

Universidade Federal de Juiz de Fora
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica
Mestrado em Sistemas de Energia Elétrica

Cristiano Gomes Casagrande

**ALOCAÇÃO DE CAPACITORES E AJUSTE DE TAPES PARA
MINIMIZAÇÃO DE PERDAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Juiz de Fora
2010

Cristiano Gomes Casagrande

**ALOCAÇÃO DE CAPACITORES E AJUSTE DE TAPES PARA
MINIMIZAÇÃO DE PERDAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação submetida ao corpo docente da coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em engenharia elétrica.

Orientador: Prof. Edimar José de Oliveira, D. Sc.

Co-orientador: Prof. Ivo Chaves da Silva Junior, D. Sc.

Juiz de Fora
2010

Casagrande, Cristiano Gomes.

Alocação de capacitores e ajuste de tapes para minimização de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica / Cristiano Gomes Casagrande. – 2010.
132 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)
Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2010.

1. Energia elétrica - Distribuição. 2. Capacitores. I.
Título.

CDU 621.315

**ALOCAÇÃO DE CAPACITORES E AJUSTE DE TAPES PARA
MINIMIZAÇÃO DE PERDAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

CRISTIANO GOMES CASAGRANDE

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

Prof. Edimar José de Oliveira, D. Sc. – Orientador – UFJF

Prof. Ivo Chaves da Silva Júnior, D. Sc. – Co-orientador – UFJF

Prof. Luiz Antônio da Fonseca Manso, D. Sc. – UFSJ

Prof. André Luís Marques Marcato, D. Sc. – UFJF

Prof. Leonardo Willer de Oliveira, D. Sc. – UFJF

Juiz de Fora, MG, Brasil.
Agosto de 2010

*Aos meus pais,
José Joel Casagrande (in memoriam) e
Aparecida do Carmo Casagrande.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus, por me conferir o dom da vida e da inteligência, sem os quais seria impossível estar presente para a realização deste trabalho.

Agradeço ao Professor Edimar José de Oliveira, pela excelência na orientação, sempre presente e acessível, sem o qual este trabalho jamais teria se desenvolvido e se concretizado.

Ao Professor Ivo Chaves da Silva Junior, pela co-orientação e por valiosas e cruciais contribuições no desenvolvimento do trabalho.

Ao Professor André Luís Marques Marcato por contribuições e apoio na escolha do tema.

Faço um agradecimento especial ao Professor Danilo Pereira Pinto, pelo apoio e incentivo ao ingresso e concretização deste trabalho, além de ceder a estrutura e o espaço do Leener (Laboratório de Eficiência Energética).

Agradeço também aos muitos amigos e colegas da Faculdade de Engenharia da UFJF, que sempre estiveram presentes, me apoiaram e proporcionaram momentos agradáveis de estudo e diversão. Particularmente, agradeço aos amigos do Leener e do Labspot (Laboratório de Sistemas de Potência), que não me deixaram desanimar nos momentos difíceis.

Entre esses amigos, agradeço especialmente ao Fernando Lima de Souza, pelo trabalho conjunto em diversos momentos do desenvolvimento deste trabalho, e ao Leonardo Willer de Oliveira, pelo apoio. Agradeço também à companhia e amizade dos colegas de curso, Marcus Augustus Alves Ferreira e German David Yagi Moromisato.

Agradeço especialmente à minha família, que constitui minha base, fundamental em me apoiar, em especial à minha mãe, Aparecida do Carmo Casagrande.

Enfim, deixo meus sinceros agradecimentos a todos os amigos que de uma ou outra forma estiveram comigo direta ou indiretamente durante este tempo.

Resumo da Dissertação apresentada à UFJF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

ALOCAÇÃO DE CAPACITORES E AJUSTE DE TAPES PARA MINIMIZAÇÃO DE PERDAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Cristiano Gomes Casagrande

Agosto de 2010

Orientador: Prof. Edimar José de Oliveira, D. Sc.

Programa: Engenharia Elétrica.

A necessidade de redução do custo associado à operação dos sistemas de distribuição de energia elétrica tem se tornado cada vez mais imperativa no cenário do setor energético. Uma das principais alternativas para resolver este problema é a minimização de perdas de potência ativa nos alimentadores de distribuição.

A fim de reduzir as perdas, algumas práticas têm sido adotadas, como a alocação de capacitores em pontos estratégicos do sistema, bem como o ajuste de tapetes de transformadores e reconfiguração de redes de distribuição. A solução de problemas desse tipo envolve complexos algoritmos de otimização não linear inteira mista.

Nesse contexto, este trabalho apresenta uma técnica especializada baseada na meta-heurística colônia de formigas para solucionar o problema de minimização de perdas nos sistemas de distribuição de energia elétrica através da alocação ótima de capacitores combinada ao ajuste de tapetes, além de considerar restrições de violação de tensão. O algoritmo desenvolvido propõe modificações na estrutura básica do problema, a fim de obter resultados melhores. A metodologia proposta é aplicada a sistemas encontrados na literatura e resultados são comparados com outros métodos.

Palavras-chave: Alocação de Capacitores, Ajuste de Tapetes, Minimização de Perdas, Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, Colônia de Formigas.

Abstract of Dissertation presented to UFJF as a partial fulfillment of the requirements for a Master of Science degree (M. Sc.)

CAPACITOR PLACEMENT AND LTC ADJUSTMENT FOR LOSS
MINIMIZATION IN ELECTRIC POWER DISTRIBUTION SYSTEMS

Cristiano Gomes Casagrande

August 2010

Advisor: Edimar José de Oliveira, D. Sc.

Department: Electrical Engineering.

The reduce the cost associated with the operation of electric power distribution systems has become increasingly imperative in the setting of the energy sector. One of the main alternatives to solve this problem is to minimize power losses in distribution feeders.

In order to reduce losses, some practices have been adopted, such as the allocation of capacitors at strategic points in the system as well as LTC adjustment and reconfiguration of distribution networks. The solution of such problems involves complex algorithms for nonlinear mixed integer optimization.

Therefore, this paper presents a specialized technique based on meta-heuristic ant colony optimization to solve the problem of minimizing losses in electric power distribution systems through the optimal capacitor placement combined with the LTC adjustment, and consider constraints voltage violation. This algorithm proposes changes to the basic structure of the problem in order to obtain better results. The proposed methodology is applied to systems found in the literature and results are compared with other methods.

Keywords: Capacitor placement, LTC adjustment, Loss minimization, Electric Power Distribution Systems, Ant Colony Optimization.

Sumário

Capítulo I

Introdução	1
I.1. Considerações Iniciais	1
I.2. O Sistema de Distribuição de Energia Elétrica	3
I.2.1. Reconfiguração de Redes de Distribuição	4
I.2.2. Alocação de Bancos de Capacitores	5
I.2.3. Ajuste de Tapes de Transformadores	7
I.2.4. Limites de Tensão	7
I.3. Metodologias	8
I.3.1. Busca Exaustiva	10
I.3.2. Branch and Bound	10
I.3.3. Branch Exchange	11
I.3.4. Busca Tabu	11
I.3.5. Simulated Annealing	12
I.3.6. Redes Neurais	13
I.3.7. Algoritmos Genéticos	13
I.3.8. Particle Swarm	15
I.3.9. Colônia de Formigas	16
I.4. Motivação	17
I.5. Objetivo	18
I.6. Publicação decorrente da pesquisa	18
I.7. Estrutura do Trabalho	19

Capítulo II

Meta-heurística Colônia de Formigas	20
II.1. Introdução	20
II.2. Algoritmo Colônia de Formigas	23
II.2.1. Estrutura Básica de um Algoritmo Colônia de Formigas	27

II.3. Aplicações do Algoritmo Colônia de Formigas em Problemas de Minimização de Perdas nos SDE	31
II.4. Conclusão	36
Capítulo III	
Metodologia Proposta	37
III.1. Introdução	37
III.2. Formulação do Problema	37
III.3. Algoritmo Colônia de Formigas Proposto	42
III.4. Conclusão	58
Capítulo IV	
Estudo de Casos	60
IV.1. Introdução	60
IV.2. Sistema 14 Barras	60
IV.3. Sistema 33 Barras	65
IV.4. Sistema 69 Barras	72
IV.5. Sistema 476 Barras	78
IV.6. Resumo das Simulações	83
IV.7. Conclusão	84
Capítulo V	
Conclusão e Trabalhos Futuros	86
V.1. Conclusão	86
V.2. Trabalhos Futuros	88
Apêndice A	
Sistemas Utilizados	89
A.1. Introdução	89
A.2. Sistema 14 Barras	89
A.3. Sistema 33 Barras	91
A.4. Sistema 69 Barras	93
A.5. Sistema 476 Barras	98
Referências Bibliográficas	111

Lista de Figuras

Figura II.1 – Comportamento das formigas diante de um obstáculo	24
Figura II.2 – Fluxograma básico de um algoritmo colônia de formigas	27
Figura III.1 – Fluxograma do algoritmo proposto	43
Figura III.2 – Sistema exemplo	45
Figura III.3 – Representação de uma solução para o sistema exemplo	46
Figura III.4 – Vetor solução obtido pela formiga 1	48
Figura III.5 – Matriz com as soluções encontradas por todas as formigas	49
Figura III.6 – Estrutura da Matriz Jacobiana	50
Figura III.7 – Concentração de feromônio nas matrizes de feromônio para os tapes	52
Figura III.8 – Concentração de feromônio para a matriz de feromônio de capacitores	52
Figura III.9 – Roleta	55
Figura III.10 – Busca de vizinhança	57
Figura III.11 – Busca de vizinhança completa	58
Figura III.12 – Busca de vizinhança dos tapes	58

Lista de Tabelas

Tabela III.1 – Valores de Ajuste de Tape correspondentes ao Número Sorteado	47
Tabela III.2 – Ajustes de Tapes encontrados pela Formiga 1	47
Tabela IV.1 – Perdas no Caso Base no Sistema 14 Barras	61
Tabela IV.2 – Simulação 1 no Sistema 14 Barras: Solução	61
Tabela IV.3 – Simulação 1 no Sistema 14 Barras: Perdas e Custos	62
Tabela IV.4 – Simulação 2 no Sistema 14 Barras: Solução	62
Tabela IV.5 – Simulação 2 no Sistema 14 Barras: Perdas e Função Objetivo	62
Tabela IV.6 – Simulação 3 no Sistema 14 Barras: Alocação de Bancos	64
Tabela IV.7 – Simulação 3 no Sistema 14 Barras: Ajuste de Tapes	64
Tabela IV.8 – Simulação 3 no Sistema 14 Barras: Perdas e Função Objetivo	64
Tabela IV.9 – Perdas no Caso Base no Sistema 33 Barras	66
Tabela IV.10 – Simulação 1 no Sistema 33 Barras: Solução	66
Tabela IV.11 – Simulação 1 no Sistema 33 Barras: Perdas e Função Objetivo	66
Tabela IV.12 – Simulação 2 no Sistema 33 Barras: Solução	67
Tabela IV.13 – Simulação 2 no Sistema 33 Barras: Perdas e Função Objetivo	67
Tabela IV.14 – Simulação 3 no Sistema 33 Barras: Alocação de Bancos	68
Tabela IV.15 – Simulação 3 no Sistema 33 Barras: Ajuste de Tapes	68
Tabela IV.16 – Simulação 3 no Sistema 33 Barras: Perdas e Função Objetivo	68
Tabela IV.17 – Simulação 4 no Sistema 33 Barras: Alocação de Bancos	69
Tabela IV.18 – Simulação 4 no Sistema 33 Barras: Ajuste de Tapes	69
Tabela IV.19 – Simulação 4 no Sistema 33 Barras: Perdas e Função Objetivo	69
Tabela IV.20 – Simulação 5 no Sistema 33 Barras: Alocação de Bancos	70
Tabela IV.21 – Simulação 5 no Sistema 33 Barras: Ajuste de Tapes	71
Tabela IV.22 – Simulação 5 no Sistema 33 Barras: Perdas e Função Objetivo	71
Tabela IV.23 – Perdas no Caso Base no Sistema 69 Barras	73
Tabela IV.24 – Alocação Ótima de Bancos em SILVA JUNIOR et al (2008b)	73
Tabela IV.25 – Reprodução das Perdas de SILVA JUNIOR et al (2008b)	73

Tabela IV.26 – Alocação de Bancos no Sistema 69 Barras pelo Algoritmo Proposto	74
Tabela IV.27 – Resultado das Perdas no Sistema 69 Barras pelo Algoritmo Proposto	74
Tabela IV.28 – Solução considerando Custo de Instalação no Sistema 69 Barras ..	75
Tabela IV.29 – Perdas considerando Custo de Instalação no Sistema 69 Barras	75
Tabela IV.30 – Ajuste de Tapes no Sistema 69 Barras	76
Tabela IV.31 – Perdas e Fob no Sistema 69 Barras com Transformador	76
Tabela IV.32 – Solução Completa no Sistema 69 Barras: Capacitores	76
Tabela IV.33 – Solução Completa no Sistema 69 Barras: Ajuste de Tapes	77
Tabela IV.34 – Perdas e Fob no Sistema 69 Barras: Solução Final	77
Tabela IV.35 – Perdas no Caso Base no Sistema 476 Barras	78
Tabela IV.36 – Solução em SILVA JUNIOR et al (2008b)	79
Tabela IV.37 – Reprodução das Perdas e Custos em SILVA JUNIOR et al (2008b)	79
Tabela IV.38 – Solução pelo Algoritmo Proposto para o Sistema 476 Barras	79
Tabela IV.39 – Perdas e Custos para o Sistema 476 Barras: Algoritmo Proposto ..	80
Tabela IV.40 – Solução com Custo de Instalação para o Sistema 476 Barras	80
Tabela IV.41 – Resultado com Custo de Instalação para o Sistema 476 Barras	80
Tabela IV.42 – Solução Final para o Sistema 476 Barras	81
Tabela IV.43 – Resultado Final para o Sistema 476 Barras	82
Tabela IV.44 – Resumo das Simulações	83
Tabela A.1 – Dados das Barras do Sistema 14 Barras	89
Tabela A.2 – Dados das Linhas do Sistema 14 Barras	90
Tabela A.3 – Dados das Barras do Sistema 33 Barras	91
Tabela A.4 – Dados das Linhas do Sistema 33 Barras	92
Tabela A.5 – Dados das Barras do Sistema 69 Barras	93
Tabela A.6 – Dados das Linhas do Sistema 69 Barras	95
Tabela A.7 – Dados das Barras do Sistema 476 Barras	99
Tabela A.8 – Dados das Linhas do Sistema 476 Barras	104

Capítulo I

Introdução

I.1. Considerações Iniciais

A energia tornou-se, ao longo dos séculos, um produto indispensável ao desenvolvimento humano, proporcionando o avanço tecnológico e industrial, conforto, mudança de hábitos e alterações profundas na sociedade. De fato, é impossível imaginar o mundo contemporâneo sem energia. Em especial, o uso da energia elétrica, acelerou esse processo de desenvolvimento, tendo esta se transformado num insumo essencial ao crescimento econômico de uma nação.

Com a reestruturação do Setor Elétrico, a partir da década de 90, novas regras passaram a controlar o mercado de energia. Se até então a energia elétrica era um produto monopolizado predominantemente por empresas estatais, a partir daí esta situação começaria a mudar. Houve a privatização e desverticalização das empresas do setor, que passaram a atuar separadamente em cada atividade: geração, transmissão, distribuição, comercialização (SILVA, 2001). Em um mercado complexo e competitivo, crescem as exigências quanto à qualidade e custo da energia fornecida. Assim, em particular as concessionárias de energia passam a buscar alternativas para redução do custo associado à operação dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDE).

O planejamento e a operação dos sistemas de energia elétrica são atividades complexas que envolvem decisões baseadas em muitas variáveis, caracterizando-se por problemas de otimização, onde se busca tomar decisões que possam garantir o bom funcionamento do sistema, minimizando os custos dos investimentos (NARAYAN, 2003). Em grande parte dos casos, esses problemas de otimização são de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM) (NOCEDAL and WRIGHT, 1999), ou seja, envolvem variáveis discretas e contínuas. Problemas de otimização desse tipo são

complexos e de difícil solução, pois apresentam muitas soluções possíveis, chamadas de ótimos locais, o que dificulta a obtenção da solução ótima global. Além disso, o grande número de variáveis discretas confere a esses problemas uma natureza combinatória de grande escala.

Tanto no planejamento da expansão quanto no planejamento da operação dos sistemas elétricos, são encontrados na literatura inúmeros exemplos de problemas de PNLIM. GUEDES et al (2009) apresenta uma proposta de solução para o problema do planejamento da expansão da geração em longo prazo, usando uma ferramenta de otimização combinatória. OLIVEIRA et al (2003) trata da expansão da rede de transmissão de um sistema hidrotérmico, cujo problema é formulado classicamente como não linear e possui variáveis discretas e contínuas. Em HAFFNER et al (2006), apresenta-se um modelo linear inteiro misto para o problema de planejamento em múltiplos estágios da expansão do sistema de distribuição. As variáveis contínuas estão associadas ao estado da rede, como as tensões nas barras e o fluxo de corrente nas linhas, ao passo que as variáveis discretas referem-se às decisões envolvidas na expansão, como ampliação da capacidade das subestações existentes, instalação de novas subestações e alterações nos alimentadores.

O planejamento da operação envolve a decisão de despacho de montantes de geração térmica e hidráulica de modo a garantir o fornecimento de energia. Esse problema exige uma série de restrições operativas para os reservatórios, para as usinas hidrelétricas e para as termelétricas, as quais muitas vezes requerem uma formulação não linear inteira (SILVA JUNIOR, 2008). Essas restrições são designadas na literatura como “Unit Commitment” (ZHUANG and GALIANA, 1988 e HUANG et al, 1998). SISWORAHARDJO and EL-KEIB (2002) identifica o problema de “Unit Commitment” como um complexo problema de otimização combinatória. SILVA JUNIOR et al (2006) aborda o mesmo problema, apresentando um índice de sensibilidade para o despacho econômico das unidades termelétricas. As variáveis contínuas se referem à demanda do sistema e às potências geradas, ao passo que as variáveis discretas são as variáveis de decisão, como ligar ou não uma unidade geradora em determinada hora do dia.

Além desses exemplos, os Sistemas de Distribuição de Energia (SDE) também envolvem problemas de PNLIM. Um dos problemas mais importantes referentes aos SDE diz respeito à redução das perdas de energia, o que contribui para otimizar o custo da sua operação.

I.2. O Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

Os sistemas de energia elétrica ou sistemas elétricos de potência são essencialmente divididos em geração, transmissão e distribuição. O sistema de distribuição, por sua vez, é dividido em rede de distribuição primária, normalmente em tensão de 13,8 kV, e rede de distribuição secundária, normalmente em 127 V ou 220 V. A operação dos SDE exige a atenção para alguns aspectos como a natureza da carga conectada, taxa de crescimento da carga, balanceamento de carga, redução de perdas, qualidade da energia fornecida, manutenção do perfil de tensão dentro de limites toleráveis, continuidade no fornecimento, possibilidade de isolamento de trechos para manutenção, entre outros (GÖNEN, 1986).

Uma realidade nos sistemas elétricos é a existência de perdas de energia ao longo do seu transporte desde a geração até o consumidor final. Essas perdas de potência ativa são maiores nos sistemas de distribuição. Segundo um relatório do Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE, 2004), as perdas técnicas na transmissão e na distribuição estariam na ocasião, em torno de 9,7%, sendo cerca de 3% na transmissão e 6,7% na distribuição. Historicamente, estima-se, segundo relatório da Centrais Elétricas Brasileiras, Eletrobrás (2001), que, em média, 15% da energia comprada pelas distribuidoras no Brasil seja perdida nas redes de distribuição.

Essas perdas na distribuição são classificadas em (ARAUJO, 2007):

- Perdas técnicas: referem-se às perdas relacionadas com as leis da física, como perdas por Efeito Joule, perdas magnéticas ou dielétricas. É a energia dissipada entre os suprimentos de energia da distribuidora e os pontos de entrega aos consumidores;
- Perdas não técnicas ou comerciais: definidas como a diferença entre as perdas totais e as perdas técnicas. Referem-se, então, a todas as demais perdas, como furtos de energia, erros de medição ou fraude, estando diretamente associadas à gestão comercial da distribuidora.

No atual mercado de energia competitivo, reduzir custos e melhorar a qualidade do fornecimento de energia é essencial. As perdas nos SDE causam impacto na quantidade de energia que deve ser comprada pelas distribuidoras e, conseqüentemente,

na sua receita, o que se reflete no valor da tarifa de energia paga pelo consumidor. De fato, um dos fatores que mais contribuem para o aumento dos custos operacionais dos SDE é a parcela de perdas de potência ativa nos alimentadores de distribuição (SARFI et al, 1993). Assim, reduzir as perdas constitui-se numa das principais estratégias para a redução do custo associado à operação dos SDE.

Além do aspecto econômico, outras questões têm motivado a busca pela redução das perdas nos sistemas elétricos, como a crise de energia ocorrida no país em 2001, a perspectiva potencial de ocorrência de novos déficits de energia no sistema, além da crescente preocupação com a preservação do meio ambiente e o desenvolvimento sustentável, o que exige a redução do consumo de recursos naturais por meio da economia de energia (MARQUES et al, 2006).

A fim de reduzir as perdas nos SDE, algumas práticas têm sido adotadas, como a reconfiguração das redes de distribuição, alocação de capacitores e ajuste de tapes de transformadores, o que melhora o nível de tensão e, conseqüentemente, contribui para a redução das perdas de potência ativa (OLIVEIRA, 2009). Alguns aspectos de cada uma dessas práticas são mencionados a seguir.

I.2.1. Reconfiguração de Redes de Distribuição

Os SDE são tradicionalmente ligados em configuração radial, sobretudo por facilitar a sua operação e a coordenação da proteção, além de exigir menores custos de investimento. No entanto, nas redes radiais a confiabilidade no que tange à continuidade do fornecimento de energia aos consumidores é menor do que em redes ligadas em malha (GÖNEN, 1986 e CIVANLAR et al, 1988). Além disso, redes configuradas em malha fornecem rotas alternativas para o fluxo de potência ativa, o que reduz as perdas.

A reconfiguração dos SDE consiste em alterar a topologia da rede pela utilização de dispositivos de chaveamento acoplados nas linhas de distribuição primária. Por meio da abertura ou fechamento dessas chaves manobráveis pode-se determinar a topologia radial e conexa que aumente a qualidade, a eficiência, a confiabilidade e a segurança do sistema, observando aspectos técnicos e econômicos (CIVANLAR et al, 1988).

A reconfiguração de SDE a fim de minimizar perdas é também um problema de PNLIM. A perda total de potência ativa na rede é expressa como função quadrática das tensões nas barras ou das correntes nas linhas, caracterizando a natureza não linear do problema. Além disso, o problema envolve variáveis discretas e contínuas. Os estados

das chaves manobráveis assumem valores discretos, pois a chave estará aberta (zero) ou fechada (um), ao passo que as variáveis contínuas correspondem ao estado operativo e aos controles do sistema. Tendo em vista as dimensões dos SDE de médio e grande porte, o problema apresenta natureza combinatória elevada, resultando em grande complexidade na busca de soluções ótimas, visto que um grande número de alternativas deve ser avaliado. CIVANLAR et al (1988), GOSWAMI and BASU (1992) e KAGAN e OLIVEIRA (1998) propõem diferentes técnicas para a solução do problema de reconfiguração dos SDE. Esses trabalhos apresentam técnicas eficientes para a solução do problema, inclusive trazendo a atenção para a questão do esforço computacional, diante da natureza combinatória dos problemas. COSTA et al (2008) e OLIVEIRA et al (2009) resolvem este problema de PNLIM para minimizar os custos associados à reconfiguração e redução das perdas, utilizando uma metodologia em que a variável discreta de decisão de abertura/fechamento das chaves é modelada como uma função contínua (função sigmóide). GOMES et al (2006) resolve o mesmo problema utilizando também uma função contínua para aproximar o estado das chaves, no entanto, utiliza uma função linear ao invés da função sigmóide.

I.2.2. Alocação de Bancos de Capacitores

Outra prática usual para a minimização de perdas nos SDE é a alocação de bancos de capacitores em pontos estratégicos da rede, proporcionando injeção de potência reativa em determinadas barras. Com essa prática, atende-se a alguns objetivos essenciais na operação eficiente dos sistemas de distribuição, como a correção do fator de potência, melhoria do perfil de tensão, redução das perdas, controle do fluxo de potência e aumento da capacidade dos circuitos (BORTIGNON and EL-HAWARY, 1995). Esses bancos de capacitores podem ser fixos ou automáticos.

O problema de alocação de bancos de capacitores envolve a localização das barras que receberão instalação de bancos, além da determinação do tipo, tamanho e número de bancos de capacitores que serão instalados em cada barra. Isso conduz a um problema de natureza combinatória com elevado número de possibilidades, de característica não linear inteira mista, onde as variáveis discretas estão associadas às opções de instalação dos bancos de capacitores. Além disso, dois fatores tornam o problema ainda mais complexo (SILVA JUNIOR, et al, 2008a):

- *Existência de várias soluções factíveis*: o problema possui uma região de solução não convexa, apresentando vários mínimos locais, o que dificulta a obtenção da solução mínima global;
- *Elevado tempo computacional*: ocorre devido à explosão combinatória referente às muitas alternativas discretas de investimento.

Adicionalmente, variações da carga ao longo do dia dificultam ainda mais a representação real do problema, pois o investimento também deve considerar a carga e o custo associado às perdas de energia em cada horário de operação. Ou seja, deve-se encontrar uma solução que considere uma análise combinatória de todas essas alternativas de investimento.

Em termos simples, deseja-se minimizar o custo associado aos investimentos, encontrando o ponto ótimo entre a quantidade de energia economizada com a redução das perdas e o investimento na aquisição e instalação dos bancos de capacitores.

A literatura aborda extensamente este problema. BARAN and WU (1989a) divide o problema de alocação de bancos em dois níveis hierárquicos. Primeiro busca a localização e a quantidade de bancos, para, numa segunda etapa, encontrar o tipo (fixo ou automático) e tamanho dos bancos. GOSWAMI et al (1999) resolve o problema fazendo uma pré-seleção das barras mais sensíveis à alocação de capacitores (barras candidatas). Assim, o espaço de busca é reduzido, diminuindo o tempo computacional. BORTIGNON and EL-HAWARY (1995), NG et al (2000) e AL-MOHAMMED and ELAMIN (2003) fazem uma revisão das diversas técnicas que vêm sendo utilizadas para resolver esse problema.

SILVA JUNIOR et al (2008a) resolve o problema de alocação de capacitores para minimização de perdas de energia, modelando as variáveis discretas por uma função contínua assim como proposto por OLIVEIRA et al (2009) para a reconfiguração de SDE. Em SILVA JUNIOR et al (2008b) o mesmo problema de alocação de bancos é tratado levando em consideração a existência de 3 patamares ou níveis de carga ao longo do dia – leve, médio e pesado – encontrando uma solução que atende ao mesmo tempo os três níveis de carregamento com as menores perdas.

Muitas vezes, é mais interessante desenvolver uma única ferramenta computacional que resolva o problema de minimização de perdas nos SDE combinando mais de uma alternativa para esse fim, o que pode resultar numa condição operacional mais eficiente. Por exemplo, em SU and LEE (2001) e OLIVEIRA et al (2010) utiliza-

se a alocação de capacitores juntamente com a reconfiguração num mesmo problema, com variação da carga ao longo do dia.

Naturalmente, a extensão dos benefícios da prática de alocação de bancos de capacitores ou qualquer alternativa de investimento para reduzir perdas nos sistemas de distribuição depende das características particulares de cada sistema, como a configuração elétrica da rede e as variações de carga ao longo do período em estudo.

I.2.3. Ajuste de Tapes de Transformadores

Mais uma alternativa para o problema de redução de perdas nos SDE é o ajuste de tapes ou derivações nos transformadores de tape variável existentes em algumas linhas do sistema (LIU et al, 1992). Um atrativo dessa opção é que ela não envolve custo adicional de investimento.

O ajuste de tapes em transformadores estrategicamente localizados, melhora o perfil de tensão na rede, reduzindo as perdas. Evidentemente, também neste caso, a extensão dos benefícios do ajuste dos tapes dependerá das características do sistema em estudo, em particular, da localização dos transformadores de tape variável, uma vez que estes se encontram fixos no sistema. Pode ocorrer que, em determinados sistemas, o ajuste de tapes num transformador pouco ou nada contribua para a redução das perdas, ao passo que em outro transformador, melhor localizado, o ajuste proporcione maior sensibilidade na variação das perdas totais.

A resolução desse problema também resulta em PNLIM de natureza combinatória, onde as variáveis discretas são as posições de ajuste dos tapes.

O ajuste de tapes pode ser uma alternativa adicional na operação dos sistemas de distribuição combinada com outras práticas, como a alocação de capacitores e a reconfiguração (LIU et al, 2002).

I.2.4. Limites de Tensão

A limitação da queda de tensão nos alimentadores de distribuição é um aspecto importante que merece atenção devido à exigência de qualidade do fornecimento de energia. A resolução número 505 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), de 26 de novembro de 2001, estabelece as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão em regime permanente.

Assim, é importante incluir restrições para a violação dos limites de tensão nos problemas de otimização dos SDE. Essa restrição pode ser incluída entre as variáveis que possuem limites máximo e mínimo em um programa de fluxo de potência ótimo (FPO) (SILVA JUNIOR et al, 2008b) ou pode ser apenas uma penalização pela ultrapassagem dos limites (CHANG, 2008), o que levará a ferramenta computacional a selecionar soluções que não apresentem violação.

Enfim, os problemas de otimização relacionados ao planejamento e operação de sistemas de distribuição são muito complexos, tanto pelas próprias características das redes, quanto pelo grande número de variáveis. Nesses problemas, portanto, uma dificuldade adicional muito comum é a necessidade de otimizar funções objetivo multicompromisso, onde os compromissos podem ser conflitantes entre si, de modo que otimizar um compromisso na função pode interferir nos demais. Isso ocorre, por exemplo, quando é preciso minimizar o custo de investimento em bancos de capacitores para reduzir as perdas, ao mesmo tempo em que se deseja minimizar o custo de instalação e não pagar o custo adicional de violação de tensão. Assim, é importante que as ferramentas computacionais utilizadas tenham essa facilidade de incorporar múltiplos compromissos de otimização.

O tópico seguinte apresentará as principais metodologias que têm sido utilizadas na literatura para a solução de problemas de PNLIM envolvendo a otimização dos sistemas de distribuição.

I.3. Metodologias

Uma série de metodologias tem sido proposta para a resolução de problemas de PNLIM, que são, conforme já mencionado, difíceis de resolver, apresentando natureza combinatória elevada e muitas soluções ótimas locais.

Tendo em vista que os sistemas de distribuição comumente são de porte considerável, é impraticável testar todas as soluções possíveis. Além disso, a presença de variáveis discretas dificulta a utilização de ferramentas tradicionais de otimização. Assim, diversas técnicas de programação vêm sendo desenvolvidas para resolver esses problemas, especialmente técnicas baseadas em inteligência artificial, métodos heurísticos e meta-heurísticas. A palavra “heurística” está associada à ideia de “encontrar”. Os métodos heurísticos, de um modo geral, são processos de busca

aleatória de soluções, sem percorrer todas as soluções possíveis, onde o processo é guiado por informações adquiridas ao longo da busca. Os métodos heurísticos se contrapõem aos métodos exatos, visto que não garantem exatamente a solução ótima global. Muitas vezes podem incluir informações previamente conhecidas do problema, chamadas de informações heurísticas, que guiam o algoritmo mais rapidamente no sentido da solução ótima, reduzindo o espaço de busca – a região de todas as soluções possíveis. Enfim, os métodos heurísticos requerem um conhecimento profundo do problema a ser estudado, a fim de que o algoritmo seja desenvolvido com base em características particulares.

No caso dos sistemas de distribuição, um bom desempenho de um algoritmo heurístico para uma rede não implica em sucesso para todas as redes, já que as redes de distribuição, apesar de terem as mesmas características básicas, possuem peculiaridades que as diferenciam entre si (KALANTAR et al, 2006).

Por sua vez, as meta-heurísticas são heurísticas generalizadas, que podem resolver diferentes problemas, sem a necessidade de grandes alterações na estrutura do algoritmo. Permitem modificações, inovações e adaptações nos algoritmos que os tornam mais adequados para cada problema em particular. São, geralmente, métodos de programação inspirados em fenômenos da natureza, como os algoritmos genéticos, baseados na teoria da seleção natural, a “*swarm intelligence*”, baseada no comportamento coletivo de enxames e de insetos sociais, como as formigas e abelhas, além de outras técnicas. Além disso, existem também modelos híbridos, que são desenvolvidos a partir da combinação de diferentes algoritmos entre si, visando complementar uma técnica com a outra, suprimindo deficiências de cada método.

Diante de tantas metodologias, é importante analisar alguns aspectos a fim de escolher uma que seja mais adequada ao problema específico e que seja bem adaptável às suas peculiaridades. Em geral, observa-se que alguns algoritmos são capazes de encontrar soluções de excelente qualidade, porém, são muito lentos. Por outro lado, há algoritmos que são rápidos, mas podem falhar em encontrar uma solução ótima. Embora as heurísticas de modo geral sejam métodos que não garantem a solução ótima com 100% de certeza, muitas vezes é possível obter soluções satisfatórias, bem próximas da solução ótima global, ou mesmo a solução ótima. Portanto, é importante desenvolver métodos que equilibrem rapidez com qualidade das soluções.

Este tópico fornecerá uma visão geral das principais metodologias utilizadas na solução de problemas de PNLIM, em especial, de minimização de perdas em SDE.

I.3.1. Busca Exaustiva

A busca exaustiva consiste na enumeração completa de todas as combinações de solução para o problema, garantindo o ótimo global. Entretanto, mesmo para sistemas de proporções moderadas, é inviável alistar todas as soluções, o que exige grande esforço computacional e tempos de simulação muitas vezes absurdamente longos, seja para o caso do problema de reconfiguração (SARFI et al, 1994) ou para outros problemas de natureza combinatória, como alocação de capacitores e ajuste de tapes (HAFFNER et al, 2009).

Evidentemente, dentre todas as combinações possíveis de soluções de um problema, nem todas são factíveis, possibilitando que muitas sejam previamente descartadas. No entanto, isso não é suficiente para tornar a enumeração exaustiva uma metodologia viável, a não ser em sistemas de dimensões muito pequenas.

I.3.2. Branch and Bound

É uma técnica que pode ser utilizada na resolução de problemas de programação inteira mista. Consiste em um método de programação exata, portanto, capaz de obter o ótimo global. Contudo, para sistemas de grande porte torna-se inviável. Um exemplo que ilustra a aplicação desse método encontra-se em MERLIN and BACK (1975), onde se utiliza essa técnica na reconfiguração de SDE para minimização de perdas ativas. Considera-se uma configuração inicial em malha, em que todas as chaves estão fechadas. A partir desta configuração, o algoritmo desenvolvido determina a abertura sequencial das chaves até que se tenha uma configuração radial. O processo continua até que se tenha uma configuração com perdas mínimas. Em sistemas reais, contudo, essa metodologia não é eficiente, devido ao grande número de configurações possíveis, típico de um problema de natureza combinatória, resultando em tempo computacional elevado (LIU et al, 1989).

Em NUGOLI et al (2006), a técnica *branch and bound* é aplicada no problema de alocação de capacitores, inclusive para um sistema de médio porte (300 barras). A metodologia foi aplicada com êxito devido a se utilizar apenas um pequeno número de barras candidatas para a análise de alocação dos bancos.

I.3.3. Branch Exchange

Branch exchange (ou “troca de ligações”) é um método heurístico muito utilizado no problema de reconfiguração de redes de distribuição. É incluído entre um grupo de algoritmos conhecidos como heurísticas construtivas. Sendo heurístico, não garante a solução ótima global, mas pode conduzir a ótimos locais. Consiste na avaliação de configurações radiais “vizinhas”, geradas a partir de uma configuração radial inicial através do fechamento de uma chave e da correspondente abertura de outra. Ao ser produzida uma nova configuração, outra configuração radial “vizinha” é gerada a partir da primeira (CIVANLAR et al, 1988).

Exemplos de aplicação desse método na reconfiguração de SDE podem ser encontrados em CIVANLAR et al (1988) e BARAN and WU (1989b). ZHANG et al (2008) combina um algoritmo genético com a técnica branch exchange para resolver simultaneamente alocação de capacitores e reconfiguração para redução das perdas.

Outros métodos heurísticos construtivos têm sido usados para resolver problemas dos SDE. Os trabalhos de SILVA JÚNIOR et al (2008a e 2008b) e OLIVEIRA et al (2009 e 2010) propõem a modelagem de variáveis discretas de um PNLIM como funções contínuas. O chaveamento de capacitores e/ou das chaves manobráveis para reconfiguração é modelado por uma função sigmóide, que tem o comportamento muito parecido com a função degrau, mas com a vantagem de ser contínua. Isso permite que a função seja diferenciável e possa ser modelada no FPO. A partir daí é usado um algoritmo heurístico construtivo para buscar a solução ótima.

I.3.4. Busca Tabu

A busca tabu é um processo heurístico que utiliza uma lista de movimentos proibidos (ou “tabus”) pela região de solução a partir do ponto inicial para avançar em direção ao ótimo. A vizinhança de uma solução é explorada a fim de que seja selecionada a melhor solução daquela vizinhança, mesmo que seja pior do que a solução corrente. Essa estratégia permite que a busca escape de regiões de ótimos locais e investigue outras regiões do espaço de busca. Cria-se uma lista tabu, que impede que soluções já investigadas sejam reavaliadas, evitando ciclos repetitivos no processo de busca. É uma ferramenta de otimização aplicada em diversos problemas de natureza combinatória (HUANG et al, 1996).

Destaca-se o trabalho de GALLEGO et al (2001) que propõe um método que utiliza a busca tabu combinada com recursos tomados de outras abordagens, como algoritmos genéticos e simulated annealing, para resolver o problema de alocação de capacitores em redes de distribuição radiais.

I.3.5. Simulated Annealing

Simulated annealing ou “recozimento simulado” é uma meta-heurística de busca local probabilística inspirada nas leis da Termodinâmica, em particular, no processo físico de recozimento de metais (KIRKPATRICK et al, 1983). O processo de recozimento, utilizado em metalurgia, consiste em elevar a temperatura do metal até a fusão e depois resfriá-lo lentamente até atingir o estado sólido. No estado líquido, o metal encontra-se numa configuração de alta energia, em que suas partículas se arranjam aleatoriamente. À medida que o material é resfriado, suas partículas passam para uma configuração de menor energia, até atingir o estado sólido. Na fase sólida, os átomos do material podem se organizar numa configuração de energia mínima, altamente estruturada, formando uma rede cristalina uniforme, que resulta num metal de maior qualidade, com o mínimo de imperfeições. Essa configuração só será alcançada se a temperatura inicial for suficientemente elevada e o resfriamento ocorrer bem lentamente. Se o resfriamento for rápido, a configuração de energia mínima não será obtida e o material conterá inúmeras imperfeições.

O método faz uma analogia com esse processo, onde cada configuração de energia corresponde a uma solução e o nível de energia à função objetivo. Cada solução é escolhida de acordo com um parâmetro T, análogo à temperatura. Quanto maior for T, maior a parcela aleatória da solução, e, ao passo que T diminui, o algoritmo converge progressivamente da direção da solução ótima. O valor de T deve diminuir lentamente para que o algoritmo encontre soluções melhores. Este processo permite adotar soluções de pior qualidade, evitando que a busca fique restrita a uma região de ótimos locais do espaço de busca, o que proporciona uma investigação mais ampla de regiões distantes do ponto inicial e resulta em uma busca mais apurada pela solução ótima.

Em CHIANG et al (1995a e 1995b) a técnica de *simulated annealing* é aplicada na solução do problema de alocação ótima de capacitores para diferentes níveis de carga, incluindo restrições de violação de tensão. Segundo os autores, a técnica mostrou-se eficiente para sistemas de maior porte.

I.3.6. Redes Neurais

Redes neurais artificiais são estruturas computacionais que modelam diversos fenômenos com base no funcionamento das redes neurais biológicas. Esta técnica pertence à área de pesquisa de inteligência artificial. A ideia de inteligência artificial baseia-se na simulação computacional do pensamento humano para resolver problemas. É uma ferramenta importante para diversos problemas de otimização, em particular na análise de complexas redes de distribuição. Em especial, algoritmos estruturados a partir de redes neurais artificiais possuem capacidade de aprendizado e adaptabilidade, qualidades atrativas para a simulação de redes de distribuição, visto que estão constantemente sujeitas a variações, como, por exemplo, na demanda.

AUGUGLIARO et al (2003) utiliza algoritmos de controle para reconfiguração, permitindo automatizar um sistema em instâncias menores, ao invés de automatizá-lo por completo, reduzindo custos. Propõe-se a utilização de um controlador em cada barra para determinar a abertura ou fechamento das ligações que se conectam à barra. Para evitar o isolamento de trechos da rede, é utilizado um algoritmo de rede neural artificial para decidir qual chave deve ser fechada e um algoritmo determinístico para decidir qual chave deve ser aberta.

I.3.7. Algoritmos Genéticos

Diversos algoritmos têm sido desenvolvidos inspirados em fenômenos naturais, especialmente em fenômenos biológicos, dando origem a uma variedade de modelos inspirados nos mais diversos campos da Biologia, como os algoritmos genéticos, inspirados na evolução das espécies; *particle swarm*, baseados na inteligência coletiva de populações e enxames; algoritmos inspirados no comportamento coletivo de insetos sociais, como abelhas e formigas; algoritmos evolutivos inspirados no sistema imunológico.

Os algoritmos genéticos são meta-heurísticas que constituem um grupo de modelos computacionais evolutivos inspirados na teoria da Seleção Natural, fundamentada na ideia de que indivíduos com boas características genéticas possuem maiores chances de sobrevivência e de produzir descendentes cada vez mais aptos, ao passo que os menos aptos tendem a desaparecer. Costumam também ser incluídos no grupo de algoritmos de inteligência artificial.

Nos algoritmos genéticos, o processo se inicia com uma população de indivíduos, onde cada indivíduo representa uma solução. Cada solução pode ser representada por uma sequência de caracteres em um vetor, o que seria análogo a um cromossomo. Cada célula desse vetor, associada a um caractere, seria um gene. A população inicial, composta de indivíduos que carregam soluções aleatórias, é então avaliada com base em um índice de aptidão, ligado à qualidade da solução (valor da função objetivo). Nesse processo de avaliação, ou seleção, os mais aptos são selecionados, ao passo que outros são descartados. A seguir, os indivíduos selecionados passam para a próxima etapa: o cruzamento. Nessa fase do processo, ocorre troca de material genético entre os indivíduos da população (pais), originando outra geração de indivíduos (filhos). Essa troca de material nos cromossomos corresponde, no algoritmo, à troca de trechos de uma solução (parte de um vetor) com um trecho de outra solução (parte de outro vetor), gerando soluções novas, mas com características das anteriores. O próximo passo é a mutação, onde ocorre a troca isolada de um ou mais genes (células do vetor representativo de uma solução) por outro valor (ou bit). Assim, esses processos se repetem, possibilitando a variabilidade dos indivíduos (soluções), ao mesmo tempo em que preservam características desejáveis. Quanto maior a população, maiores serão as chances de se obter boas soluções, no entanto, uma população grande acarretará em tempo computacional mais elevado, especialmente se o sistema em simulação for de maior porte.

Essa técnica encontra grande aplicação nos problemas de distribuição de energia. PARK et al (2009) utiliza um algoritmo genético para resolver a alocação ótima de capacitores minimizando perdas e custos de instalação. SOUZA et al (2009) aplica a metodologia de algoritmos genéticos para a alocação de geração distribuída visando diminuir perdas e limitar violação de tensão. GUIMARÃES et al (2007) desenvolve um algoritmo genético modificado, onde as operações de cruzamento e mutação são especialmente adaptadas para o problema de reconfiguração. Em GUIMARÃES et al (2008) os autores propõem a metodologia utilizando reconfiguração simultaneamente com alocação de capacitores para minimizar perdas.

Uma grande vantagem dos algoritmos genéticos, assim como das meta-heurísticas em geral, é a facilidade de adaptar a metodologia a particularidades de cada problema especial. Por exemplo, isso é feito em MENDOZA et al (2006), onde é avaliado um método que melhora a adaptabilidade e eficiência dos algoritmos genéticos na

reconfiguração de SDE. Segundo os autores, há uma drástica redução no tempo computacional.

A literatura contém ainda diversos métodos híbridos com algoritmos genéticos. Por exemplo, KUO e CHANG (1994) desenvolveram um algoritmo híbrido que associa algoritmo genético com recozimento simulado para reconfiguração de redes de distribuição. KAGAN e OLIVEIRA (1999) apresentam uma ferramenta baseada em algoritmo genético para reconfiguração de SDE visando minimizar perdas. Para garantir a geração de topologias radiais e conexas, o algoritmo proposto utiliza uma codificação apropriada. O modelo inclui também a técnica de lógica *fuzzy*, através de funções de pertinência dos objetivos e restrições, para composição da função de objetivo do algoritmo genético.

Além dos algoritmos genéticos, outros modelos baseados em algoritmos evolutivos são usados nos problemas da distribuição. CHIOU et al (2006) utiliza uma técnica de evolução diferencial híbrida de escala variável para resolver o problema de alocação de capacitores. TRIPATHY and MISHRA (2007) resolvem um problema de localização ótima e controle de um controlador de fluxo de potência unificado simultaneamente com ajuste de taps de transformadores para minimizar perdas e manter a estabilidade de tensão utilizando um algoritmo evolutivo chamado de forrageamento de bactérias (“*bacteria foraging*”).

I.3.8. Particle Swarm

A técnica conhecida como *particle swarm* (“nuvem de partículas” ou “enxame de partículas”) origina-se a partir do conceito de comportamento coletivo de populações (KENNEDY and EBERHART, 1995). Muitos animais, como pássaros, peixes e insetos, quando em grupo, exibem comportamentos complexos e são capazes de realizar tarefas sofisticadas que não fariam isoladamente. Ou seja, a interação entre os indivíduos da população leva ao desenvolvimento de sistemas complexos, o que somente se torna possível graças à atuação da população em conjunto. Por exemplo, movimento ordenado de aves migratórias, construção de ninhos, como um formigueiro, organização de uma colmeia, busca e transporte de alimentos, etc.

Numa concepção mais ampla, a ideia de “*swarm intelligence*” pode se basear também em outros modelos da Biologia, como células e tecidos, sistema imunológico, sistema nervoso e outros.

A analogia com esses sistemas biológicos originou meta-heurísticas onde os indivíduos ou partículas atuam em conjunto varrendo o espaço de busca para encontrar soluções ótimas. Esses algoritmos são, muitas vezes, relativamente simples de implementar e facilmente adaptáveis a problemas diversos.

SALAS et al (2009) compara a utilização de alguns algoritmos heurísticos para resolver o problema de alocação ótima de capacitores, entre eles, uma variante do método *particle swarm*.

I.3.9. Colônia de Formigas

Seguindo a mesma linha do conceito de *particle swarm*, a técnica inspirada em colônia de formigas (*ant colony optimization*) tem sido muito aplicada em problemas de otimização combinatória (COLORNI et al, 1992 e DORIGO et al, 1996). Essa meta-heurística baseia-se no comportamento de formigas ao realizarem a busca de alimento. Observa-se na natureza que as formigas são capazes de formar trilhas que ligam o formigueiro até a fonte de alimento – e essas trilhas, com frequência, correspondem ao menor caminho. Essa comunicação eficiente entre as formigas é possível graças a uma substância química denominada feromônio. As formigas liberam essa substância, deixando-a em suas trilhas, o que atrai outras formigas. Com o tempo, o depósito cumulativo de feromônio faz com que uma grande quantidade de formigas siga a mesma trilha, que em geral corresponde ao caminho mais curto (DORIGO and STÜTZLE, 2004).

De forma análoga, formigas artificiais buscarão soluções para o problema num processo que se inicia aleatoriamente. Cada solução aleatória é representada por uma formiga e o conjunto de formigas (ou soluções) sorteadas corresponde ao formigueiro. A seguir, cada solução (formiga) é avaliada com base no valor da função objetivo correspondente, recebendo um mérito chamado feromônio. Quanto melhor a solução encontrada, maior a quantidade de feromônio a ela associada. Na próxima iteração, o formigueiro não será mais sorteado de forma aleatória, mas sim com base na quantidade de feromônio existente em cada solução. Dessa forma, as melhores soluções terão maior probabilidade de serem sorteadas, guiando a busca das formigas na direção da solução ótima. O processo continua até que algum critério de parada seja alcançado. Naturalmente, quanto maior o formigueiro (mais indivíduos – formigas) maior a chance

de se encontrar soluções ótimas, no entanto, mais lento também será o programa. Essa metodologia será abordada com maiores detalhes no Capítulo 2.

Diversas aplicações da técnica colônia de formigas para os problemas dos SDE são encontradas na literatura. DANIEL et al (2005) e KHOA and PHAN (2006) utilizam essa metodologia para resolver o problema de reconfiguração. Em CHANG (2008) é proposta a aplicação de colônia de formigas para a reconfiguração de redes juntamente com a alocação ótima de capacitores, utilizando apenas um patamar de carga. AHUJA et al (2007) propõe a solução de um problema de reconfiguração por meio de um algoritmo híbrido que combina a técnica de colônia de formigas com um algoritmo baseado em sistema imunológico artificial (“*artificial immune systems*”). A metodologia utiliza uma população de anticorpos para buscar as soluções e também adota a ideia de feromônio para guiar a busca de novas soluções.

I.4. Motivação

No contexto de crescente exigência por qualidade e baixo custo da energia o tema sobre minimização de perdas nos SDE é um campo atrativo de estudo. A fim de reduzir as perdas na distribuição, algumas práticas são adotadas, como a reconfiguração, a alocação de capacitores e o ajuste de tapes. É importante que essas práticas sejam adotadas em conjunto, o que produz resultados mais eficientes. Todavia, o porte e a complexidade das redes de distribuição tornam esses problemas de minimização de perdas difíceis de resolver, caracterizando-se em problemas de natureza combinatória com muitas soluções factíveis e muitos ótimos locais. Uma gama de metodologias tem sido proposta na literatura, porém, observa-se que muitos métodos podem ser aperfeiçoados ou combinados com outras técnicas a fim de melhorar a qualidade das soluções e o tempo de processamento. Assim, o desenvolvimento de métodos computacionais eficientes, capazes de resolver problemas desse tipo, é um campo vasto.

Além disso, embora existam muitas pesquisas sobre métodos de otimização para minimizar perdas nos sistemas de distribuição por meio de alocação de capacitores ou ajuste de tapes, poucos trabalhos propõem a combinação dessas duas práticas a fim de obter melhores resultados. Adicionalmente, existe uma dificuldade em muitas metodologias de representar funções objetivo multicompromisso, tornando atrativa a utilização de técnicas que permitam incluir, num único problema, outros compromissos

para otimização, como restrição de violação de tensão e custo de instalação de capacitores. Outro aspecto a ser considerado é a variação da carga nos SDE, levando à necessidade de formular algoritmos que simulem o problema com diferentes níveis de carga. A carência de trabalhos na literatura que abordem todos esses aspectos simultaneamente constitui-se num motivador para o desenvolvimento desta pesquisa.

I.5. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma ferramenta que resolva o problema de minimização de perdas em sistemas radiais de distribuição por meio da alocação ótima de bancos de capacitores associada ao ajuste ótimo dos tapes de transformadores. Serão considerados na formulação três patamares de carga – leve, média e pesada – além de penalizações por violação de limites de tensão.

Para resolver o problema, apresenta-se uma metodologia baseada na técnica colônia de formigas. O algoritmo desenvolvido propõe uma técnica especializada que permite encontrar soluções de boa qualidade independente de ajustes de parâmetros. A metodologia proposta tem boa aplicabilidade no tratamento de funções multicompromisso.

I.6. Publicação decorrente da pesquisa

Em decorrência da pesquisa realizada na elaboração desta dissertação, o seguinte trabalho foi aceito para publicação:

- CASAGRANDE, C. G., OLIVEIRA, E. J., MARCATO, A. L. M., SOUZA, F. L., SILVA JÚNIOR, I. C., OLIVEIRA, L. W. “Localização de Capacitores e Ajuste de Tapes para Minimização de Perdas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica”. Aceito para publicação no XVIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA) 2010, Bonito, MS.

I.7. Estrutura do Trabalho

Este capítulo apresentou uma visão geral dos SDE, em especial, o problema de minimização de perdas, identificado como PNLIM, além de uma revisão bibliográfica das principais técnicas utilizadas para resolvê-lo. Apresentou também a motivação para a realização deste trabalho, bem como seu objetivo.

O Capítulo II apresenta a técnica colônia de formigas identificando a aplicação específica para alocação de capacitores e ajuste de tapes.

O Capítulo III mostra a formulação desenvolvida neste trabalho para a resolução do problema de minimização de perdas via alocação ótima de capacitores e ajuste ótimo de tapes.

Já o Capítulo IV mostra os estudos de casos realizados e os resultados obtidos a partir da simulação do algoritmo desenvolvido. E, finalmente, o Capítulo V apresentará as conclusões deste trabalho e propostas de desenvolvimentos futuros.

Capítulo II

Meta-heurística Colônia de Formigas

II.1. Introdução

Os fenômenos biológicos têm fascinado pesquisadores por muito tempo, diante de tão grande complexidade e ordem. Sejam os complexos mecanismos da vida, como a reprodução, o metabolismo ou o código genético, seja o comportamento instintivo dos animais ou o pensamento humano, esses fenômenos são muito intrigantes.

Recentemente, um campo de estudo que tem ganhado notoriedade é a modelagem matemática desses fenômenos biológicos. Tanto que hoje existe uma área do conhecimento chamada de Biomatemática. Enquanto a modelagem matemática está fortemente presente em áreas como Física ou Engenharia, na Biologia ela constitui-se num campo de pesquisa relativamente novo (BASSANEZI, 2004). Isso reside no fato de que os sistemas biológicos possuem uma complexidade muito maior e são menos “exatos” que os fenômenos físicos e químicos.

Esse esforço de representar matematicamente fenômenos naturais aparentemente tão distantes da Matemática torna esse estudo ainda mais interessante. Além disso, como é comum tantas vezes nessa ciência, um modelo inicialmente proposto para um determinado fenômeno pode ser estendido para outras áreas. Ou seja, a mesma modelagem pode ser aplicada para estudar outro fenômeno completamente distinto. Isso ocorre, por exemplo, com as equações diferenciais ordinárias, que podem ser usadas para representar matematicamente o comportamento de diversos fenômenos físicos. Assim, a modelagem de uma série de fenômenos biológicos transcende a Biologia,

encontrando grande aplicação em muitas áreas do conhecimento, em particular na Engenharia, sobretudo em problemas de otimização.

Um desses fenômenos observados na natureza de especial interesse neste trabalho é o comportamento e organização dos insetos sociais. Esses insetos, como as abelhas, formigas, vespas e cupins, possuem um alto grau de organização, formando colônias bem organizadas e com uma complexa estrutura social, com indivíduos ocupando funções bem definidas na sociedade. Assim, entre esses insetos, observa-se em geral, que os indivíduos se separam em castas, como a rainha, os soldados, operários, etc. Além disso, é notável a organização que esses grupos possuem para realizar tarefas extremamente complexas, como a construção de um ninho, seja uma colmeia, formigueiro ou vespeiro, ou transportar alimentos de modo ordeiro para a colônia.

Igualmente, existe entre esses insetos notável estrutura de divisão de trabalho. Entre as formigas, por exemplo, além da já mencionada separação em castas dentro da sociedade, ocorre uma divisão de tarefas. Enquanto grupos de indivíduos têm a função de proteger o ninho, outros trabalham cortando folhas, outros transportando-as até o formigueiro. Ainda outras formigas têm a função de alimentar as larvas ou cuidar da limpeza do ninho. Algumas espécies cultivam fungos no interior da colônia a fim de que sirvam de alimento para a população. Outro aspecto curioso é que a divisão de trabalho tem grande flexibilidade, de modo que se um grupo de formigas que realizava determinada função morre, outros indivíduos são capazes de compensar a deficiência, se especializando e realizando aquela tarefa específica (BONABEAU et al, 1999).

Uma característica comum a esses insetos que vivem em colônias é a capacidade de auto-organização. Sistemas auto-organizados possuem uma organização espontânea que parece não ser dirigida por leis físicas aparentes. A ideia de auto-organização surgiu originalmente na Física e na Química, associada à organização de estruturas macroscópicas a partir de processos microscópicos, com estruturas microscópicas se auto-organizando para formar padrões macroscópicos. Sistemas microscópicos aparentemente isolados, como átomos e moléculas, se interagem para formar sistemas organizados altamente complexos, como uma estrutura cristalina de um metal ou até mesmo uma célula viva. Essa ideia tem sido aplicada em sistemas biológicos, em particular, no estudo dos insetos que vivem organizados em colônias (BONABEAU, et al, 1997). Embora os insetos trabalhem de maneira tão organizada, coordenada, como se estivessem sendo comandados por alguém, por um chefe, esse comando central não existe, ou ao menos não é claramente identificado. Os indivíduos sozinhos constituem

uma unidade isolada, um organismo complexo, mas são incapazes de realizar a tarefa individualmente. O trabalho coordenado surge da interação entre os diversos indivíduos, produzindo um resultado final organizado. Os sistemas auto-organizados apresentam características que só são observadas quando se analisa o conjunto de indivíduos (ou seja, todo o conjunto de sistemas menores). No caso das formigas, abelhas, vespas ou cupins, estes são capazes de se auto-organizar, sem um comando central (DETRAIN and DENEUBOURG, 2006).

Um exemplo de processo auto-organizado observado entre insetos sociais é a estigmergia (“*stigmergy*”), que resulta de interações indiretas entre os indivíduos, em que determinado comportamento destes é consequência de efeitos produzidos no ambiente local por um comportamento anterior (BECKERS et al, 1994). Esse fenômeno é observado na construção de ninhos. Um grupo de formigas consegue construir um formigueiro a partir de interações indiretas entre todas elas. Uma formiga altera o ambiente, depositando uma quantidade de terra em determinado local, o que se constitui num estímulo para que outra formiga faça o mesmo no mesmo local, que, por sua vez, estimula uma próxima formiga e assim por diante. Com o tempo, observa-se, em consequência dessas interações, que o ninho é construído (BONABEAU et al, 1999). O processo é auto-organizado, sem um controle central, e só ocorre através do processo global, a interação de muitas formigas. Em outras palavras, a construção do formigueiro é um processo decorrente de um comportamento coletivo. Uma formiga ou mesmo algumas, seriam incapazes de realizar o processo.

Outro fenômeno que se constitui num exemplo de sistema auto-organizado entre os insetos é o forrageamento de formigas. Este processo envolve a atividade de procura e transporte de alimento para a colônia (DENEUBOURG et al, 1994). As formigas formam trilhas bem definidas neste processo de busca, formando padrões de rastros característicos para cada espécie diferente, conhecidos como padrões de forrageamento. Em cada uma delas, contudo, é possível perceber que elas são capazes de escolher caminhos ótimos entre a fonte de alimento e a colônia. E, uma vez encontrado esse caminho, a maioria das formigas segue por ele, como se existisse uma estrada, uma trilha por ali. Essas “trilhas” é que dão o padrão de forrageamento típico da espécie. Essa comunicação eficiente entre as formigas se faz por meio do feromônio, substância química depositada por elas onde passam. As formigas são atraídas pela presença do feromônio, o que as induz a seguir pelo caminho que contém a maior concentração dessa substância (BONABEAU et al, 1999).

Além deste, outro processo semelhante é o fenômeno da correição, em que as formigas formam filas organizadas, porém mais densas, com muitos indivíduos, criando uma frente de busca, que avança capturando presas pelo caminho (ASSIS e FERREIRA JÚNIOR, 2005). Este comportamento auto-organizado também é estimulado pela concentração de feromônio no ambiente.

Enfim, os sistemas auto-organizados, especialmente as complexas estruturas e atividades existentes entre os insetos sociais, servem de inspiração para a construção de modelos matemáticos e algoritmos que não só tentam descrever matematicamente esses comportamentos da natureza, como encontram grande aplicação em diferentes áreas do conhecimento, ultrapassando seu objetivo original. Em particular, a atividade de forrageamento das formigas inspirou a técnica de otimização denominada colônia de formigas, que será abordada no tópico seguinte.

II.2. Algoritmo Colônia de Formigas

As formigas, em sua busca por comida, deixam trilhas bem definidas entre a colônia e a fonte de alimento. Conforme já mencionado no item II.1, isso acontece devido ao depósito de feromônio nessas trilhas. Embora o processo de busca se inicie de forma aleatória, se uma formiga encontra um caminho mais curto entre a fonte de comida e o ninho, esta, ao retornar para o ninho, reforçará a trilha de feromônio deixada por ela na ida. Como seu caminho é mais curto, ela percorrerá o trajeto de ida e volta mais vezes do que as outras, que levarão mais tempo para sair e voltar ao ninho, reforçando mais a concentração de feromônio no caminho mais curto. À medida que outras formigas encontrarem essa trilha com maior quantidade de feromônio, estas continuarão depositando a substância, aumentando ainda mais a sua concentração, chegando a um ponto em que praticamente todas as formigas serão atraídas a ir somente por aquele caminho ótimo (DORIGO et al, 1996).

Além disso, as formigas são capazes de responder a alterações no ambiente e encontrar um novo caminho mínimo. Por exemplo, se um obstáculo é colocado no caminho original, os indivíduos encontram outro caminho menor. A Figura II.1 ilustra essa situação (DORIGO et al, 1996). Em (a) os indivíduos caminham pela trilha de feromônio que liga o ninho *A* à fonte de alimento *B*. Ao ser colocado um obstáculo (b), as formigas perdem a trilha de feromônio, ficando desorientadas. Assim, elas precisam

decidir sobre qual caminho tomar. A decisão inicial é aleatória, mas com o tempo, a maioria delas passa a optar pelo caminho mais curto, criando uma nova trilha de feromônio (c).

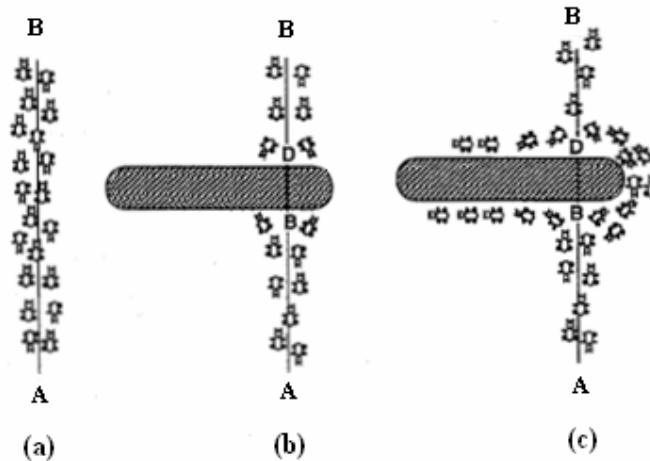


Figura II.1 – Comportamento das formigas diante de um obstáculo.

A fim de modelar matematicamente esse comportamento guiado pela concentração de feromônio, foi realizada por DENEUBOURG and GOSS (1989) uma montagem experimental simples, conhecida como Experimento da Ponte Binária. Em essência, o experimento consistia em conectar uma colônia de formigas a uma área com alimento por meio de uma ponte com dois ramos. Após cuidadosa observação, foi possível chegar a algumas conclusões importantes que serviram de ideia para a modelagem matemática.

Quando os ramos da ponte tinham a mesma extensão, observou-se que as formigas concentravam-se sempre em um dos ramos de forma aleatória, ao passo que, quando um dos ramos era mais longo que o outro, as formigas concentravam-se no ramo mais curto, minimizando a distância da trilha entre a colônia e o alimento. Embora o processo de decisão comece aleatório, com probabilidade de 50% de escolha para cada ramo, à medida que a maioria dos insetos decide por um dos caminhos, a probabilidade de uma nova formiga optar pelo ramo onde a maioria se concentra vai aumentando. Isso demonstra que a decisão de escolha está intimamente ligada à concentração de feromônio no ramo. Essa dinâmica é observada inclusive quando os ramos da ponte têm o mesmo comprimento. Neste caso, as formigas não se distribuem

igualmente pelos ramos, embora eles sejam iguais. Ocorre também a escolha da maioria por um dos caminhos em razão do reforço da trilha de feromônio.

Essa observação levou à formação de um modelo matemático, que tenta prever a decisão de uma formiga por um dos caminhos. O modelo assume que a quantidade de feromônio em cada ramo é proporcional ao número de formigas (BONABEAU et al, 1999). Se uma formiga, após i formigas terem atravessado a ponte, se depara com os dois ramos, A e B , a probabilidade P_A de que esta formiga escolha o ramo A é dada por:

$$P_A = \frac{(k + A_i)^n}{(k + A_i)^n + (k + B_i)^n} \quad (\text{II.1})$$

Onde:

A_i é o número de formigas que passaram pelo ramo A após i formigas terem atravessado a ponte.

B_i é o número de formigas que passaram pelo ramo B após i formigas terem atravessado a ponte.

k é um parâmetro associado ao grau de atração dos indivíduos por um ramo não marcado. Se k é grande, é preciso uma grande quantidade de feromônio depositada até que os indivíduos passem a escolher pelo respectivo ramo. Em outras palavras, k dá uma ideia da quantidade de formigas que devem passar pelo ramo para que a probabilidade de ele ser escolhido seja significativa. Quanto maior k , mais aleatória é a decisão, sendo necessário que muitas formigas passem pelo caminho para que a quantidade de feromônio seja suficiente para aumentar a probabilidade de escolha.

n representa a sensibilidade dos indivíduos à presença de feromônio.

Equação semelhante à equação (II.1) pode ser escrita para a probabilidade P_B de escolha do ramo B depois de i formigas cruzarem a ponte:

$$P_B = \frac{(k + B_i)^n}{(k + A_i)^n + (k + B_i)^n} = 1 - P_A \quad (\text{II.2})$$

O sistema possui ainda uma parcela aleatória na decisão dos indivíduos por seguir um dos ramos, representada por uma variável randômica δ , uniformemente distribuída no intervalo $[0,1]$. Assim, define-se a dinâmica do sistema (BONABEAU, 1999):

$$A_{i+1} = \begin{cases} A_i + 1, & \text{se } \delta \leq P_A; \\ A_i, & \text{se } \delta > P_A \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

$$B_{i+1} = \begin{cases} B_i + 1, & \text{se } \delta > P_A; \\ B_i, & \text{se } \delta \leq P_A \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

$$A_i + B_i = i \quad (\text{II.5})$$

O modelo pode ser estendido para o caso de mais caminhos existentes ou ainda, para o caso de existir mais fontes de alimento. Em suma, observa-se que o comportamento dos agentes da colônia é influenciado pela sua sensibilidade à presença de feromônio e à quantidade de feromônio depositada, parâmetros que podem variar entre as espécies. Outro fator que pode ser significativo no comportamento do grupo é a taxa de evaporação do feromônio. Se a evaporação for lenta, por exemplo, as formigas ainda continuarão numa trilha mesmo após a fonte de comida ter se esgotado, retardando a procura e obtenção de uma nova rota. Ademais, o número de agentes na colônia também será importante no resultado final. Poucas formigas levarão mais tempo para encontrar um caminho ótimo.

O modelo da ponte binária serviu de base para uma melhor compreensão do comportamento das formigas na atividade de forrageamento, através da formulação de um modelo matemático. A compreensão dessa dinâmica em linguagem matemática levou ao desenvolvimento do algoritmo colônia de formigas (COLORNI et al, 1992 e DORIGO et al, 1996).

O algoritmo colônia de formigas tenta reproduzir o comportamento das formigas reais para construir a solução de diversos problemas de otimização. Formigas artificiais, agentes abstratos, realizam o processo de busca das soluções de forma conjunta, imitando os insetos reais. Por outro lado, esses agentes artificiais podem ser sofisticados com habilidades e técnicas adicionais não encontradas nas formigas reais, a fim de

tornar o algoritmo mais eficiente e adaptado ao problema específico. O tópico seguinte apresenta uma descrição da estrutura básica de um algoritmo colônia de formigas.

II.2.1. Estrutura Básica de um Algoritmo Colônia de Formigas

A Figura II.2 apresenta a estrutura básica de um algoritmo colônia de formigas. Cada um dos passos é detalhado a seguir.

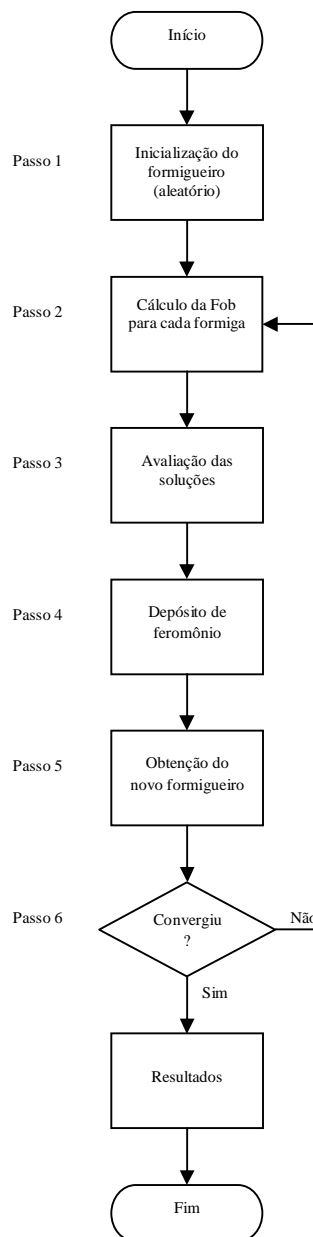


Figura II.2 – Fluxograma básico de um algoritmo colônia de formigas.

Passo 1: Inicialização do formigueiro.

Em termos gerais, o algoritmo colônia de formigas é inicializado com uma população de agentes que representarão informações referentes à solução do problema. Esse conjunto de agentes ou população, que será um conjunto de soluções, é o formigueiro. O processo tem início de forma completamente aleatória, sendo essas soluções iniciais (ou decisões das formigas) escolhidas ao acaso.

Passo 2: Cálculo da Fob para cada formiga.

Neste passo, calcula-se a função objetivo do problema (Fob) para cada uma das soluções.

Passo 3: Avaliação das soluções.

O passo seguinte é avaliar as soluções obtidas. Essa avaliação é feita com base no valor da função objetivo encontrada por cada formiga. A cada solução avaliada é atribuído um valor numérico que corresponde ao “feromônio”. Se, por exemplo, a Fob deve ser minimizada, quanto menor o valor desta, maior será o valor numérico do feromônio associado a esta solução. Ou seja, de maneira geral, soluções melhores terão maior valor de feromônio associado a elas, ao passo que soluções avaliadas como ruins receberão um valor menor de feromônio. Assim, é possível saber como foi avaliada cada solução. Feita essa avaliação de todas as soluções, o próximo passo é guardar essa informação, por meio do depósito de feromônio.

Passo 4: Depósito de Feromônio.

O depósito de feromônio é importante a fim de guardar a informação de quais soluções foram mais bem avaliadas. A cada iteração, o depósito é cumulativo, tornando a quantidade de feromônio cada vez mais acentuada nas melhores soluções.

No algoritmo, o feromônio corresponde, como já mencionado, a uma informação numérica, que, no caso em que se deseja minimizar a Fob, pode ser obtida pelo inverso do valor desta. Essa maneira de calcular o valor do feromônio pode variar de acordo com cada programa, adaptando-se ao que for mais eficiente para o problema específico.

A ideia, no entanto, em geral é semelhante: atribuir maior depósito de feromônio às melhores soluções.

O valor numérico associado ao feromônio pode ser armazenado num vetor ou matriz de feromônio, cuja dimensão vai depender do problema específico. Um vetor seria conveniente no caso de as formigas carregarem apenas um parâmetro para a solução, como, por exemplo, na analogia com as formigas reais, a escolha de um caminho possível entre dois pontos. Para muitos problemas, porém, os agentes irão escolher mais de um parâmetro para solução.

Como a concentração de feromônio é cumulativa, a cada iteração a sua quantidade para cada solução é atualizada pela adição do depósito de feromônio de todas as formigas na iteração atual, conforme a equação (II.6):

$$\tau^i(m) = \tau^{i-1}(m) + \Delta\tau^i(m) \quad (\text{II.6})$$

Onde:

$\tau^i(m)$ é a quantidade total de feromônio para a solução m na iteração i .

$\tau^{i-1}(m)$ é a quantidade total de feromônio para a solução m na iteração anterior à iteração i .

$\Delta\tau^i(m)$ é o depósito de feromônio de todas as formigas para a solução m na iteração i , dado por:

$$\Delta\tau^i(m) = \sum_{k=1}^{nf} \Delta\tau_k^i(m) \quad (\text{II.7})$$

Onde:

nf é o número de formigas.

Outro aspecto que deve ser levado em conta a fim de tornar o algoritmo mais eficiente é a evaporação do feromônio. Sem uma taxa de decaimento da quantidade de feromônio, o algoritmo não terá um bom desempenho. A evaporação permite que soluções ruins sejam “esquecidas”, além de permitir que a busca não fique presa em ótimos locais e possa varrer mais amplamente o espaço de soluções (BONABEAU et al,

1999). Assim, introduzindo um coeficiente de evaporação ρ , que pode variar entre 0 e 1, a equação (II.6) fica:

$$\tau^i(m) = (1 - \rho) \cdot \tau^{i-1}(m) + \Delta\tau^i(m) \quad (\text{II.8})$$

Passo 5: Obtenção de novas soluções.

A seguir, as formigas escolhem suas próximas decisões baseadas na concentração de feromônio gerada no passo anterior. Ou seja, o novo sorteio das soluções será ponderado pela quantidade de feromônio correspondente a cada solução. Isso é feito por meio de uma regra de transição, que fornece a probabilidade de cada nova formiga k escolher a solução m :

$$P_k(m) = \frac{[\tau(m)]^\alpha \cdot [\eta(m)]^\beta}{\sum \{[\tau]^\alpha \cdot [\eta]^\beta\}} \quad (\text{II.9})$$

Onde:

- $P_k(m)$ é a probabilidade de que a formiga k escolha a solução m .
- $\tau(m)$ representa a quantidade de feromônio da solução m .
- $\eta(m)$ é uma informação prévia do problema, um índice de atratividade de escolha pela solução m .
- α e β são parâmetros de controle (fatores de escala), que determinam o peso relativo da influência da concentração de feromônio ou da informação prévia do problema. Se, por exemplo, $\alpha \gg \beta$, a quantidade de feromônio depositada é mais importante do que a informação prévia do problema na decisão dos agentes.

A ideia da equação (II.9) é semelhante à equação (II.1). No entanto, a equação (II.9) é mais geral, podendo ser mais facilmente aplicada e adaptada para diversos problemas.

Sorteado o novo formigueiro (conjunto de soluções) baseado na quantidade de feromônio, onde cada solução tem uma probabilidade de ser escolhida dada pela

equação (II.9), cada formiga repete o procedimento, retornando ao Passo 2. Antes, porém, é feito o teste de convergência do algoritmo (Passo 6).

Passo 6: Teste de Convergência.

Este passo consiste em verificar se o critério de parada do algoritmo foi atendido. Enquanto isso não ocorre, o processo continua, retornando ao Passo 2.

O processo iterativo continua até que algum critério de parada seja atendido, como por exemplo, um número máximo de iterações. Entretanto, diversas sofisticções e adaptações podem ser feitas na estrutura básica do algoritmo ou no critério de parada, a fim de tornar a busca mais eficiente.

A cada atualização da quantidade de feromônio, é realizado um novo sorteio de soluções baseado na regra de transição (equação II.9). À medida que os depósitos de feromônio prosseguem, a sua quantidade total vai aumentando nas melhores soluções, orientando a busca. Evidentemente, quanto maior a população de formigas no algoritmo, maiores as chances de ser encontrado o ótimo global. Por outro lado, maior também será o tempo computacional.

Na literatura é possível encontrar inúmeras maneiras de executar os passos básicos do algoritmo, bem como uma série de modificações. O próximo tópico mostrará alguns exemplos de como essa técnica tem sido aplicada, em particular, nos problemas de minimização de perdas nos sistemas de distribuição.

II.3. Aplicações do Algoritmo Colônia de Formigas em Problemas de Minimização de Perdas nos SDE

O algoritmo colônia de formigas é uma ferramenta bem adequada para tentar resolver o problema de minimização de perdas seja por alocação de capacitores, ajuste de tapes, reconfiguração ou uma combinação de mais de uma dessas práticas. É uma meta-heurística bastante adaptável, permitindo certa liberdade de formulação do problema, de detalhes e execução dos passos do algoritmo. Os exemplos a seguir, encontrados na literatura, ilustram como esse método pode ser utilizado e adaptado para resolver este problema.

CHANG (2008) utiliza essa técnica para resolver o problema de reconfiguração e alocação de capacitores para redução de perdas nos SDE. Sua função objetivo é minimizar as perdas (equação II.10). Foram incluídas no algoritmo penalizações por violação de limites de tensão e corrente, que devem, preferencialmente, estar compreendidas nos intervalos das inequações (II.11) e (II.12).

$$\min Fob = \min(P_t + \lambda_v \cdot S_{CV} + \lambda_I \cdot S_{CI}) \quad (\text{II.10})$$

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (\text{II.11})$$

$$I_i \leq I_{i,\max} \quad (\text{II.12})$$

Onde:

- P_t é o total de perdas ativas do sistema.
- λ_v e λ_I são penalidades pelas violações dos limites de tensão e corrente, respectivamente. Se não há violação, seu valor é igual a zero.
- S_{CV} é a soma dos quadrados das violações de tensão.
- S_{CI} é a soma dos quadrados das violações de corrente.
- V_i é o valor da tensão na barra i .
- V_{\min} e V_{\max} são os limites mínimo e máximo de tensão nas barras, respectivamente.
- I_i é a magnitude da corrente no ramo i .
- $I_{i,\max}$ é o limite máximo de corrente na linha i .

Observa-se que facilmente pode ser incorporada no problema uma função objetivo multicompromisso, onde, neste caso, se busca minimizar 3 compromissos simultaneamente: as perdas, as violações de tensão e as violações de corrente.

A perda de potência ativa $P_{i,j}$ em cada linha, ou seja, entre cada barra i e j que sejam ligadas entre si, é dada nesta formulação pela equação (II.13) e a perda total P_t do sistema é obtida a partir do somatório das perdas em todas as linhas (equação II.14). Essas perdas são sempre determinadas após o cálculo do fluxo de carga no sistema.

$$P_{i,j} = R_{i,j} \cdot \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (\text{II.13})$$

$$P_t = \sum P_{i,j} \quad (\text{II.14})$$

Onde:

$R_{i,j}$ é a resistência da linha entre as barras i e j .

P_i é a potência ativa que sai da barra i .

Q_i é a potência reativa que sai da barra i .

O primeiro procedimento do algoritmo é calcular o fluxo de carga e as perdas para o caso base, ou seja, sem alterações nas chaves de reconfiguração e sem alocar bancos de capacitores. Então, começam os sorteios das soluções (formigas) aleatoriamente. Cada formiga escolhe uma barra do sistema e sorteia uma quantidade de bancos de capacitores que será instalada. Depois sorteia quais chaves serão abertas/fechadas para a reconfiguração. As soluções são avaliadas, segundo o valor da função objetivo e então é atualizada a quantidade de feromônio, conforme a equação (II.8). O valor do feromônio é dado pelo inverso da Fob e armazenado em duas matrizes de feromônio, uma para a alocação de bancos, tendo a dimensão de número de barras por quantidade máxima de bancos, e outra para os estados das chaves manobráveis.

A regra de transição é semelhante à equação (II.9), baseada na quantidade de feromônio na respectiva solução (τ) e no inverso da “distância” (η). O parâmetro η pondera que barras mais próximas da barra onde a formiga está têm melhor chance.

O algoritmo ainda guarda em cada iteração a melhor solução encontrada pelas formigas (melhor formiga) a fim de compará-la com as próximas soluções encontradas.

O critério de parada do algoritmo é um número máximo de iterações ou se todas as formigas selecionam uma mesma solução.

PIMENTEL FILHO et al (2009) realiza uma aplicação semelhante do algoritmo anterior, porém utilizando apenas alocação de capacitores para minimizar perdas. A função objetivo é mais simples, contendo apenas a minimização de perdas (somente 1 objetivo a ser minimizado), sem restrições de violação de tensão ou corrente.

Uma diferença importante é a utilização de uma informação heurística juntamente com a quantidade de feromônio na regra de transição para calcular as probabilidades de escolha das formigas (equação II.9). A escolha das formigas é baseada na concentração de feromônio (τ) e na informação heurística (η). A informação heurística é uma

informação prévia do problema e neste caso, trata-se da atratividade de adicionar um banco de capacitor em determinada barra j , sendo o j -ésimo componente do vetor gradiente ∇P_t (MEDEIROS JÚNIOR e PIMENTEL FILHO, 1998). Assim, tem-se:

$$\eta_j = \frac{\partial P_t}{\partial Q_j} \quad (\text{II.15})$$

Pode-se entender η_j como um índice de sensibilidade do impacto que a injeção de potência reativa na barra j provoca nas perdas totais do sistema.

Os outros aspectos do algoritmo são muito parecidos a CHANG (2008), inclusive o critério de convergência, que é somente o número máximo de iterações.

Outro exemplo de aplicação do algoritmo colônia de formigas encontra-se em KASAEI and GANDOMKAR (2010), em que se utiliza alocação de capacitores simultaneamente com reconfiguração para minimizar as perdas. O algoritmo geral é também bastante parecido com os dois exemplos mencionados acima. A diferença mais notável está na regra de transição (equação II.9), especificamente no parâmetro η . A regra de transição é baseada no feromônio (τ), que é o inverso das perdas, e em η , que é a diferença entre as perdas do caso base ($P_{t,original}$) e as perdas da solução avaliada ($P_{t,atual}$). Dessa forma:

$$\tau_j = \frac{1}{P_{t,atual}} \quad (\text{II.16})$$

$$\eta_j = P_{t,original} - P_{t,atual} \quad (\text{II.17})$$

Ainda ANNALURU et al (2004) trata o problema com a técnica colônia de formigas através de uma função objetivo multicompromisso mais completa, em que minimiza o custo da perda total de energia em vários patamares de carga, o custo do pico de perda de potência ativa e o custo dos bancos de capacitores. A equação (II.18) mostra essa função:

$$\min \text{Custo} = \min k_e \sum_{i=1}^L t_i P_i + k_p P_o + k_c \sum_{j=1}^n C_j \quad (\text{II.18})$$

Onde:

- k_e , k_p e k_c são os custos da energia, da potência de pico e do banco de capacitor, respectivamente. O custo do capacitor é proporcional ao custo do kVAr.
- L é o número de patamares ou níveis de carga em estudo.
- t_i é o tempo de duração do nível de carga i .
- P_i é a perda de potência ativa para o nível de carga i .
- P_o é o pico de perda de potência ativa.
- n é o número de barras do sistema.
- C_j é o número de bancos de capacitores instalados na barra j .

Cada solução (formiga) escolhe algumas barras e instala uma quantidade de bancos de capacitores. O fluxo de carga é calculado com essa adição de potência reativa e fornece as perdas do sistema. Então a função objetivo é avaliada para cada solução, que recebe a quantidade de feromônio associada ao inverso do valor da Fob. No entanto, são montadas duas matrizes de feromônio: uma para avaliar as melhores barras a receber bancos de capacitores e outra para decidir quantos bancos serão instalados (ou a quantidade de potência reativa a ser injetada na barra). Os autores justificam essa formulação devido a algumas concessionárias decidirem previamente um número limitado de barras a receber bancos, devido a problemas de custo de instalação e manutenção. Assim, o problema é resolvido em dois níveis hierárquicos: a escolha das barras em primeiro plano e, a seguir, a escolha da quantidade de bancos a serem instalados.

A regra de transição, para a escolha de novas soluções, foi modificada em relação à equação (II.9), sendo baseada apenas na quantidade de feromônio, e representada então por:

$$P(j) = \frac{\tau(j)}{\sum \tau} \quad (\text{II.19})$$

Como existem duas matrizes distintas de feromônio, a regra de transição será calculada duas vezes, uma para cada matriz de feromônio. O índice j , portanto, que se

refere a uma solução, é relativo à barra ou à quantidade de bancos cuja probabilidade de escolha está sendo avaliada.

A atualização do feromônio em cada iteração é semelhante ao método já descrito (equação II.8), no entanto, a evaporação é um valor aleatório, sorteado a cada atualização, e não um valor constante.

O algoritmo é executado para um número significativo de iterações até que uma solução satisfatória seja encontrada.

Os exemplos mencionados neste tópico ilustram a diversidade de modificações que podem ser feitas na estrutura básica do algoritmo colônia de formigas a fim de se obter melhores resultados.

II.4. Conclusão

Este capítulo apresentou a técnica de otimização colônia de formigas, sua estrutura básica, além de alguns exemplos encontrados na literatura que mostram como essa meta-heurística pode ser aplicada ao problema de minimização de perdas nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Conforme visto, esta técnica permite inúmeras modificações na estrutura básica do algoritmo, adaptando-o e tornando-o mais eficiente para resolver o problema específico.

O capítulo subsequente apresenta o algoritmo proposto neste trabalho, que inclui algumas modificações no algoritmo básico.

Capítulo III

Metodologia Proposta

III.1. Introdução

Este capítulo apresenta a metodologia proposta neste trabalho, baseada no algoritmo colônia de formigas, para resolver o problema de minimização de perdas nos SDE, considerando a alocação de capacitores associada ao ajuste de tapes de transformadores e a penalizações por violação de limites de tensão. A formulação utilizada acomoda três patamares de carga, tendo boa aplicabilidade no tratamento de funções multicompromisso. Além disso, foram incluídas modificações na estrutura básica do algoritmo, tornando-o mais eficiente.

III.2. Formulação do Problema

O problema de alocação ótima de bancos de capacitores para redução de perdas nos SDE é, em geral, formulado a fim de minimizar o custo de investimento em aquisição e instalação dos bancos mais o custo das perdas de energia, buscando encontrar as menores perdas com o menor investimento. A inclusão do ajuste de tapes permite uma redução a mais do custo total, uma vez que essa ação não envolve qualquer investimento adicional e pode diminuir ainda mais a perda de potência ativa. Além disso, com o ajuste de tapes, espera-se ainda que seja possível instalar menor quantidade de bancos, reduzindo ainda mais o investimento e, conseqüentemente, o custo total de operação.

A formulação proposta neste trabalho utiliza três patamares ou níveis de carga – leve, médio e pesado – permitindo que os tapes sejam ajustados em diferentes valores de acordo com a carga em cada patamar. Embora os tapes possam ser ajustados livremente em cada nível de carga, a alocação de bancos de capacitores é a mesma em todos os patamares, pois os capacitores considerados no problema são fixos. Assim, ao considerar os diferentes patamares de carga simultaneamente numa mesma simulação, o acoplamento entre os patamares é dado pela decisão de onde instalar e a quantidade de bancos instalados. Dessa forma, o problema adquire uma complexidade adicional, ao passo em que o ajuste ótimo dos tapes é realizado com base em cada nível de carga, mas os capacitores são instalados de modo a atender a uma solução ótima para os três patamares simultaneamente.

Um grande atrativo do modelo utilizado é a facilidade de utilização de uma função multicompromisso, permitindo que vários compromissos sejam otimizados. Neste caso, além da minimização do custo da energia, referente à minimização das perdas, e o investimento em potência reativa instalada por meio de bancos de capacitores, são adicionados ao problema a otimização do custo de instalação dos bancos mais a penalização por violação dos limites de tensão nas barras.

É importante entender a diferença entre o custo de investimento em aquisição dos bancos e o custo de instalação dos bancos. O primeiro refere-se ao custo da potência reativa (em MVAR ou kVAR) instalada, representando o custo da compra dos bancos de capacitores. Por outro lado, o custo de instalação é fixo, um custo adicional pela operação de instalar os bancos numa barra. Este custo é o mesmo para cada barra que recebe alocação de bancos, independente da quantidade de potência reativa instalada ou da quantidade de bancos. A inclusão desse custo adicional na função objetivo permite que, na busca da melhor solução, seja dada preferência a uma solução que instale uma determinada quantidade de bancos no menor número possível de barras.

Assim, a formulação matemática do problema pode ser expressa pelas equações (III.1) a (III.5).

$$\min Fob = T \cdot \sum_{i=1}^{npt} k_i \cdot P_i \cdot perc_i + \sum_{i=1}^{npt} Cvio_i + Cinv \quad (III.1)$$

$$Cinv = C_{MVAR} \cdot Q_b \cdot N_b + C_{inst} \cdot N_{barras} \quad (III.2)$$

$$P_i = \sum_1^{NL} G_{km} \cdot (V_k^2 + V_m^2 - 2 \cdot V_k \cdot V_m \cdot \cos \theta_{km}) \quad (\text{III.3})$$

Sujeito a:

$$Pg_k - Pl_k + \sum_{m \in \Omega_k} P_{km} = 0 \quad (\text{III.4})$$

$$Qg_k - Ql_k + \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km} = 0 \quad (\text{III.5})$$

Onde:

T	representa o tempo de operação do sistema, em horas.
npt	é o número de patamares ou níveis de carga em simulação.
k_i	é o custo unitário da energia elétrica em cada patamar de carga i , em \$/kWh.
P_i	representa as perdas totais do sistema para o patamar de carga i , em kW.
$perc_i$	é o percentual do tempo total T em que o sistema opera no patamar i .
$Cvio_i$	é o custo de violação de tensão para o nível de carga i , em \$.
$Cinv$	representa o custo total de investimento, em \$, que possui duas parcelas: uma referente ao investimento nos bancos de capacitores (custo do MVAR) e outra relativa ao custo de instalação dos bancos.
C_{MVAR}	é o custo da potência reativa, em \$/MVAR.
Q_b	é a potência reativa de cada banco de capacitores, em MVar.
N_b	é o número total de bancos instalados.
C_{inst}	é o custo de instalação de bancos de capacitores por barra, em \$.
N_{barras}	é o número total de barras que tiveram instalação de bancos.
V_k	é a magnitude da tensão na barra k .
V_m	é a magnitude da tensão na barra m .
G_{km}	é a condutância entre a barra k e a barra m .
θ_{km}	é a variação angular entre as tensões das barras k e m .
NL	é o número de linhas do sistema.
Pg_k	representa a potência ativa gerada na barra k .

Pl_k	representa a carga ativa conectada na barra k .
P_{km}	é o fluxo de potência ativa ao longo de cada circuito k-m, estando a barra m conectada à barra k ($m \in \Omega_k$).
Qg_k	representa a potência reativa gerada na barra k .
Ql_k	representa a carga reativa conectada na barra k .
Q_{km}	é o fluxo de potência reativa ao longo do circuito k-m, estando a barra m conectada à barra k ($m \in \Omega_k$).

A equação (III.1) representa a função objetivo do problema, com 3 parcelas: a primeira parcela referente ao custo da energia, a segunda referente ao custo pela violação de tensão e a terceira relativa ao custo total de investimento em bancos de capacitores.

A equação (III.2) representa o custo total de investimento C_{inv} que inclui o investimento na aquisição dos bancos mais o custo de instalação por barra.

A equação (III.3) representa o cálculo das perdas do sistema, que é sempre efetuado após o cálculo do fluxo de potência. Além disso, o fluxo de potência no sistema atende às equações estáticas de fluxo de carga, dadas pelas equações (III.4) e (III.5).

Adicionalmente, foi incluída uma penalização por violação de tensão nas barras, ou seja, a magnitude da tensão deve estar dentro de um limite, conforme a inequação (III.6).

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (\text{III.6})$$

Onde:

V_{\min}	é o limite mínimo de tensão em uma barra, em pu.
V_{\max}	é o limite máximo de tensão em uma barra, em pu.
V_i	é a magnitude de tensão na barra i , em pu.

O custo de violação de tensão (C_{vio}) na função objetivo (equação III.1) é igual a zero se as tensões em todas as barras não são violadas, ou seja, se todas as tensões têm seu módulo dentro dos limites da inequação (III.6). Caso contrário, atribui-se um custo adicional (penalização) para essa solução, com o parâmetro C_{vio} assumindo um valor

maior (CHANG, 2008). Neste caso, a penalização cobrada será proporcional ao desvio de tensão de cada barra e C_{vio} será a soma de todas as penalizações aplicadas a cada barra com tensão violada. Isso faz com que as soluções que não apresentem violação de tensão ou que tenham menor violação sejam melhores, direcionando o processo de busca pela solução ótima.

A equação (III.7) esclarece como é cobrada a penalização em cada barra.

$$Pen_i = desvio_i \cdot C \quad (III.7)$$

Onde:

- Pen_i é a penalização, em \$, cobrada pela violação de tensão na barra i .
 $desvio_i$ é o desvio de tensão na barra i em relação aos limites máximo e mínimo, ou seja, $desvio_i = V_i - V_{max}$ se $V_i > V_{max}$ ou $desvio_i = V_{min} - V_i$ se $V_i < V_{min}$.
 C é um valor constante ao qual a penalidade será proporcionalmente cobrada.

Assim, na ocorrência de violações de tensão, C_{vio} será o custo ou penalização total da solução encontrada, ou seja, a soma de todas as penalizações Pen_i de cada barra com tensão violada.

As equações (III.1) a (III.7) descrevem o problema a ser resolvido, que se caracteriza por um problema de otimização não linear inteira mista e função objetivo multicompromisso, sendo de difícil solução. Dessa forma, apresenta-se a seguir a proposta de solução do problema baseada na técnica colônia de formigas combinada com modificações pertinentes, a fim de melhorar o processo de busca e encontrar soluções de boa qualidade.

III.3. Algoritmo Colônia de Formigas Proposto

O funcionamento do algoritmo colônia de formigas já foi descrito no Capítulo 2. Pode-se resumir sua estrutura essencialmente em três passos:

- i. Escolha aleatória de várias soluções do problema a ser resolvido. Cada solução sorteada é representada por uma formiga. Esse conjunto de formigas constitui o formigueiro;
- ii. Obtenção do valor da função objetivo para cada solução (formiga) sorteada. A partir daí, cada solução será avaliada com base no valor da função objetivo correspondente, associando a cada uma um valor numérico chamado feromônio. Assim, a melhor solução (ou a melhor formiga) terá a maior quantidade de feromônio depositada;
- iii. Sorteio de um novo formigueiro baseado na quantidade de feromônio presente em cada solução avaliada. O processo retoma o passo (ii) e continua até que seja atendido um critério de parada.

Esses passos podem ser executados de diversas formas, de modo a se adequar da melhor maneira ao problema em questão. Na literatura existem diversos exemplos e alguns foram mostrados no Capítulo 2. Este trabalho apresenta algumas modificações na estrutura básica do algoritmo a fim de se adequar à resolução do problema apresentado no item III.2.

O fluxograma da Figura III.1 mostra a estrutura e os passos do algoritmo proposto. Cada um dos passos é descrito em seguida.

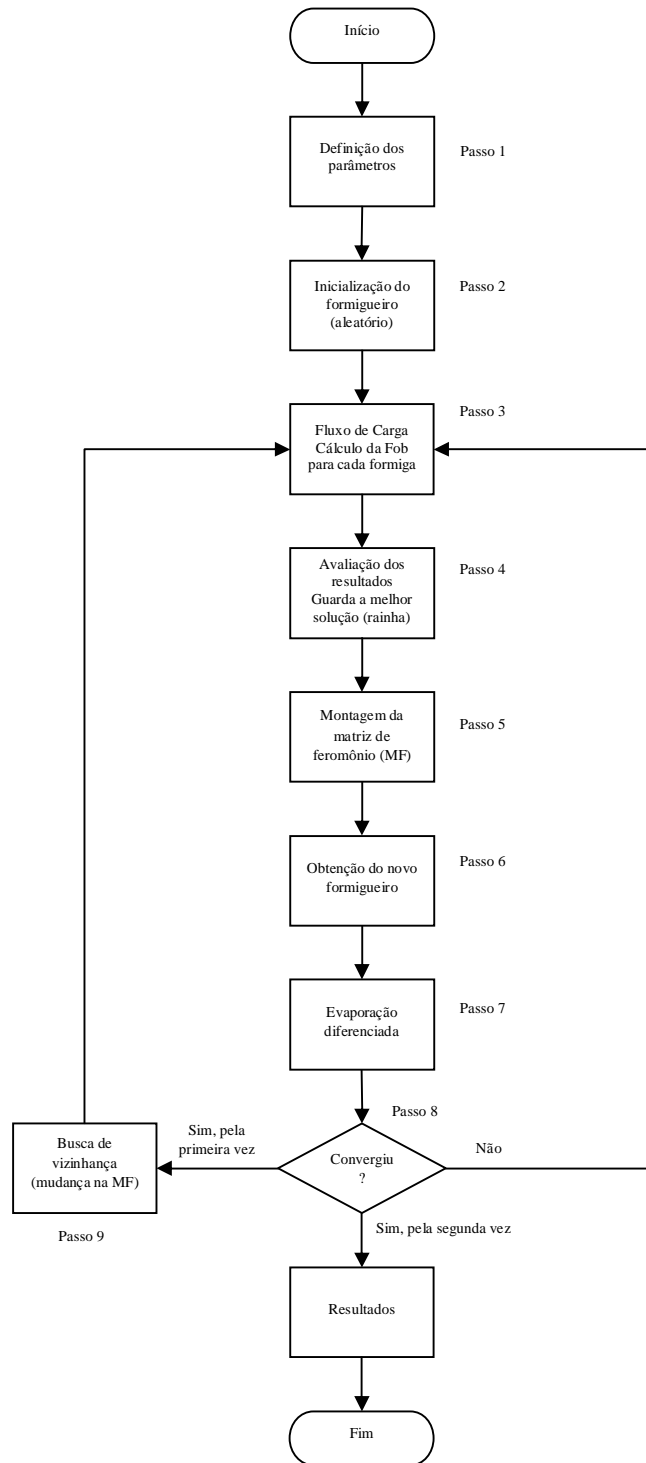


Figura III.1 – Fluxograma do algoritmo proposto.

Passo 1: Definição dos parâmetros.

Neste passo são definidos os parâmetros do algoritmo, como o número de formigas, taxas de evaporação do feromônio e qual o percentual dos sorteios das soluções que será sempre aleatório. Além disso, é feita a leitura de dados do sistema em análise e são definidas as variáveis específicas do problema, como o número máximo de bancos de capacitores que serão instalados por barra, dimensão dos bancos, percentual máximo de barras do sistema que poderá receber instalação de bancos, custos da potência reativa instalada, da energia, da instalação dos bancos e da violação de tensão, tempo de operação do sistema, discretização do ajuste dos tapes, limites de tensão.

É importante esclarecer o parâmetro percentual máximo de barras a receber bancos. Observa-se que, em problemas de alocação de capacitores em SDE, normalmente as soluções encontradas envolvem a alocação de bancos em poucas barras (como exemplo, BARAN and WU, 1989a, SILVA JUNIOR et al, 2008b e PARK et al, 2009, entre outros encontrados na literatura). Assim, uma limitação prévia da quantidade máxima de barras a receber bancos exclui soluções que aloquem grande quantidade de capacitores no sistema, as quais já se sabe que não terão bom desempenho. Ressalta-se que esse percentual não envolve nenhum critério de seleção de barras candidatas a receber a instalação de bancos. É apenas uma limitação da quantidade máxima de barras que poderão ser sorteadas. Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, diversas simulações foram feitas variando esse percentual e constatou-se que um percentual em torno de 20% a 40% é satisfatório, dependendo de cada sistema.

Passo 2: Inicialização do Formigueiro.

No segundo passo são sorteadas as formigas que compõem o conjunto de soluções iniciais, inteiramente aleatórias. Cada formiga carrega uma solução, que envolve o ajuste dos tapes de cada transformador do sistema para cada um dos patamares de carga e a localização e quantidade de bancos de capacitores instalados.

Assim, cada solução é representada por um vetor cuja dimensão é dada pelo produto do número de patamares de carga (n_{pt}) pelo número de transformadores existentes no sistema (NT) mais o número de barras candidatas (NBC) à alocação. Para fins de simplificação, adotou-se o número de posições no vetor solução para as barras candidatas igual ao número total de barras do sistema. No entanto, antes de realizar o

sorteio dos capacitores cada formiga seleciona aleatoriamente o número de barras que receberá bancos, dentro do percentual máximo de barras do sistema previamente definido.

Para melhor compreensão, considera-se um sistema exemplo constituído por cinco barras e três transformadores de tape variável, esquematizado na Figura III.2.

Cada transformador tem o ajuste de tape variando no intervalo de $[0,9 - 1,1]$ com discretização de 0,05 – ou seja, são possíveis 5 posições de ajuste. Além disso, podem ser alocados no máximo 3 bancos de capacitores em cada barra.

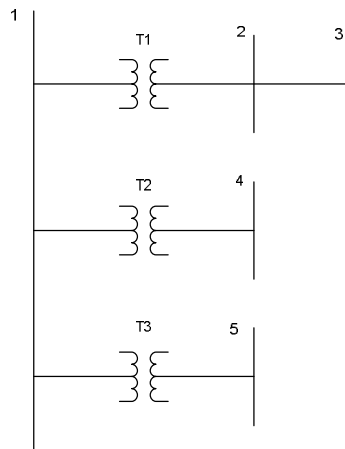


Figura III.2 – Sistema exemplo.

A Figura III.3 mostra a representação da solução para este caso, em que se pode visualizar a informação que uma formiga carrega. O vetor que representa a solução encontrada por uma formiga pode ser entendido da seguinte forma:

- As posições numeradas de 1 a 3 são preenchidas com números referentes aos valores discretos dos tapes dos transformadores T1, T2 e T3 para o nível leve de carregamento. Neste exemplo, cada uma dessas posições pode assumir cinco valores diferentes que equivalem aos cinco possíveis ajustes dos tapes no intervalo de $[0,9 - 1,1]$.
- As posições de 4 a 6 são referentes aos valores discretos dos tapes dos transformadores T1, T2 e T3 para o patamar de carga médio. Também podem ser sorteados 5 números para cada uma dessas posições.

- As posições de 7 a 9 são referentes aos valores discretos dos tapes dos transformadores T1, T2 e T3 no nível de carga pesado. Da mesma forma, 5 posições de ajuste de tapes podem ser escolhidas para preencher cada uma dessas células do vetor solução. É importante notar que essa modelagem do vetor solução permite que os tapes sejam ajustados de forma independente em cada nível de carga.
- As posições 10 a 14 referem-se às barras 1 a 5 do sistema exemplo e contém a quantidade de bancos de capacitores instalados nas barras correspondentes. Como neste exemplo podem ser alocados até 3 bancos por barra, cada uma dessas células pode assumir 4 valores discretos: 0, 1, 2 ou 3 bancos.

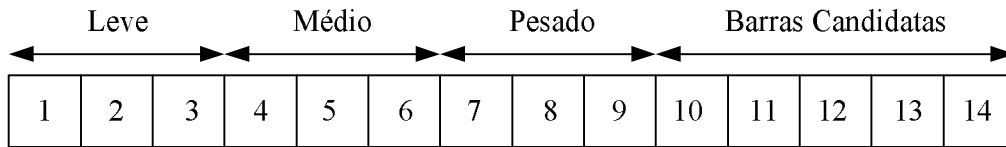


Figura III.3 – Representação de uma solução para o sistema exemplo.

Em um exemplo simples como esse já se pode perceber o grande número de combinações possíveis para uma solução, o que ilustra a natureza combinatória elevada desse tipo de problema. Considerando que todas as barras possam ter capacitores instalados ou não durante a simulação, o número de combinações possíveis é dado por $5^9 \times 4^5 = 2 \times 10^9$. De fato, essa característica torna inviável que problemas de otimização combinatória como este sejam resolvidos pela enumeração e avaliação de todas as soluções.

Na obtenção das soluções nesta etapa, cada formiga constrói uma solução passo a passo, a partir dos sorteios de maneira aleatória. Para ilustrar como este processo transcorre, considera-se, no exemplo da Figura III.2, a simulação sendo feita com 3 formigas.

Assim, a formiga ou agente 1, por exemplo, percorre as posições 1 a 9 do vetor solução (Figura III.3) e sorteia um número de 1 a 5, correspondentes aos cinco possíveis ajustes dos tapes de cada um dos três transformadores para cada nível de carregamento. Cada número sorteado corresponde ao seguinte valor do tape, conforme a Tabela III.1:

Tabela III.1 – Valores de Ajuste de Tape correspondentes ao Número Sorteado.

Número sorteado	Valor do ajuste do tape
1	0,90
2	0,95
3	1,00
4	1,05
5	1,10

Supõe-se que tenha sido sorteada a seguinte sequência de números, um para cada posição de 1 a 9 do vetor solução: 2 – 3 – 5 – 1 – 4 – 1 – 3 – 2 – 4. Isso significa que a formiga 1 selecionou os ajustes de tapes para os transformadores segundo a Tabela III.2.

Tabela III.2 – Ajustes de Tapes encontrados pela Formiga 1.

Transformador	Nível Leve	Nível Médio	Nível Pesado
T1	0,95	0,90	1,00
T2	1,00	1,05	0,95
T3	1,10	0,90	1,05

Em seguida, sorteia-se a quantidade de barras do sistema que receberá banco de capacitores. Supõe-se, por se tratar de um sistema pequeno, que o percentual máximo de barras a receber bancos tenha sido definido em 100%, ou seja, cada formiga poderá escolher alocar bancos em até todas as 5 barras. Por exemplo, para a formiga 1 foi sorteado alocar bancos em 2 barras.

A ação seguinte é escolher as barras e a quantidade de bancos. Sorteia-se a barra 3 (posição 12 do vetor solução, Figura III.3) e decide-se aleatoriamente instalar 1 banco. A seguir, repete-se o procedimento, selecionando a barra 2 (posição 11 do vetor solução) e sorteando alocar 2 bancos. Esses dois sorteios (localização da barra e quantidade de bancos) são realizados apenas duas vezes, visto que para esta formiga foi sorteado alocar bancos em somente duas barras. Percebe-se uma diferença entre o

sorteio dos tapes e o sorteio dos capacitores: enquanto no primeiro a formiga percorre todas as posições no vetor solução e escolhe um ajuste, no segundo são escolhidas previamente algumas posições do vetor solução (barras) que terão o sorteio de uma quantidade de bancos instalados. As posições das barras não sorteadas permanecem com zero.

Assim, a formiga 1 tem seu vetor solução conforme mostrado na Figura III.4. T1, T2 e T3 são os transformadores, que podem assumir diferentes valores de ajuste de tape em cada patamar de carga, enquanto B1, B2, B3, B4 e B5 são as barras do sistema, que recebem quantidades fixas de capacitores, ou seja, a solução da alocação de bancos é a mesma para os três patamares.

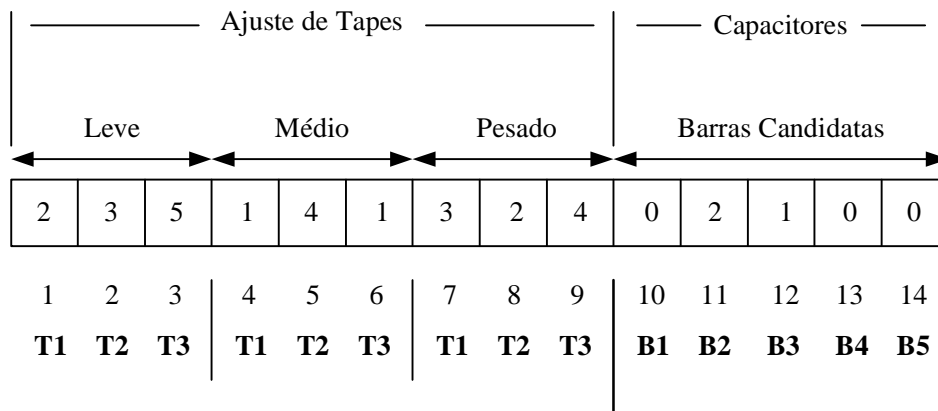


Figura III.4 – Vetor solução obtido pela formiga 1.

As formigas 2 e 3 repetem os mesmos procedimentos, a partir de sorteios aleatórios. A formiga 2 percorre as posições 1 a 9 do vetor solução, sorteando os seguintes números: 3 – 1 – 1 – 5 – 2 – 3 – 4 – 1 – 5, que correspondem a ajustes nos tapes conforme a Tabela III.1. A seguir, escolhe que serão alocados bancos em 3 barras e, finalmente, sorteia as barras 1, 2 e 5 para receberem 3, 1 e 1 bancos de capacitores, respectivamente. Igualmente, a formiga 3 realiza o mesmo procedimento encontrando outra solução. A figura III.5 mostra a matriz com as soluções encontradas pelos três agentes, onde cada linha representa a solução de uma formiga.

Ajuste de Tapes									Capacitores				
T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	B1	B2	B3	B4	B5
2	3	5	1	4	1	3	2	4	0	2	1	0	0
3	1	1	5	2	3	4	1	5	3	1	0	0	1
1	5	4	2	1	1	2	3	2	0	0	2	0	0

Figura III.5 – Matriz com as soluções encontradas por todas as formigas.

Ao fim deste passo, cada formiga estará associada a uma solução do problema, representada por um vetor com estrutura semelhante aos mostrados nas figura III.3 e III.4. Cada um desses vetores servirá de entrada para o passo 3.

Passo 3: Cálculo do fluxo de potência e da Fob.

Sorteadas todas as soluções, o passo seguinte é o cálculo da função objetivo para cada solução (equação III.1). Para tanto, é necessário realizar o cálculo do fluxo de carga do sistema para cada solução proposta. Antes, porém, é realizado um cálculo de fluxo de carga para o caso base, sem qualquer alocação de capacitores ou ajuste de tapes. Esse primeiro cálculo fornece uma referência, que servirá de comparação para os próximos resultados do fluxo de carga para as soluções sorteadas.

Neste caso, é utilizado um programa convencional de fluxo de carga baseado no processo iterativo de Newton-Raphson (MONTICELLI, 1983). Este programa foi desenvolvido especialmente para acomodar os três níveis de carga, leve, média e pesada, em uma única solução acoplada. Assim, a matriz Jacobiana ([J]), de característica bastante esparsa, tem sua estrutura aumentada, similar ao trabalho apresentado em SILVA JUNIOR et al (2008b). A Figura III.6 apresenta a estrutura da Jacobiana para essa situação, onde cada $J_{u,u}$, com $u = L, M, H$, corresponde às submatrizes para os níveis de carga leve, média e pesada, respectivamente. A vantagem dessa solução ocorre devido à necessidade de ordenar a matriz uma única vez.

$$[\mathbf{J}] = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{L,L} & & \\ & \mathbf{J}_{M,M} & \\ & & \mathbf{J}_{H,H} \end{bmatrix}$$

Figura III.6 – Estrutura da Matriz Jacobiana.

É importante ressaltar que o único acoplamento entre as submatrizes é a alocação de bancos de capacitores, visto que estes são instalados fixos nas barras do sistema real, ou seja, a mesma alocação é repetida nos três níveis de carga. Um banco instalado na barra i no patamar de carga médio, por exemplo, será automaticamente instalado na mesma barra i dos patamares leve e pesado, visto que representam uma única barra física i . Os tapes dos transformadores, no entanto, são ajustados independentemente em cada patamar de carga.

Após o cálculo do fluxo de carga, as perdas em cada nível de carga são obtidas a partir da equação (III.3), servindo de entrada para o cálculo do valor da Fob (equação III.1). Este procedimento é realizado para cada formiga, ou seja, para cada solução encontrada. Assim, se uma simulação foi feita com 500 formigas, por exemplo, esse processo será executado 500 vezes no passo 3.

Além do valor das perdas, outra informação que deve constar para a função objetivo é se houve ou não violação dos limites de tensão em cada solução calculada, conforme as equações (III.6) e (III.7). Essa avaliação é feita também neste passo.

Passo 4: Avaliação das soluções.

Este passo envolve a avaliação das soluções encontradas. Quanto menor o valor da função objetivo, melhor a solução. Identificada a melhor solução da iteração corrente, ela é armazenada. Esta melhor solução é chamada solução rainha (DORIGO and STÜTZLE, 2003). Este passo impede que a melhor solução encontrada até o momento seja perdida nas próximas iterações.

Obtido o valor da Fob de todas as soluções, o próximo passo é a montagem da matriz de feromônio.

Passo 5: Matriz de Feromônio.

Neste passo são montadas as matrizes de feromônio (MF). Neste trabalho, adotou-se uma matriz de feromônio para a alocação de capacitores e três matrizes para os tapes dos transformadores, sendo uma para cada patamar de carga.

A cada solução encontrada será associado um depósito de feromônio, informação numérica proporcional à qualidade da solução. A quantidade de feromônio (QF) que será depositada por cada formiga “ k ” na região da solução é determinada pelo valor da função objetivo correspondente. O valor numérico do feromônio é dado pela equação (III.8).

$$QF_k = \frac{1}{(Fob_k - Me + 1) \cdot 100} \quad (III.8)$$

Onde:

QF_k é a quantidade de feromônio depositada pela formiga k , ou seja, a quantidade de feromônio associada à solução k .

Fob_k é a função objetivo calculada pela formiga k .

Me é o menor valor da função objetivo na iteração corrente, ou seja, o valor da Fob da solução rainha.

Na equação (III.8), soma-se 1 no denominador a fim de que este não se torne igual a zero quando for calculada a quantidade de feromônio da solução rainha, pois, neste caso, $Fob_k = Me$. O denominador foi multiplicado por 100 a fim de tornar as quantidades de feromônio das diversas soluções mais discrepantes entre si, fazendo com que o depósito de feromônio das soluções ruins seja bem inferior em relação ao depósito de feromônio das boas soluções. Esse fator multiplicativo foi empírico e apresentou bons resultados em acelerar o processo de convergência.

A quantidade de feromônio calculada na equação (III.8) para a formiga k será depositada nas matrizes de feromônio nas posições relativas à solução k . Essas matrizes são matrizes de sensibilidade que guiarão o sorteio do próximo formigueiro com base na quantidade de feromônio em cada solução. São determinadas quatro matrizes para o depósito de feromônio. As três primeiras são associadas aos tapes dos transformadores,

uma para cada nível de carregamento, sendo a dimensão de cada uma dessas matrizes dada pelo número de valores discretos dos tapes vezes o número de transformadores. No sistema exemplo da Figura III.2, cada matriz de feromônio dos tapes tem dimensão 5 x 3. Cada linha se refere a uma das cinco posições de ajuste de tape, ao passo que cada coluna corresponde a um dos três transformadores, T1, T2 e T3.

A quarta matriz de feromônio representa a alocação de capacitores, sendo a dimensão dessa matriz dada pelo número máximo de bancos que podem ser instalados por barra vezes o número de barras candidatas à alocação. No mesmo exemplo anterior, essa matriz tem dimensão 3 x 5. Cada linha refere-se a uma quantidade de bancos de capacitores alocados e as colunas indicam a barra.

Considerando ainda as 3 formigas do exemplo cujas soluções são mostradas na Figura III.5, supõe-se que a solução que apresentou menor valor para a Fob seja a da formiga 1, ou seja, ela é a solução rainha. Assim, essa solução contribuiria com mais feromônio e as matrizes de feromônio teriam maiores valores (maior depósito de feromônio) nas células sombreadas indicadas nas figuras III.7 e III.8.

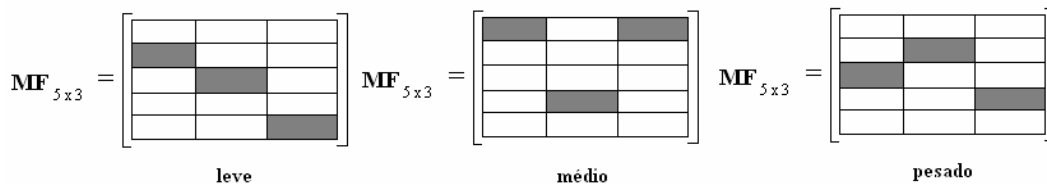


Figura III.7 – Concentração de feromônio nas matrizes de feromônio para os tapes.

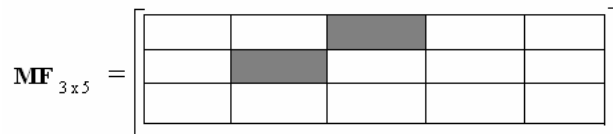


Figura III.8 – Concentração de feromônio para a matriz de feromônio de capacitores.

É importante mencionar que essas matrizes são únicas para todo o processo de otimização, sendo atualizadas a cada passo. Soluções com baixo custo contribuem de forma mais contundente, ao passo que soluções de alto custo apresentam pequenas contribuições.

Dessa forma, nas iterações seguintes cada matriz de feromônio MF será atualizada com o incremento das quantidades de feromônio calculadas através da equação (III.8) na iteração corrente. Assim, a cada iteração, ocorrerá um acúmulo de feromônio nas regiões de melhores soluções.

A atualização da matriz de feromônio MF é feita segundo a equação (III.9):

$$MF^i = MF^{i-1} + \Delta MF^i \quad (III.9)$$

Onde:

MF^i é um elemento da matriz de feromônio com a quantidade total de feromônio atualizada na iteração i .

MF^{i-1} é o correspondente elemento da matriz de feromônio com a quantidade total de feromônio na iteração anterior à iteração i .

ΔMF^i é o depósito de feromônio realizado no elemento correspondente da matriz MF por todas as formigas na iteração i , cujo valor é dado por:

$$\Delta MF^i = \sum_{k=1}^{nf} \Delta MF_k^i \quad (III.10)$$

Onde:

nf é o número de formigas.

ΔMF_k^i é a quantidade de feromônio depositada pela formiga k na iteração i , cujo valor é dado pela equação (III.8).

Passo 6: Sorteio de um novo formigueiro.

Esta etapa consiste no sorteio de um novo formigueiro ou conjunto de novas soluções. Este novo sorteio será feito baseado na quantidade de feromônio, definido segundo uma regra de transição, em que a probabilidade da formiga k escolher determinada solução é dada por:

$$P_k = \frac{[MF]}{\sum MF} \quad (\text{III.11})$$

Onde:

$[MF]$ é a quantidade de feromônio existente no elemento da matriz MF correspondente à solução que se deseja calcular a probabilidade de escolha.

$\sum MF$ é a soma da quantidade de feromônio presente em todos os elementos da matriz MF.

A partir das probabilidades de escolha de cada posição da matriz de feromônio (associadas a componentes de uma solução), é montada uma roleta de probabilidades para o novo sorteio, onde o tamanho da fatia correspondente a cada componente de solução é proporcional à sua probabilidade de escolha. Assim, o sorteio será feito de tal forma que as soluções com maior quantidade de feromônio terão maiores chances de serem sorteadas.

Neste caso, têm-se quatro matrizes de feromônio, portanto, existirão quatro regras de transição e, conseqüentemente, quatro roletas para a seleção das novas soluções (formigas).

Além disso, alguns procedimentos adicionais foram adotados neste trabalho:

- i. A melhor solução anterior, rainha, sempre estará presente no novo conjunto de soluções. Essa técnica permite manter a melhor solução até o final do processo;
- ii. No sorteio das novas soluções, 80% da roleta é construída baseando-se na matriz de feromônio, ou seja, com as fatias proporcionais à probabilidade dada pela regra de transição (equação III.11). Isso é adequado para garantir que o próximo conjunto de soluções (formigueiro) caminhe na direção da solução ótima;
- iii. A roleta reserva uma fatia de 20% para o sorteio das soluções de forma aleatória, a fim de evitar que o algoritmo fique preso em uma solução de mínimo local. Estes são valores normalmente adotados na literatura (DORIGO and STÜTZLE, 2003).

A roleta pode ser construída como um vetor, onde as soluções com maior concentração de feromônio aparecem em maior quantidade, proporcional à sua probabilidade dada pela regra de transição (equação III.11).

A Figura III.9, apenas ilustrativa, apresenta um esquema onde é possível ter uma visualização da estrutura da roleta. Supõe-se que seja possível em um único sorteio escolher uma entre 15 decisões possíveis, assim como na alocação de capacitores do sistema exemplo da Figura III.2 (até 3 bancos x 5 barras). Cada fatia da roleta representa uma das 15 componentes de solução, que correspondem a cada uma das células da matriz de feromônio da Figura III.8. Nessa figura, as células 3 (posição (1,3) da matriz MF) e 7 (posição (2,2) da matriz MF) estão sombreadas, indicando que possuem maior concentração de feromônio. A célula 3 corresponde à alocação de 1 banco na barra 3 e a célula 7, representa a posição referente à alocação de 2 bancos na barra 2. Assim, as células 3 e 7, por apresentarem maior concentração de feromônio terão suas fatias na roleta proporcionalmente maiores em relação às demais, conforme a Figura III.9. Quando um sorteio for realizado, representado pela posição da seta sob o vetor, maior será a probabilidade de escolha das fatias 3 e 7. Nota-se ainda que a roleta possui uma região sombreada referente aos 20% de sorteio aleatório. Quando a seta seleciona essa fatia, a formiga passa por um novo sorteio aleatório, não baseado na roleta.

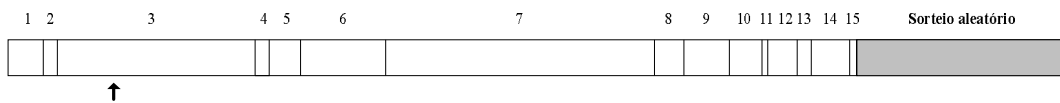


Figura III.9 – Roleta.

Passo 7: Evaporação.

Neste passo ocorre a evaporação de um percentual do feromônio existente nas matrizes de feromônio, conforme a equação (III.12).

$$MF = (1 - \rho) \cdot MF \quad (III.12)$$

Onde

ρ é a taxa de evaporação ou taxa de decréscimo de feromônio, variando entre [0,1].

A taxa da evaporação é importante uma vez que evita que o nível de feromônio cresça excessivamente, podendo ocasionar convergência para mínimos locais, além de proporcionar o “esquecimento” de decisões ruins tomadas durante o processo.

Neste trabalho foi adotada a taxa de evaporação diferenciada para soluções boas e para as ruins. Neste sentido, para soluções piores que o caso base o coeficiente de evaporação ρ é mais elevado, 20%, ao passo que, para as soluções melhores que o caso base, esse coeficiente é de apenas 5%. Isso faz com que as soluções ruins, neste caso, piores que o caso base, sejam “esquecidas” mais rapidamente. Os valores escolhidos para esse coeficiente foram testados e apresentaram resultados satisfatórios.

Passo 8: Teste de convergência.

Enquanto a convergência não for obtida, o processo iterativo retorna ao passo 3. O critério de convergência adotado neste trabalho consiste em verificar se a solução rainha detém pelo menos 90% da quantidade total de feromônio em cada uma das matrizes de feromônio.

No caso dos tapes, a probabilidade deverá ser de no mínimo 90% para uma determinada posição de ajuste separadamente para cada transformador. Já para a alocação de capacitores, a soma das probabilidades das células da matriz de feromônio que correspondem à solução rainha deve ser no mínimo 90%.

No entanto, quando esta condição de convergência é obtida pela primeira vez, o algoritmo não termina e vai para o passo 9, descrito a seguir. Somente quando 90% do feromônio se concentrar na solução ótima pela segunda vez, o processo termina e o algoritmo finalmente converge. O percentual adotado de 90% para a convergência foi obtido de forma empírica, através de testes de convergência do algoritmo.

Passo 9: Busca de vizinhança.

Após atender o critério de convergência pela primeira vez, o algoritmo entra em um processo chamado de busca de vizinhança. Nesta etapa, as posições nas matrizes de feromônio vizinhas às posições que constituem a melhor solução encontrada adquirem a

mesma quantidade de feromônio da posição da melhor solução. Isso permite pesquisar soluções em torno das barras vizinhas às melhores barras encontradas até então, bem como variar a quantidade de bancos para quantidades vizinhas na barra da melhor solução e ajustar o tape para posições adjacentes à melhor solução encontrada.

Essa estratégia é um detalhe importante, a principal contribuição do método proposto neste trabalho, pois permite que o processo não termine prematuramente e continue pesquisando soluções em torno da solução rainha, tornando a busca mais eficiente. Isso é equivalente à técnica de “*branch exchange*” (CIVANLAR et al, 1988).

A Figura III.10 permite compreender melhor como é feito este passo. Considera-se a matriz de feromônio para alocação de capacitores do sistema exemplo já utilizado. Supondo que a melhor solução (rainha) encontrada quando esta concentrou 90% do total de feromônio pela primeira vez seja a instalação de 2 capacitores na barra 3, célula indicada na figura pela letra “A”, este passo impõe a mesma quantidade de feromônio da célula “A” às células vizinhas sombreadas, indicadas por 2, 4, 5 e 7. Assim a probabilidade de escolha dessas posições torna-se igual, aumentando as chances de sorteio nessas regiões. Assim, o algoritmo terá boa probabilidade de pesquisar as soluções de instalar 2 capacitores nas barras vizinhas 2 ou 4, ou alocar 1 ou 3 bancos na barra 3. Naturalmente, se mais de uma célula da matriz MF constituir a solução rainha, este procedimento é executado em todas elas.

$$MF_{3 \times 5} = \begin{bmatrix} & 1 & 2 & 3 & \\ & 4 & A & 5 & \\ & 6 & 7 & 8 & \end{bmatrix}$$

Figura III.10 – Busca de vizinhança.

A pesquisa da região de vizinhança pode também ser expandida conforme mostrado na região sombreada na Figura III.11, tornado-a mais ampla e eficiente. Neste exemplo, são analisadas também as soluções de instalar 1 ou 3 bancos nas barras vizinhas 2 e 4. No entanto, ao se fazer a pesquisa de toda a vizinhança, o tempo computacional cresce consideravelmente. A busca nas regiões vizinhas conforme a Figura III.10 se mostrou satisfatória no modelo proposto.

$$\mathbf{MF}_{3 \times 5} = \begin{bmatrix} & \mathbf{1} & \mathbf{2} & \mathbf{3} & \\ \mathbf{4} & & \mathbf{A} & & \mathbf{5} \\ & \mathbf{6} & \mathbf{7} & \mathbf{8} & \end{bmatrix}$$

Figura III.11 – Busca de vizinhança completa.

Para a busca de vizinhança na matriz de feromônio do ajuste de tapes, a pesquisa das regiões vizinhas é feita independentemente para cada transformador. Assim, em cada coluna correspondente a um transformador, as duas posições vizinhas 1 e 2 indicadas na Figura III.12, referentes aos ajustes adjacentes dos tapes, recebem a mesma quantidade de feromônio da posição central (rainha), representada pela letras A, B e C, que equivalem à posição de ajuste de tape na solução rainha para cada transformador.

$$\mathbf{MF}_{5 \times 3} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & & \\ \mathbf{A} & \mathbf{1} & \\ \mathbf{2} & \mathbf{B} & \mathbf{1} \\ & \mathbf{2} & \mathbf{C} \\ & & \mathbf{2} \end{bmatrix}$$

Figura III.12 – Busca de vizinhança dos tapes.

Depois de realizadas as alterações nas matrizes de feromônio, o processo retorna ao passo 3. Na próxima vez que atender ao critério de convergência, o algoritmo finalmente converge.

III.4. Conclusão

Este capítulo apresentou em detalhes o método proposto neste trabalho para resolver o problema de minimização de perdas nos SDE baseado na técnica colônia de formigas. Conforme visto, a metodologia utilizada inclui modificações pertinentes e adaptações na estrutura básica do algoritmo que o tornam mais eficiente para resolver o problema proposto. As principais modificações incluídas foram:

- Armazenamento da melhor solução encontrada a cada iteração (solução rainha);
- Evaporação de feromônio diferenciada para soluções boas e ruins;
- Pesquisa de soluções vizinhas à melhor solução, principal contribuição deste trabalho;
- Critério de convergência mais eficiente, baseado na concentração de feromônio.

O próximo capítulo apresentará alguns resultados de simulações realizadas em alguns sistemas, utilizando a técnica proposta.

Capítulo IV

Estudo de Casos

IV.1. Introdução

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos pela aplicação do método proposto para minimização de perdas ativas em sistemas de distribuição através da alocação de bancos de capacitores e ajuste de tapes de transformadores com restrições de violação de tensão. Apresentam-se simulações nos sistemas de 14 barras (CIVANLAR et al, 1988), 33 barras (BARAN and WU, 1989b), 69 barras (BARAN and WU, 1989a) e 476 barras (GOMES et al., 2005). Os dados desses sistemas encontrados na literatura estão disponíveis no Apêndice A.

Em todos os casos, a tensão da subestação é considerada igual a 1,0 pu e o custo dos bancos de capacitores de \$ 4,00/kVAr (SILVA JÚNIOR et al, 2008b).

Os sistemas de 14 e 33 barras foram utilizados com a finalidade de verificar o funcionamento do algoritmo proposto. Uma vez comprovada a eficiência do método, os demais sistemas foram simulados e comparados com outras metodologias e resultados existentes na literatura. As simulações foram realizadas utilizando o software Matlab.

IV.2. Sistema 14 Barras

Foi utilizado primeiro um sistema de pequeno porte para simulação, 14 barras, a fim de verificar o funcionamento do método proposto. Foi adotada a opção de instalação de até 3 bancos de 500 kVAr por barra. Cada banco custa, portanto, \$ 2000,00. Adotou-

se ainda, uma limitação do percentual máximo de barras do sistema a receber bancos, 40% do total de barras. A simulação considerou a existência de três patamares de carga e os fatores de carga utilizados foram 0,5 pu para o nível leve, 1,0 pu para o médio e 1,6 pu para o pesado. O custo das perdas de energia adotado foi de \$ 0,06/kWh para os três níveis de carga. O período de simulação escolhido foi 1 ano, ou seja, 8760 horas, sendo 1000 h para carga leve, 6760 h para a média 1000 h para a pesada. Os limites mínimo e máximo de tensão considerados foram 0,95 pu e 1,05 pu, respectivamente.

A Tabela IV.1 mostra a situação do caso base, ou seja, sem alocação de capacitores e ajuste de tapes, enquanto as tabelas IV.2 e IV.3 apresentam o resultado da simulação considerando somente a alocação de capacitores. Nesta primeira simulação, não foram considerados o custo fixo de instalação por barra e o custo de violação de tensão.

Tabela IV.1 – Perdas no Caso Base no Sistema 14 Barras.

Nível de Carga	Perdas (MW)	Custo das Perdas (\$)
Leve	0,1586	9.516,00
Médio	0,6576	266.723,00
Pesado	1,7635	105.810,00
Total	2,5797	382.049,00

Tabela IV.2 – Simulação 1 no Sistema 14 Barras: Solução.

Barra	Quantidade de Bancos
5	2
7	3
8	3
9	3
10	3
13	2

Tabela IV.3 – Simulação 1 no Sistema 14 Barras: Perdas e Custos.

Nível de Carga	Perdas (MW)	Custo das Perdas (\$)
Leve	0,1307	7.842,00
Médio	0,5233	212.250,00
Pesado	1,4790	88.750,00
Total	2,1330	308.832,00
Fob (\$)	340.832,00	

Conforme já se esperava, a alocação dos bancos de capacitores permitiu reduzir as perdas no sistema, diminuindo também o custo total, dado pela função objetivo.

Outra simulação foi realizada, considerando desta vez o custo de instalação de bancos por barra, igual a \$ 1000,00. O resultado é mostrado nas tabelas IV.4 e IV.5.

Tabela IV.4 – Simulação 2 no Sistema 14 Barras: Solução.

Barra	Quantidade de Bancos
5	3
7	3
8	3
9	3
10	3

Tabela IV.5 – Simulação 2 no Sistema 14 Barras: Perdas e Função Objetivo.

Nível de Carga	Perdas (MW)	Custo das Perdas (\$)
Leve	0,1338	8.028,00
Médio	0,5288	214.481,00
Pesado	1,4875	89.250,00
Total	2,1501	311.759,00
Fob (\$)	346.759,00	

Comparando os resultados das tabelas IV.2 e IV.3 com as tabelas IV.4 e IV.5, verifica-se que, ao considerar o custo de instalação, o algoritmo foi capaz de encontrar uma solução que instale bancos em menos barras. No primeiro caso, foram instalados 16 bancos de capacitores em 6 barras e no segundo, 15 bancos em 5 barras. Observa-se ainda que as perdas na simulação 2 foram maiores que na simulação 1. No entanto, a opção pelo segundo caso se dá por ter sido considerado o custo de instalação. Se o custo de instalação fosse considerado na solução da Tabela IV.2 (simulação 1), o valor da sua Fob seria maior que o da simulação 2, ou seja, igual a \$ 346.832,00. Assim, embora a solução da simulação 1 (tabelas IV.2 e IV.3) apresente menores perdas, com a consideração do custo de instalação ela se tornaria mais cara, levando à escolha da solução das tabelas IV.4 e IV.5.

Outro aspecto importante a destacar é que nas duas simulações anteriores houve violação do limite mínimo de tensão em algumas barras no nível de carga pesado. Neste caso, não foi considerada nenhuma penalidade pela violação de tensão.

As duas simulações foram realizadas com 300 formigas, convergindo, em média, com 60 iterações, em um tempo computacional de cerca de 1,6 minutos. Verificou-se que, utilizando mais agentes na simulação (de 500 a 1000 formigas), o resultado ótimo é garantido, ao passo que na simulação com 300 formigas, nem sempre a solução melhor é obtida. No entanto, quanto maior o número de agentes, o tempo computacional cresce consideravelmente. Utilizando 1000 formigas, por exemplo, o tempo de simulação foi de 14 minutos. Num sistema de pequeno porte como este, a utilização de mais agentes é até conveniente, porém, em sistemas maiores, o tempo computacional torna-se excessivamente longo, inviabilizando a utilização de muitas formigas nas simulações.

Finalmente, foi realizada uma terceira simulação considerando penalização por violação de tensão proporcional a \$ 100.000,00 e a inclusão de três transformadores no sistema 14 barras. Os transformadores foram colocados nos ramos 2-3, 6-7 e 11-12. Cada transformador tem seu *tape* variando de 0,9 a 1,1 em *steps* de 0,01. O caso base apresentou violação de tensão no nível de carga pesado, sendo a maior violação de 0,9213 pu na barra 10. O valor da Fob do caso base incluindo as penalizações por violação de tensão foi igual a \$ 388.790,00 (custo das perdas mais penalizações).

As tabelas IV.6 a IV.8 apresentam os resultados encontrados nessa simulação.

Tabela IV.6 – Simulação 3 no Sistema 14 Barras: Alocação de Bancos.

Barra	Quantidade de Bancos
5	3
6	3
8	3
10	2

Tabela IV.7 – Simulação 3 no Sistema 14 Barras: Ajuste de Tapes.

Transformador (circuito)	2-3	6-7	11-12
Tape (nível leve)	1,00	1,00	1,00
Tape (nível médio)	1,00	1,01	1,00
Tape (nível pesado)	1,01	1,03	1,00

Tabela IV.8 – Simulação 3 no Sistema 14 Barras: Perdas e Função Objetivo.

Nível de Carga	Perdas (MW)	Custo das Perdas (\$)
Leve	0,1280	7.680,00
Médio	0,4912	199.230,00
Pesado	1,3576	81.456,00
Total	1,9768	288.366,00
Fob (\$)	314.366,00	

Conforme observado, o ajuste de tapes sem custo adicional de investimento reduziu ainda mais as perdas, o que possibilitou que se instalasse ainda menos capacitores em menor quantidade de barras, apenas 4. O total de bancos instalados caiu de 16, na primeira simulação, para 11. Além disso, a solução encontrada não apresentou violação de tensão, validando a inclusão da penalização por violação na função objetivo.

A simulação com capacitores e ajuste de tapes também foi realizada com 300 formigas, no entanto, devido ao aumento do número de combinações possíveis dado pela inclusão dos transformadores, foram necessárias mais iterações para alcançar a convergência: 140. O tempo computacional foi próximo de 5 minutos.

Estas simulações mostram a eficiência do método proposto para o tratamento da função objetivo multicompromisso. O algoritmo foi capaz de encontrar soluções boas e respondeu bem à inclusão das penalidades e compromissos adicionais, além de mostrar o bom desempenho do ajuste de tapes combinado à alocação de capacitores, que proporcionou a queda do custo das perdas de \$ 382.049,00 no caso base para 288.366,00 na simulação completa, ou seja, uma redução próxima de 25%. Quanto ao custo total, este caiu de \$ 388.790,00 para \$ 314.366,00, representando uma queda da ordem de 19%, considerando como custo inicial o custo associado às perdas no caso base mais a respectiva penalização pelas violações de tensão.

A simulação do sistema 14 barras permitiu uma análise completa do desempenho do algoritmo proposto, inclusive o fato de, neste caso, o método ter encontrado uma solução em que não houve violação de tensão em nenhuma barra.

IV.3. Sistema 33 Barras

Na simulação do sistema 33 barras foi escolhida a instalação de até 3 bancos de capacitores de 200 kVAr em cada barra, representando um investimento de \$ 800,00 por aquisição de um banco. O percentual máximo de barras que poderia ter capacitores instalados foi de 30%. Os fatores de carga para os três patamares, o custo das perdas e os limites de tensão foram os mesmos adotados na simulação do sistema 14 barras. O período analisado na simulação foi de 1 ano, com a seguinte distribuição: 10 horas por dia para carga leve, 11 h/dia para carga média e 3 h/dia de carga pesada, ou seja, 3650 h de carga leve, 4015 h média e 1095 h pesada.

Neste sistema, além das simulações semelhantes às realizadas no caso de 14 barras, é realizado um teste com os tapes em um ajuste mais fino, a fim de verificar o desempenho do algoritmo em encontrar uma solução ainda melhor.

As tabelas IV.9 a IV.11 apresentam os resultados do caso base e da simulação 1 no sistema 33 barras, apenas com instalação de capacitores, sem tapes e sem considerar custos de instalação de bancos por barra e custo de violação de tensão.

Tabela IV.9 – Perdas no Caso Base no Sistema 33 Barras.

Nível de Carga	Perdas (MW)	Custo das Perdas (\$)
Leve	0,0471	10.310,00
Médio	0,2027	48.830,00
Pesado	0,5754	37.800,00
Total	0,8252	96.940,00

Tabela IV.10 – Simulação 1 no Sistema 33 Barras: Solução.

Barra	Quantidade de Bancos
7	1
13	1
24	1
29	3
31	1

Tabela IV.11 – Simulação 1 no Sistema 33 Barras: Perdas e Função Objetivo.

Nível de Carga	Perdas (MW)	Custo das Perdas (\$)
Leve	0,0361	7.906,00
Médio	0,1350	32.511,00
Pesado	0,4157	27.308,00
Total	0,5868	67.725,00
Fob (\$)	73.325,00	

Conforme observado nas tabelas IV.9 a IV.11, foram alocados 7 bancos de capacitores, distribuídos em 5 barras, o que proporcionou uma redução de 30% no custo das perdas, caindo de \$ 96.940,00 para \$ 67.725,00. Isso foi feito com um investimento

de \$ 5.600,00 em aquisição de capacitores. Esse investimento teria ainda o custo adicional de instalação, de \$ 5000,00, que não foi considerado.

Uma outra simulação, apresentada nas tabelas IV.12 e IV.13, inclui o custo de instalação de capacitores por barra, o que leva o algoritmo a buscar uma solução que instale bancos em menor número de barras. É interessante perceber que as perdas nessa simulação foram maiores, no entanto, devido à inclusão do custo de instalação, essa opção proporcionou o menor valor para a função objetivo.

Tabela IV.12 – Simulação 2 no Sistema 33 Barras: Solução.

Barra	Quantidade de Bancos
11	2
29	3
31	1

Tabela IV.13 – Simulação 2 no Sistema 33 Barras: Perdas e Função Objetivo.

Nível de Carga	Perdas (MW)	Custo das Perdas (\$)
Leve	0,0373	8.159,00
Médio	0,1385	33.357,00
Pesado	0,4224	27.750,00
Total	0,5982	69.266,00
Fob (\$)	77.066,00	

A Tabela IV.12 mostra que, além de alocar os capacitores em menor número de barras, a quantidade total de bancos também foi reduzida: 6 bancos instalados, reduzindo o investimento em aquisição e instalação de capacitores.

A simulação 3, apresentada nas tabelas IV.14 a IV.16, inclui 3 transformadores de tape variável entre 0,9 e 1,1, com discretização de 0,01, nos circuitos 3-4, 18-19 e 22-23. Nesta simulação não foi ainda considerada a penalização por violação de tensão.

Tabela IV.14 – Simulação 3 no Sistema 33 Barras: Alocação de Bancos.

Barra	Quantidade de Bancos
14	1
29	3
31	1

Tabela IV.15 – Simulação 3 no Sistema 33 Barras: Ajuste de Tapes.

Transformador (circuito)	3-4	18-19	22-23
Tape (nível leve)	1,00	1,00	1,00
Tape (nível médio)	1,01	1,00	1,01
Tape (nível pesado)	1,01	1,01	1,01

Tabela IV.16 – Simulação 3 no Sistema 33 Barras: Perdas e Função Objetivo.

Nível de Carga	Perdas (MW)	Custo das Perdas (\$)
Leve	0,0348	7.613,00
Médio	0,1301	31.331,00
Pesado	0,3782	24.845,00
Total	0,5431	63.789,00
Fob (\$)	70.789,00	

Os resultados das tabelas IV.14 a IV.16 mostram que houve considerável redução das perdas com a inclusão dos transformadores, em torno de 35%. O ajuste de tapes também permitiu que fosse instalado 1 banco de capacitores a menos no sistema, reduzindo ainda mais o investimento em aquisição de bancos.

A simulação seguinte (simulação 4) acrescenta a penalização por violação de tensão ao problema. As penalizações foram cobradas proporcionalmente ao valor de \$

100.000,00. Com a inclusão das penalizações no caso base, o custo da solução inicial, que inclui custo das perdas e penalizações, foi de \$ 296.080,00. A menor tensão encontrada no caso base foi de 0,8528 pu na barra 17. A maioria das violações ocorreu na carga pesada.

As tabelas IV.17 a IV.19 apresentam os resultados da simulação, com a alocação de capacitores e ajuste de tapes.

Tabela IV.17 – Simulação 4 no Sistema 33 Barras: Alocação de Bancos.

Barra	Quantidade de Bancos
14	3
29	3
31	3

Tabela IV.18 – Simulação 4 no Sistema 33 Barras: Ajuste de Tapes.

Transformador (circuito)	3-4	18-19	22-23
Tape (nível leve)	1,00	1,00	1,00
Tape (nível médio)	1,01	1,00	1,01
Tape (nível pesado)	1,04	1,01	1,01

Tabela IV.19 – Simulação 4 no Sistema 33 Barras: Perdas e Função Objetivo.

Nível de Carga	Perdas (MW)	Custo das Perdas (\$)
Leve	0,0651	14.258,00
Médio	0,1361	32.794,00
Pesado	0,6127	40.253,00
Total	0,8139	87.305,00
Fob (\$)	104.760,00	

Conforme esperado, a simulação 4 (tabelas IV.17 a IV.19) indica que a inclusão das penalizações por violação de tensão levou o algoritmo a escolher uma solução que, embora apresente maiores perdas do que na simulação 3 (tabelas IV.14 a IV.16), possui menor desvio de tensão. A menor tensão encontrada foi na barra 17, de 0,9365 pu no período de carga pesada, contra 0,8528 pu na mesma barra no caso base. Para obter essa solução, além do ajuste dos tapes, foi necessário alocar mais bancos de capacitores (9 bancos em 3 barras). Todas as violações ocorreram somente no período de carga pesada. Embora não tenha encontrado uma solução que não violasse nenhuma tensão, a inclusão das penalizações proporcionais ao desvio de tensão levou o algoritmo a direcionar a busca em torno de soluções em que o desvio de tensão fosse menor. Naturalmente, quanto maiores as penalizações cobradas pelas violações de tensão, mais a solução ótima priorizará a qualidade do nível de tensão em detrimento das perdas.

As simulações foram feitas usando 200 e 300 formigas com um tempo computacional médio variando entre 10 e 20 minutos. Evidentemente, as simulações com transformadores levam mais tempo, devido à existência de mais soluções possíveis. O tempo computacional com 200 formigas foi aproximadamente o mesmo da simulação com 300 formigas, porém, o algoritmo precisou de maior número de iterações para convergir. Em média, o algoritmo sem a inclusão dos transformadores convergiu com 70 iterações quando utilizadas 300 formigas, ao passo que convergiu em média com 130 iterações quando utilizadas 200 formigas.

Finalmente, ainda outra simulação foi realizada neste sistema de 33 barras, alterando a discretização dos tapes dos transformadores. A discretização foi modificada para *steps* de 0,001. Com um ajuste mais fino, espera-se que seja possível diminuir ainda mais as perdas sem qualquer custo adicional. A fim de enfatizar o efeito do ajuste fino dos tapes na redução adicional das perdas, essa simulação não incluiu penalização por violação de tensão, sendo, portanto, comparada com a simulação 3 (tabelas IV.14 a IV.16). Os resultados dessa simulação encontram-se nas tabelas IV.20 a IV.22.

Tabela IV.20 – Simulação 5 no Sistema 33 Barras: Alocação de Bancos.

Barra	Quantidade de Bancos
11	2
29	3

Tabela IV.21 - Simulação 5 no Sistema 33 Barras: Ajuste de Tapes.

Transformador (circuito)	3-4	18-19	22-23
Tape (nível leve)	1,002	1,002	1,004
Tape (nível médio)	1,006	1,004	1,007
Tape (nível pesado)	1,012	1,006	1,011

Tabela IV.22 – Simulação 5 no Sistema 33 Barras: Perdas e Função Objetivo.

Nível de Carga	Perdas (MW)	Custo das Perdas (\$)
Leve	0,0309	6.762,00
Médio	0,1260	30.354,00
Pesado	0,3832	25.176,00
Total	0,5401	62.292,00
Fob (\$)	68.292,00	

Conforme observado ao se comparar as tabelas IV.20 a IV.22 com as tabelas IV.14 a IV.16, as perdas reduziram-se ainda mais e também o valor da função objetivo, alocando os mesmos 5 bancos de capacitores em apenas 2 barras. Isso demonstra a eficiência do algoritmo em encontrar uma solução melhor ao considerar os tapes em um ajuste mais fino.

As simulações realizadas até aqui nos sistemas de 14 e 33 barras mostraram que o método proposto neste trabalho tem bom desempenho em encontrar soluções de boa qualidade. Comprovada a eficiência da técnica proposta, as simulações seguintes serão comparadas com resultados existentes na literatura.

IV.4. Sistema 69 Barras

No sistema de 69 barras foi adotada também a instalação de até 3 bancos de capacitores de 200 kVAr por barra e o percentual máximo de barras a receber bancos escolhido foi de 30%. O custo das perdas e os limites de tensão são os mesmo adotados nos sistemas de 14 e 33 barras. Os fatores de carga utilizados foram de 0,5 pu para carga leve, 1,0 pu para carga média e 2,45 pu para carga pesada. A simulação foi feita para 8760 horas, sendo 1000 h carga leve, 6760 h carga média e 1000 h carga pesada.

A fim de comprovar a eficiência do método proposto neste trabalho, os resultados são comparados com outra simulação existente na literatura (SILVA JUNIOR et al, 2008b), que utiliza um algoritmo heurístico construtivo baseado em função sigmóide para resolver o problema de alocação de capacitores. Além do algoritmo heurístico construtivo, o trabalho de SILVA JUNIOR et al (2008b) utiliza algoritmo genético para comparar seus resultados entre as duas metodologias. Assim, por extensão, os testes realizados com o método proposto no presente trabalho são comparados com a heurística construtiva e com o algoritmo genético.

Outro aspecto importante do trabalho de SILVA JUNIOR et al (2008b) é a utilização de uma ferramenta de fluxo de potência ótimo (FPO) para o cálculo das perdas e do fluxo de carga, que pode conduzir a resultados diferentes de um algoritmo baseado no fluxo de potência convencional. Sendo assim, como o método proposto no presente trabalho utiliza um programa de fluxo de potência convencional, a solução encontrada por SILVA JUNIOR et al (2008b) para a alocação de capacitores é reproduzida no algoritmo proposto neste trabalho. Os resultados são comparados então a partir da reprodução da solução encontrada em SILVA JUNIOR et al (2008b), visto que uma ligeira diferença nos valores das perdas é observada entre o FPO e o fluxo de potência convencional.

Além disso, SILVA JUNIOR et al (2008b) utiliza apenas um número limitado de 28 barras candidatas pré selecionadas a partir de um índice de sensibilidade para a alocação de capacitores. Nas simulações comparativas realizadas neste trabalho, além de limitar o número de barras a receber bancos em 30% da quantidade total de barras do sistema, foram adotadas as mesmas 28 barras candidatas para o espaço de busca. No entanto, durante o processo de busca de vizinhança, outras barras que não estejam entre as candidatas podem receber alocação de bancos de capacitores.

A Tabela IV.23 mostra os resultados da simulação para o caso base, ou seja, sem alocação de capacitores e ajuste de tapes.

Tabela IV.23 – Perdas no Caso Base no Sistema 69 Barras.

Nível de carga	Perdas (MW)	Custo das perdas (\$)
Leve	0,0516	3.096,60
Média	0,2250	91.260,00
Pesada	1,9704	118.223,00
Total	2,2470	212.580,00

A Tabela IV.24 mostra a solução encontrada por SILVA JUNIOR et al (2008b) por meio do algoritmo heurístico construtivo (HC) e a comparação com algoritmo genético (AG). Estes resultados foram obtidos somente para alocação de capacitores, sem considerar o custo de instalação dos bancos. A Tabela IV.25 apresenta a reprodução dessas duas soluções no algoritmo proposto neste trabalho. As comparações serão realizadas com esses valores.

Tabela IV.24 – Alocação Ótima de Bancos em SILVA JUNIOR et al (2008b).

Barra	Quantidade de Bancos (HC)	Quantidade de Bancos (AG)
13	1	1
22	1	2
60	1	1
62	3	3
63	1	1
65	2	2

Tabela IV.25 – Reprodução das Perdas de SILVA JUNIOR et al (2008b).

	Solução HC	Solução AG
Custo das Perdas no Algoritmo Proposto	146.440,00	146.420,00

A fim de avaliar sua eficiência, o algoritmo proposto foi então aplicado a este sistema de 69 barras nas mesmas condições de SILVA JUNIOR et al, 2008, ou seja, somente com a alocação de bancos de capacitores e utilizando as mesmas 28 barras candidatas. Os resultados são apresentados nas tabelas IV.26 e IV.27. A simulação foi realizada considerando o formigueiro com 200 formigas. Os mesmos resultados foram obtidos para 300 formigas, mostrando a robustez do algoritmo proposto.

Comparando os resultados das tabelas IV.24 e IV.26, verifica-se que as metodologias HC e a técnica proposta alocaram 9 capacitores de 200 kVAr. No entanto, a localização dos bancos ocorre em barras diferentes, conduzindo a um resultado melhor na metodologia proposta, conforme se observa comparando o custo das perdas entre as tabelas IV.25 e IV.27. Observando essas duas tabelas, é possível notar que o custo total das perdas obtido com o método colônia de formigas proposto neste trabalho é menor que no resultado existente na literatura.

Tabela IV.26 – Alocação de Bancos no Sistema 69 Barras pelo Algoritmo Proposto.

Barra	Quantidade de Bancos
12	1
22	1
61	3
62	3
64	1

Tabela IV.27 – Resultado das Perdas no Sistema 69 Barras pelo Algoritmo Proposto.

Nível de carga	Perdas (MW)	Custo das perdas (\$)
Leve	0,0581	3.486,00
Média	0,1463	59.339,28
Pesada	1,3744	82.464,00
Total	1,5788	145.289,28

Outra simulação foi realizada com o algoritmo colônia de formigas proposto considerando-se o custo de instalação dos bancos. O resultado obtido mostra que o

método proposto instala a mesma quantidade de bancos (9 bancos), no entanto isto ocorre em menor número de barras, confirmando novamente seu bom desempenho. A Tabela IV.28 mostra as barras e a correspondente quantidade de bancos de capacitores alocados. Já a Tabela IV.29 apresenta as perdas para os três níveis de carga para esta situação.

Conforme esperado, com a consideração das restrições de custo de instalação ocorreu um aumento do custo das perdas, pois o algoritmo optou por selecionar uma solução que, embora apresente maiores perdas, a Fob total diminuiu de valor ao instalar bancos em menor quantidade de barras, com a redução do custo de instalação.

Tabela IV.28 – Solução considerando Custo de Instalação no Sistema 69 Barras.

Barra	Quantidade de Bancos
17	2
61	3
62	3
65	1

Tabela IV.29 – Perdas considerando Custo de Instalação no Sistema 69 Barras.

Nível de carga	Perdas (MW)	Custo das perdas (\$)
Leve	0,0600	3.600,00
Média	0,1473	59.744,88
Pesada	1,3714	82.284,00
Total	1,5787	145.628,88

A seguir, foi realizada uma simulação com a inclusão de quatro transformadores no sistema de 69 barras. Os transformadores foram inseridos nos ramos 14-15, 28-29, 36-37 e 54-55. A Tabela IV.30 mostra o ajuste dos tapes para os três níveis de carga. A localização e quantidade de bancos de capacitores são as mesmas apresentadas na Tabela IV.28. A Tabela IV.31 mostra as perdas no sistema, podendo-se verificar que ocorreu uma redução de perdas no horário de carga pesada devido aos ajustes dos tapes.

Tabela IV.30 – Ajuste de Tapes no Sistema 69 Barras.

Transformador (circuito)	14-15	28-29	36-37	54-55
Tape (nível leve)	1,00	1,00	1,00	1,00
Tape (nível médio)	1,00	1,00	1,00	1,00
Tape (nível pesado)	1,01	1,00	1,00	1,01

Tabela IV.31 – Perdas e Fob no Sistema 69 Barras com Transformador.

Nível de carga	Perdas (MW)	Custo das perdas (\$)
Leve	0,0600	3.600,00
Média	0,1473	59.745,00
Pesada	1,2863	77.175,00
Total	1,4936	140.520,00
Fob (\$)	151.720,00	

Finalmente, foi realizada uma simulação completa considerando alocação de capacitores, ajuste de tapes e penalização por violação de tensão proporcional a \$ 100.000. O caso base apresentou violação máxima na barra 65, cuja tensão foi de 0,7268 pu. O custo do caso base, considerando as devidas penalizações, foi de \$ 560.840,00. Os resultados da simulação encontram-se nas tabelas IV.32 a IV.34.

Tabela IV.32 – Solução Completa no Sistema 69 Barras: Capacitores.

Barra	Quantidade de Bancos
10	3
22	2
60	3
62	2
63	3
65	2

Tabela IV.33 – Solução Completa no Sistema 69 Barras: Ajuste de Tapes.

Transformador (circuito)	14-15	28-29	36-37	54-55
Tape (nível leve)	1,00	1,00	1,00	1,00
Tape (nível médio)	1,00	1,00	1,00	1,00
Tape (nível pesado)	1,05	1,00	1,00	1,03

Tabela IV.34 – Perdas e Fob no Sistema 69 Barras: Solução Final.

Nível de carga	Perdas (MW)	Custo das perdas (\$)
Leve	0,1191	7.146,00
Média	0,1733	70.290,00
Pesada	1,4708	88.248,00
Total	1,7632	165.684,00
Fob (\$)	304.310,00	

Conforme esperado, esta última simulação mostra que a solução encontrada apresenta maiores perdas, devido à escolha por uma solução com menor violação de tensão. A tensão mais baixa, neste caso, aumentou de 0,7268 para 0,8220 pu, na mesma barra 65. Pode-se observar também que, para melhorar o perfil de tensão, foram alocados mais capacitores e os tapes reajustados no nível de carga pesado.

Os resultados obtidos nessas simulações também mostram a eficiência do método proposto para tratamento de função multicompromisso. O algoritmo foi capaz de selecionar soluções mais adequadas à medida que foram acrescentados mais objetivos a ser otimizados a cada nova simulação. O tempo computacional médio para as simulações foi de 2 horas, mostrando uma aplicação da metodologia para casos relacionados com o planejamento dos sistemas.

IV.5. Sistema 476 Barras

Para verificar a eficácia da metodologia proposta em um sistema real, utilizou-se um sistema de 476 barras (GOMES et al., 2005), contendo 2 alimentadores aéreos urbanos de 13,8 kV. Um destes alimentadores possui 258 barras, carga ativa de 5140 kW e carga reativa de 1949 kVAr. O outro alimentador possui 218 barras, carga ativa de 3874 kW e carga reativa de 1498 kVAr.

Neste sistema, foram adotadas as mesmas condições de simulação do sistema de 69 barras, com exceção do custo das perdas, que foi de \$ 0,06/kWh para os níveis leve e médio e \$ 0,108/kWh para o nível pesado de carga. Os resultados também são comparados com a simulação feita em SILVA JUNIOR et al (2008b), que utiliza heurística construtiva baseada em função sigmóide e algoritmo genético.

Igualmente, SILVA JUNIOR et al (2008b) utiliza barras candidatas também na simulação deste sistema. O presente trabalho usou as 98 barras candidatas utilizadas pela referência para a simulação do sistema 476 barras. Além disso, como feito no sistema 69 barras, a solução encontrada por SILVA JUNIOR et al (2008b) é reproduzida no algoritmo proposto, a fim de tornar a comparação mais coerente.

O caso base para o sistema, calculado no método proposto, em três níveis de carga, é mostrado na Tabela IV.35.

Tabela IV.35 – Perdas no Caso Base no Sistema 476 Barras.

Perda total (MW)	Custo das perdas (\$)
1,6682	238.160,00

A Tabela IV.36 apresenta a alocação de bancos de 200kVAr encontrada por SILVA JUNIOR et al (2008b). A mesma solução foi obtida com HC e AG. A Tabela IV.37 mostra as perdas e os custos para esta solução, calculadas pelo método proposto.

As tabelas IV.38 e IV.39 apresentam a solução para alocação ótima de capacitores nas mesmas condições de SILVA JUNIOR et al (2008b) utilizando o algoritmo proposto, com 200 formigas. O resultado foi obtido com 98 iterações.

Tabela IV.36 – Solução em SILVA JUNIOR et al (2008b).

Barra	Quantidade de Bancos
16	1
20	1
31	2
59	2
66	2
70	2
160	3

Tabela IV.37 – Reprodução das Perdas e Custos de SILVA JUNIOR et al (2008b).

Perdas (MW)	1,4857
Custo das Perdas (\$)	209.040,00
Função Objetivo (\$)	219.440,00

Tabela IV.38 – Solução pelo Algoritmo Proposto para o Sistema 476 Barras.

Barra	Quantidade de Bancos
31	1
59	2
70	3
99	2
144	3
160	2

Tabela IV.39 – Perdas e Custos para o Sistema 476 Barras: Algoritmo Proposto.

Perdas (MW)	1,4619
Custo das Perdas (\$)	207.430,00
Função Objetivo (\$)	217.830,00

Comparando as tabelas IV.38 e IV.39 com as tabelas IV.36 e IV.37, observa-se que o algoritmo proposto neste trabalho apresentou novamente bom desempenho, encontrando solução ligeiramente melhor que a do algoritmo heurístico construtivo de SILVA JUNIOR et al (2008b).

A seguir, a próxima simulação considerou o custo de instalação por barra e a inclusão de dois transformadores nas linhas 6-8 e 52-55. A solução encontrada está nas tabelas IV.40 e IV.41. A simulação foi realizada com 300 formigas e o resultado encontrado com 180 iterações.

Tabela IV.40 – Solução com Custo de Instalação para o Sistema 476 Barras.

Barra	Quantidade de Bancos
31	3
70	2
91	3
124	2
160	3

Tabela IV.41 – Resultado com Custo de Instalação para o Sistema 476 Barras.

Perdas (MW)	1,4618
Custo das Perdas (\$)	207.430,00
Função Objetivo (\$)	222.830,00

Nesta simulação, os dois transformadores tiveram seus tapes ajustados em 1,00 nos três patamares de carga, não contribuindo para a redução das perdas. Durante a simulação do sistema, houve uma dificuldade em escolher em quais ramos seriam colocados os transformadores. Em muitos casos, o sistema se mostrou instável, não convergindo o cálculo do fluxo de potência. Alguns sistemas são menos sensíveis ao ajuste de tapes, como talvez seja o caso deste sistema 476 barras ou ainda é possível que simplesmente a localização dos transformadores tenha sido ineficiente para reduzir as perdas pelo ajuste de tapes.

Pode-se observar ainda que ocorreu uma redução no número de barras alocadas devido à inclusão do custo de instalação na função objetivo.

Finalmente, com a inclusão das penalizações por violação de tensão proporcionais a \$ 100.000, o algoritmo encontrou a solução mostrada nas tabelas IV.42 e IV.43. O caso base apresentou custo de \$ 2.181.100,00 e tensão mínima de 0,8536 pu na barra 213 durante o carregamento pesado. O alto custo imposto pelas penalizações ocorre devido ao fato de o sistema ser maior e, portanto, com grande quantidade de barras apresentando violação de tensão.

Tabela IV.42 – Solução Final para o Sistema 476 Barras.

Barra	Quantidade de Bancos
31	2
32	3
58	3
59	2
65	3
66	2
67	3
68	2
69	3
70	3
90	3
91	2
99	2
100	3

124	2
143	2
144	3
159	2
160	2

Tabela IV.43 – Resultado Final para o Sistema 476 Barras.

Perdas (MW)	1,8062
Custo das Perdas (\$)	287.590,00
Função Objetivo (\$)	379.390,00

O ajuste de tapes, também nesta simulação, não contribuiu para uma solução melhor, ficando os dois transformadores com os tapes ajustados em 1,00 nos três patamares de carga. Como já se esperava, o algoritmo aumentou a alocação de capacitores, reduzindo as violações de tensão, porém, aumentando as perdas. Foram alocados 47 bancos de capacitores em 19 barras, o que elevou a menor tensão do sistema na barra 213 para 0,9440 pu. Essa grande quantidade de capacitores no sistema fez com que a tensão ficasse acima de 1,0 pu em diversas barras, ocorrendo pequena violação da tensão máxima. As maiores tensões observadas foram de 1,0505 pu em grande parte das barras compreendidas entre a barra 157 e 257 no nível leve de carga. As violações do limite inferior ocorreram apenas no carregamento pesado. Observa-se, contudo, considerável redução nas penalizações, confirmada pelo custo total na função objetivo, que caiu de \$ 2.181.100,00 para \$ 379.390,00.

IV.6. Resumo das Simulações

A Tabela IV.44 mostra um resumo das simulações realizadas, quanto ao tempo computacional e condições de simulação. Pode-se verificar que o tempo computacional aumenta de acordo com o número de barras do sistema e com o número de formigas.

Tabela IV.44 – Resumo das Simulações.

Sistema	Tipo de simulação	Número de formigas	Tempo computacional aproximado	Número médio de iterações
14 barras	Somente capacitores	300	1,6 min	60
	Capacitores e tapes	300	5 min	140
33 barras	Somente capacitores	300	12 min	70
	Capacitores e tapes	300	20 min	120
69 barras	Somente capacitores	200	2 h	150
		300	2,8 h	134
	Capacitores e tapes	300	6,5 h	370
		500	8,4 h	287
476 barras	Somente capacitores	200	37 h	98
	Capacitores e tapes	300	72 h	180

Conforme pode ser verificado na tabela resumo de simulações, em sistemas maiores associado à simulação completa (alocação de capacitores com ajuste de tapes) o tempo computacional cresce consideravelmente, conforme se observa, em particular, no sistema de 476 barras. Reduzir o número de formigas pode diminuir o tempo de simulação, no entanto, fica mais difícil garantir a qualidade da solução. Além disso, com menor quantidade de formigas, o algoritmo pode necessitar de mais iterações para convergir, visto que fica mais difícil varrer o espaço de busca. Adicionalmente, observa-

se que, em alguns casos, aumentando o número de formigas o algoritmo leva mais tempo para convergir, porém, consegue a convergência com menos iterações. Isso pode ser ilustrado na tabela pela variação do número de formigas no sistema 69 barras. Na simulação completa, com 300 formigas o tempo computacional foi de cerca de 6,5 horas e o algoritmo convergiu em média com 370 iterações. Por outro lado, ao aumentar o número de formigas para 500, embora o tempo computacional tenha sido de cerca de 8 horas, o número de iterações diminuiu para 287.

Apesar da eficiência do algoritmo em encontrar soluções de boa qualidade e responder bem à adição de diversos compromissos na função objetivo, o tempo computacional se mostrou um problema nos sistemas de maior porte.

IV.7. Conclusão

Este capítulo apresentou algumas simulações da metodologia proposta para resolver o problema de minimização de perdas nos SDE por meio da alocação de capacitores e ajuste de tapes com penalizações por violação de tensão. Os testes foram realizados em alguns sistemas existentes na literatura, mostrando que o método é eficiente em encontrar soluções de boa qualidade. As simulações realizadas nos sistemas de 14 e 33 barras serviram para comprovar o bom desempenho do algoritmo neste sentido. Igualmente, as simulações nos sistemas de 69 e 476 barras foram satisfatórias e os resultados obtidos foram compatíveis com a literatura, sendo comparados com outras metodologias existentes.

Além disso, em todas as simulações foi possível verificar a boa aplicabilidade e eficiência do método no tratamento de funções multicompromisso.

Com a representação do custo de instalação, o método proposto foi capaz de alocar os bancos em menor quantidade de barras, resultado que já era esperado com a inclusão desse custo adicional.

A consideração do custo de violação dos limites de tensão leva o algoritmo a selecionar, quando possível, soluções que não incorram em violação de tensão, conforme foi observado no caso do sistema 14 barras. Nos demais casos, principalmente devido ao nível de carga pesada, não foi possível encontrar solução que não violasse tensão, no entanto, o algoritmo foi capaz de selecionar soluções em que o desvio de

tensão foi menor, contribuindo para conciliar redução de perdas com qualidade no nível de tensão.

O método se mostrou também eficiente com a inclusão do ajuste de tapes, onde se observou nos sistemas de 14, 33 e 69 barras a redução das perdas sem custo adicional.

O fato de o tempo computacional ser expressivo para sistemas de grande porte não deve ser uma razão para descartar a utilização do método proposto, uma vez que se mostrou eficiente em encontrar soluções de boa qualidade, compatíveis com a literatura. Isso é válido visto que o algoritmo desenvolvido pode ser adaptado para utilização em processamento paralelo, o que resultaria em menor tempo de simulação, tornando atrativa sua aplicação em sistemas reais de grande porte.

Finalmente, o capítulo seguinte apresenta as conclusões finais deste trabalho e perspectivas de trabalhos futuros.

Capítulo V

Conclusão e Trabalhos Futuros

V.1. Conclusão

O método proposto neste trabalho para a minimização de perdas nos sistemas de distribuição de energia elétrica através da alocação de capacitores combinada com o ajuste de taps de transformadores e restrições de violação de limites de tensão mostrou-se eficiente em encontrar soluções de boa qualidade, conforme se verifica ao compará-lo com outros casos existentes na literatura.

O método foi baseado na técnica colônia de formigas, incluindo modificações importantes que tornaram o algoritmo mais eficiente e adaptado para resolver este problema particular.

Algumas dessas modificações na estrutura básica do algoritmo colônia de formigas foram: armazenamento da melhor solução encontrada em cada iteração (solução rainha), evaporação diferenciada, busca de vizinhança e o critério de convergência baseado na concentração de feromônio na solução rainha. O algoritmo colônia de formigas especializado proposto nesta dissertação obteve resultados compatíveis com outras metodologias existentes na literatura, como heurística construtiva e algoritmo genético.

Importante ressaltar a eficiência da metodologia proposta no tratamento de funções multicompromisso. O algoritmo respondeu bem à inclusão de diversos compromissos a ser otimizados, como o custo de instalação dos bancos por barra e a penalização por violação de tensão.

Ao se considerar o custo de instalação na função objetivo do problema, o algoritmo foi capaz de selecionar soluções que alocavam os bancos em menor número de barras.

Outro aspecto acrescentado ao problema foi a penalização por violação dos limites de tensão. Neste caso, o algoritmo se mostrou também capaz de optar por uma solução que não violasse essa restrição. Em muitos casos, não foi possível encontrar uma solução em que não houvesse violação de tensão, principalmente devido ao período de carga pesada, contudo, a técnica desenvolvida foi eficiente em selecionar soluções com menores desvios de tensão, mesmo que isso envolvesse aumentar as perdas.

As simulações realizadas neste trabalho mostraram que o ajuste de tapes é uma técnica que pode ser associada à alocação de capacitores para melhorar o perfil de tensão e, conseqüentemente, para diminuir as perdas, o que acontece sem qualquer custo adicional, levando a reduzir ainda mais o valor da função objetivo da solução encontrada.

Naturalmente, por se tratar de uma meta-heurística, a metodologia proposta não é capaz de garantir a certeza de que a solução encontrada seja a ótima global. No entanto, como já mencionado, os resultados encontrados e comparados com a literatura mostram que as soluções foram de boa qualidade, sendo até ligeiramente melhores do que resultados obtidos a partir de outras metodologias.

Melhores soluções podem ser alcançadas com maior certeza de que sejam ótimas aumentando o número de agentes (formigas) na simulação. No entanto, o tempo de simulação computacional cresce consideravelmente, inviabilizando essa alternativa em sistemas de maior porte. Embora as soluções encontradas tenham sido de boa qualidade quanto ao valor da função objetivo, o tempo computacional se mostrou como um aspecto negativo, principalmente em sistemas maiores. A metodologia, no entanto, permite a adaptação para utilização em processamento paralelo, o que resulta em menor tempo de simulação, permitindo a análise de vários casos de planejamento. Essa adaptação seria bastante atrativa, viabilizando fortemente a utilização do método proposto em sistemas de grande porte.

V.2. Trabalhos Futuros

Conforme mencionado no item anterior, o algoritmo desenvolvido é adequado para aplicação de processamento paralelo, o que permitiria o uso dessa ferramenta para a análise de sistemas reais de grande porte com tempos computacionais compatíveis. Portanto, uma próxima etapa a ser desenvolvida é adaptar a técnica para uma arquitetura paralela em cluster (PITANGA, 2008). O processamento paralelo permite que um algoritmo complexo, de elevado tempo computacional, tenha sua execução distribuída em vários processadores e memórias, permitindo considerável redução no tempo de simulação. Assim, a aplicação de cluster deve ser arquitetada como continuidade deste trabalho.

Outro aspecto que pode ser considerado em trabalhos posteriores é a inclusão da reconfiguração de redes de distribuição associada à alocação de capacitores e ajuste de tapes, tornando a ferramenta mais completa na análise da redução de perdas. O método desenvolvido pode ainda ser adaptado para o estudo de redes inteligentes (*smart grids*), realidade cada vez mais presente nos sistemas elétricos.

Além disso, poderia ser feita uma análise dos resultados da metodologia proposta utilizando um programa de fluxo de potência ótimo (FPO) para o cálculo do fluxo de carga, ao invés do convencional método iterativo de Newton-Raphson.

Adicionalmente, poderiam ser desenvolvidas técnicas que permitissem uma análise prévia do problema, como um índice de sensibilidade das barras à alocação de capacitores. Este processo identificaria previamente as melhores barras candidatas a receber a instalação de bancos de capacitores, o que reduziria o espaço de busca e, provavelmente, o tempo computacional.

Finalmente, o método proposto neste trabalho baseado na técnica colônia de formigas abre a possibilidade de desenvolvimento de ferramentas computacionais híbridas, combinando a técnica utilizada com outras metodologias, o que pode originar algoritmos mais bem adaptados e eficientes.

Apêndice A

Sistemas Utilizados

A.1. Introdução

Este apêndice apresenta os dados dos sistemas utilizados, comumente encontrados na literatura: 14, 33, 69 e 476 barras.

A.2. Sistema 14 Barras

O sistema 14 barras possui tensão base de 23 kV e potência base de 100 MVA. A barra de referência é a barra 1. Em todas as tabelas, P representa a potência ativa e Q a potência reativa.

Tabela A.1 – Dados das Barras do Sistema 14 Barras.

Barra	P (MW)	Q (MVAR)
1	0	0
2	2	1,6
3	3	1,5
4	2	0,8
5	1,5	1,2
6	4	2,7
7	5	3

8	1	0,9
9	0,6	0,1
10	4,5	2
11	1	0,9
12	1	0,7
13	1	0,9
14	2,1	1

Tabela A.2 – Dados das Linhas do Sistema 14 Barras.

De	Para	Resistência (pu)	Reatância (pu)
1	2	0,075	0,10
2	3	0,080	0,11
2	4	0,090	0,18
4	5	0,040	0,04
1	6	0,110	0,11
6	7	0,080	0,11
6	8	0,110	0,11
7	9	0,110	0,11
7	10	0,080	0,11
1	11	0,110	0,11
11	12	0,090	0,12
11	13	0,080	0,11
13	14	0,040	0,04

A.3. Sistema 33 Barras

Este sistema possui tensão de 12,66 kV e potência base de 100 MVA, sendo a barra de geração a de número 33.

Tabela A.3 – Dados das Barras do Sistema 33 Barras.

Barra	P (kW)	Q (kVAR)
1	100.0	60.0
2	90.0	40.0
3	120.0	80.0
4	60.0	30.0
5	60.0	20.0
6	200.0	100.0
7	200.0	100.0
8	60.0	20.0
9	60.0	20.0
10	45.0	30.0
11	60.0	35.0
12	60.0	35.0
13	120.0	80.0
14	60.0	10.0
15	60.0	20.0
16	60.0	20.0
17	90.0	40.0
18	90.0	40.0
19	90.0	40.0
20	90.0	40.0
21	90.0	40.0
22	90.0	50.0
23	420.0	200.0
24	420.0	200.0
25	60.0	25.0
26	60.0	25.0

27	60.0	20.0
28	120.0	70.0
29	200.0	600.0
30	150.0	70.0
31	210.0	100.0
32	60.0	40.0
33	0.0	0.0

Tabela A.4 – Dados das Linhas do Sistema 33 Barras.

De	Para	Resistência (ohms)	Reatância (ohms)
33	1	0,0922	0,047
1	2	0,493	0,2511
2	3	0,366	0,1864
3	4	0,3811	0,1941
4	5	0,819	0,707
5	6	0,1872	0,6188
6	7	0,7114	0,2351
7	8	1,03	0,74
8	9	1,044	0,74
9	10	0,1966	0,065
10	11	0,3744	0,1238
11	12	1,468	1,155
12	13	0,5416	0,7129
13	14	0,591	0,526
14	15	0,7463	0,545
15	16	1,299	1,721
16	17	0,732	0,574
1	18	0,164	0,1565
18	19	1,5042	1,3554
19	20	0,4095	0,4784
20	21	0,7089	0,9373
2	22	0,4512	0,3083
22	23	0,898	0,7091

23	24	0,896	0,7011
5	25	0,203	0,1034
25	26	0,2842	0,1447
26	27	1,059	0,9337
27	28	0,8042	0,7006
28	29	0,5075	0,2585
29	30	0,9744	0,963
30	31	0,3105	0,3619
31	32	0,341	0,5302

A.4. Sistema 69 Barras

O sistema de 69 barras possui tensão base de 12,66 kV e potência base de 10 kVA, sendo a barra de geração a de número 1. Nas tabelas seguintes, R é a resistência e X a reatância.

Tabela A.5 – Dados das Barras do Sistema 69 Barras.

Barra	P (kW)	Q (kVAr)
1	0,0	0,0
2	0,0	0,0
3	0,0	0,0
4	0,0	0,0
5	0,0	0,0
6	2,6	2,2
7	40,4	30,0
8	75,0	54,0
9	30,0	22,0
10	28,0	19,0
11	145,0	104,0
12	145,0	104,0
13	8,0	5,5

14	8,0	5,5
15	0,0	0,0
16	45,5	30,0
17	60,0	35,0
18	60,0	35,0
19	0,0	0,0
20	1,0	0,6
21	114,0	81,0
22	5,3	3,5
23	0,0	0,0
24	28,0	20,0
25	0,0	0,0
26	14,0	10,0
27	14,0	10,0
28	26,0	18,6
29	26,0	18,6
30	0,0	0,0
31	0,0	0,0
32	0,0	0,0
33	14,0	10,0
34	19,5	14,0
35	6,0	4,0
36	26,0	18,55
37	26,0	18,55
38	0,0	0,0
39	24,0	17,0
40	24,0	17,0
41	1,2	1,0
42	0,0	0,0
43	6,0	4,3
44	0,0	0,0
45	39,22	26,3
46	39,22	26,3
47	0,0	0,0
48	79,0	56,4
49	384,7	274,5

50	384,7	274,5
51	40,5	28,3
52	3,6	2,7
53	4,35	3,5
54	26,4	19,0
55	24,0	17,2
56	0,0	0,0
57	0,0	0,0
58	0,0	0,0
59	100,0	72,0
60	0,0	0,0
61	1244,0	888,0
62	32,0	23,0
63	0,0	0,0
64	227,0	162,0
65	59,0	42,0
66	18,0	13,0
67	18,0	13,0
68	28,0	20,0
69	28,0	20,0

Tabela A.6 – Dados das Linhas do Sistema 69 Barras.

De	Para	R (ohms)	X (ohms)
1	2	0,00050	0,00120
2	3	0,00050	0,00120
3	4	0,00150	0,00360
4	5	0,02510	0,02940
5	6	0,36600	0,18640
6	7	0,38110	0,19410
7	8	0,09220	0,04700
8	9	0,04930	0,02510
9	10	0,81900	0,27070

10	11	0,18720	0,06190
11	12	0,71140	0,23510
12	13	1,03000	0,34000
13	14	1,04400	0,34500
14	15	1,05800	0,34960
15	16	0,19660	0,06500
16	17	0,37440	0,12380
17	18	0,00470	0,00160
18	19	0,32760	0,10830
19	20	0,21060	0,06960
20	21	0,34160	0,11290
21	22	0,01400	0,00460
22	23	0,15910	0,05260
23	24	0,34630	0,11450
24	25	0,74880	0,24750
25	26	0,30890	0,10210
26	27	0,17320	0,05720
2	28	0,00440	0,01080
28	29	0,06400	0,15650
29	30	0,39780	0,13150
30	31	0,07020	0,02320
31	32	0,35100	0,11600
32	33	0,83900	0,28160
33	34	1,70800	0,56460
34	35	1,47400	0,48730
3	36	0,00440	0,01080
36	37	0,06400	0,15650
37	38	0,10530	0,12300
38	39	0,03040	0,03550
39	40	0,00180	0,00210
40	41	0,72830	0,85090
41	42	0,31000	0,36230
42	43	0,04100	0,04780
43	44	0,00920	0,01160

44	45	0,10890	0,13730
45	46	0,00090	0,00120
4	47	0,00340	0,00840
47	48	0,08510	0,20830
48	49	0,28980	0,70910
49	50	0,08220	0,20110
8	51	0,09280	0,04730
51	52	0,33190	0,11140
9	53	0,17400	0,08860
53	54	0,20300	0,10340
54	55	0,28420	0,14470
55	56	0,28130	0,14330
56	57	1,59000	0,53370
57	58	0,78370	0,26300
58	59	0,30420	0,10060
59	60	0,38610	0,11720
60	61	0,50750	0,25850
61	62	0,09740	0,04960
62	63	0,14500	0,07380
63	64	0,71050	0,36190
64	65	1,04100	0,53020
11	66	0,20120	0,06110
66	67	0,00470	0,00140
12	68	0,73940	0,24440
68	69	0,00470	0,00160

A.5. Sistema 476 Barras

Este sistema possui dois alimentadores aéreos urbanos de 13,8 kV. O primeiro possui 258 barras, carga ativa de 5140 kW e carga reativa de 1949 kVAr, enquanto que o segundo possui 218 barras, carga ativa de 3874 kW e carga reativa de 1498 kVAr. As bases utilizadas são 100 MVA e 7960,4 V. As barras do primeiro alimentador são numeradas de 1 a 257, enquanto que as barras do segundo alimentador são numeradas de 1001 a 1218. A barra 1000 é a barra de geração.

Tabela A.7 – Dados das Barras do Sistema 476 Barras.

Barra	P (MW)	Q(MVAR)	Barra	P (MW)	Q(MVAR)	Barra	P (MW)	Q(MVAR)
1	0	0	37	0	0	73	0	0
2	0	0	38	0	0	74	0	0
3	0	0	39	0	0	75	0	0
4	0.43015	0.17782	40	0	0	76	0	0
5	0	0	41	0	0	77	0	0
6	0	0	42	0	0	78	0	0
7	0	0	43	0	0	79	0	0
8	0	0	44	0	0	80	0	0
9	0.43015	0.17782	45	0	0	81	0	0
10	0.43015	0.17782	46	0	0	82	0	0
11	0.43015	0.17782	47	0	0	83	0	0
12	0	0	48	0	0	84	0	0
13	0	0	49	0	0	85	0	0
14	0	0	50	0	0	86	0	0
15	0	0	51	0	0	87	0	0
16	0.43015	0.17782	52	0.001003	-0.00281	88	0	0
17	0.43015	0.17782	53	0	0	89	0	0
18	0	0	54	0	0	90	0	0
19	0	0	55	0	0	91	0.43015	0.17782
20	0.43015	0.17782	56	0	0	92	0	0
21	0	0	57	0	0	93	0.000685	0.00203
22	0	0	58	0	0	94	0	0
23	0	0	59	0.43015	0.17782	95	0	0
24	0	0	60	0	0	96	0	0
25	0	0	61	0	0	97	0.000822	0.001374
26	0	0	62	0	0	98	0	0
27	0	0	63	0	0	99	0.13015	0.042778
28	0	0	64	0	0	100	0	0
29	0	0	65	0	0	101	0	0
30	0	0	66	0.43015	0.17782	102	0	0
31	0.43015	0.17782	67	0.323	0.106165	103	0	0
32	0	0	68	0	0	104	0	0
33	0	0	69	0	0	105	0	0
34	0	0	70	0.43015	0.17782	106	0	0
35	0	0	71	0	0	107	0	0
36	0	0	72	0	0	108	0	0

Barra	P (MW)	Q(MVAR)	Barra	P (MW)	Q(MVAR)	Barra	P (MW)	Q(MVAR)
109	0	0	145	0	0	181	0	0
110	0	0	146	0	0	182	0	0
111	0	0	147	0	0	183	0	0
112	0.000495	0.0014979	148	0	0	184	0	0
113	0	0	149	0.140238	0.074929	185	0	0
114	0	0	150	0	0	186	0	0
115	0	0	151	0	0	187	0	0
116	0	0	152	0	0	188	0	0
117	0.046746	0.0249762	153	0.04631	0.029671	189	0	0
118	0	0	154	0	0	190	0	0
119	0	0	155	0	0	191	0	0
120	0	0	156	0	0	192	0	0
121	0	0	157	0	0	193	0	0
122	0	0	158	0	0	194	0	0
123	0	0	159	0	0	195	0	0
124	0.47025	0.154564	160	0.78375	0.257606	196	0	0
125	0	0	161	0	0	197	0	0
126	0	0	162	0	0	198	0	0
127	0	0	163	0	0	199	0	0
128	0	0	164	0	0	200	0	0
129	0	0	165	0	0	201	0	0
130	0	0	166	0	0	202	0	0
131	0	0	167	0	0	203	0	0
132	0	0	168	0	0	204	0	0
133	0	0	169	0	0	205	0	0
134	0	0	170	0	0	206	0	0
135	0	0	171	0.213342	0.061394	207	0	0
136	0	0	172	0	0	208	0	0
137	0	0	173	0	0	209	0	0
138	0	0	174	0	0	210	0	0
139	0	0	175	0	0	211	0	0
140	0	0	176	0	0	212	0	0
141	0.000591	0.001121	177	0	0	213	0.32015	0.105228
142	0	0	178	0	0	214	0	0
143	0.083506	0.0205608	179	0	0	215	0	0
144	0	0	180	0	0	216	0	0

Barra	P(MW)	Q(MVAR)	Barra	P (MW)	Q(MVAR)	Barra	P (MW)	Q(MVAR)
217	0	0	253	0	0	1032	0	0
218	0	0	254	0	0	1033	0.01634	0.005371
219	0	0	255	0	0	1034	0.01501	0.004934
220	0	0	256	0	0	1035	0	0
221	0	0	257	0	0	1036	0	0
222	0	0	1001	0	0	1037	0	0
223	0	0	1002	0	0	1038	0	0
224	0	0	1003	0.017005	0.005589	1039	0	0
225	0	0	1004	0	0	1040	0	0
226	0	0	1005	0.038	0.01249	1041	0	0
227	0	0	1006	0	0	1042	0.00627	0.002061
228	0	0	1007	0	0	1043	0	0
229	0	0	1008	0	0	1044	0	0
230	0	0	1009	0	0	1045	0	0
231	0	0	1010	0.03952	0.01299	1046	0	0
232	0	0	1011	0.027075	0.008899	1047	0.01482	0.004871
233	0	0	1012	0	0	1048	0.0019	0.000625
234	0	0	1013	0.029545	0.009711	1049	0.005415	0.00178
235	0	0	1014	0	0	1050	0	0
236	0	0	1015	0	0	1051	0.03534	0.011616
237	0	0	1016	0.012065	0.003966	1052	0.011305	0.003716
238	0	0	1017	0.013205	0.00434	1053	0	0
239	0	0	1018	0.01577	0.005183	1054	0	0
240	0	0	1019	0	0	1055	0	0
241	0	0	1020	0	0	1056	0.027455	0.009024
242	0	0	1021	0.01007	0.00331	1057	0	0
243	0	0	1022	0.026695	0.008774	1058	0	0
244	0	0	1021	0	0	1059	0	0
245	0	0	1024	0	0	1060	0	0
246	0	0	1025	0	0	1061	0	0
247	0	0	1026	0.005605	0.001842	1062	0.00779	0.00256
248	0	0	1027	0	0	1063	0	0
247	0	0	1028	0.01102	0.003622	1064	0	0
250	0	0	1029	0	0	1065	0	0
251	0	0	1030	0	0	1066	0	0
252	0	0	1031	0.042655	0.01402	1067	0	0

Barra	P (MW)	Q(MVAR)	Barra	P (MW)	Q(MVAR)	Barra	P (MW)	Q(MVAR)
1068	0	0	1104	0.005795	0.001905	1140	0	0
1069	0	0	1105	0	0	1141	0.018525	0.006089
1070	0.010545	0.00346597	1106	0.00513	0.001686	1142	0	0
1071	0	0	1107	0	0	1143	0.017195	0.005652
1072	0	0	1108	0.00551	0.001811	1144	0	0
1073	0	0	1109	0	0	1145	0	0
1074	0	0	1110	0.00019	6.25E-02	1146	0	0
1075	0	0	1111	0	0	1147	0	0
1076	0	0	1112	0	0	1148	0	0
1077	0	0	1113	0	0	1149	0	0
1078	0	0	1114	0	0	1150	0	0
1079	0	0	1115	0	0	1151	0	0
1080	0	0	1116	0	0	1152	0	0
1081	0	0	1117	0	0	1153	0.010925	0.003591
1082	0	0	1118	0	0	1154	0.03401	0.011179
1083	0	0	1119	0	0	1155	0	0
1084	0	0	1120	0.006935	0.002279	1156	0.001995	0.000656
1085	0.00437	0.00143635	1121	0	0	1157	0	0
1086	0	0	1122	0	0	1158	0	0
1087	0	0	1123	0.011115	0.003653	1159	0	0
1088	0	0	1124	0	0	1160	0.087495	0.028758
1089	0	0	1125	0	0	1161	0	0
1090	0.00608	0.0019984	1126	0	0	1162	0	0
1091	0	0	1127	0	0	1163	0	0
1092	0	0	1128	0	0	1164	0	0
1093	0.010735	0.00352842	1129	0.012255	0.004028	1165	0	0
1094	0	0	1130	0.019665	0.006464	1166	0	0
1095	0	0	1131	0	0	1167	0	0
1096	0	0	1132	0	0	1168	0	0
1097	0	0	1133	0.020235	0.006651	1169	0.011685	0.003841
1098	0	0	1134	0	0	1170	0	0
1099	0	0	1135	0.075335	0.024761	1171	0.015865	0.005215
1100	0.020615	0.00677582	1136	0	0	1172	0	0
1101	0	0	1137	0.01083	0.00356	1173	0	0
1102	0.027645	0.00908647	1138	0.004085	0.001343	1174	0.008645	0.002841
1103	0	0	1139	0.024225	0.007962	1175	0	0

Barra	P (MW)	Q(MVAR)	Barra	P (MW)	Q(MVAR)
1176	0.039995	0.0131457	1201	0	0
1177	0	0	1202	0	0
1178	0	0	1203	0	0
1179	0	0	1204	0.012065	0.00396557
1180	0.0209	0.0068695	1205	0.016055	0.00527702
1181	0.002185	0.00071818	1206	0.020615	0.00677582
1182	0	0	1207	0	0
1183	0	0	1208	0	0
1184	0	0	1209	0	0
1185	0	0	1210	0.004085	0.00134267
1186	0	0	1211	0.014725	0.00483987
1187	0.00551	0.00181105	1212	0.017385	0.005714
1188	0.0114	0.003747	1213	0.00646	0.002123
1189	0.12749	0.0419039	1214	0.02527	0.008306
1190	0	0	1215	0	0
1191	0	0	1216	0.01292	0.004247
1192	0	0	1217	0	0
1193	0	0	1218	0.01292	0.004247
1194	0	0			
1195	0	0			
1196	0.00703	0.00231065			
1197	0	0			
1198	0	0			
1199	0.01254	0.0041217			
1200	0	0			

Tabela A.8 – Dados das Linhas do Sistema 476 Barras.

De	Para	R (pu)	X (pu)	De	Para	R (pu)	X (pu)
1	1000	0,000283556	0,000378075	160	155	0,00025205	0,000110272
2	1	0,00001	0,00001	161	156	0,00211092	0,000976694
3	2	0,000299309	0,000598619	162	156	0,000393828	0,000189038
4	3	0,0010082	0,000456841	163	158	0,00001	0,00001
5	3	0,000204791	0,000425334	164	159	0,00001	0,00001
6	5	0,0000945188	0,000189038	165	163	0,0005041	0,000236297
7	6	0,000598619	0,00118148	166	164	0,000110272	0,000220544
8	6	0,000110272	0,000220544	167	165	0,00001	0,00001
9	7	0,000189038	0,000362322	168	166	0,00001	0,00001
10	7	0,0000315063	0,0000630125	169	166	0,0000315063	0,0000630125
11	8	0,0000945188	0,000173284	170	167	0,000598619	0,000267803
12	9	0,000204791	0,000409581	171	168	0,000598619	0,000267803
13	12	0,0000787656	0,000173284	172	169	0,000189038	0,000378075
14	13	0,00001	0,00001	173	170	0,000157531	0,0000787656
15	14	0,000110272	0,000220544	174	170	0,000283556	0,000126025
16	15	0,000267803	0,000519853	175	172	0,000283556	0,000567113
17	15	0,0000315063	0,0000630125	176	173	0,00001	0,00001
18	15	0,0000945188	0,000189038	177	174	0,00001	0,00001
19	17	0,000283556	0,000330816	178	175	0,000330816	0,000157531
20	18	0,0000945188	0,000204791	179	175	0,000110272	0,000220544
21	19	0,000110272	0,000220544	180	176	0,0005041	0,000236297
22	21	0,00001	0,00001	181	177	0,000882175	0,000409581
23	22	0,0000157531	0,0000315063	182	178	0,00001	0,00001
24	23	0,000110272	0,000220544	183	178	0,00025205	0,000110272
25	23	0,0000945188	0,0000472594	184	179	0,0000787656	0,000157531
26	23	0,000456841	0,000220544	185	180	0,00155956	0,000724644
27	24	0,000110272	0,000204791	186	181	0,00001	0,00001
28	25	0,00001	0,00001	187	181	0,000803409	0,000362322
29	27	0,000220544	0,000456841	188	182	0,00140203	0,000645878
30	28	0,000393828	0,000189038	189	183	0,00001	0,00001
31	29	0,0000315063	0,0000630	125	190	185	0,00119724
32	29	0,0000787656	0,000157531	191	185	0,000567113	0,00025205
33	29	0,0000787656	0,000157531	192	186	0,000330816	0,000157531
34	30	0,000330816	0,0000630125	193	187	0,000409581	0,000189038
35	32	0,0005041	0,000236297	194	188	0,00001	0,00001
36	33	0,00001	0,00001	195	188	0,000913681	0,000425334

De	Para	R (pu)	X (pu)	De	Para	R (pu)	X (pu)
37	35	0,00001	0,00001	196	189	0,000362322	0,000173284
38	36	0,000189038	0,000378075	197	190	0,00001	0,00001
39	37	0,000393828	0,0000630125	198	190	0,000362322	0,000173284
40	38	0,0000315063	0,0000787656	199	191	0,000567113	0,00025205
41	40	0,000110272	0,000204791	200	193	0,000834916	0,000378075
42	40	0,000315063	0,000141778	201	194	0,000315063	0,000141778
43	40	0,000330816	0,000677384	202	195	0,00103971	0,000472594
44	41	0,000110272	0,000220544	203	195	0,00001	0,00001
45	43	0,0000945188	0,000189038	204	196	0,00118148	0,000551359
46	44	0,00001	0,00001	205	197	0,00321364	0,00148079
47	45	0,000472594	0,000220544	206	198	0,000393828	0,000189038
48	45	0,000267803	0,000535606	207	199	0,000267803	0,000126025
49	46	0,0000630125	0,000126025	208	199	0,0000945188	0,0000472594
50	47	0,000441088	0,000204791	209	200	0,000708891	0,000330816
51	48	0,0000787656	0,000157531	210	200	0,000677384	0,000315063
52	49	0,0000315063	0,0000472594	211	200	0,000614372	0,000283556
53	50	0,000441088	0,000204791	212	201	0,000346569	0,000157531
54	52	0,000126025	0,000141778	213	203	0,000157531	0,0000787656
55	52	0,000204791	0,000220544	214	205	0,00110272	0,0005041
56	52	0,0000787656	0,0000787656	215	206	0,00001	0,00001
57	53	0,00001	0,00001	216	208	0,00001	0,00001
58	54	0,0000945188	0,000110272	217	209	0,00001	0,00001
59	55	0,000409581	0,000834916	218	210	0,00001	0,00001
60	56	0,00001	0,00001	219	215	0,00118148	0,000551359
61	57	0,0000945188	0,0000472594	220	216	0,000519853	0,000236297
62	58	0,00001	0,00001	221	217	0,00138628	0,000645878
63	60	0,000141778	0,000173284	222	218	0,000220544	0,000110272
64	60	0,0000787656	0,0000945188	223	219	0,0144299	0,0000157531
65	61	0,000425334	0,000204791	224	220	0,000567113	0,00025205
66	61	0,000866422	0,000393828	225	220	0,00001	0,00001
67	62	0,000488347	0,000220544	226	221	0,000441088	0,000204791
68	64	0,0000787656	0,0000945188	227	221	0,000472594	0,000220544
69	68	0,000535606	0,000614372	228	222	0,00193763	0,000897928
70	68	0,000267803	0,000299309	229	223	0,000378075	0,000173284
71	69	0,000141778	0,000157531	230	225	0,000189038	0,0000945188
72	71	0,00001	0,00001	231	227	0,00001	0,00001
73	72	0,000519853	0,000582866	232	228	0,000236297	0,000110272
74	73	0,000126025	0,000141778	233	229	0,00001	0,00001

De	Para	R (pu)	X (pu)	De	Para	R (pu)	X (pu)
75	74	0,000346569	0,000393828	234	229	0,00154381	0,000708891
76	74	0,000425334	0,000204791	235	231	0,000850669	0,000393828
77	75	0,000236297	0,000267803	236	233	0,001276	0,000551359
78	76	0,00001	0,00001	237	235	0,000362322	0,000173284
79	77	0,000204791	0,000409581	238	235	0,000850669	0,000393828
80	78	0,00305611	0,00140203	239	235	0,000960941	0,000441088
81	79	0,000189038	0,000393828	240	236	0,000519853	0,000236297
82	79	0,000315063	0,000141778	241	238	0,000315063	0,000141778
83	79	0,00132326	0,000614372	242	239	0,00111847	0,000519853
84	80	0,000346569	0,000157531	243	239	0,000472594	0,000220544
85	80	0,00155956	0,000724644	244	240	0,00107121	0,000488347
86	80	0,000378075	0,000157531	245	240	0,00102395	0,000456841
87	81	0,0000945188	0,000189038	246	242	0,00001	0,00001
88	82	0,00001	0,00001	247	243	0,0005041	0,000236297
89	86	0,00001	0,00001	248	246	0,0005041	0,000236297
90	87	0,00001	0,00001	249	247	0,00001	0,00001
91	88	0,000189038	0,0000945188	250	248	0,000488347	0,000220544
92	89	0,00113423	0,0005041	251	249	0,000346569	0,000157531
93	90	0,0000315063	0,0000630125	252	250	0,000472594	0,000220544
94	92	0,000330816	0,000141778	253	250	0,000614372	0,000283556
95	92	0,00220544	0,0010082	254	253	0,000913681	0,000425334
96	93	0,00001	0,00001	255	254	0,000519853	0,000236297
97	93	0,000110272	0,000220544	256	254	0,00105546	0,000488347
98	94	0,000960941	0,000425334	257	255	0,000425334	0,000204791
99	96	0,000283556	0,000126025	1001	1000	0,0000787656	0,000157531
100	97	0,0000630125	0,000126025	1002	1001	0,00001	0,00001
101	97	0,0000630125	0,000126025	1003	1002	0,000693138	0,00138628
102	97	0,000236297	0,000472594	1004	1003	0,0000630125	0,000126025
103	98	0,000299309	0,000126025	1005	1004	0,000441088	0,000897928
104	98	0,00215818	0,000992447	1006	1004	0,00001	0,00001
105	100	0,0000945188	0,000173284	1007	1005	0,000220544	0,000456841
106	101	0,000362322	0,000173284	1008	1006	0,000535606	0,00025205
107	101	0,000456841	0,000220544	1009	1007	0,000236297	0,000472594
108	101	0,0000157531	0,0000315063	1010	1007	0,000299309	0,000141778
109	102	0,0000945188	0,000189038	1011	1008	0,000567113	0,00025205
110	104	0,00200065	0,000913681	1012	1008	0,00025205	0,000110272
111	105	0,00001	0,00001	1013	1009	0,000173284	0,000236297
112	105	0,000110272	0,000204791	1014	1009	0,0000630125	0,000141778

De	Para	R (pu)	X (pu)	De	Para	R (pu)	X (pu)
113	106	0,000535606	0,00025205	1015	1012	0,000204791	0,0000945188
114	106	0,00001	0,00001	1016	1012	0,000157531	0,0000787656
115	107	0,00001	0,00001	1017	1012	0,000897928	0,000409581
116	108	0,00001	0,00001	1018	1014	0,000110272	0,000220544
117	111	0,0000315063	0,0000787656	1019	1014	0,0000945188	0,0000472594
118	112	0,00001	0,00001	1020	1015	0,00001	0,00001
119	112	0,0000787656	0,000157531	1021	1015	0,00111847	0,000519853
120	113	0,00001	0,00001	1022	1018	0,000315063	0,000630125
121	114	0,000456841	0,000220544	1023	1019	0,00001	0,00001
122	115	0,0005041	0,000236297	1024	1020	0,000173284	0,0000787656
123	116	0,0000315063	0,0000630125	1025	1022	0,0000945188	0,000204791
124	118	0,000299309	0,000141778	1026	1023	0,000409581	0,000189038
125	119	0,00001	0,00001	1027	1025	0,00001	0,00001
126	120	0,000567113	0,00025205	1028	1026	0,000488347	0,000220544
127	122	0,00155956	0,000724644	1029	1027	0,0000945188	0,000189038
128	123	0,0000315063	0,0000630125	1030	1029	0,000126025	0,0000787656
129	125	0,0000787656	0,000157531	1031	1029	0,0000945188	0,000204791
130	126	0,000582866	0,000267803	1032	1030	0,00001	0,00001
131	127	0,00121299	0,000551359	1033	1031	0,000204791	0,000409581
132	127	0,000472594	0,000220544	1034	1032	0,000141778	0,0000945188
133	128	0,0000472594	0,0000945188	1035	1033	0,0000472594	0,0000945188
134	128	0,00001	0,00001	1036	1034	0,000220544	0,000141778
135	129	0,000630125	0,000283556	1037	1036	0,0000157531	0,0000315063
136	129	0,000409581	0,000834916	1038	1037	0,0000472594	0,0000945188
137	130	0,000535606	0,00025205	1039	1037	0,0000157531	0,0000315063
138	132	0,00001	0,00001	1040	1038	0,00001	0,00001
139	134	0,000519853	0,000220544	1041	1039	0,0000945188	0,0000630125
140	135	0,00001	0,00001	1042	1040	0,000126025	0,00025205
141	136	0,0000945188	0,000173284	1043	1040	0,000126025	0,00025205
142	137	0,000362322	0,000472594	1044	1041	0,0000945188	0,000173284
143	138	0,000330816	0,000157531	1045	1042	0,000110272	0,000204791
144	139	0,00001	0,00001	1046	1045	0,00001	0,00001
145	140	0,000472594	0,000220544	1047	1046	0,0000945188	0,000189038
146	141	0,000141778	0,000299309	1048	1047	0,0000945188	0,000189038
147	141	0,00001	0,00001	1049	1048	0,000126025	0,00025205
148	142	0,000157531	0,000220544	1050	1049	0,000126025	0,00025205
149	144	0,000173284	0,0000787656	1051	1050	0,0000787656	0,000173284
150	145	0,000519853	0,000236297	1052	1051	0,000157531	0,000330816

De	Para	R (pu)	X (pu)	De	Para	R (pu)	X (pu)
151	146	0,000488347	0,000992447	1053	1052	0,0000787656	0,000157531
152	146	0,00102395	0,000472594	1054	1053	0,00001	0,00001
153	147	0,000315063	0,000141778	1055	1054	0,000189038	0,000393828
154	148	0,000472594	0,000220544	1056	1055	0,0000630125	0,000110272
155	150	0,00001	0,00001	1057	1055	0,0000472594	0,0000945188
156	150	0,00141778	0,000661631	1058	1055	0,000157531	0,000330816
157	151	0,000693138	0,000315063	1059	1056	0,000110272	0,000204791
158	151	0,000110272	0,0000472594	1060	1058	0,00001	0,00001
159	151	0,0000157531	0,0000315063	1061	1060	0,000346569	0,000693138
1062	1061	0,0000787656	0,000141778	1144	1136	0,0000630125	0,0000472594
1063	1062	0,0000787656	0,000173284	1145	1136	0,000220544	0,000157531
1064	1063	0,000141778	0,000299309	1146	1138	0,000567113	0,00025205
1065	1063	0,00001	0,00001	1147	1139	0,000409581	0,000189038
1066	1064	0,0000315063	0,0000472594	1148	1140	0,000110272	0,000220544
1067	1065	0,0000472594	0,0000315063	1149	1140	0,00001	0,00001
1068	1066	0,0000945188	0,000189038	1150	1142	0,0000787656	0,000141778
1069	1068	0,00001	0,00001	1151	1144	0,00001	0,00001
1070	1069	0,000110272	0,000204791	1152	1145	0,00001	0,00001
1071	1070	0,000110272	0,000204791	1153	1146	0,000519853	0,000236297
1072	1071	0,00001	0,00001	1154	1146	0,000740397	0,000330816
1073	1071	0,000425334	0,000850669	1155	1147	0,00001	0,00001
1074	1072	0,000330816	0,000141778	1156	1149	0,000315063	0,000141778
1075	1073	0,0000157531	0,0000315063	1157	1150	0,000126025	0,00025205
1076	1073	0,0000157531	0,0000472594	1158	1150	0,0000787656	0,000157531
1077	1073	0,0000787656	0,000173284	1159	1150	0,000157531	0,000315063
1078	1074	0,00001	0,00001	1160	1151	0,000283556	0,000126025
1079	1075	0,00001	0,00001	1161	1152	0,000267803	0,000173284
1080	1076	0,00001	0,00001	1162	1155	0,000362322	0,000173284
1081	1077	0,000141778	0,000283556	1163	1157	0,00001	0,00001
1082	1077	0,000173284	0,000362322	1164	1159	0,000661631	0,000299309
1083	1077	0,0000157531	0,0000315063	1165	1159	0,000189038	0,000393828
1084	1078	0,000299309	0,000141778	1166	1161	0,000157531	0,0000945188
1085	1079	0,0000945188	0,000189038	1167	1161	0,000409581	0,000267803
1086	1080	0,000378075	0,000157531	1168	1161	0,00025205	0,000488347
1087	1081	0,00001	0,00001	1169	1163	0,0000630125	0,000110272
1088	1082	0,00001	0,00001	1170	1164	0,00001	0,00001
1089	1085	0,000283556	0,000126025	1171	1168	0,000236297	0,000488347
1090	1086	0,000378075	0,000157531	1172	1168	0,00001	0,00001

De	Para	R (pu)	X (pu)	De	Para	R (pu)	X (pu)
1091	1086	0,00001	0,00001	1173	1169	0,0000472594	0,0000945188
1092	1087	0,0000787656	0,000157531	1174	1170	0,000425334	0,000204791
1093	1088	0,0000787656	0,000173284	1175	1171	0,000157531	0,000315063
1094	1089	0,00001	0,00001	1176	1172	0,000299309	0,000141778
1095	1091	0,000346569	0,000157531	1177	1173	0,00001	0,00001
1096	1092	0,000330816	0,000661631	1178	1173	0,000157531	0,000299309
1097	1092	0,00001	0,00001	1179	1174	0,00204791	0,000945188
1098	1093	0,0000945188	0,000173284	1180	1177	0,000378075	0,000173284
1099	1094	0,000189038	0,0000787656	1181	1178	0,000267803	0,000126025
1100	1096	0,000110272	0,000204791	1182	1178	0,0000157531	0,0000315063
1101	1096	0,00001	0,00001	1183	1179	0,000472594	0,000220544
1102	1097	0,000283556	0,000126025	1184	1179	0,00001	0,00001
1103	1098	0,0000472594	0,000110272	1185	1182	0,0000472594	0,0000787656
1104	1098	0,000630125	0,000283556	1186	1182	0,000110272	0,0000472594
1105	1100	0,000220544	0,000157531	1187	1182	0,000819163	0,000378075
1106	1101	0,000126025	0,0000630125	1188	1183	0,00103971	0,000472594
1107	1103	0,0000787656	0,0000315063	1189	1184	0,000299309	0,000141778
1108	1103	0,00163833	0,00075615	1190	1185	0,000299309	0,000141778
1109	1103	0,0000945188	0,000189038	1191	1185	0,000315063	0,000141778
1110	1105	0,000110272	0,0000787656	1192	1185	0,00025205	0,0005041
1111	1105	0,00001	0,00001	1193	1186	0,00001	0,00001
1112	1107	0,00001	0,00001	1194	1190	0,00001	0,00001
1113	1109	0,00001	0,00001	1195	1191	0,00001	0,00001
1114	1110	0,000110272	0,0000787656	1196	1193	0,000472594	0,000220544
1115	1111	0,000598619	0,000267803	1197	1194	0,00170134	0,000787656
1116	1112	0,000236297	0,000110272	1198	1195	0,00176435	0,000803409
1117	1113	0,0000787656	0,000173284	1199	1196	0,000441088	0,000204791
1118	1114	0,000315063	0,000141778	1200	1197	0,000283556	0,000126025
1119	1114	0,0000630125	0,0000315063	1201	1197	0,000299309	0,000141778
1120	1116	0,000456841	0,000220544	1202	1197	0,000315063	0,000141778
1121	1116	0,00001	0,00001	1203	1198	0,0000945188	0,0000472594
1122	1117	0,000267803	0,000535606	1204	1198	0,00148079	0,000677384
1123	1117	0,000126025	0,00025205	1205	1200	0,000425334	0,000204791
1124	1117	0,0000157531	0,0000315063	1206	1200	0,000488347	0,000220544
1125	1118	0,000173284	0,0000787656	1207	1201	0,00001	0,00001
1126	1118	0,00001	0,00001	1208	1202	0,000330816	0,000141778
1127	1119	0,00001	0,00001	1209	1203	0,000441088	0,000204791
1128	1120	0,0012445	0,000567113	1210	1203	0,00141778	0,000661631

De	Para	R (pu)	X (pu)	De	Para	R (pu)	X (pu)
1129	1121	0,00025205	0,000110272	1211	1205	0,000409581	0,000189038
1130	1122	0,000110272	0,000220544	1212	1206	0,0005041	0,00025205
1131	1122	0,00001	0,00001	1213	1207	0,000362322	0,000173284
1132	1123	0,0000630125	0,000126025	1214	1208	0,000488347	0,000220544
1133	1124	0,000519853	0,000236297	1215	1209	0,00001	0,00001
1134	1125	0,00001	0,00001	1216	1213	0,00025205	0,000110272
1135	1126	0,000315063	0,000141778	1217	1215	0,000141778	0,0000630125
1136	1127	0,000141778	0,0000945188	1218	1216	0,000299309	0,000141778
1137	1128	0,000740397	0,000330816				
1138	1128	0,000267803	0,000126025				
1139	1128	0,00137052	0,000630125				
1140	1130	0,000110272	0,000220544				
1141	1131	0,000346569	0,000157531				
1142	1132	0,00001	0,00001				
1143	1134	0,000141778	0,0000630125				

Referências Bibliográficas

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução N° 505, de 26 de novembro de 2001.
- AHUJA, A., DAS, S., PAHWA, A. “An AIS-ACO Hybrid Approach for Multi-Objective Distribution System Reconfiguration”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 3, pp. 1101-1111, August 2007.
- AL-MOHAMMED, A. H. H. and ELAMIN, I. “Capacitor Placement in Distribution Systems Using Artificial Intelligent Techniques”. In: Proceedings of the 2003 IEEE Power Tech Conference, Bologna, Italy, Jun, 23–26, 2003, Vol. 4.
- ANNALURU, R., DAS, S., PAHWA, A. “Multi-Level Ant Colony Algorithm for Optimal Placement of Capacitors in Distribution Systems”. In: Congress on Evolutionary Computation 2004, CEC2004. Vol. 2, pp. 1932 – 1937, 2004.
- ARAÚJO, A. C. M. “Perdas e Inadimplência na Atividade de Distribuição de Energia Elétrica no Brasil”. Tese de Doutorado COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- ASSIS, R. A. e FERREIRA JÚNIOR, W. C. “Inteligência Coletiva: Rotação da Direção de Busca de Presas em uma Colônia de Formigas (*Eciton burchelli*)”. Biomatemática 15, pp. 13-28, Campinas, 2005.
- AUGUGLIARO, A., DUSONCHET, L., IPOLLITO, M. G., SANSEVERINO, E. R. “Minimum Losses Reconfiguration of MV Distribution Networks through Local Control of Tie-Switches”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 3, pp. 762- 771, Jul 2003.
- BARAN, M. E. and WU, F. F. (1989a) “Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No.1, pp. 735-743, January 1989.
- BARAN, M. E. and WU, F. F. (1989b) “Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp. 1401-1407, April 1989.
- BASSANEZI, R. C. “Ensino-Aprendizagem com Modelagem Matemática: Uma Nova Estratégia”. Editora Contexto, 2004.

- BECKERS, R., HOLLAND, O. E., DENEUBOURG, J. L. "From Local Actions to Global Tasks: Stigmergy and Collective Robotics". *Artificial Life IV*, pp. 181-189. Cambridge MA, MIT Press, 1994.
- BONABEAU, E., THERAULAZ, G., DENEUBOURG, J. L., ARON, S., CAMAZINE, S. "Self-organization in Social Insects". *Trends in Ecology and Evolution*, Vol. 12, No. 5, pp. 188-193, May 1997.
- BONABEAU, E., DORIGO, M., THERAULAZ, G. "Swarm Intelligence. From Natural to Artificial Systems". Oxford University Press, 1999.
- BORTIGNON, G. A. and EL-HAWARY, M. E. "A Review of Capacitor Placement Techniques for Loss Reduction in Primary Feeders on Distribution Systems". *IEEE Conference on Electrical and Computer Engineering*, Vol. 2, pp. 648-687, 1995.
- CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS (ELETROBRÁS). "Mercado de energia elétrica: relatório analítico. Ciclo 2001". Rio de Janeiro, 2001.
- CHANG, C. F. "Reconfiguration and Capacitor Placement for Loss Reduction of Distribution Systems by Ant Colony Search Algorithm". *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol.23, No. 4, pp. 1747-1755, November 2008.
- CHIANG, H. D., WANG, J. C., TONG, J., DARLING, G. (1995a) "Optimal Capacitor Placement, Replacement and Control in Large-Scale Unbalanced Distribution Systems: System Modeling and A New Formulation". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 356-362, February 1995.
- CHIANG, H. D., WANG, J. C., TONG, J., DARLING, G. (1995b) "Optimal Capacitor Placement, Replacement and Control in Large-Scale Unbalanced Distribution Systems: System Solution Algorithms and Numerical Studies". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 363-369, February 1995.
- CHIOU, J. P., CHANG, C. F., SU, C. T. "Capacitor Placement in Large-scale Distribution Systems Using Variable Scaling Hybrid Differential Evolution". *International Journal of Electrical Power and Energy Systems (IJEPES)*. March 2006.
- CIVANLAR, S., GRAINGER, J. J., YIN, H. AND LEE, S. S. H. "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.3, No. 3, pp. 1217-1223, July 1988.
- COLORNI, A., DORIGO, M., MANIEZZO, V. "An Investigation of Some Properties of an Ant Algorithm". In: *Proceedings 2nd Conf. Parallel Problem Solving from Nature*, North-Holland, Amsterdam, 1992, pp. 509-520.

- COSTA, J. S., OLIVEIRA, E. J., OLIVEIRA, L. W., CARNEIRO JÚNIOR, S., PEREIRA, J. L. R., SILVA JÚNIOR, I. C. “Reconfiguração Ótima de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica”. In: Anais do XVII Congresso Brasileiro de Automática, CBA, Juiz de Fora, MG, 2008.
- DANIEL, L. C., KHAN, I. H., RAVICHANDRAN, S. “Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction Using Ant Colony System Algorithm”. IEEE Indicon Conference, Chennai, India, 2005.
- DENEUBOURG, J. L., CLIP, P. L., CAMAZINE, S. S. “Ants, Buses and Robots Self-organization of Transportation Systems”. In: Proceedings of Perception to Action Conference 1994, pp. 12-23, Lausanne, Switzerland, Sep. 1994.
- DENEUBOURG, J. L. and GOSS, S. “Collective Patterns and Decision-making”. *Ethology Ecology and Evolution* 1, pp. 295-311, 1989.
- DETRAIN, C. and DENEUBOURG, J. L. “Self-organized Structures in a Superorganism: Do Ants “Behave” Like Molecules?” *Physics of Life Reviews* 3, pp. 162–187, Sep. 2006.
- DORIGO, M., MANIEZZO, V., COLORNI A. “The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents”. *IEEE Transaction on System, Man, Cybernetics, Part B*, Vol.26, No.1, pp. 29-41, 1996.
- DORIGO, M. and STÜTZLE, T. “The Ant Colony Optimization Metaheuristic: Algorithms, Applications and Advances”. *International Series Operations Research & Management Science*, Vol. 57, 2003.
- DORIGO, M. and STÜTZLE, T. “Ant Colony Optimization”. MIT Press, 2004.
- GALLEGO, R. A., MONTICELLI, A. J., ROMERO, R. “Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Networks”. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 16, No. 4, pp. 630-637, November 2001.
- GOMES, F. V., CARNEIRO JÚNIOR, S., PEREIRA, J. L. R., VINAGRE, M. P., GARCIA, P. A. N., OLIVEIRA, E. J., ARAÚJO, L. R. “A New Distribution System Reconfiguration Approach Using Optimal Power Flow Technique and Sensitive Analysis for Loss Reduction”. *IEEE Power Eng. Soc. General Meeting*, San Francisco, CA, Vol. 1, No. 1, August 2005.
- GOMES, F. V., CARNEIRO JÚNIOR, S., PEREIRA, J. L. R., VINAGRE, M. P., GARCIA, P. A. N., ARAUJO, L. R. “A New Distribution System Reconfiguration Approach Using Optimum Power Flow and Sensitivity Analysis for Loss

- Reduction”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.21, No. 4, pp. 1616-1623, November 2006.
- GÖNEN, T. “Electric Power Distribution System Engineering”. 1ª edição. McGraw-Hill, 1986.
- GOSWAMI, S. K. and BASU, S. K. “A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, pp. 1484-1491, July 1992.
- GOSWAMI, S. K., GHOSE, T., BASU, S. K. “An Approximate Method for Capacitor Placement in Distribution System Using Heuristics and Greedy Search Technique”. Electric Power Research, Vol. 51, pp. 143-151, 1999.
- GUEDES, D. F., VIEIRA, J. M., MELO, G. H. S., SODRÉ, E., ALVES, F., SILVA, C. A. L. “Uma Proposta para o Planejamento da Expansão de Longo Prazo Utilizando Otimização Colônia de Formigas”. XIII Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ, ERIAC, Puerto Iguazú, Argentina, 2009.
- GUIMARÃES, M. A. N., CASTRO, C. A., ROMERO, R. “Reconfiguration of Distribution Systems by a Modified Genetic Algorithm”. In: Proceedings of the IEEE Power Tech, Lausanne, 2007.
- GUIMARÃES, M. A. N., CASTRO, C. A., ROMERO, R. “Minimização de Perdas de Potência Ativa em Sistemas de Distribuição Utilizando Reconfiguração e Alocação de Capacitores”. In: Anais do XVII Congresso Brasileiro de Automática, CBA, Juiz de Fora, MG, 2008.
- HAFFNER, S., PEREIRA, L. F., PEREIRA, L. A., BARRETO, L. “Modelo Multi-Estágio de Otimização para o Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição”. Revista Controle e Automação (SBA), Vol. 17, No. 4, Outubro a Dezembro de 2006.
- HAFFNER, S., PEREIRA, L. A., GASPERIN, L. V., BARRETO, L. “Alocação de Bancos de Capacitores em Redes de Distribuição de Energia Visando Eliminar Violações de Tensão”. Revista Controle e Automação (SBA), Vol. 20, No. 4, Outubro a Dezembro de 2009.
- HUANG, Y. C., YANG, H. T. and HUANG, C. L., “Solving the Capacitor Placement Problem in a Radial Distribution System Using Tabu Search Approach ”. IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 11, No.4, pp.1868-1873, November 1996.

- HUANG, K. Y., YANG, H. T., HUANG, C. L. “A New Thermal Unit Commitment Approach Using Constraint Logic Programming”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, pp. 936-945, August 1998.
- INEE. “Geração Distribuída: Um negócio e um complemento à geração centralizada”. Relatório técnico, Instituto Nacional de Eficiência Energética, Abril 2004.
- KAGAN, N. e OLIVEIRA, C. C. B. “Reconfiguração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica Através de Ferramenta para Solução de Problemas de Decisão com Múltiplos Objetivos e Incertezas”. Revista Controle e Automação (SBA), Vol. 9, No. 1, pp. 18-30, Jan a Abril 1998.
- KAGAN, N. and OLIVEIRA, C. C. B. “Fuzzy Decision Model for the Reconfiguration of Distribution Networks Using Genetic Algorithms”. In: Proceedings of the 13th Power Systems Computation Conference, PSCC, Trondheim, Norway, Jun 1999.
- KALANTAR, M., DASHTI, R., DASHTI, R. “Combination of Network Reconfiguration and Capacitor Placement for Loss Reduction in Distribution System with Based Genetic Algorithm”. In: Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference (UPEC '06), Vol. 1, pp. 308-312, Newcastle upon Tyne, UK, Sep. 2006.
- KASAEI, M. J. and GANDOMKAR, M. “Loss Reduction in Distribution Network Using Simultaneous Capacitor Placement and Reconfiguration With Ant Colony Algorithm”. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Asia-Pacific, 2010.
- KENNEDY, J. and EBERHART, R. “Participle Swarm Optimization”. IEEE International Conference on Neural Networks, Vol. 4, pp. 1942-1948, 1995.
- KHOA, T. Q. D. and PHAN, B. T. T. “Ant Colony Search-Based Loss Minimum for Reconfiguration of Distribution Systems”. IEEE Power India Conference, 2006.
- KIRKPATRICK, S., GELLAT, C. D., VECCHI, M. P. “Optimization by Simulated Annealing”. Science, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680, 13 May 1983.
- KUO, C. C. and CHANG, H. C. “Applying a Refined Genetic Algorithm to Network Reconfiguration for Loss Reduction”. In: Proceedings of the IEEE of Japan and Energy'94, pp. 37-42, Tokyo, Japan, 1994.
- LIU, C. C., LEE, S. J., VU, K. “Loss Minimization of Distribution Feeders: Optimality and Algorithms”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp. 1281-1289, April 1989.

- LIU, W. H. E., PAPALEXOPOULOS, A. D., TINNEY, W. F. “Discrete Shunt Controls in a Newton Optimal Power Flow” IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 7, No. 4, pp. 1509-1518, November 1992.
- LIU, M., TSO, S. K., CHENG, Y. “An Extended Nonlinear Primal-Dual Interior Point Algorithm for Reactive-Power Optimization of Large-Scale Power Systems with Discrete Control Variables” IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 17, No. 4, pp. 982-991, November 2002.
- MARQUES, M. C. S., HADDAD, J., MARTINS, A. R. S. “Conservação de Energia. Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações”. 3ª edição. Eletrobrás/Procel, Itajubá, 2006.
- MEDEIROS JUNIOR, M. F. e PIMENTEL FILHO, M. C. “Optimal Power Flow in Distribution Networks by Newton’s Optimization Methods”. Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Montrey, CA, 1998.
- MENDOZA, J., LÓPEZ, R., MORALES, D., LÓPEZ, E., DESSANTE, P., MORAGA, R. “Minimal Loss Reconfiguration Using Genetic Algorithms with Restricted Population and Addressed Operators: Real Application”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 2, pp. 948-954, May 2006.
- MERLIN, A. and BACK, G. “Search for Minimum-loss Operational Spanning Tree Configuration for Urban Power Distribution System”. In: Proceedings of the 5th Power System Conference, pp. 1-18, Cambridge, Sep. 1975.
- MONTICELLI, A. “Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica”. Edgar Blücher, São Paulo, 1983.
- NARAYAN, S. R. “Optimization Principles. Practical Applications to the Operation and Markets of the Electric Power Industry”. IEEE Press Power Engineering Series, Wiley Interscience, 2003.
- NG, H. N., SALAMA, M. M. A., CHIKHANI, A. Y. “Classification of Capacitor Allocation Techniques”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No.1, pp. 387-392, January 2000.
- NOCEDAL, J. and WRIGHT, S. J. “Numerical Optimization”. Springer Series in Operations Research, 1999.
- NUGOLI, C. R., RIDER, M. J., MANTOVANI, J. R. S. “Algoritmo de Branch and Bound Não Linear para Problemas de Planejamento de Reativos em Sistemas de Energia Elétrica”. In: XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Goiânia, Setembro 2006.

- OLIVEIRA, G. C., BAHIANSE, L., PEREIRA, M. V. “Modelo Disjuntivo de Expansão Ótima de Redes de Transmissão em Sistemas Hidrotérmicos”. Pesquisa Operacional, Vol. 23, No. 1, pp. 129-140, Janeiro a Abril de 2003.
- OLIVEIRA, L. W. “Reconfiguração e Alocação Ótima de Capacitores em Sistemas de Distribuição”. Tese de Doutorado COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- OLIVEIRA, L. W., OLIVEIRA, E. J., CARNEIRO JÚNIOR, S., PEREIRA, J. L. R., COSTA, J. S., SILVA JUNIOR, I. C. “Reconfiguração Ótima de Sistemas de Distribuição para Minimização de Perdas de Energia”. Revista Controle e Automação (SBA), Vol. 20, No. 2, pp. 233-246, Abril a Junho de 2009.
- OLIVEIRA, L. W., CARNEIRO JUNIOR, S., OLIVEIRA, E. J., PEREIRA, J. L. R., SILVA JUNIOR, I. C., COSTA, J. S. “Optimal Reconfiguration and Capacitor Allocation in Radial Distribution Systems for Energy Losses Minimization”. International Journal of Electrical Power and Energy Systems (IJEPES). January 2010.
- PARK, J. Y., SOHN, J. M., PARK, J. K. “Optimal Capacitor Allocation in a Distribution System Considering Operation Costs”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 1, pp. 462-468, February 2009.
- PIMENTEL FILHO, M. C., LACERDA, E. G. M., MEDEIROS JÚNIOR, M. F. “Capacitor Placement Using Ant Colony Optimization and Gradient”. In: 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, ISAP 2009.
- PITANGA, M. “Construindo Supercomputadores com Linux”. 3ª edição. Brasport, Rio de Janeiro, 2008.
- SALAS, S. S., CAVALCANTE, P. L., LOPES, M., TORRES, F., SILVA, L. C. P., LAZARO, R. R. “Uma Comparação dos Algoritmos Heurísticos Aplicados na Solução do Problema de Alocação Ótima de Bancos de Capacitores”. In: XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, SBPO, 2009.
- SARFI, R. J., SALAMA, M. M. A., VANNELLI, A., CHIKHANI, A. Y. “Loss Reduction in Distribution Systems: A New Approach Using Partitioning Techniques”. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Vol. 2, pp. 1439-1444, 1993.
- SARFI, R. J., SALAMA, M. M. A., CHIKHANI, A. Y. “A Survey of the State of the Art in Distribution System Reconfiguration for System Loss Reduction”. Electric Power Systems Research, v. 31, n. 1, pp. 61-70, 1994.

- SILVA, E. L. “Formação de Preços em Mercados de Energia Elétrica”. 1ª edição. Editora Sagra Luzzatto, Porto Alegre, 2001.
- SILVA JUNIOR, I. C. “Planejamento da Operação de Sistemas Termoelétricos utilizando Análise de Sensibilidade Associada a Procedimentos Heurísticos”. Tese de Doutorado COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- SILVA JUNIOR, I. C., CARNEIRO JÚNIOR, S., OLIVEIRA, E. J., PEREIRA, J. L. R., GARCIA, P. A. N., MARCATO, A. L. M. “Determinação da Operação de Unidades Térmicas para o Estudo de Unit Commitment Através de uma Análise de Sensibilidade”. Revista Controle e Automação (SBA), Vol.17, No. 3, Julho a Setembro de 2006.
- SILVA JUNIOR, I. C., CARNEIRO JÚNIOR, S., OLIVEIRA, E. J., PEREIRA, J. L. R., GARCIA, P. A. N. (2008a) “Metodologia Heurística Construtiva para Alocação de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica”. Revista Controle e Automação (SBA), Vol. 19, No. 1, Janeiro a Março de 2008.
- SILVA JUNIOR, I. C., CARNEIRO JÚNIOR, S., OLIVEIRA, E. J., COSTA, J. S., PEREIRA, J. L. R., GARCIA, P. A. N. (2008b) “A Heuristic Constructive Algorithm for Capacitor Placement on Distribution Systems”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.23, No. 4, pp. 1619-1626, November 2008.
- SISWORAHARDJO, N. S. and EL-KEIB, A. A. “Unit Commitment Using the Ant Colony Search Algorithm”. In: Proceedings of the Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, 2002.
- SOUZA, A. R. R., FERNANDES, T. A. P., AOKI, A. R., OMORI, J. C., OENING, A. P., MARCÍLIO, D. C. “Alocação de Geração Distribuída em Rede de Distribuição Utilizando Fluxo de Potência Ótimo e Algoritmos Genéticos”. In: XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, SNPTEE, Recife, 2009.
- SU, C. T., and LEE, C. S. “Feeder Reconfiguration and Capacitor Setting for Loss Reduction of Distribution Systems”. Electric Power Systems Research, Vol. 58, pp. 97–102, 2001.
- TRIPATHY, M. and MISHRA, S. “Bacteria Foraging-Based Solution to Optimize Both Real Power Loss and Voltage Stability Limit”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 1, pp. 240-248, February 2007.

ZHANG, D., FU, Z., ZHANG, L. "Joint Optimization for Power Loss Reduction in Distribution Systems". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 1, pp. 161-169, Feb 2008.

ZHUANG, F. and GALIANA, F. D. "Towards a More Rigorous and Practical Unit Commitment by Lagrangian Relaxation". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, pp. 763-773, May 1988.