

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ

CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE  
PARTÍCULAS DISCRETO APLICADO NA ALOCAÇÃO  
ÓTIMA DE BANCO DE CAPACITORES EM SISTEMAS  
DE DISTRIBUIÇÃO**

LUÍS HENRIQUE CHOUAY DALL'AGNESE

FOZ DO IGUAÇU

2020



Luís Henrique Chouay Dall’Agnese

**Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas Discreto  
aplicado na Alocação Ótima de Banco de Capacitores em  
Sistemas de Distribuição**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e Computação. Área de concentração: Sistemas Dinâmicos e Energéticos.

Orientador: Carlos Roberto Mendonça da Rocha

Foz do Iguaçu

2020

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Chouay Dall'Agnese, Luís Henrique

Algoritmo de otimização por enxame de partículas discreto aplicado na alocação ótima de banco de capacitores em sistemas de distribuição / Luís Henrique Chouay Dall'Agnese; orientador(a), Carlos Roberto Mendonça da Rocha, 2020.

69 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação, 2020.

1. Alocação de capacitores. 2. Algoritmo PSO. 3. Algoritmo PSO discreto. 4. Redução nas perdas de potência. I. Mendonça da Rocha, Carlos Roberto. II. Título.

# Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas Discreto aplicado na Alocação Ótima de Banco de Capacitores em Sistemas de Distribuição

Luís Henrique Chouay Dall’Agnese

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica e Computação e aprovada pela Banca Examinadora:

Data da defesa pública: 18/03/2020.



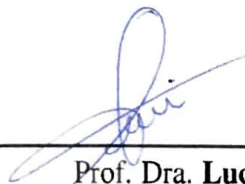
---

Prof. Dr. **Carlos Roberto Mendonça da Rocha** - (Orientador)  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE



---

Prof. Dr. **Edgar Manuel Carreño Franco**  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE



---

Prof. Dra. **Luciana Paro Scarin Freitas**  
Centro Universitário União das Américas - UNIÁMERICA



# Resumo

O planejamento da operação de um sistema elétrico é uma tarefa complexa. Uma de suas atividades é analisar as condições operativas da rede com o intuito de avaliar alternativas e estabelecer procedimentos com o objetivo de controlar a tensão e o carregamento do sistema. Uma das estratégias utilizadas para trabalhar esse problema é o emprego de banco de capacitores, uma vez que esses dispositivos são fontes de potência reativa, e a inserção dessa energia em locais específicos do sistema leva a uma melhoria da tensão de operação e a uma redução do nível de carga local. Nesse contexto, este trabalho procura definir a alocação ótima de banco de capacitores para regular o fluxo de potência reativa em sistemas de distribuição. A solução do problema é baseada em um modelo matemático que minimiza o custo de operação do sistema e o investimento em dispositivos, onde um índice de sensibilidade e as barras com baixos níveis de tensão são utilizados para definir quais locais serão selecionados como candidatos para a alocação. Utilizou-se o algoritmo de otimização por enxame de partículas, adaptado para a versão discreta buscando determinar a melhor quantidade e o local ideal para o posicionamento do banco de capacitores. O algoritmo foi aplicado em sistemas testes de 10, 34, 69 e 85 barras presentes na literatura especializada. Como resultado, houve uma redução nas perdas de potência ativa com a adição dos banco de capacitores e o algoritmo proposto mostrou uma boa solução em comparação com outras técnicas de otimização presentes na literatura.

**Palavras-chave:** Alocação de Capacitores, Algoritmo PSO, Algoritmo PSO Discreto, Redução nas Perdas de Potência.

# Abstract

The operation planning of an electrical system is a complex task. One of its activities is to analyse the operational conditions of the power network with the objective of evaluating alternatives and the procedures in order to control the voltages and the use of the system. One of the strategies used to work with this problem is the capacitor bank, since these devices are sources of reactive power energy, and the insertion of this energy in specific locations on the system leads to an improvement in operating voltage and a reduction in the level of local load operation. In this context, this work can define an optimal allocation of capacitor banks for regular reactive power flow in distribution systems. The problem is based on a mathematical model that minimizes the cost of system operating and investment in devices, where a sensitivity index and bars with low voltage levels are used to define the locals that are selected as candidates for allocation. Use the particule swarm optimization algorithm, adapted for a discrete version, seeking to determine the best quantity and the ideal location for the positioning of the capacitor bank. The algorithm was applied to the 10-, 34-, 69- and 85-bars systems tested present in the specialized literature. As a result, there was a reduction in the active power loss with the addition of a capacitor bank and an algorithm demonstrated a good solution compared to other optimization techniques present in the literature.

**Keywords:** Capacitor Allocation, PSO Algorithm, Discrete PSO Algorithm, Power Loss Reduction.



Dedico este trabalho à minha família.



# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre ter iluminado e abençoado minha vida.

À minha família, por serem os pilares das minhas conquistas. Meu pai, pelo companheirismo e nunca deixar de se preocupar comigo. Minha mãe, por me incentivar e acreditar no meu potencial. Minha avó, por orar e me fortalecer com suas palavras. Meu irmão pela amizade. Minha irmã pelos momentos de descontração e a todos que desejam o meu bem.

À minha namorada Eng. Twanny Lapczyk, que sempre esteve comigo e me acompanhou durante essa trajetória e me enriqueceu como pessoa. Com seu amor, carinho, companheirismo, incentivo e confiança me ajudou a tornar tudo isso possível. Além do conhecimento da língua portuguesa.

Ao meu orientador, prof. Dr. Carlos Rocha, por aceitar me orientar e me ajudar durante a elaboração desse trabalho, e ao prof. Dr. Ricardo Freitas pela ajuda e conselhos dados durante esse período.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná pela oportunidade de realização do mestrado, e aos professores do programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Computação, por compartilharem seus conhecimentos e incentivarem o estudo e a dedicação.

Aos meus irmãos Gabriel Guerra e Ezequiel Dobke, pelo tempo e companheirismo juntos, planos de ataque concluídos (ou não) e pela amizade construída durante o começo da graduação que certamente continuará por muito tempo.

Aos amigos do laboratório de geração de ideias, que propiciaram um ambiente extremamente prazeroso e amigável durante esses dois anos. Nossas reuniões serão recordadas para sempre.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

A todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão desta caminhada.



“Por trás dos troféus,  
há muito trabalho.”  
Cristiano Ronaldo



# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>15</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>17</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>19</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>21</b>
1.1 Justificativa . . . . .	22
1.2 Objetivos . . . . .	22
1.2.1 Objetivo Geral . . . . .	23
1.2.2 Objetivos Específicos . . . . .	23
1.3 Estrutura do Trabalho . . . . .	23
<b>2 Fundamentação Teórica</b>	<b>25</b>
2.1 Perdas de Potência Ativa em Sistemas de Distribuição . . . . .	25
2.2 Banco de Capacitores . . . . .	27
2.3 Métodos de Solução . . . . .	29
2.4 Considerações Finais . . . . .	30
<b>3 Estado da Arte</b>	<b>31</b>
3.1 Revisão Bibliográfica . . . . .	31
3.2 Considerações Finais . . . . .	33
<b>4 Formulação do Problema</b>	<b>35</b>
4.1 Modelo Matemático para Alocação de BC . . . . .	35
4.2 Método de Solução do Fluxo de Potência . . . . .	37
4.3 Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas . . . . .	38
4.4 Demonstração do Funcionamento . . . . .	41
4.5 Sistema de Ilustração . . . . .	42
4.6 Considerações Finais . . . . .	45
<b>5 Testes e Resultados</b>	<b>47</b>

5.1	Sistema de 10 Barras . . . . .	47
5.2	Sistema de 34 Barras . . . . .	49
5.3	Sistema de 69 Barras . . . . .	52
5.4	Sistema de 85 Barras . . . . .	54
5.5	Considerações Finais . . . . .	56
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>57</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>59</b>
<b>A</b>	<b>Dados dos Sistemas</b>	<b>63</b>



# Lista de Figuras

Figura 2.1: Perdas no Sistema Elétrico . . . . .	26
Figura 2.2: Comparação da Tensão . . . . .	27
Figura 2.3: Efeito de BC Fixos e Chaveados . . . . .	28
Figura 4.1: Método Varredura . . . . .	38
Figura 4.2: Movimento das Partículas . . . . .	39
Figura 4.3: Atualização da Posição da Partícula . . . . .	39
Figura 4.4: Fluxograma do Algoritmo . . . . .	42
Figura 4.5: Sistema Teste 4 Barras . . . . .	43
Figura 5.1: Configuração do Sistema de 10 Barras . . . . .	48
Figura 5.2: Perfil de Tensão - Sistema de 10 Barras . . . . .	49
Figura 5.3: Configuração do Sistema de 34 Barras . . . . .	50
Figura 5.4: Perfil de Tensão - Sistema de 34 Barras . . . . .	51
Figura 5.5: Configuração do Sistema de 69 Barras . . . . .	52
Figura 5.6: Perfil de Tensão - Sistema de 69 Barras . . . . .	53
Figura 5.7: Configuração do Sistema de 85 Barras . . . . .	54
Figura 5.8: Perfil de Tensão - Sistema de 85 Barras . . . . .	56



# Lista de Tabelas

Tabela 4.1:	Sistema de 4 Barras . . . . .	43
Tabela 4.2:	Primeira Iteração . . . . .	43
Tabela 4.3:	Segunda Iteração . . . . .	43
Tabela 4.4:	Terceira Iteração . . . . .	44
Tabela 4.5:	Quarta Iteração . . . . .	44
Tabela 4.6:	Sétima Iteração . . . . .	44
Tabela 4.7:	Décima Iteração . . . . .	45
Tabela 5.1:	Capacitores Disponíveis . . . . .	47
Tabela 5.2:	Comparação dos Resultados Obtidos . . . . .	48
Tabela 5.3:	Comparação entre Técnicas PSO . . . . .	48
Tabela 5.4:	Alocação dos BC para o Sistema de 10 Barras . . . . .	49
Tabela 5.5:	Comparação dos Resultados Obtidos . . . . .	50
Tabela 5.6:	Comparação entre Técnicas PSO . . . . .	50
Tabela 5.7:	Alocação dos BC para o Sistema de 34 Barras . . . . .	51
Tabela 5.8:	Comparação dos Resultados Obtidos . . . . .	53
Tabela 5.9:	Comparação entre Técnicas PSO . . . . .	53
Tabela 5.10:	Alocação dos BC para o Sistema de 69 Barras . . . . .	54
Tabela 5.11:	Comparação dos Resultados Obtidos . . . . .	55
Tabela 5.12:	Comparação entre Técnicas PSO . . . . .	55
Tabela 5.13:	Alocação dos BC para o Sistema de 85 Barras . . . . .	55
Tabela 5.14:	Síntese dos Resultados Obtidos . . . . .	56
Tabela A.1:	Sistema de 10 Barras . . . . .	63
Tabela A.2:	Sistema de 34 Barras . . . . .	64
Tabela A.3:	Sistema de 69 Barras . . . . .	65
Tabela A.4:	Sistema de 69 Barras - Continuação . . . . .	66
Tabela A.5:	Sistema de 85 Barras . . . . .	67
Tabela A.6:	Sistema de 85 Barras - Continuação . . . . .	68
Tabela A.7:	Sistema de 85 Barras - Continuação . . . . .	69



# Lista de Símbolos

$\theta_i$	Ângulo da tensão na barra $i$
$g_{i,j}$	Condutância da linha que liga as barras $i$ e $j$
$N_B$	Conjunto das barras que podem receber banco de capacitores
$N_i$	Conjunto de barras conectadas a barra $i$
$N$	Conjunto de todas as barras do sistema
$I_k$	Corrente consumida pela barra $k$
$I_{m,k}$	Corrente que flui entre a barra $m$ e $k$
$K_P$	Custo das perdas de potência ativa
$Kc_i$	Custo de cada banco instalado na barra $i$
$dp_i$	Demanda por potência ativa na barra $i$
$dq_i$	Demanda por potência reativa na barra $i$
$FP$	Fator de potência
$S_{i,j}$	Fluxo de potência aparente da barra $i$ para $j$
$S_{MAX}$	Fluxo de potência aparente máximo
$P_{i,j}$	Fluxo de potência ativa da barra $i$ para $j$
$Q_{i,j}$	Fluxo de potência reativa da barra $i$ para $j$
$K$	Função objetivo
$c1$	Índice de aprendizagem própria da partícula
$c2$	Índice de aprendizagem social da partícula
$w$	Índice de inércia da partícula
$w_{iter}$	Índice de inercia da partícula na iteração $iter$
$iter$	Iteração atual
$V_{MIN}$	Limite inferior de tensão
$V_{MAX}$	Limite superior de tensão
$V_i$	Magnitude da tensão na barra $i$
$p_p^{best}$	Melhor posição que a partícula $p$ conseguiu encontrar
$g^{best}$	Melhor posição que o exame todo já encontrou
$rand$	Número aleatório
$iter_{max}$	Número máximo de iterações
$Ii_k$	Parte imaginária da corrente consumida na barra $k$

$V i_k$	Parte imaginária da tensão na barra $k$
$I r_k$	Parte real da corrente consumida na barra $k$
$V r_k$	Parte real da tensão na barra $k$
$P_T$	Perdas de potência ativa
$p_p^i$	Posição da partícula $p$ na iteração $i$
$P_k$	Potência ativa consumida na barra $k$
$Q_B$	Potência reativa base de cada banco de capacitor
$Q_k$	Potência reativa consumida na barra $k$
$Q^{sub}$	Potência reativa enviada pela subestação
$Q c_i$	Potência reativa injetada na barra $i$
$N c_k$	Quantidade de banco de capacitores alocados na barra $k$
$x_{i,j}$	Reatância da linha que liga as barras $i$ e $j$
$r_{i,j}$	Resistência da linha que liga as barras $i$ e $j$
$b_{i,j}$	Susceptância da linha que liga as barras $i$ e $j$
$w_{max}$	Valor máximo do índice de inércia
$w_{min}$	Valor mínimo do índice de inércia
$v_p^i$	Velocidade da partícula $p$ na iteração $i$

# Capítulo 1

## Introdução

A rede elétrica é um conjunto de equipamentos responsáveis por transportar a energia elétrica de um ponto a outro, de modo a garantir que os consumidores tenham acesso à eletricidade no momento que desejarem. Esta energia deve ser entregue com qualidade, e essa qualidade no sentido de nível de tensão significa que o sistema deverá operar dentro de faixas de operação estabelecidas por normas técnicas (Willis, 2004).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é a responsável por garantir que a normatização das empresas fornecedoras e as leis que protegem os usuários sejam cumpridas, assegurando um fornecimento de energia com qualidade e confiabilidade para os consumidores. Para garantir essa qualidade é necessário, por parte das fornecedoras, um planejamento e uma consequente manutenção na infraestrutura existente (Pereira Júnior & Mantovani, 2008).

O objetivo de um planejamento é, através de um processo ou ferramenta de tomadas de decisões, certificar que o aumento da demanda de carga possa ser atendido através de melhorias no sistema de distribuição, situado entre o sistema de transmissão e o consumidor final, de modo que esses investimentos sejam economicamente viáveis e assegurem um fornecimento confiável e seguro (Gönen, 2014).

O crescente aumento dos centros consumidores torna a distância em relação ao sistema de distribuição cada vez maior, fazendo necessário um aumento da extensão desse sistema, o que ocasiona uma redução no perfil de tensão da rede, provocado pelas perdas de energia elétrica devido ao aumento de corrente na linha (Pereira Junior, 2009).

Além disso, o aumento de corrente na linha também pode ser motivado pelo excesso de potência reativa. A energia utilizada para o funcionamento de equipamentos elétricos, necessita de potência ativa e reativa agindo combinadamente, apesar de necessária a potência reativa deve atingir um baixo nível. A presença de um alto nível de potência reativa e consequentemente um baixo fator de potência, utilizado para indicar a eficiência do uso de energia, provoca um incremento nas perdas, devido ao aumento no aquecimento de condutores, e quedas de tensão na linha (Mamede Filho, 2018).

O sistema de distribuição é o maior responsável pelas perdas de potência nos sistemas de energia elétrica e tem uma baixa regulação de tensão. Realizar o planejamento de controle de potência reativa é uma estratégia que leva a uma melhor operação do sistema de distribuição

(Prasad Reddy P & Gunaprasad, 2014).

Para regular essa tensão, o nível de potência reativa e o fator de potência pode-se utilizar alguns equipamentos como transformadores com taps variáveis, reguladores de tensão e bancos de capacitores (Gasperin, Haffner & Pereira, 2008).

Um ponto ótimo de operação dificilmente será alcançado sem o auxílio de uma ferramenta computacional, devido à complexidade do sistema e das suas variáveis (Beê, Aoki, Fernandes & Gruppellio JR, 2007).

O presente trabalho propõe a utilização de um algoritmo inteligente para determinar o ponto ótimo de alocação de banco de capacitores visando minimizar os custos de operação através da redução das perdas de energia.

## 1.1 Justificativa

A qualidade do serviço oferecido pelas concessionárias pode ser mensurada pelo nível de tensão entregue aos consumidores, a partir dos sistemas de distribuição (Soares, 2010).

Para uma melhor prestação de serviços, a utilização de banco de capacitores é uma alternativa viável quando se considera o custo desses equipamentos em relação a alternativas como recondutoramento ou a reconfiguração da rede (Szuovovivski, Fernandes & Aoki, 2012).

A alocação de banco de capacitores auxilia no perfil de tensão da rede, levando a um perfil mais horizontal e melhorando assim a qualidade da energia entregue ao consumidor. Além disso, como estão inserindo potência reativa na rede, reduzem o fluxo de potência aparente no sistema e isso leva a menores perdas elétricas (Tabares, Franco, Lavorato & Rider, 2016).

A decisão da localização, capacidade e quantidade dos bancos de capacitores, não deve ser tomada com base em conhecimento empírico, pois tende a não apresentar resultados que cumpram com seu objetivo (Szuovovivski, 2008).

Diante disso, um trabalho acadêmico que proponha um algoritmo inteligente que assegure a melhor localização da inserção de equipamentos que reduzam as perdas de energia e mantenham a tensão elétrica dentro dos limites aceitáveis é uma contribuição para o desenvolvimento de projetos que buscam minimizar os custos de operação.

## 1.2 Objetivos

Nesta seção são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.



### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho foi resolver o problema de planejamento de fluxo de potência reativa de um sistema de distribuição, buscando reduzir as perdas de potência ativa com a determinação do melhor local para a instalação de banco de capacitores. Para atingir esse objetivo, foi necessário utilizar uma ferramenta computacional que fosse eficiente na busca da solução, ou seja, que procurasse fugir de pontos ótimos locais. Por questões de afinidade com a ferramenta, optou-se por utilizar a meta-heurística de otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization* - PSO).

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Para o cumprimento do objetivo geral, foram necessárias as seguintes tarefas:

- Definir uma metodologia para o planejamento de potência reativa em sistemas de distribuição;
- Definir um método de solução para o fluxo de potência;
- Selecionar uma estratégia para seleção de barras candidatas para alocação;
- Estruturar uma codificação para a utilização da meta-heurística PSO na solução de problemas de variáveis discretas;
- Avaliar o algoritmo em sistemas testes.

## 1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está dividido em seis capítulos: No capítulo 1 é apresentado uma breve introdução sobre o tema de pesquisa e o cenário em que o trabalho está inserido, destacando a relevância e a motivação para a elaboração do estudo. Além disso, apresenta o objetivo geral e os específicos, e a estrutura que foi adotada para a confecção do trabalho escrito.

No capítulo 2 realiza-se uma contextualização sobre perdas de energia em sistemas de distribuição, técnicas de alocação de banco de capacitores e métodos de solução.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica de pesquisas relacionadas a essa temática, citadas cronologicamente e que auxiliaram no desenvolvimento desta linha de pesquisa.

No capítulo 4 é descrito o modelo matemático utilizado, a técnica meta-heurística para minimização da função objetivo, a adaptação da técnica para solução do problema de variáveis inteiras e um fluxograma do algoritmo proposto.

O capítulo 5 mostra os resultados obtidos através da aplicação do algoritmo proposto em sistemas testes frequentemente utilizados.

No capítulo 6 avalia-se o desempenho do algoritmo proposto considerando os resultados obtidos e são sugeridas propostas de trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Fundamentação Teórica

Neste capítulo são apresentadas definições pertinentes ao tema da pesquisa e características dos bancos de capacitores (BC), bem como as estratégias para a alocação dos dispositivos, além de algumas técnicas de solução que são aplicadas na literatura.

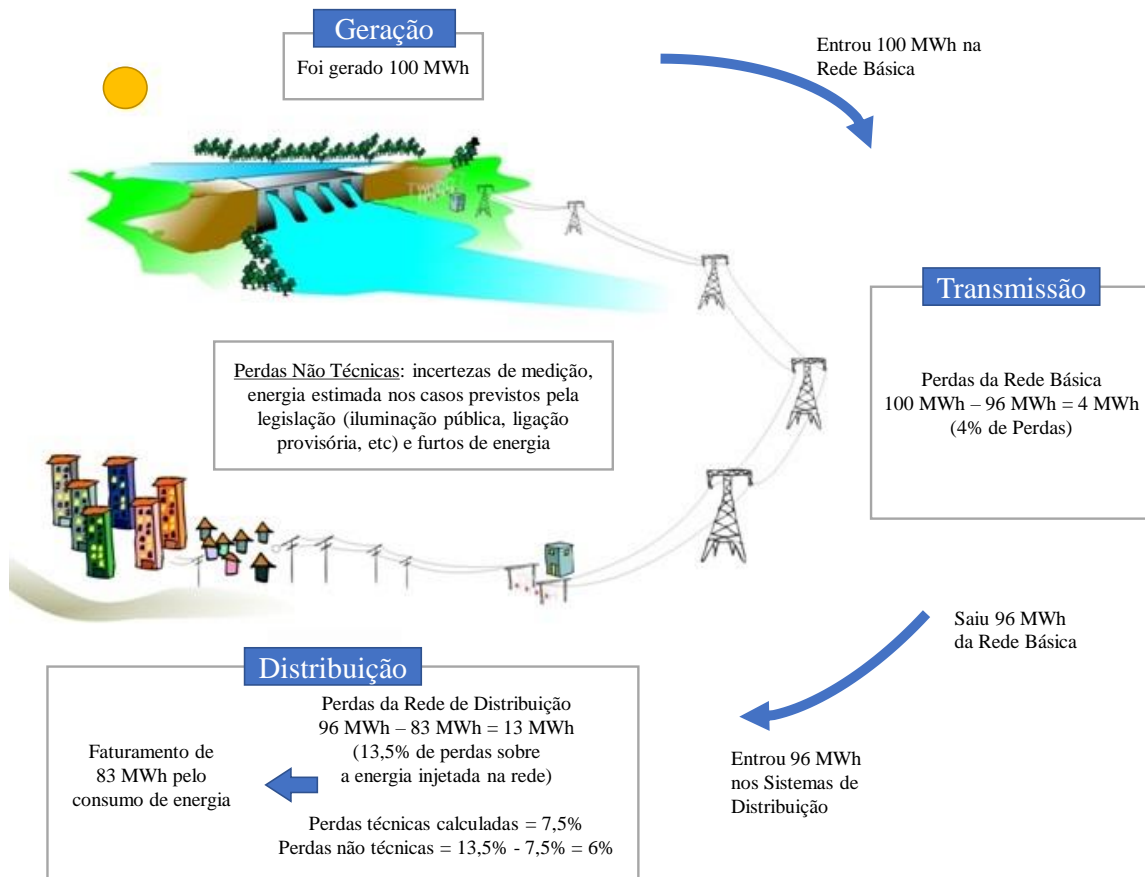
### 2.1 Perdas de Potência Ativa em Sistemas de Distribuição

As perdas podem ser definidas como a energia elétrica gerada que deixa de ser comercializada após passar pelas linhas de transmissão e pelo sistema de distribuição. As concessionárias de energia elétrica classificam as perdas conforme sua origem e elas podem ser denominadas como perdas técnicas ou perdas comerciais. A primeira delas está relacionada com as perdas pelo transporte da energia, pelo aquecimento nos condutores e transformadores da rede ou em quaisquer outros equipamentos da operação. Já as perdas comerciais estão relacionadas com erros de medição e fraudes ou furtos de energia elétrica decorrentes de desvios diretos da rede ou adulteração nos medidores (ANEEL, 2019).

A metodologia definida para o cálculo de perdas técnicas está presente no módulo 7 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), baseando-se na classe de operação do sistema (alta, média e baixa tensão) e nos equipamentos como transformadores, ramais de ligação, medidores, etc. Com isso, são aplicados modelos próprios para cada uma das classes de operação, junto com as informações da rede e dos equipamentos. A partir desses dados, avalia-se as perdas técnicas em relação a energia fornecida pela rede.

Já o cálculo tarifário e a metodologia para as perdas não técnicas encontra-se no submódulo 2.6 dos Procedimentos de Regulação Tarifária (PRORET), que utiliza uma metodologia para comparar o comportamento das distribuidoras, levando em consideração critérios de eficiência e questões sociais e econômicas das regiões de concessão (ANEEL, 2019).

Na Figura 2.1 é possível visualizar um exemplo de como ocorrem as perdas no sistema elétrico de potência.



**Figura 2.1:** Perdas no Sistema Elétrico  
Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2019)

As perdas técnicas são inevitáveis em qualquer rede de distribuição, porém o aumento da demanda, em termos de taxas de crescimento crescentes e altas densidades de carga, aumenta de forma severa o nível de corrente na linha, levando a uma maior queda de tensão e um aumento da potência dissipada nas linhas, podendo violar limites pré-estabelecidos.

Além disso, a potência reativa, aquela que não produz trabalho mas é consumida pelos equipamentos com a função de formar os campos eletromagnéticos necessários para o funcionamento, quando em excesso também incrementa a corrente na linha causando perdas.

O planejamento do sistema de distribuição visa garantir que a crescente demanda por eletricidade não altere as variáveis do sistema, fazendo com que ele atenda as restrições de operação (Gönen, 2014).

As perdas do sistema de distribuição podem ser reduzidas através da reconfiguração da rede, a partir da observação do comportamento das cargas de residências, comércios e indústrias. Dependendo das características de consumo, as cargas podem ser alocadas entre os alimentadores de um sistema de distribuição otimizando a operação da rede. Porém trata-se de uma alternativa manual que demanda capacitação e deslocamento de operadores (Oliveira & Asada, 2016).

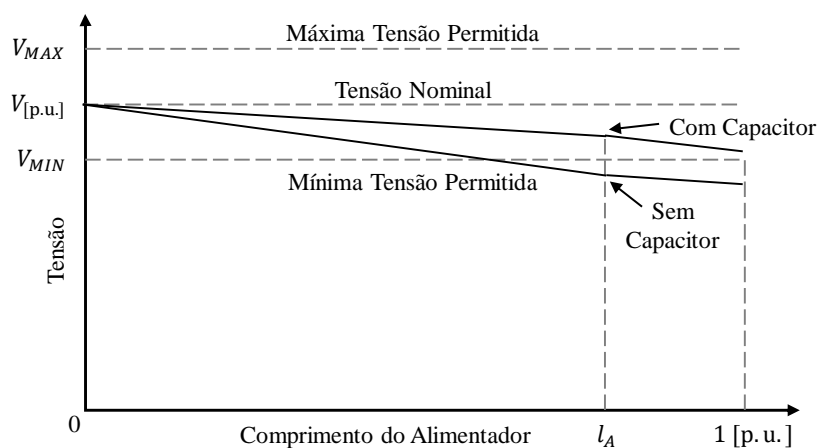
Nesse sentido, a utilização de BC pode ser vista como uma solução para esse problema, tendo em vista que esses dispositivos são capazes de reduzir a carga de potência reativa total dentro de um alimentador (Willis, 2004).

## 2.2 Banco de Capacitores

Os capacitores de potência são dispositivos formados por duas placas metálicas separadas por um material isolante dielétrico. Entretanto, são de um alto nível de complexidade, já que seu material dielétrico é muito fino e ele trabalha com alta tensão elétrica.

Com o passar dos anos, a tecnologia envolvendo os BC foi se aprimorando cada vez mais, tanto pela utilização mais eficiente dos materiais e melhoria dos mesmos, quanto pelas técnicas de construção mais sofisticadas. Exemplificando, a potência que pode ser fornecida por BC passou de 15 a 25 kilo volt-ampère reativo (kvar) para 200 a 300 kvar, podendo chegar a 1800 kvar hoje em dia (Gönen, 2014).

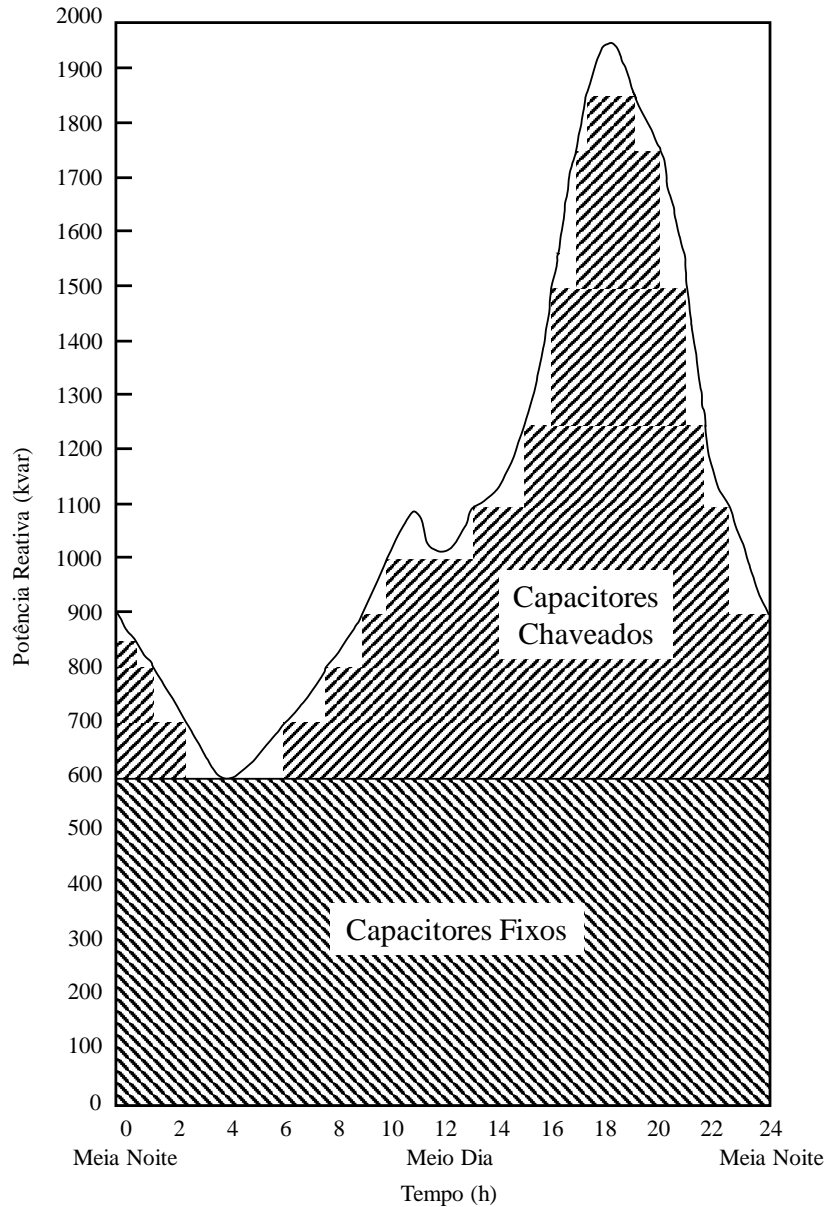
Capacitores usados em paralelo com a linha, em derivação, são largamente utilizados em sistemas de potência. Dessa maneira, eles são capazes de entregar a energia reativa que a carga exige, não sendo necessário que a subestação envie essa energia. O efeito da utilização de um BC em um sistema de distribuição (SD) é ilustrado na Fig 2.2.



**Figura 2.2:** Comparação da Tensão  
Fonte: Adaptado de (Gönen, 2014)

A Figura 2.2 mostra que no local onde o BC é inserido ocorre um aumento na tensão de operação. Como os SD operam de forma radial, o aumento da tensão em uma barra do sistema leva a um aumento em cascata em todo o sistema.

Os capacitores disponíveis no mercado podem ser do tipo fixos ou chaveados. Os capacitores fixos são aqueles que sempre estarão ligados ao SD, já os chaveados podem ser comutados em determinados momentos do dia. A Figura 2.3 mostra uma maneira de diferenciar a utilização desses dois dispositivos.



**Figura 2.3:** Efeito de BC Fixos e Chaveados  
Fonte: Adaptado de (Gönen, 2014)

A carga consumida em um sistema elétrico varia conforme passam as horas do dia, dependendo do padrão de consumo de cada sistema. Assim, em caso de pouco consumo de energia, a utilização de BC fixos não se torna tão atrativo, visto que sua conexão à rede nesse perfil de carga pode levar a uma operação não satisfatória do sistema.

Entretanto, caso estejam conectados BC chaveados, apenas é necessário um sinal de comutação para que o BC seja desconectado da rede.

A redução de potência reativa total pelos BC acontece pelo fato de que estes são capazes de entregar potência reativa no local onde foram instalados. Assim, pode-se considerar que são fontes de geração local de potência reativa (Gönen, 2014).

A quantidade de BC à serem instalados em cada barra ou no sistema inteiro e a quantidade de barras selecionadas para receber os bancos são tratadas como restrições do problema de alocação de BC. A definição dessa quantidade e quais são as barras candidatas para alocação de BC ajuda na redução do espaço de solução do problema (Rao, Narasimham & Ramalingaraju, 2011).

## 2.3 Métodos de Solução

A alocação de BCs pode ser tratada como um problema de otimização combinatória, onde existe um conjunto finito, porém muito grande de soluções factíveis. Essas soluções contemplam tanto a quantidade quanto a localização desses dispositivos, assim, devido ao tamanho das redes de distribuição e as opções de BC, a avaliação de todas as opções se torna um processo inviável (Askarzadeh, 2016).

Os métodos exatos representam técnicas de programação numérica que podem resolver problemas de otimização combinatória, pois encontram a solução ótima global do modelo. Entretanto, em modelos muito complexos podem demandar um grande esforço computacional. Com a evolução computacional, foram surgindo métodos inteligentes capazes de encontrar soluções de boa qualidade em problemas com grande quantidade de soluções, nesse contexto, surgiram os métodos heurísticos.

Os métodos heurísticos são baseados em índices inteligentes que não realizam uma busca completa por todas as possibilidades, reduzindo o esforço computacional, melhorando assim a eficiência no processo de otimização. Porém, na utilização desse método mesmo encontrando soluções de boa qualidade há a possibilidade de não se encontrar a solução global do problema (Miloca, 2012).

Já os meta-heurísticos são uma derivação dos heurísticos, essas estratégias surgiram com a intenção de auxiliar os heurísticos que não conseguiam sair de regiões de mínimo local, pois conseguem ampliar o espaço de busca por soluções.

Os meta-heurísticos são técnicas de alta performance para avaliar os espaços de busca, uma vez que existe o equilíbrio entre a diversificação e a intensificação. A diversificação diz respeito a abrangência do espaço de busca, já a intensificação se refere a uma busca minuciosa em um curto espaço (Blum & Roli, 2003).

São métodos adaptáveis e podem ser aplicados à problemas de otimização para os quais não são conhecidos modelos analíticos de solução ou heurísticos de boa qualidade (Madhuri & Deep, 2009). São inspirados por analogias com a física, biologia, etologia, entre outros.

Possuem características distintas que possibilitam classificá-los conforme a abordagem de cada método, entre elas, algoritmos evolucionários, inspirados na natureza, de população, busca local, sem memória, etc (Madhuri & Deep, 2009).

## 2.4 Considerações Finais

A proposta deste trabalho de pesquisa é desenvolver um algoritmo computacional para auxiliar na tomada de decisão para a alocação de banco de capacitores em sistemas de distribuição, contribuindo para o planejamento de fluxo de potência reativa. Nesse sentido, neste capítulo buscou-se por apresentar aspectos relacionados com as perdas de energia, com a utilização de banco de capacitores e com algoritmos inteligentes.

Buscando entender de que forma outras pesquisas sugerem uma solução para problemas de perdas no sistema de distribuição, no próximo capítulo são citados alguns autores e suas técnicas sugeridas, assim como a evolução de métodos inteligentes para a busca da solução.



# Capítulo 3

## Estado da Arte

Neste capítulo são apresentadas pesquisas relacionadas com o tema de estudo, que foram utilizadas para entendimento e elaboração deste trabalho.

### 3.1 Revisão Bibliográfica

Um dos primeiros trabalhos na área de alocação de banco de capacitores foi o de Neagle & Samson (1956) onde os autores desenvolvem um método analítico para definir o local onde o BC será instalado. Partindo de uma relação de 70% entre a potência do BC e da carga reativa total do sistema, a melhor localização do BC é em 65% do comprimento do sistema, considerando uma distribuição uniforme de carga e um alimentador sem ramificações.

Bae (1978) apresenta uma formulação analítica para encontrar o melhor local e a potência ideal de BC. Apesar de considerar um alimentador com carga distribuída uniformemente pelo sistema, a metodologia apresentada pode ser aplicada para qualquer nível de carga, nos ramos principais ou secundários do sistema.

Willis (2004) mostra a regra dos dois terços para a alocação de múltiplos BC. A regra é fundamentada em duas equações, que definem a localização dos BC e a potência de cada um, baseadas na carga de potência reativa do alimentador e no número de BC que se pretende colocar.

Hamada, Wahab, El-Sayed & Ramadan (2008) propõem uma estratégia para a alocação de BC para sistemas de distribuição. A estratégia é baseada na alocação iterativa de capacitores para reduzir as perdas de potência ativa em cada linha do sistema. Assim, aloca-se um BC na barra mais afastada da subestação e verifica se houve uma redução nas perdas em cada linha, caso houvesse uma melhora, é inserido mais um BC na mesma barra, caso contrário, repete-se o processo para a próxima barra do sistema.

Rao et al. (2011) apresentam o algoritmo de simulação de crescimento de plantas (*Plant Growth Simulation Algorithm*) para determinar a melhor quantidade de BC para a redução nas perdas de energia. Dentro da função objetivo, os autores consideram o custo de operação anual

mais o custo de instalação, além do custo referentes as perdas de energia elétrica.

Kalantari & Kazemi (2011) utilizam uma função multiobjetivo que pondera índices de perdas de potência ativa, reativa e perfil de tensão. O algoritmo busca minimizar a função multiobjetivo com a utilização de geração distribuída e banco de capacitores.

Shuaib & Rajan (2011) utilizam um algoritmo que simula o ciclo da vida de uma abelha rainha combinado com um algoritmo genético para a criação dos herdeiros. Assim, os resultados obtidos se mostraram melhores em comparação aos resultados usando apenas o algoritmo genético.

Arcanjo, Pereira, Oliveira, Peres, De Oliveira & Da Silva (2012) utilizam um índice de sensibilidade de perdas de potência ativa que leva em consideração a matriz jacobiana do método de Newton-Raphson para o cálculo do fluxo de potência, o nível de tensão da barra candidata e as variáveis de controle. Além disso, durante o processo de otimização, esse índice é recalculado a cada iteração.

Mohapatra, Behera, Nayak & Panigrahi (2012) utilizam o algoritmo da evolução diferencial para minimizar apenas as perdas por efeito joule do sistema. As autoras realizam testes mudando o local de maior concentração de carga. Como resultado, alcançam uma redução nas perdas do sistema, mostrando que a barra com maior carga do sistema é uma boa candidata a receber os BC.

El-Fergany (2013) realiza uma comparação entre um índice de perdas e um fator de sensibilidade de perdas para o processo de alocação. Também define valores máximos e mínimos de potência reativa de cada banco, discretizados em um determinado passo. Ainda como restrições, coloca que a potência reativa total alocada não pode passar de 75% da carga reativa total do sistema.

El-Fergany & Abdelaziz (2014) consideram que a compensação total no sistema não pode ser maior que a carga reativa total do sistema. Também é adotado, como restrição, o valor do fator de potência na subestação, respeitando valores mínimos e máximos. Os autores realizaram testes para definir a quantidade de barras a serem selecionadas para o processo de solução, variando conforme o tamanho do sistema.

Gönen (2014) apresenta a seguinte regra para definir a potência dos BC: a quantidade máxima de BC instalados deve ser aquela que faça a tensão no pico de consumo subir em 50%. E a localização deve ser a dois terços do comprimento do alimentador.

Prasad Reddy P & Gunaprasad (2014) trabalham com a alocação de BC para maximizar a economia no custo das perdas de potência de pico e perdas de energia, com um baixo valor para investimento em BC. Para isso, utiliza o algoritmo de busca Cuckoo para apresentar o melhor valor encontrado.

Shuaib, Kalavathi & Rajan (2015) utilizam o algoritmo da busca gravitacional para reduzir as perdas de potência ativa, junto com o custo de instalação de cada BC utilizado. Nesse

trabalho, o método para o cálculo do fluxo de potência é baseado apenas nas variáveis de potência ativa e reativa na barra, o módulo e ângulo da tensão da barra que está enviando a energia e a impedância da linha que liga as duas barras.

Dixit, Kundu & Jariwala (2016) utilizam um algoritmo PSO para a alocação de BC, com o objetivo de minimizar o custo de operação, referente as perdas de potencia ativa, mais o custo de investimento, referente ao custo dos BC. Entretanto, o algoritmo PSO foi adaptado para encontrar uma quantidade inteira de BC instalados no sistema, e isso foi feito através da construção de uma faixa de valores para relacionar o número real encontrado pelo algoritmo e o número inteiro de BC disponíveis.

Diab, Tolba & Tulsy (2017) mostram uma combinação entre o algoritmo de exame de partículas com o da busca gravitacional, implementando um algoritmo híbrido. A ideia deste novo algoritmo é que ambos vão trabalhar em conjunto, combinando a capacidade de aprendizagem social do enxame de partículas com a capacidade de busca local do gravitacional.

Neagu, Ivanov & Gavrilas (2017) consideram que a compensação total em cada barra não pode ser maior que a carga reativa na mesma barra. Além disso, consideram que a potência reativa não pode fluir em direção a subestação.

Abd Elazim & Ali (2018) apresentam o algoritmo da explosão de minas para tentar solucionar o problema da alocação de BC. Dentro da função objetivo os autores consideram, além do custo das perdas, três parâmetros para considerar o custo dos BC: o custo da instalação, custo por potência reativa injetada e custo de operação. Com essas considerações, conseguiram alcançar uma economia no custo total do sistema, com redução nas perdas de energia.

Mujezinović, Turković, Dautbašić, Dedović & Turković (2019) levam em consideração, na função objetivo, o custo das perdas de potência ativa mais os custos com instalação e manutenção dos BC. Utilizando um algoritmo genético inteiro, aplicaram a metodologia para um sistema de distribuição real na Bósnia, alcançando uma economia no custo de operação anual.

Sudabattula, Suresh, Subramaniam, Almakhles, Padmanaban, Leonowicz & Iqbal (2019) utilizam uma função multiobjetivo que considera a redução das perdas de potência ativa, um índice de desvio de tensão e o custo de operação. Essa função foi minimizada com um algoritmo de otimização, levando em conta a alocação de múltiplas unidades de geração distribuída e banco de capacitores.

## 3.2 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas pesquisas correlatas, que apresentam modelos matemáticos, restrições e técnicas de solução de problemas de alocação de banco de capacitores.

Foi possível perceber que as pesquisas recentes dentro dessa temática utilizam algoritmos inteligentes para resolver o problema, possivelmente por tratar-se de um problema de otimização combinatória com um grande número de soluções, não sendo viável escrever um algoritmo que avalie todas as possibilidades.

Com base nestas pesquisas foi definido um modelo matemático e desenvolveu-se uma codificação, em que se adaptou um algoritmo inteligente para trabalhar no problema da alocação de BC, que serão apresentados no próximo capítulo.

# Capítulo 4

## Formulação do Problema

O presente capítulo tem como objetivo apresentar o modelo matemático utilizado, a técnica meta-heurística para minimização da função objetivo, a adaptação da técnica para solução de variáveis inteiras, e a ilustração do funcionamento do algoritmo em um sistema exemplo.

### 4.1 Modelo Matemático para Alocação de BC

O modelo matemático é baseado no fluxo de potência ótimo em sistemas elétricos, com o objetivo de reduzir as perdas de potência ativa dentro do sistema.

$$\min Z = K_P P_T + \sum_{i=1}^{N_B} K_{c_i} Q_{c_i} \quad (4.1)$$

s.a.

$$-dp_i = \sum_{j=1}^N P_{i,j} + P_{j,i} \quad i \in N \quad (4.2)$$

$$-dq_i + N_{c_k} * Q_B = \sum_{j=1}^N Q_{i,j} + Q_{j,i} \quad i \in N, k \in N_B \quad (4.3)$$

$$P_{i,j} = V_i^2 g_{i,j} - V_i V_j g_{i,j} * \cos(\theta_i - \theta_j) - V_i V_j b_{i,j} * \sen(\theta_i - \theta_j) \quad (4.4)$$

$$Q_{i,j} = -V_i^2 b_{i,j} - V_i V_j g_{i,j} * \cos(\theta_i - \theta_j) + V_i V_j b_{i,j} * \sen(\theta_i - \theta_j) \quad (4.5)$$

$$S_{i,j} \leq S_{MAX} \quad (4.6)$$

$$V_{MIN} \leq V_i \leq V_{MAX} \quad (4.7)$$

$$Q^{sub} \geq 0 \quad (4.8)$$

$$FP_{sistema} \geq FP_{MIN} \quad (4.9)$$

A primeira equação representa a função que tem como objetivo a minimização de dois termos de custo, o primeiro deles está relacionado com a operação do sistema, buscando-se

minimizar os custos com as perdas de potência ativa, já o segundo diz respeito ao investimento de equipamentos, buscando-se minimizar o custo com a instalação de BC. Na equação,  $K_P$  (\$/kW) e  $K_{C_i}$  (\$/kvar) representam o custo pela perda de potência ativa no sistema e o custo pela instalação do banco de capacitores na barra  $i$ ,  $P_T$  (kW) representa o valor total de perdas de potência ativa,  $Q_{C_i}$  (kvar) representa a potência reativa do BC instalado na barra  $i$ , e  $N_B$  representa o conjunto de barras do sistema que tem BC ligados a elas.

A função objetivo está sujeita a um conjunto de restrições de igualdade e desigualdade. Dentro das restrições de igualdade, (4.2) e (4.3) representam o balanço de potência ativa e reativa do sistema, em que  $dp_i$  e  $dq_i$  representam as demandas de potência ativa e reativa na barra  $i$  respectivamente,  $P_{i,j}$  e  $Q_{i,j}$  representam o fluxo de potência ativa e reativa que fluem da barra  $i$  para a barra  $j$ , respectivamente,  $N_{C_k}$  representa o número de BC instalados na barra  $k$  e  $Q_B$  indica a potência reativa de cada BC.

As expressões (4.4) e (4.5) representam as equações do fluxo de potência ativa e reativa na linha, respectivamente,  $V_i$  e  $\theta_i$  representam o módulo e o ângulo da tensão na barra  $i$  e  $g_{i,j}$  e  $b_{i,j}$  representam a condutância e a susceptância da linha que liga a barra  $i$  a barra  $j$ .

Com relação as restrições de desigualdade, (4.6) representa o limite de potência aparente na linha, que não pode exceder um valor máximo e (4.7) indica os limites mínimos e máximos do nível de tensão nas barras. As restrições (4.8) e (4.9) referem-se as condições operativas na subestação, onde a primeira mostra que o fluxo de potência reativa fluindo da subestação deve ser maior que zero, ou seja, a subestação deve apenas fornecer potência reativa e não absorver do sistema, e a segunda indica que o fator de potência da energia entregue na subestação deve ser maior que um valor mínimo.

Definir as barras candidatas a receber os bancos de capacitores alivia consideravelmente o processo de otimização, tendo em vista que dessa forma reduz-se o espaço de busca de solução (El-Fergany, 2013). A definição de quais barras do sistema são candidatas a inserção de BC é guiada por dois indicadores apresentados a seguir (Rao et al., 2011).

$$FSP_i = \frac{2Q_{i,j}r_{i,j}}{V_i^2} \quad (4.10)$$

$$Norm_i = \frac{V_i}{0,95} \quad (4.11)$$

A equação (4.10) indica o Fator de Sensibilidade de Perdas na barra  $i$  ( $FSP_i$ ), em que  $r_{i,j}$  representa a resistência da linha que liga a barra  $i$  à barra  $j$ , e (4.11) representa um vetor que normaliza os valores de tensão nas barras. Ambas equações representam os critérios utilizados para a seleção das barras candidatas à instalação de BC. Primeiramente, o fator de sensibilidade de perdas (FSP) é calculado e ordenado de maneira decrescente, então, são selecionadas as barras cujo vetor de normalização correspondente seja menor que 1,01. Esse valor foi definido para que as barras com tensões menores que 0,95 [p.u.] sejam escolhidas como candidatas.

## 4.2 Método de Solução do Fluxo de Potência

Para verificar as restrições de (4.2) à (4.5) foi utilizado o método de varredura *Backward Forward Sweep* (BFS) para o cálculo do fluxo de potência em sistemas radiais. Os passos desta solução são apresentados a seguir.

### 1. Corrente de Carga

Primeiramente são calculadas as correntes drenadas por toda a carga conectada a cada barra do sistema, que pode ser visualizado na indicação  $I_C$  da Figura 4.1, considerando inicialmente as tensões de barra em 1 [p.u.].

$$I r_k = \frac{P_k * V r_k + Q_k * V i_k}{V r_k^2 + V i_k^2} \quad (4.12)$$

$$I i_k = \frac{P_k * V i_k - Q_k * V r_k}{V r_k^2 + V i_k^2} \quad (4.13)$$

Sendo:  $P_k$  e  $Q_k$  as potências ativa e reativa na barra  $k$ ,  $V r_k$  e  $V i_k$  a parte real e imaginária da tensão na barra  $k$  e  $I r_k$  e  $I i_k$  a parte real e imaginária da corrente na barra  $k$ .

### 2. Corrente de Linha

Com as correntes de carga, são calculadas as correntes de linha, tanto a parte real quanto a imaginária, ilustradas por  $I_L$  na Figura 4.1, considerando toda a carga e todas as linhas supridas pela linha.

$$I_{m,k} = I_k + \sum_{i \in N_k} I_{k,i} \quad (4.14)$$

Sendo:  $I_{m,k}$  a corrente na linha  $m, k$ ,  $I_k$  a corrente na barra  $k$  e  $N_k$  o conjunto de linhas conectadas a barra  $k$ .

### 3. Tensão nas Barras

Com as correntes de linha, são calculadas as quedas de tensão nas linhas do sistema, indicadas por  $\Delta V$  na Figura 4.1. O processo inicia-se desde a subestação até as últimas barras do sistema, encontrando assim os novos valores de tensões nas barras.

$$V r_m = V r_k - r_{k,m} * I r_{k,m} + x_{k,m} * I i_{k,m} \quad (4.15)$$

$$V i_m = V i_k - r_{k,m} * I i_{k,m} - x_{k,m} * I r_{k,m} \quad (4.16)$$

Sendo:  $r_{k,m}$  e  $x_{k,m}$  a resistência e a reatância da linha que conecta as barras  $k$  e  $m$ .

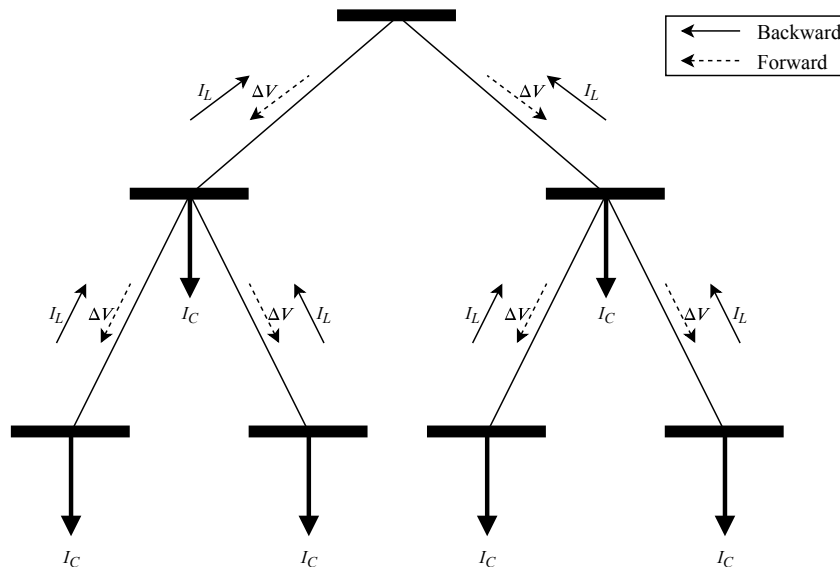
#### 4. Perdas no Sistema

Com as correntes de carga, são calculadas as perdas de potência no sistema, finalizando assim uma iteração do método. O processo se repete até que a variação das perdas de uma iteração a outra não seja maior que a tolerância estabelecida.

$$P_T = \sum_{k,m \in N} r_{k,m} * (I r_{k,m}^2 + I i_{k,m}^2) \quad (4.17)$$

$$\Delta P = P_{T_{i+1}} - P_{T_i} \leq \varepsilon \quad (4.18)$$

Sendo:  $P_T$  o total de perdas de potência ativa no sistema,  $\Delta P$  a variação das perdas de potência ativa,  $P_{T_i}$  as perdas de potência ativa na iteração  $i$  e  $\varepsilon$  a tolerância definida.



**Figura 4.1:** Método Varredura  
Fonte: Autor.

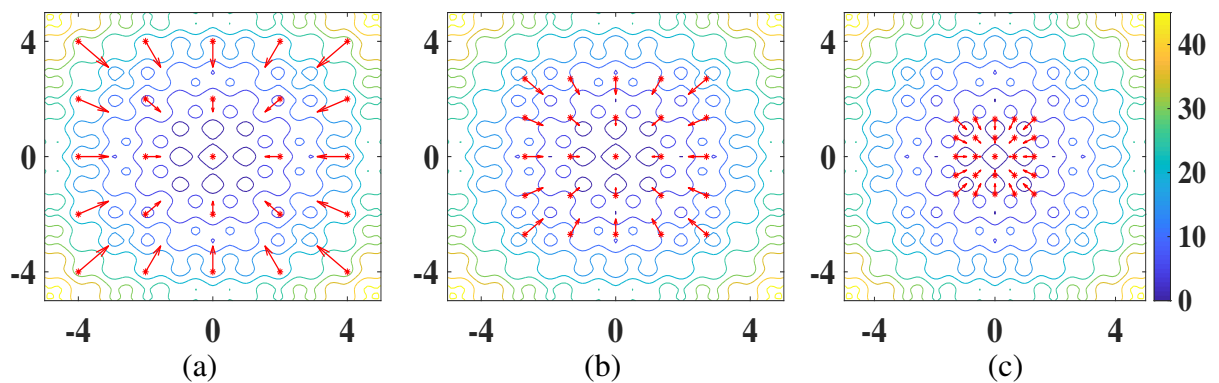
### 4.3 Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas

Na natureza, é possível observar que algumas famílias de animais conseguem se movimentar em trajetórias complexas de maneira dinâmica, organizada e coordenada, apenas entendendo e conhecendo a posição e a velocidade dos seus companheiros (Dréo, Pétrowski, Siarry & Taillard, 2003).

A técnica utilizada no algoritmo proposto se baseia justamente no comportamento social e coletivo observado em rebanhos de animais, ou seja, busca a solução para problemas de otimização baseando-se no movimento de partículas dentro de um enxame (Kennedy & Eberhart, 1995).



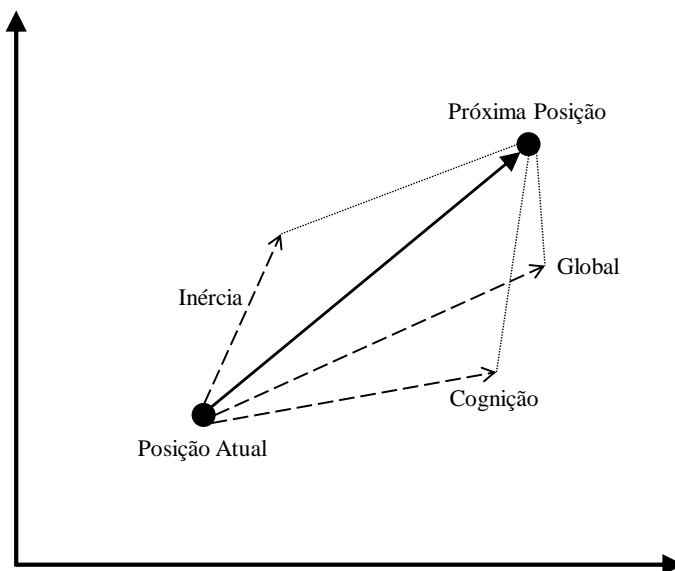
A Figura 4.2 ilustra, didaticamente, o movimento das partículas durante o processo de otimização. Desde o momento inicial do algoritmo, onde cada integrante (partícula) do enxame é posicionada dentro do espaço de solução, até o momento onde estreitam a busca em uma região de valores mais interessante. Assim, conforme as indicações das setas na figura, as partículas se movimentam dentro do espaço em busca dos melhores pontos que satisfaçam o objetivo da otimização.



**Figura 4.2:** Movimento das Partículas

Fonte: Autor

Cada partícula é posicionada de maneira aleatória no espaço de solução, espaço esse definido pelo número de barras do sistema. Assim, a cada iteração, as partículas do enxame se movimentam dentro do espaço de solução, buscando a melhor posição possível. O movimento da partícula é ilustrado na Figura 4.3.



**Figura 4.3:** Atualização da Posição da Partícula

Fonte: Adaptado de (Yoshida, Kawata, Fukuyama, Takayama & Nakanishi, 2000).

A Figura 4.3 mostra que o movimento da partícula depende de três elementos: o termo de inércia, que quantifica a tendência da partícula em não mudar de direção, ou seja, manter o seu próprio movimento, o termo cognitivo, que quantifica a tendência da partícula em seguir para o melhor caminho que ela já encontrou, e o termo de aprendizado social, que quantifica a tendência da partícula em seguir para o melhor caminho que o enxame todo já encontrou, ou seja, a melhor posição encontrada. A posição de cada partícula e a velocidade com que ela se move são representadas através das expressões (4.19) e (4.20).

$$v_p^{i+1} = wv_p^i + c1 * rand * (p_p^{best} - p_p^i) + c2 * rand * (g_{best} - p_p^i) \quad (4.19)$$

$$p_p^{i+1} = p_p^i + v_p^{i+1} \quad (4.20)$$

Em (4.19) e (4.20):  $v_p^i$  é a velocidade da partícula  $p$  na iteração  $i$ ,  $w$  é o índice de inércia da partícula,  $c1$  é o índice de aprendizagem da própria partícula,  $p_p^{best}$  é a melhor posição por onde a partícula  $p$  já esteve,  $p_p^i$  é a posição da partícula  $p$  na iteração  $i$ ,  $c2$  é o índice de aprendizado global da partícula e  $g_{best}$  é a melhor posição que qualquer partícula já esteve. Para o desenvolvimento do algoritmo, foi implementado uma equação de melhoria para o índice de inércia, indicada em (4.21).

$$w_{iter} = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} * iter \quad (4.21)$$

Na equação acima,  $w_{iter}$  representa o índice de inércia da partícula na iteração  $iter$ ,  $w_{min}$  e  $w_{max}$  representam os valores mínimos e máximos que o índice pode ter,  $iter_{max}$  é o número máximo de iterações, e  $iter$  a iteração atual. A equação de melhoria é inserida no algoritmo para melhorar a performance no processo de otimização (Shi & Eberhart, 1998).

O PSO foi desenhado para resolver problemas com variáveis contínuas, porém, o objetivo deste problema é estabelecer o número de BC que serão conectados em cada barra. Assim, foi preciso adaptar o algoritmo, para que ele conseguisse trabalhar com variáveis discretas. Os autores Kennedy & Eberhart (1997) que inicialmente desenvolveram o PSO, apresentam também uma maneira para discretizar variáveis em algoritmos PSO, que se baseia na formulação apresentada a seguir

$$v_p^{i+1} = wv_p^i + c1 * (p_p^{best} - p_p^i) + c2 * (g_{best} - p_p^i) \quad (4.22)$$

$$f = \frac{1}{1 + e^{-v_p^{i+1}}} \quad (4.23)$$

$$p_p^{i+1} = \begin{cases} 1, & f \geq rand \\ 0, & f < rand \end{cases} \quad (4.24)$$

A expressão (4.22) é modificada de (4.19) retirando o número aleatório, que será utilizado em outro momento. A equação (4.23) é a Função Sigmóide responsável por estabelecer a velocidade das partículas em valores entre 0 e 1, com isso, a equação (4.24) realiza um sorteio para determinar o nível lógico que representa aquela velocidade. A relação dessa codificação com o vetor de posições de cada partícula é ilustrado abaixo.

$$n \begin{bmatrix} B_1 & B_2 & B_3 & \dots & B_N \\ 1 & 2 & 3 & \dots & N_{MAX} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{matrix} \\ Bit_1 \\ Bit_2 \\ \vdots \\ Bit_N \end{matrix} \begin{bmatrix} B_1 & B_2 & B_3 & \dots & B_N \\ 1 & 0 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

A equação (4.25) mostra que cada posição da partícula passa a ser representada por um vetor binário, para se poder utilizar variáveis inteiras em problemas discretos de otimização. Além disso, a velocidade da posição de cada partícula também é representada por um vetor, com isso, as expressões (4.23) e (4.24) são utilizadas para cada elemento das, agora, matrizes de posição e velocidade.

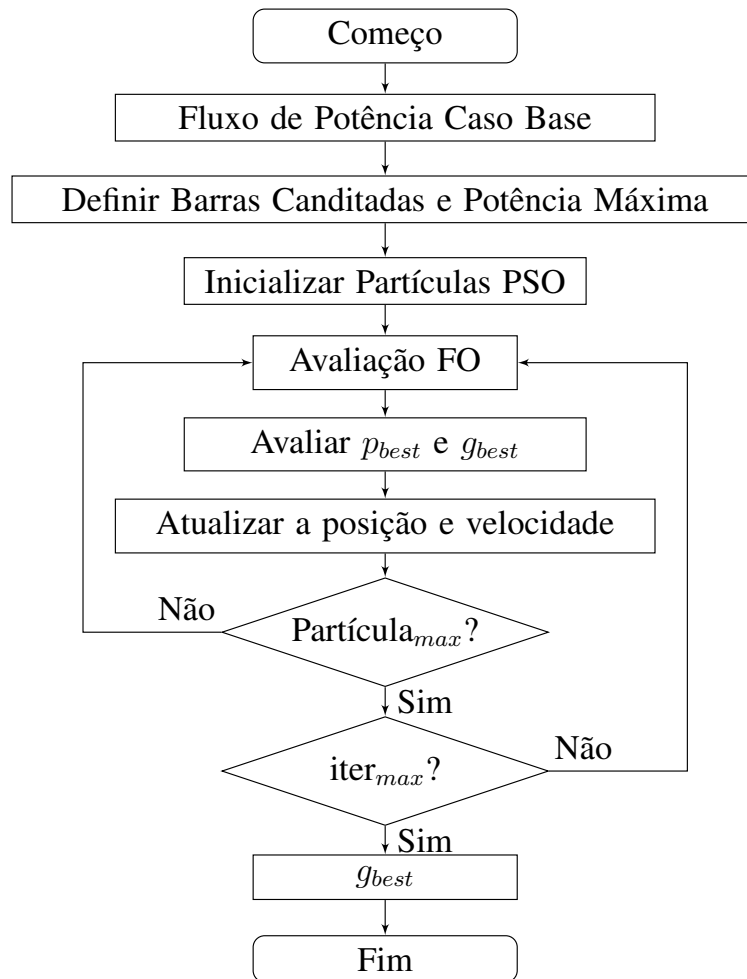
O tamanho do vetor binário utilizado na codificação dependerá do número máximo de BC que poderão ser inseridos em cada barra do sistema.

O algoritmo implementado considerando esta técnica procura representar o problema através do modelo descrito anteriormente, para buscar os melhores locais para a instalação de BC.

## 4.4 Demonstração do Funcionamento

Um diagrama esquemático com as etapas do funcionamento do algoritmo é ilustrado na Figura 4.4. Esta figura ilustra o processo de execução do algoritmo. Inicialmente, é realizado o cálculo do fluxo de potência para o caso base, ou seja, considerando que não há BC instalados no sistema. Com os resultados, são definidos a partir das equações (4.10) e (4.11) quais são as barras candidatas a receberem BC e a potência máxima que cada barra pode receber, sendo que essa potência não pode ser maior que a carga total de potência reativa do sistema. Esses valores são necessários para definir as dimensões da matriz de posição binária.

A posição de cada partícula é utilizada para a avaliação da função objetivo, com isso, esses valores são comparados com as melhores posições que cada partícula já esteve, e com a melhor posição que o enxame inteiro já esteve, se essas posições levarem a um melhor valor da função objetivo, são armazenadas. As melhores posições de cada partícula são utilizadas na equação (4.19) para atualização da velocidade de cada partícula.



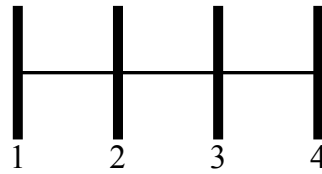
**Figura 4.4:** Fluxograma do Algoritmo  
Fonte: Autor.

Com isso, esse processo continua para todas as partículas do enxame, terminando assim uma execução do processo iterativo. O algoritmo continua até que o número máximo de iterações seja alcançado, e a melhor posição que o enxame todo já esteve é a solução do algoritmo.

Além disso, as restrições de desigualdade do problema foram implementadas como penalização da função objetivo, ou seja, caso as restrições fossem violadas, um alto valor seria adicionado ao valor final. Assim, o algoritmo de otimização não leva em consideração as soluções que violam as restrições.

## 4.5 Sistema de Ilustração

Para ilustrar o funcionamento do algoritmo é apresentado um sistema exemplo de 4 barras, de configuração representada através da Figura 4.5 e com dados na Tabela 4.1.



**Figura 4.5:** Sistema Teste 4 Barras

Fonte: Adaptado de (Carvalho, Belati & Costa, 2005).

**Tabela 4.1:** Sistema de 4 Barras

Dados de Linha				Dados de Barra		
Barra De	Barra Para	r (p.u.)	x (p.u.)	Barra	P (p.u.)	Q (p.u.)
01	02	0,0236	0,0233	01	0	0
02	03	0,0003	0,0002	02	1,28	1,28
03	04	0,0051	0,0005	03	0,36	0,16
				04	1,60	0,80

Fonte: (Carvalho et al., 2005)

Para o algoritmo, são utilizados 5 partículas e 10 iterações, com as seguintes variáveis:  $w_{max} = 0,9$ ,  $w_{min} = 0,4$ ,  $c1 = 0,8$  e  $c2 = 0,8$ . O BC utilizado para essa simulação foi de  $Q_B = 0,15$  [p.u.] e o custo das perdas  $K_P = 10.000$  \$/[p.u.]. Para o caso sem adição de BC, o valor da função objetivo é de \$ 5.314,71. A inicialização das partículas é apresentada na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2:** Primeira Iteração

	$B_2$	$B_3$	$B_4$		$B_2$	$B_3$	$B_4$	Função Objetivo (\$)	Atualização		
$P_1$	0000	0000	0001	→	$P_1$	0	0	1	5.096,27	$p_{best}$	-
$P_2$	0001	0000	0001		$P_2$	1	0	1	4.920,85	$p_{best}$	-
$P_3$	0001	0001	0001		$P_3$	1	1	1	4.764,57	$p_{best}$	$g_{best}$
$P_4$	0000	0000	0001		$P_4$	0	0	1	5.096,27	$p_{best}$	-
$P_5$	0000	0001	0000		$P_5$	0	1	1	5.116,19	$p_{best}$	-

Fonte: Autor

A inicialização das partículas é feita de maneira aleatória, considerando apenas a alocação de um banco por barra. Com isso, a função objetivo apresentou valores menores que o caso base em todas as partículas. Assim, seus melhores valores locais e o global do enxame foram atualizados. Com a atualização, os novos valores de posição das partículas são apresentados na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3:** Segunda Iteração

	$B_2$	$B_3$	$B_4$		$B_2$	$B_3$	$B_4$	Função Objetivo (\$)	Atualização		
$P_1$	0110	1111	1111	→	$P_1$	6	15	15	1.005.744	-	-
$P_2$	0011	1011	1010		$P_2$	3	11	10	1.004.155	-	-
$P_3$	1110	1100	1011		$P_3$	14	12	11	1.006.367	-	-
$P_4$	1111	1110	1111		$P_4$	15	14	15	1.007.658	-	-
$P_5$	1011	0001	0010		$P_5$	11	1	2	3.643,08	$p_{best}$	$g_{best}$

Fonte: Autor

Nesse caso, as quatro primeiras partículas receberam uma penalização na função objetivo, por terem violado alguma restrição do problema, explicando assim seus valores muito maiores que o caso base. Já a última partícula obteve um menor valor, atualizando assim, seu melhor valor local e o melhor global do enxame. Assim, o algoritmo segue para mais uma iteração, ilustrada na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4:** Terceira Iteração

	$B_2$	$B_3$	$B_4$		$B_2$	$B_3$	$B_4$	Função Objetivo (\$)	Atualização		
$P_1$	0011	0101	1100	→	$P_1$	3	5	12	1.003.868	-	-
$P_2$	0011	1111	1100		$P_2$	3	15	12	1.004.827	-	-
$P_3$	0000	0111	0101		$P_3$	0	7	5	3.689,91	$p_{best}$	-
$P_4$	1000	1010	1111		$P_4$	8	10	15	1.005.363	-	-
$P_5$	1001	0101	1101		$P_5$	9	5	13	1.004.660	-	-

Fonte: Autor

Na terceira iteração houve apenas uma partícula, a terceira, que obteve um melhor valor da função objetivo, porém, esse valor é menor apenas que o menor valor que a própria partícula já esteve, não sendo melhor que o menor valor do enxame. Os resultados obtidos para a quarta iteração são mostrados na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5:** Quarta Iteração

	$B_2$	$B_3$	$B_4$		$B_2$	$B_3$	$B_4$	Função Objetivo (\$)	Atualização		
$P_1$	1001	1100	0100	→	$P_1$	9	12	4	1.004.214	-	-
$P_2$	0010	0101	0110		$P_2$	2	5	6	3.651,10	$p_{best}$	-
$P_3$	0010	1011	0000		$P_3$	2	11	0	3.645,92	$p_{best}$	-
$P_4$	0010	0000	1000		$P_4$	2	0	8	3.719,66	$p_{best}$	-
$P_5$	1011	0001	0110		$P_5$	11	1	6	1.003.639	-	-

Fonte: Autor

Na quarta iteração, as partículas 2, 3 e 4 melhoraram apenas seu melhores valores. Na quinta e sexta iteração, nenhuma das partículas obteve melhoras na função objetivo. Já os resultados da sétima iteração são mostrados na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6:** Sétima Iteração

	$B_2$	$B_3$	$B_4$		$B_2$	$B_3$	$B_4$	Função Objetivo (\$)	Atualização		
$P_1$	0100	0001	1011	→	$P_1$	4	1	11	3.661,43	$p_{best}$	-
$P_2$	1101	0010	0010		$P_2$	13	2	2	1.003.699	-	-
$P_3$	1100	0010	0110		$P_3$	12	2	6	1.003.729	-	-
$P_4$	0010	1010	0011		$P_4$	2	10	3	3.625.82	$p_{best}$	$g_{best}$
$P_5$	1000	1000	0111		$P_5$	8	8	7	1.003.951	-	-

Fonte: Autor

Nessa iteração as partículas 1 e 4 melhoraram seus menores valores e esta última melhorou o menor valor que o enxame já encontrou. Dessa maneira, o algoritmo segue sem mudanças na oitava e nona iteração. Na ultima iteração, os resultados alcançados são apresentados na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7:** Décima Iteração

	$B_2$	$B_3$	$B_4$		$B_2$	$B_3$	$B_4$	Função Objetivo (\$)	Atualização		
$P_1$	1110	0000	0010	→	$P_1$	14	0	2	3.567,13	$p_{best}$	$g_{best}$
$P_2$	0000	1000	1110		$P_2$	0	8	14	1.003.939	-	-
$P_3$	0011	1100	0001		$P_3$	3	12	1	3.640,67	$p_{best}$	-
$P_4$	1001	0110	0011		$P_4$	9	6	3	1.003.647	-	-
$P_5$	0101	1111	0011		$P_5$	5	15	3	1.003.935	-	-

Fonte: Autor

Na décima iteração as partículas 1 e 3 melhoraram seus menores valores e a primeira melhorou o menor valor do enxame, finalizando assim o algoritmo. Como resultado, a função objetivo apresentou o valor de \$ 3.567,13 com a alocação de 14 e 2 bancos nas barras 2 e 4, respectivamente.

## 4.6 Considerações Finais

A técnica de otimização PSO foi utilizada devido ao fato de que sua implementação é facilitada pelo algoritmo conter apenas duas equações para modelar o movimento das partículas. Além disso, apresentam apenas três índices de ajuste para intensificação e diversidade de busca, fato que auxilia nas simulações.

Como o PSO, em sua essência, foi desenvolvido para trabalhar com variáveis reais, foi necessário adaptá-lo para otimizar problemas com variáveis inteiras. Nessa adaptação, cada posição das partículas do algoritmo foram modeladas como vetores binários.

No próximo capítulo são apresentados os sistemas utilizados para teste e validação do algoritmo proposto, assim como os resultados obtidos com sua aplicação e discussões sobre a codificação adotada.





# Capítulo 5

## Testes e Resultados

O algoritmo proposto foi avaliado em sistemas testes presentes na literatura, e os resultados comparados com os obtidos por outros autores. Em todos os casos, foram usadas 15 partículas, 100 iterações,  $K_P = 168$  \$/kW e a barra da subestação foi escolhida como referência de tensão do sistema com valor de  $1\angle 0^\circ$  [p.u.]. Para a execução, foi utilizada a linguagem C e o compilador DevC++, empregando a técnica de alocação dinâmica.

A Tabela 5.1 mostra os BC disponíveis que foram considerados neste trabalho. A potência base foi definida como 150 kvar, pois esse é um valor proporcional a todos os BC disponíveis. O algoritmo foi escrito de maneira que primeiramente fossem utilizados os BC com as melhores relações custo-benefício, ou seja, os menores valores da quinta coluna da Tabela 5.1.

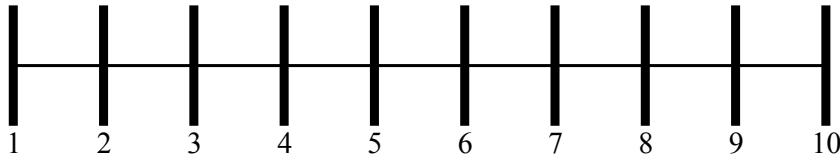
**Tabela 5.1:** Capacitores Disponíveis

Quantidade	Potência Base (kvar)	Potência Total (kvar)	Custo (\$)	Relação (\$/kvar)
8	150	1.200	204	1,7
6	150	900	165	1,833
4	150	600	132	2,2
3	150	450	114	2,533
2	150	300	97,5	3,25
1	150	150	75	5

Fonte: Adaptado de (Rao et al., 2011)

### 5.1 Sistema de 10 Barras

O sistema de 10 barras opera em 23 kV e tem carga total de 12.368 kW e 4.186 kvar. Os dados do sistema estão disponíveis na Tabela A.1 do anexo A e em (Hamada et al., 2008). A Figura 5.1 ilustra a configuração do sistema.



**Figura 5.1:** Configuração do Sistema de 10 Barras

Fonte: Adaptado de (Hamada et al., 2008)

A Tabela 5.2 mostra uma comparação entre o caso base, onde não há BC instalados, os resultados obtidos por Dixit et al. (2016) e Hamada et al. (2008) e os encontrados nesse trabalho. É possível notar que houve uma redução em 13,25% nas perdas de potência ativa, diminuindo-as em 103,84 kW. Além disso, a potência reativa total mostra que não é necessária uma grande quantidade de BC, mas que essa quantidade deve estar aliada a escolha inteligente das barras para instalação.

**Tabela 5.2:** Comparação dos Resultados Obtidos

	Caso Base	(Dixit et al., 2016)	(Hamada et al., 2008)	PSO Discreto
Perda (kW)	783,78	703,97	684	679,94
Custo de Operação (\$)	131.674,9	118.226,96	114.912	114.229,72
Total Reativo (kvar)	0	2.850	5.400	4.950
Custo de Instalação (\$)	0	588	1.199,4	949
Custo Total (\$)	131.674,9	118.854,96	116.111,4	115.178,70
$V_{\text{MIN}}$	0,838	0,873	0,9	0,880
$V_{\text{MAX}}$	0,993	0,995	-	0,997

Fonte: Autor

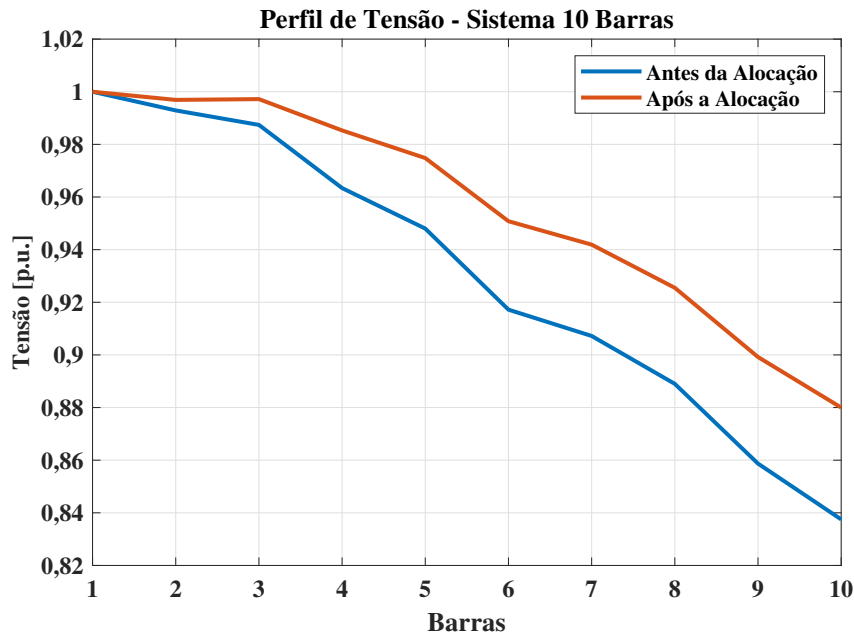
A Tabela 5.3 mostra uma comparação entre trabalhos que utilizaram técnicas PSO, os autores Elsheikh, Helmy, Abouelseoud & Elsherif (2014) utilizaram uma combinação de capacitores disponíveis e uma variável binária, já os autores Prakash & Sydulu (2007) consideraram que os BC podem fornecer qualquer valor de potência reativa dentre valores mínimos e máximos. Ao comparar os resultados encontrados em cada pesquisa, observa-se que a codificação utilizada nesse trabalho resultou na maior redução de perdas de potência ativa, demonstrando a eficiência do algoritmo para a solução do problema.

**Tabela 5.3:** Comparação entre Técnicas PSO

	Caso Base	(Elsheikh et al., 2014)	(Prakash & Sydulu, 2007)	PSO Discreto
Perda (kW)	783,78	701,2	696,21	679,94
Total Reativo (kvar)	0	6.000	3.186	4.950

Fonte: Autor

A Figura 5.2 apresenta uma comparação entre os níveis de tensão no sistema antes e depois da alocação de BC. Pode ser observado que a alocação de BC, além de reduzir as perdas de potência ativa, leva a uma melhoria no perfil de tensão na rede, o que significa um melhor ponto de operação para o sistema.



**Figura 5.2:** Perfil de Tensão - Sistema de 10 Barras

Fonte: Autor.

A Tabela 5.4 mostra as barras que foram selecionadas para o processo de otimização, bem como a quantidade que foi alocada e sua configuração além do custo da instalação no sistema 10 barras.

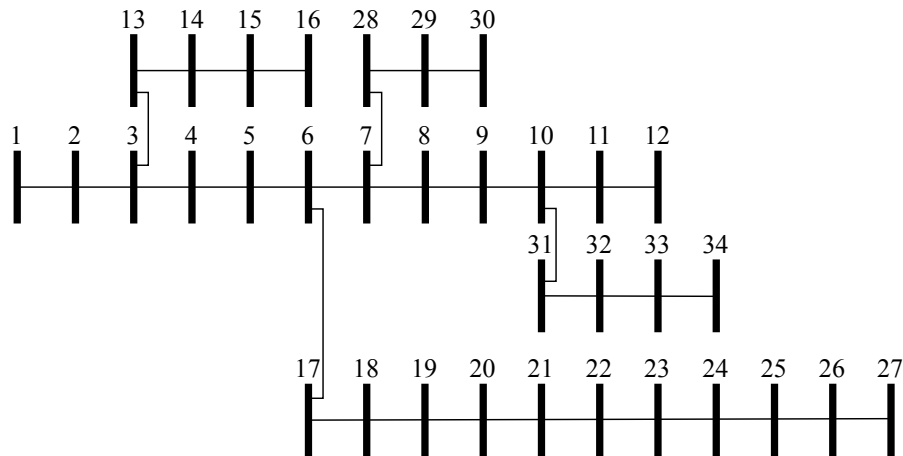
**Tabela 5.4:** Alocação dos BC para o Sistema de 10 Barras

Barra	Quantidade	Configuração dos Bancos	Custo (\$)
B04	8	8	204
B05	14	8 + 6	369
B06	8	8	204
B09	2	2	97,5
B10	1	1	75

Fonte: Autor

## 5.2 Sistema de 34 Barras

O sistema de 34 barras opera em 11 kV e tem carga total de 4.636,5 kW e 2.873,5 kvar. Os dados do sistema estão disponíveis na Tabela A.2 do anexo A e em (Hamada et al., 2008). A configuração do sistema é ilustrada na Figura 5.3.



**Figura 5.3:** Configuração do Sistema de 34 Barras  
Fonte: Adaptado de (Hamada et al., 2008)

A Tabela 5.5 mostra uma comparação entre o caso base, onde não há BC instalados, os resultados obtidos por (Dixit et al., 2016) e (Hamada et al., 2008) e os encontrados nesse trabalho. Já a Tabela 5.6 apresenta uma comparação entre técnicas PSO, onde os autores Gholinezhad, Noroozian & Bagheri (2017) definem que a posição de cada partícula é especificada entre um valor mínimo e máximo de potência reativa, com um determinado passo.

**Tabela 5.5:** Comparação dos Resultados Obtidos

	Caso Base	(Dixit et al., 2016)	(Hamada et al., 2008)	PSO Discreto
Perda (kW)	221,72	168,37	158	160,60
Custo de Operação (\$)	37.249,19	28.286,16	26.544	26.979,69
Total Reativo (kvar)	0	1950	3000	2400
Custo de Instalação (\$)	0	521,7	1.365	525
Custo Total (\$)	37.249,19	28.807,86	27.909	27.504,69
$V_{MIN}$	0,9417	0,9502	0,951	0,9506
$V_{MAX}$	0,9941	0,9950	-	0,9952

Fonte: Autor

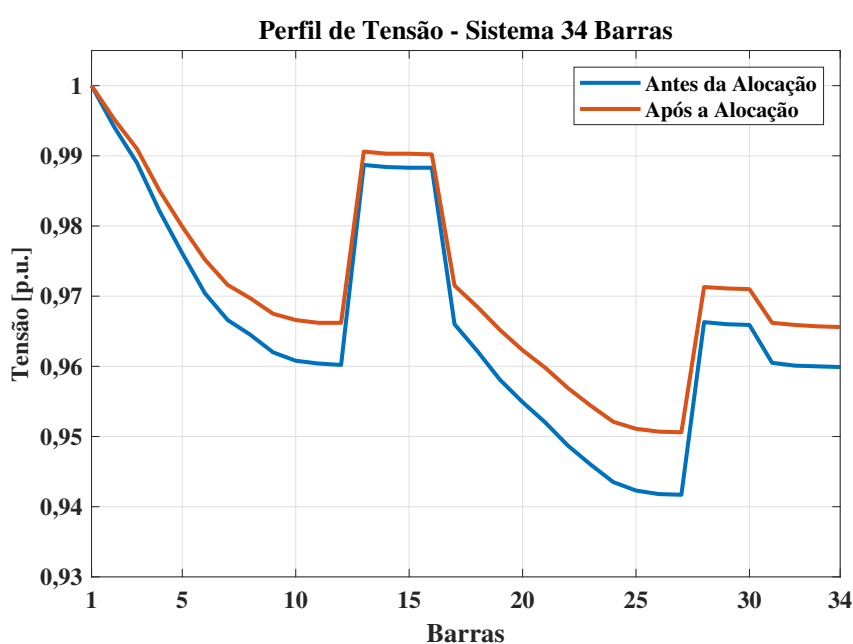
**Tabela 5.6:** Comparação entre Técnicas PSO

	Caso Base	(Elsheikh et al., 2014)	(Gholinezhad et al., 2017)	PSO Discreto
Perda (kW)	221,72	163,3	161,98	160,60
Total Reativo (kvar)	0	1.950	2.050	2.400

Fonte: Autor

Ao analisar a Tabela 5.5 observou-se que houve uma redução em 27,57%, ou seja, 61,12 kW nas perdas de potência ativa em relação ao caso base. Porém, comparando com (Hamada et al., 2008), notou-se que as perdas foram maiores, levando a conclusão inicial que a melhor solução nesse caso não foi encontrada. Entretanto, analisando os valores de custo total obtidos, o algoritmo apresentou o melhor resultado. A Tabela 5.6 mostra que para esse sistema teste, não houve uma diferença significativa nos valores de perdas em comparação com outras técnicas PSO, porém, a codificação usada neste trabalho conseguiu intensificar mais a busca por solução, alcançando um menor valor de perdas.

Observando a Figura 5.4 é possível concluir que houve um aumento na tensão de operação, após a inserção de BC, reduzindo assim as perdas de potência ativa do sistema.



**Figura 5.4:** Perfil de Tensão - Sistema de 34 Barras

Fonte: Autor.

A Tabela 5.7 mostra todas as barras candidatas que foram selecionadas para o processo de otimização, assim como a quantidade instalada e o custo agregado a essa instalação. Nota-se que algumas barras não tiveram BC alocados, isso ocorre pois o algoritmo entende que essas barras não geraram uma mudança significativa na função objetivo.

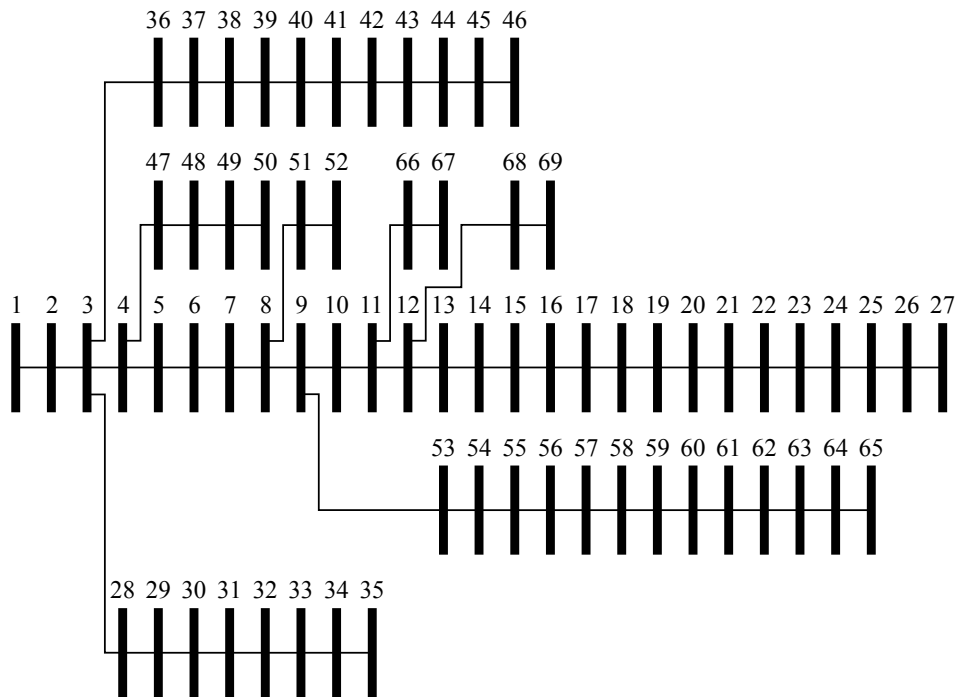
**Tabela 5.7:** Alocação dos BC para o Sistema de 34 Barras

Barra	Quantidade	Configuração dos Bancos	Custo (\$)
B10	0	-	0
B12	4	4	132
B19	6	6	165
B22	3	3	114
B26	3	3	114

Fonte: Autor

### 5.3 Sistema de 69 Barras

O sistema de 69 barras opera em 11 kV e tem carga total de 3.791,9 kW e 2.694,2 kvar. Os dados desse sistema estão disponíveis nas Tabelas A.3 e A.4 do anexo A e em (Venkatesh, Chandramohan, Kayalvizhi & Kumudini Devi, 2009). A configuração do sistema é ilustrada na Figura 5.5.



**Figura 5.5:** Configuração do Sistema de 69 Barras

Fonte: Adaptado de (Venkatesh et al., 2009).

A Tabela 5.8 mostra uma comparação entre o caso base, onde não há BC instalados, os resultados obtidos por (Arcanjo et al., 2012) e (Mohapatra et al., 2012) e os encontrados nesse trabalho. Ao analisar a Tabela 5.8 observou-se que houve uma redução em 35,37 %, ou seja, 79,57 kW nas perdas de potência ativa. Contudo, analisando os valores mínimos de tensão, o resultado obtido foi o menor dentro da comparação. Isso se justifica pela função objetivo, que não leva em conta o perfil de tensão, apenas o custo total.

A Tabela 5.9 apresenta uma comparação entre técnicas PSO. Em seu algoritmo, como consideração, os autores Kumar, Singh & Kansal (2017) não determinaram um valor de potência reativa que cada BC podia fornecer. Os valores apresentados mostram que não houve uma diferença significativa entre as reduções de perdas ativas em comparação com esses autores, porém, demonstra, pela similaridade de resultados, que ambos apresentaram algoritmos capazes de alcançar valores de redução satisfatória quando em comparação com outros casos.

A Figura 5.6 mostra uma comparação entre os níveis de tensão no sistema antes e depois

**Tabela 5.8:** Comparação dos Resultados Obtidos

	Caso Base	(Arcanjo et al., 2012)	(Mohapatra et al., 2012)	PSO Discreto
Perda (kW)	224,95	145,8	145,39	145,38
Custo de Operação (\$)	37.791,60	24.494,4	24.425,37	24.423,15
Total Reativo (kvar)	0	1.500	1.950	1.800
Custo de Instalação (\$)	0	475,5	415,0	393,00
Custo Total (\$)	37.791,60	24.969,9	24.840,37	24.816,15
$V_{MIN}$	0,9092	0,9330	0,9313	0,9308
$V_{MAX}$	1,00	1,00	1,00	1,00

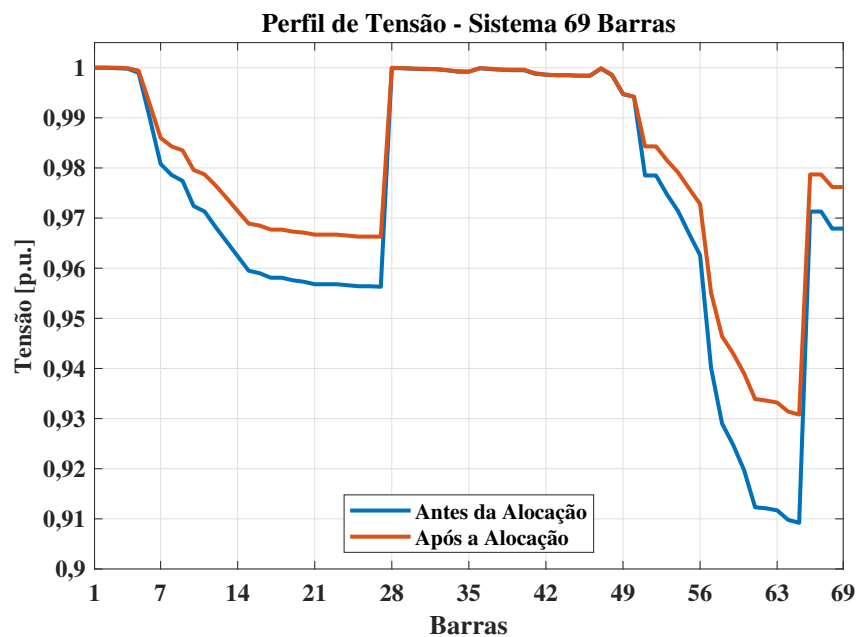
Fonte: Autor

**Tabela 5.9:** Comparação entre Técnicas PSO

	Caso Base	(Prakash & Sydulu, 2007)	(Kumar et al., 2017)	PSO Discreto
Perda (kW)	224,95	152,48	144,5	145,38
Total Reativo (kvar)	0	1.621	2.280	1.800

Fonte: Autor

da alocação de BC. Semelhante aos resultados apresentados anteriormente, para o sistema de 69 barras o algoritmo também foi efetivo em reduzir o perfil de tensão da rede.

**Figura 5.6:** Perfil de Tensão - Sistema de 69 Barras

Fonte: Autor.

A Tabela 5.10 apresenta as barras selecionadas dentre as candidatas do sistema de 69

barras. Novamente, algumas barras não foram escolhidas para receber os BC.

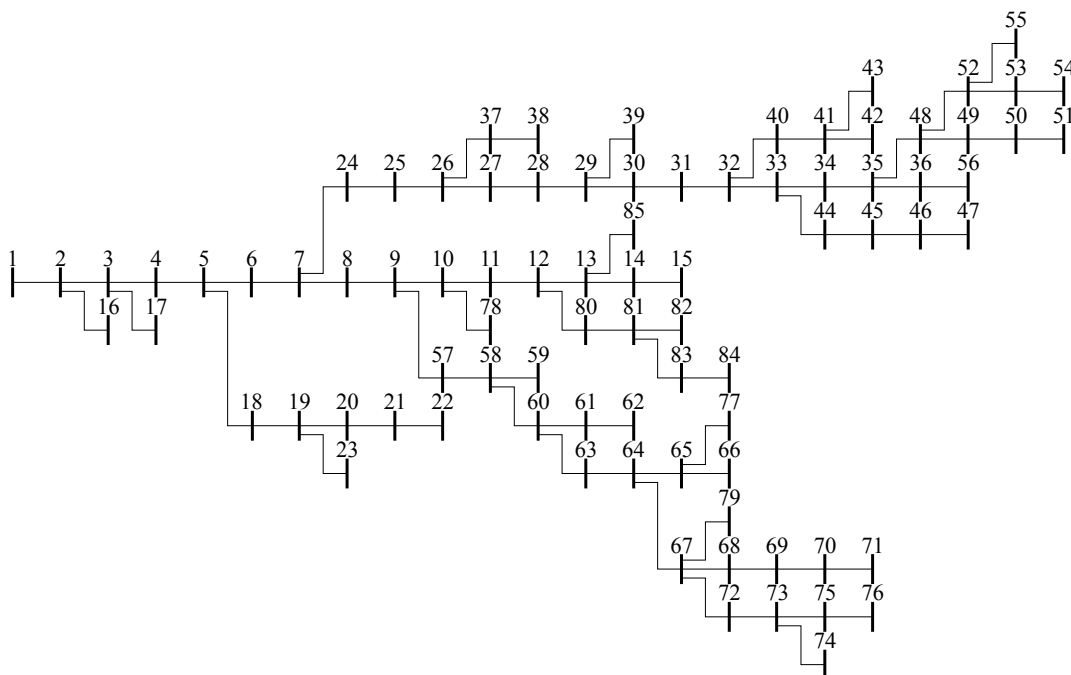
**Tabela 5.10:** Alocação dos BC para o Sistema de 69 Barras

Barra	Quantidade	Configuração dos Bancos	Custo (\$)
B12	3	3	114
B15	0	-	0
B21	1	1	75
B36	0	-	0
B61	8	8	204

Fonte: Autor

## 5.4 Sistema de 85 Barras

O sistema de 85 barras opera em 11 kV e tem carga total de 2.549,56 kW e 2.601,07 kvar. Os dados do sistema estão disponíveis nas Tabelas A.5, A.6 e A.7 do anexo A e em (Shuaib et al., 2015). A configuração do sistema é ilustrada na Figura 5.7.



**Figura 5.7:** Configuração do Sistema de 85 Barras

Fonte: Adaptado de (Shuaib et al., 2015).

A Tabela 5.11 mostra uma comparação entre o caso base, onde não há BC instalados, os resultados obtidos por (Rao et al., 2011) e (Shuaib et al., 2015) e os encontrados nesse trabalho. Ao analisar a Tabela 5.11 observou-se que houve uma redução em 53,84%, aproximadamente 169,98 kW nas perdas de potência ativa. Além disso, a potência reativa total determinada mostra que não é necessária uma grande quantidade de BC, mas que essa quantidade deve estar aliada a escolha inteligente das barras para instalação.



**Tabela 5.11:** Comparação dos Resultados Obtidos

	Caso Base	(Rao et al., 2011)	(Shuaib et al., 2015)	PSO Discreto
Perda (kW)	315,71	161,4	143,02	145,73
Custo de Operação (\$)	53.039,95	27.115,2	24.027,19	24.482,99
Total Reativo (kvar)	0	2.308	2.600	2.250
Custo de Instalação (\$)	0	469,8	739,6	572
Custo Total (\$)	53.039,95	27.585	24.766,79	25.054,99
$V_{MIN}$	0,8708	0,9657	-	0,9205
$V_{MAX}$	0,9957	0,9991	-	0,9973

Fonte: Autor

A Tabela 5.12 apresenta uma comparação entre técnicas PSO. Os autores Mendoza, Vacas & Ferreira (2018) consideraram que cada banco podia fornecer qualquer valor de potência reativa. Com os valores exibidos é possível observar que o algoritmo intensificou a busca por soluções em dois sentidos, tanto na redução de perdas quanto na localização e capacidade dos BC.

**Tabela 5.12:** Comparação entre Técnicas PSO

	Caso Base	(Mendoza et al., 2018)	(Gholinezhad et al., 2017)	PSO Discreto
Perda (kW)	315,71	148,99	148,29	145,73
Total Reativo (kvar)	0	2.217	2.000	2.250

Fonte: Autor

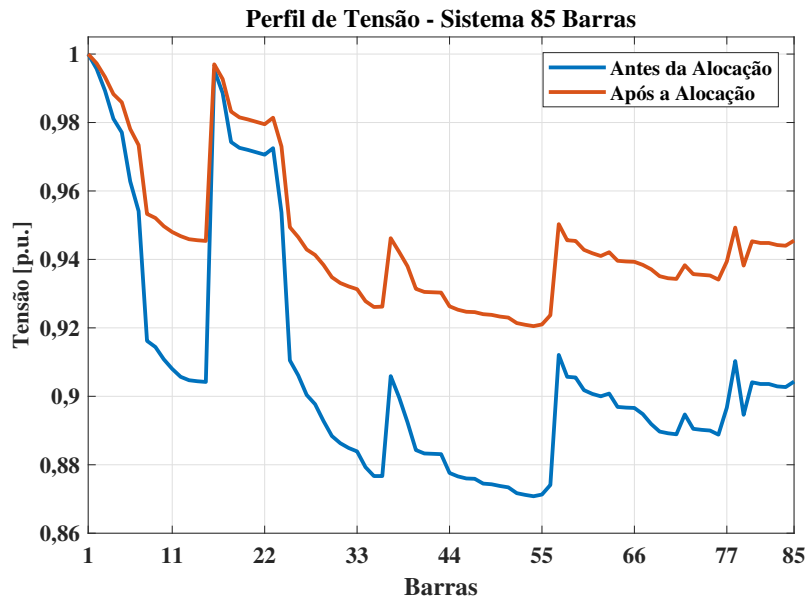
A Tabela 5.13 mostra as barras que foram selecionadas para o processo de otimização, bem como a quantidade que foi alocada e sua configuração, e o custo da instalação no sistema 85 barras.

**Tabela 5.13:** Alocação dos BC para o Sistema de 85 Barras

Barra	Quantidade	Configuração dos Bancos	Custo (\$)
8	4	4	132
12	2	2	97,5
29	4	4	132
36	2	2	97,5
68	3	3	114

Fonte: Autor

A Figura 5.8 mostra uma comparação entre os níveis de tensão no sistema antes e depois da alocação de BC. A Figura 5.8 mostra que a alocação de BC, além de reduzir as perdas de potência ativa, leva a uma melhoria no perfil de tensão na rede, o que significa um melhor ponto de operação para o sistema.



**Figura 5.8:** Perfil de Tensão - Sistema de 85 Barras

Fonte: Autor.

## 5.5 Considerações Finais

Os resultados alcançados com a utilização do algoritmo PSO discreto mostraram uma redução nas perdas de potência ativa nos quatro sistemas testados. Além disso, o custo total, que leva em conta o custo de operação e o custo de investimento na utilização de BC, também foi reduzido através do processo de otimização. Uma síntese dos resultados é apresentado na Tabela 5.14.

**Tabela 5.14:** Síntese dos Resultados Obtidos

Sistema	10 Barras	34 Barras	69 Barras	85 Barras
Redução nas Perdas (kW)	103,84	61,12	79,57	169,98
Redução nas Perdas (%)	13,25	27,57	35,37	53,84
Redução do Custo Total (\$)	16.496,2	9.744,5	12.975,45	27.984,96
Redução do Custo Total (%)	12,53	26,16	34,33	52,76

Fonte: Autor

# Capítulo 6

## Conclusão

O objetivo do trabalho consistia em definir um algoritmo que fosse capaz de determinar soluções de boa qualidade para o local de inserção de capacitores em um sistema de distribuição com o intuito de regular o seu fluxo de potência reativa visando reduzir as perdas no sistema com o menor custo.

Por se tratar de um problema de otimização combinatória, onde o problema é composto por variáveis inteiras e restrições não lineares, optou-se pelo desenvolvimento de um algoritmo meta-heurístico, o *Particle Swarm Optimization* (PSO), que foi adaptado para problemas de variáveis discretas.

O modelo matemático em que o algoritmo foi baseado busca primeiramente o fluxo de potência ótimo do sistema e leva em consideração limites de tensão e corrente na linha, além de restrições operativas na subestação, buscando reduzir as perdas e o custo de instalação dos equipamentos.

O algoritmo foi desenvolvido em linguagem C e em geral se mostrou robusto, apresentando um excelente desempenho, com um tempo de convergência adequado e eficaz em determinar a quantidade e localização da instalação de banco de capacitores na rede elétrica.

A avaliação do desempenho do algoritmo e da alocação de banco de capacitores foi feita em comparação com outras técnicas de otimização em sistemas testes presentes na literatura, como sistemas de 10, 34, 69 e 85 barras.

Para todos os sistemas avaliados e em comparação com a literatura, o custo total obtido, levando em conta a soma do custo de operação e investimento, se apresentou inferior. Além disso a alocação de banco de capacitores reduziu em todos os casos as perdas de potência ativa do sistema, o que conseqüentemente apresentou uma melhoria no perfil de tensão.

Portanto, conclui-se que tanto o método de alocação de bancos de capacitores, com intuito de reduzir as perdas e os custos envolvidos, quanto o algoritmo proposto para a solução desse problema de otimização, comprovaram-se boas alternativas para a melhoria da qualidade da energia distribuída ao apresentarem resultados satisfatórios.

Como propostas de trabalhos futuros são sugeridos os seguintes temas de pesquisa:

- Pesquisar e implementar estratégias para seleção das barras candidatas para alocação de BC utilizando PSO discreto;
- Aplicar a metodologia para seleção de capacitores fixos e chaveados, em diferentes níveis de carga;
- Considerar no modelo matemático as distorções harmônicas, referentes ao uso de BC, e considerar redes desbalanceadas;
- Pesquisar a influência do modelo de carga do BC no processo de otimização;
- Desenvolver uma metodologia para alocar tanto reguladores de tensão quanto BC, para redução das perdas ou melhoria do perfil de tensão da rede.

# Referências Bibliográficas

- Abd Elazim, S. M. & Ali, E. S. (2018). Optimal locations and sizing of capacitors in radial distribution systems using mine blast algorithm, *Electrical Engineering* **100**: 1–9. Citado na página 33.
- ANEEL, A. N. d. E. E. (2019). Perdas de Energia. Data de Acesso: 01/02/2020.  
**URL:** [https://www.aneel.gov.br/metodologia-distribuicao/-/asset\\_publisher/e2INtBH4EC4e/content/perdas/654800?inheritRedirect=false](https://www.aneel.gov.br/metodologia-distribuicao/-/asset_publisher/e2INtBH4EC4e/content/perdas/654800?inheritRedirect=false) Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- Arcanjo, D. N., Pereira, J. L. R., Oliveira, E. J., Peres, W., De Oliveira, L. W. & Da Silva, I. C. (2012). Cuckoo search optimization technique applied to capacitor placement on distribution system problem, *IEEE/IAS International Conference on Industry Applications* **10**: 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 32, 52 e 53.
- Askarzadeh, A. (2016). Capacitor placement in distribution systems for power loss reduction and voltage improvement: A new methodology, *IET Generation, Transmission and Distribution* **10**(14): 3631–3638. Citado na página 29.
- Bae, Y. G. (1978). Analytical method of capacitor allocation on distribution primary feeders, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-97**(4): 1232–1238. Citado na página 31.
- Beê, R. T., Aoki, A. R., Fernandes, T. S. P. & Gruppellio JR, F. (2007). Alocação Ótima de Banco de Capacitores em Redes de Distribuição Utilizando Algoritmos Genéticos, *XII Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ*, Foz do Iguaçu. Citado na página 22.
- Blum, C. & Roli, A. (2003). Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison, *ACM Computing Surveys* **35**(3): 268–308. Citado na página 29.
- Carvalho, M. R., Belati, E. A. & Costa, G. R. M. (2005). Comparative Study of Power Flow for Radial Distribution Systems, *6th Latin-American Congress Electricity Generation and Transmission*, Mar Del Plata. Citado na página 43.
- Diab, A. A., Tolba, M. A. & Tulsy, V. N. (2017). A new hybrid PSO-GSA algorithm for optimal allocation and sizing of capacitor banks in RDS, *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, IEEE, St. Petersburg, Russia, pp. 1496–1501. Citado na página 33.
- Dixit, M., Kundu, P. & Jariwala, H. R. (2016). Optimal allocation and sizing of shunt capacitor in distribution system for power loss minimization, *IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, IEEE, pp. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 33, 48 e 50.
- Dréo, J., Pétrowski, A., Siarry, P. & Taillard, E. (2003). *Metaheuristics for Hard Optimization*, Springer Science & Business Media. Citado na página 38.
- El-Fergany, A. A. (2013). Optimal capacitor allocations using evolutionary algorithms, *IET Generation, Transmission and Distribution* **7**(6): 593–601. Citado 2 vezes nas páginas 32

e 36.

- El-Fergany, A. A. & Abdelaziz, A. Y. (2014). Capacitor allocations in radial distribution networks using cuckoo search algorithm, *IET Generation, Transmission and Distribution* **8**(2): 223–232. Citado na página 32.
- Elsheikh, A., Helmy, Y., Abouelseoud, Y. & Elsherif, A. (2014). Optimal capacitor placement and sizing in radial electric power systems, *Alexandria Engineering Journal* **53**(4): 809–816.  
**URL:** <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2014.09.012> Citado 2 vezes nas páginas 48 e 50.
- Gasperin, L. V., Haffner, S. & Pereira, L. A. (2008). Modelos Alternativos para Determinação das Tensões Nodais em Redes de Distribuição de Energia em Problemas de Alocação Ótima de Banco de Capacitores, *XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia*, Olinda. Citado na página 22.
- Gholinezhad, J., Noroozian, R. & Bagheri, A. (2017). Optimal Capacitor Allocation in Radial Distribution Networks for Annual Costs Minimization Using Hybrid PSO and Sequential Power Loss Index Based Method, *Journal of Operation and Automation in Power Engineering* **5**(2): 117–130. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 55.
- Gönen, T. (2014). *Electric Power Distribution Engineering*, third edn, CRC Press. Citado 6 vezes nas páginas 21, 26, 27, 28, 29 e 32.
- Hamada, M. M., Wahab, M. A., El-Sayed, A. H. M. & Ramadan, H. A. (2008). A proposed strategy for capacitor allocation in radial distribution feeders, *12th International Middle-East Power System Conference*, IEEE, pp. 146–151. Citado 6 vezes nas páginas 31, 47, 48, 49, 50 e 51.
- Kalantari, M. & Kazemi, A. (2011). Placement of distributed generation unit and capacitor allocation in distribution systems using genetic algorithm, *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, IEEEIC.EU 2011 - Conference Proceedings*, number 2, IEEE, pp. 1–5. Citado na página 32.
- Kennedy, J. & Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization, *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, pp. 1942–1948. Citado na página 38.
- Kennedy, J. & Eberhart, R. C. (1997). Discrete binary version of the particle swarm algorithm, *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation*, Vol. 5, pp. 4104–4108. Citado na página 40.
- Kumar, D., Singh, A. & Kansal, S. (2017). To Improve the Voltage Profile of Distribution System with the Optimal Placement of Capacitor, *Indian Journal of Science and Technology* **10**(31): 1–7. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 53.
- Madhuri & Deep, K. (2009). A State-of-art Review of Population-based Parallel Meta-heuristics, *World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing*, Coimbatore. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- Mamede Filho, J. (2018). *Instalações elétricas industriais*, 9 edn, LTC, Rio de Janeiro. Citado na página 21.
- Mendoza, G. E., Vacas, V. M. & Ferreira, N. R. (2018). Optimal Capacitor Allocation and Sizing in Distribution Networks Using Particle Swarm Optimization Algorithm, *Workshop on Communication Networks and Power Systems*, IEEE, pp. 1–5. Citado na página 55.

- Miloca, S. A. (2012). *Planejamento da Expansão em Redes de Distribuição de Energia Elétrica com Indicadores de Confiabilidade e Base de Dados Georreferenciada*, Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná. Citado na página 29.
- Mohapatra, A., Behera, S., Nayak, S. & Panigrahi, B. K. (2012). A study on DG and capacitor placement in radial distribution system, *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*, IEEE, Bengaluru, India, pp. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 32, 52 e 53.
- Mujezinović, A., Turković, N., Dautbašić, N., Dedović, M. M. & Turković, I. (2019). Use of Integer Genetic Algorithm for Optimal Allocation and Sizing of the Shunt Capacitor Banks in the Radial Distribution Networks, *2019 18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA, INFOTEH 2019 - Proceedings*, number March, pp. 20–22. Citado na página 33.
- Neagle, N. M. & Samson, D. R. (1956). Loss Reduction from Capacitors Installed on Primary Feeders, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems* **75**(3): 950–959. Citado na página 31.
- Neagu, B. C., Ivanov, O. & Gavrilaş, M. (2017). Voltage profile improvement in distribution networks using the whale optimization algorithm, *Proceedings of the 9th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, ECAI 2017 2017-Janua*: 1–6. Citado na página 33.
- Oliveira, F. B. R. D. & Asada, E. N. (2016). Redução de Perdas de Sistemas de Distribuição através do Dimensionamento Ótimo de Banco de Capacitores via Entropia Cruzada, *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Natal. Citado na página 26.
- Pereira Junior, B. R. (2009). *Alocação Otimizada de Banco de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Através de Metaheurísticas Multiobjetivo*, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Citado na página 21.
- Pereira Júnior, B. R. & Mantovani, J. R. S. (2008). Alocação de Banco de Capacitores em Sistemas de Distribuição Considerando as Incertezas das Cargas, *XVII Congresso Brasileiro de Automática*, Juiz de Fora. Citado na página 21.
- Prakash, K. & Sydulu, M. (2007). Particle swarm optimization based capacitor placement on radial distribution systems, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 53.
- Prasad Reddy P, D. & Gunaprasad, K. (2014). Sensitivity Based Capacitor Placement Using Cuckoo Search Algorithm for Maximum Annual Savings, *IOSR Journal of Engineering* **4**(4): 06–09. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 32.
- Rao, R., Narasimham, S. & Ramalingaraju, M. (2011). Optimal capacitor placement in a radial distribution system using plant growth simulation algorithm, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **33**(2): 1133–1139. Citado 6 vezes nas páginas 29, 31, 36, 47, 54 e 55.
- Shi, Y. & Eberhart, R. (1998). A modified particle swarm optimizer algorithm, *IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence*, pp. 69–73. Citado na página 40.
- Shuaib, Y. M., Kalavathi, M. S. & Rajan, C. C. A. (2015). Optimal capacitor placement in

radial distribution system using Gravitational Search Algorithm, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* **64**: 384–397.

**URL:** <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.07.041> Citado 3 vezes nas páginas 32, 54 e 55.

Shuaib, Y. M. & Rajan, C. C. A. (2011). Capacitor sizing and placement on radial distribution system using queen bee assisted genetic algorithm, *Proceedings of 2011 International Conference on Process Automation, Control and Computing, PACC 2011* pp. 1–8. Citado na página 32.

Soares, C. E. F. (2010). *Análise de Ferramenta de Fluxo de Potência Ótimo na Otimização de Sistema Real de Subtransmissão*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco. Citado na página 22.

Sudabattula, S. K., Suresh, V., Subramaniam, U., Almakhlles, D., Padmanaban, S., Leonowicz, Z. & Iqbal, A. (2019). Optimal Allocation of Multiple Distributed Generators and Shunt Capacitors in Distribution System Using Flower Pollination Algorithm, *Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/ I and CPS Europe 2019*, number 1, pp. 0–4. Citado na página 33.

Szuvovivski, I. (2008). *Alocação Simultânea de Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão em Sistemas de Distribuição Usando Algoritmos Genéticos e Fluxo de Potência Ótimo*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná. Citado na página 22.

Szuvovivski, I., Fernandes, T. S. P. & Aoki, A. R. (2012). Simultaneous Allocation of Capacitors and Voltage Regulators at Distribution Networks using Genetic Algorithms and Optimal Power Flow, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **40**: 62–69. Citado na página 22.

Tabares, A., Franco, J. F., Lavorato, M. & Rider, M. J. (2016). Multistage Long-Term Expansion Planning of Multiple Alternatives, *IEEE Transactions on Power Systems* **31**(3): 1900–1914. Citado na página 22.

Venkatesh, B., Chandramohan, S., Kayalvizhi, N. & Kumudini Devi, R. P. (2009). Optimal Reconfiguration of Radial Distribution System Using Artificial Intelligence Methods, *IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity*, IEEE, pp. 660–665. Citado na página 52.

Willis, H. L. (2004). *Power Distribution Planning Reference Book*, second edn, Marcel Dekker, Inc., New York. Citado 3 vezes nas páginas 21, 27 e 31.

Yoshida, H., Kawata, K., Fukuyama, Y., Takayama, S. & Nakanishi, Y. (2000). A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS* **15**(4): 1232 – 1239. Citado na página 39.



# Apêndice A

## Dados dos Sistemas

Na Tabela A.1 estão representados os dados das barras e das linhas do sistema de 10 barras.

**Tabela A.1:** Sistema de 10 Barras

Dados de Linha				Dados de Barra		
Barra De	Barra Para	r ( $\Omega$ )	x ( $\Omega$ )	Barra	P (kW)	Q (kvar)
01	02	0,1233	0,4127	01	0	0
02	03	0,0140	0,6051	02	1840	460
03	04	0,7463	1,2050	03	980	340
04	05	0,6984	0,6084	04	1790	446
05	06	1,9831	1,7276	05	1598	1840
06	07	0,9053	0,7886	06	1610	600
07	08	2,0552	1,1640	07	780	110
08	09	4,7953	2,7160	08	1150	60
09	10	5,3434	3,0264	09	980	130
				10	1640	200

Na Tabela A.2 estão representados os dados das barras e das linhas do sistema de 34 barras.

**Tabela A.2:** Sistema de 34 Barras

Dados de Linha				Dados de Barra		
Barra De	Barra Para	r ( $\Omega$ )	x ( $\Omega$ )	Barra	P (kW)	Q (kvar)
01	02	0,11700	0,04800	01	0,0	0,0
02	03	0,10725	0,04400	02	230,0	142,5
03	04	0,16445	0,04565	03	0,0	0,0
04	05	0,14950	0,04150	04	230,0	142,5
05	06	0,14950	0,04150	05	230,0	142,5
06	07	0,31440	0,05400	06	0,0	0,0
07	08	0,20960	0,03600	07	0,0	0,0
08	09	0,31440	0,05400	08	230,0	142,5
09	10	0,20960	0,03600	09	230,0	142,5
10	11	0,13100	0,02250	10	0,0	0,0
11	12	0,10480	0,01800	11	230,0	142,5
03	13	0,15720	0,02700	12	137,0	84,0
13	14	0,20960	0,03600	13	72,0	45,0
14	15	0,10480	0,01800	14	72,0	45,0
15	16	0,05240	0,00900	15	72,0	45,0
06	17	0,17940	0,04980	16	13,5	7,5
17	18	0,16445	0,04565	17	230,0	142,5
18	19	0,20790	0,04730	18	230,0	142,5
19	20	0,18900	0,04300	19	230,0	142,5
20	21	0,18900	0,04300	20	230,0	142,5
21	22	0,26200	0,04500	21	230,0	142,5
22	23	0,26200	0,04500	22	230,0	142,5
23	24	0,31440	0,05400	23	230,0	142,5
24	25	0,20960	0,03600	24	230,0	142,5
25	26	0,13100	0,02250	25	230,0	142,5
26	27	0,10480	0,01800	26	230,0	142,5
07	28	0,15720	0,02700	27	137,0	85,0
28	29	0,15720	0,02700	28	75,0	48,0
29	30	0,15720	0,02700	29	75,0	48,0
10	31	0,15720	0,02700	30	75,0	48,0
31	32	0,20960	0,03600	31	57,0	34,5
32	33	0,15720	0,02700	32	57,0	34,5
33	34	0,10480	0,01800	33	57,0	34,5
				34	57,0	34,5

Nas Tabelas A.3 e A.4 estão representados os dados das barras e das linhas do sistema de 69 barras.

**Tabela A.3:** Sistema de 69 Barras

Dados de Linha				Dados de Barra		
Barra De	Barra Para	r ( $\Omega$ )	x ( $\Omega$ )	Barra	P (kW)	Q (kvar)
01	02	0,0005	0,0012	01	0,0	0,0
02	03	0,0005	0,0012	02	0,0	0,0
03	04	0,0015	0,0036	03	0,0	0,0
04	05	0,0251	0,0294	04	0,0	0,0
05	06	0,3660	0,1864	05	0,0	0,0
06	07	0,3811	0,1941	06	2,6	2,2
07	08	0,0922	0,0470	07	40,4	30,0
08	09	0,0493	0,0251	08	75,0	54,0
09	10	0,8190	0,2707	09	30,0	22,0
10	11	0,1872	0,0619	10	28,0	19,0
11	12	0,7114	0,2351	11	145,0	104,0
12	13	1,0300	0,3400	12	145,0	104,0
13	14	1,0440	0,3450	13	8,0	5,0
14	15	1,0580	0,3496	14	8,0	5,5
15	16	0,1966	0,0650	15	0,0	0,0
16	17	0,3744	0,1238	16	45,5	30,0
17	18	0,0047	0,0016	17	60,0	35,0
18	19	0,3276	0,1083	18	60,0	35,0
19	20	0,2106	0,0690	19	0,0	0,0
20	21	0,3416	0,1129	20	1,0	0,6
21	22	0,0140	0,0046	21	114,0	81,0
22	23	0,1591	0,0526	22	5,0	3,5
23	24	0,3463	0,1145	23	0,0	0,0
24	25	0,7488	0,2475	24	28,0	20,0
25	26	0,3089	0,1021	25	0,0	0,0
26	27	0,1732	0,0572	26	14,0	10,0
03	28	0,0044	0,0108	27	14,0	10,0
28	29	0,0640	0,1565	28	26,0	18,6
29	30	0,3978	0,1315	29	26,0	18,6
30	31	0,0702	0,0232	30	0,0	0,0
31	32	0,3510	0,1160	31	0,0	0,0
32	33	0,8390	0,2816	32	0,0	0,0
33	34	1,7080	0,5646	33	14,0	10,0
34	35	1,4740	0,4873	34	9,5	14,0
03	36	0,0044	0,0108	35	6,0	4,0

**Tabela A.4:** Sistema de 69 Barras - Continuação

Dados de Linha				Dados de Barra		
Barra De	Barra Para	r ( $\Omega$ )	x ( $\Omega$ )	Barra	P (kW)	Q (kvar)
36	37	0,0640	0,1565	36	26,0	18,6
37	38	0,1053	0,1230	37	26,0	18,6
38	39	0,0304	0,0355	38	0,0	0,0
39	40	0,0018	0,0021	39	24,0	17,0
40	41	0,7283	0,8509	40	24,0	17,0
41	42	0,3100	0,3623	41	1,2	1,0
42	43	0,0410	0,0478	42	0,0	0,0
43	44	0,0092	0,0116	43	6,0	4,3
44	45	0,1089	0,1373	44	0,0	0,0
45	46	0,0009	0,0012	45	39,2	26,3
04	47	0,0034	0,0084	46	39,2	26,3
47	48	0,0851	0,2083	47	0,0	0,0
48	49	0,2898	0,7091	48	79,0	56,4
49	50	0,0822	0,2011	49	384,7	274,5
08	51	0,0928	0,0473	50	384,7	274,5
51	52	0,3319	0,1114	51	40,5	28,3
09	53	0,1740	0,0886	52	3,6	2,7
53	54	0,2030	0,1034	53	4,4	3,5
54	55	0,2842	0,1447	54	26,4	19,0
55	56	0,2813	0,1433	55	24,0	17,2
56	57	1,5900	0,5337	56	0,0	0,0
57	58	0,7837	0,2630	57	0,0	0,0
58	59	0,3042	0,1006	58	0,0	0,0
59	60	0,3861	0,1172	59	100,0	72,0
60	61	0,5075	0,2585	60	0,0	0,0
61	62	0,0974	0,0496	61	1244,0	888,0
62	63	0,1450	0,0738	62	32,0	23,0
63	64	0,7105	0,3619	63	0,0	0,0
64	65	1,0410	0,5302	64	227,0	162,0
11	66	0,2012	0,0611	65	59,0	42,0
66	67	0,0047	0,0014	66	18,0	13,0
12	68	0,7394	0,2444	67	18,0	13,0
68	69	0,0047	0,0016	68	28,0	20,0
				69	28,0	20,0

Nas Tabelas A.5, A.6 e A.7 estão representados os dados das barras e das linhas do sistema de 85 barras.

**Tabela A.5:** Sistema de 85 Barras

Dados de Linha				Dados de Barra		
Barra De	Barra Para	r ( $\Omega$ )	x ( $\Omega$ )	Barra	P (kW)	Q (kvar)
01	02	0,108	0,075	01	0,00	0,00
02	03	0,163	0,112	02	0,00	0,00
03	04	0,217	0,149	03	0,00	0,00
04	05	0,108	0,074	04	56,00	57,13
05	06	0,435	0,298	05	0,00	0,00
06	07	0,272	0,186	06	35,28	35,99
07	08	1,197	0,820	07	0,00	0,00
08	09	0,108	0,074	08	35,28	35,99
09	10	0,598	0,410	09	0,00	0,00
10	11	0,544	0,373	10	0,00	0,00
11	12	0,544	0,373	11	56,00	57,13
12	13	0,598	0,410	12	0,00	0,00
13	14	0,272	0,186	13	0,00	0,00
14	15	0,326	0,223	14	35,28	35,99
02	16	0,728	0,302	15	35,28	35,99
03	17	0,455	0,189	16	35,28	35,99
05	18	0,820	0,340	17	112,00	114,26
18	19	0,637	0,264	18	56,00	57,13
19	20	0,455	0,189	19	56,00	57,13
20	21	0,819	0,340	20	35,28	35,99
21	22	1,548	0,642	21	35,28	35,99
19	23	0,182	0,075	22	35,28	35,99
07	24	0,910	0,378	23	35,28	35,99
08	25	0,455	0,189	24	35,28	35,99
25	26	0,364	0,151	25	14,00	14,28
26	27	0,546	0,226	26	0,00	0,00
27	28	0,273	0,113	27	0,00	0,00
28	29	0,546	0,226	28	36,28	37,01
29	30	0,546	0,226	29	56,00	57,13
30	31	0,273	0,113	30	0,00	0,00
31	32	0,182	0,075	31	35,28	35,99
32	33	0,182	0,075	32	56,00	57,13
33	34	0,819	0,340	33	56,00	57,13
34	35	0,637	0,264	34	14,00	14,28
35	36	0,182	0,075	35	56,00	57,13

**Tabela A.6:** Sistema de 85 Barras - Continuação

Dados de Linha				Dados de Barra		
Barra De	Barra Para	r ( $\Omega$ )	x ( $\Omega$ )	Barra	P (kW)	Q (kvar)
26	37	0,364	0,151	36	0,00	0,00
27	38	1,002	0,416	37	56,00	57,13
29	39	0,546	0,226	38	0,00	0,00
32	40	0,455	0,189	39	56,00	57,13
40	41	1,002	0,416	40	56,00	57,13
41	42	0,273	0,113	41	14,00	14,28
41	43	0,455	0,189	42	0,00	0,00
34	44	1,002	0,416	43	0,00	0,00
44	45	0,911	0,378	44	56,00	57,13
45	46	0,911	0,378	45	56,00	57,13
46	47	0,546	0,226	46	35,28	35,99
35	48	0,637	0,264	47	35,28	35,99
48	49	0,182	0,075	48	56,00	57,13
49	50	0,364	0,151	49	56,00	57,13
50	51	0,455	0,189	50	35,28	35,99
48	52	1,366	0,567	51	0,00	0,00
52	53	0,455	0,189	52	35,28	35,99
53	54	0,546	0,226	53	14,00	14,28
52	55	0,546	0,226	54	0,00	0,00
49	56	0,546	0,226	55	35,28	35,99
09	57	0,273	0,113	56	0,00	0,00
57	58	0,819	0,340	57	0,00	0,00
58	59	0,182	0,075	58	56,00	57,13
58	60	0,546	0,226	59	56,00	57,13
60	61	0,728	0,302	60	56,00	57,13
61	62	1,002	0,415	61	35,28	35,99
60	63	0,182	0,075	62	35,28	35,99
63	64	0,728	0,302	63	0,00	0,00
64	65	0,182	0,075	64	35,28	35,99
65	66	0,182	0,075	65	35,28	35,99
64	67	0,455	0,189	66	35,28	35,99
67	68	0,910	0,378	67	0,00	0,00
68	69	1,092	0,453	68	0,00	0,00
69	70	0,455	0,189	69	56,00	57,13
70	71	0,546	0,226	70	0,00	0,00

**Tabela A.7:** Sistema de 85 Barras - Continuação

Dados de Linha				Dados de Barra		
Barra De	Barra Para	r ( $\Omega$ )	x ( $\Omega$ )	Barra	P (kW)	Q (kvar)
67	72	0,182	0,075	71	35,28	35,99
68	73	1,184	0,491	72	56,00	57,13
73	74	0,273	0,113	73	0,00	0,00
73	75	1,002	0,416	74	56,00	57,13
70	76	0,546	0,226	75	35,28	35,99
65	77	0,091	0,037	76	56,00	57,13
10	78	0,637	0,264	77	14,00	14,28
67	79	0,546	0,226	78	56,00	57,13
12	80	0,728	0,302	79	35,28	35,99
80	81	0,364	0,151	80	56,00	57,13
81	82	0,091	0,037	81	0,00	0,00
81	83	1,092	0,453	82	56,00	57,13
83	84	1,002	0,416	83	35,28	35,99
13	85	0,819	0,340	84	14,00	14,28
				85	35,28	35,99