção de reguladores de tensão, a reconfiguração das cargas na rede, dentre outras.

O aumento da demanda de energia elétrica agrava problemas como os mencionados anteriormente, uma vez que as cargas, em geral, apresentam fatores de potência não unitários com características predominantemente indutivas. Na Figura 1, tem-se de forma simplificada um diagrama das potências e o efeito do acréscimo de potência reativa capacitiva a esse diagrama.

Figura 1 – Triângulo de Potências



Além de promover a melhoria no perfil de tensão e uma redução nas perdas ativas, a alocação de bancos de capacitores pode proporcionar outras vantagens (BEÊ, 2007), como:

- controle do fluxo de potência;
- correção do fator de potência; e
- aumento da capacidade de transferência da potência ativa no trecho pela compensação que produz a redução da parcela reativa.

## 1.2 Justificativa

Nos sistemas elétricos, os níveis de tensão e os ajustes de fator de potência indesejados são penalizados por órgãos regulamentadores e fiscalizadores. No Brasil, esta função é dada à Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. A atuação da ANEEL tem exigido das concessionárias de distribuição de energia elétrica índices de qualidade na energia elétrica progressivamente mais severos. Um marco técnico na normatização do controle operacional de sistemas de distribuição é reconhecido na apresentação, em 2008, dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - o PRODIST (ANEEL,

2008) - de modo que este órgão normativo uniformizasse a exigência por melhores índices relacionados à qualidade de energia. Diante de tal cenário, as concessionárias passaram a tratar a alocação de equipamentos para compensação reativa como uma forma eficiente e financeiramente viável de atender às exigências de qualidade estipuladas.

A correção de reativos na rede elétrica por meio de bancos de capacitores, analisada pelo referido trabalho, é uma alternativa viável quando realizada de forma racional, ou seja, por meio de um método de análise, baseado em modelos matemáticos minimamente complexos, que sejam capazes de estimar as melhorias nos indicadores operacionais da rede quando se definem os tipos, as capacidades e os locais de instalação desses bancos.

### 1.3 Objetivos

O objetivo primário do referido trabalho é a avaliação dos efeitos da alocação de bancos de capacitores em redes de distribuição primária por meio de técnicas de otimização aliadas à modelagem minimamente complexa dos componentes dessas redes, visando-se melhorar o perfil de tensão ao longo do alimentador e minimizar as perdas de potência ativa nas linhas da rede. Busca-se, neste trabalho, propor uma função de custo que represente os custos de investimento em bancos de capacitores reais, bem como o custo associado às perdas de potência ativa na rede. Visa-se a aplicação deste estudo tanto a redes de distribuição primária equilibradas quanto desequilibradas, necessitando, assim, de modelagem trifásica para os componentes elétricos bem como um método de fluxo de potência trifásico. Como objetivo secundário, pretende-se comparar o desempenho das estratégias PSO e VNS ao lidar com o problema da alocação de bancos.

### 1.4 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2, uma revisão bibliográfica sobre a alocação de Bancos de Capacitores é apresentada. No Capítulo 3, é feita uma revisão dos principais conceitos utilizados neste trabalho. No Capítulo 4, é apresentada a formulação proposta para o Problema de Alocação de Bancos de Capacitores. O Capítulo 5 reúne as metodologias de otimização utilizadas. No Capítulo 6, tem-se as redes de distribuição usadas como sistemas teste, bem como a apresentação e discussão dos resultados obtidos. O Capítulo 7 é dedicado às conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

## 2 Referencial Teórico

O problema de alocação de bancos de capacitores (BC) é clássico no estudo de sistemas elétricos de potência, podendo ser modelado diferentemente. A literatura especializada dispõe de vários trabalhos que propõem abordagens para resolver a compensação de reativos por alocação de bancos de capacitores.

Em (MASOUM et al., 2004), aplicou-se Algoritmos Genéticos (AG) com a finalidade de alocar e dimensionar, de forma ótima, bancos de capacitores fixos em redes de distribuição radiais na presença de tensões e correntes harmônicas. A função objetivo inclui o custo das perdas e o custo dos bancos de capacitores. Como restrições, são impostos os limites de tensão, capacidades e localizações de bancos já instalados e limites relacionados à qualidade de energia, conforme norma vigente. Barras candidatas para inserção de bancos são selecionadas a partir de uma geração inicial de cromossomos. Usando a função objetivo, uma combinação adequada de objetivos e restrições é definida como critério para selecionar, dentre as barras candidatas previamente listadas, as que mais se adequem a receber bancos. Foram realizadas simulações em duas redes do sistema IEEE, de modo a comparar os resultados com os obtidos por outras referências.

Um algoritmo microgenético (AMG) em conjunto com Lógica Fuzzy é proposto em (SOUZA; ALVES; FERREIRA, 2004) para resolver o problema de alocação de capacitores. A função objetivo inclui a economia financeira obtida pela redução das perdas de potência ativa, bem como os custos de aquisição e instalação de bancos de capacitores fixos e chaveados. Restrições de tensão são consideradas. Um método simples e eficiente é usado para o fluxo de potência, em que a tensão da barra da subestação é assumida como controlada. Uma curva de duração de carga aproximada dividida em diferentes níveis de carga é usada para calcular as perdas de potência ativa. Um sistema teste de 34 barras é apresentado, e os resultados são comparados aos obtidos por outra técnica de busca.

Já em (XU et al., 2013), é proposta a alocação de bancos de capacitores, fixos e automáticos, no lado de baixa tensão (11 kV) de transformadores em redes de distribuição radiais com o objetivo de reduzir as perdas de potência ativa. A função objetivo é definida pela relação custo-benefício da inserção dos bancos através do Valor Presente Líquido (VLP), onde são considerados os custos das perdas de potência ativa e o custo de investimento em bancos, sendo este último aproximado por uma função linear. O problema de alocação de bancos de capacitores é formulado como um modelo de Programação Inteira Mista (PIM), de modo a maximizar o VLP sujeito a restrições de tensão e de capacidade dos bancos, sendo adequado para ser resolvido por pacotes PIM comerciais, como mostra a referida obra.

A meta-heurística Particle Swarm Optimization (PSO) é citada em alguns trabalhos. Em (SINGH; RAO, 2012), este método é usado para determinar os locais de instalação

e as capacidades dos bancos de capacitores fixos e automáticos, onde também é levada em consideração a curva diária de carga. Também é aplicado um método de análise de sensibilidade dinâmica, de modo que, após a inserção de cada banco os nós são verificados, e o que apresentar maior índice de sensibilidade, nele será inserido um banco com capacidade determinada pela PSO. Um método iterativo simples é usado para calcular o fluxo de potência. Os resultados da aplicação da metodologia apresentada à redes de 70 e 135 barras foram comparados com os resultados obtidos pelos métodos Busca Tabu, Método Híbrido e Algoritmos Genéticos. A PSO apresentou resultados que produziram menores custos, menores perdas e melhor perfil de tensão nas barras. Em comparação com Algoritmos Genéticos, a PSO apresentou esforço computacional muito menor.

Uma modificação na PSO é proposta em (ZIARI et al., 2010), onde nesta meta-heurística são inseridos operadores de cruzamento e mutação, a fim de se determinar os locais de instalação e as capacidades dos bancos de capacitores a serem inseridos em redes de distribuição. A função objetivo envolve as perdas nas linhas e o custo de investimento dos bancos. Restrições referentes à tensão das barras e correntes nos trechos são inseridas na função objetivo através de um fator de penalidade. Dentre os sistemas teste, está a rede de distribuição de 18 barras do sistema IEEE. Os resultados obtidos pela PSO modificada foram comparados aos obtidos por um método analítico de programação não linear, e aos obtidos por dois métodos heurísticos: Algoritmos Genéticos e Recozimento Simulado, de modo que o melhor valor para a função objetivo foi obtido pela PSO.

A vida útil de bancos de capacitores pode ser significativamente reduzida devido à amplificação de correntes harmônicas em uma eventual ressonância com a rede. Em face a isto, em (SALAS, 2010) é apresentado um estudo de alocação de bancos onde são calculados índices de ressonância harmônica, que são inseridos como restrições adicionais ao problema de alocação de bancos. Outro aspecto investigado neste trabalho é a alocação simultânea de capacitores nas redes primária e secundária de distribuição. Como métodos de otimização foram empregadas as meta-heurísticas AG e PSO, que foram testadas e validadas nas redes de 4 e de 34 barras do sistema IEEE, e posteriormente aplicadas a um sistema de distribuição de grande porte. As restrições adicionais do problema aumentaram sua complexidade. Ambas as meta-heurísticas obtiveram resultados satisfatórios, destacando o menor esforço computacional do AG em comparação com a PSO.

Dentre as obras que apresentam modelo linear, em (HAFFNER et al., 2009) o autor propõe função objetivo e restrições lineares, juntamente com variáveis contínuas e binárias, tratando o problema de alocação de bancos como sendo de programação linear inteira mista, permitindo assim a aplicação de métodos de otimização clássica. O modelo também incorpora a definição simultânea do tap ótimo de operação dos transformadores de distribuição visando minimizar as violações nos limites de tensão. A função objetivo a ser minimizada é formada pelo custo de investimento (aquisição, instalação e remoção) e de operação (manutenção e custos associados à violação de tensão), tendo restrições

operacionais, financeiras e lógicas com a finalidade de se reduzir o espaço de busca. Os resultados da aplicação do modelo a uma rede radial de 23 barras mostraram a importância de ser levada em consideração a posição dos taps dos transformadores.

Outra abordagem linear para o problema de alocação de reativos é apresentado em (GASPERIN, 2008), em que o objetivo consiste em determinar os locais e as capacidades dos bancos de capacitores fixos ou chaveados, a fim de minimizar as violações de tensão e os custos de aquisição, instalação e manutenção dos mesmos. São apresentados dois modelos simplificados para obtenção das tensões nas barras da rede, em que as equações não lineares do fluxo de potência são aproximadas por equações lineares. O modelo apresenta, portanto, função objetivo e restrições lineares, em que a primeira é formada pelo custo de investimento (aquisição, instalação e remoção de bancos) e custo de operação (manutenção e violações de tensão). Os modelos alternativos para representar a rede de distribuição apresentaram, segundo o autor, excelentes resultados na determinação da magnitude das tensões nas barras, sendo assim bastante aceitáveis para o propósito de modelar a rede em problemas de otimização, de modo a ser possível incorporar restrições lineares de limites de tensão.

A literatura também apresenta diversas outras abordagens para o problema de alocação de reativos. Em (ABUL'WAFI, 2013) é proposto um método em dois estágios: No primeiro, são listados os nós a terem bancos alocados a partir da verificação da máxima redução nas perdas devido a inserção de cada banco individualmente, e numa segunda etapa é usada a meta-heurística Algoritmos Genéticos para fazer a alocação de forma otimizada. Já a obra apresentada em (DUQUE, 2013) baseia-se na técnica de otimização bio-inspirada denominada Monkey Search (MS) para determinar a alocação ótima dos BCs. Apresenta também modificações e aprimoramentos desta técnica para melhor se adequar às características e restrições do problema, definindo assim um novo algoritmo denominado Modified Monkey Search (MMS). Esses algoritmos apresentam como grande vantagem a fácil implementação devido a pequena quantidade de parâmetros que devem ser ajustados ao problema.

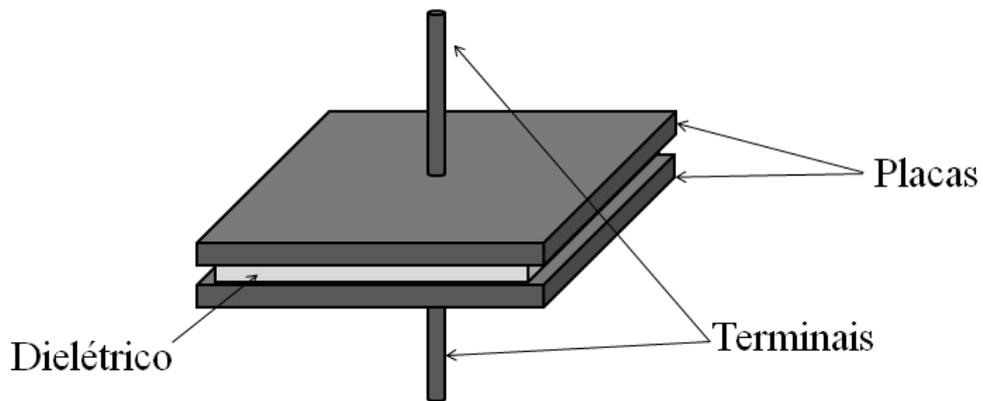
# 3 Modelagem de Elementos de Rede

## 3.1 Capacitores de Potência

### 3.1.1 Estrutura básica de capacitores

Capacitores de Potência consistem em elementos estáticos que são inseridos nos circuitos de transmissão e distribuição (primária e secundária) do sistema elétrico com o intuito de reduzir o consumo de potência reativa (GODOI, 2009). Os principais parâmetros que definem um capacitor são a Tensão de Utilização e a Potência de Serviço. A tensão de utilização define a espessura do material isolante (dielétrico) entre as placas do capacitor, uma das dimensões construtivas desse componente. Já a potência de serviço define a área das folhas, ou seja, das placas condutoras e do dielétrico que formam o componente – outro aspecto construtivo. Portanto, os dois parâmetros mencionados definem o volume do componente. A Figura 2 mostra a constituição básica de um capacitor que conta com duas placas paralelas condutoras separadas por um material isolante.

Figura 2 – Representação de um capacitor



Na Figura 3, têm-se modelos reais de bancos de capacitores monofásicos comerciais.

Figura 3 – Bancos de Capacitores



Fonte: (GODOI, 2009)

### 3.1.2 Características dos Bancos de Capacitores em Redes de Distribuição Primária

A principal norma que regulamenta e detalha especificações de bancos de capacitores no Brasil é a NBR 5282. Tal norma aplica-se a bancos em derivação em sistemas elétricos de tensão nominal acima de 1000V. A Tabela 1 contém algumas especificações para as redes onde a frequência nominal (60Hz) é predominante.

Tabela 1 – Tensões admissíveis para BCs em redes primárias de acordo com a NBR 5282

TIPO	TENSÃO (Valor Eficaz)	DURAÇÃO MÁXIMA
Frequência Nominal	1,00 $U_n$	Contínua
Frequência Nominal	1,10 $U_n$	12 horas por período de 24 horas
Frequência Nominal	1,15 $U_n$	30 minutos por período de 24 horas
Frequência Nominal	1,20 $U_n$	5 minutos
Frequência Nominal	1,30 $U_n$	1 minuto

O valor de  $U_n$  é definido como valor médio de tensão mais elevado durante um período qualquer de energização do capacitor, considerando-se o aumento da tensão provocado pela ligação do banco e o perfil de tensão no local de instalação (ver NBR 10671).

Para tensões compreendidas entre 1,00 $U_n$  e 1,10 $U_n$ , a duração de sobretensão deve

ser limitada ao tempo necessário para a reposição das condições normais sem significativa deterioração do capacitor. A amplitude de sobretensão que pode ser tolerada depende da sua duração, do número total de sobretensões e da temperatura do capacitor. E as sobretensões indicadas na Tabela 1 foram caracterizadas por valores acima de  $1,15U_n$  cuja ocorrência não ultrapassa 200 vezes durante a vida útil do capacitor.

Os capacitores projetados conforme norma NBR5282 podem operar até 12h por período de 24h com até 110% da tensão nominal, desde que a tensão de crista, incluindo-se todos os harmônicos, não exceda  $1,2 \times \sqrt{2}$  vezes a tensão nominal, e a potência máxima não exceda 144% a potência nominal. Também são impostas outras observações:

- os capacitores devem ser adequados para operar em altitudes de até 1000 metros;
- as buchas devem estar de acordo com a norma NBR 5034, sua composição ser de material resistente à intempéries, soldadas diretamente ao corpo do capacitor; e
- a combinação de número+letra é utilizada para categorizar capacitores em faixas de temperatura, onde o número indica a menor temperatura ambiente na qual o capacitor pode operar e a letra representa o limite superior da faixa de variação tolerada da temperatura. Os detalhes desta classificação podem ser consultados diretamente na norma NBR 5282.

As unidades de BCs devem ser capazes de suportar continuamente uma corrente de valor eficaz igual a 1,31 vezes a corrente nominal  $I_n$  (excluído o período e efeitos do transitório), desde que as condições de tensão contidas na Tabela 1 sejam observadas. A máxima corrente admissível pode atingir  $1,44 \times I_n$ . Esses fatores de sobrecorrente são destinados a levar em conta os efeitos combinados dos harmônicos e das sobretensões até o nível de 1,1 pu. Em redes elétricas onde haja harmônicos em níveis consideráveis, é recomendado praticar o que está estabelecido na norma NBR 10671.

### 3.1.2.1 Configuração de Instalação

Segundo (GODOI, 2009), os bancos de capacitores devem ser instalados preferencialmente em locais abertos, fixados a postes ou sustentados por plataformas, ou em locais onde haja boa refrigeração e espaço suficiente para inspeção e manutenção. Esses bancos são formados por várias unidades monofásicas que podem estar conectadas da seguinte forma:

**Ligação em Delta** - Utilizada especialmente em redes elétricas onde a tensão é inferior a 2,4 kV. Esta configuração apresenta um alto custo de proteção, sendo pouco viável economicamente para níveis de tensão superiores. Apresenta como vantagem o fato de impedir a circulação da corrente do 3<sup>o</sup> harmônico presente na ligação estrela com neutro aterrado e que pode causar interferência nos circuitos de comunicação e proteção.

**Ligação em Estrela com neutro aterrado** - Essa conexão fornece um caminho de baixa impedância para correntes de descargas atmosféricas. Por este motivo, é utilizada algumas vezes sem proteção. Apresenta também baixo custo de instalação e demanda menor área. No entanto, pode provocar interferência nos circuitos de comunicação e

proteção devido à circulação de correntes das componentes harmônicas de sequência zero para a terra.

**Ligação em Estrela com neutro isolado** - Esse tipo de conexão bloqueia a circulação das correntes harmônicas, não interferindo, assim, em circuitos de comunicação. Como desvantagem, atenção deve ser dada às tensões transitórias, o que pode onerar a montagem pela necessidade de dispositivos de proteção.

**Ligação em dupla estrela não aterrada** - Nesta configuração, os distúrbios do sistema não são transferidos para o circuito de proteção do banco de capacitor, o que é vantajoso para a redução de custos associados aos circuito de proteção.

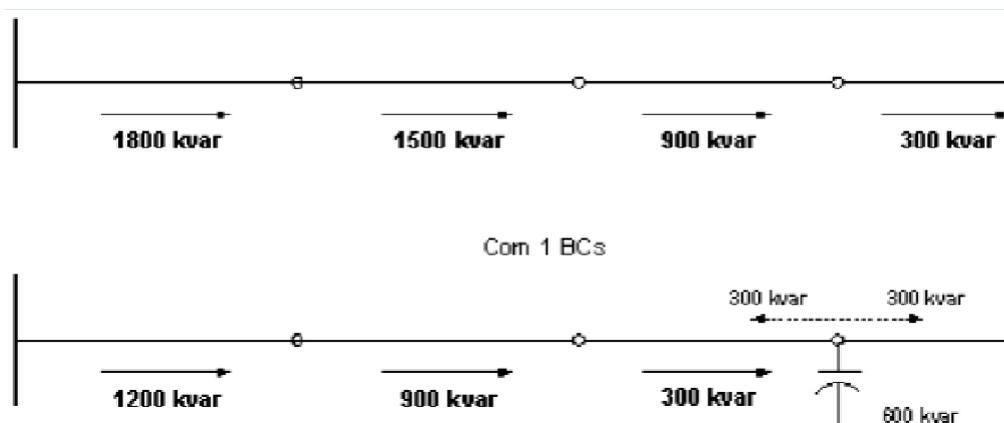
### 3.1.3 Metodologia usada por empresas de distribuição

Segundo (BEÊ, 2007), uma das metodologias utilizadas por concessionárias para realizar a alocação de reativos (localização dos BCs) avalia primariamente a redução do fluxo reativo na rede.

Nessa metodologia, é feita uma simplificação do processo de análise e somente o ramo principal da rede é avaliado. São identificados os pontos essenciais nos quais faz-se necessária a imediata compensação. Os BCs devem ser alocados ao longo do alimentador, já simplificado, de modo a reduzir o fluxo reativo no sistema.

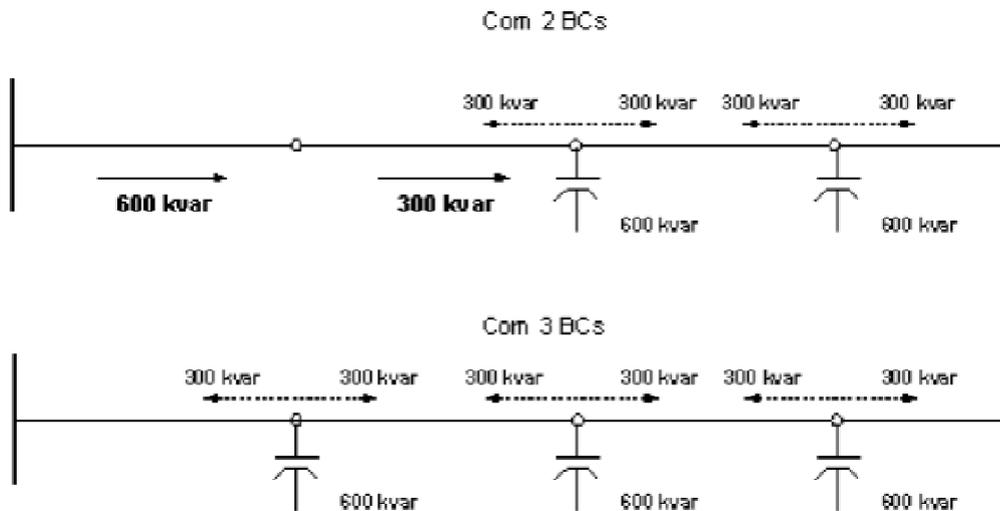
Após conhecido o perfil reativo do alimentador e definidas as capacidades dos bancos a serem instalados, o alimentador é percorrido do seu extremo junto às cargas em direção à subestação. Os locais de instalação de BC correspondem aos pontos onde o fluxo de potência reativa é aproximadamente a metade da capacidade do BC, levando-se em conta a compensação já realizada pelos bancos existentes ou anteriormente alocados. As Figuras 4 e 5 ilustram esse procedimento.

Figura 4 – Fluxo reativo do alimentador



Fonte: (BEÊ, 2007)

Figura 5 – Continuação - Fluxo reativo do alimentador



Fonte: (BEÊ, 2007)

### 3.1.4 Modelagem do Banco de Capacitor

Em (KERSTING, 2001), afirma-se que os bancos de capacitores são modelados como susceptâncias constantes, conectadas em estrela ou delta. Segundo (KAGAN, 2009), os capacitores podem ser modelados como Impedâncias Constantes, assim como os equipamentos puramente resistivos (equipamentos aquecedores). Assim, com base nestas duas referências científicas, o modelo a ser empregado para o Banco de Capacitor será o modelo de Impedância Constante. Esse modelo de carga, assim como outros existentes, estão descritos na seção a seguir.

## 3.2 Modelagem das Cargas

Mediante certas análises, o comportamento simulado de um sistema elétrico torna-se distinto conforme o modelo de carga admitido e, conseqüentemente, os parâmetros elétricos calculados podem variar seus valores significativamente. Existem alguns modelos muito comuns adotados frequentemente por trabalhos científicos: Impedância Constante, Corrente Constante e Potência Constante. Estes três modelos são descritos em (KAGAN, 2009), como também em (KERSTING, 2001):

- **Impedância Constante:** A potência na carga altera-se proporcionalmente ao quadrado da variação da tensão aplicada à mesma.

$$S_k = S_0 \times \left(\frac{V_k}{V_0}\right)^2 \quad (3.2.1)$$

Em que:

- $V_0$  é a tensão no instante '0';
- $S_0$  é a potência aparente da carga quando a mesma está submetida à tensão  $V_0$ ;

- $V_k$  é a tensão no instante ' $k$ '; e
- $S_k$  é a potência aparente da carga quando a mesma está submetida à tensão  $V_k$ .

Desta forma, a impedância elétrica associada à carga permanece constante, mesmo diante de perturbações na tensão, conforme mostra a Equação 3.2.2.

$$Z_k = \frac{V_k^2}{S_k} = V_k^2 \times \frac{V_0^2}{S_0 \times V_k^2} = \frac{V_0^2}{S_0} = Z_0 \quad (3.2.2)$$

Em que:

- $Z_0$  é a impedância da carga quando a mesma está submetida à tensão  $V_0$ ;
- $Z_k$  é a impedância da carga quando a mesma está submetida à tensão  $V_k$ ;
- **Corrente Constante:** As variações causadas na potência da carga são proporcionais à variação da tensão aplicada à mesma.

$$S_k = S_0 \times \frac{V_k}{V_0} \quad (3.2.3)$$

A corrente drenada por esta carga permanece constante, ainda que haja variações na tensão, conforme mostra a equação 3.2.4.

$$I_k = \left(\frac{S_k}{V_k}\right)^* = \left(S_0 \times \frac{V_k}{V_0 \times V_k}\right)^* = \left(\frac{S_0}{V_0}\right)^* = I_0 \quad (3.2.4)$$

- **Potência Constante:** A carga é especificada por um valor de potência que permanece constante independentemente de variações nas demais grandezas elétricas.

$$S_k = S_0 \quad (3.2.5)$$

Neste trabalho, o modelo utilizado para representar a carga consistiu no modelo Potência Constante, de modo que, nenhuma alteração é realizada no valor de potência de cada carga quando a mesma é utilizada no fluxo de potência, conforme discutido a seguir. Situação diferente ocorre para o banco de capacitor: uma vez que este foi modelado por Impedância Constante, sua potência será corrigida conforme a Equação 3.2.1, em que  $V_0$  corresponde à Tensão de Utilização especificada pelo fabricante e  $V_k$  corresponde à tensão apresentada pela barra na qual está inserido.

### 3.2.1 Modelo ZIP Polinomial

O modelo polinomial ZIP (NEVES, 2008) é o mais conhecido para se caracterizar o comportamento estático de cargas, e é muito empregado em estudos de fluxo de potência e de estabilidade de tensão. Nesse modelo, a potência que flui para uma carga é composta de três parcelas. Uma parcela atribuída ao comportamento do tipo impedância constante (tendo  $\alpha$  como coeficiente ponderador), outra caracterizada pelo comportamento do tipo

corrente constante (coeficiente  $\beta$ ) e a terceira associada ao comportamento do tipo potência constante (coeficiente  $\gamma$ ). Assim, a potência é dada pelas Equações 3.2.6 e 3.2.7.

$$P_k = P_0[\alpha(\frac{V_k}{V_0})^2 + \beta\frac{V_k}{V_0} + \gamma] \quad (3.2.6)$$

$$Q_k = Q_0[\alpha(\frac{V_k}{V_0})^2 + \beta\frac{V_k}{V_0} + \gamma] \quad (3.2.7)$$

Em que os coeficientes são adimensionais e equivalem a percentuais, tendo-se a seguinte relação satisfeita:

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (3.2.8)$$

Em relação à modelagem da carga para estudos de estabilidade eletromecânica, em Procedimentos de Rede do ONS (submódulo 23.3, item 8.2.10) afirma-se:

"...Se não houver informações para representação da carga em função da tensão, deve-se representá-la como 50% de potência constante e 50% de impedância constante para a parte ativa, e como 100% de impedância constante para a parte reativa..."

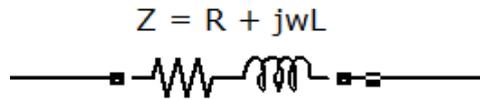
### 3.3 Modelagem das linhas

Em (STEVENSON, 1986), apresenta-se a modelagem de linhas em sistemas de potência, porém a mesma tem como foco as redes de transmissão. As linhas com comprimento não superior a 80 km (equivalente a 50 milhas) são caracterizadas pelo modelo de Linha Curta.

Ainda segundo (STEVENSON, 1986), em linhas de transmissão com comprimento entre 80 e 240 km (50 a 150 milhas) é aplicado o modelo de Linha Média. Para linhas com comprimento superior a 240 km (150 milhas), é empregada uma formulação própria da modelagem por parâmetros distribuídos: modelo de Linha Longa. Para alguns propósitos, uma representação em termos de parâmetros concentrados pode ser usada para linhas com comprimento de até 320 km (200 milhas). Os detalhes dessa modelagem são encontrados na referência citada.

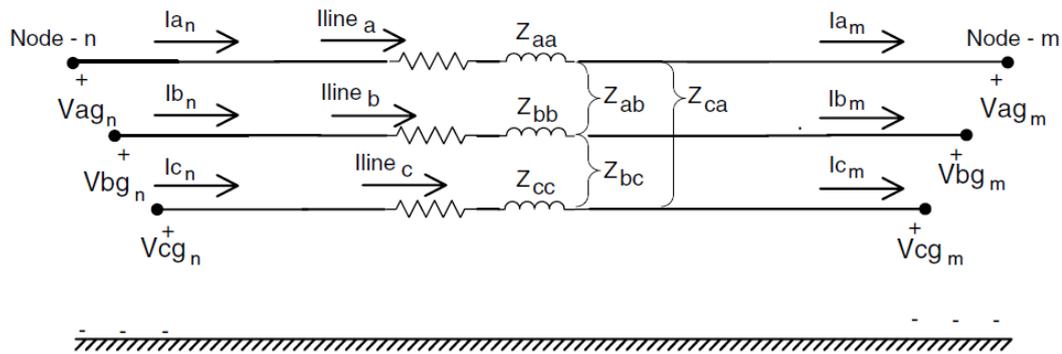
Em redes de distribuição, as extensões médias das linhas são inferiores às das linhas de transmissão, sendo aplicado, portanto, o modelo de Linha Curta. O modelo de Linha Curta é caracterizado por uma resistência e uma reatância indutiva em série, conforme mostra a Figura 6. Nesse tipo de linha, os efeitos capacitivos devido a uma diferença de potencial entre o condutor e o solo e à presença de um dielétrico entre ambos (o ar) podem ser negligenciados.

Figura 6 – Modelo de Linha Curta



Na forma trifásica, o modelo de Linha Curta assume a forma mostrada na Figura 7 para uma representação a três fios, onde novamente nota-se a ausência das impedâncias shunt por se desconsiderar os efeitos capacitivos neste modelo de linha.

Figura 7 – Modelo Trifásico de Linha Curta



Fonte: (KERSTING, 2001)

Em forma matemática, a impedância da linha trifásica, na representação a três fios, é dada conforme a Equação 3.3.1

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (3.3.1)$$

Nesta representação, os elementos da diagonal principal da matriz de impedância  $Z$  referem-se à impedância própria de cada fase. Já os elementos fora da diagonal referem-se ao acoplamento eletromagnético entre as fases.

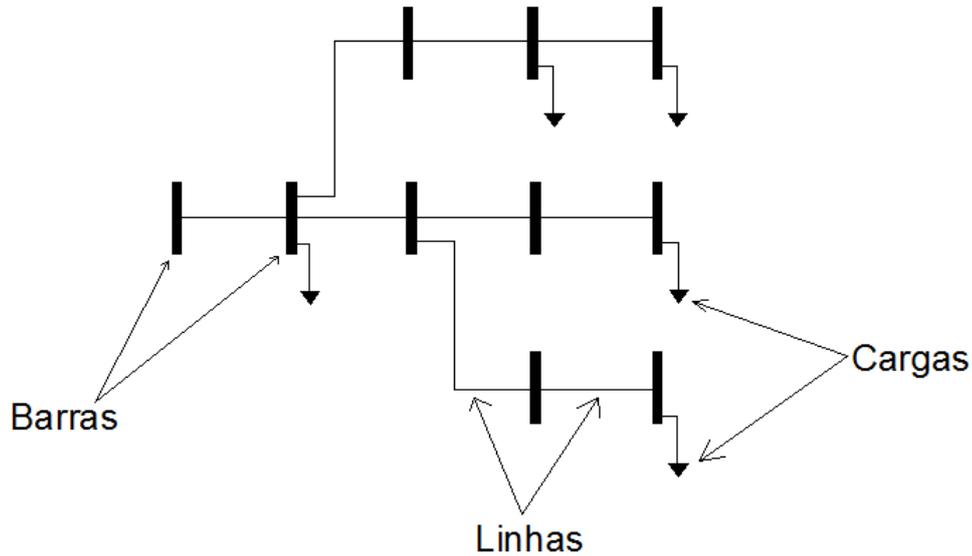
### 3.4 Fluxo de Potência - Método de Varredura

Nesta seção, será apresentado o método utilizado para calcular o fluxo de potência nas linhas do sistema elétrico analisado. O problema do fluxo de potência consiste primariamente em se determinar as tensões em todas as barras e as correntes em todos os trechos da rede elétrica analisada. O método escolhido para tanto foi o de Varredura (CARVALHO, 2006).

O método de Varredura é simples, de fácil implementação e muito eficiente para determinar o fluxo de potência em redes radiais de distribuição. Este método é chamado de Varredura por realizar um processo iterativo fazendo um percurso das barras extremas

em direção à subestação e vice-versa. O método de Varredura é preponderantemente aplicado a sistemas radiais, ou seja, a rede elétrica simulada não pode apresentar laços (ou malhas). A Figura 8 exemplifica uma rede radial.

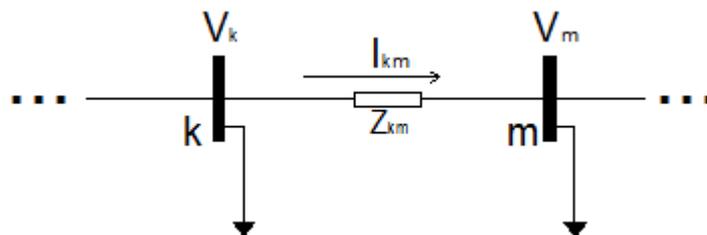
Figura 8 – Rede de distribuição radial típica



### 3.4.1 Método de Varredura em Redes Monofásicas

No algoritmo de Varredura, o processo inicia-se escolhendo um valor para os módulos de tensão nas barras. Tipicamente é escolhida a mesma tensão da subestação. Dadas as tensões nas barras, é possível calcular a corrente que flui para a carga em cada barra e as correntes em todos os ramos do sistema radial. Este processo é implementado por um procedimento de cálculo simples que se inicia nas barras extremas do sistema e se desloca em direção à subestação (nó raiz) - etapa reversa. A partir dos valores de corrente determinados, pode-se calcular as perdas ativa e reativa da rede. A Figura 9 ilustra este processo.

Figura 9 – Fluxo de Potência



A corrente na carga da barra 'm' da Figura 9 é calculada conforme a Equação 3.4.1.

$$I_m = \left( \frac{S_m}{V_m} \right)^* \quad (3.4.1)$$

E da mesma forma na barra 'k':

$$I_k = \left( \frac{S_k}{V_k} \right)^* \quad (3.4.2)$$

em que:

$I_k$  e  $I_m$  são as correntes das cargas nas barras 'k' e 'm', respectivamente, em Ampères;  $S_k$  e  $S_m$  são as potências das cargas nas barras 'k' e 'm', respectivamente, em kVA; e  $V_k$  e  $V_m$  são as tensões das barras k e m, respectivamente, em kV.

A Lei de Kirchhoff das Correntes (LKC) é implementada neste fluxo de potência, e é dada pela Equação 3.4.3.

$$I_{mon_k} = I_k + \sum_{j \in \Omega} I_j \quad (3.4.3)$$

em que:

- $I_{mon_k}$  é a corrente que está à montante da barra 'k', em Ampères;
- $I_k$  é a corrente que foi para a carga ligada à barra 'k', em Ampères;
- $I_j$  é a corrente que foi para a carga ligada à barra 'j' à jusante da barra 'i', em Ampères; e
- $\Omega$  é o conjunto de barras vizinhas à jusante da barra 'k'.

Com as correntes nos ramos calculadas no processo reverso, é possível determinar a corrente provida pela subestação ao sistema. Então, usando os valores das correntes dos ramos e iniciando o processo a partir da subestação, é possível calcular os novos valores das tensões de todas as barras do sistema analisado. Este processo é realizado a partir da subestação e termina nas barras extremas - etapa direta. Com os novos valores das tensões nas barras, é possível atualizar, novamente, os valores das correntes de carga nas barras e as correntes em todos os ramos da rede. Os novos valores de corrente nos ramos permitem determinar os novos valores de perdas das potências ativas e reativas no sistema. Um processo iterativo representa a estratégia básica do algoritmo de Varredura.

Tipicamente é escolhido como critério de parada a variação das perdas ativas em duas iterações consecutivas. Pode ser utilizado também como critério de parada a variação de tensão nas barras do sistema em duas iterações consecutivas.

Na etapa direta, a tensão da barra 'm' é dada por:

$$V_m = V_k - I_{km} \times Z_{km} \quad (3.4.4)$$

em que  $Z_{km}$  é a impedância, em  $\Omega$ , no trecho que conecta as barras k e m. As tensões das outras barras são calculadas da mesma forma. O algoritmo de Varredura pode ser resumido nos seguintes passos:

1 – Fixar as tensões nas barras como sendo iguais à tensão da barra de referência (subestação). Fazer  $perdas_1=0$ . Especificar a tolerância de convergência  $\varepsilon$ .

2 – Iniciar das barras extremas com o cálculo da corrente de carga em todas as barras de carga. Agregar as correntes em todos os ramos do sistema pela somas simples (etapa reversa).

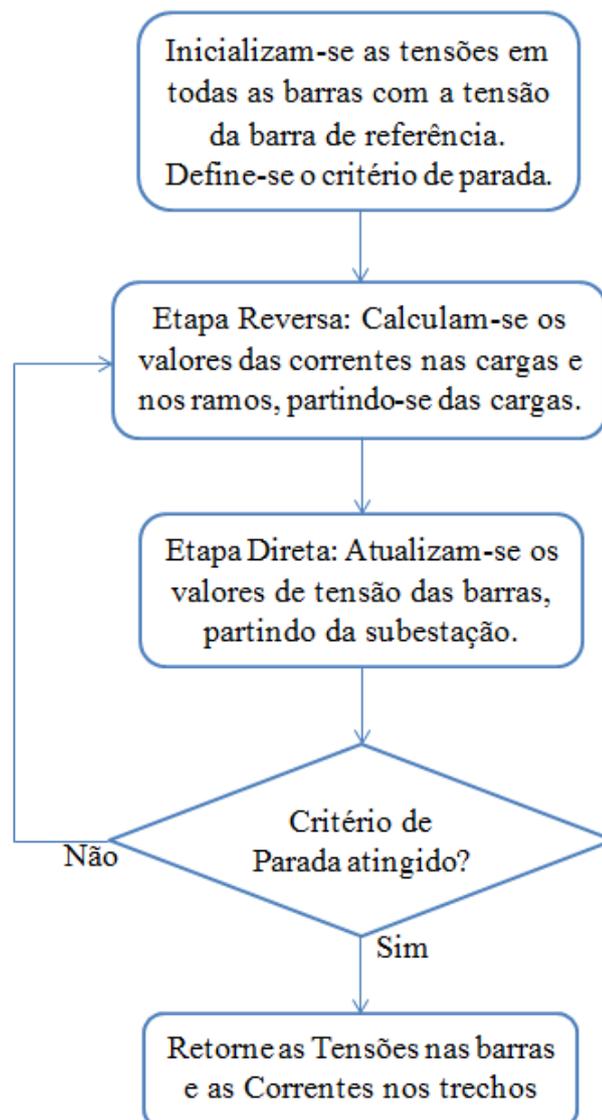
3 – Calcular as perdas ativas do sistema usando a resistência ôhmica das linhas e a corrente que flui através delas,  $P = R \times I^2$ . Fazer  $perdas_2 = perdas_1$ .

4 – Se  $\Delta_{perdas} = |perdas_2 - perdas_1| \leq \varepsilon$ , sendo  $\varepsilon$ , então pare o processo, visto que a convergência ocorreu. Em caso contrário, fazer  $perdas_2 = perdas_1$  e passar ao passo seguinte.

5 – A partir dos valores de corrente de ramos conhecidos, calcular novos os valores das tensões nas barras do sistema iniciando o processo a partir da subestação (etapa direta). Voltar ao passo 2.

A Figura 10 apresenta um fluxograma do método.

Figura 10 – Fluxograma do Método de Varredura



### 3.4.2 Método de Varredura em Redes Trifásicas

Os sistemas de distribuição de energia elétrica geralmente encontram-se desequilibrados, não sendo assim possível usar o modelo monofásico equivalente. Nesta seção será apresentada a versão trifásica do método de Varredura.

O algoritmo de Varredura trifásico é essencialmente idêntico ao monofásico. A mudança será na representação da rede e de seus elementos, que passam a ser caracterizados por meio de matrizes. As tensões e correntes são representadas por vetores que contêm as respectivas grandezas para as três fases.

Com base no algoritmo descrito na Seção 3.4.1, para o método de Varredura versão monofásica, o passo 1 dá-se da seguinte forma na versão trifásica:

$$\begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \end{bmatrix}^{k=0} = \begin{bmatrix} V_{ref} \\ a^2 V_{ref} \\ a V_{ref} \end{bmatrix} \quad (3.4.5)$$

Em que:

$V_{ia}, V_{ib}, V_{ic}$  são respectivamente as tensões, em kV, nas fases A, B e C da barra  $i$ ;

$V_{ref}$  é a tensão da barra de referência, em kV;

$k$  refere-se a iteração, onde  $k=0$  refere-se a iteração inicial;

O operador do ângulo característico é representado por  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ .

Para o passo 2, o cálculo da corrente drenada em cada barra de carga é feito da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} I_{ia} \\ I_{ib} \\ I_{ic} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{S_{ia}}{V_{ia}}\right)^* \\ \left(\frac{S_{ib}}{V_{ib}}\right)^* \\ \left(\frac{S_{ic}}{V_{ic}}\right)^* \end{bmatrix} \quad (3.4.6)$$

em que:

$I_{ia}, I_{ib}, I_{ic}$  são as correntes, em Ampères, das fases A, B e C da barra  $i$ ;

$S_{ia}, S_{ib}, S_{ic}$  são as injeções de potência, em kVA, das fases A, B e C da barra  $i$ ; e

$V_{ia}, V_{ib}, V_{ic}$  são as tensões, em kV, das fases A, B e C da barra  $i$ ;

A corrente no ramo à montante da barra ' $i$ ' é dada, por Lei de Kirchhoff das Correntes, pela Equação 3.4.7.

$$\begin{bmatrix} I_{ia} \\ I_{ib} \\ I_{ic} \end{bmatrix}_{mon} = \begin{bmatrix} I_{ia} \\ I_{ib} \\ I_{ic} \end{bmatrix} + \sum_{j \in \Omega} \begin{bmatrix} I_{ja} \\ I_{jb} \\ I_{jc} \end{bmatrix} \quad (3.4.7)$$

em que:

- o subscrito *mon* implica em à montante;

- $\Omega$  é o conjunto de barras vizinhas à jusante da barra ' $i$ '; e
- $I_{ja}, I_{jb}, I_{jc}$  são as correntes, em Ampères, das fases A, B e C da barra ' $j$ ' à jusante da barra ' $i$ '.

Para o cálculo das perdas e queda de tensão nas linhas, passos 3 a 5, a impedância da linha passa a ser representada pela matriz de dimensões  $3 \times 3$  dada por:

$$[Z_l] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (3.4.8)$$

em que:

$Z_l$ : é a impedância do ramo  $l$ , dada em  $\Omega$ ;

Os subscritos a, b, c referem-se às três fases. A diagonal principal dessa matriz é preenchida com os valores de impedância próprios de cada fase. Já os demais elementos representam as impedâncias mútuas entre as fases.

Na etapa direta (passo 5), as tensões nos nós são calculadas como se segue:

$$\begin{bmatrix} V_{ja} \\ V_{jb} \\ V_{jc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{la} \\ I_{lb} \\ I_{lc} \end{bmatrix} \quad (3.4.9)$$

em que:

- O subscrito  $j$  indica barra a jusante da barra  $i$ ;
- $I_{la}, I_{lb}$  e  $I_{lc}$  representam as correntes, em Ampères, das fases A, B e C no ramo  $l$ .

O critério de parada, como no caso monofásico, é dado pela diferença das perdas de potência no sistema de uma iteração para outra consecutiva, em que esta diferença sendo menor do que uma dada tolerância  $\varepsilon$  indica a convergência do fluxo de potência. Pode ser utilizada também a diferença entre as tensões de uma mesma barra entre duas iterações consecutivas.

# 4 Modelo Matemático para o Problema de Otimização

## 4.1 Função Objetivo para o Problema de Alocação de Bancos de Capacitores

A Função Objetivo definida neste trabalho para o problema de alocação de capacitores envolve o custo de investimento em bancos e o custo proveniente das perdas de potência ativa na rede, conforme descreve a Equação 4.1.1.

$$\text{mín}F = C_{\text{bancos}} + C_{\text{perdas}} \quad (4.1.1)$$

A parcela  $C_{\text{bancos}}$  refere-se ao custo de aquisição dos bancos de capacitores, e é dada pela soma dos preços de cada banco a ser instalado. Os preços destes bancos é dado pela Tabela 2.

Tabela 2 – Custo dos Bancos de Capacitores

Valor [kVAr]	Custo [\$]
150	693
200	798
300	1012
400	1218
450	1321
600	1630

**Nota:** Os preços foram informados pela empresa PL Capacitors and Filters - ABB Ltda, referentes ao ano de 2015.

Esses bancos são unidades monofásicas, de capacidades fixas, com tensão de 13,8 kV e frequência de operação de 60 Hz.

Já a parcela  $C_{\text{perdas}}$  refere-se ao custo das perdas de energia nas linhas, representadas como valor agregado em MWh que são perdidos nas resistências série dos ramos da rede. O valor do MWh foi obtido a partir do seu valor médio comercializado pelas empresas geradoras de energia em leilão realizado no ano de 2007, o que corresponderia a R\$ 123,95 por MWh. Esta estimativa para o custo das perdas também pode ser obtida com base na tarifa aplicada pela empresa de distribuição a seus clientes.

O período de validade da alocação proposta não é superior a 15 anos, o que equivale ao tempo de vida útil médio dos bancos (GODOI, 2009) a partir do qual a demanda dos consumidores esboça variações significativas. Assim, este será o período de tempo tomado

como referência para o cálculo das perdas. O custo das perdas, portanto, foi calculado conforme as Equações 4.1.2, 4.1.3 e 4.1.4.

$$C_{perdas} = (Custodaenergia) \times (PerdasMW) \times (Período) \quad (4.1.2)$$

$$C_{perdas} = 123,95 \times (Perdas) \times 10^{-6} \times 15 \times 365 \times 24 \quad (4.1.3)$$

$$C_{perdas} = 16,28703 \times (Perdas) \quad (4.1.4)$$

em que:

- *Custodaenergia* refere-se ao custo do MWh discutido acima;
- *PerdasMW* refere-se ao total de perdas, em 'MW', verificado na rede;
- *Perdas* refere-se ao total de perdas, em 'W', verificado na rede;
- *Período* refere-se ao período de validade da solução proposta, correspondente a 15 anos, conforme discutido acima; e
- já o fator  $10^{-6}$  surge do fato de se usar a potência das perdas em 'W' quando na equação anterior se usava em 'MW', e o produto  $15 \times 365 \times 24$  corresponde ao período de 15 anos tomado em horas.

Cabe ressaltar que esta modelagem apresenta algumas limitações. Não foram consideradas as variações dos custos em função do tempo e a potência das cargas foi assumida como constante. Entretanto, este modelo se mostra satisfatório para os estudos realizados neste trabalho, de modo a permitir comparações também satisfatórias dos resultados encontrados em diferentes cenários de simulação.

## 4.2 Restrições para o Problema de Alocação de Bancos de Capacitores

As restrições apresentadas nas equações 4.2.1 e 4.2.2 implicam que para a solução ser viável, o perfil de tensão deve estar confinado aos limites de tensão impostos pela legislação vigente. Neste caso, segundo o "Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica" do PRODIST, para tensões acima de 1 kV e abaixo de 69 kV, a tensão é considerada adequada quando se encontra acima de 0.93 p.u. e abaixo de 1.05 p.u..

$$\text{mín}(V_{ak}, V_{bk}, V_{ck}) \geq 0,93p.u. \quad (4.2.1)$$

$$\text{máx}(V_{ak}, V_{bk}, V_{ck}) \leq 1,05p.u. \quad (4.2.2)$$

em que:

-  $V_{ak}, V_{bk}, V_{ck}$  são as tensões das fases A, B e C em cada barra 'k' da rede, dadas em 'por unidade'.

A restrição dada pela Equação 4.2.3 indica o máximo valor que as correntes das fases em cada trecho da rede podem assumir.

$$\text{máx}(I_{al}, I_{bl}, I_{cl}) \leq \text{Amp}_l \quad (4.2.3)$$

em que:

-  $I_{al}, I_{bl}, I_{cl}$  são as correntes das fases A, B e C, em Ampères, em cada trecho 'l' da rede; e

-  $\text{Amp}_l$  corresponde ao máximo valor de corrente (Ampacidade), em Ampères, que o condutor usado no trecho 'l' pode suportar.

Já a restrição apresentada na Equação 4.2.4 implica que a soma das potências das cargas de todas as barras mais as perdas nos trechos tem que ser menor que a capacidade da subestação.

$$\text{Perdas} + \sum_{k=1}^{nbarras} S_k \leq S_{máx} \quad (4.2.4)$$

em que;

-  $nbarras$  corresponde ao número total de barras da rede de distribuição;

-  $S_k$  corresponde à potência da carga, em kVA, ligada à barra 'k'; e

-  $S_{máx}$  corresponde à máxima potência, em kVA, que pode ser fornecida pela subestação.

A Equação 4.2.5 expressa a obediência à Lei de Kirchhoff das Correntes, que ocorre da maneira a seguir.

$$\begin{bmatrix} I_{ia} \\ I_{ib} \\ I_{ic} \end{bmatrix}_{mon} = \begin{bmatrix} I_{ia} \\ I_{ib} \\ I_{ic} \end{bmatrix} + \sum_{j \in \Omega} \begin{bmatrix} I_{ja} \\ I_{jb} \\ I_{jc} \end{bmatrix} \quad (4.2.5)$$

em que:

- o subscrito *mon* implica em à montante;

-  $\Omega$  é o conjunto de barras vizinhas à jusante da barra 'i'; e

-  $I_{ja}, I_{jb}, I_{jc}$  são as correntes, em Ampères, das fases A, B e C da barra 'j' à jusante da barra 'i'.

E já na Equação 4.2.6, têm-se a obediência à Lei de Ohm.

$$\begin{bmatrix} V_{ja} \\ V_{jb} \\ V_{jc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ia} \\ I_{ib} \\ I_{ic} \end{bmatrix} \quad (4.2.6)$$

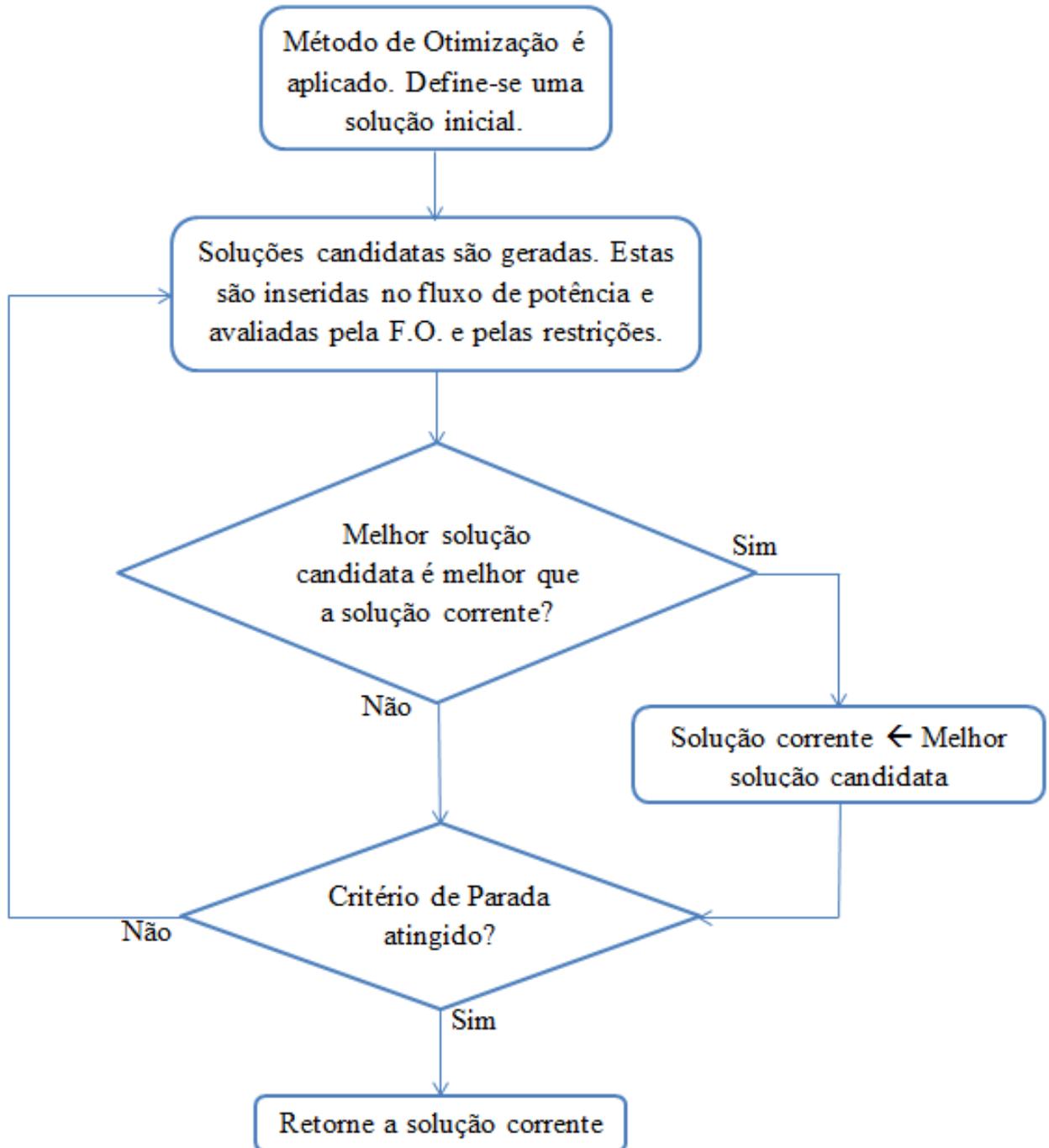
em que:

- O subscrito *j* indica barra a jusante da barra *i*;

-  $I_{la}$ ,  $I_{lb}$  e  $I_{lc}$  representam as correntes, em Ampères, das fases A, B e C no ramo  $l$ .

A Figura 11 apresenta um fluxograma com a proposta deste trabalho. Inicialmente, um método de otimização é aplicado para investigar soluções candidatas, de modo a encontrar uma solução melhor avaliada pela Função Objetivo (F.O.) do modelo. Para avaliar cada solução candidata (sugestão de alocação de bancos) é usado o fluxo de potência para calcular os valores de tensão, corrente e das perdas de potência ativa, fornecendo assim os dados para a Função Objetivo e para as restrições. Após atingido o critério de parada do método de otimização, a melhor solução encontrada é retornada.

Figura 11 – Fluxograma do Modelo Completo



# 5 Estratégias de Otimização

Neste capítulo, são apresentadas as técnicas de otimização empregadas neste trabalho para resolver o problema de alocação de BCs apresentado: As meta-heurísticas Particle Swarm Optimization e Variable Neighborhood Search. O objetivo é encontrar a melhor solução (ótima) que minimize o desvio de tensão das barras e as perdas de potência ativa nas linhas, bem como os custos de investimento em bancos de capacitores.

## 5.1 Particle Swarm Optimization - PSO

De acordo com (ALOISE; OLIVEIRA; SILVA, 2006), a PSO é uma meta-heurística evolucionária que surgiu com a intenção de simular o comportamento de um conjunto de pássaros em voo com seu movimento localmente aleatório, mas globalmente determinado. É uma técnica muito utilizada em sistemas contínuos não-lineares, mas pouco explorada para problemas discretos.

Diferentemente de outras técnicas de computação evolutiva como Algoritmos Genéticos, a PSO (EBERHART; KENNEDY, 1995) não utiliza operadores genéticos. Em vez disso, são utilizadas partículas movendo-se em um espaço de busca n-dimensional, sendo cada uma delas uma solução potencial para o problema. Neste método, existe uma população de indivíduos ou partículas que juntos formam a nuvem (ou enxame) de partículas e evoluem através da cooperação e não da competição entre si. As partículas beneficiam-se de sua própria experiência e da experiência alheia durante a busca de um melhor "mérito".

Cada partícula possui uma velocidade aleatória para percorrer o espaço de soluções do problema. A posição atual da  $i$ -ésima partícula é representada por:

$$X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{id}) \quad (5.1.1)$$

em que o subscrito ' $d$ ' representa a dimensão da partícula ' $i$ '.

A melhor posição de cada partícula ' $i$ ', ou seja, dentre as posições que a partícula já visitou, a que resulta no melhor valor de aptidão (avaliação da posição ocupada pela partícula) é representada por:

$$P_{best_i} = (P_{best_{i1}}, P_{best_{i2}}, \dots, P_{best_{id}}) \quad (5.1.2)$$

Já a melhor posição dentre todas as visitadas por todas as partículas da nuvem é representada por:

$$G_{best} = (G_{best_1}, G_{best_2}, \dots, G_{best_d}) \quad (5.1.3)$$

A taxa da mudança de posição, chamada de velocidade, para a partícula ' $i$ ', é representada na Equação 5.1.4.

$$V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{id}) \quad (5.1.4)$$

O deslocamento das partículas é baseado em três fatores fundamentais:

- **Fator de Sociabilidade:** atração das partículas para a melhor solução descoberta por qualquer elemento da nuvem;

- **Fator de Individualidade:** atração da partícula com sua melhor posição já descoberta; e

- **Velocidade Máxima:** restrição para o movimento, uma vez que é direcional e determinado.

A Equação 5.1.5 é usada para calcular a nova velocidade da partícula, tendo como referência sua velocidade anterior e as distâncias entre sua posição atual, sua melhor posição e a melhor posição do grupo. Assim, define-se a nova posição de cada partícula ' $i$ ' de acordo com a Equação 5.1.6. A avaliação de cada partícula é feita usando-se uma função de aptidão (função que avalia cada posição da partícula) relacionada ao problema a ser resolvido. A função do fator de inércia ' $W$ ' é controlar o impacto da velocidade anterior na velocidade atual.

$$V_i = W \times V_i + c_1 \times rand() \times (P_{best}^i - X_i) + c_2 \times Rand() \times (G_{best} - X_i) \quad (5.1.5)$$

$$X_i = X_i + V_i \quad (5.1.6)$$

em que:

$c_1$  e  $c_2$  são constantes positivas que correspondem às componentes cognitivas e sociais;  $rand()$  e  $Rand()$  são duas funções aleatórias no intervalo  $[0,1]$ ; e

$W$  é o peso de inércia frente ao movimento das partículas.

O algoritmo da estratégia PSO, retirado de (ALOISE; OLIVEIRA; SILVA, 2006), é apresentado em Algoritmo 1.

---

**Algoritmo 1:** Particle Swarm Optimization - PSO

---

**Entrada:**  $S_0, W, c_1, c_2$

**Saída:**  $G_{best}$

**início**

*// Definição das Variáveis*

$p$ : O tamanho da população.

$X[i]$ : A posição da  $i$ -ésima partícula da população da PSO, que representa uma solução candidata para o problema.

$fitness[i]$ : O custo da função para a  $i$ -ésima partícula.

$V[i]$ : A velocidade da  $i$ -ésima partícula.

$G_{best}$ : Variável para a melhor posição global

$P_{best}[i]$ : A melhor posição encontrada pela  $i$ -ésima partícula.

$P_{best\_fitness}[i]$ : O melhor fitness local visitado pela  $i$ -ésima partícula.

*// Inicializações*

**Para cada partícula  $i$ :**

Inicialize  $X[i]$  randomicamente.

Inicialize  $V[i]$  randomicamente.

Avalie o  $fitness[i]$ .

Inicialize  $G_{best}$ .

Inicialize  $P_{best}[i]$  com uma cópia de  $X[i]$ .

*// Processo Iterativo*

**enquanto Critério de parada não satisfeito faça**

**enquanto  $i \leq P$  faça**

$P_{best}[i] = X[i]$  se  $fitness[i]$  for melhor que  $P_{best\_fitness}[i]$ .

$i \leftarrow i + 1$

**fim**

    Encontre  $G_{best}$  tal que  $G_{best}$  possui o melhor  $fitness$  já encontrado.

**enquanto  $i \leq p$  faça**

        Atualize  $V[i]$  e  $X[i]$  de acordo com as equações 5.1.5 e 5.1.6.

        Avalie a partícula  $i$  atualizando o  $fitness[i]$ .

$i \leftarrow i + 1$

**fim**

**fim**

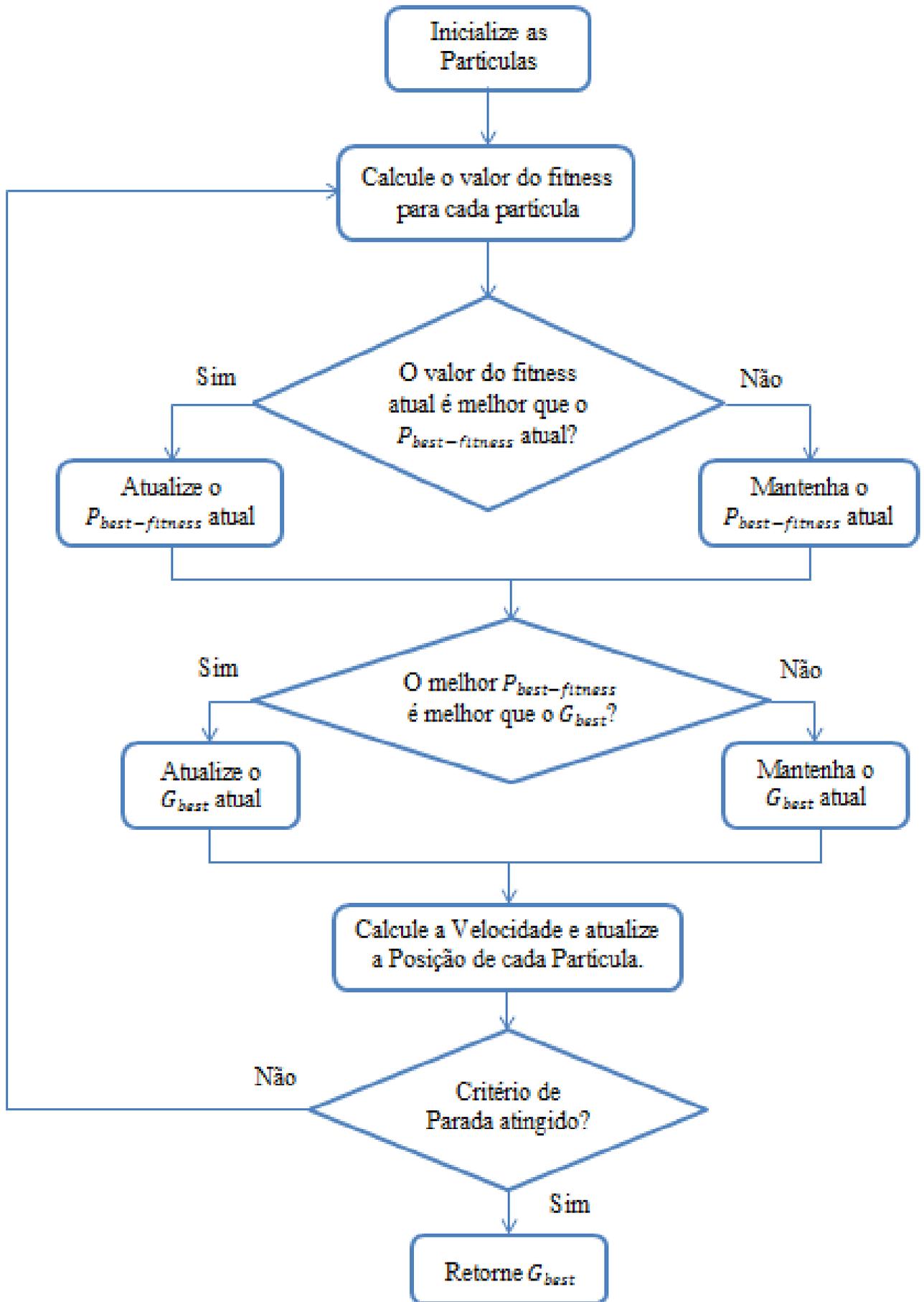
**retorna  $G_{best}$ ;**

**fim**

---

O algoritmo da PSO também é sintetizado em forma de fluxograma, conforme Figura 12 a seguir.

Figura 12 – Algoritmo do Método PSO



Na seção a seguir são apresentadas as codificações utilizadas para o modelo proposto neste trabalho para o problema de alocação de bancos de capacitores.

### 5.1.1 Codificações

Neste trabalho, será estudada a alocação somente de capacitores de potências fixas, sendo elas 150 kVAr, 200 kVAr, 300 kVAr, 400 kVAr, 450 kVAr e 600 kVAr. Na codificação para as simulações elas foram modificadas por um fator multiplicativo igual a 1/50, resultando nos respectivos valores: 3, 4, 6, 8, 9 e 12.

Para cada rede de distribuição a ser testada serão executadas quatro simulações. Na primeira, chamada de 'Alocação 1', serão utilizados bancos de apenas uma capacidade, neste caso, bancos de 600 kVAr. Na simulação 'Alocação 2' serão utilizados bancos de duas capacidades: 300 kVAr e 600 kVAr, na 'Alocação 3' serão três valores de bancos: 200 kVAr, 400 kVAr e 600 kVAr, e na 'Alocação 4' serão quatro valores de capacidade para os bancos: 150 kVAr, 300 kVAr, 450 kVAr e 600 kVAr. O motivo pelo qual se definiu quatro simulações foi explorar diferentes espaços de soluções, conforme discutidos nos resultados, definidos pelas quantidades de capacidades de bancos disponíveis e número de barras da rede.

Com base na codificação citada acima um exemplo de uma solução para um sistema de 10 barras obtido na simulação "Alocação 1" é dado na Figura 13.

Figura 13 – Exemplo de solução na simulação "Alocação 1". Sistema de 10 barras

<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>12</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>12</b>	<b>0</b>	<b>12</b>
----------	----------	----------	----------	-----------	----------	----------	-----------	----------	-----------

As entradas do vetor mostrado na Figura 13 correspondem aos valores dos bancos codificados de forma que, multiplicando os mesmos por 50 obtém-se as capacidades dos bancos em kVAr. Já a identificação da barra ocorre numerando-se as entradas da tabela da esquerda para a direita. Sendo assim, no exemplo apresentado tem-se um banco de 600 kVAr nas barras 5, 8 e 10, e nenhum banco nas demais barras.

Outro exemplo de solução para a mesma rede de 10 barras, sendo desta vez para a simulação "Alocação 4", é apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Exemplo de solução na simulação "Alocação 4". Sistema de 10 barras

<b>0</b>	<b>12</b>	<b>0</b>	<b>9</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>9</b>
----------	-----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Neste segundo exemplo, tem-se a alocação de um banco de 600 kVAr na barra 2, de 450 kVAr nas barras 4 e 10, de 150 kVAr na barra 5 e de 300 kVAr na barra 8. De forma análoga é feita a representação da solução para as demais simulações.

### 5.1.2 PSO aplicada ao Problema de Alocação de Bancos de Capacitores

A PSO será aplicada à formulação para o problema de alocação de BCs mostrada no Capítulo 4 a fim de encontrar uma solução ótima ou quase ótima. A solução consiste em definir as barras onde os BCs devem ser instalados, além da determinação das capacidades desses.

No algoritmo PSO cada partícula é uma possível solução para o problema, ou seja, é uma proposição de alocação de bancos. Cada partícula  $i$  tem sua posição representada por  $X[i]$ , assim, a variável 'Posição', ' $X$ ', consiste em uma matriz com " $p$ " linhas e " $d$ " colunas, sendo " $p$ " a quantidade de partículas da nuvem e " $d$ " a dimensão da partícula, o que corresponde ao número de barras da rede elétrica. Na Figura 15, tem-se um exemplo de representação da variável 'Posição'  $X$ , sendo, neste caso, uma nuvem de 5 partículas para avaliar uma rede elétrica de 10 barras.

Figura 15 – Exemplo de representação da variável 'Posição' para a PSO

<b>Partícula 1</b>	0	12	0	9	3	0	0	6	0	9
<b>Partícula 2</b>	0	0	6	0	0	0	9	3	0	0
<b>Partícula 3</b>	0	6	3	0	0	12	0	0	0	3
<b>Partícula 4</b>	0	0	0	3	0	6	0	0	9	0
<b>Partícula 5</b>	0	3	0	0	9	0	0	6	0	6

A variável 'fitness' consiste em um vetor coluna de tamanho " $p$ " onde cada entrada é formada pela avaliação da respectiva partícula. Já a variável ' $P_{best}$ ' possui as mesmas dimensões que a variável ' $X$ ', onde cada linha representa a melhor posição visitada pela respectiva partícula. A variável ' $P_{best\_fitness}$ ' representa um vetor coluna de tamanho " $P$ " com a avaliação de cada posição de ' $P_{best}$ '. E ' $G_{best}$ ' consiste em um vetor linha, de tamanho " $d$ ", com a melhor posição já encontrada dentre todas as partículas.

A variável 'Velocidade', ' $V$ ', consiste em uma matriz com as mesmas dimensões que a variável 'Posição'. Conforme discutido anteriormente, a codificação dos bancos associa números discretos em um intervalo entre 0 e 12. Assim, o deslocamento das partículas resumiu-se a acrescentar ou diminuir um número aleatório entre 0 e 12. Posteriormente, um arredondamento para o valor válido mais próximo é realizado. Um exemplo para a variável 'Velocidade' é mostrado na Figura 16, tendo neste exemplo uma nuvem de 5 partículas para uma rede de 10 barras.

Figura 16 – Exemplo de representação da variável 'Velocidade' para o método PSO

<b>Partícula 1</b>	0	-5	0	0	-3	0	8	1	0	-4
<b>Partícula 2</b>	0	0	2	0	0	-1	0	0	6	0
<b>Partícula 3</b>	0	1	-4	0	0	0	0	7	0	12
<b>Partícula 4</b>	0	2	0	9	0	0	1	0	-10	0
<b>Partícula 5</b>	0	0	0	11	0	0	0	0	4	-9

Foram realizadas as quatro simulações discutidas anteriormente: "Alocação 1", "Alocação 2", "Alocação 3" e "Alocação 4". As principais diferenças entre elas estão no

tamanho da nuvem, quantidade de iterações, e principalmente no arredondamento para os valores válidos, quando se atualiza a variável 'Posição'.

### 5.1.3 Exemplo Aplicado envolvendo a PSO

Nesta seção, será apresentado um exemplo de aplicação do método PSO, usando as codificações já apresentadas, em um problema de alocação de bancos em uma rede de 5 barras. A Função Objetivo para este problema consistirá na minimização da soma dos números representativos dos bancos associados às barras.

Será realizada neste exemplo a simulação 'Alocação 4'. Os parâmetros da PSO para este cenário foram definidos como: 2 iterações, 3 partículas, fator  $w = 0.5$ , fator  $c_1 = 0.5$ , fator  $c_2 = 0.5$ . O primeiro passo é a geração aleatória de uma nuvem inicial, identificando a posição de cada partícula. Cada partícula aqui representa uma solução candidata para o problema, ou seja, sugere uma alocação de bancos. O vetor '*Posição*', ou '*X*', gerado é mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Vetor inicial para a 'Posição' das partículas

$$x^0 =$$

<b>Partícula 1</b>	<b>0</b>	<b>12</b>	<b>0</b>	<b>9</b>	<b>3</b>
<b>Partícula 2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>12</b>
<b>Partícula 3</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>6</b>

Dadas as posições das partículas, é feita a avaliação das mesmas usando-se a função objetivo do problema, que foi definida como a soma dos números que codificam os bancos.

Para a 'Partícula 1', sua avaliação será dada pela soma  $12 + 9 + 3$ , que corresponde ao valor 24. Procedendo-se assim, são também avaliadas as demais partículas, chegando-se ao vetor *fitness* mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Vetor 'fitness' para a iteração 1

$$fitness^1 =$$

<b>Partícula 1</b>	<b>24</b>
<b>Partícula 2</b>	<b>21</b>
<b>Partícula 3</b>	<b>15</b>

O passo agora é atualizar o vetor ' $P'_{best}$ '. Ele é atualizado com a melhor posição já visitada por cada partícula. Como cada partícula somente visitou uma posição (primeira iteração), ele será igual ao vetor '*X*', e o vetor ' $P'_{best\_fitness}$ ' (vetor com a avaliação de cada partícula de ' $P'_{best}$ ') será, para a primeira iteração, igual ao vetor *fitness*.

Parte-se então para a atualização do valor de  $G_{best}$ . Esta variável armazena a melhor posição já visitada pela nuvem. Esta variável somente é atualizada para uma nova posição de partícula se esta última se apresenta melhor avaliada que a posição armazenada em  $G_{best}$ . Para esta primeira iteração,  $G_{best}$  receberá a posição da 'Partícula 3' e  $G_{best\_fitness}$

receberá sua avaliação, conforme mostra a Figura 19, pois esta é até o momento, a melhor posição já visitada.

Figura 19 – Variáveis  $G_{best}$  e  $G_{best\_fitness}$  para a iteração 1

$$G_{best}^1 = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline 0 & 6 & 3 & 0 & 6 \\ \hline \end{array}$$

$$G_{best\_fitness}^1 = \boxed{15}$$

Agora, calcula-se a 'Velocidade' e a nova 'Posição' da partícula, conforme as Equações 5.1.5 e 5.1.6. Como o algoritmo se encontra na primeira iteração, sua velocidade anterior é nula. Para a 'Partícula 1', tem-se:

$$V_1 = 0.5 \times ([0, 0, 0, 0, 0]) + 0.5 \times ([0, 12, 0, 9, 3] - [0, 12, 0, 9, 3]) + 0.5 \times ([0, 6, 3, 0, 6] - [0, 12, 0, 9, 3]) \quad (5.1.7)$$

$$V_1 = [0, -3, 1.5, -4.5, 1.5] \quad (5.1.8)$$

Desta forma, a posição da 'Partícula 1' passa a ser:

$$X_1 = [0, 12, 0, 9, 3] + [0, -3, 1.5, -4.5, 1.5] \quad (5.1.9)$$

$$X_1 = [0, 9, 1.5, 4.5, 4.5] \quad (5.1.10)$$

Os valores definidos para a nova posição da 'Partícula 1' são agora arredondados para os valores válidos mais próximos, conforme é mostrado a seguir.

$$X_1 = [0, 9, 0, 3, 3] \quad (5.1.11)$$

Da mesma forma realizada para a primeira partícula, é feita a estimativa da velocidade e da nova posição para as demais. Assim, é formada uma nova nuvem, de modo que, enquanto o critério de parada não é atingido (como exemplo o número de iterações), o algoritmo inicia uma nova iteração e executa novamente os passos detalhados neste exemplo.

## 5.2 Variable Neighborhood Search - VNS

A Variable Neighborhood Search (Busca em Vizinhança Variável) é uma meta-heurística que realiza busca local na vizinhança de uma solução corrente (REIS, 2013). A VNS é um método de busca local que consiste em explorar o espaço de soluções por meio de trocas sistemáticas de estruturas de vizinhança. Diferentemente de outras técnicas, esse método não segue uma trajetória, mas sim explora soluções vizinhas gradativamente mais

"distantes" da solução atual e concentra a busca em torno de uma nova solução se, e somente se, um movimento de melhoria é realizado. Caso não haja uma solução vizinha melhor do que a atual, busca-se, aleatoriamente, uma solução vizinha cada vez mais remota. Caso haja uma solução melhor, inicia-se uma nova busca local.

Nessa meta-heurística, parte-se de uma solução inicial qualquer e, a cada iteração, seleciona-se aleatoriamente um vizinho  $s'$  dentro da vizinhança  $N^k(s)$ , obtida por meio de estrutura de vizinhança de ordem  $k$  ( $1 \leq k \leq r$ ), a partir da solução atual  $s$ . O vizinho  $s'$  é então submetido a um processo de busca local. Se a nova solução  $s''$ , resultante da busca em torno de  $s'$ , for melhor do que a solução atual  $s$  (isto é  $f(s'') < f(s)$ ), a busca prossegue a partir da nova solução encontrada  $s''$ , reiniciando a partir da primeira estrutura de vizinhança  $N^1(s)$ , que corresponde a  $k = 1$ . Caso contrário, a busca prossegue a partir da próxima estrutura de vizinhança  $N^{k+1}(s)$  (REIS, 2013). O método VNS é apresentado no pseudocódigo do Algoritmo 2 (REIS, 2013).

---

**Algoritmo 2:** Variable Neighborhood Search - VNS

---

**Entrada:** ( $S_0$ ) solução inicial, ( $r$ ) número de estruturas de vizinhança

**Saída:** ( $S$ ) solução ótima

**início**

$S \leftarrow S_0$ ;

**enquanto** *Critério de parada não satisfeito* **faça**

$k \leftarrow 1$  Tipo de estrutura de vizinhança

**enquanto**  $k \leq r$  **faça**

            Gere um vizinho qualquer  $S' \in N^{(k)}(S)$ ;

$S'' \leftarrow \text{BuscaLocal}(S')$ ;

**se**  $f(S'') < f(S)$  **então**

$S \leftarrow (S'')$ ;

$k \leftarrow 1$ ;

**senão**

$k \leftarrow k + 1$ ;

**fim**

**fim**

**fim**

**retorna**  $S$ ;

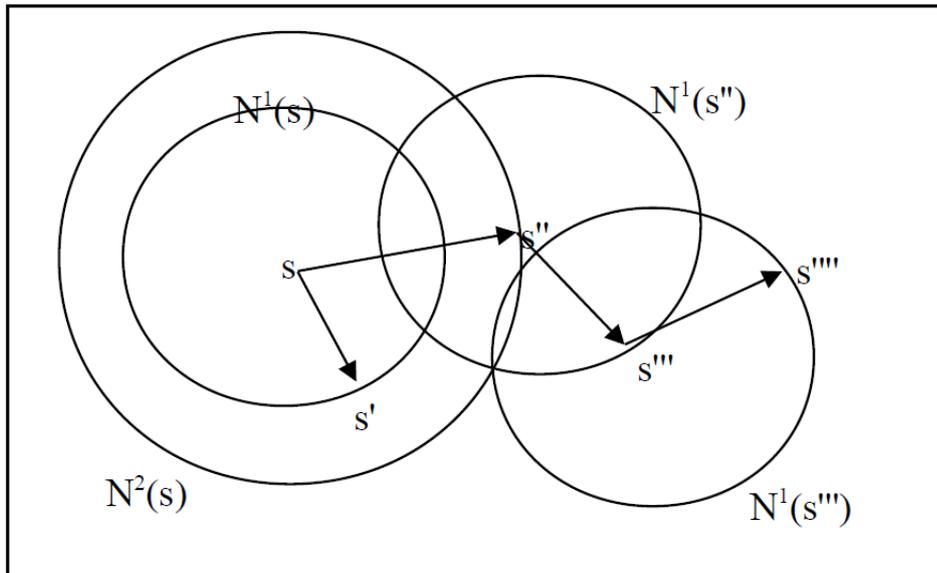
**fim**

---

Como critério de parada, pode-se empregar o tempo de processamento, o número máximo de iterações ou o número máximo de iterações consecutivas sem melhoria. A solução  $s'$  é obtida de forma aleatória, conforme mostra o algoritmo acima, de modo a evitar ciclos, que podem ocorrer caso uma regra determinística seja utilizada.

A Figura 20 mostra o modo como a VNS explora o espaço de soluções.

Figura 20 – Funcionamento da VNS



Fonte: (REIS, 2013)

Ressalta-se aqui outros métodos de otimização relacionados à meta-heurística VNS descritos em (REIS, 2013). Esta estratégia de otimização é resultado da junção das meta-heurísticas Iterated Local Search (ILS) e Variable Neighbourhood Descend (VND). Já a junção das meta-heurísticas Tabu Search (TS) e VNS resultou no desenvolvimento da meta-heurística VNS-LR (VNS com Lista Restrita).

### 5.2.1 VNS aplicada ao Problema de Alocação de Bancos de Capacitores

No método VNS, o modo de se realizar a busca em uma vizinhança consistiu em alterar o valor agregado ao banco em determinada barra. Isto é feito somando ou subtraindo um valor aleatório ao valor referente ao banco, de modo a inserir, remover ou alterar o valor do banco.

As estruturas de vizinhança consistiram em limitar a quantidade de barras a serem modificadas. Para assumir o lugar da solução vigente, a vizinha tem que apresentar melhor valor de avaliação do que o valor de avaliação da solução vigente, de acordo com a função objetivo do problema, além de atender às restrições quanto ao perfil de tensão, que foram discutidas anteriormente. O critério de parada é alcançado quando se chega a um limite de iterações sem melhoria da solução, ou quando se alcança simplesmente um limite máximo de iterações.

### 5.2.2 Exemplo Aplicado envolvendo a VNS

Na Seção 5.1.3, a meta-heurística PSO foi aplicada a um exemplo de problema de alocação de bancos em uma rede de 5 barras. A este mesmo problema será aplicada a

VNS, de forma a demonstrar com mais detalhes a implementação desta meta-heurística. Será realizada a simulação 'Alocação 4', assim como na aplicação da PSO.

Neste exemplo serão investigadas duas soluções vizinhas à solução corrente e serão definidas duas estruturas de vizinhança. Cada estrutura de vizinhança define uma região ao redor da solução corrente. A primeira estrutura apresenta um raio de alcance menor, é menos abrangente em relação à segunda estrutura, ou seja, as soluções vizinhas investigadas nela estão mais próximas da solução corrente do que as soluções vizinhas investigadas na segunda estrutura de vizinhança.

A primeira estrutura de vizinhança foi definida de modo que as soluções vizinhas se diferenciem da solução corrente em apenas uma das barras, e já na segunda estrutura, as soluções vizinhas podem diferir da solução atual em até duas barras. É definido um número máximo de iterações em cada uma destas estruturas de vizinhança.

O método VNS executa a busca em torno de uma solução inicial, definida aleatoriamente. Ele divide seu esforço computacional nas buscas em diferentes estruturas de vizinhança. Neste exemplo define-se que ele permaneça por no máximo 10 iterações em cada estrutura de vizinhança sem a percepção de uma solução melhor do que a atual. Define-se aleatoriamente a solução inicial mostrada na Figura 21, com seu respectivo valor de avaliação.

Figura 21 – Solução Inicial

$$\begin{aligned}
 \text{Solução}^0 &= \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline \mathbf{0} & \mathbf{9} & \mathbf{0} & \mathbf{6} & \mathbf{12} \\ \hline \end{array} \\
 \text{Valor}^0 &= \boxed{27}
 \end{aligned}$$

Como no primeiro nível de vizinhança definiu-se que as soluções vizinhas diferem da solução atual em apenas uma barra, elas são geradas da seguinte maneira: para uma solução vizinha, define-se aleatoriamente uma barra da solução corrente para ser alterada, por exemplo a barra 4. Após isto, é somado um número inteiro, aleatório, compreendido no intervalo  $[-12,12]$ , tal qual o número -5, que tem a função de alterar (inserir, retirar ou mudar a capacidade) a condição de banco de capacitor inserido nesta barra. Para a segunda solução vizinha, são sorteados a barra 3 e o número inteiro 4. As duas soluções vizinhas resultam, portanto, nas apresentadas na Figura 22.

Figura 22 – Soluções Vizinhas

<b>Vizinha 1</b>	<b>0</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>12</b>
<b>Vizinha 2</b>	<b>0</b>	<b>9</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>12</b>

Estas soluções candidatas possuem números inválidos, pois como esta é a simulação 'Alocação 4', somente se permite os números 0, 3, 6, 9 e 12. Desta forma, os números representativos dos bancos são arredondados para os valores válidos, conforme mostra a Figura 23, que mostra também as avaliações destas soluções candidatas.

Figura 23 – Soluções Vizinhas Válidas

<b>Vizinha 1</b>	<b>0</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>12</b>
<b>Vizinha 2</b>	<b>0</b>	<b>9</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>12</b>

*Avaliações* =

<b>21</b>
<b>30</b>

Nota-se que a solução 'Vizinha 1' é mais bem avaliada que a solução corrente, assim, a solução corrente é atualizada com os valores desta solução vizinha.

Figura 24 – Solução corrente atualizada

*Solução*<sup>1</sup> =

<b>0</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>12</b>
----------	----------	----------	----------	-----------

*Valor*<sup>1</sup> =

<b>21</b>
-----------

Como nesta iteração foi observada uma melhoria na solução corrente, a contagem das iterações não é incrementada e somente após dez iterações sem a observação de melhoria é que o algoritmo passa a investigar soluções na segunda estrutura de vizinhança, onde são alteradas duas barras da solução corrente.

# 6 Testes e Resultados

O presente capítulo é dedicado à descrição das redes de distribuição utilizadas como sistemas teste para o estudo desenvolvido bem como à apresentação dos resultados da alocação de reativos para as redes avaliadas. Foram aplicadas duas meta-heurísticas tanto em redes monofásicas como em uma rede trifásica de distribuição primária de energia elétrica. Antes de apresentar as simulações e seus respectivos resultados, serão apresentados os resultados de implementações e validações dos métodos apresentados nas seções e capítulos anteriores.

## 6.1 Implementação e Validação dos Métodos Utilizados

### 6.1.1 Implementação e Validação do Método de Varredura

A versão monofásica deste método de fluxo de potência foi implementada no software MatLab. A validação dos resultados encontrados foi feita com base em (CARVALHO, 2006), que apresenta os valores de tensão nas barras e de corrente nos ramos para as redes de 4, 10, 34 e 70 barras. Foram obtidos os mesmos resultados, considerando-se os dados em p.u. e usando-se sete casas após a vírgula, validando a codificação desenvolvida.

Já a versão trifásica do método de Varredura, também implementada no ambiente MatLab, teve sua validação feita com base em uma rede do sistema IEEE de 4 barras. As simulações realizadas nesse trabalho geraram os mesmos valores apresentados pelo relatório que acompanha o sistema elétrico modelo, mostrando o exato funcionamento do método implementado.

### 6.1.2 Implementação e Validação da PSO

Antes de aplicar o algoritmo da PSO ao problema de alocação de bancos de capacitores, sua implementação foi avaliada para resolver funções analíticas conhecidas, cuja solução ótima já foi determinada, de modo a testar sua eficácia. Foram solucionadas três dessas funções, chamadas de Funções de Benchmark: Função Easom, Função EggHolder e a Função Griewank. Estas funções estão descritas em "Anexo A". As implementações da PSO, bem como da VNS, foram realizadas em ambiente Matlab.

**Função Easom:** O domínio desta função foi limitado por  $-100 \leq x, y \leq 100$ . O valor mínimo desta função é obtido quando  $x = \pi$  e  $y = \pi$  resultando em  $f(\pi, \pi) = -1$ . Para esta função, os parâmetros da PSO foram:  $w = 0.9, c_1 = 0.5, c_2 = 0.5, p = 50$  partículas. A dimensão da partícula é igual a 2 ( $d = 2$ ), e como critério de parada foi definido o número máximo de iterações igual a 50. A solução encontrada pela PSO foi

$x = 3.1463, y = 3.126$  e  $f(x, y) = -0.9996$ , mostrando que o algoritmo tinha condições de lidar com funções similares. A PSO também foi aplicada a outras duas funções:

**Função EggHolder:** A função EggHolder tem seu domínio limitado por  $x_i \in [-512, 512]$  para  $i = 1, 2$ , e sua solução ótima consiste em  $x_1 = 512$  e  $x_2 = 404.2319$ , resultando em  $f(x_1, x_2) = -959.64$ . Para esta função, foram adotados para a PSO os seguintes valores de parâmetros:  $w = 0.9, c_1 = 0.5, c_2 = 0.5$ , tendo também 1000 partículas e 1000 iterações. Foi possível encontrar a seguinte solução  $x_1 = 512, x_2 = 404.23$  e  $f(x_1, x_2) = -959.64$ .

**Função Griewank:** Já a função de Griewank é definida para  $x_i \in [-512, 512]$  para  $i = 1, 2$ , e tem como solução ótima  $x_1 = 0, x_2 = 0$  e  $f(x_1, x_2) = 0$ . A PSO aplicada a esta função empregou os mesmos valores dos parâmetros:  $w = 0.9, c_1 = 0.5, c_2 = 0.5$ , partículas=1000 e iterações=1000. Como solução ótima, o método encontrou:  $x_1 = 5.5945 \times 10^{-9}, x_2 = 1.2757 \times 10^{-8}$  e  $f(x_1, x_2) = 0$ .

Nota-se que para as três funções de Benchmark testadas, o método PSO funcionou como esperado. A PSO foi adaptada ao problema de alocação ótima de bancos em uma rede trifásica de 10 barras. O objetivo foi verificar adequabilidade do método ao problema, bem como sua eficiência computacional. Esta rede é detalhada em "Anexo C". A função de avaliação para este problema consistiu na Função Objetivo apresentada no Capítulo 4, dada na Equação 4.1.1. A princípio, foi considerado apenas um valor de banco a ser alocado (600 kVar). Assim, o espaço de busca a ser sondado era composto por 1024 possibilidades. Os parâmetros da PSO para este problema foram ajustados para  $w = 0.1, c_1 = 0.5, c_2 = 0.5$ , partículas=30 e iterações=10. O algoritmo foi executado 50 vezes e em 44 delas encontrou a solução ótima, já conhecida previamente.

Com base nos resultados até aqui apresentados, constata-se um desempenho satisfatório da meta-heurística PSO para tratar o problema investigado.

### 6.1.3 Implementação e Validação da VNS

Assim como feito para a meta-heurística PSO, a VNS foi implementada e aplicada às três funções de Benchmark e na rede de 10 barras anteriormente citadas.

Para as funções de Benchmark foram criadas 5 estruturas de vizinhança:  $N^1(s)$  a  $N^5(s)$ . Em cada uma destas estruturas, são gerados valores aleatórios compreendidos no intervalo  $(0, 1)$ , que são multiplicados pelo índice da estrutura de vizinhança  $(1, 2, \dots, 5)$  em questão, e arbitrariamente, são somados ou subtraídos aos termos da solução em questão gerando assim uma solução vizinha.

Para as três funções apresentadas (Easom, EggHolder e Griewank) os parâmetros da VNS consistiram em 5 estruturas de vizinhança, 100 vizinhas investigadas a cada iteração, e o critério de parada consistiu em limitar em 100 o número de iterações sem melhoria da solução. A solução ótima encontrada para a função Easom consistiu em  $x = 3.1443, y = 3.1398$  e  $f(x, y) = -0.99998$ , o que equivale a solução ótima da função:  $x = \pi, y = \pi$

e  $f(\pi, \pi) = -1$ . Já para a função EggHolder, o método VNS encontrou como solução ótima  $x_1 = 512$ ,  $x_2 = 404.24$  e  $f(x_1, x_2) = -959.64$ , o que corresponde a solução ótima da função, dada por  $x_1 = 512$ ,  $x_2 = 404.2319$  e  $f(x_1, x_2) = -959.64$ . Para a função Griewank, o método encontrou  $x_1 = 0.0011$ ,  $x_2 = -0.0001$  e  $f = 0$ , correspondendo à solução ótima da função:  $x_1 = 0$ ,  $x_2 = 0$  e  $f(x_1, x_2) = 0$ .

Para a rede de 10 barras, cujo objetivo é alocar bancos de 600 kVAr, foram utilizadas também 5 estruturas de vizinhança, onde o índice de cada estrutura define o número máximo de barras a serem modificadas (inserida ou retirada do banco). Os demais parâmetros desta simulação foram definidos como se segue: 5 vizinhas geradas a cada iteração e o critério de parada consistiu em limitar a 20 o número máximo de iterações sem melhoria da solução.

A execução do algoritmo desenvolvido durou em média 29 iterações, sendo geradas 5 soluções vizinhas a cada iteração, o espaço investigado consistiu em  $5 \times 29 = 145$  soluções candidatas, de um total de 1024 possíveis, correspondendo a 14% do espaço total de soluções. Os resultados foram satisfatórios, em que 50 execuções do método levaram à convergência para a solução ótima previamente conhecida em 42 vezes, correspondendo a 84% de acerto.

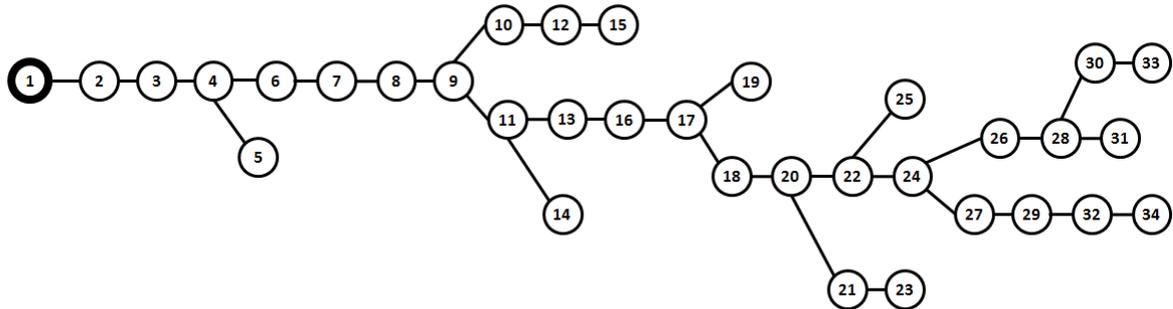
Assim como para a PSO, foram feitos testes e validações da VNS a fim de se verificar a correta implementação e funcionamento. Os resultados acima mostraram que o método foi implementado de maneira satisfatória.

## 6.2 Redes Usadas como Sistemas Teste

As redes serão apresentadas conforme o tamanho das mesmas. Isto foi feito pelo fato de redes menores corresponderem a menores espaços de busca, oferecendo menores dificuldades aos métodos propostos neste trabalho. Desta forma, inicialmente será apresentada a rede de trifásica desequilibrada de 34 barras e posteriormente, as redes monofásicas de 70 e 222 barras.

A rede de 34 barras consiste em um alimentador trifásico de média tensão, do sistema IEEE, retirado de (PIZZALI, 2003). O mesmo possui como tensão em sua barra de referência o valor de  $V_{ref} = 25.647kV$ . Esta rede também apresenta bitolas CAA #1/0, CAA #2 e CAA #4. A relação X/R, nas impedâncias próprias das fases, varia entre 0.68 e 1.81. A Figura 25 apresenta a disposição das barras nesta rede radial. As demais características da rede como impedância dos trechos e valores das cargas estão descritas em "Anexo C". Os valores das cargas foram acentuados por um fator multiplicativo de 1.4, de modo a serem obtidas violações consideráveis nos valores de tensão de algumas barras, simulando assim uma situação de demanda elevada.

Figura 25 – Rede Trifásica de 34 barras

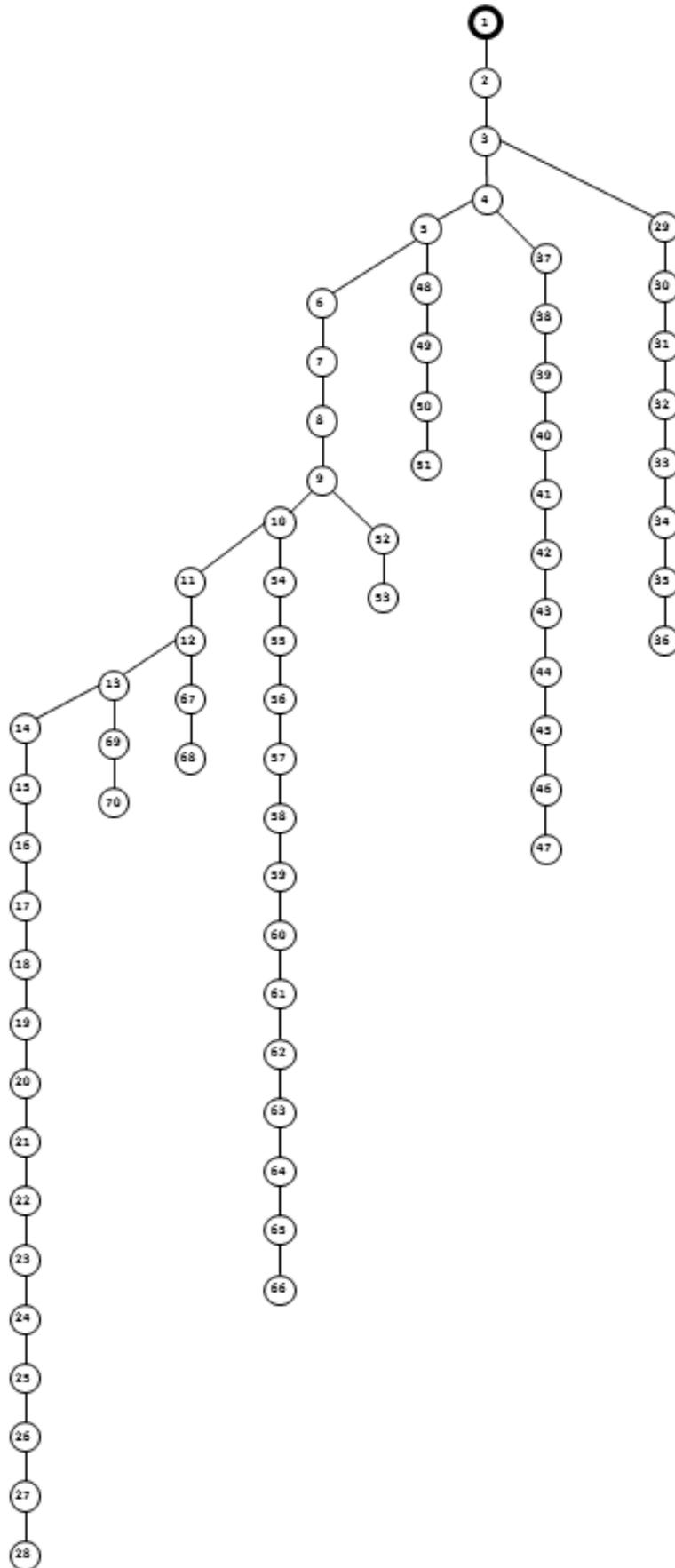


Fonte: Baseada em (PIZZALI, 2003)

Uma das redes monofásicas utilizadas neste trabalho foi um sistema de distribuição primária de 70 barras, retirado de (CARVALHO, 2006). Esta rede possui uma barra que representa a subestação. Portanto, são 69 barras de carga, 69 linhas de distribuição e 7 ramais laterais. A tensão da barra de referência é de 12.66 kV. A disposição das barras é mostrada na Figura 26, e as demais características elétricas da rede são apresentadas em "Anexo C". Assim como na rede de 34 barras, os valores das cargas desta rede foram também acentuados por um fator multiplicativo, que neste caso foi de 1.3.

Outra rede estudada neste trabalho foi um alimentador monofásico de 222 barras. Este alimentador possui tensão de 69 kV, uma barra de subestação e 221 barras de carga. Esta rede foi retirada de um banco de dados, de uso público, com diversos sistemas reais de distribuição, chamado de REDS: Repository of Distribution Systems (<http://www.dejazzer.com/reds.html>), ambiente este criado por Rajesh Kavasseri e Cristinel Ababei. As demais características desta rede estão descritas em "Anexo C". Para esta rede, nenhum fator multiplicativo foi aplicado.

Figura 26 – Rede Monofásica de 70 barras



Fonte: Baseada em (CARVALHO, 2006)

### 6.3 Sistema de 34 Barras

Conforme discutido na Seção 5.1.1, foram concebidos quatro cenários de teste para cada estratégia de otimização, a saber:

I) 'Alocação 1', bancos com capacidades de único valor (600 kVAr);

II) 'Alocação 2', bancos com capacidades de dois valores possíveis (300 kVAr e 600 kVAr);

III) 'Alocação 3', bancos com capacidades dentre três valores possíveis (200 kVAr, 400 kVAr e 600 kVAr);

IV) 'Alocação 4', bancos com capacidades dentre quatro valores possíveis (150 kVAr, 300 kVAr, 450 kVAr e 600 kVAr).

Para as simulações realizadas neste trabalho, o valor cambial do dólar foi considerado igual a R\$ 3.77 (referente ao ano de 2015). Os parâmetros associados à cada meta-heurística, em cada simulação, são descritos nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Parâmetros da PSO para as simulações na rede de 34 barras

	<b>Iterações</b>	<b>Partículas</b>	<b>Fator <math>w</math></b>	<b>Fator <math>c_1</math></b>	<b>Fator <math>c_2</math></b>
<b>Alocação 1</b>	100	1000	0.3	0.5	0.5
<b>Alocação 2</b>	100	5000	0.4	0.5	0.5
<b>Alocação 3</b>	100	10000	0.4	0.5	0.5
<b>Alocação 4</b>	100	10000	0.6	0.5	0.5

Tabela 4 – Parâmetros da VNS para as simulações na rede de 34 barras

	<b>Iterações</b>	<b>Vizinhas</b>	<b>Estruturas de Vizinhança</b>
<b>Alocação 1</b>	1000	1000	10
<b>Alocação 2</b>	1000	1000	10
<b>Alocação 3</b>	1000	2000	10
<b>Alocação 4</b>	1000	2000	10

Para todas as quatro simulações envolvendo o método VNS para esta rede, foram definidos 10 níveis de estruturas de vizinhança. A estrutura de vizinhança de nível '1' corresponde a uma solução adjacente obtida pela alteração de apenas uma das barras, escolhida aleatoriamente, da solução corrente, ou seja, o valor do banco associado a esta barra é modificado, podendo assim ser inserido, removido, ou ter sua capacidade alterada. A Tabela 5 apresenta a correspondência de cada estrutura de vizinhança com a quantidade de barras a serem alteradas. A quantidade de barras a serem alteradas em cada estrutura foi estimada empiricamente, com base nos primeiros resultados das simulações.

Tabela 5 – Estruturas de Vizinhança para a rede de 34 barras

<b>Estrutura de Vizinhança</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b><math>N^\circ</math> de barras alteradas</b>	1	2	3	6	10	12	14	18	21	25

As Figuras 27 a 30 apresentam as soluções obtidas para cada método em cada simulação.

Figura 27 – Soluções encontradas para cada método, na simulação 'Alocação 1' para a rede de 34 barras. Solução da PSO em vermelho e da VNS em azul

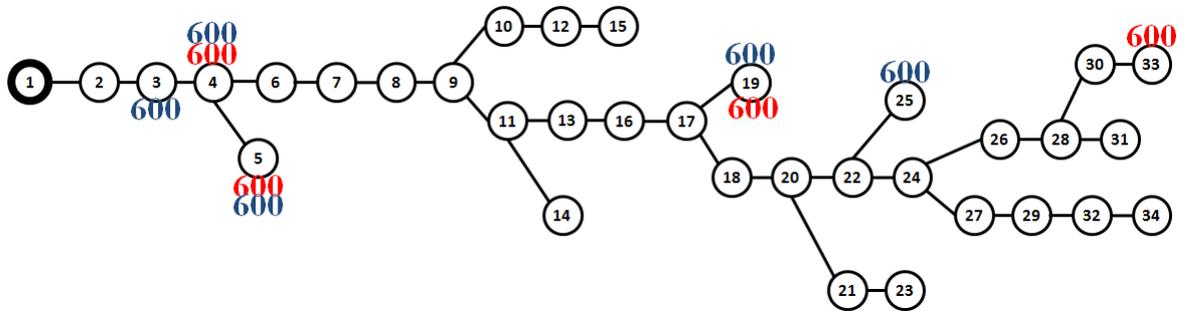


Figura 28 – Soluções encontradas para cada método, na simulação 'Alocação 2' para a rede de 34 barras. Solução da PSO em vermelho e da VNS em azul

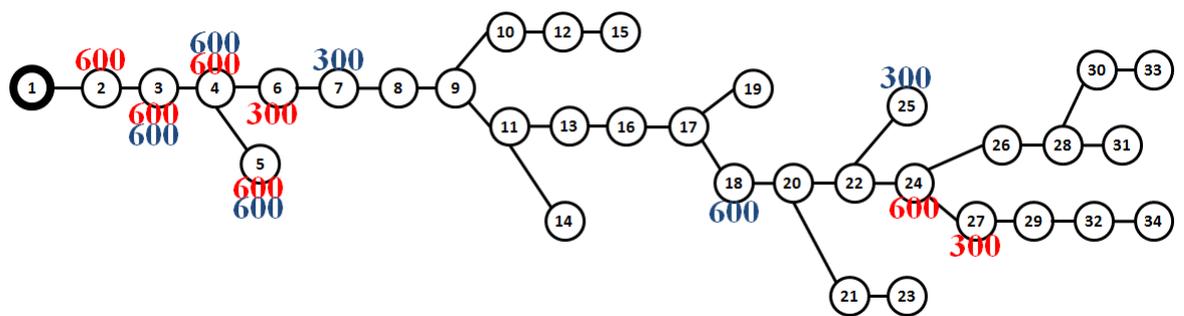


Figura 29 – Soluções encontradas para cada método, na simulação 'Alocação 3' para a rede de 34 barras. Solução da PSO em vermelho e da VNS em azul

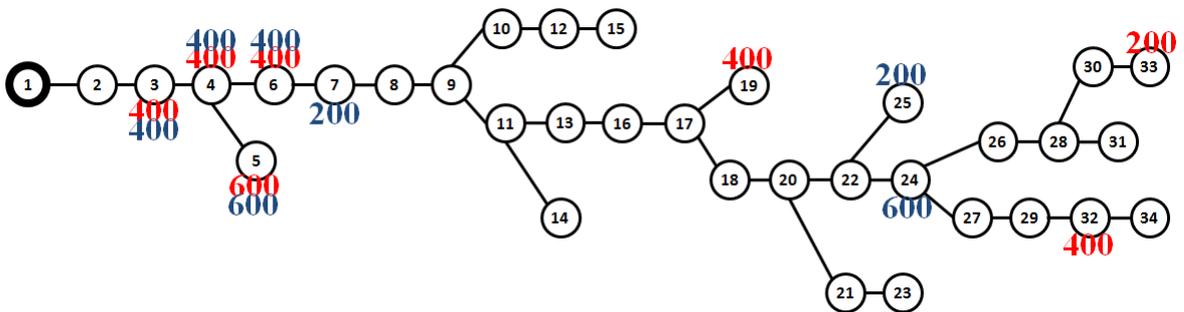
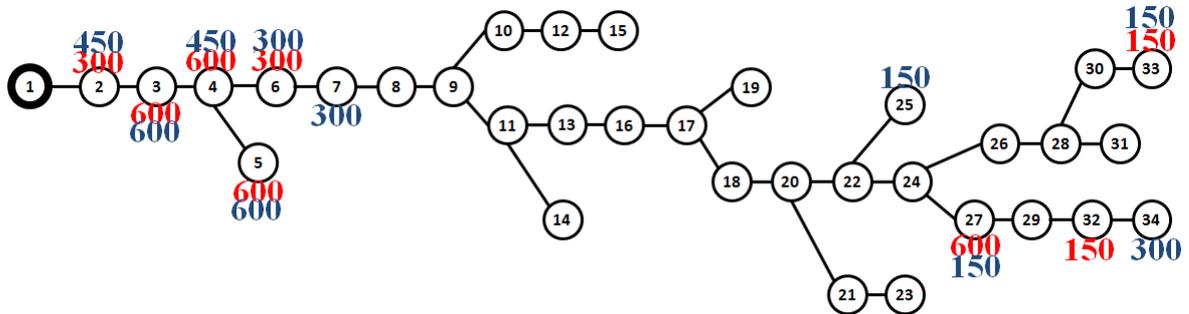


Figura 30 – Soluções encontradas para cada método, na simulação 'Alocação 4' para a rede de 34 barras. Solução da PSO em vermelho e da VNS em azul



Para todas as quatro simulações, nota-se que a quantidade e a disposição dos bancos definidas para cada meta-heurística são semelhantes. Em todas as simulações, destaca-se também a concentração de bancos na região inicial do alimentador, somada a mais alguns bancos na parte final do mesmo. As Figuras 31 à 33 apresentam os perfis de tensão obtidos antes e após as alocações sugeridas.

Para as três fases, as oito curvas de perfil de tensão provenientes das soluções encontradas pelos métodos de otimização (quatro pela PSO e quatro pela VNS) se apresentaram bem próximas entre si, mostrando uma coerência dos resultados das simulações. Nota-se também que após a instalação dos bancos, as tensões em todas as barras, para as três fases, se apresentaram acima de 0.93 p.u., conforme exige a legislação vigente.

Figura 31 – Perfis de Tensão encontrados para a fase A, para a rede de 34 Barras

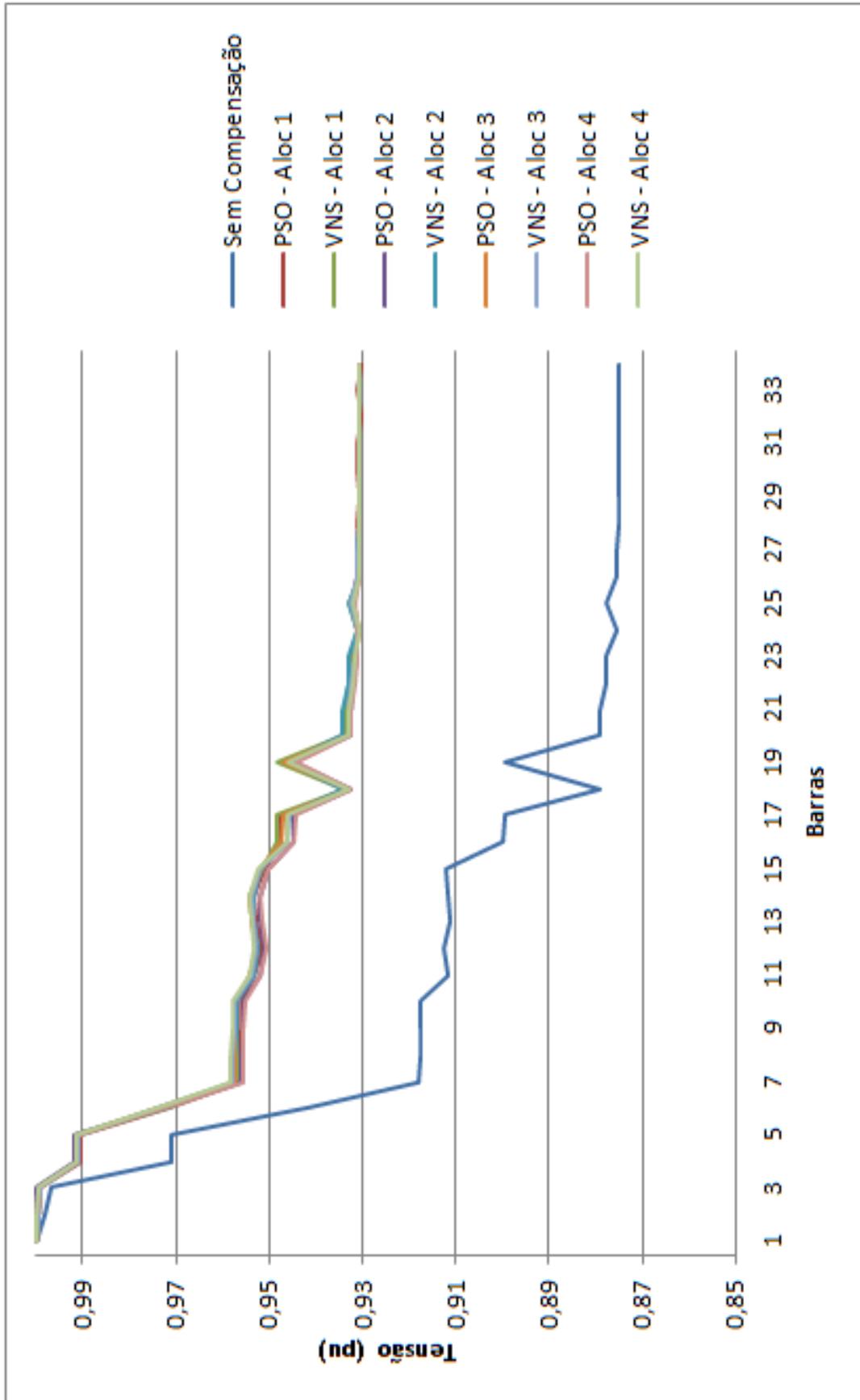


Figura 32 – Perfis de Tensão encontrados para a fase B, para a rede de 34 Barras

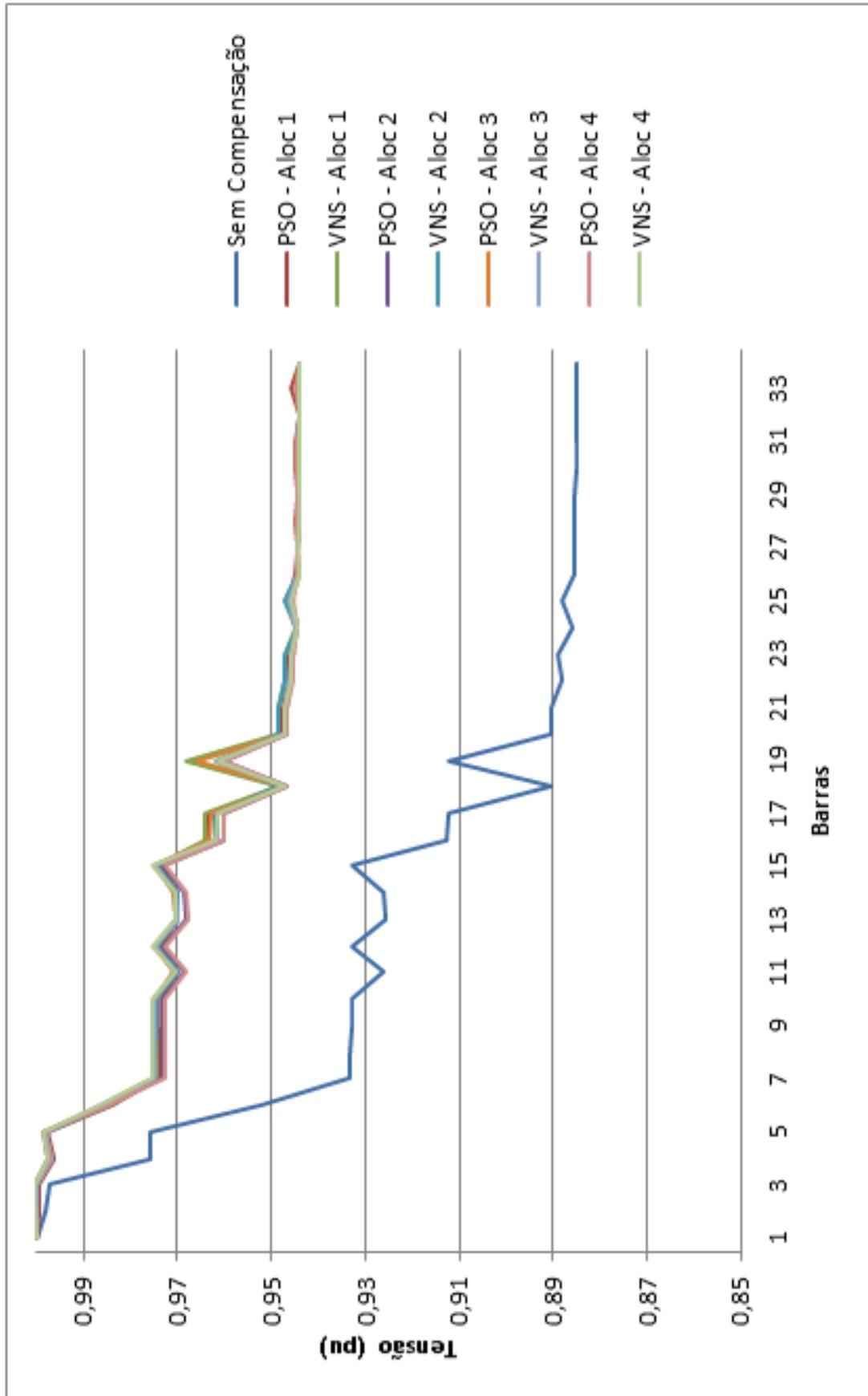
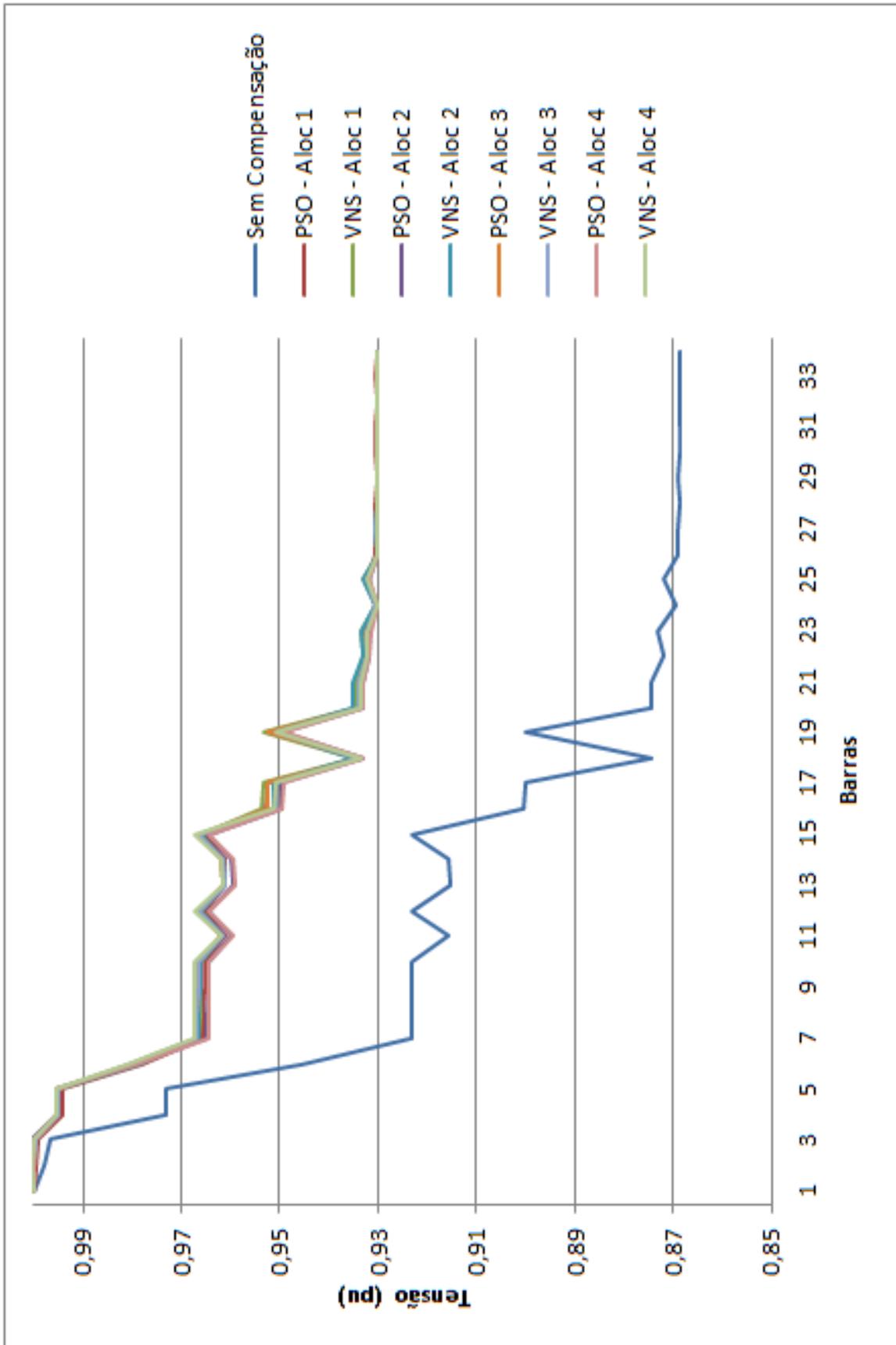


Figura 33 – Perfis de Tensão encontrados para a fase C, para a rede de 34 Barras



O percentual das perdas de potência ativa nas linhas foi estimado através da razão entre a soma das potências ativas dissipadas nas linhas das três fases e a soma das potências ativas das cargas das três fases, conforme apresenta a Equação 6.3.1. A estimação das perdas pode ser feita de maneira mais precisa, mas a aproximação aqui apresentada é satisfatória na quantização destas perdas e para a finalidade de comparar as mesmas em diferentes cenários de simulação.

$$Perdas(\%) = \frac{Real(\sum_{l=1}^{nlinhas}(Z_{a\_l} \times I_{a\_l}^2 + Z_{b\_l} \times I_{b\_l}^2 + Z_{c\_l} \times I_{c\_l}^2))}{Real(\sum_{k=1}^{nbarras}(S_{a\_k} + S_{b\_k} + S_{c\_k}))} \quad (6.3.1)$$

em que:

-  $nlinhas$  e  $nbarras$  correspondem, respectivamente, ao número total de linhas e barras da rede;

-  $Z_{a\_l}$  e  $I_{a\_l}$  correspondem, respectivamente, à impedância (em  $\Omega$ ) e à corrente (em Ampères) do trecho ' $l$ ' na fase ' $a$ ';

-  $S_{a\_k}$  corresponde à potência aparente (em VA) da carga ligada à barra ' $k$ ', na fase ' $a$ '.

A Tabela 6 apresenta os percentuais de perdas de potência ativa obtidos, antes e após as alocações propostas.

Tabela 6 – Análise das Perdas para a rede de 34 Barras

	<b>Solução da PSO</b>	<b>Solução da VNS</b>	<b>Sem Bancos Inseridos</b>
<b>Alocação 1</b>	6,84%	6,81%	9,18%
<b>Alocação 2</b>	6,65%	6,82%	
<b>Alocação 3</b>	6,64%	6,69%	
<b>Alocação 4</b>	6,61%	6,63%	

Nota-se a expressiva redução das perdas de potência ativa alcançada em todos os cenários de simulação, onde uma redução sensivelmente superior foi alcançada pelas soluções encontradas na simulação 'Alocação 4'. As Tabelas 7 e 8 fazem uma síntese dos custos envolvidos nas simulações para a rede de 34 barras, onde na primeira são expostos os custos para a rede sem a inserção dos bancos.

Tabela 7 – Custos para a rede de 34 barras sem a inserção dos bancos de capacitores

<b>Quantidade de Bancos</b>	0
<b>Custo dos Bancos</b>	R\$ 0,00
<b>Custo das Perdas</b>	R\$ 4.733.314,85
<b>Custo Total</b>	R\$ 4.733.314,85

Com base nas tabelas 7 e 8, a primeira observação de destaque é que o custo total associado à rede sem a inserção dos bancos (somente custo das perdas) é superior ao custo de investimento em bancos somado ao custo das perdas em todas as soluções obtidas,

Tabela 8 – Análise Financeira das simulações feitas para a rede de 34 barras

		<b>Solução da PSO</b>	<b>Solução da VNS</b>
<b>Alocação 1</b>	<b>Quantidade de Bancos</b>	4	5
	<b>Custo dos Bancos</b>	R\$ 73.741,20	R\$ 92.176,50
	<b>Custo das Perdas</b>	R\$ 3.529.782,14	R\$ 3.512.079,99
	<b>Custo Total</b>	R\$ 3.603.523,34	R\$ 3.604.256,49
<b>Alocação 2</b>	<b>Quantidade de Bancos</b>	7	6
	<b>Custo dos Bancos</b>	R\$ 115.067,94	R\$ 96.632,64
	<b>Custo das Perdas</b>	R\$ 3.428.759,50	R\$ 3.515.974,74
	<b>Custo Total</b>	R\$ 3.543.827,44	R\$ 3.612.607,38
<b>Alocação 3</b>	<b>Quantidade de Bancos</b>	7	7
	<b>Custo dos Bancos</b>	R\$ 96.338,58	R\$ 96.248,10
	<b>Custo das Perdas</b>	R\$ 3.426.377,07	R\$ 3.449.731,23
	<b>Custo Total</b>	R\$ 3.522.715,65	R\$ 3.545.979,33
<b>Alocação 4</b>	<b>Quantidade de Bancos</b>	7	10
	<b>Custo dos Bancos</b>	R\$ 108.078,36	R\$ 124.602,27
	<b>Custo das Perdas</b>	R\$ 3.408.412,00	R\$ 3.420.838,01
	<b>Custo Total</b>	R\$ 3.516.490,36	R\$ 3.545.440,28

ou seja, todo o investimento em bancos de capacitores é mais que recuperado durante a validade das soluções propostas. Outro ponto importante é que nas simulações 'Alocação 1', 'Alocação 2' e 'Alocação 3', dentre as duas soluções encontradas em cada simulação, uma propõe um investimento maior em bancos de capacitores, gerando um menor gasto com perdas de potência ativa nas linhas, e o contrário ocorre na outra solução, onde se investe menos em bancos mas se gasta mais com perdas. Já na simulação 'Alocação 4', a solução obtida pela PSO apresentou menor investimento em bancos e ainda conseguiu um menor gasto com as perdas, se apresentando mais eficiente.

A Tabela 9 resume a relação entre o espaço de busca e o espaço investigado para cada método em cada simulação. Para a simulação 'Alocação 1', à cada barra, excetuando-se a barra de subestação, podem ser associados dois números: 0 (ausência de banco) ou 12 (banco de 600 kVAr), de modo que o espaço de busca total obtém a dimensão de  $2^{34-1} = 8.59 \times 10^9$  possibilidades. Para a simulação 'Alocação 2' têm-se  $3^{34-1} = 5.56 \times 10^{15}$  possibilidades, e desta forma também se obtém para as demais simulações. Para as simulações do método PSO, o espaço investigado é dado pela multiplicação do número de iterações pelo número de partículas, e já para as da VNS, será dado pelo produto entre o número de iterações e o número de vizinhas.

Nota-se que as simulações percorreram um total de no máximo da ordem de  $10^6$  possibilidades em espaços de busca com dimensões até da ordem de  $10^{23}$  possibilidades, mostrando a eficiência dos métodos, que apesar de não garantirem a obtenção da solução ótima global, conseguiram chegar em soluções suficientemente satisfatórias, conforme mostraram os resultados de tensão e os relacionados às perdas de potência ativa.

Cada simulação foi executada dez vezes, de modo que a Tabela 10 apresenta a

Tabela 9 – Condições de Simulação para a Rede de 34 Barras

	<b>Alocação 1</b>	<b>Alocação 2</b>
<b>Espaço de Busca</b>	$8.59 \times 10^9$	$5.56 \times 10^{15}$
<b>PSO</b>	iter: 100 e part:1000	iter: 100 e part: 5000
<b>VNS</b>	iter: 1000 e vizin: 1000	iter: 1000 e vizin: 1000
	<b>Alocação 3</b>	<b>Alocação 4</b>
<b>Espaço de Busca</b>	$7.38 \times 10^{19}$	$1.16 \times 10^{23}$
<b>PSO</b>	iter: 100 e part:10000	iter: 100 e part: 10000
<b>VNS</b>	iter: 1000 e vizin: 2000	iter: 1000 e vizin: 2000

quantidade de vezes que a solução ótima encontrada se repetiu dentro dessas tentativas.

Tabela 10 – Acertos em 10 tentativas, para as simulações na rede de 34 barras

	<b>Alocação 1</b>	<b>Alocação 2</b>	<b>Alocação 3</b>	<b>Alocação 4</b>
<b>PSO</b>	9	3	1	1
<b>VNS</b>	7	3	1	1

Vê-se que, com o aumento do espaço de busca a quantidade de acertos foi diminuindo, uma vez que o espaço percorrido não aumentou tanto quanto este último, devido ao grande custo computacional que foi gerado. Ainda em relação a estas dez tentativas, a Tabela 11 apresenta a média e o desvio padrão das mesmas para cada simulação.

Tabela 11 – Análise Estatística para as simulações na rede de 34 barras

	<b>Solução da PSO</b>		<b>Solução da VNS</b>	
	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Alocação 1</b>	R\$ 3.629.210,34	R\$ 49.899,04	R\$ 3.549.653,75	R\$ 13.625,13
<b>Alocação 2</b>	R\$ 3.569.679,91	R\$ 18.286,72	R\$ 3.585.485,32	R\$ 43.692,13
<b>Alocação 3</b>	R\$ 3.539.431,50	R\$ 6.640,29	R\$ 3.576.601,15	R\$ 57.576,86
<b>Alocação 4</b>	R\$ 3.527.337,87	R\$ 8.833,57	R\$ 3.512.391,94	R\$ 30.852,36

As Figuras 34 e 35 apresentam, respectivamente, o comportamento da PSO e da VNS na busca pela solução ótima na simulação 'Alocação 1'. Para as demais simulações, estas curvas encontram-se em "Anexo B". Como se trata de um problema de minimização, é evidente a redução no valor da função objetivo com o decorrer das iterações.

Figura 34 – Comportamento da Função Objetivo, na simulação 'Alocação 1' para a PSO, para o sistema de 34 Barras

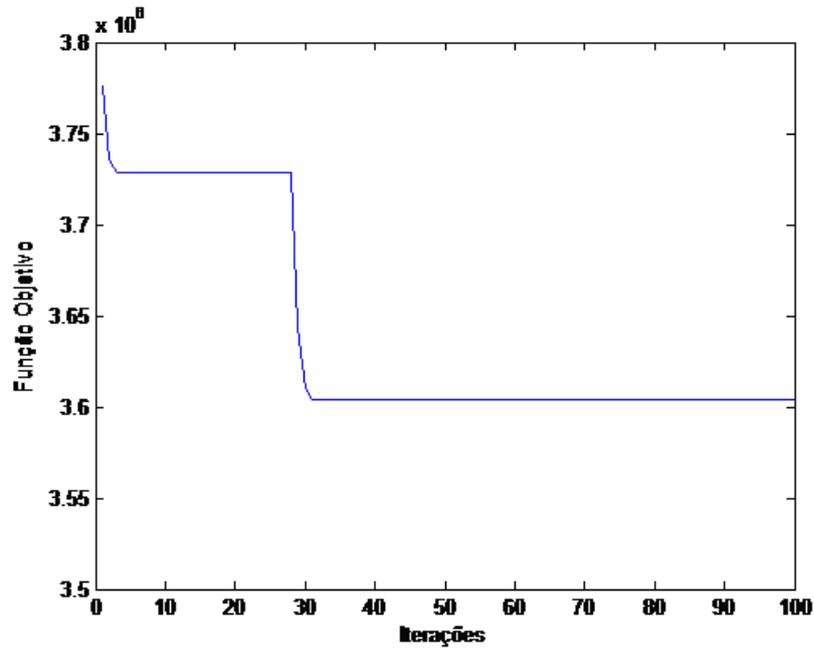
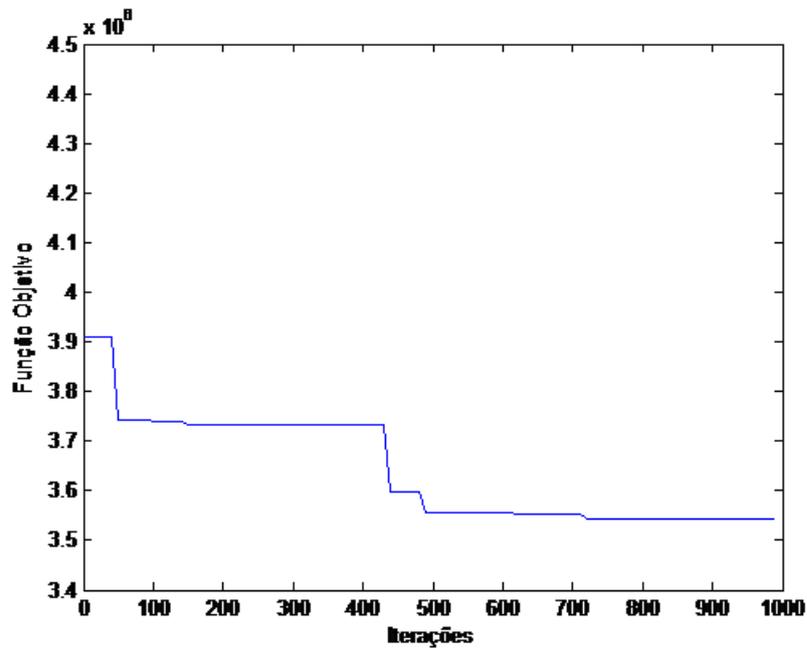


Figura 35 – Comportamento da Função Objetivo, na simulação 'Alocação 1' para a VNS, para o sistema de 34 Barras



Vale ressaltar algumas diferenças importantes de cada método. A PSO executa 100 iterações para um grupo de 1000 partículas, o que resulta em 100.000 avaliações. Já a VNS executa 1000 iterações e 1000 soluções vizinhas são investigadas a cada iteração, o que leva a 1.000.000 de avaliações.

## 6.4 Sistema de 70 Barras

O estudo feito neste trabalho e o desenvolvimento dos modelos até aqui apresentados podem ser aplicados a redes de distribuição monofásicas, conforme será visto a seguir, a redes trifásicas desequilibradas, conforme apresentado na seção anterior, e também a redes trifásicas equilibradas, onde se aplica a metodologia em seu equivalente monofásico e a quantidade de bancos e os custos envolvidos consistirão em multiplicar por um fator de três a quantidade de bancos e os custos encontrados para o equivalente monofásico. Essa relação direta pode ser vista pela análise da função objetivo, no Capítulo 4.

As quatro simulações realizadas para a rede trifásica de 34 barras foram também aplicadas à rede monofásica de 70 barras. Os parâmetros associados aos métodos de otimização são apresentados nas tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Parâmetros da PSO para as simulações na rede de 70 barras

	<b>Iterações</b>	<b>Partículas</b>	<b>Fator <math>w</math></b>	<b>Fator <math>c_1</math></b>	<b>Fator <math>c_2</math></b>
<b>Alocação 1</b>	200	1000	0.6	0.55	0.45
<b>Alocação 2</b>	200	5000	0.8	0.55	0.45
<b>Alocação 3</b>	200	10000	0.8	0.55	0.45
<b>Alocação 4</b>	200	10000	0.8	0.55	0.45

Tabela 13 – Parâmetros da VNS para as simulações na rede de 70 barras

	<b>Iterações</b>	<b>Vizinhas</b>	<b>Estruturas de Vizinhaça</b>
<b>Alocação 1</b>	1000	1000	20
<b>Alocação 2</b>	1000	1000	20
<b>Alocação 3</b>	1000	2000	20
<b>Alocação 4</b>	1000	2000	20

Os vinte níveis de estruturas de vizinhaça, definidos para as simulações do método VNS são apresentados na tabela 14, de modo que, para cada nível está associada uma quantidade de barras, nas quais serão feitas modificações (inserção, remoção, ou alteração da capacidade do banco de capacitor).

Tabela 14 – Estruturas de Vizinhaça para a rede de 70 barras

<b>Estrutura de Vizinhaça</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Nº de barras alteradas</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Estrutura de Vizinhaça</b>	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>Nº de barras alteradas</i>	12	15	18	22	26	30	35	40	45	50

As soluções obtidas pelas simulações nas condições acima apresentadas são mostradas nas figuras 36 à 39.

Figura 36 – Soluções encontradas para cada método, na simulação 'Alocação 1' para a rede de 70 barras. Solução da PSO em vermelho e da VNS em azul

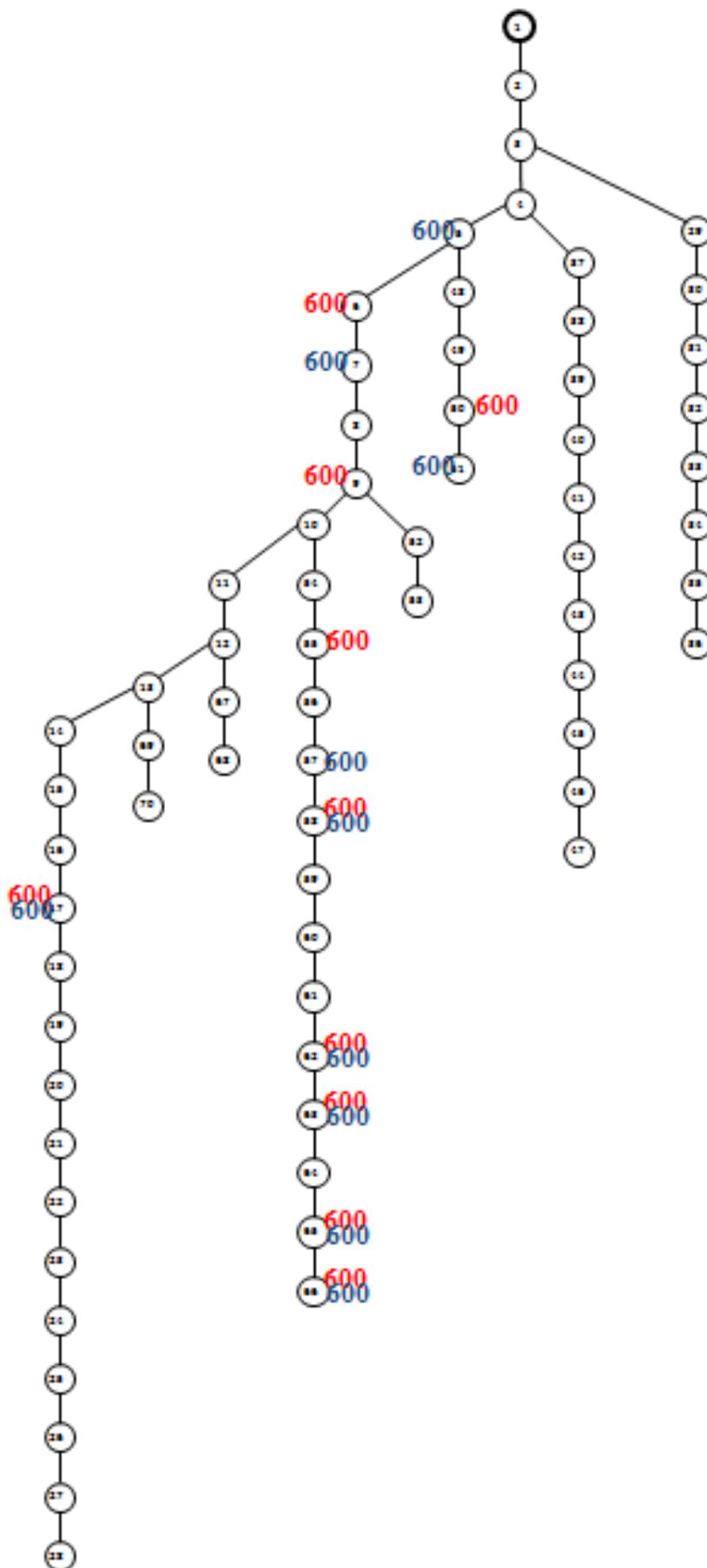


Figura 37 – Soluções encontradas para cada método, na simulação 'Alocação 2' para a rede de 70 barras. Solução da PSO em vermelho e da VNS em azul

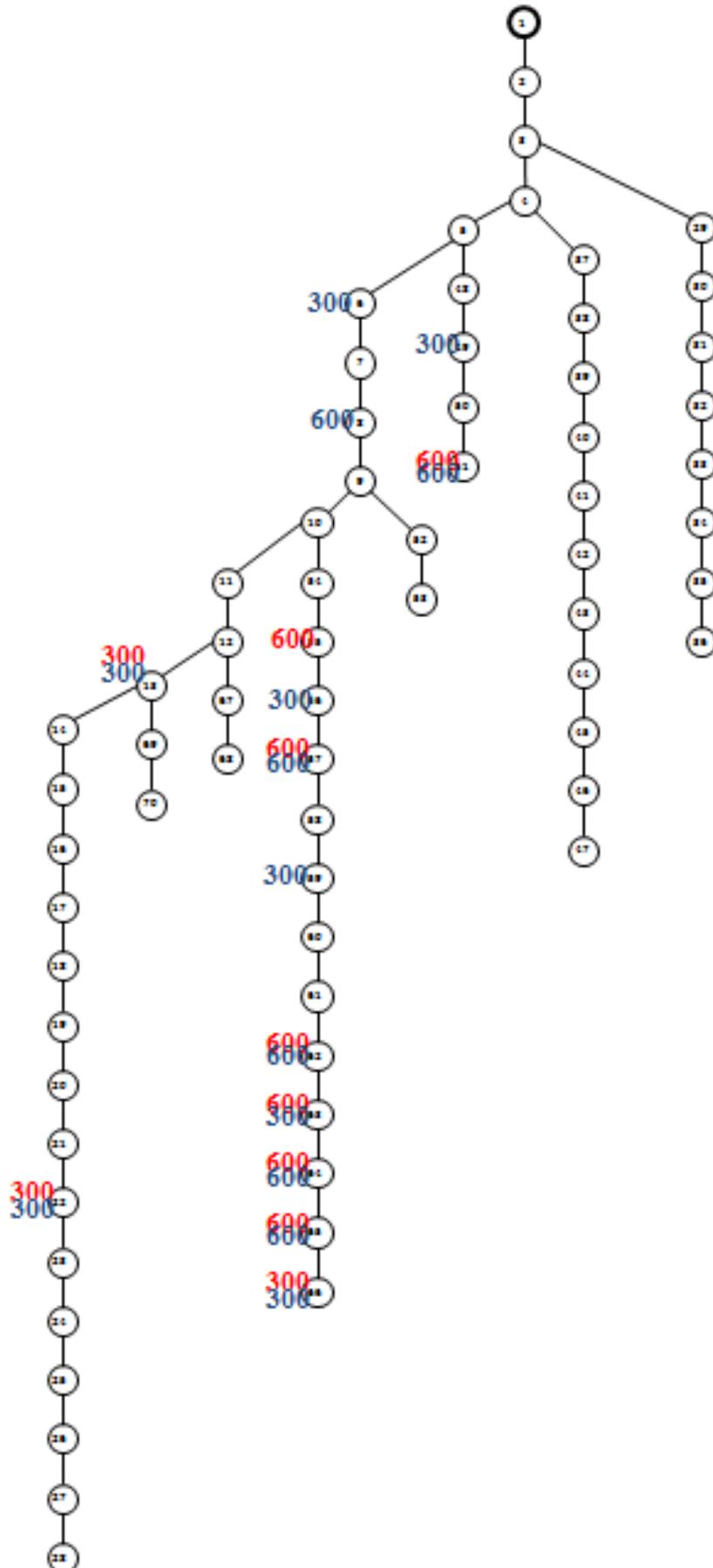


Figura 38 – Soluções encontradas para cada método, na simulação 'Alocação 3' para a rede de 70 barras. Solução da PSO em vermelho e da VNS em azul

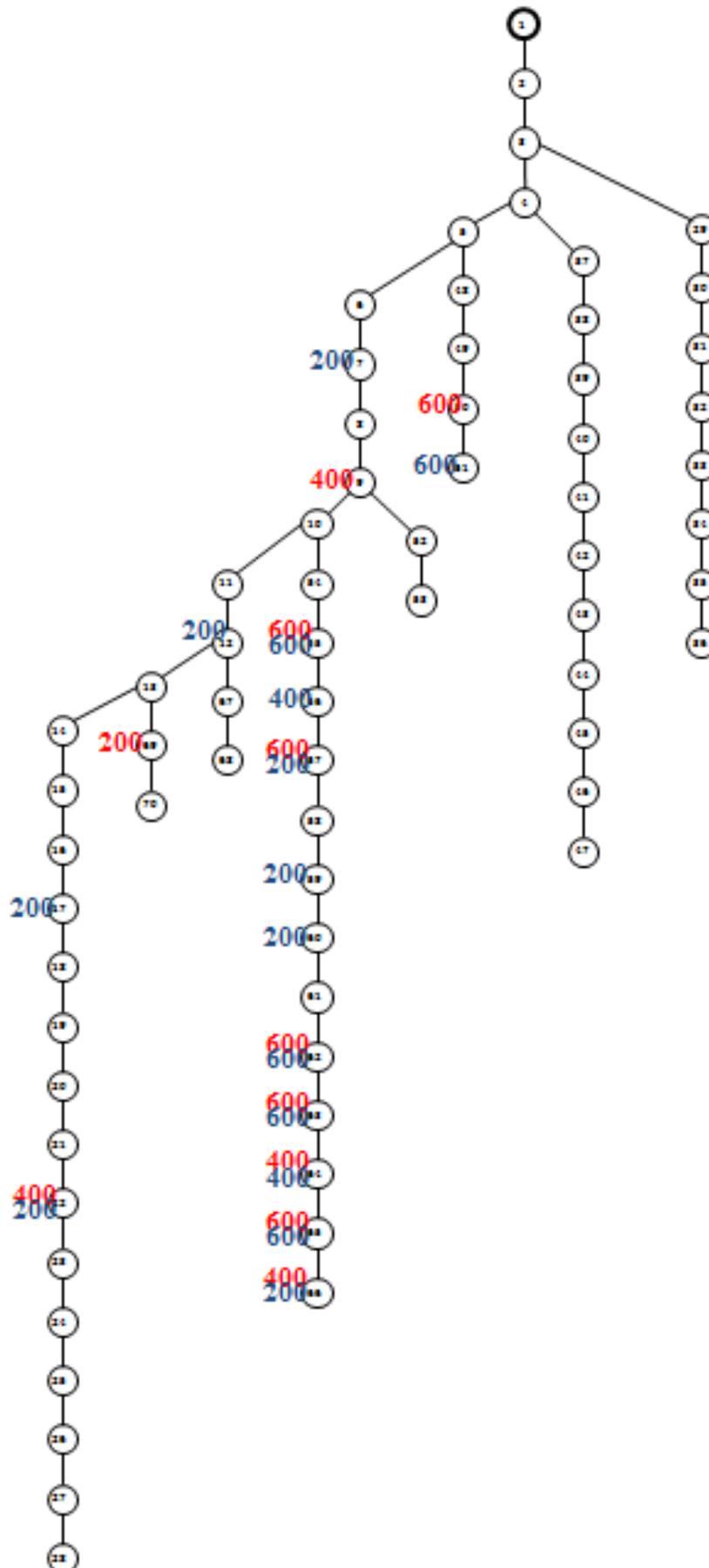
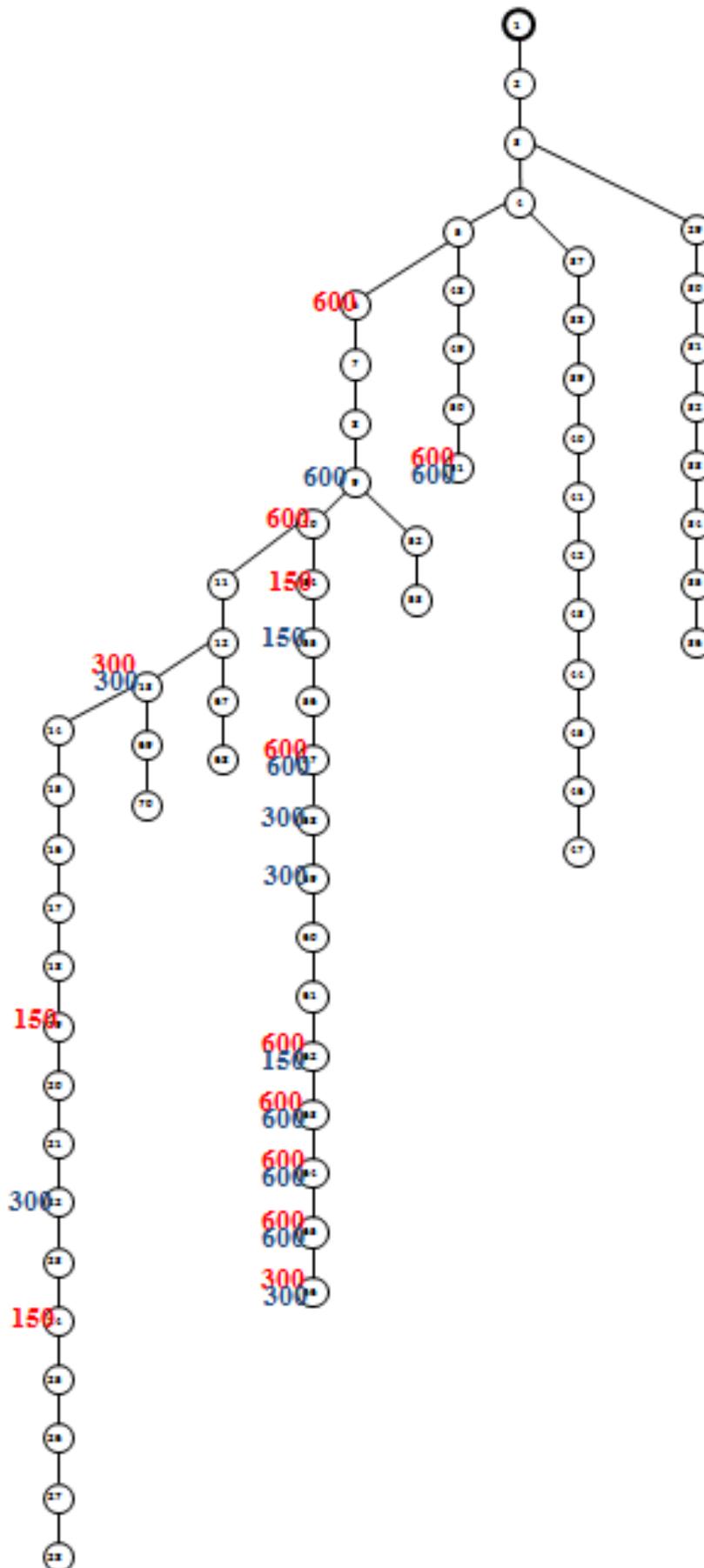


Figura 39 – Soluções encontradas para cada método, na simulação 'Alocação 4' para a rede de 70 barras. Solução da PSO em vermelho e da VNS em azul



Em cada simulação, as duas soluções se apresentaram similares, coincidindo algumas barras e capacidades dos bancos. Todas as simulações apresentaram disposições similares dos bancos e uma concentração dos mesmos em um dos ramais, conforme mostram as figuras 36 à 39.

A Figura 40 apresenta os perfis de tensão provenientes das oito soluções apresentadas e também o perfil de tensão para a rede sem a presença de bancos de capacitores. Assim como para os perfis para a rede de 34 barras, nota-se aqui também uma grande proximidade entre as curvas provenientes das oito alocações propostas, mostrando a coerência dos resultados.

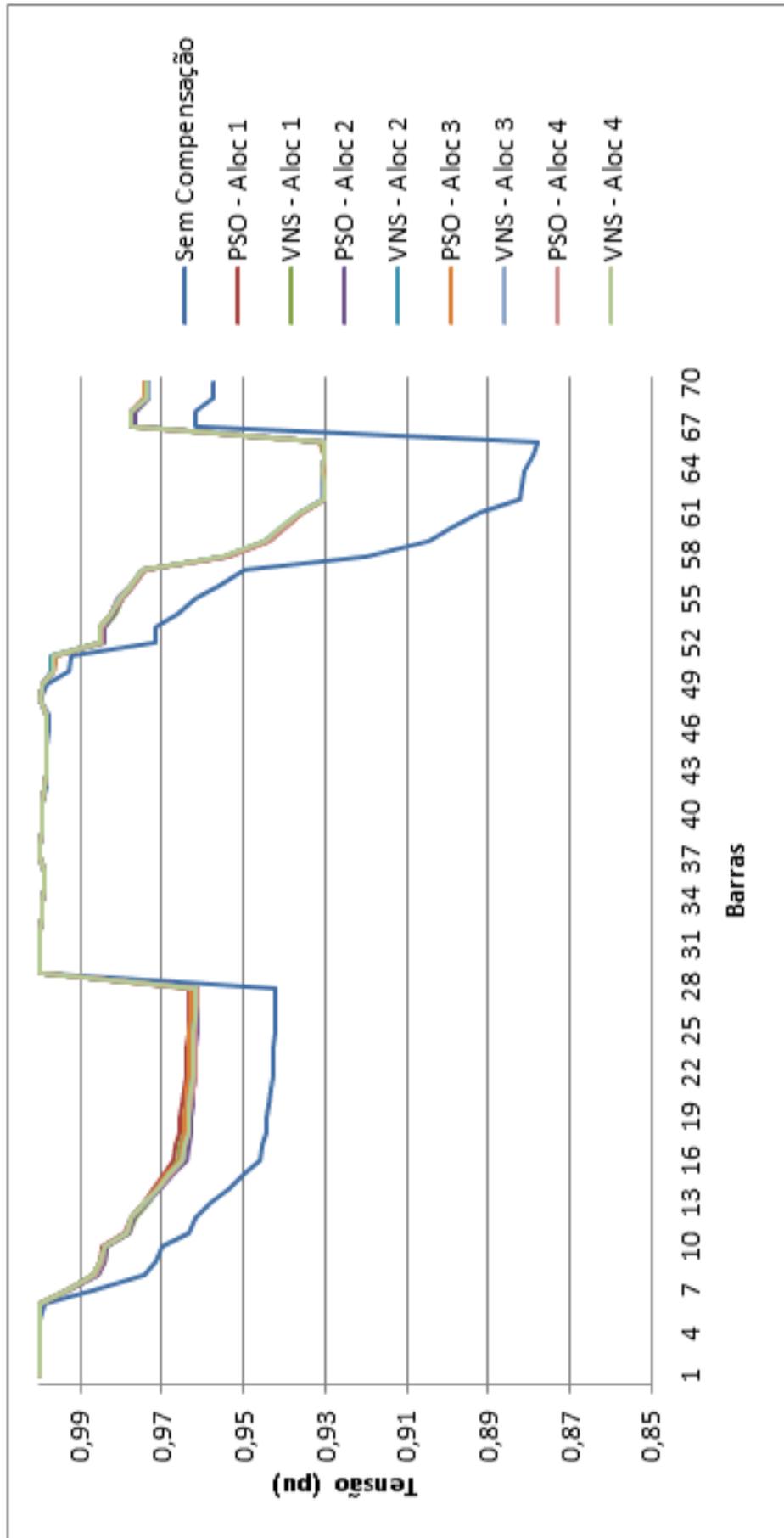
A Tabela 15 faz uma síntese do percentual das perdas de potência ativa na rede de 70 barras antes e após as inserções dos bancos de capacitores.

Tabela 15 – Análise das Perdas para a rede de 70 Barras

	<b>Solução da PSO</b>	<b>Solução da VNS</b>	<b>Sem Bancos Inseridos</b>
<b>Alocação 1</b>	6,13%	6,13%	8,16%
<b>Alocação 2</b>	6,03%	6,01%	
<b>Alocação 3</b>	6,05%	6,05%	
<b>Alocação 4</b>	6,01%	6,04%	

Observa-se que na ausência dos bancos, o percentual de perdas na rede chegava a 8,16%, já com quaisquer das alocações propostas, este percentual passou a ser próximo de 6%.

Figura 40 – Perfis de Tensão encontrados para a rede de 70 barras



As Tabelas 16 e 17 trazem dados referentes aos custos associados às simulações.

Tabela 16 – Custos para a rede de 70 barras sem a inserção dos bancos de capacitores

<b>Quantidade de Bancos</b>	0
<b>Custo dos Bancos</b>	R\$ 0,00
<b>Custo das Perdas</b>	R\$ 6.568.900,17
<b>Custo Total</b>	R\$ 6.568.900,17

Tabela 17 – Análise Financeira das simulações feitas para a rede de 70 barras

		<b>Solução da PSO</b>	<b>Solução da VNS</b>
<b>Alocação 1</b>	<b>Quantidade de Bancos</b>	10	10
	<b>Custo dos Bancos</b>	R\$ 61.451,00	R\$ 61.451,00
	<b>Custo das Perdas</b>	R\$ 4.935.459,78	R\$ 4.935.485,90
	<b>Custo Total</b>	R\$ 4.996.910,78	R\$ 4.996.936,90
<b>Alocação 2</b>	<b>Quantidade de Bancos</b>	10	14
	<b>Custo dos Bancos</b>	R\$ 54.461,42	R\$ 67.392,52
	<b>Custo das Perdas</b>	R\$ 4.857.318,08	R\$ 4.838.743,75
	<b>Custo Total</b>	R\$ 4.911.779,50	R\$ 4.906.136,27
<b>Alocação 3</b>	<b>Quantidade de Bancos</b>	11	15
	<b>Custo dos Bancos</b>	R\$ 58.246,50	R\$ 63.976,90
	<b>Custo das Perdas</b>	R\$ 4.869.266,90	R\$ 4.873.636,72
	<b>Custo Total</b>	R\$ 4.927.513,40	R\$ 4.937.613,62
<b>Alocação 4</b>	<b>Quantidade de Bancos</b>	13	13
	<b>Custo dos Bancos</b>	R\$ 64.629,11	R\$ 61.172,02
	<b>Custo das Perdas</b>	R\$ 4.839.339,81	R\$ 4.866.079,34
	<b>Custo Total</b>	R\$ 4.903.968,92	R\$ 4.927.251,36

Assim como ocorreu na rede de 34 barras, o custo total associado à rede sem a presença de bancos (somente custo associado às perdas) é superior ao custo de investimento em bancos somado ao custo das perdas para todas as simulações, mostrando que o investimento é totalmente recuperado. Nas três últimas simulações também é notório que uma das soluções indica maior investimento em bancos e menor gasto com perdas, de modo que o contrário ocorre na outra solução. Na Tabela 18, têm-se uma comparação entre o espaço de busca total e o espaço investigado para cada método de otimização em cada simulação.

O espaço investigado para cada método corresponde a no máximo  $2 \times 10^6$  soluções candidatas, onde o espaço total de soluções chega, em alguns casos, à ordem de  $10^{48}$  possibilidades. Nota-se, portanto, a necessidade de se aplicar métodos de busca de modo a encontrar a solução ótima ou quase ótima, de modo a evitar a verificação de cada uma das diversas possibilidades do espaço de busca total.

Tabela 18 – Condições de Simulação para a Rede de 70 Barras

	<b>Alocação 1</b>	<b>Alocação 2</b>
<b>Espaço de Busca</b>	$5.9 \times 10^{20}$	$8.34 \times 10^{32}$
<b>PSO</b>	iter: 200 e part: 1000	iter: 200 e part: 5000
<b>VNS</b>	iter: 1000 e vizin: 1000	iter: 1000 e vizin: 1000
	<b>Alocação 3</b>	<b>Alocação 4</b>
<b>Espaço de Busca</b>	$3.44 \times 10^{41}$	$1.69 \times 10^{48}$
<b>PSO</b>	iter: 200 e part: 10000	iter: 200 e part: 10000
<b>VNS</b>	iter: 1000 e vizin: 2000	iter: 1000 e vizin: 2000

A Tabela 19 apresenta a quantidade de acertos em dez tentativas, ou seja, cada método em cada simulação foi executado dez vezes e verificado a quantidade de vezes que a melhor solução se repetiu.

Tabela 19 – Acertos em 10 tentativas, para as simulações na rede de 70 barras

	<b>Alocação 1</b>	<b>Alocação 2</b>	<b>Alocação 3</b>	<b>Alocação 4</b>
<b>PSO</b>	1	2	1	1
<b>VNS</b>	1	1	1	1

A Tabela 20 traz os valores de média e de desvio padrão para estas tentativas.

Tabela 20 – Análise Estatística para as simulações na rede de 70 barras

	<b>Solução da PSO</b>		<b>Solução da VNS</b>	
	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Alocação 1</b>	R\$ 5.012.363,27	R\$ 12.560,86	R\$ 5.023.337,69	R\$ 17.120,85
<b>Alocação 2</b>	R\$ 4.929.678,72	R\$ 23.965,81	R\$ 5.044.922,63	R\$ 101.485,64
<b>Alocação 3</b>	R\$ 4.939.552,72	R\$ 9.285,16	R\$ 5.044.724,39	R\$ 100.060,28
<b>Alocação 4</b>	R\$ 4.914.616,13	R\$ 8.781,88	R\$ 4.981.556,40	R\$ 34.244,34

## 6.5 Sistema de 222 Barras

Após os testes com as redes anteriores, a metodologia desenvolvida foi aplicada à uma rede de maior porte, de 222 barras.

Para as duas redes anteriormente estudadas, os melhores resultados foram obtidos na simulação 'Alocação 4', na qual estão disponíveis quatro valores para as capacidades dos bancos. Sendo assim, somente esta simulação é realizada na rede de 222 barras. Os parâmetros utilizados são descritos a seguir.

- **Parâmetros da PSO:** Para a PSO foram utilizadas 150 iterações, 20000 partículas, fator  $w = 0.8$ , fator  $c_1 = 0.55$  e fator  $c_2 = 0.45$ .

- **Parâmetros da VNS:** Para a VNS foram utilizadas 500 iterações, 4000 vizinhas e 30 estruturas de vizinhança. A Tabela 21 relaciona cada estrutura de vizinhança com a quantidade de barras alteradas, conforme discutido em seções anteriores.

Tabela 21 – Estruturas de Vizinhança para a rede de 222 Barras

<b>Estrutura de Vizinhança</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>N<sup>o</sup> de barras alteradas</i>	1	2	3	4	5	7	9	12	15	18
<b>Estrutura de Vizinhança</b>	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>N<sup>o</sup> de barras alteradas</i>	21	25	30	40	50	60	70	80	90	100
<b>Estrutura de Vizinhança</b>	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
<i>N<sup>o</sup> de barras alteradas</i>	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200

Com base nestes parâmetros, as soluções obtidas para cada método de otimização são apresentadas nas Tabelas 22 e 23.

Tabela 22 – Solução encontrada pela PSO para a rede de 222 Barras

<b>Barra</b>	<b>Banco (kVAr)</b>	<b>Barra</b>	<b>Banco (kVAr)</b>	<b>Barra</b>	<b>Banco (kVAr)</b>
12	600	62	600	149	600
13	600	71	600	160	600
19	600	73	600	172	600
21	600	75	600	174	600
22	600	76	600	176	600
28	600	90	600	182	600
34	300	100	600	183	600
39	600	103	600	189	600
42	600	109	600	190	600
44	600	110	600	205	600
47	600	124	600	206	600
48	600	128	600	214	600
49	600	134	600	218	600
52	600	136	300	219	600
60	600	141	600		
61	600	147	600		

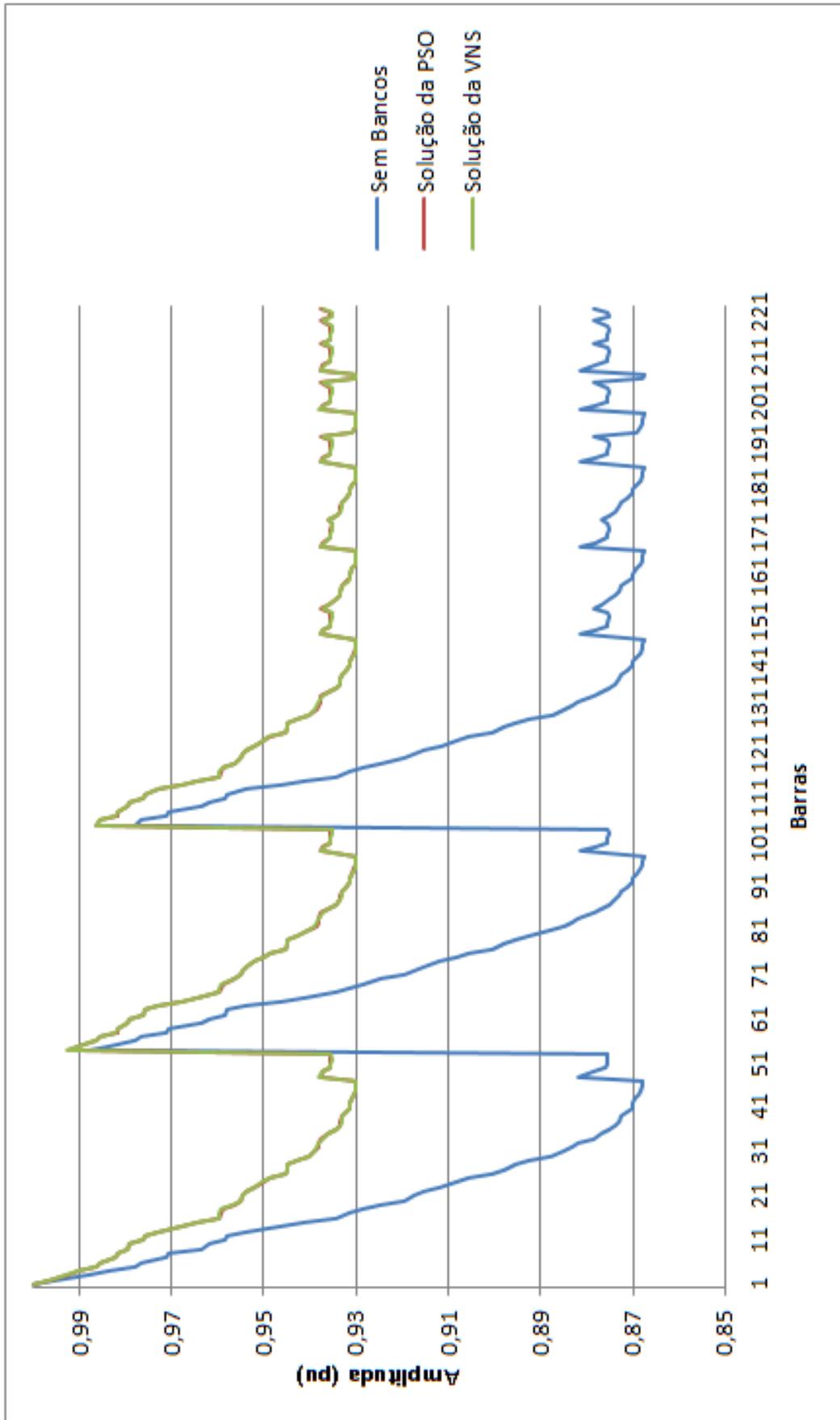
Tabela 23 – Solução encontrada pela VNS para a rede de 222 Barras

<b>Barra</b>	<b>Banco (kVAr)</b>	<b>Barra</b>	<b>Banco (kVAr)</b>	<b>Barra</b>	<b>Banco (kVAr)</b>
10	450	74	450	158	450
20	450	75	450	162	300
21	150	81	300	164	450
22	450	85	300	169	300
24	450	90	600	172	600
25	150	94	300	174	300
26	300	96	150	179	300
28	450	97	600	180	300
36	600	102	600	186	600
37	450	109	300	193	300
38	150	110	600	199	450
44	600	111	450	201	600
47	600	116	600	205	600
48	600	121	150	206	600
49	600	122	450	209	600
53	300	125	600	211	600
60	600	129	600	213	450
61	600	132	300	215	150
62	150	133	150	217	300
65	150	135	600		
68	450	141	600		

As duas estratégias de otimização encontraram soluções distintas entre si. A PSO propôs uma alocação onde a maioria dos bancos, 44 de um total de 46, possui a capacidade de 600 kVAr, e apenas 2 de capacidade igual a 300 kVAr. A VNS, por sua vez, alocou um total de 64 bancos, sendo as capacidades dos mesmos mais diversificadas, conforme mostra a Tabela 23.

A Figura 41 apresenta os perfis de tensão resultantes nas barras deste alimentador, antes e após as inserções de bancos propostas.

Figura 41 – Perfis de Tensão encontrados para a rede de 222 Barras



Embora as duas soluções, quando vistas nas Tabelas 22 e 23, pareçam muito distintas, elas na verdade propõem alocações totais de potência reativa muito próximas entre si, sendo 27000 kVAr propostos pela solução encontrada pela PSO e 27150 kVAr propostos pela solução da VNS, conforme mostra a Tabela 24. Os perfis de tensão nas barras, resultantes das duas soluções, se apresentam bem similares, com valores de tensão bem próximos entre si (as duas curvas estão quase que sobrepostas, conforme Figura 41). A Tabela 24 também traz outras informações referentes aos custos.

Tabela 24 – Análise Financeira para a rede de 222 Barras

	<b>Sem Bancos</b>	<b>Solução da PSO</b>	<b>Solução da VNS</b>
<b>Quantidade de Bancos</b>	0	46	64
<b>Total de kVAr Instalado</b>	0	27.000	27.150
<b>Custo dos Bancos</b>	0	R\$ 278.014,88	R\$ 305.539,65
<b>Custo das Perdas</b>	R\$ 52.288.662,29	R\$ 33.403.812,23	R\$ 33.423.307,76
<b>Custo Total</b>	R\$ 52.288.662,29	R\$ 33.681.827,11	R\$ 33.728.847,41

A preferência da solução obtida pela PSO por bancos de 600 kVAr, permitiu a ela alocar quase a mesma potência reativa que a solução da VNS, porém a um custo consideravelmente menor. Isto ocorre pelo fato desses bancos apresentarem o menor custo por kVAr, conforme pode ser verificado na Tabela 2. Além de obter um menor custo de investimento em bancos, a solução da PSO também obteve um custo das perdas inferior ao obtido pela solução da VNS, obtendo, conseqüentemente, um menor custo total, mostrando que esta meta-heurística se apresentou mais eficiente para o caso simulado, e com os parâmetros de ajuste considerados. A Tabela 25 apresenta os percentuais das perdas de potência ativa nas linhas.

Tabela 25 – Perdas de potência ativa nas linhas para a rede de 222 Barras

<b>Sem Banco</b>	<b>Solução da PSO</b>	<b>Solução da VNS</b>
9,96%	6,36%	6,37%

Em relação às perdas nas linhas, ambas as soluções proporcionaram uma redução significativa, tendo um resultado sensivelmente melhor a solução obtida pela PSO.

# 7 Conclusões

Este trabalho apresentou uma abordagem para o Problema de Alocação de Bancos de Capacitores com função objetivo abrangendo os custos de investimento em bancos, obtidos através do contato com uma empresa que os comercializa, e os relacionados às perdas de potência ativa nas linhas, obtidos com base no valor do MWh pago por empresas de distribuição em leilões de energia do setor. A modelagem proposta neste trabalho se mostrou abrangente, uma vez que é aplicável em redes monofásicas e trifásicas, o que permite o estudo de redes de distribuição desequilibradas.

A execução de diversas simulações utilizando duas distintas metodologias de otimização proporcionou um vasto campo de análises quanto à eficiência de cada uma delas na resolução do problema de alocação de bancos. Para a rede trifásica de 34 barras, em todas as quatro simulações a PSO encontrou uma resposta melhor do que a da VNS, mesmo investigando uma parcela menor do espaço total de soluções. Para a rede monofásica de 70 barras, em três das quatro simulações a PSO também foi mais eficiente, encontrando uma solução melhor e pesquisando uma parcela do espaço de soluções menor ou igual à parcela pesquisada pela VNS. A PSO também encontrou uma solução melhor na simulação para a rede de 222 barras. Porém, a parcela do espaço de soluções investigada pela mesma foi superior à investigada pela VNS.

Para as três redes apresentadas, as curvas de perfil de tensão para as soluções encontradas por ambas as meta-heurísticas resultaram em padrões superpostos, o que mostra coerência entre os resultados identificados pelas duas estratégias. Portanto, ambas as meta-heurísticas se apresentaram satisfatórias frente à formulação proposta neste trabalho para o problema de alocação de bancos, destacando-se, conforme discutido, um desempenho superior da PSO.

## 7.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

Os transformadores dos sistemas de distribuição podem ser inseridos na modelagem do problema, de modo a ser investigada a alocação ótima dos bancos, juntamente com a definição da posição ótima das comutadoras dos transformadores. Pode ser estudada também a inserção de bancos de capacitores tanto de capacidades fixas como os do tipo automáticos. Outra sugestão também é se realizar um estudo comparativo entre a alocação de bancos e a alocação de reguladores de tensão.

# Referências

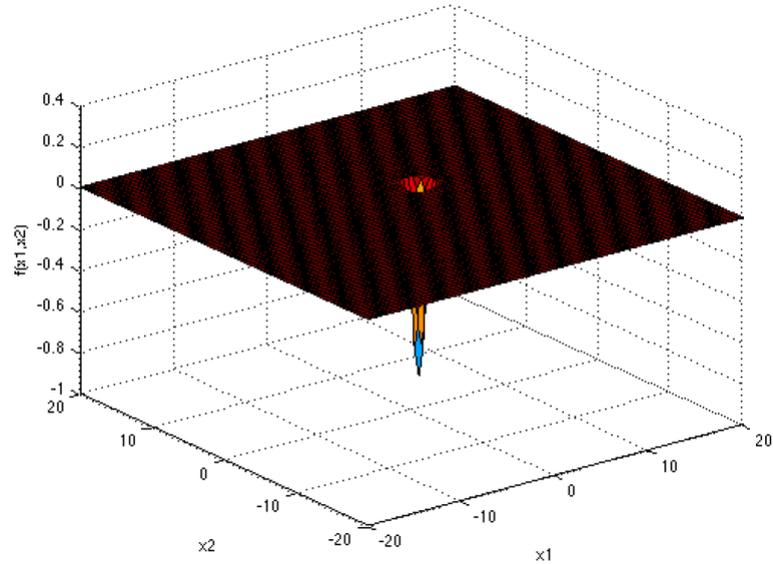
- ABUL'WAFI, A. R. Optimal capacitor allocation in radial distribution systems for loss reduction: A two stage method. *Electrical Power and Energy Systems*, v. 95, p. 168–174, 2013. 5
- ALOISE, D. J.; OLIVEIRA, M. C. S.; SILVA, T. L. Otimização Discreta por Nuvem de Partículas Aplicada ao Problema do Caixeiro Viajante. *Revista Controle e Automação*, v. 1, n. 2, p. 87–95, 2006. 23, 24
- ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST*. [S.l.], 2008. 2
- BEÊ, R. T. *Alocação de Bancos de Capacitores em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Algoritmos Genéticos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, 2007. 1, 9, 10
- CARVALHO, M. R. *Estudo Comparativo de Fluxo de Potência para Sistemas de Distribuição Radial*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2006. 13, 35, 38, 39
- DUQUE, F. G. *Alocação de Bancos de Capacitores em Redes de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando técnica de Otimização Bio-Inspirada*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2013. 5
- EBERHART, R. C.; KENNEDY, J. A. New optimizer using particles swarm theory. *Proc. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. IEEE Service Center, Piscataway, NJ*, n. 1, p. 39–43, 1995. 23
- GASPERIN, L. V. *Alocação Ótima de Banco de Capacitores em Redes de Distribuição de Energia Elétrica utilizando modelos simplificados*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2008. 5
- GODOI, A. A. *Alocação de Bancos de Capacitores em Redes Primária e Secundária de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, 2009. 6, 7, 8, 19
- HAFFNER, S. et al. Alocação de bancos de capacitores em redes de distribuição de energia visando eliminar violações de tensão. *Revista Controle e Automação*, v. 20, n. 4, p. 546–563, 2009. 4
- KAGAN, N. *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. [S.l.]: Blucher, 2009. 10
- KERSTING, W. H. *Distribution System Modeling and Analysis*. [S.l.]: CRC Press, 2001. 10, 13
- MASOUM, M. A. S. et al. Optimal placement, replacement and sizing of capacitor banks in distorted distribution networks by genetic algorithms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 4, p. 1794–1801, 2004. 3

- NEVES, M. S. *Modelagem de Carga em Sistemas de Energia Elétrica: Modelo Matemático e sua Validação com Testes de Campo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2008. 11
- PIZZALI, L. F. O. *Cálculo de Fluxo de Potência em Redes de Distribuição com Modelagem a Quatro Fios*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2003. 37, 38
- REIS, J. A. *Meta-Heurísticas Baseadas em Busca em Vizinhança Variável Aplicadas a Problemas de Operação de Transportes*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2013. 30, 31, 32
- SALAS, C. S. S. *Alocação de Capacitores em Redes de Distribuição Primárias e Secundárias Incluindo Restrições de Ressonância*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Junho 2010. 4
- SINGH, G. P.; SINGH, A. Comparative study of krill herd, firefly and cuckoo search algorithms for unimodal and multimodal optimization. *I.J. Intelligent Systems and Applications*, n. 3, p. 35–49, 2014. 66, 67
- SINGH, S.; RAO, A. R. Optimal allocation of capacitors in distribution systems using particle swarm optimization. *Electrical Power and Energy Systems*, v. 43, p. 1267–1275, 2012. 3
- SOUZA, B. A. de; ALVES, H. do N.; FERREIRA, H. A. Microgenetic algorithms and fuzzy logic applied to the optimal placement of capacitor banks in distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 19, p. 942–947, 2004. 3
- STEVENSON, W. D. *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1986. 12
- XU, Y. et al. Optimal capacitor placement to distribution transformers for power loss reduction in radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 28, p. 4072–4079, 2013. 3
- ZIARI, I. et al. Optimal allocation and sizing of capacitors to minimize the transmission line loss and to improve the voltage profile. *Computers and Mathematics with Applications*, v. 60, p. 1003–1013, 2010. 4

# Anexo A

## Função Easom:

Figura 42 – Função Easom



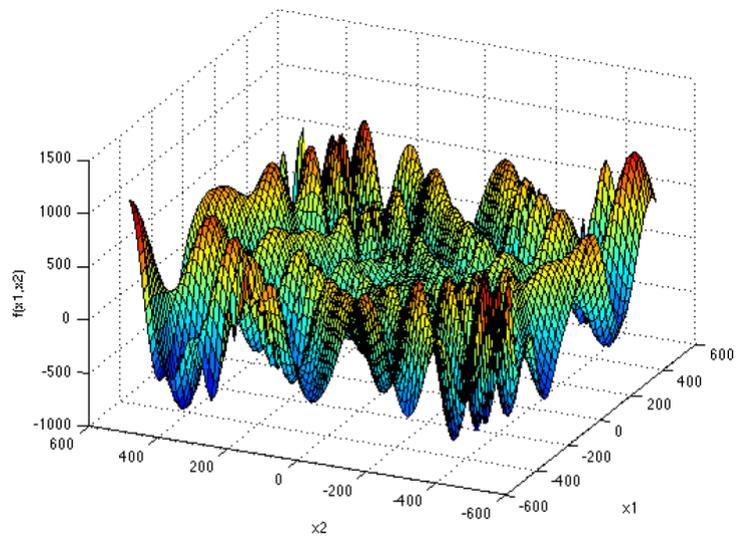
Fonte: (SINGH; SINGH, 2014)

A função Easom é dada por:

$$f(x, y) = -\cos(x)\cos(y)e^{-((x-\pi)^2+(y-\pi)^2)} \quad (7.1.1)$$

## Função EggHolder:

Figura 43 – Função EggHolder



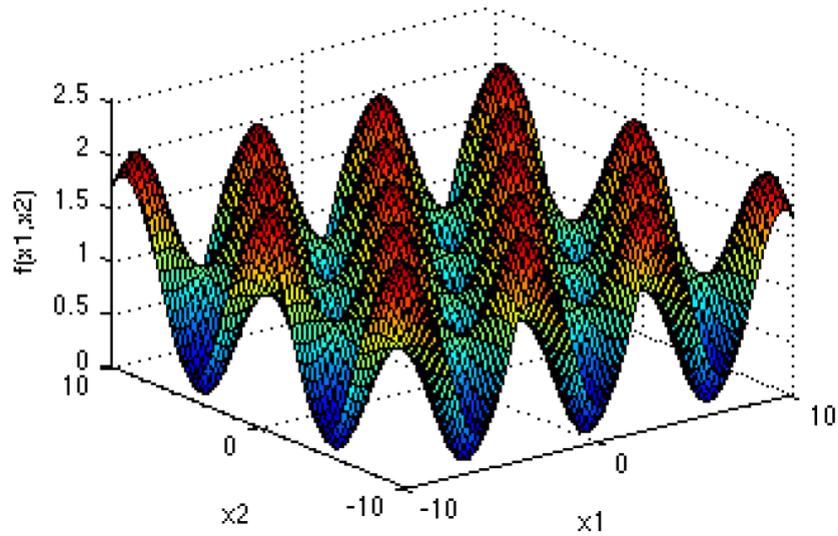
Fonte: (SINGH; SINGH, 2014)

A expressão matemática da função EggHolder é:

$$f(x) = -x_1 \text{sen}(\sqrt{|x_1 - x_2 - 47|}) - (x_2 + 47) \text{sen}(\sqrt{|\frac{1}{2}x_1 + x_2 + 47|}) \quad (7.1.2)$$

**Função Griewank:**

Figura 44 – Função Griewank



Fonte: (SINGH; SINGH, 2014)

Dada por:

$$f(x_1, \dots, x_n) = 1 + \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) \quad (7.1.3)$$

# Anexo B

## Perfis de Convergência dos métodos de Otimização para a rede de 34 Barras

Figura 45 – Comportamento da Função Objetivo, na simulação 'Alocação 2' para a PSO, para o sistema de 34 Barras

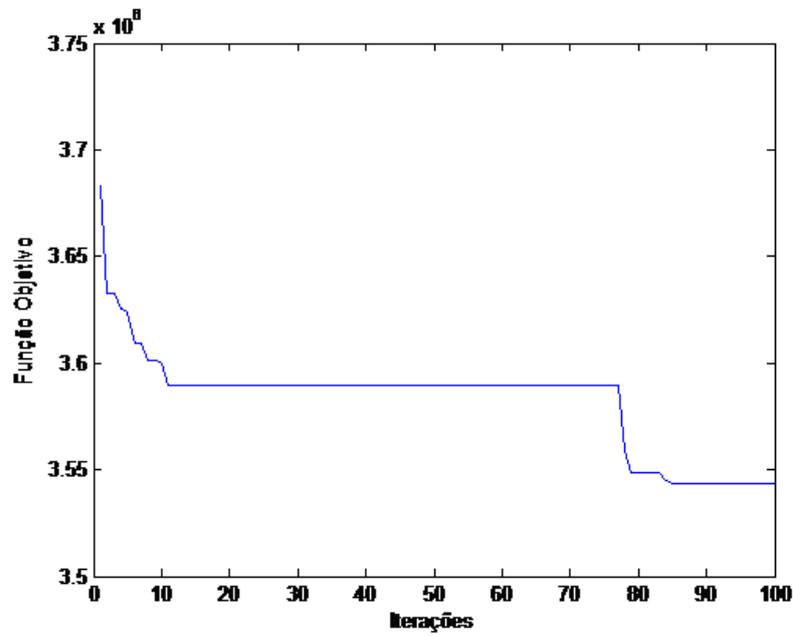


Figura 46 – Comportamento da Função Objetivo, na simulação 'Alocação 2' para a VNS, para o sistema de 34 Barras

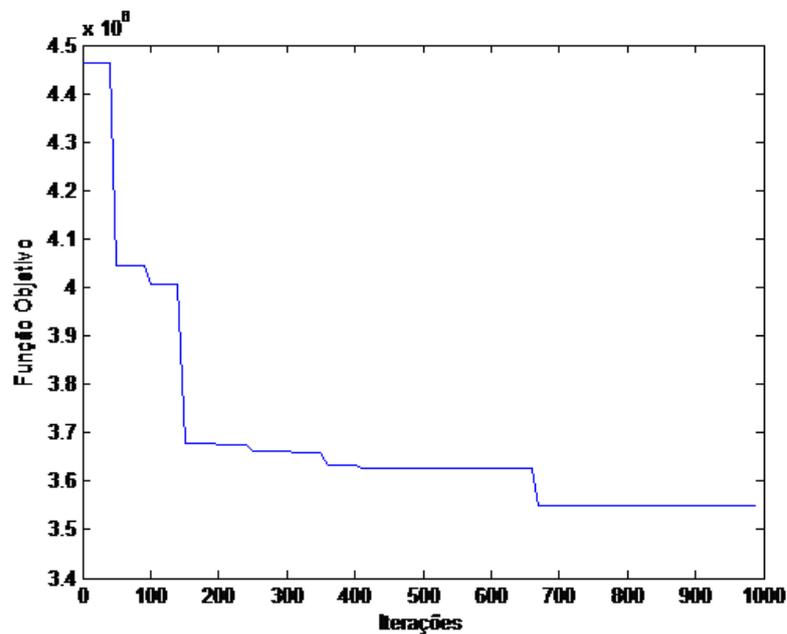


Figura 47 – Comportamento da Função Objetivo, na simulação 'Alocação 3' para a PSO, para o sistema de 34 Barras

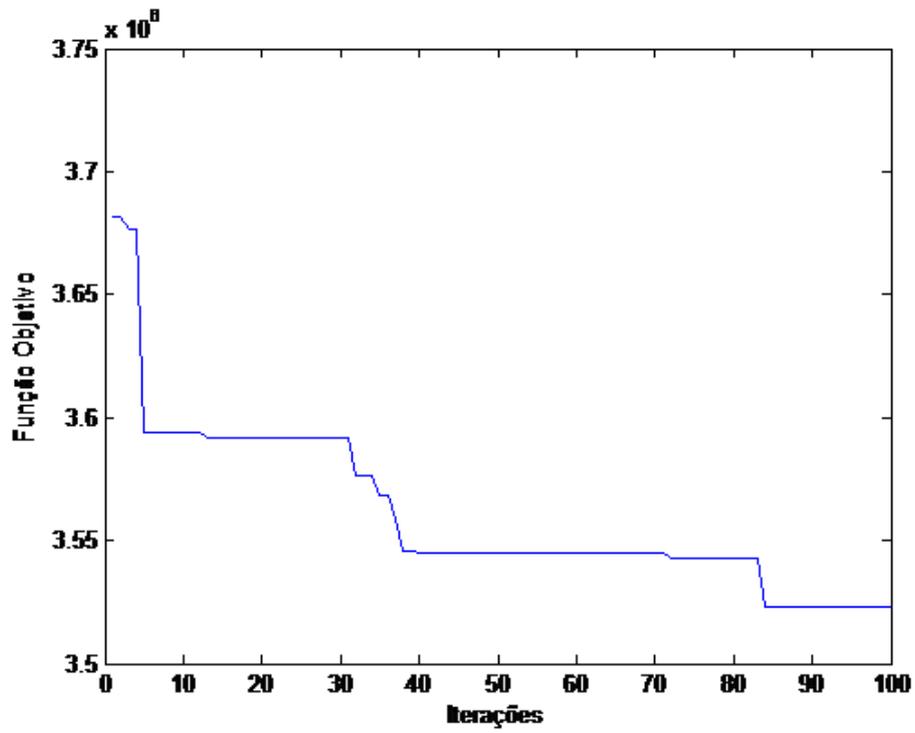


Figura 48 – Comportamento da Função Objetivo, na simulação 'Alocação 3' para a VNS, para o sistema de 34 Barras

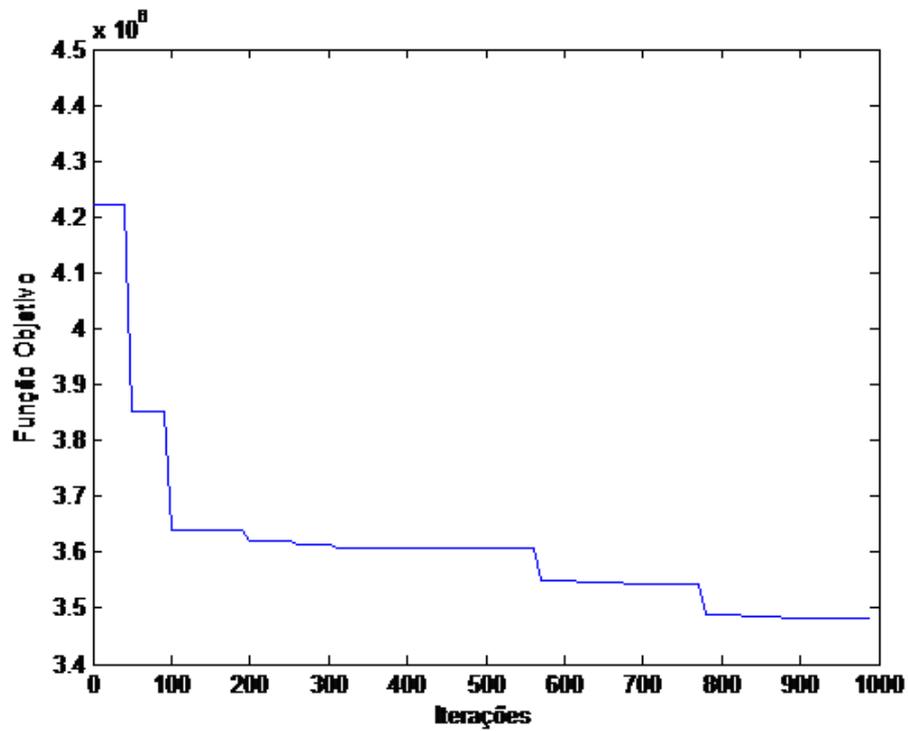


Figura 49 – Comportamento da Função Objetivo, na simulação 'Alocação 4' para a PSO, para o sistema de 34 Barras

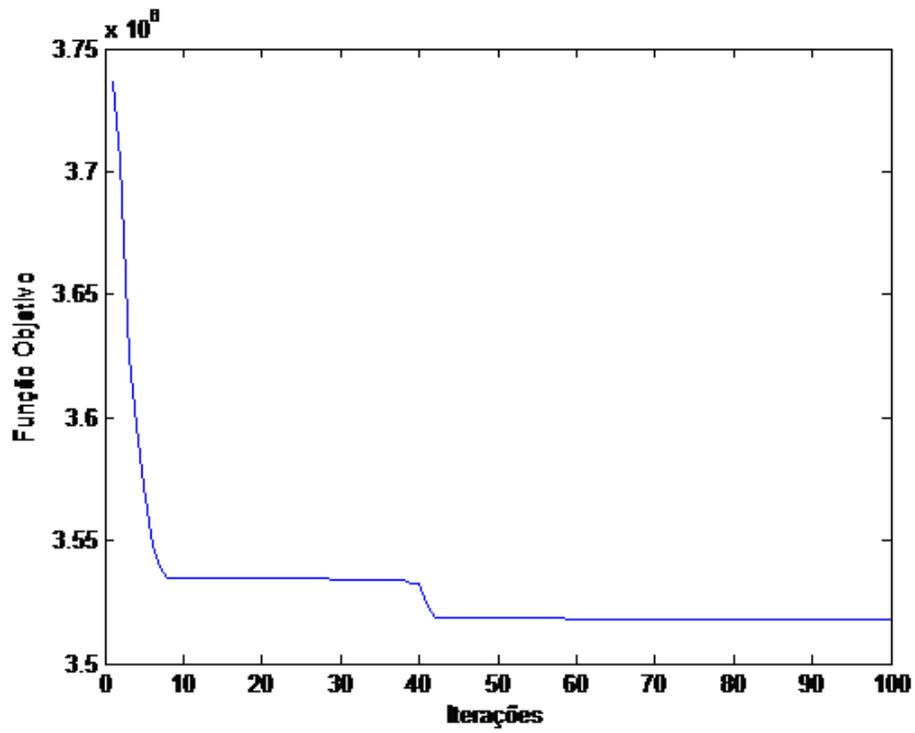
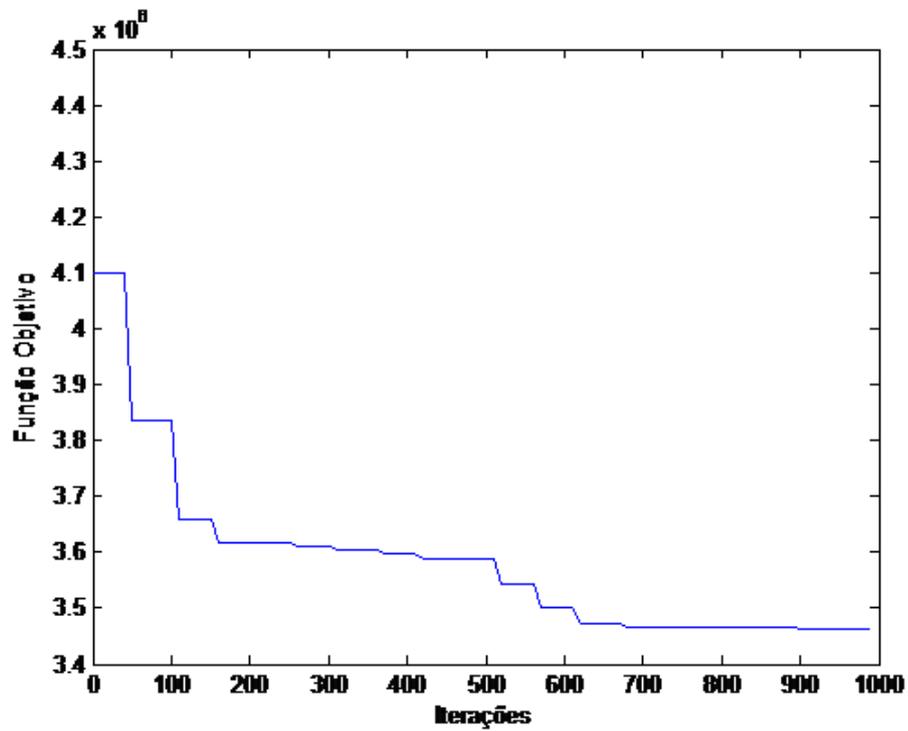


Figura 50 – Comportamento da Função Objetivo, na simulação 'Alocação 4' para a VNS, para o sistema de 34 Barras



## Perfis de Convergência dos métodos de Otimização para a rede de 70 Barras

Figura 51 – Comportamento da Função Objetivo na rede de 70 barras, para a PSO na simulação 'Alocação 1'

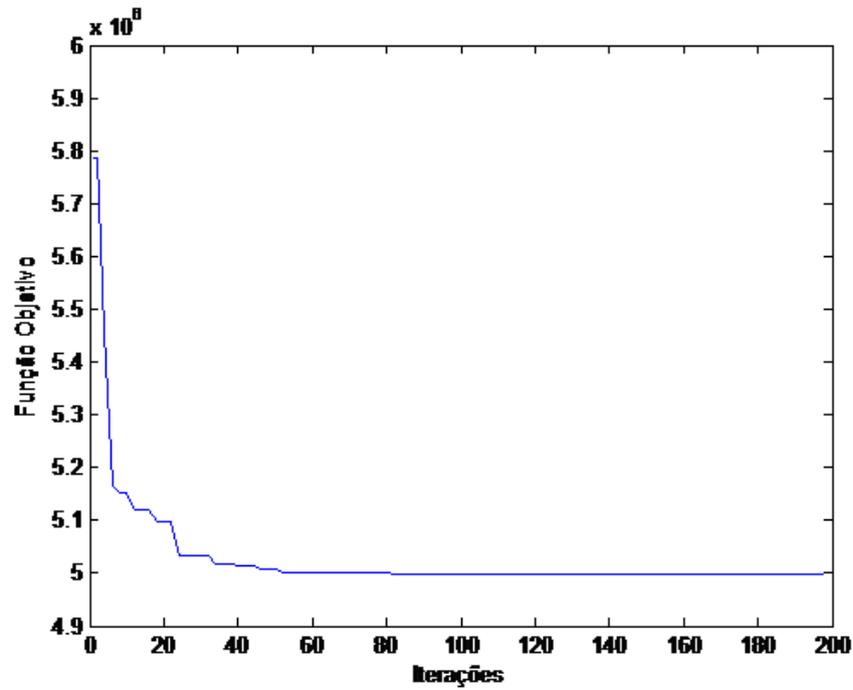


Figura 52 – Comportamento da Função Objetivo na rede de 70 barras, para a VNS na simulação 'Alocação 1'

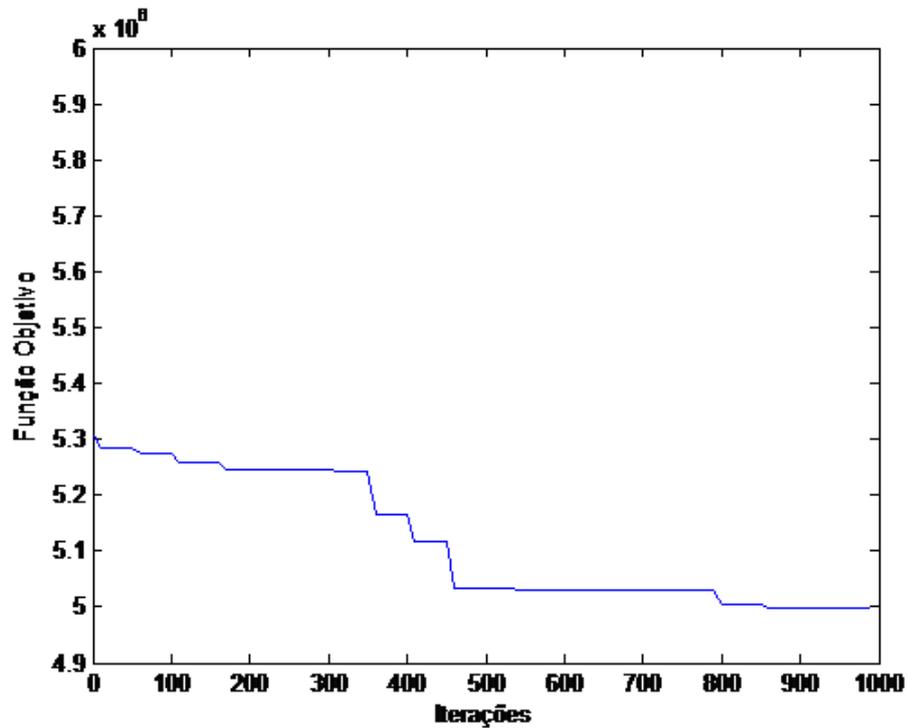


Figura 53 – Comportamento da Função Objetivo na rede de 70 barras, para a PSO na simulação 'Alocação 2'

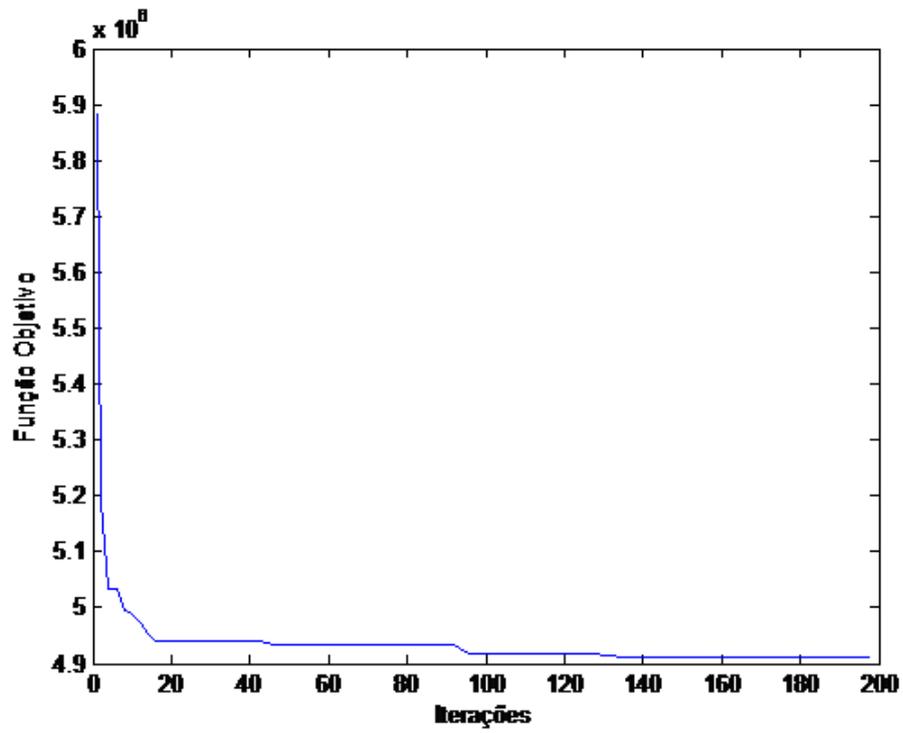


Figura 54 – Comportamento da Função Objetivo na rede de 70 barras, para a VNS na simulação 'Alocação 2'

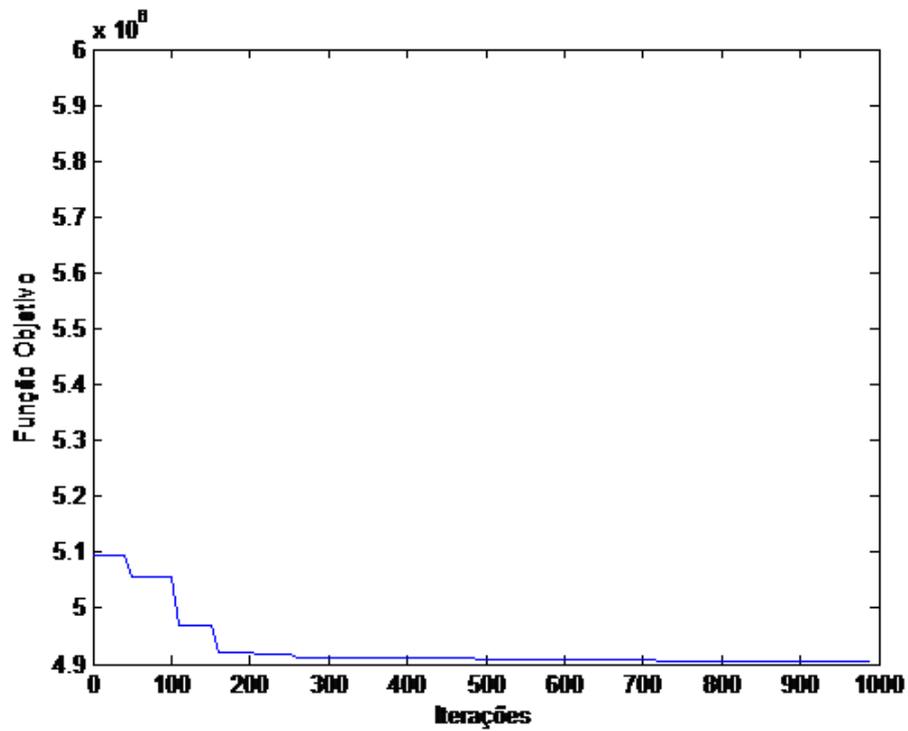


Figura 55 – Comportamento da Função Objetivo na rede de 70 barras, para a PSO na simulação 'Alocação 3'

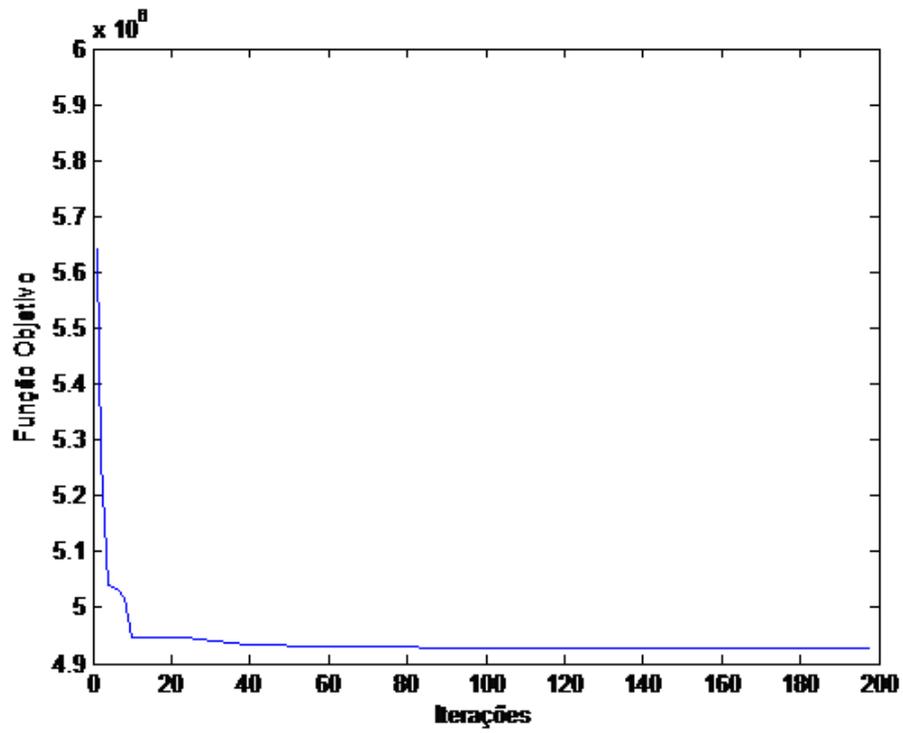


Figura 56 – Comportamento da Função Objetivo na rede de 70 barras, para a VNS na simulação 'Alocação 3'

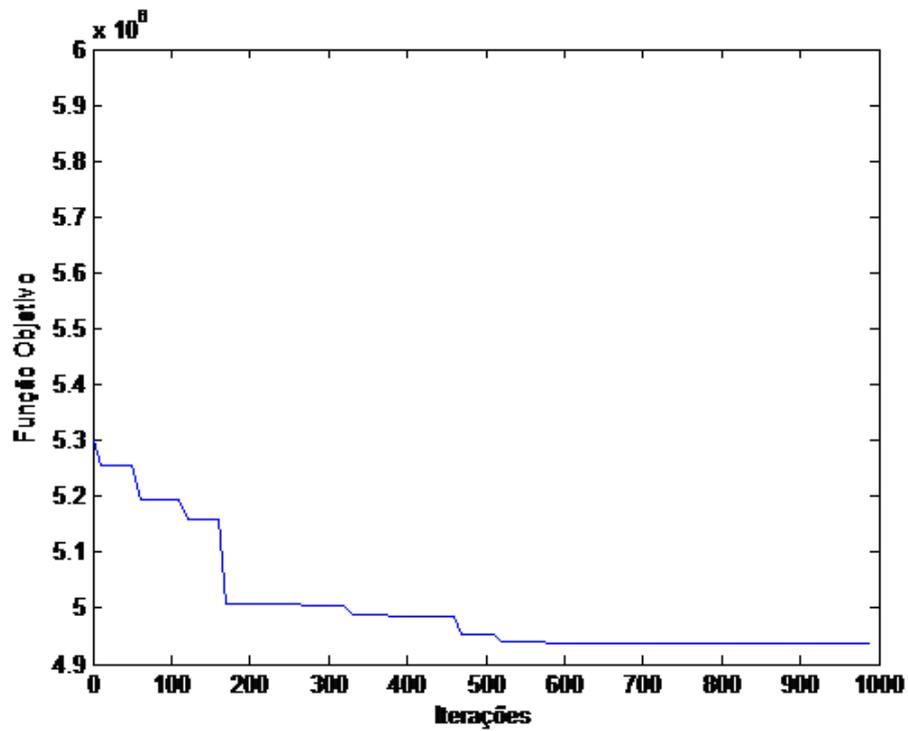


Figura 57 – Comportamento da Função Objetivo na rede de 70 barras, para a PSO na simulação 'Alocação 4'

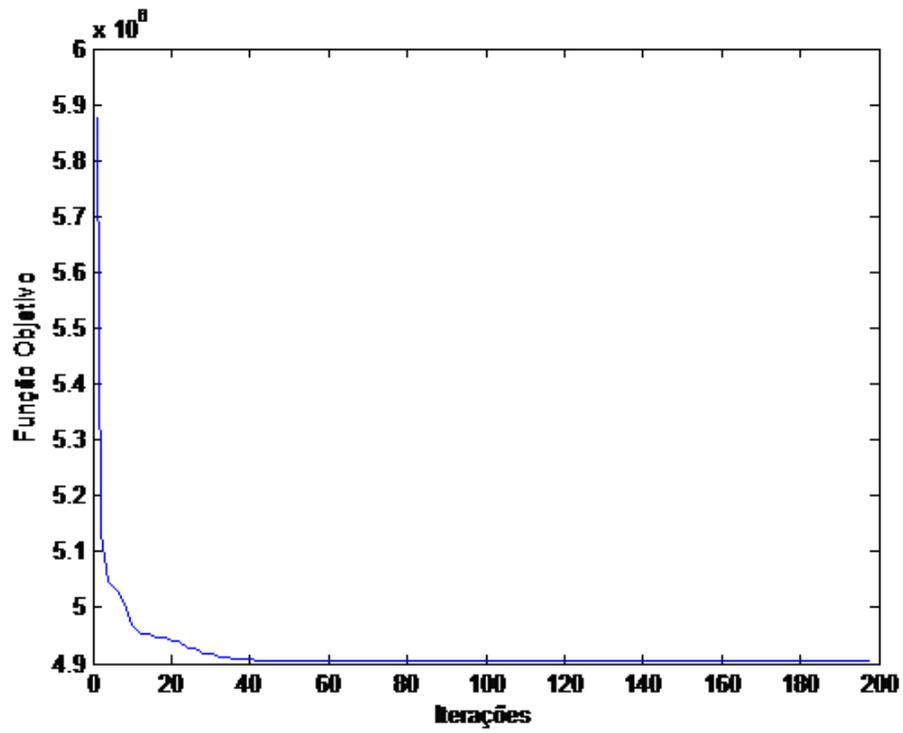
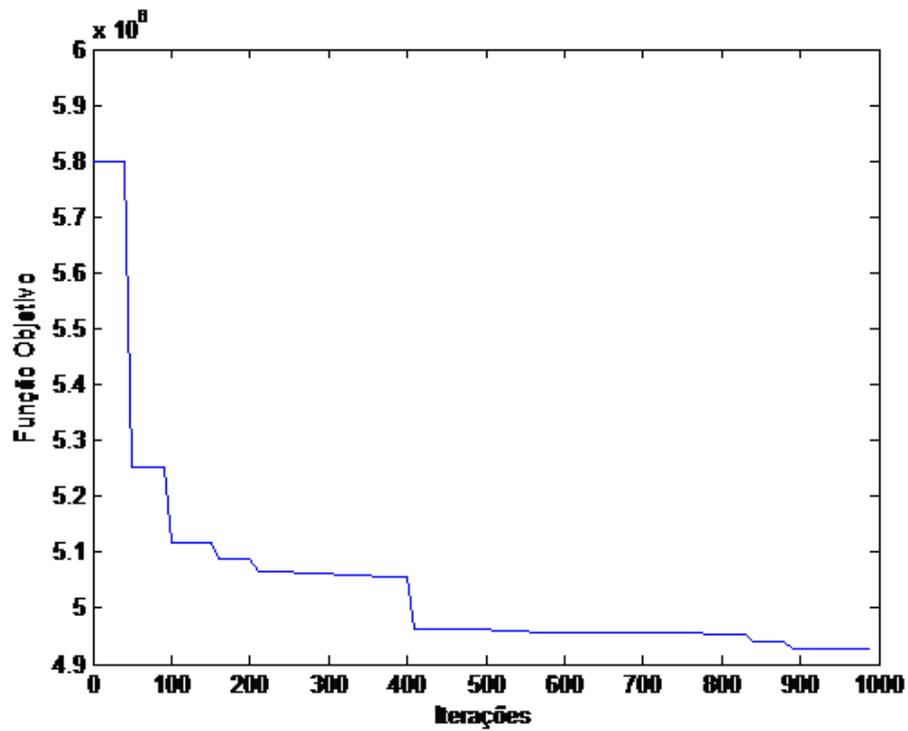


Figura 58 – Comportamento da Função Objetivo na rede de 70 barras, para a VNS na simulação 'Alocação 4'



# Anexo C

## Dados das Redes de Distribuição usadas como sistemas teste

Para todas as redes, a barra de subestação é a barra 1.

Tabela 26 – Dados das Linhas para a rede Trifásica de 10 Barras, em  $\Omega$

Nó Emissor	Nó Receptor	$R_{aa}$	$X_{aa}$	$R_{ab}$	$X_{ab}$	$R_{ac}$	$X_{ac}$	$R_{ba}$
1	2	0.8258	0.5634	0	0.1844	0	0.1496	0
2	3	0.5537	0.3778	0	0.1237	0	0.1003	0
3	4	10.3159	7.0387	0	2.3037	0	1.8695	0
4	5	0	0	0	0	0	0	0
5	6	0.8258	0.5634	0	0.1844	0	0.1496	0
6	7	0.5537	0.3778	0	0.1237	0	0.1003	0
7	8	10.3159	7.0387	0	2.3037	0	1.8695	0
8	9	0.8258	0.5634	0	0.1844	0	0.1496	0
9	10	0.5537	0.3778	0	0.1237	0	0.1003	0

Tabela 27 – Continuação - Dados das Linhas para a rede Trifásica de 10 Barras, em  $\Omega$

$X_{ba}$	$R_{bb}$	$X_{bb}$	$R_{bc}$	$X_{bc}$	$R_{ca}$	$X_{ca}$	$R_{cb}$	$X_{cb}$	$R_{cc}$	$X_{cc}$
0.1844	0.8258	0.5634	0	0.1238	0	0.1496	0	0.1238	0.8258	0.5634
0.1237	0.5537	0.3778	0	0.083	0	0.1003	0	0.083	0.5537	0.3778
2.3037	10.3159	7.0387	0	1.5463	0	1.8695	0	1.5463	10.3159	7.0387
0	0.6508	1.1833	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1844	0.8258	0.5634	0	0.1238	0	0.1496	0	0.1238	0.8258	0.5634
0.1237	0.5537	0.3778	0	0.083	0	0.1003	0	0.083	0.5537	0.3778
2.3037	10.3159	7.0387	0	1.5463	0	1.8695	0	1.5463	10.3159	7.0387
0.1844	0.8258	0.5634	0	0.1238	0	0.1496	0	0.1238	0.8258	0.5634
0.1237	0.5537	0.3778	0	0.083	0	0.1003	0	0.083	0.5537	0.3778

Tabela 28 – Dados das Barras para a rede Trifásica de 10 Barras

Barra	$P_a$ (W)	$Q_a$ (VAr)	$P_b$ (W)	$Q_b$ (VAr)	$P_c$ (W)	$Q_c$ (VAr)
1	0	0	0	0	0	0
2	12500	7000	15000	7500	0	0
3	12500	7000	0	0	12500	7000
4	0	0	8000	4000	12500	7000
5	12500	7000	8000	4000	0	0
6	12500	7000	0	0	12500	7000
7	0	0	15000	7500	12500	7000
8	12500	7000	8000	4000	12500	7000
9	12500	7000	8000	4000	12500	7000
10	12500	7000	8000	4000	12500	7000

Tabela 29 – Dados das Linhas para a rede Trifásica de 34 Barras, em  $\Omega$ 

Nó Emissor	Nó Receptor	$R_{aa}$	$X_{aa}$	$R_{ab}$	$X_{ab}$	$R_{ac}$	$X_{ac}$	$R_{ba}$
1	2	0.8258	0.5634	0	0.1844	0	0.1496	0
2	3	0.5537	0.3778	0	0.1237	0	0.1003	0
3	4	10.3159	7.0387	0	2.3037	0	1.8695	0
4	5	0.0000	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0
4	6	12.0026	8.1896	0	2.6803	0	2.1751	0
6	7	9.5157	6.4927	0	2.1250	0	1.7244	0
7	8	0.0032	0.0022	0	0.0007	0	0.0006	0
8	9	0.0992	0.0677	0	0.0222	0	0.0180	0
9	10	0.1918	0.3486	0	0.0000	0	0.0000	0
9	11	3.2679	2.2298	0	0.7298	0	0.5922	0
10	12	5.3993	9.8169	0	0.0000	0	0.0000	0
11	13	0.2689	0.1834	0	0.0600	0	0.0487	0
11	14	0.0000	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0
12	15	1.5407	2.8013	0	0.0000	0	0.0000	0
13	16	6.5422	4.4639	0	1.4610	0	1.1856	0
16	17	0.1664	0.1136	0	0.0372	0	0.0302	0
17	18	11.7882	8.0433	0	2.6324	0	2.1363	0
17	19	0.0000	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0
18	20	0.0032	0.0022	0	0.0007	0	0.0006	0
20	21	0.0000	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0
20	22	1.5683	1.0701	0	0.3502	0	0.2842	0
21	23	2.2399	2.2904	0	0.7548	0	0.6125	0
22	24	1.8660	1.2732	0	0.4167	0	0.3382	0
22	25	0.0000	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0
24	26	0.6465	0.4411	0	0.1444	0	0.1172	0
24	27	0.0896	0.0611	0	0.0200	0	0.0162	0
26	28	0.8578	0.5853	0	0.1916	0	0.1554	0
27	29	0.4321	0.2948	0	0.0965	0	0.0783	0
28	30	0.0896	0.0611	0	0.0200	0	0.0162	0
28	31	0.2753	0.1878	0	0.0615	0	0.0499	0
29	32	1.1651	0.7949	0	0.2602	0	0.2111	0
30	33	0.0000	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0
32	34	0.1696	0.1157	0	0.0379	0	0.0307	0

Tabela 30 – Continuação - Dados das Linhas para a rede Trifásica de 34 Barras, em  $\Omega$

$X_{ba}$	$R_{bb}$	$X_{bb}$	$R_{bc}$	$X_{bc}$	$R_{ca}$	$X_{ca}$	$R_{cb}$	$X_{cb}$	$R_{cc}$	$X_{cc}$
0.1844	0.8258	0.5634	0	0.1238	0	0.1496	0	0.1238	0.8258	0.5634
0.1237	0.5537	0.3778	0	0.0830	0	0.1003	0	0.0830	0.5537	0.3778
2.3037	10.3159	7.0387	0	1.5463	0	1.8695	0	1.5463	10.3159	7.0387
0.0000	0.6508	1.1833	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0.0000	0.0000
2.6803	12.0026	8.1896	0	1.7991	0	2.1751	0	1.7991	12.0026	8.1896
2.1250	9.5157	6.4927	0	1.4263	0	1.7244	0	1.4263	9.5157	6.4927
0.0007	0.0032	0.0022	0	0.0005	0	0.0006	0	0.0005	0.0032	0.0022
0.0222	0.0992	0.0677	0	0.0149	0	0.0180	0	0.0149	0.0992	0.0677
0.0000	0.0000	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0.0000	0.0000
0.7298	3.2679	2.2298	0	0.4898	0	0.5922	0	0.4898	3.2679	2.2298
0.0000	0.0000	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0.0000	0.0000
0.0600	0.2689	0.1834	0	0.0403	0	0.0487	0	0.0403	0.2689	0.1834
0.0000	0.3398	0.6178	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0.0000	0.0000
1.4610	6.5422	4.4639	0	0.9806	0	1.1856	0	0.9806	6.5422	4.4639
0.0372	0.1664	0.1136	0	0.0249	0	0.0302	0	0.0249	0.1664	0.1136
2.6324	11.7882	8.0433	0	1.7669	0	2.1363	0	1.7669	11.7882	8.0433
0.0000	2.6161	4.7565	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0.0000	0.0000
0.0007	0.0032	0.0022	0	0.0005	0	0.0006	0	0.0005	0.0032	0.0022
0.0000	0.0000	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0.0000	0.0000
0.3502	1.5683	1.0701	0	0.2351	0	0.2842	0	0.2351	1.5683	1.0701
0.7548	2.2399	2.2904	0	0.5066	0	0.6125	0	0.5066	2.2399	2.2904
0.4167	1.8660	1.2732	0	0.2797	0	0.3382	0	0.2797	1.8660	1.2732
0.0000	0.1817	0.3303	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0.0000	0.0000
0.1444	0.6465	0.4411	0	0.0969	0	0.1172	0	0.0969	0.6465	0.4411
0.0200	0.0896	0.0611	0	0.0134	0	0.0162	0	0.0134	0.0896	0.0611
0.1916	0.8578	0.5853	0	0.1286	0	0.1554	0	0.1286	0.8578	0.5853
0.0965	0.4321	0.2948	0	0.0648	0	0.0783	0	0.0648	0.4321	0.2948
0.0200	0.0896	0.0611	0	0.0134	0	0.0162	0	0.0134	0.0896	0.0611
0.0615	0.2753	0.1878	0	0.0413	0	0.0499	0	0.0413	0.2753	0.1878
0.2602	1.1651	0.7949	0	0.1746	0	0.2111	0	0.1746	1.1651	0.7949
0.0000	1.5555	1.0652	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0.0000	0.0000
0.0379	0.1696	0.1157	0	0.0254	0	0.0307	0	0.0254	0.1696	0.1157

Tabela 31 – Dados das Barras para a rede Trifásica de 34 Barras

Barra	$P_a$ (W)	$Q_a$ (VAr)	$P_b$ (W)	$Q_b$ (VAr)	$P_c$ (W)	$Q_c$ (VAr)
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	15000	7500	12500	7000
3	0	0	15000	7500	12500	7000
4	0	0	8000	4000	0	0
5	0	0	8000	4000	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	2500	1000	0	0
10	17000	8500	0	0	0	0
11	0	0	22500	11000	2000	1000
12	84500	43500	0	0	0	0
13	3500	1500	0	0	2000	1000
14	0	0	20000	10000	0	0
15	67500	35000	0	0	0	0
16	13500	6500	12000	6000	25000	10000
17	0	0	2000	1000	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
20	3500	1500	1000	500	3000	1500
21	0	0	0	0	0	0
22	6500	3000	8500	4500	9500	5000
23	150000	75000	150000	75000	150000	75000
24	10000	5000	17500	9000	61500	31000
25	1000	500	0	0	0	0
26	43000	27500	35000	24000	96000	54500
27	4500	2500	0	0	0	0
28	24000	12000	16000	8500	21000	11000
29	139500	107500	147500	111000	145000	110500
30	0	0	14000	7000	0	0
31	18000	11500	20000	12500	9000	7000
32	0	0	24000	11500	0	0
33	0	0	14000	7000	0	0
34	20000	16000	31500	21500	20000	16000

Tabela 32 – Dados das Linhas para a rede Monofásica de 70 Barras, em  $\Omega$ 

Nó	Nó	R	X	Nó	Nó	R	X
Emissor	Receptor			Emissor	Receptor		
1	2	0.0005	0.0012	4	37	0.0044	0.0108
2	3	0.0005	0.0012	37	38	0.064	0.1565
3	4	0.0001	0.0001	38	39	0.1053	0.123
4	5	0.0015	0.0036	39	40	0.0304	0.0305
5	6	0.0251	0.0294	40	41	0.0018	0.0021
6	7	0.366	0.1864	41	42	0.7283	0.8509
7	8	0.3811	0.1941	42	43	0.31	0.3623
8	9	0.0922	0.047	43	44	0.041	0.0478
9	10	0.0493	0.0251	44	45	0.0092	0.0116
10	11	0.819	0.2707	45	46	0.1089	0.1373
11	12	0.1872	0.0619	46	47	0.0009	0.0012
12	13	0.7114	0.2351	5	48	0.0034	0.0084
13	14	1.03	0.34	48	49	0.0851	0.2083
14	15	1.044	0.345	49	50	0.2898	0.7091
15	16	1.058	0.3496	50	51	0.0822	0.2011
16	17	0.1966	0.065	9	52	0.0928	0.0473
17	18	0.3744	0.1238	52	53	0.3319	0.1114
18	19	0.0047	0.0016	10	54	0.174	0.0886
19	20	0.3276	0.1083	54	55	0.203	0.1034
20	21	0.2106	0.0696	55	56	0.2842	0.1447
21	22	0.3416	0.1129	56	57	0.2813	0.1433
22	23	0.014	0.0046	57	58	1.59	0.5337
23	24	0.1591	0.0526	58	59	0.7837	0.263
24	25	0.3463	0.1145	59	60	0.3042	0.1006
25	26	0.7488	0.2475	60	61	0.3861	0.1172
26	27	0.3089	0.1021	61	62	0.5075	0.2585
27	28	0.1732	0.0572	62	63	0.0974	0.0496
3	29	0.0044	0.0108	63	64	0.145	0.0738
29	30	0.064	0.1565	64	65	0.7105	0.3619
30	31	0.3978	0.1315	65	66	1.041	0.5302
31	32	0.0702	0.0232	12	67	0.2012	0.0611
32	33	0.351	0.116	67	68	0.0047	0.0014
33	34	0.839	0.2816	13	69	0.7394	0.2444
34	35	1.708	0.5646	69	70	0.0047	0.0016
35	36	1.474	0.4873				

Tabela 33 – Dados das Barras para a rede Monofásica de 70 Barras

Barra	P(W)	Q(VAr)	Barra	P(W)	Q(VAr)
1	0	0	36	7800	5200
2	0	0	37	33800	24115
3	0	0	38	33800	24115
4	0	0	39	0	0
5	0	0	40	31200	22100
6	0	0	41	31200	22100
7	3380	2860	42	1560	1300
8	52520	39000	43	0	0
9	97500	70200	44	7800	5590
10	39000	28600	45	0	0
11	36400	24700	46	50986	34190
12	188500	135200	47	50986	34190
13	188500	135200	48	0	0
14	10400	7150	49	102700	73320
15	10400	7150	50	500110	356850
16	0	0	51	500110	356850
17	59150	39000	52	52650	36790
18	78000	45500	53	4680	3510
19	78000	45500	54	5655	4550
20	0	0	55	34320	24700
21	1300	780	56	31200	22360
22	148200	105300	57	0	0
23	6890	4550	58	0	0
24	0	0	59	0	0
25	36400	26000	60	130000	93600
26	0	0	61	0	0
27	18200	13000	62	1617200	1154400
28	18200	13000	63	41600	29900
29	33800	24180	64	0	0
30	33800	24180	65	295100	210600
31	0	0	66	76700	54600
32	0	0	67	23400	16900
33	0	0	68	23400	16900
34	18200	13000	69	36400	26000
35	25350	18200	70	36400	26000

Tabela 34 – Dados das Linhas para a rede Monofásica de 222 Barras, em  $\Omega$ 

Nó	Nó	R	X	Nó	Nó	R	X
Emissor	Receptor			Emissor	Receptor		
1	2	0.47385	0.24926	33	48	0.106633	0.57827
2	3	0.6195	0.61857	34	49	0.47385	0.24926
3	4	0.34049	0.33998	35	50	0.32267	0.74488
4	5	0.56862	0.29911	50	51	0.14633	0.33779
5	6	0.10877	0.1086	51	52	0.12382	0.28583
6	7	0.56862	0.29911	51	53	0.01126	0.02598
7	8	0.01126	0.02598	3	54	0.6491	0.149842
8	9	0.41835	0.96575	4	55	0.04502	0.10394
9	10	0.10499	0.13641	5	56	0.5264	0.18056
10	11	0.43898	0.101338	6	57	0.02064	0.04764
11	12	0.0455	0.05911	7	58	0.53071	0.27917
12	13	0.47385	0.24926	8	59	0.09755	0.2252
13	14	0.86241	0.45364	9	60	0.11819	0.27283
14	15	0.56862	0.29911	10	61	0.13882	0.32047
15	16	0.77711	0.40878	11	62	0.04315	0.09961
16	17	0.108038	0.5683	12	63	0.09192	0.2122
17	18	0.106633	0.57827	13	64	0.16134	0.37244
18	19	0.47385	0.24926	14	65	0.37832	0.37775
19	20	0.32267	0.74488	15	66	0.39724	0.39664
20	21	0.14633	0.33779	16	67	0.2932	0.29276
21	22	0.16134	0.37244	17	68	0.34049	0.33998
22	23	0.37832	0.37775	18	69	0.56862	0.29911
23	24	0.39724	0.39664	19	70	0.10877	0.1086
24	25	0.2932	0.29276	20	71	0.56862	0.29911
25	26	0.77711	0.40878	21	72	0.01126	0.02598
26	27	0.108038	0.5683	22	73	0.41835	0.96575
27	28	0.106633	0.57827	23	74	0.10499	0.13641
28	29	0.47385	0.24926	24	75	0.43898	0.101338
29	30	0.6195	0.61857	25	76	0.0752	0.02579
30	31	0.34049	0.33998	26	77	0.07692	0.17756
31	32	0.16884	0.38976	27	78	0.33205	0.76653
32	33	0.11819	0.27283	28	79	0.08442	0.19488
33	34	0.228608	0.78414	29	80	0.1332	0.30748
34	35	0.45587	0.105236	30	81	0.2932	0.29276
35	36	0.696	0.160669	31	82	0.21753	0.21721
36	37	0.45774	0.105669	32	83	0.26482	0.26443
37	38	0.20298	0.26373	33	84	0.10318	0.23819
38	39	0.21348	0.27737	34	85	0.13507	0.31181
39	40	0.54967	0.28914	35	86	0.0938	0.02165
40	41	0.54019	0.28415	36	87	0.16884	0.38976
41	42	0.0455	0.05911	37	88	0.11819	0.27283
42	43	0.47385	0.24926	38	89	0.228608	0.78414
43	44	0.86241	0.45364	39	90	0.45587	0.105236
44	45	0.56862	0.29911	40	91	0.696	0.160669
45	46	0.77711	0.40878	41	92	0.45774	0.105669
46	47	0.108038	0.5683	42	93	0.20298	0.26373

Tabela 35 – Continuação - Dados das Linhas para a rede Monofásica de 222 Barras, em  $\Omega$ 

Nó	Nó	R	X	Nó	Nó	R	X
Emissor	Receptor			Emissor	Receptor		
43	94	0.21348	0.27737	91	140	0.1332	0.30748
44	95	0.54967	0.28914	92	141	0.2932	0.29276
45	96	0.54019	0.28415	93	142	0.21753	0.21721
46	97	0.0455	0.05911	94	143	0.26482	0.26443
47	98	0.47385	0.24926	95	144	0.10318	0.23819
48	99	0.86241	0.45364	96	145	0.13507	0.31181
49	100	0.56862	0.29911	97	146	0.0938	0.02165
50	101	0.77711	0.40878	98	147	0.16884	0.38976
51	102	0.108038	0.5683	99	148	0.11819	0.27283
52	103	0.106633	0.57827	100	149	0.228608	0.78414
53	104	0.47385	0.24926	101	150	0.45587	0.105236
56	105	0.32267	0.74488	102	151	0.696	0.160669
57	106	0.14633	0.33779	103	152	0.45774	0.105669
58	107	0.12382	0.28583	104	153	0.20298	0.26373
59	108	0.01126	0.02598	134	154	0.21348	0.27737
60	109	0.6491	0.149842	135	155	0.54967	0.28914
61	110	0.04502	0.10394	136	156	0.54019	0.28415
62	111	0.5264	0.18056	137	157	0.0455	0.05911
63	112	0.02064	0.04764	138	158	0.47385	0.24926
64	113	0.53071	0.27917	139	159	0.86241	0.45364
65	114	0.09755	0.2252	140	160	0.56862	0.29911
66	115	0.11819	0.27283	141	161	0.77711	0.40878
67	116	0.13882	0.32047	142	162	0.108038	0.5683
68	117	0.04315	0.09961	143	163	0.106633	0.57827
69	118	0.09192	0.2122	144	164	0.47385	0.24926
70	119	0.16134	0.37244	145	165	0.32267	0.74488
71	120	0.37832	0.37775	146	166	0.14633	0.33779
72	121	0.39724	0.39664	147	167	0.16134	0.37244
73	122	0.2932	0.29276	148	168	0.37832	0.37775
74	123	0.77711	0.40878	149	169	0.39724	0.39664
75	124	0.108038	0.5683	150	170	0.2932	0.29276
76	125	0.106633	0.57827	151	171	0.77711	0.40878
77	126	0.47385	0.24926	152	172	0.108038	0.5683
78	127	0.6195	0.61857	153	173	0.106633	0.57827
79	128	0.34049	0.33998	86	174	0.47385	0.24926
80	129	0.56862	0.29911	87	175	0.6195	0.61857
81	130	0.10877	0.1086	88	176	0.34049	0.33998
82	131	0.56862	0.29911	89	177	0.56862	0.29911
83	132	0.01126	0.02598	90	178	0.10877	0.1086
84	133	0.41835	0.96575	91	179	0.56862	0.29911
85	134	0.10499	0.13641	92	180	0.01126	0.02598
86	135	0.43898	0.101338	93	181	0.41835	0.96575
87	136	0.0752	0.02579	94	182	0.10499	0.13641
88	137	0.07692	0.17756	95	183	0.43898	0.101338
89	138	0.33205	0.76653	96	184	0.0455	0.05911
90	139	0.08442	0.19488	97	185	0.47385	0.24926

Tabela 36 – Continuação - Dados das Linhas para a rede Monofásica de 222 Barras, em  $\Omega$ 

Nó	Nó	R	X	Nó	Nó	R	X
Emissor	Receptor			Emissor	Receptor		
98	186	0.86241	0.45364	134	205	0.11819	0.27283
99	187	0.56862	0.29911	97	206	0.228608	0.78414
100	188	0.77711	0.40878	98	207	0.45587	0.105236
101	189	0.108038	0.5683	99	208	0.696	0.160669
102	190	0.106633	0.57827	100	209	0.45774	0.105669
103	191	0.47385	0.24926	101	210	0.20298	0.26373
104	192	0.32267	0.74488	102	211	0.21348	0.27737
134	193	0.14633	0.33779	103	212	0.54967	0.28914
94	194	0.16134	0.37244	104	213	0.54019	0.28415
95	195	0.37832	0.37775	134	214	0.0455	0.05911
96	196	0.39724	0.39664	101	215	0.47385	0.24926
97	197	0.2932	0.29276	102	216	0.86241	0.45364
98	198	0.77711	0.40878	103	217	0.56862	0.29911
99	199	0.108038	0.5683	104	218	0.77711	0.40878
100	200	0.106633	0.57827	134	219	0.108038	0.5683
101	201	0.47385	0.24926	103	220	0.106633	0.57827
102	202	0.6195	0.61857	104	221	0.47385	0.24926
103	203	0.34049	0.33998	134	222	0.32267	0.74488
104	204	0.16884	0.38976				

Tabela 37 – Dados das Barras para a rede Monofásica de 222 Barras

Barra	P(W)	Q(VAr)	Barra	P(W)	Q(VAr)
1	0	0	47	100000	100000
2	100000	100000	48	250148	106041
3	141238	59873	49	100000	100000
4	279847	118631	50	68809	28593
5	87312	37013	51	32072	13596
6	243849	103371	52	61084	25894
7	247750	105025	53	100000	100000
8	100000	100000	54	94622	46260
9	89878	38101	55	49858	24375
10	137280	482108	56	123164	60214
11	458339	194296	57	78350	38304
12	202435	85815	58	145475	71121
13	60823	25874	59	21369	10447
14	45618	19338	60	74789	36564
15	100000	100000	61	227926	111431
16	157070	66584	62	35614	17411
17	100000	100000	63	249295	121877
18	250148	106041	64	316722	154842
19	100000	100000	65	333817	163199
20	68809	28593	66	249295	121877
21	32072	13596	67	100000	100000
22	316722	154842	68	279847	118631
23	333817	163199	69	87312	37013
24	249295	121877	70	243849	103371
25	100000	100000	71	247750	105025
26	157070	66584	72	100000	100000
27	100000	100000	73	89878	38101
28	250148	106041	74	137280	482108
29	100000	100000	75	458339	194296
30	141238	59873	76	385197	163290
31	279847	118631	77	100000	100000
32	51322	21756	78	79608	33747
33	59874	25381	79	87312	37013
34	9065	3843	80	100000	100000
35	2092	887	81	74001	31370
36	16735	7094	82	232050	98369
37	506520	638634	83	141819	60119
38	313023	132694	84	100000	100000
39	79831	33842	85	76449	32408
40	51322	21756	86	100000	100000
41	100000	100000	87	51322	21756
42	202435	85815	88	59874	25381
43	60823	25874	89	9065	3843
44	45618	19338	90	2092	887
45	100000	100000	91	16735	7094
46	157070	66584	92	506520	638634

Tabela 38 – Continuação - Dados das Barras para a rede Monofásica de 222 Barras

Barra	P(W)	Q(VAr)	Barra	P(W)	Q(VAr)
93	313023	132694	139	87312	37013
94	79831	33842	140	100000	100000
95	51322	21756	141	74001	31370
96	100000	100000	142	232050	98369
97	202435	85815	143	141819	60119
98	60823	25874	144	100000	100000
99	45618	19338	145	76449	32408
100	100000	100000	146	100000	100000
101	157070	66584	147	51322	21756
102	100000	100000	148	59874	25381
103	250148	106041	149	9065	3843
104	100000	100000	150	2092	887
105	68809	28593	151	16735	7094
106	32072	13596	152	506520	638634
107	61084	25894	153	313023	132694
108	100000	100000	154	79831	33842
109	94622	46260	155	51322	21756
110	49858	24375	156	51322	21756
111	123164	60214	157	202435	85815
112	78350	38304	158	60823	25874
113	145475	71121	159	45618	19338
114	21369	10447	160	100000	100000
115	74789	36564	161	157070	66584
116	227926	111431	162	100000	100000
117	35614	17411	163	250148	106041
118	249295	121877	164	100000	100000
119	316722	154842	165	68809	28593
120	333817	163199	166	32072	13596
121	249295	121877	167	316722	154842
122	100000	100000	168	333817	163199
123	157070	66584	169	249295	121877
124	100000	100000	170	100000	100000
125	250148	106041	171	157070	66584
126	100000	100000	172	100000	100000
127	141238	59873	173	250148	106041
128	279847	118631	174	100000	100000
129	87312	37013	175	141238	59873
130	243849	103371	176	279847	118631
131	247750	105025	177	87312	37013
132	100000	100000	178	243849	103371
133	89878	38101	179	247750	105025
134	137280	482108	180	100000	100000
135	458339	194296	181	89878	38101
136	385197	163290	182	137280	482108
137	100000	100000	183	458339	194296
138	79608	33747	184	202435	85815

Tabela 39 – Continuação - Dados das Barras para a rede Monofásica de 222 Barras

Barra	P(W)	Q(VAr)	Barra	P(W)	Q(VAr)
185	60823	25874	204	51322	21756
186	45618	19338	205	59874	25381
187	100000	100000	206	9065	3843
188	157070	66584	207	2092	887
189	100000	100000	208	16735	7094
190	250148	106041	209	506520	638634
191	100000	100000	210	313023	132694
192	68809	28593	211	79831	33842
193	32072	13596	212	51322	21756
194	316722	154842	213	100000	100000
195	333817	163199	214	202435	85815
196	249295	121877	215	60823	25874
197	100000	100000	216	45618	19338
198	157070	66584	217	100000	100000
199	100000	100000	218	157070	66584
200	250148	106041	219	100000	100000
201	100000	100000	220	250148	106041
202	141238	59873	221	100000	100000
203	279847	118631	222	68809	28593

