



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica

Plataforma Integrada para o Planejamento de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Metaheurísticas

Autor: Marcos Antonio do Nascimento Guimarães
Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Jr.
Co-orientador : Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Carlos A. Castro Jr. - FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva - FEEC/UNICAMP
Dr. Marcos Julio Rider Flores - FEEC/UNICAMP
Profa. Dra. Patrícia Teixeira Leite - UFABC
Profa. Dra. Jacqueline Gisele Rolim - UFSC

Campinas, 25 de Setembro de 2009.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

G647p Guimarães, Marcos Antonio do Nascimento
Plataforma integrada para o planejamento de sistemas
de distribuição de energia elétrica utilizando
metaheurísticas. Marcos Antonio do Nascimento
Guimarães. – Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientadores: Carlos Alberto de Castro Junior, Rubén
Augusto Romero Lázaro.

Tese de Doutorado - - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Algoritmos Genéticos. 2. Capacitores. 3.
Metaheurísticas 4. Otimização combinatória. I. Castro
Junior, Carlos Alberto de. II. Romero Lázaro, Rubén
Augusto. III. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV.
Título.

Titulo em Inglês: Integrated platform for distribution systems planning using
metaheuristics

Palavras-chave em Inglês: Genetic Algorithms, Capacitor, Metaheuristics, Combinatorial
optimization

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Luiz Carlos Pereira da Silva, Marcos Julio Rider Flores, Patrícia
Teixeira Leite, Jacqueline Gisele Rolim.

Data da defesa: 25/09/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Doutor Carlos Alberto de Castro por sua amizade, confiança e excelente orientação durante todos esses anos.

Agradeço ao Professor Doutor Rubén Romero, por seus valiosos ensinamentos sobre meta-heurísticas.

Agradeço Doutor Marcos Rider por sua amizade e inúmeros ensinamentos, que contribuíram para a melhoria do trabalho.

Agradeço aos professores da comissão examinadora, membros titulares Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva, Dr. Marcos Julio Rider Flores, Profa. Dra. Patrícia Teixeira Leite e Profa. Dra. Jacqueline Gisele Rolim e membros suplentes Profa. Dra. Ahda Pionkoski Grilo Pavani, Prof. Dr. Walmir de Freitas Filho e Prof. Dr. Ariovaldo Verandio Garcia.

Agradeço aos demais alunos e professores da FEEC que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho.

Agradeço imensamente aos meus pais, Di e Oswaldo (*in memoriam*) que sempre me incentivaram a estudar. Seus ensinamentos e exemplos de perseverança e honestidade sempre me acompanharão.

Agradeço à minha tia Biná e meu tio Hélio (*in memoriam*), que me ajudaram em alguns momentos da minha vida.

Agradeço ao meu irmão Sérgio por sua amizade.

Agradeço de forma muito especial à minha querida esposa Beth, que sempre esteve ao meu lado, mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro.

*À Minha esposa, Beth.
À minha filha, Ana.
Aos meus pais.*

Resumo

O objetivo desse trabalho de pesquisa é desenvolver ferramentas computacionais eficientes para a otimização da operação de sistemas de distribuição de energia elétrica. A principal contribuição apresentada é fornecer uma metodologia para redução de perdas de potência ativa, baseada em reconfiguração e alocação de bancos de capacitores fixos e automáticos. É possível encontrar na literatura várias propostas baseadas nos mais diversos tipos de algoritmos, entretanto, na maioria dos casos as propostas apresentadas propõem o atendimento a um único objetivo. A proposta apresentada neste trabalho contempla a otimização dos objetivos de forma conjunta, usando um único algoritmo, de forma a tirar o máximo proveito dos recursos já instalados no sistema. Mostra-se que é possível obter uma economia significativa no custo de instalação de bancos de capacitores, utilizando a reconfiguração como ferramenta adicional. Um dos maiores desafios a ser enfrentado, no entanto, refere-se ao tamanho do espaço de busca, que nesse caso cresce consideravelmente. Para a resolução do problema optou-se pelo algoritmo genético, que é uma metaheurística já consagrada na resolução de problemas de grande complexidade. No decorrer do trabalho foram desenvolvidas diversas ferramentas e operadores genéticos especiais que tornaram possível a obtenção de excelentes resultados com baixo custo computacional. Adicionalmente, foi desenvolvido um algoritmo de *Simulated Annealing* que, a partir da melhor configuração obtida pelo algoritmo genético desenvolvido, otimiza as manobras dos *taps* do transformador da subestação de forma coordenada com *taps* dos capacitores automáticos. O comutador de *tap* do transformador tem uma vida útil limitada em aproximadamente 100.000 operações, o que corresponde a aproximadamente 30 operações diárias, e o algoritmo desenvolvido tem por finalidade, minimizar o número de operações diárias do dispositivo, prolongando sua vida útil.

Palavras-chave: Algoritmos genéticos, alocação de capacitores, reconfiguração de sistemas de distribuição, *simulated annealing*, metaheurísticas, otimização combinatória.

Abstract

The goal of this research work is to develop efficient computational tools for optimizing the operation of distribution systems. The main contribution presented here is providing a methodology for reducing the real power losses based on reconfiguration and placement of both fixed and automatic capacitor banks. Many different methodologies, using several different algorithms can be found in the literature. However, most of them focus on one objective only. The method presented here comprises the simultaneous optimization of multiple objectives, in one algorithm only, to fully use the resources already installed in the system. It is shown that significant savings with the purchase of capacitor banks can be achieved by using reconfiguration as an additional tool. One of the hardest challenges to be tackled is related to the search space, that may grow significantly. The problem is solved by a genetic algorithms, which is an already widely accepted metaheuristic for solving very complex problems. Many different tools and special genetic operators have been developed along the research work. Those provided excellent results, at a low computational cost. Additionally, a simulated annealing algorithm was developed to optimize the substation transformer tap maneuvers in a coordinated way with the automatic capacitor bank tap maneuvers, from the best configuration obtained with genetic algorithms. The transformer tap commutator has a useful life limited to 100,000 operations, or approximately 30 daily operations. The proposed algorithm also minimizes the number of daily operations to stretch transformers' service life.

Keywords: Genetic algorithms, capacitor placement, reconfiguration of distribution systems, *simulated annealing*, metaheuristics, combinatorial optimization.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Revisão bibliográfica	2
1.2	Controle da operação de redes de distribuição	3
1.3	Motivação e objetivos	6
1.3.1	Estrutura da Tese	8
2	Algoritmos Genéticos	9
2.1	Introdução	9
2.2	Charles Darwin [23]	10
2.3	Alguns conceitos de genética	11
2.3.1	Terminologia biológica [26]	12
2.4	Algoritmo Genético Básico	16
2.4.1	Notação computacional [26]	17
2.4.2	Superfície de adaptação	18
2.4.3	Codificação do indivíduo	18
2.4.4	Função de avaliação	19
2.4.5	Teoria da Pressão Seletiva	20
2.4.6	Operadores de seleção	20
2.4.7	Cruzamento	21
2.4.8	Operador de mutação	24
2.4.9	Teoria dos esquemas (<i>schemata theory</i>) [42]	24
2.4.10	Deception problem	27

3	<i>Simulated Annealing</i>	29
3.1	O algoritmo de Metropolis	30
3.2	Algoritmo de <i>Simulated Annealing</i>	31
3.3	Programa de resfriamento	32
3.3.1	Determinação da temperatura inicial, T_0	33
3.3.2	Determinação de N_k	33
3.3.3	Determinação da taxa de resfriamento	33
3.3.4	Critério de Parada	34
4	Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica	35
4.1	Revisão bibliográfica	35
4.2	Algoritmo Genético Dedicado à Resolução do Problema de Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica	38
4.2.1	Função de avaliação	40
4.2.2	Geração da população inicial	42
4.2.3	Algoritmo de seleção	45
4.2.4	Algoritmo de cruzamento	46
4.2.5	Algoritmo de mutação	49
4.2.6	Substituição da população	50
4.2.7	Algoritmo completo	50
4.2.8	Resultados obtidos	52
4.2.9	Transformador com comutador de <i>taps</i>	58
4.2.10	Considerações	65
5	Alocação de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica	67
5.1	Introdução	67
5.2	Metodologias para resolução do problema	69
5.3	Modelo matemático	71
5.4	Análise de Sensibilidade	72
5.5	Representação do indivíduo	75
5.6	População inicial	77

5.7	Cruzamento	78
5.8	Mutação	79
5.9	Resultados obtidos	81
5.9.1	Alocação de capacitores fixos	82
5.9.2	Alocação de capacitores automáticos	83
5.9.3	Alocação de capacitores fixos e automáticos	84
5.9.4	Alocação de capacitores fixos, automáticos e otimização dos <i>taps</i> do transformador	85
5.9.5	Resumo das simulações	87
5.10	Considerações	88
6	O algoritmo integrado	89
6.1	Introdução	89
6.2	Reconfiguração e alocação de capacitores	89
6.3	Resultados obtidos	91
6.3.1	Sistema de 69 barras	91
6.3.2	Sistema de 135 barras	94
6.3.3	Considerações	96
6.4	Coordenação entre o <i>OLTC</i> e capacitores automáticos	98
6.5	Função Objetivo	103
6.6	Codificação das soluções candidatas	104
6.7	Geração da solução inicial	105
6.8	Mecanismo de perturbação	107
6.9	Algoritmo proposto	107
6.10	Resultados obtidos	109
6.10.1	Sistema de 69 barras	109
6.10.2	Sistema de 135 barras	114
6.11	Considerações	118
7	Conclusões	121

Referências Bibliográficas	122
A Árvore Geradora mínima	129
A.1 Circuitos fundamentais e busca de todas as árvores	130
A.2 Árvore geradora em grafo valorado	130
A.2.1 Algoritmo de <i>Kruskal</i>	131
B Algoritmos de fluxo de carga utilizados em sistemas de distribuição de energia elétrica	137
B.1 Introdução	137
B.2 Método <i>back forward sweep</i> por soma de correntes	137
B.3 Método Matriz Z_{bus}	141
C Dados dos Sistemas Testados	151
C.1 Sistema de 69 barras	152
C.1.1 Diagrama unifilar do sistema de 69 barras	154
C.2 Sistema de 135 barras	155
C.2.1 Diagrama unifilar do sistema de 135 barras	159
D Divulgação da Pesquisa	161

Capítulo 1

Introdução

O desenvolvimento de ferramentas apropriadas de projeto e análise de sistemas de distribuição, há algum tempo, não acompanhava o desenvolvimento que ocorria no caso dos sistemas de transmissão [1]. Com o passar do tempo, essa característica foi mudando, e os desafios do planejamento e operação de sistemas de distribuição ficaram mais claros. Um dos fatores que impulsionaram a pesquisa e desenvolvimento na área de distribuição de energia elétrica foi a investigação e implementação da automação da distribuição [2]. Mais recentemente, a privatização das empresas de distribuição e a desregulamentação do setor elétrico também tiveram um impacto significativo na filosofia de gestão da área. Por um lado, a exigência de alta qualidade de fornecimento de energia elétrica tem obrigado as concessionárias a tratar a operação dos sistemas de distribuição de forma cada vez mais cuidadosa. Por outro lado, as pressões do mercado levam à minimização dos custos, evidenciando, no caso de sistemas de distribuição, a já conhecida incompatibilidade entre os custos e a operação segura e com qualidade da rede. Desta forma, problemas já conhecidos na área de transmissão, como a tendência dos equipamentos operarem próximos de seus limites, passam a ser observados também no nível de distribuição. Além dos problemas já conhecidos na operação de redes de distribuição, como a manutenção de perfis de tensão adequados e a minimização das perdas de potência ativa nas linhas, começaram a ser observados problemas de instabilidades de tensão, principalmente em áreas com grande concentração industrial [3].

Deve-se acrescentar a esse cenário o fato de que um sistema planejado para atender uma determinada demanda projetada pode vir a operar de forma distinta daquela prevista devido a vários fatores, como o crescimento desigual e desordenado de bairros, o aumento consistente do consumo, a instalação de cargas com níveis de fator de potência não previstos, dentre outros problemas.

Como os limites de operação dos equipamentos estão sendo atingidos, torna-se necessário:

- analisar a possibilidade de reforço das linhas, construção de novas subestações e a instalação de novos recursos de controle, de modo a atender o aumento da demanda. Essas medidas apresentam quase sempre um custo elevado de investimentos, não sendo muito atraentes para as empresas de distribuição. Metodologias para a obtenção de soluções de

mínimo custo são fundamentais.

- utilizar os recursos de controle já existentes de forma racional e eficiente, a fim de manter o padrão de fornecimento de energia elétrica. Os principais recursos que podem ser utilizados para manter a qualidade da energia fornecida e também diminuir as perdas de potência ativa e conseqüentemente aumentar a margem de carregamento são basicamente a reconfiguração da rede, o ajuste de taps de transformadores das subestações abaixadoras e a comutação de bancos de capacitores. A utilização dos recursos já disponíveis de forma eficiente permite que investimentos na expansão e reforço da rede sejam postergados.

No entanto a utilização conjunta desses recursos requer um estudo muito cuidadoso, devido ao grande número de possibilidades de configurações de cada um desses recursos para atender os objetivos pretendidos.

Uma complicação adicional refere-se ao custo da operação das chaves de interconexão, chaves seccionadoras, ajustes de *taps* de transformadores e comutação de bancos de capacitores, que deve ser levado em conta no estudo. Além disso, existe o problema da vida útil dos componentes, o que limita o número de operações diárias, principalmente no tocante a *taps* de transformadores.

Devido ao grande número de possibilidades de configuração em função das variáveis de controle disponíveis, pode não ser possível obter a solução ótima com um esforço computacional razoável. Na verdade, para sistemas de médio e grande porte o cálculo de todas as possibilidades de configuração em um tempo computacional aceitável é totalmente inviável. Para esses casos, uma opção que se mostra interessante é abrir mão da solução ótima global, obtendo-se uma solução de boa qualidade (de acordo com critérios pré-estabelecidos) com um esforço computacional (tempo de processamento) adequado.

Neste trabalho de pesquisa, pretende-se abordar esse problema e propor soluções aceitáveis do ponto de vista de precisão de resultados, e que demandem um esforço computacional apropriado, inclusive para aplicações na operação em tempo real.

1.1 Revisão bibliográfica

Os recursos de controle citados anteriormente vêm sendo utilizados cada vez mais frequentemente em modernos sistemas de distribuição, e, para utilizar cada um desses recursos com máxima eficiência é necessário um estudo muito cuidadoso da relação custo/benefício. A otimização de sistemas de distribuição de médio e grande porte, utilizando todos os recursos citados, não é uma tarefa simples. Normalmente para esses casos são empregadas as mais diferentes técnicas de otimização, sendo que nos últimos anos têm-se adotado também o uso das heurísticas e metaheurísticas para a resolução do problema.

O uso de métodos heurísticos aplicados a sistemas de distribuição remontam à década de 80 [4–7]. A maioria dos trabalhos publicados naquela época enfatizavam a minimização

de perdas de potência ativa e balanceamento de cargas entre alimentadores. Os algoritmos empregados eram heurísticas simples, mas bastante rápidas, fornecendo resultados aceitáveis com baixo custo computacional.

A partir da década de 90, heurísticas mais sofisticadas começaram a ser empregadas na solução do problema de reconfiguração da rede de distribuição, permitindo a obtenção de soluções de melhor qualidade. Algumas referências podem ser citadas como [9–11], que utilizam a metaheurística *simulated annealing* na resolução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição para minimização de perdas de potência ativa. Em [12] é utilizada a metaheurística “Busca Tabu” para essa mesma finalidade, e bons resultados são obtidos para o problema de minimização de perdas de potência ativa. Em [13, 14] são utilizados AGs para reconfiguração de sistemas de distribuição para diminuição das perdas.

Nos últimos anos, além da preocupação com o balanceamento de carga entre alimentadores e a redução das perdas de potência ativa das redes, foram publicados alguns trabalhos abordando também a maximização da margem de carregamento (ou margem de segurança com relação à estabilidade de tensão) através de heurísticas e metaheurísticas. Em [15] um algoritmo híbrido é utilizado na reconfiguração de sistemas de distribuição para aumento da margem de carregamento da rede. Em [16] é utilizado um algoritmo de busca tabu dedicado, que realiza a reconfiguração otimizando a margem de carregamento de sistemas de distribuição. Em [17] propõe-se um algoritmo evolutivo que realiza a otimização de sistemas de distribuição visando regulação de tensão e minimização das perdas de potência ativa.

Através do estudo da bibliografia disponível, observa-se que o desenvolvimento de ferramentas computacionais dedicadas a sistemas de distribuição vem ganhando destaque, e técnicas de análise cada vez mais sofisticadas vêm sendo empregadas. Com a crescente tendência da automação dos sistemas e também dos recursos de controle disponíveis, a otimização de uma rede de distribuição de médio/grande porte torna-se uma tarefa árdua, devendo ser empregadas técnicas cada vez mais complexas de modo a extrair o máximo desempenho dos sistemas ao menor custo possível. Por outro lado, estudos rigorosos demonstram que os sistemas de distribuição são responsáveis por cerca de 65% das perdas de energia de um sistema interligado [18].

Assim, justifica-se uma pesquisa mais aprofundada do tema, com a aplicação de técnicas de otimização modernas e também a integração dos diversos recursos de otimização disponíveis (reconfiguração, ajuste de *taps* de transformadores das subestações e comutação de bancos de capacitores) de modo a extrair o máximo desempenho de um sistema com a menor razão custo/benefício possível.

1.2 Controle da operação de redes de distribuição

As redes de distribuição são projetadas como redes malhadas, mas são normalmente operadas de forma radial [19]. Algumas chaves de interconexão ficam normalmente abertas e são operadas quando necessário, para transferir carga entre alimentadores. Esta filosofia de

planejamento e operação é interessante pois permite uma maior flexibilidade, principalmente no caso da ocorrência de faltas. Portanto, é possível isolar a área sob falta e restabelecer o fornecimento de energia aos demais consumidores através da reconfiguração da rede, ou seja, da abertura e fechamento de chaves. A reconfiguração da rede pode também ser levada a efeito a fim de alterar as condições de operação da rede, por exemplo, no que diz respeito à minimização das perdas de potência ativa, balanceamento de carga entre alimentadores, manutenção de um perfil adequado de tensões, maximização da margem de segurança da rede com relação à estabilidade de tensão, etc. Assim como a reconfiguração, a compensação de potência reativa através do chaveamento de bancos de capacitores também pode ser útil no atendimento de objetivos de operação. Os bancos de capacitores contribuem para a minimização das perdas de potência ativa e manutenção de perfis adequados de tensão. O ajuste dos *taps* dos transformadores nas subestações de distribuição contribui para a manutenção de perfis adequados de tensão sob variadas condições de carregamento.

A seguir serão apresentados de maneira simplificada alguns dos critérios importantes na operação de redes de distribuição. Estes critérios aparecem sob diversas formas e utilizando diferentes modelos em vários trabalhos apresentados na literatura. Na sua maioria, esses critérios são abordados de maneira individual, ou seja, trata-se do estabelecimento de critérios mono-objetivo. Outros trabalhos tratam alguns desses critérios através de uma visão multi-objetivo.

(a) Perdas de potência ativa

As perdas de potência ativa devem ser as mínimas possíveis. Estas podem ser representadas por [17]:

$$P_p = \sum_{j=1}^{N_R} R_j I_j^2 \quad (1.1)$$

em que N_R corresponde ao número de ramos da rede, incluindo transformadores e trechos de alimentadores e ramais, R_j à resistência do ramo j e I_j à corrente pelo ramo j .

(b) Regulação de tensão

Um fornecimento de energia com qualidade está associado, entre outros fatores, à manutenção das magnitudes das tensões nos nós o mais próximo possível do valor nominal. Uma função que deve ser minimizada a fim de atender esse critério poderia ser [17]:

$$\Delta V = \frac{1}{N_N} \sum_{i=1}^{N_N} |\Delta V_i| \quad (1.2)$$

em que ΔV_i é a queda de tensão do nó i em relação à tensão da subestação de distribuição e N_N é o número de nós.

(c) Balanceamento de carga entre alimentadores

As cargas podem ser divididas entre os alimentadores, e conseqüentemente entre os transformadores da subestação de distribuição, de acordo com as suas respectivas potências nominais. Pode-se encontrar na literatura a definição de índices de balanceamento de carga, como por exemplo [17]:

$$\text{LBI} = \frac{1}{N_{SS}} \sum_{i=1}^{N_{SS}} \left(\frac{A_{t,i}}{A_{t,i}^{\text{nom}}} - \frac{\sum_{j=1}^{N_{SS}} A_{t,j}}{\sum_{j=1}^{N_{SS}} A_{t,j}^{\text{nom}}} \right) \quad (1.3)$$

em que N_{SS} corresponde ao número de subestações, $A_{t,i}$ à potência aparente injetada na rede através do transformador i , e $A_{t,i}^{\text{nom}}$ à respectiva potência nominal.

(d) Número de operações de chaveamento

O número de operações de chaveamento dos equipamentos, incluindo os *taps* de transformadores, bancos de capacitores e chaves de interconexão deve ser limitado a valores predeterminados. Esta é uma restrição importante para a resolução do problema, pois os benefícios obtidos no atendimento de outros fatores podem ser ofuscados por uma diminuição do tempo de vida e aumento das ocorrências de manutenção desses equipamentos [17].

(e) Aumento da margem de segurança com relação à estabilidade de tensão

Problemas de instabilidade de tensão são comuns em sistemas de transmissão e já há casos reportados de incidentes do tipo em redes de distribuição [3]. Em [16] foram obtidos resultados muito interessantes com relação ao aumento da margem de segurança com relação à estabilidade de tensão através da reconfiguração da rede. Mostrou-se que esse aumento resulta adicionalmente em diminuição das perdas de potência ativa e melhoria no perfil de tensão. Dessa forma, o atendimento à exigência de aumento da margem de estabilidade de tensão colabora para o atendimento aos demais objetivos.

Em [16], as decisões sobre as operações de chaveamento para a reconfiguração da rede são tomadas em função dos valores de índices de estabilidade de tensão. Esses índices são escalares que podem ser calculados para cada nó ou para cada ramo da rede, ou até mesmo para a rede como um todo, e que indicam o quão perto do ponto de máximo carregamento a rede está operando. Em [3] é proposto um índice de estabilidade de tensão cujo cálculo é extremamente rápido e fornece resultados bastante precisos sobre a condição de operação da rede com relação à estabilidade de tensão. A partir das expressões para os fluxos de potência ativa e reativa através de um trecho do alimentador, é possível obter uma equação de quarto grau em função da magnitude da tensão na barra receptora do trecho (aquela que recebe o fluxo de potência). Das quatro soluções possíveis, uma corresponde à solução de operação estável da rede. Considera-se que a rede tenha atingido o ponto de máximo carregamento, que corresponde a uma margem de estabilidade de tensão nula, quando deixa de existir solução real para a magnitude de tensão de algum barramento da rede, levando o índice de estabilidade a um valor nulo. Esse índice é calculado para uma determinada barra m por:

$$\text{VSI}_m = [V_k^2 - 2(P_M r_\ell + Q_M x_\ell)]^2 - 4(P_M^2 + Q_M^2)(r_\ell^2 + x_\ell^2) \quad (1.4)$$

em que V_k é a tensão da barra k que alimenta a barra m , P_M e Q_M são as potências ativa e reativa acumuladas na barra m (ou seja, a soma da potência consumida na barra m com as potências consumidas nas barras alimentadas através da barra m), e r_ℓ e x_ℓ são a resistência e reatância série do ramo ℓ que conecta as barras k e m .

De maneira geral, a idéia é simplesmente maximizar o menor índice VSI, a fim de obter melhoria na margem de estabilidade de tensão da rede.

1.3 Motivação e objetivos

O desafio deste trabalho de pesquisa é definir estratégias de otimização da operação de sistemas de distribuição através de um método computacionalmente eficiente e que coordene apropriadamente as seguintes ações de controle:

- Reconfiguração da rede, tendo como objetivos a minimização de perdas de potência ativa, o aumento da margem de carregamento, o balanceamento das cargas entre alimentadores e a manutenção de perfis de tensão adequados;
- Ajuste dos taps dos transformadores presentes nas subestações do sistema de forma a ajustar o perfil de tensão da rede;
- Comutação de bancos de capacitores com os objetivos de manter o perfil de tensão da rede, mesmo em situações de demanda elevada, e prover um suporte de potência reativa adequado ao sistema.

Todas as intervenções na rede para atender os objetivos acima devem obedecer as restrições de limitação do número de manobras diárias das chaves seccionadoras/interconexão, *taps* de transformadores e comutação de bancos de capacitores.

A motivação principal desse trabalho de pesquisa é desenvolver uma metodologia unificada, que possibilite integrar os recursos de otimização presentes nos sistemas de distribuição, e dessa forma extrair dos mesmos o máximo desempenho. Através da pesquisa bibliográfica nota-se que a maioria dos trabalhos aborda um único objetivo de cada vez, sendo poucos os que adotam uma abordagem unificada. Se o sistema a ser estudado possuir alternativas para reconfiguração, e esta se mostrar econômica, é interessante otimizar as perdas de potência ativa através de reconfiguração em conjunto com a alocação dos bancos de capacitores. Através das simulações realizadas observou-se uma melhoria significativa do perfil de tensão da rede após a reconfiguração, tornando necessário a comutação de menos capacitores para se atingir os objetivos desejados. A proposta desse trabalho é utilizar uma técnica baseada em AGs para realizar a reconfiguração e alocação de bancos de capacitores. Para isso, foi desenvolvido um esquema de codificação que concentra todas as informações necessárias em um único indivíduo, que por

sua vez passará por um processo de evolução através dos AGs desenvolvidos. Na realidade, a evolução desse indivíduo dar-se-á através de um algoritmo especialmente desenvolvido de forma a explorar algumas das características específicas de sistemas de distribuição. É claro que os AGs, sendo um algoritmos populacionais, necessitam de uma população de indivíduos de boa qualidade para poder operar de forma eficiente, o que é solucionado através de um algoritmo heurístico especialmente desenvolvido para a geração da população inicial. Os AGs fornecem como saída, uma ou mais configurações de boa qualidade, contemplando a nova topologia de rede, bancos de capacitores fixos, bancos de capacitores automáticos e seus respectivos *taps* e o posicionamento do *tap* do transformador da subestação para cada nível de carga, tendo como horizonte de um ano de estudo. O algoritmo desenvolvido nessa etapa, considera três níveis de carregamento: leve (L), médio (M) e pesado (P). Na prática, entretanto, o que ocorre é uma variação da carga durante todo o dia, o que leva o comutador de *taps* do transformador da subestação a ser operado constantemente (dentro de uma certa margem de tempo, ou tempo morto) de forma a tentar compensar as variações de carga de maior intensidade, que podem degradar o nível geral de tensão do alimentador. De forma a complementar a proposta de otimização, um algoritmo de *simulated annealing* foi desenvolvido de forma a coordenar a atuação do comutador de *taps* do transformador com a operação dos capacitores automáticos alocados na rede.

Do ponto de vista global, a idéia do trabalho é realizar a otimização em duas etapas. Primeiramente realiza-se a reconfiguração e alocação de capacitores fixos e automáticos, também otimizando nessa etapa o ajuste do *tap* do transformador da subestação para os níveis de carga leve, médio e pesado. A melhor configuração obtida é utilizada como dado de entrada para um algoritmo *simulated annealing*, que, a partir de uma configuração otimizada, irá apresentar as alternativas para as posições do *tap* do transformador da subestação em conjunto com os *taps* dos capacitores automáticos alocados previamente nas barras. Serão feitas análises para um sistema de 69 barras [20] e para um sistema real de 135 barras [21], e serão mostradas as vantagens da abordagem proposta.

De maneira geral, nesse trabalho de pesquisa foram desenvolvidos:

1. Um algoritmo especializado para a geração da população inicial;
2. Um algoritmo especializado para os operadores de mutação (reconfiguração, capacitores fixos, capacitores automáticos e *tap* do transformador);
3. Um algoritmo especializado para o cruzamento ou recombinação com relação à reconfiguração, baseado em geradores de árvore mínima;
4. Um algoritmo de fluxo de carga radial baseado em *back-forward-sweep* com renumeração automática das barras e ramos, com o objetivo de obter o estado de operação da rede e posteriormente calcular as funções objetivo correspondentes aos indivíduos gerados;
5. Um algoritmo de *simulated annealing* com o objetivo de otimizar a posição do *tap* do transformador e também dos capacitores automáticos baseando-se em uma determinada curva de carga.

1.3.1 Estrutura da Tese

Esta tese está organizada em 7 capítulos, descritos a seguir.

Capítulo 1 - Introdução. O problema de otimização de sistemas de distribuição é apresentado bem como uma revisão bibliográfica sobre o assunto. São apresentados de forma geral os algoritmos desenvolvidos ao longo do trabalho.

Capítulo 2 - Algoritmos Genéticos. São apresentados os conceitos básicos sobre AGs, desde a base biológica necessária para o seu entendimento e detalhando os operadores genéticos e vantagens e desvantagens da utilização dos AGs.

Capítulo 3 - *Simulated Annealing*. Apresenta os conceitos básicos da metaheurística *simulated annealing*, fundamentais para o desenvolvimento do algoritmo 2 presente neste trabalho.

Capítulo 4 - Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. A alteração da topologia do sistema de distribuição através da modificação dos *status* das chaves presentes nos ramos é estudada nesse capítulo. É proposto um AG dedicado para realizar a reconfiguração e os resultados para o sistema de 69 barras [20] são analisados. De forma adicional é proposto um algoritmo para a otimização do posicionamento do *tap* do transformador da subestação de forma a melhorar o perfil de carga nos três níveis considerados (leve, médio e pesado).

Capítulo 5 - Alocação de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. São apresentados os conceitos sobre a alocação de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica, suas vantagens e desvantagens. É proposto um algoritmo inteligente que realiza a alocação de capacitores fixos e automáticos e os resultados para o sistema de 69 barras [20] são apresentados e discutidos.

Capítulo 6 - O Algoritmo integrado. Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos com a utilização dos AGs integrados, que realizam a otimização do sistema levando em conta a reconfiguração, alocação de capacitores fixos e automáticos e otimização do *tap* do *OLTC* do transformador da subestação. Também é proposto um algoritmo baseado em *simulated annealing*, que leva em conta a curva de carga diária, para otimizar a operação do *OLTC* do transformador da subestação em conjunto com os capacitores automáticos previamente alocados pelos AGs. São apresentados resultados para os sistemas de 69 barras [20] e 135 barras [21].

Capítulo 7 - Conclusão. São apresentadas as conclusões da tese, discussões sobre os resultados obtidos e propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Algoritmos Genéticos

2.1 Introdução

Os algoritmos genéticos, doravante denominados AGs, são algoritmos de busca estocástica inspirados nos princípios da seleção natural, tendo sido idealizados por John Holland da Universidade de Michigan [22]. Holland iniciou os estudos na década de 60 e os resultados de suas pesquisas foram publicados no livro *Adaptation in Natural and Artificial System*, publicado em 1975. O objetivo inicial de Holland era conseguir um melhor entendimento dos processos de adaptação da natureza e projetar sistemas artificiais com propriedades similares às dos sistemas naturais.

Os AGs mantêm um determinado número de indivíduos (população), que são as soluções candidatas e que competem entre si para sobreviver. Apenas os indivíduos mais “fortes”, ou seja, com mais “aptidão” (representada por um índice, que será chamado aqui de função de avaliação) têm chance de sobreviver. Os indivíduos com mais “aptidão”, além disso, têm maior probabilidade de gerar novos indivíduos, contribuindo para o aprimoramento da população. A geração de novos indivíduos dá-se através de um operador chamado cruzamento ou recombinação, que basicamente realiza a troca de fragmentos entre dois indivíduos previamente selecionados, combinando características dos mesmos. Outra característica herdada da observação da natureza foi incorporada na idéia geral dos AGs, através do operador de “mutação”, que, de acordo com uma certa probabilidade, realiza pequenas alterações em um indivíduo da população.

Associa-se a cada indivíduo da população um determinado valor numérico, chamado função de avaliação, pelo qual os indivíduos são avaliados, sendo que os indivíduos com melhor função de avaliação prevalecem sobre os demais, permitindo assim uma melhoria crescente na qualidade da população. Uma das características mais importantes dos AGs é a manutenção de diversas soluções em paralelo (paralelismo implícito). Essa característica dá aos AGs a capacidade de explorar o espaço de busca de forma mais eficiente, tornando-o mais robusto, ou seja, é consistente em encontrar soluções de boa qualidade.

2.2 Charles Darwin [23]

Em 1831, Charles Darwin (1809-1882) integrou-se a uma expedição para uma viagem ao redor do mundo que duraria cerca de cinco anos. No caminho, Darwin coletou espécimes para estudo e fez numerosas anotações, que serviram de base para o desenvolvimento de suas idéias. Nas costas do Equador, a expedição fez escala no arquipélago de Galápagos, onde Darwin estudou com particular interesse os fringilídeos (ou tentilhões). Observando esses pássaros, Darwin notou diferentes adaptações, principalmente em relação ao bico e ao tipo de alimento ingerido. Retornando à Inglaterra, Darwin trazia a convicção de que os seres vivos se modificam ao longo do tempo, adaptando-se ao ambiente. Sabia que suas idéias contrariavam as crenças da época. Durante cerca de vinte anos, organizou suas anotações, elaborando hipóteses para os mecanismos de adaptação dos seres vivos ao ambiente. Envolvido com essa questão, chegou-lhe à mãos o livro “Um ensaio sobre populações”, em que o autor, Thomas Malthus, afirmava que a população humana crescia em progressão geométrica, enquanto a produção de alimento crescia em progressão aritmética. Em outras palavras, a população crescia muito mais rapidamente que a produção de alimento. Com o tempo haveria uma população muito grande para uma quantidade relativamente pequena de alimento. Essas idéias fizeram Darwin imaginar que, nas circunstâncias propostas por Malthus, ocorreria intensa luta pela sobrevivência. Também percebeu que, embora houvesse tendência de as espécies selvagens terem grande aumento de suas populações, esse acentuado incremento numérico não acontecia, e as populações naturais normalmente se mantinham estáveis. Darwin explicava que entre os indivíduos de uma espécie havia grande variabilidade; essa variabilidade era transmitida e acentuava-se de uma geração para a seguinte. Em cada grupo, alguns indivíduos sobreviviam, enquanto outros eram eliminados, sendo a “escolha” realizada pelo ambiente, pela seleção natural. Em 1858, o naturalista Alfred Russel Wallace, também inglês, enviou a Darwin uma cópia de um trabalho, solicitando sua apreciação. Quando Darwin o leu, percebeu que as idéias de Wallace sobre evolução das espécies eram muito semelhantes às suas. Os dois publicaram conjuntamente seus trabalhos na mesma revista científica, sem despertar a atenção dos leitores. Darwin, então, passou a escrever sua maior obra, “A origem das espécies”, que foi publicada em 1859. Uma das críticas à obra de Darwin foi a falta de exemplos concretos e atuais de evolução. Outra foi a falta de explicação convincente para as causas da diversidade intra-específica. Apenas no início do século XX, com o conhecimento a respeito da variabilidade genética, inclusive das mutações, as idéias de Darwin puderam ser melhor explicadas.

2.3 Alguns conceitos de genética

O ano de 1900 costuma ser considerado como o marco da origem daquilo que se convencionou chamar de “genética moderna”. O intervalo de tempo entre a publicação das proposições de Mendel¹ e de sua aceitação pela comunidade científica atesta que as idéias do pesquisador austríaco eram por demais avançadas para seu tempo. A grande novidade introduzida por Mendel nas suas interpretações dos resultados dos cruzamentos referem-se ao emprego de um raciocínio matemático-probabilístico em Biologia, que não era de costume.

A associação do raciocínio matemático com fenômenos biológicos acompanhou a genética desde então. Pesquisadores da área concluíram que os caracteres que eram herdados de uma geração para outra o faziam por intermédio de fatores particulados que ocorriam aos pares. Embora as leis da hereditariedade sejam hoje consagradas, especialmente a primeira lei de Mendel², e são ministradas em todos os programas de ensino de Biologia ou Ciências, as conclusões desses geneticistas não foram aceitas imediata e completamente. Charles Darwin, um dos criadores da teoria da evolução por seleção natural junto com Alfred Russell Wallace, acreditava que a evolução por seleção natural era um processo que ocorria sobre a variação genética de natureza contínua, sendo portanto um processo gradual. Hugo De Vries foi um dos proponentes da teoria alternativa de “evolução por saltos”, através de mutações de grande efeito, onde o processo não seria gradual. Havia ainda outros fatores envolvidos na disputa. De Vries, Wilhelm Johannsen e Wiliam Bateson são conhecidos como os “mendelistas de primeira hora”, envolvidos com a divulgação da herança particulada. Galton era inglês e primo de Charles Darwin, fundou a escola biométrica com cientistas do porte de Karl Pearson, que desenvolveu métodos estatísticos usados até hoje, tornando a Inglaterra um reduto daqueles que estudavam herança de caracteres métricos.

O grande geneticista dinamarquês, Wilhelm Johannsen, que cunhou os termos “gene”, “genótipo” e “fenótipo” verificou experimentalmente a falta de resposta à seleção através de tentativas de seleção em plantas previamente endocruzadas sem ter se apercebido que estas não apresentam obviamente variabilidade genética. O termo “fenótipo” foi cunhado por Johannsen devido ao reconhecimento da importância do ambiente nas características que apresentam variação contínua. Morgan chegou a afirmar em 1932 que “a implicação da teoria de seleção natural de que selecionando-se os indivíduos mais extremos da população, a próxima geração mover-se-á na direção selecionada, é agora reconhecida como errada”. Esse tipo de afirmação que contrariava a observação talvez milenar da prática do melhoramento genético de plantas e animais ilustra bem o abismo conceitual que existia entre aquilo que atualmente se

¹O monge agostiniano Gregor Mendel (1822-84) realizou uma série de experimentos sobre caracteres hereditários da ervilha e apresentou os resultados, enunciando três leis da herança, na sociedade científica de sua cidade (Brno, na atual República Checa), e os publicou em 1866. Esses experimentos são considerados, hoje, os mais importantes e inovadores na área da biologia do século XIX [24].

²A primeira lei, conhecida como a da uniformidade, mostra que, quando se cruzam dois indivíduos originários de linhagens puras, os quais apresentam determinado caráter, por exemplo, cor dos olhos, diferente um do outro, os descendentes mostram uma homogeneidade na característica estudada e todos herdam o caráter de um dos genitores (fator dominante), enquanto que o do outro aparentemente se perde, ou então apresentam um traço intermediário em relação aos traços de ambos os pais. Neste último caso, diz-se que existe co-dominância.

chama de genética quantitativa e a genética mendeliana [25].

2.3.1 Terminologia biológica [26]

- **Célula**

Unidade estrutural básica dos seres vivos, que se compõe de numerosas partes, sendo as fundamentais a parede ou membrana, o protoplasma e o núcleo. A célula é a menor unidade de matéria viva que pode existir de maneira independente e ser capaz de se reproduzir. Toda célula de um mesmo organismo contém o mesmo conjunto de um ou mais cromossomos. Nos seres humanos, cada célula somática (não-germinativa) contém 23 pares de cromossomos.

- **Cromossomo**

Cromossomos (*Kroma* = cor, *soma* = corpo) são filamentos espiralados de cromatina, existentes no suco nuclear de todas as células, que coram intensamente com o uso de corante citológico (carmin acético,orceína acética, reativo de Schiff), composto por *DNA*³ e proteínas, sendo observável à microscopia de luz durante a divisão celular [27].

Os cromossomos são os responsáveis por carregar toda a informação que as células necessitam para seu crescimento, desenvolvimento e reprodução. Localizados no núcleo celular, eles são constituídos por *DNA*, que, em padrões específicos, são denominados genes.

As características próprias de cada indivíduo, como, por exemplo, a cor dos olhos, cabelos, estatura, entre tantas outras, são hereditárias, uma vez que fazem parte de seu código genético (*DNA*).

Em nosso código genético há 46 cromossomos (23 pares); contudo, é importante saber que o número de cromossomos não está relacionado ao nível de inteligência ou complexidade de cada criatura, uma vez que, o ser humano não é o ser que possui a maior quantidade de cromossomos.

Existem ainda muitos organismos da mesma espécie com diferentes números de cromossomos, um exemplo é a frequência com que são encontradas plantas da mesma espécie com esta característica.

Dentro do núcleo celular, encontramos também um outro ácido nucléico que contribui na formação de proteína e divisão celular, o *RNA*.⁴

A maioria das células humanas encontram-se em pares, e, por isso, são chamadas *diploides* (46 cromossomos). Há também as células *haploides* (23 cromossomos), estas possuem apenas metade do número de cromossomos e normalmente são encontradas nas células germinativas masculina e feminina. [28]

³O ácido desoxirribonucleico (sigla em português: *ADN* e em inglês, *DNA*, *deoxyribonucleic acid*) é um composto orgânico cujas moléculas contêm as instruções genéticas que coordenam o desenvolvimento e funcionamento de todos os seres vivos e alguns vírus.

⁴O ácido ribonucleico (sigla em português: *ARN* e em inglês, *RNA*, *ribonucleic acid*) é o responsável pela síntese de proteínas da célula. Tanto o *RNA* quanto o *DNA*, são encontrados dentro núcleo celular.

- **Genes**

Os genes são blocos funcionais de *DNA*, os quais codificam uma proteína específica. É a denominação que damos hoje ao fator mendeliano. Cada gene está localizado em uma posição (*locus*) particular do cromossomo. Quando dois genes se comportam segundo a primeira lei de Mendel, são ditos *alelos*, e se encontram no mesmo *locus* de dois cromossomos homólogos. Para exemplificar, é possível pensar um gene como o responsável pela definição de uma característica do indivíduo, como a cor dos olhos. As diferentes colorações (azul, castanho, etc) correspondem a alelos. No entanto, também existem pontos de vista muito mais refinados [29]. Como muitos organismos apresentam células com mais de um cromossomo, o conjunto de todos os cromossomos compõe o material genético do organismo, denominado genoma.

A Figura 2.1 ilustra um diagrama de um cromossomo, salientando o *locus*, os genes e os alelos.

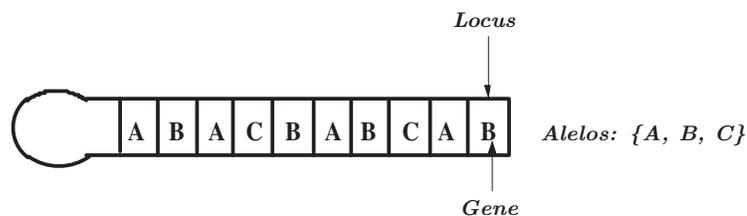


Figura 2.1: Ilustração de um cromossomo.

- **Fenótipo x Genótipo [30]**

O genótipo representa o conjunto específico de genes do genoma. Neste caso, diz-se que indivíduos com o mesmo genoma tem o mesmo genótipo. O fenótipo é a manifestação do genótipo no comportamento, fisiologia e morfologia do indivíduo, como um produto de sua interação com o ambiente. A seleção natural opera somente na expressão fenotípica do genótipo [31, 32]. Para modelar este fenômeno, Atmar [33] estendeu um resultado da literatura baseado no emprego de dois espaços de estados:

- **G**: espaço genotípico (representa a informação);
- **P**: espaço fenotípico (representa o comportamento), que permitem a definição de quatro funções, onde **I** representa um conjunto de efeitos do ambiente (entrada), na forma:
 - * $f1: \mathbf{I} \times \mathbf{G} \rightarrow \mathbf{P}$ (epigênese);
 - * $f2: \mathbf{P} \rightarrow \mathbf{P}$ (seleção);
 - * $f3: \mathbf{P} \rightarrow \mathbf{G}$ (sobrevivência genotípica);
 - * $f4: \mathbf{G} \rightarrow \mathbf{G}$ (variação genética);

* A adaptação evolutiva ocorre a partir da aplicação iterativa dessas funções.

• Adaptação evolutiva

Sob um processo de competição por recursos limitados e seleção natural, indivíduos mais bem adaptados têm uma maior probabilidade de sobreviver e propagar seu material genético. A adaptação (função de avaliação) pode ser definida como a probabilidade de sobrevivência e reprodução (viabilidade), ou então como uma função do número de descendentes que o organismo produziu (fertilidade). Atmar [34] indicou que uma medida singular da adaptação evolutiva é dada pela habilidade de uma população antecipar seu ambiente e agir no sentido de atender aos requisitos associados às predições realizadas. Uma alternativa a esta definição de medida de adaptação é a idéia simplificada de que a adaptação pode ser medida em termos de mudanças na frequência gênica dentro da população [35]. Esta definição despreza os efeitos importantes de pleiotropia⁵ e poligenia⁶, ao assumir a relação (um gene) \Leftrightarrow (uma característica) para descrever o relacionamento (genótipo) \Leftrightarrow (fenótipo). Sistemas naturais em evolução são fortemente pleiotrópicos e altamente poligênicos [32]. Além disso, a seleção natural atua sobre uma coleção de características fenotípicas, e não sobre uma única característica isolada. Como consequência, um gene não pode ser considerado como uma unidade individual de seleção, pelo fato de não ser possível atribuir a um gene isolado um valor significativo para o seu nível de adaptação. Logo, a evolução se refere mais apropriadamente a mudanças em adaptação e diversidade, e não diretamente a mudanças na frequência gênica. Além disso, a evolução é oportunista, ou seja, características críticas serão intensamente otimizadas, enquanto características menos críticas podem sofrer uma grande variedade de tratamentos alternativos.

• Reprodução assexuada e sexuada

Embora os detalhes da evolução biológica ainda não estejam completamente compreendidos, existem alguns aspectos fundamentados em fortes evidências experimentais:

1. a evolução é um processo que opera sobre cromossomos e não sobre organismos;
2. a seleção natural é o mecanismo que relaciona cromossomos com a eficiência da entidade que eles representam, permitindo assim que organismos mais bem adaptados ao meio ambiente tenham uma taxa maior de reprodução;
3. o processo evolutivo se dá durante o processo reprodutivo. Dentre os fenômenos que podem ocorrer neste estágio é possível citar a mutação e a recombinação genética (*crossover*);
4. o processo evolutivo não possui memória direta.

– Reprodução assexuada

⁵Pleiotropia (Do grego, *pleion* = mais numeroso e *tropos* = afinidade) é o fenômeno em que um par de genes alelos condiciona o aparecimento de várias características no mesmo organismo.

⁶Quando uma única característica fenotípica é determinada pela iteração simultânea de muitos genes

Na natureza, a codificação da informação genética é realizada de modo a admitir reprodução assexuada. Neste caso, os filhos apresentam quase sempre a mesma informação genética do pai. Um número muito grande de organismos naturais se reproduzem de forma assexuada, incluindo a maior parte das bactérias.

– Reprodução sexuada

Neste caso, os filhos apresentam uma informação genética que corresponde a uma união da informação genética de seus pais. Na reprodução sexuada diplóide, cada pai fornece uma célula haplóide denominada gameta, formada por cromossomos resultantes da recombinação dos pares de cromossomos existentes nos respectivos pais. Os cromossomos presentes nos gametas fornecidos pelos pais se unem para gerar uma nova célula diplóide. Durante a reprodução sexuada, os cromossomos estão sujeitos à recombinação ou *crossover*, que consiste na troca aleatória de material genético entre dois cromossomos.

• Mutação

Tanto na reprodução assexuada como na sexuada, o processo de cópia do material genético dos pais está sujeito a alterações e perturbações, denominados mutações. Uma mutação corresponde então à troca aleatória, no processo de cópia do material genético, de um nucleotídeo por outro.

A mutação é uma consequência inevitável da existência de sistemas que se reproduzem continuamente em um universo com diferencial de entropia positivo, sendo um mecanismo importante de implantação da diversidade entre os indivíduos. Em estágios iniciais do processo evolutivo natural, as taxas de mutação podem ter sido muito maiores. O fato de que as taxas de mutação atuais nos organismos vivos são muito baixas na maioria dos casos observados pode ser devido a estes organismos, como espécie, terem atingido um estado de estacionariedade em relação às condições ambientais atuais. Neste caso, o nível de evolução orgânica atual não deve servir de referência para nenhum tipo de implementação computacional de algoritmo evolutivo. Geralmente, a recombinação deve ter probabilidades de ocorrência muito maior que a mutação. Teoricamente, as taxas ótimas de mutação são inversamente proporcionais ao número de variáveis de decisão envolvidas e diretamente proporcionais à distância do ótimo. A probabilidade de ocorrência de mutação deve ser inversamente proporcional ao tamanho da população [36]. Existem estratégias que incorporam a definição da taxa de mutação ao próprio genótipo. A Tabela 2.1 apresenta um resumo de termos da biologia aplicados à computação evolutiva.

Tabela 2.1: Comparação entre termos de Biologia e computação evolutiva

Biologia	Algoritmos Evolutivos
Cromossomo	Estrutura de dados
Gene	Um ou mais atributos ocupando uma determinada posição da estrutura de dados
Locus	Posição ocupada por um gene em uma estrutura de dados
Alelo	Diferentes valores (dados) que um gene pode assumir
Crossover	Troca de porções entre duas ou mais estruturas de dados
Mutação	Variação aleatória em uma estrutura de dados individual
<i>Fitness</i>	Valor que quantifica a qualidade relativa (nível de adaptação) de um indivíduo dada uma função de avaliação
Seleção	Processo que permite a sobrevivência e reprodução dos indivíduos mais aptos em detrimento dos menos aptos
Genótipo	Estrutura de dados que representa uma solução candidata para um determinado problema
Fenótipo	Decodificação de um ou mais cromossomos que leva a um ponto da superfície de adaptação, definida no espaço de busca

2.4 Algoritmo Genético Básico

Os AGs operam com uma população de indivíduos, sendo que cada indivíduo é uma solução em potencial para um determinado problema. Normalmente o indivíduo é codificado como um vetor binário de comprimento fixo. Após a população inicial haver sido gerada, de forma aleatória ou heurísticamente controlada, são aplicados três operadores genéticos: seleção, cruzamento e mutação. Após a aplicação dos operadores genéticos, uma nova geração é formada e o processo é repetido. Para grandes problemas de otimização, é interessante incorporar à população inicial um conhecimento do problema a ser estudado. Tal procedimento, no entanto, não pode diminuir de forma demasiada a diversidade populacional, o que poderia ocasionar convergência prematura do algoritmo. O tamanho da população típica adotada pode variar bastante, dependendo da dimensão do problema, sendo encontrados na literatura valores de 30 até 300 indivíduos. A execução de uma iteração do algoritmo é basicamente um processo de dois estágios. Iniciando com a população corrente, o operador de seleção é aplicado de forma a criar uma população intermediária. Então, os operadores de cruzamento e mutação são aplicados à população intermediária criando novos indivíduos que poderão compor a nova população. Embora uma grande ênfase tenha sido dada aos três operadores genéticos mencionados, o esquema de codificação e a função de adaptação são os mais importantes aspectos na implementação de AGs eficientes, porque dependem diretamente do problema a ser estudado. Para aplicar os AGs a um dado problema a primeira decisão a ser tomada é sobre o tipo do genótipo que o problema necessita, ou seja, como os parâmetros do problema poderão ser representados por um número finito de seqüências binárias (*strings*), de forma a codificar todas as possíveis soluções. Assim, percebe-se que a representação adequada é crucial para o desenvolvimento

de AGs eficientes. Normalmente usa-se a representação binária para os *strings*, mas outros tipos de representação podem também ser utilizados, dependendo do problema. Quando é utilizada a codificação binária, a posição dos genes no cromossomo é muito importante para um algoritmo bem sucedido. Uma má escolha pode tornar o problema mais difícil de ser resolvido, aumentando o número de gerações necessárias para atingir determinado objetivo. A Figura 2.2 ilustra o procedimento básico de um AG.

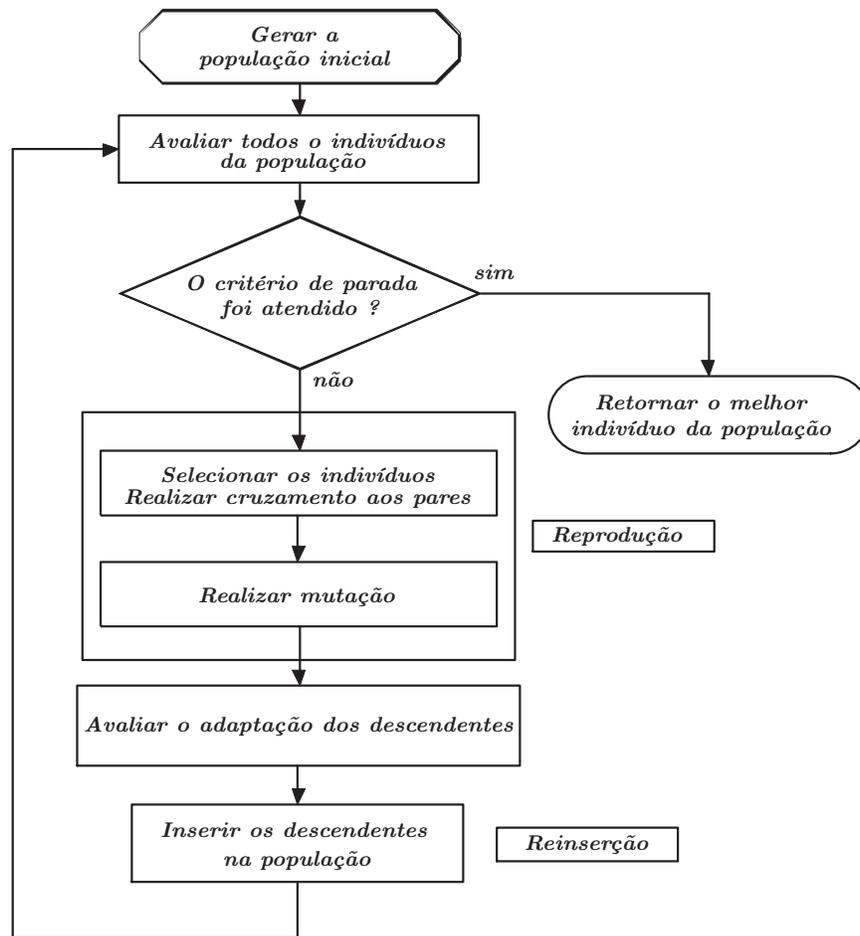


Figura 2.2: AG básico.

2.4.1 Notação computacional [26]

Um cromossomo haplóide geralmente corresponde a uma estrutura de dados (por exemplo uma cadeia de bits) que representa um candidato (indivíduo de uma população) à solução de um problema. Um gene corresponde a um único bit, ou então a um pequeno bloco de bits adjacentes que codificam um elemento particular da solução candidata. Por exemplo,

em otimização de funções multiparamétricas, o conjunto de bits utilizado para codificar um parâmetro específico pode ser considerado um único gene. Em uma cadeia de bits, um alelo é 0 ou 1. Para alfabetos maiores, mais alelos podem ser considerados para cada posição (*locus*). A grande maioria das aplicações de algoritmos evolutivos emprega codificação haplóide e baseada em um único cromossomo. Neste caso, o genótipo passa a corresponder à configuração de bits do cromossomo.

2.4.2 Superfície de adaptação

Uma vez definido o processo de codificação (representação) para um dado problema, o objetivo é buscar uma solução desejada dentre todos os possíveis candidatos à solução (elementos do espaço de busca).

Genótipo: uma solução potencial de um dado problema pode ser codificada na forma de uma ou mais cadeias cromossômicas (estrutura de dados).

Fenótipo: a decodificação de um ou mais cromossomos leva a um ponto na superfície de adaptação, definida no espaço de busca.

Espaço de busca normado⁷: coleção de candidatos à solução do problema acrescentado de uma norma (operador que estabelece a noção de vizinhança).

A superfície de adaptação foi originalmente definida pelo biólogo Sewell Wright, em 1931, como a representação do nível de adaptação de todos os genótipos. Observa-se que aqui é realizada uma avaliação diretamente sobre o genótipo, sem considerar o fenótipo.

No contexto de superfícies de adaptação, a evolução é um processo responsável pela movimentação da população nesta superfície, a partir de operadores genéticos como mutação e recombinação, no sentido de conduzir os indivíduos para as regiões de máximo local. Neste caso, a seleção natural pode ser vista como um processo que conduz à maturação ou aumento da adaptação média da população. A idéia de evolução a partir do deslocamento da população ao longo de uma superfície de adaptação fixa é biologicamente irreal, porque um indivíduo da população não pode receber um valor de adaptação independente dos demais. O nível médio de adaptação de um indivíduo em um ambiente não-estacionário varia em função da dinâmica do ambiente e das interações deste indivíduo e de outros com o ambiente e entre si.

2.4.3 Codificação do indivíduo

Conforme já mencionado anteriormente, na maioria das aplicações de AGs as estruturas de dados utilizadas como representação das soluções candidatas são cadeias binárias, mesmo

⁷Os algoritmos evolutivos geralmente assumem que existe alguma correlação entre candidatos à solução que sejam vizinhos (segundo a norma estabelecida).

quando as variáveis do problema são inteiras ou reais. Uma variável real $x \in (a, b)$ pode ser codificada utilizando-se cadeias binárias de comprimento l , o que resultará em uma precisão numérica de $(a - b)/(2^l - 1)$. A motivação para o uso de codificação binária vem da teoria dos esquemas (*schemata theory*), que será discutida adiante. Holland [22, 37], argumenta que seria benéfico para o desempenho do algoritmo maximizar o paralelismo implícito inerente aos AGs, e prova que um alfabeto binário maximiza o paralelismo implícito. Entretanto, em diversas aplicações práticas a utilização de codificação binária leva a um desempenho insatisfatório. Em problemas de otimização numérica com parâmetros reais, algoritmos genéticos com representação em ponto flutuante frequentemente apresentam desempenho superior à codificação binária. Michalewicz [38] argumenta que a representação binária apresenta desempenho pobre quando aplicada a problemas numéricos com alta dimensionalidade e onde alta precisão é requerida. Suponha por exemplo, que temos um problema com 100 variáveis com domínio no intervalo $[-500, 500]$ e que precisamos de 6 dígitos de precisão após a casa decimal. Neste caso precisaríamos de um cromossomo de comprimento 3000, e teríamos um espaço de busca de dimensão aproximadamente 10^{1000} . Neste tipo de problema o algoritmo genético clássico apresenta desempenho pobre. Uma das características da representação binária é que dois pontos vizinhos no espaço de parâmetros não são necessariamente vizinhos no espaço de busca definido pela representação do problema.

2.4.4 Função de avaliação

A cada indivíduo da população é atribuído um certo valor, normalmente chamado de *fitness* ou avaliação, que depende diretamente do desempenho do fenótipo. A avaliação é calculada a partir do genótipo através de uma função de avaliação, que deve retornar um valor numérico único. A função de avaliação é altamente dependente do problema a ser resolvido. A especificação de uma função de avaliação adequada é crucial para o bom desempenho dos AGs. Frequentemente, os operadores de cruzamento e mutação produzem indivíduos infactíveis, causando grande problema para o cálculo da avaliação do indivíduo. Uma alternativa bastante simples consiste em desprezar os indivíduos infactíveis e somente avaliar os factíveis. Outra alternativa seria um processo de “reparo” dos indivíduos, tornando-os factíveis. Pode-se também projetar o algoritmo de tal forma a produzir apenas indivíduos factíveis, de forma a evitar os problemas mencionados. Cada uma das técnicas citadas tem vantagens e desvantagens, que devem ser ponderadas quando da sua aplicação a um determinado problema. Particularmente, para alguns tipos de problema relacionados com sistemas de potência, quando as soluções ótimas estão muito perto da fronteira de factibilidade, as técnicas citadas podem produzir soluções de baixa qualidade. Uma maneira de se evitar esse problema é aplicar um operador de reparação em apenas uma fração (cerca de 10%) da população infactível.

O processo de avaliação de indivíduos em um algoritmo evolutivo começa com a definição de uma função objetivo $f : A_x \rightarrow \mathfrak{R}$, onde A_x é o espaço de atributos das variáveis. A função de avaliação $\phi : A_x \rightarrow \mathfrak{R}_+$ faz um mapeamento dos valores nominais da função objetivo em um intervalo não-negativo. A função de avaliação é geralmente uma composição da função objetivo com uma função de escalonamento: $\phi(a_i(t)) = g(f(a_i(t)))$, onde $a_i(t) \in A_x$.

O mapeamento acima faz-se necessário caso se deseje minimizar a função objetivo, uma vez que valores maiores de avaliação corresponderão a valores menores da função objetivo.

2.4.5 Teoria da Pressão Seletiva

Os operadores de seleção são caracterizados por um parâmetro conhecido como *pressão seletiva*, que relaciona o tempo de dominância (*takeover*) do operador. O tempo de dominância é definido como sendo a velocidade para que a melhor solução da população inicial domine toda a população através da aplicação isolada do operador de seleção [39, 40]. Se o tempo de dominância de um operador é grande, então a pressão seletiva é fraca, e vice-versa. Portanto, a pressão seletiva oferece uma medida de quão “guloso” é o operador de seleção no que se refere à dominância de um indivíduo da população. Se o operador de seleção apresenta uma forte pressão seletiva, então a população perde diversidade rapidamente. Para evitar uma rápida convergência para pontos sub-ótimos é necessário empregar populações com dimensões elevadas e/ou operadores genéticos capazes de introduzir e/ou manter a diversidade populacional. Por outro lado, operadores genéticos com estas características tornam a convergência do algoritmo lenta nos casos em que a pressão seletiva é fraca. Isto permite uma maior exploração do espaço de busca. A discussão acima sugere que o sucesso na aplicação de um algoritmo evolutivo depende do mecanismo de seleção empregado, que, por sua vez, irá depender dos operadores genéticos e outros parâmetros escolhidos para o algoritmo.

2.4.6 Operadores de seleção

Nos AGs convencionais é utilizado um sistema de seleção proporcional à função de avaliação sendo geralmente implementado utilizando um algoritmo chamado *roulette wheel*. O método é bastante simples e foi proposto por Goldberg [41], através do qual cada indivíduo possui um segmento da roleta proporcional à sua aptidão. A seguir serão brevemente apresentados esse e outros métodos de seleção utilizados na implementação dos AGs.

- ***Roulette Wheel***

O *roulette wheel* atribui a cada indivíduo de uma população uma probabilidade de passar para a próxima geração proporcional a sua função de avaliação normalizada, ou seja, a função de avaliação medida em relação à somatória da função de avaliação de todos os indivíduos da população. Assim, quanto melhor a função de avaliação de um indivíduo, maior a probabilidade dele passar para a próxima geração. Observa-se que a seleção de indivíduos por *roulette wheel* permite a perda do melhor indivíduo da população.

- **Seleção por Torneio**

É um dos mais refinados processos de seleção, por permitir ajustar a pressão seletiva. A seleção é feita em função do número de vitórias de cada indivíduo em N competições contra q oponentes aleatórios da população, sendo que vence uma competição aquele que

apresentar a melhor função de avaliação (comparada ao de seu(s) oponente(s)). Para propósitos práticos, $q \geq 10$ conduz a uma forte pressão seletiva, enquanto valores de q entre 3 e 5 levam a uma fraca pressão seletiva. Para $q = 1$, nenhuma seleção está sendo feita. Para $q = 2$, tem-se o chamado torneio binário. Para $q \rightarrow N$ tem-se simplesmente a seleção por ordem de avaliação, sem nenhuma aleatoriedade.

- **Seleção baseada em Rank**

Este mecanismo utiliza apenas as posições dos indivíduos quando ordenados de acordo com a função de avaliação para determinar a probabilidade de seleção. A seleção por rank simplifica o processo de mapeamento do objetivo para a função de avaliação: $\phi(a_i(t)) = \alpha f(a_i(t))$, onde $\alpha = 1$ para problemas de maximização e $\alpha = -1$ para problemas de minimização. O rank também elimina a necessidade de escalonamento da função de avaliação, uma vez que a pressão seletiva é mantida mesmo que os valores da função de avaliação dos indivíduos sejam muito próximos um do outro, o que normalmente ocorre após muitas gerações. Podem ser usados mapeamentos lineares ou não-lineares para determinar a probabilidade de seleção.

- **Seleção de Boltzmann**

Os mecanismos de seleção de Boltzmann controlam termodinamicamente a pressão seletiva utilizando princípios de *simulated annealing* (SA). A idéia básica da seleção de Boltzmann é utilizar uma distribuição de Boltzmann-Gibbs como mecanismo de competição entre indivíduos: $P(x') = [1 + \exp(f(x) - f(x'))/T]^{-1}$, onde T é a temperatura do sistema, x e x' são os dois indivíduos que estão competindo para serem selecionados, e $f(\cdot)$ é o valor da função de avaliação.

- **Seleções Bi-Classista e Elitista**

Na seleção bi-classista, são escolhidos os $b\%$ melhores indivíduos e os $w\%$ piores indivíduos da população. O restante, $(100 - (b + w))\%$, é selecionado aleatoriamente com ou sem reposição. O elitismo consiste em um caso particular de seleção bi-classista na qual um ou mais dos melhores indivíduos da população é sempre mantido e nenhum dos piores indivíduos é selecionado, ou seja, $b \neq 0$ e $w = 0$.

2.4.7 Cruzamento

O operador genético de cruzamento combina dois cromossomos para produzir dois novos cromossomos. É o principal meio de troca de informações genéticas entre os indivíduos pertencentes à população. A idéia principal é que a troca de material genético pode ser benéfica, porque o indivíduo resultante pode ter uma função de avaliação melhor que o dos indivíduos que o gerou.

- **Cruzamento de 1 ponto**

No cruzamento de 1 ponto o indivíduo é dividido em duas partes e o ponto de corte é escolhido de forma aleatória ou determinística conforme mostrado na Figura 2.3.

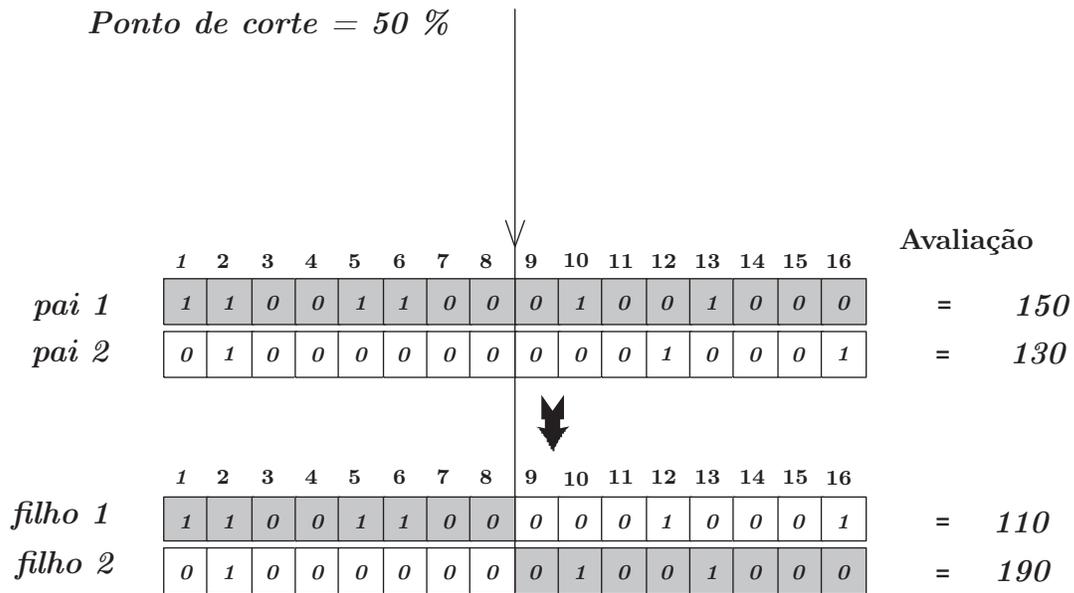


Figura 2.3: Exemplo de cruzamento de 1 ponto.

- *Cruzamento de 2 pontos*

A Figura 2.4 apresenta um exemplo de cruzamento de dois pontos, onde os pontos de corte estão nas posições 4 e 10 do indivíduo respectivamente. Observa-se que, após a realização da troca de material genético, foram gerados dois descendentes, chamados “filhos”, sendo que o pai 1 tem maior função de avaliação entre os quatro indivíduos estudados. Observa-se também que o filho 1 tem a função de avaliação menor, portanto representa uma solução de menor qualidade.

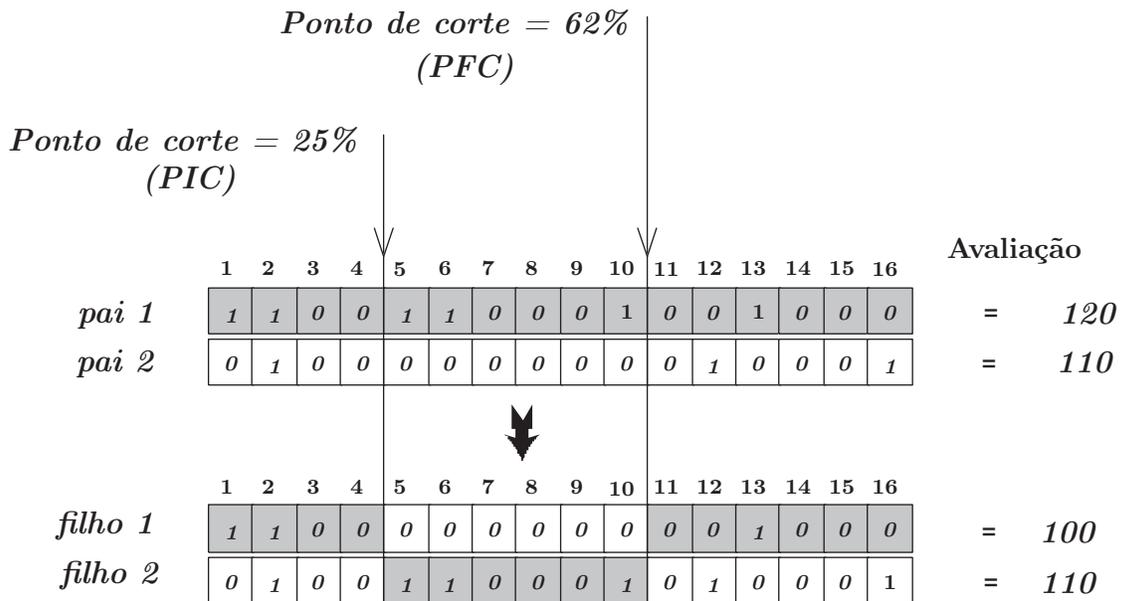


Figura 2.4: Exemplo de cruzamento de 2 pontos.

Com esses exemplos meramente ilustrativos, pode-se observar que a aplicação do cruzamento nem sempre é benéfica, podendo inclusive deteriorar a qualidade dos indivíduos gerados.

- Cruzamento uniforme

O cruzamento uniforme (*uniform crossover*) é bastante diferente do cruzamento até então estudado. Cada gene do descendente é criado copiando o gene correspondente de um dos pais, escolhido de acordo com uma máscara de cruzamento gerada aleatoriamente. Onde houver 1 na máscara de cruzamento, o gene correspondente será copiado do primeiro pai e, onde houver 0, será copiado do segundo. O processo é repetido com os pais trocados para produzir o segundo descendente. Uma nova máscara de cruzamento é criada para cada par de pais. O número de pontos de troca de informação não é fixo mas em geral é usado $l/2$ (onde l é o comprimento do indivíduo). A Figura 2.5 demonstra graficamente o processo.

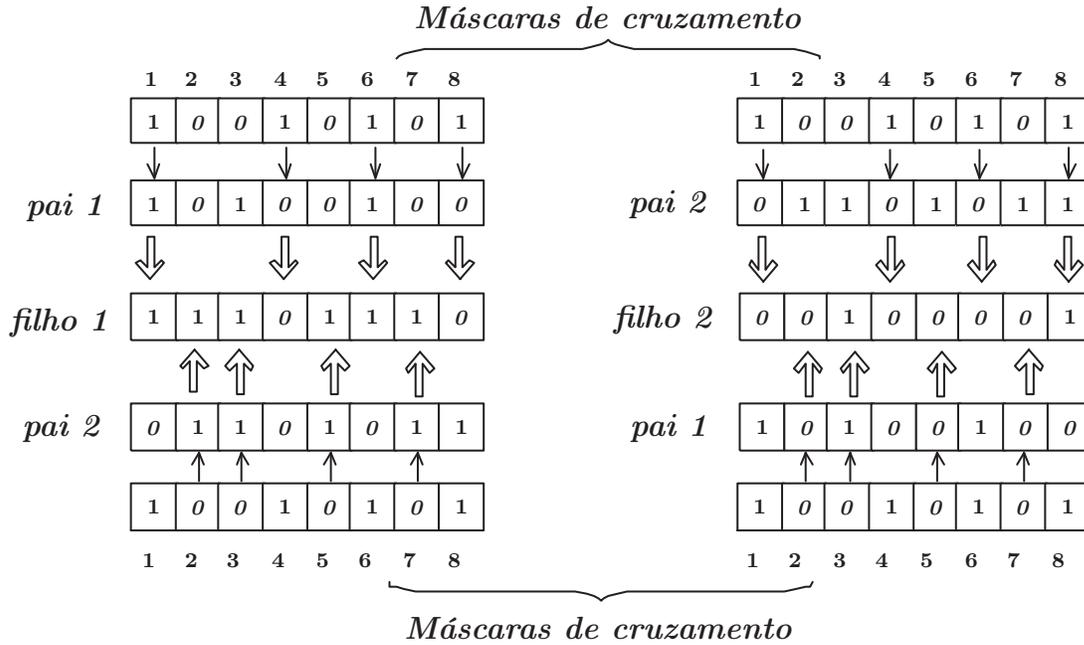


Figura 2.5: Exemplo de cruzamento uniforme.

2.4.8 Operador de mutação

Em genética, a mutação pontual é um processo no qual um alelo de um gene é aleatoriamente substituído (ou modificado) por outro, resultando em um novo cromossomo. Geralmente existe uma baixa probabilidade de mutar cada gene de um cromossomo e isso significa que cada bit na população P é operado da seguinte forma:

- Os números r, \dots, u indicando as posições que irão sofrer mutação são determinadas aleatoriamente de forma que cada posição possui uma pequena probabilidade pm de sofrer mutação independente das outras posições.
- Uma nova cadeia $x' = x_1 \dots x_r \dots x_u \dots x_l$ é gerada, onde $x_r \dots x_u$ são determinadas aleatoriamente partindo do conjunto de alelos para cada gene. No caso de cadeias binárias, se uma posição possui alelo '0', então ela se torna '1' e viceversa.

2.4.9 Teoria dos esquemas (*schemata theory*) [42]

A Teoria dos Esquemas (*schemata theory*), foi proposta por Holland [22, 37], para tentar explicar por que os algoritmos genéticos funcionam. Um esquema é uma representação capaz de descrever diversos cromossomos simultaneamente. Um esquema é construído inserindo um caractere *don't care* (*) no alfabeto dos genes, indicando que aquele gene pode representar

$$\begin{array}{c}
[0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0] \\
[*\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0] \\
[0\ *\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0] \\
\vdots \\
[0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ *] \\
[*\ *\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0] \\
[*\ 1\ *\ 0\ 1\ 0\ 0] \\
\vdots \\
[0\ 1\ 0\ 0\ 1\ *\ *] \\
[*\ *\ *\ 0\ 1\ 0\ 0] \\
\vdots \\
[*\ *\ *\ *\ *\ *]
\end{array}$$

Figura 2.6: Esquemas.

qualquer alelo. Por exemplo, o esquema $[1\ *\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1]$ representa os indivíduos $[1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1]$ e $[1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1]$. O esquema $[1\ *\ 0\ *\ 1\ 1\ 0]$ representa quatro indivíduos: $[1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0]$, $[1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0]$, $[1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0]$ e $[1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0]$. Obviamente, o esquema $[1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0]$ representa apenas um indivíduo, enquanto que o esquema $[*\ *\ *\ *\ *\ *]$ representa todos os indivíduos de comprimento 7.

Observa-se que cada esquema representa 2^r indivíduos, onde r é o número de caracteres *don't care* “*” presentes no esquema. Por outro lado, cada indivíduo de comprimento m é representado por 2^m esquemas.

Considere o indivíduo $[0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0]$, por exemplo. Este indivíduo é representado pelos 2^7 esquemas mostrados na figura 2.6.

Considerando indivíduos de comprimento m , há um total de 2^m possíveis esquemas. Numa população de tamanho n , entre 2^m e $n \times 2^m$ diferentes esquemas podem ser representados.

A *ordem* de um esquema S , $o(S)$, é definida como o número de 0s e 1s presentes no esquema, isto é, o número de posições fixas (caracteres diferentes de *don't care*) presentes no esquema. A ordem de um esquema define sua especificidade, de modo que quanto maior a ordem, mais específico é o esquema.

O *comprimento definitório* de um esquema S , denotado por $\delta(S)$, é a maior distância entre posições fixas de um cromossomo. O comprimento definitório define o nível de compactação da informação contida no esquema.

A função de adaptação de um esquema S na geração t , $eval(S, t)$, é definido como a média das funções de adaptação de todos os indivíduos na população representados pelo esquema S . Assumindo-se que há p indivíduos $\{x_{i_1}^t, \dots, x_{i_p}^t\}$ representado pelo esquema S_i na geração t . Então:

$$eval(S_i, t) = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p eval(x_{i_j}^t), \quad (2.1)$$

onde $eval(x_{i_j}^t)$ é a função de adaptação do indivíduo $x_{i_j}^t$.

Considerando tam_{pop} o tamanho da população, a função de adaptação média da população na geração t , $\bar{F}(t)$ é dada por:

$$\bar{F}(t) = \frac{1}{tam_{pop}} \sum_{i=1}^{tam_{pop}} eval(x_i^t). \quad (2.2)$$

Sejam p_c e p_m as probabilidades de cruzamento e mutação, respectivamente, e m o comprimento dos indivíduos. Seja $\xi(S_i, t)$ o número de indivíduos representados pelo esquema S_i na geração t . Pode-se mostrar que [38]:

$$\xi(S_i, t + 1) \geq \frac{\xi(S_i, t) eval(S_i, t)}{\bar{F}(t)} \left[1 - p_c \frac{\delta(S_i)}{m - 1} - o(S_i) p_m \right] \quad (2.3)$$

A equação 2.3 é conhecida como *equação de crescimento reprodutivo do esquema*. Esta equação é deduzida supondo que a função de avaliação $f(\cdot)$ produz apenas valores positivos. Se a função a ser otimizada produz valores negativos, um mapeamento entre as funções de otimização e de adaptação é necessário. Esta equação de crescimento mostra que a seleção aumenta a amostragem de esquemas cuja função de adaptação está acima da média da população, e este aumento é exponencial [38]. A seleção, por si só, não introduz nenhum novo esquema (não representado na geração inicial em $t = 0$). Esta é a razão da introdução do operador de cruzamento: possibilitar a troca de informação estruturada, ainda que aleatória. Além disso, o operador de mutação introduz uma variabilidade maior na população. O efeito (destrutivo) combinado destes operadores não é significativo se o esquema é curto e de ordem baixa. O resultado final da equação de crescimento pode ser formulado como segue:

- **Teorema dos Esquemas:**

Esquemas com comprimento definitório curto, de ordem baixa, e com função de adaptação acima da média, têm um aumento exponencial de sua participação em gerações consecutivas dos algoritmos genéticos [22, 37].

Uma consequência imediata deste teorema é que os algoritmos genéticos tendem a explorar o espaço por meio de esquemas curtos e de baixa ordem que, subsequentemente, são usados para troca de informação durante o cruzamento.

- **Hipótese dos Blocos Construtivos:**

Os AGs buscam desempenho quase-ótimo através da justaposição de esquemas curtos, de baixa ordem e alto desempenho, chamados de blocos construtivos.

Em uma população de tamanho tam_{pop} , indivíduos de comprimento m processam pelo menos 2^m e no máximo $2^{tam_{pop}}$ esquemas. Alguns deles são processados de forma útil: são amostrados a uma taxa crescente exponencial (desejável); e outros são quebrados por meio de cruzamento e mutação.

Holland [22,37], mostrou que, em uma população de tamanho tam_{pop} , pelo menos tam_{pop}^3 são processados de forma útil. Esta propriedade foi denominada *paralelismo implícito*, pois é obtida sem nenhuma exigência extra de memória e processamento. Entretanto, Bertoni e Dorigo [43] mostraram que a estimativa tam_{pop}^3 é válida apenas para o caso particular em que tam_{pop} é proporcional a 2^l , onde $l = \frac{1}{2}m\varepsilon$ e ε é a probabilidade de um esquema ser rompido por cruzamento.

Deve-se notar, entretanto que, em alguns problemas, alguns blocos construtivos (esquemas curtos, de ordem baixa) podem direcionar erroneamente o algoritmo, levando-o a convergir a pontos sub-ótimos. Este fenômeno é conhecido como decepção. Assim, a hipótese dos blocos construtivos não fornece uma explicação definitiva do porquê os algoritmos genéticos funcionam. Ela é apenas uma indicação da razão pela qual os algoritmos genéticos funcionam para uma certa classe de problemas.

2.4.10 Deception problem

Alguns blocos construtivos podem direcionar erroneamente os AGs, levando a uma convergência a pontos sub-ótimos:

Suponha que os esquemas $[1\ 1\ 1\ *\ *\ *\ *\ *\ *\ *]$ e $[*\ *\ *\ *\ *\ *\ *\ *\ 1\ 1]$ apresentem função de adaptação acima da média, e que, por outro lado, o esquema $[1\ 1\ 1\ *\ *\ *\ *\ *\ 1\ 1]$ apresente função de adaptação muito menor que $[0\ 0\ 0\ *\ *\ *\ *\ *\ 0\ 0]$. Embora a solução ótima seja $[1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1]$, o processo evolutivo poderá apresentar a tendência a convergir para pontos como $[0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0]$.

Algumas alternativas foram propostas para combater o problema da decepção [38,41]. A primeira assume que há algum conhecimento a priori da função objetivo para que seja possível codificá-la de forma apropriada (que forme blocos construtivos “coesos”).

A segunda consiste na utilização de um operador de inversão, em que selecionam-se 2 pontos em um cromossomo e inverte-se a ordem dos bits entre os pontos selecionados (alterando-se a codificação em conjunto com a operação).

A terceira opção é utilizar algoritmos genéticos *messy*, que diferem dos AGs clássicos de várias maneiras, incluindo codificação, operadores, presença de indivíduos de tamanho distinto e fases evolutivas.

Capítulo 3

Simulated Annealing

A metaheurística *simulated annealing* (*SA*) é uma das mais flexíveis técnicas disponíveis para a resolução de difíceis problemas combinatoriais. A maior vantagem da técnica é que pode ser aplicada em um grande número de problemas sem haver a preocupação das condições de diferenciabilidade, continuidade e convexidade que normalmente são exigidos nos métodos de otimização convencionais.

Como acontece com outras técnicas combinatoriais, como busca tabu e algoritmos genéticos, a codificação das soluções, a caracterização da vizinhança de uma dada configuração, a avaliação da função objetivo e o mecanismo de transição são críticos para o sucesso de uma implementação prática de *simulated annealing* [44].

O termo *annealing* (recozimento) refere-se a um tratamento térmico que começa com a elevação da temperatura de um material até o ponto de liquefação, com o conseqüente lento e gradual resfriamento, tendo por objetivo produzir um cristal de alta qualidade. Assim a metaheurística *simulated annealing* simula o processo físico de *annealing*, e originalmente foi proposto, em mecânica estatística, tendo por objetivo a representação do processo de solidificação e formação de cristais. Durante o processo de resfriamento, assume-se que as condições de equilíbrio térmico (ou quase equilíbrio) são mantidas. O processo de resfriamento termina quando o material alcança o estado de mínima energia o qual, em princípio corresponde a um cristal perfeito. É sabido que um processo de resfriamento lento é responsável pela formação de um cristal com menor quantidade de defeitos.

As duas principais características de *simulated annealing* são o mecanismo de transição entre estados e o programa de resfriamento.

Quando aplicado a problemas de otimização combinatoriais, *SA* tem como objetivo encontrar um configuração ótima (ou um estado com mínima energia) para um problema complexo.

A metaheurística *SA* foi proposta originalmente por Metropolis nos anos 50 como um modelo de processo de cristalização. Apenas nos anos 80 todavia, pesquisadores independentes (Kirpatrick, Gelatt, Vecchi [45] e Cerny [46]) notaram as semelhanças entre o processo físico de *annealing* e alguns problemas de otimização combinatoria. Eles observaram que a alternân-

cia dos estados físicos do material corresponde ao espaço de possíveis soluções do problema de otimização. A função objetivo do problema de otimização corresponde à energia livre do material. Uma solução ótima está associada com um cristal perfeito, sendo que um cristal com defeitos corresponde a uma solução mínima local. A analogia no entanto não é completa, pois no processo físico de *annealing* existe uma variável física (temperatura) que, adequadamente controlada, garante a formação de um cristal perfeito. Quando *SA* é usado como uma técnica de otimização, a “temperatura” torna-se simplesmente um parâmetro de controle a ser determinado de modo a se conseguir os resultados desejados.

O método proposto por Metropolis é baseado na técnica de Monte Carlo. O processo é basicamente o seguinte: a cada passo do algoritmo, primeiramente uma molécula é escolhida de forma aleatória; um movimento aleatório (uma pequena perturbação) para a molécula é determinado; se o movimento leva a um estado com decréscimo de energia livre, então o movimento é aceito, caso contrário, se leva a um estado com aumento de energia livre, então esse movimento pode ser aceito com uma certa probabilidade.

3.1 O algoritmo de Metropolis

A idéia original do algoritmo de *SA* está baseada no algoritmo de Metropolis que simula o comportamento de um grupo muito grande de moléculas de um material, através da simulação de Monte Carlo. Em um material, as moléculas têm diferentes níveis de energia de acordo com uma certa distribuição estatística. O nível de energia mais baixo possível, conhecido como nível fundamental, corresponde ao estado onde todas as moléculas permanecem imóveis, e ocorre a 0 K (ou -273° C). Para temperaturas acima desse nível, as moléculas ocuparão diferentes níveis de energia. A distribuição das moléculas nos vários níveis varia com a temperatura. Para $T = 0$ K, por exemplo, todas as moléculas estão no nível fundamental, com o aumento da temperatura mais moléculas serão encontradas em níveis diferentes de energia, mantendo uma distribuição decrescente. O algoritmo de Metropolis gera uma sequência de estados de um material da forma descrita a seguir. Dado um material sólido em um estado S_i , com energia E_i , o próximo estado S_j é gerado por um mecanismo de transição que consiste de uma pequena perturbação do estado original, obtido pelo movimento de uma das moléculas do material. A energia do estado resultante é E_j . Se a diferença $E_j - E_i$ é menor ou igual a zero, o novo estado S_j é aceito, caso contrário o novo estado é aceito com a seguinte probabilidade:

$$e^{\left\{\frac{E_i - E_j}{K_b T}\right\}} \quad (3.1)$$

onde T é a temperatura do material e K_b é a constante de *Boltzmann*.

O critério de aceitação é também conhecido como critério de Metropolis. Assume-se haver uma taxa de variação da temperatura (programa de resfriamento) tal que o equilíbrio termodinâmico é alcançado a cada nível de temperatura, antes de haver um movimento para o próximo nível. Isso normalmente requer um grande número de transições de estado do algoritmo de Metropolis. O condição de equilíbrio térmico é tal que a probabilidade do material sólido

estar em um estado S_i , com energia E_i é dado pela distribuição de *Boltzmann*:

$$P_T\{X = i\} = \frac{1}{Z(T)} e^{\left(\frac{-E_i}{K_b T}\right)} \quad (3.2)$$

onde X é uma variável estocástica que corresponde ao estado atual do sólido, $Z(T) = \sum_j e^{\left(\frac{-E_j}{K_b T}\right)}$ é um fator de normalização (fator de participação), K_B é a constante de *Boltzmann* e $e^{\left(\frac{-E_i}{K_b T}\right)}$ é conhecido como fator de *Boltzmann*.

3.2 Algoritmo de *Simulated Annealing*

Para um problema de otimização combinatorial ser resolvido através de *SA* a formulação é a seguinte. Seja G um conjunto de configurações finito mas provavelmente muito grande e v o custo associado a cada configuração de G . A solução para o problema combinatorial consiste na busca por um par (G_i, v_i) no espaço de configurações que apresente o menor custo. O algoritmo inicia com uma configuração G_0 e a temperatura inicial $T = T_0$. Em seguida é gerado um certo número de configurações candidatas. A temperatura é então reduzida e o número de passos realizados a cada temperatura é determinado e o processo é repetido. A configuração candidata é aceita se o custo é menor do que a configuração corrente. Se o custo da configuração candidata é maior que o custo da configuração corrente essa configuração pode ser aceita com uma certa probabilidade. A característica do algoritmo de aceitar configurações que aumentem o custo, permite que o algoritmo escape de mínimos locais. Todo o processo é controlado por um programa de resfriamento que determina o quanto a temperatura decresce durante o processo de otimização.

A Figura 3.1 mostra o algoritmo *SA* que consiste de dois mecanismos básicos: a geração de alternativas e uma regra de aceitação. T_k é o parâmetro de controle que corresponde à temperatura no processo físico de *annealing* e N_k é o número de alternativas geradas no k -ésimo nível de temperatura (que corresponde ao tempo que o sistema permanece em um dado nível de temperatura, que pode ser grande pois corresponde ao tempo que se demora para chegar ao equilíbrio térmico). Inicialmente, quando T é grande, pode ocorrer uma grande deterioração da função objetivo. Com o decréscimo da temperatura o algoritmo passa a aceitar cada vez menos configurações que deteriore a função objetivo.

Uma solução vizinha S_j da configuração corrente (S_i) com custo $f(S_j)$ é gerada por um mecanismo de transição. A seguinte probabilidade é calculada no teste de aceitação:

$$P_T\{\text{aceitar}_j\} = \begin{cases} 1 & ; \text{se } f(j) \leq f(i) \\ e^{\left(\frac{f(i)-f(j)}{T}\right)} & ; \text{se } f(j) > f(i) \end{cases}$$

Simulated Annealing;
inicia
inicializar (T_0, N_0) ;
 $k = 0$;
configuração inicial S_i
repetir o procedimento
do $L = 1$ **to** N_k
gerar $(S_j$ **de** $S_i)$;
se $f(j) \leq f(i)$ **faça** $S_i = S_j$;
caso contrário
se $\exp\left(\frac{f(i)-f(j)}{T_k}\right) > \text{random}[0, 1]$ **faça** $S_i = S_j$;
end do;
 $k = k + 1$;
Cálculo do comprimento de (N_k) ;
Determinar o parâmetro de controle (T_k) ;
Critério de parada
termina;

Figura 3.1: Algoritmo *Annealing* (Aarts & Korst [47])

3.3 Programa de resfriamento

O programa de resfriamento é a estratégia usada desde o início até a convergência do algoritmo e é composto pelos seguintes parâmetros:

- Temperatura inicial T_0 ;
- Temperatura final T_f ;
- Número de transições, N_k a uma temperatura T_k ;
- Taxa de alteração da temperatura, $T_{k+1} = g(T_k) \cdot T_k$.

A eficiência do algoritmo representada pela qualidade das soluções e também no número máximo de iterações depende da escolha correta desses parâmetros. O procedimento usado para o cálculo dos parâmetros está baseado na idéia do equilíbrio térmico e será detalhada a seguir.

3.3.1 Determinação da temperatura inicial, T_o

Existem diversas maneiras de se determinar a temperatura inicial T_o . Uma alternativa consiste na execução de um processo experimental construtivo que simula o primeiro nível de temperatura do algoritmo. Em [47] é proposto a seguinte fórmula:

$$T_o = \frac{\overline{\Delta V}^+}{\ln\left(\frac{m_2}{m_2 X_o - m_1(1 - X_o)}\right)} \quad (3.3)$$

onde X_o é especificado e os outros parâmetros são determinados dos resultados de m_o tentativas; m_1 e m_2 , em que $m_o = m_1 + m_2$, correspondem ao número de tentativas de transição que reduzem e aumentam os custos respectivamente. Na literatura é comum usar o valor $X_o = 0,85$, o que significa que na temperatura inicial 85% dos movimentos são aceitos.

Uma alternativa para a determinação de T_o é proposta em [48]:

$$T_o = \frac{\mu}{-Ln\phi} f(x^o) \quad (3.4)$$

onde assume-se que ϕ % dos movimentos são aceitos na temperatura inicial T_o .

3.3.2 Determinação de N_k

O número de movimentos realizados a cada temperatura deve ser tal que a condição de quase equilíbrio térmico seja conseguida. Assim o valor desse parâmetro está ligado com a taxa de redução da temperatura. Muitos algoritmos usam um valor de N_k que depende do tamanho do problema (número de variáveis de decisão). Duas das propostas que são encontradas na literatura são:

- N_k constante:

$$N_{k+1} = N_o$$

- N_k variável: $\rho \geq 1,0$

$$N_{k+1} = \rho N_k$$

onde N_o é o número de movimentos na temperatura inicial e ρ é um parâmetro suplementar.

3.3.3 Determinação da taxa de resfriamento

Existem várias maneiras de determinar a taxa de resfriamento em *SA*. Todos os métodos no entanto são baseados no fato de que o equilíbrio térmico tem de ser alcançado antes da temperatura ser reduzida. Três alternativas para o cálculo de T_{k+1} são mostradas a seguir:

- Taxa de resfriamento constante: $\beta \in [0,50; 0,99]$

$$T_{k+1} = \beta T_k \quad (3.5)$$

- Taxa de resfriamento variável: $\delta \in [0,01; 0,20]$

$$T_{k+1} = \frac{T_k}{\left[1 + \frac{\ln(1+\delta)T_k}{3\sigma(T_k)}\right]} \quad (3.6)$$

onde $\rho(T_k)$ é o desvio padrão dos custos da configuração gerada a uma temperatura T_k .

- Taxa de resfriamento variável: $\lambda \leq 1,0$

$$T_{k+1} = \frac{T_k}{\exp\left(\frac{\lambda T_k}{\sigma(T_k)}\right)} \quad (3.7)$$

O desempenho dos vários programas de resfriamento é altamente dependente do problema a ser resolvido.

3.3.4 Critério de Parada

O critério de parada pode variar muito em nível de complexidade e sofisticação. Critérios pré-definidos e adaptativos são sugeridos na literatura. Alguns das estratégias mais empregadas são:

- Definir um número constante de reduções de temperatura (normalmente entre 6 e 50);
- Usar a taxa de melhoria da função objetivo para definir o critério de parada. Assim se o custo da solução incumbente¹ ou o custo da melhor solução encontrada não melhorar após um certo número de reduções de temperatura, assume-se que a convergência foi alcançada e o processo termina;
- Definir um número de movimentos que melhorem a função objetivo. O processo termina se o número de soluções aceitas for menor que um número especificado.

¹Melhor solução encontrada até o momento.

Capítulo 4

Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

4.1 Revisão bibliográfica

A reconfiguração de um sistema de distribuição consiste na alteração da topologia da rede mediante manobras de chaves, de forma a atingir determinado objetivo, mantendo a estrutura radial do sistema.

Principalmente devido problemas inerentes à coordenação de sistemas de proteção e minimização de custos, os sistemas de distribuição são projetados para operarem de forma radial.

A maioria dos sistemas de distribuição dispõe de chaves localizadas em alguns locais estratégicos, que permitem a alteração da topologia da rede quando necessário. Essas chaves permitem que se realizem manobras de forma a isolar um setor defeituoso, ou então para efetuar transferência de carga entre os alimentadores, de modo a tentar diminuir as perdas de potência ativa do sistema ou aliviar um alimentador sobrecarregado. De forma geral, as concessionárias de energia elétrica utilizam o sistema de chaves para remanejamento de cargas, ou isolamento de um determinado setor defeituoso, de forma a minimizar os efeitos para o consumidor. Dessa forma, o sistema de chaves pode ser utilizado para melhorar o desempenho do sistema de distribuição, diminuindo as perdas de potência ativa, tendo como consequência direta a melhoria do nível de carregamento da rede e o perfil de tensão, o que é um benefício bastante interessante pois pode inclusive postergar investimentos em obras de melhorias no sistema.

Dependendo do número de chaves presentes no sistema, o número de operações possíveis, cresce de maneira notável, caracterizando uma explosão combinatorial. Consequentemente, as mais diversas técnicas de solução foram empregadas para a resolução do problema, e, nos últimos anos os algoritmos heurísticos e meta heurísticos vêm sendo cada vez mais empregados. A formulação do problema para a minimização de perdas pode ser escrita como [17]:

$$\begin{aligned}
\min f &= \sum_{j=1}^{N_R} R_j I_j^2 & (4.1) \\
\text{s.a.} & V_{min} \leq |V_i| \leq V_{max} \\
& 0 \leq |I_j| \leq I_{jmax} \\
& g(x) = 0
\end{aligned}$$

onde N_R representa o número de ramos do sistema, R_j é a resistência do ramo j , I_j e I_{jmax} representam o fluxo e fluxo máximo de corrente pelo ramo j , V_{min} e V_{max} são os limites de magnitude de tensão e $g(x)$ representa as equações de fluxo de carga. Adicionalmente, a topologia do sistema deve ser sempre radial e não apresentar ilhamento de barra.

Diversas publicações tem tratado o assunto da reconfiguração, utilizando-se de diversas técnicas. Os algoritmos heurísticos e mais recentemente a aplicação de métodos de inteligência artificial e computação evolutiva tem contribuído para a resolução do problema de forma cada vez mais eficiente.

Em [5] é feita uma estimativa da variação de perdas de potência ativa quando da transferência de cargas de um alimentador para outro. É utilizada uma fórmula simples para os cálculos e verifica-se que, para obter redução de perdas, deve haver uma diferença significativa de tensão entre as chaves e se as cargas são transferidas para o outro alimentador. Através desse método consegue-se eliminar um grande número de operações indesejáveis, diminuindo o esforço computacional do algoritmo.

Em [6] a minimização de perdas de potência ativa é conseguida utilizando-se um índice de sensibilidade denominado padrão de fluxo ótimo, que consiste em calcular os fluxos de corrente em um ramo, desconsiderando as componentes reativas da linha. A chave que deve ser aberta é aquela pertencente ao ramo em que o fluxo é mínimo. O algoritmo inicia fechando todas as chaves de interconexão e, através do PFO (padrão de fluxo ótimo), as mesmas são abertas de modo a tornar a rede novamente radial. O algoritmo é eficiente e consegue encontrar soluções de boa qualidade.

Em [7] a minimização de perdas de potência ativa e balanceamento de cargas entre alimentadores são realizados através de uma técnica de troca de ramos que consiste na seleção, dentre todas as possíveis configurações, daquela que apresenta a melhor função objetivo. É utilizado um índice de ganho para classificar as topologias e em função desse índice, uma das configurações é escolhida para reiniciar o processo. São apresentadas no artigo duas metodologias de fluxo de carga: o *Simplified DistFlow Method* e o *Backward and Forward Update of Distflow Power Flow Update*.

Outra proposta para minimização de perdas de potência ativa é apresentada em [8]. É também utilizado o conceito de padrão de fluxo ótimo, mas apenas em um laço de cada vez. Assim, ao invés de se iniciar fechando todas as chaves da rede, o algoritmo fecha apenas uma chave de cada vez e abre a mesma chave ou outra pertencente ao laço de forma a tornar a rede novamente radial. O algoritmo consegue encontrar soluções de melhor qualidade que [6] e

destaca-se pela simplicidade de implementação e baixo esforço computacional.

Uma proposta baseada em AGs com modificações é proposto em [49], em que uma nova forma de cruzamento evita a geração de configurações não radiais. Os resultados conseguidos são muito bons para os sistemas testados.

A redução de perdas de potência ativa para um sistema trifásico é proposta em [9] utilizando-se *SA*. O método consiste em simular o resfriamento lento de um metal de modo que o sistema busque um ponto de equilíbrio caracterizado por uma estrutura ordenada e estável. As variáveis do projeto são perturbadas aleatoriamente e armazena-se o melhor valor da função objetivo a cada perturbação. A temperatura é então reduzida (*annealing*) e novas tentativas executadas. Este procedimento continua até que se escape de um mínimo local. Ao final do processo é possível que se obtenha um mínimo global [50].

Em [19] as contingências na rede são levadas em conta, além da reconfiguração. O método proposto integra programação multiobjetivo fuzzy e um algoritmo genético para realizar a otimização de sistemas de distribuição. Os objetivos a serem alcançados nesse caso são minimização de perdas de potência ativa e queda de tensão nas barras.

Em [51] é utilizada uma proposta de codificação onde as chaves presentes no sistema são representadas por uma função contínua. Nessa abordagem, inicialmente todas as chaves são consideradas fechadas e, após feita uma análise do padrão de fluxo ótimo (OPF) uma heurística determina qual laço será desfeito através de uma abertura de chave. O processo se repete até que não reste nenhum laço no sistema.

Em [52] é proposto um algoritmo de programação dinâmica para otimizar sistemas de distribuição com relação à perdas de potência ativa, dessa vez levando em conta a variação da demanda. Nessa proposta a reconfiguração é realizada de hora em hora, obedecendo a curvas de carga aproximadas. Uma das conclusões interessantes do trabalho é que a reconfiguração efetuada dessa forma não é tão efetiva quanto àquela realizada considerando uma demanda média, ou mesmo reconfigurando a rede sob a condição de demanda máxima.

Um algoritmo evolutivo com operadores especiais, projetados para aumentar o desempenho geral em sistemas de grande porte é apresentado em [53]. A representação adotada é baseada em cadeias de grafos. O algoritmo é utilizado para resolver problemas de reconfiguração, planejamento e restauração de redes de distribuição.

Em [54] é proposta uma metodologia para melhorar o desempenho dos AGs aplicados ao problema de minimização de perdas de potência ativa. A idéia é diminuir o espaço de busca alterando o processo de cruzamento e utilizando uma mutação direcionada. As modificações propostas diminuem o consumo de memória e o esforço computacional para a resolução do problema. Um sistema de representação simplificado é adotado, onde somente as chaves abertas são consideradas.

Uma proposta baseada em AGs é apresentada em [55] para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição sob diversas condições de carregamento. A população inicial é gerada de forma aleatória utilizando o algoritmo de *Kruskal* (ver apêndice A). O sistema de cruzamento é aplicado de forma a preservar a informação genética dos anteces-

sores e tem como principal característica a geração de configurações factíveis sob o ponto de vista da radialidade das configurações. São realizadas diversas análises do comportamento do algoritmo para diversos parâmetros de controle.

Observa-se que diversos tipos de técnicas têm sido empregadas para a resolução do problema de reconfiguração, sendo que a escolha da metodologia a ser empregada depende da relação custo-benefício, recursos computacionais e outros fatores. Nesse trabalho de pesquisa foi utilizado uma proposta baseada em AGs para resolver o problema da reconfiguração. Foram desenvolvidos operadores de cruzamento e mutação especiais, de forma evitar a geração de configurações infactíveis sob o ponto de vista da radialidade, diminuindo assim o esforço computacional exigido.

4.2 Algoritmo Genético Dedicado à Resolução do Problema de Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Conforme já exposto, várias propostas de otimização aplicadas a sistemas de distribuição de energia elétrica utilizam os AGs como principais ferramentas computacionais. Os AGs têm se mostrado ferramentas bastante robustas de otimização, além dos seus desenvolvimentos serem relativamente simples. No entanto, para aplicações na área de engenharia, os algoritmos devem, além da robustez, apresentar soluções de boa qualidade a um custo computacional aceitável. Para conseguir tal intento, é necessário codificar e representar adequadamente o problema a ser estudado. Nesse trabalho foi desenvolvida uma nova metodologia de representação do indivíduo, de forma a tirar proveito do conhecimento das características de sistemas de distribuição e também contornar o problema da geração de configurações infactíveis no tocante à radialidade da rede. O AG desenvolvido utiliza uma heurística de geração da população inicial baseado em análise de laços, gerando indivíduos de boa qualidade e sempre factíveis no tocante à condição de radialidade. A adoção de uma heurística para a geração da população inicial, tem ainda como vantagem a diminuição do esforço computacional necessário para a execução do algoritmo. Na Figura 4.1 é apresentado um sistema exemplo muito simples com 5 barras, 4 ramos e duas chaves de interconexão. O sistema de representação adotado nesse trabalho leva em conta as chaves normalmente abertas no sistema, capacitores fixos e automáticos e também os *taps* do transformador da subestação conforme mostrado na Figura 4.2.

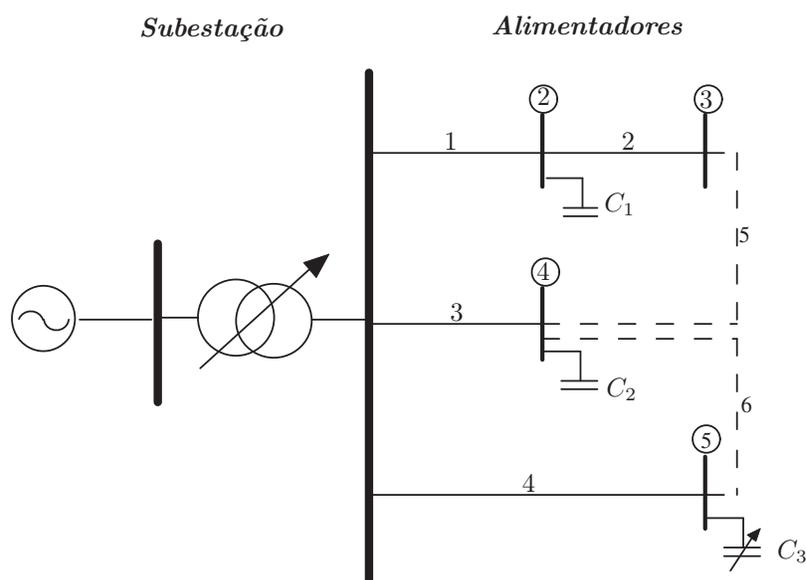


Figura 4.1: Sistema de 5 barras

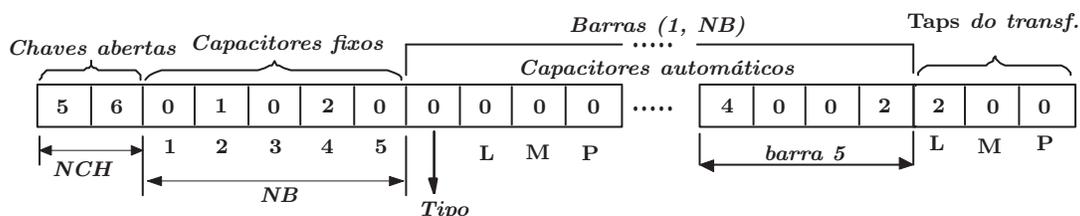


Figura 4.2: Representação do indivíduo.

Na primeira parte do indivíduo são representadas as chaves abertas, sendo que os números 5 e 6 indicam que as chaves 5 e 6 estão abertas e todas as outras estão fechadas. Supõe-se que exista uma chave em cada ramo da rede. Na segunda parte do indivíduo estão representadas as informações a respeito dos capacitores fixos. Portanto, 5 posições são necessárias para representar a alocação dos capacitores fixos nas 5 barras da rede. Assim, tem-se 5 posições em que cada barra candidata à alocação pode receber bancos de capacitores fixos de: **(1)** 300 kVar, **(2)** 600 kVar, **(3)** 900 kVar ou **(4)** 1200 kVar. Para os capacitores automáticos é considerado ainda um banco adicional de 1800 kVar **(5)**. Pelo exemplo percebe-se que foi alocado um banco fixo de 300 kVar na barra 2, um banco fixo de 600 kVar na barra 4 e um banco automático de 1200 kVar na barra 5. Na terceira parte do indivíduo são armazenadas as informações sobre os capacitores automáticos. A posição denominada “tipo”, armazena a capacidade do capacitor seguindo o mesmo critério adotado para os capacitores fixos. Nas três posições seguintes são armazenadas as informações referentes aos *taps* dos capacitores automáticos, que podem variar de acordo com o carregamento da rede. Assim, para o exemplo

verifica-se que o banco automático do tipo (4) (1200 kVAr) instalado na barra 5 está com o *tap* ajustado em (2) (600 kVAr) para o nível de carregamento P (pesado). Nesse trabalho pode-se alocar os *taps* dos capacitores automáticos nos níveis leve (L), médio (M) e pesado (P). Na quarta parte do indivíduo são armazenadas as informações correspondentes aos *taps* do transformador da subestação, que podem ter valores diferentes para os carregamentos leve, médio e pesado. Para o armazenamento dessas informações é necessário um indivíduo com a dimensão $5NB+NCH+3$ ¹

Para um primeiro estudo considerando somente reconfiguração, apenas a primeira parte do indivíduo será utilizada, considerando que não existem capacitores instalados e que o alimentador está ajustado para uma tensão fixa de 1 pu. Após um estudo feito dessa maneira, será considerada a liberação das manobras dos *taps* do transformador em conjunto com a reconfiguração, de forma a conseguir uma melhoria no perfil de tensão da rede.

4.2.1 Função de avaliação

A avaliação das soluções candidatas é realizada através de um função denominada função de avaliação ou função de adaptação. Nesse trabalho são utilizados fatores de penalização de modo a atender as restrições de limite de tensão nas barras e fluxo de corrente nos ramos. A equação 4.1 permite minimizar as perdas de um sistema de distribuição considerando uma demanda fixa pré-estabelecida. Nesse caso, o valor obtido é sempre o valor das perdas em kW. De modo a compatibilizar o cálculo das perdas para os três níveis de carga adotados, será minimizada uma função que representa o custo das perdas em cada um dos níveis de carga.

A função de avaliação pode ser formulada matematicamente como [55]:

$$FOB = K_e \sum_{i=0}^{nt} T_i \sum_{j=1}^{N_R} R_j I_j^2 + K_1 \sum_{j=1}^{n_{cf}} C f_j + K_2 \sum_{j=1}^{n_{ca}} C a_j + \omega_1 K_3 \sum_{n=0}^{nt} \sum_{j=1}^{nb} \Delta V_j^n + \omega_2 K_4 \sum_{n=0}^{nt} \sum_{i=1}^{nr} \Delta I r_i^n, \quad (4.2)$$

onde

$$\Delta V_j^n = \begin{cases} 0 & V_{min} \leq V_j \leq V_{max} \\ (V_j - V_{max})^2 & V_j > V_{max} \\ (V_j - V_{min})^2 & V_j < V_{min} \end{cases} \quad (4.3)$$

e

$$I r_i^n = \begin{cases} 0 & |I_i| \leq I_{max,i} \\ |I_i| - I_{max,i} & |I_i| > I_{max,i} \end{cases} \quad (4.4)$$

¹Onde NB representa o número de barras da rede e NCH o número de chaves abertas.

Define-se

- K_e : custo unitário da energia elétrica em $\$/\text{kWh}$;
- T_i : tempo de permanência em cada perfil de carga considerado (em horas);
- R_j : resistência do ramo j ;
- I_j : corrente pelo ramo j ;
- K_1 : valor em $\$/\text{kVAr}$ para cálculo do custo do banco de capacitor fixo;
- K_2 : valor em $\$/\text{kVAr}$ para cálculo do custo do banco de capacitor automático;
- K_3 : valor em $\$/\text{V}$ para cálculo do custo dos desvios de tensão;
- K_4 : valor em $\$/\text{A}$ para cálculo do custo dos desvios de corrente;
- ω_1 : coeficiente de ponderação para os desvio de tensão;
- ω_2 : coeficiente de ponderação para os desvio de corrente;
- C_f : capacitores fixos alocados em kVAr ;
- C_a : capacitores automáticos alocados em kVAr ;
- n_{cf} : quantidade de capacitores fixos alocados na rede;
- n_{ca} : quantidade de capacitores automáticos alocados na rede;
- V_{max} : limite máximo de tensão nas barras da configuração k ;
- V_{min} : limite mínimo de tensão nas barras da configuração k ;
- I_i : corrente do ramo i na configuração k ;
- I_{max_i} : limite de corrente do ramo i na configuração k ;
- N_R : número de ramos da rede;
- nb : número de barras da rede;
- nt : número de perfis de carga adotados.

Neste capítulo apenas a reconfiguração será realizada, portanto, os custos com capacitores fixos e automáticos são iguais a zero, e o problema resume-se em encontrar a configuração com menor custo em $\$$ considerando-se apenas o valor das perdas de potência ativa, custo da energia elétrica e o tempo de permanência em cada perfil de carga. Neste trabalho, adotou-se $K_3 = 1$, $K_4 = 1$, $\omega_1 = 1$ e $\omega_2 = 0$. A definição de ω_2 deveu-se ao fato de que, atualmente, as redes de distribuição possuem uma estrutura física tal que as restrições relativas a correntes em ramos dificilmente são violadas. Ressalta-se que a sua exclusão (adotando $\omega_2 = 0$) é trivial.

A função de adaptação é calculada a partir de soluções de fluxos de carga e é um dos principais problemas em relação a esforço computacional. O apêndice B apresenta os modelos de fluxo de carga utilizados nesse trabalho.

4.2.2 Geração da população inicial

Os AGs são algoritmos populacionais, ou seja trabalham com um conjunto de indivíduos que representam as possíveis soluções para o problema abordado. Para os AGs convencionais, que utilizam codificação binária, normalmente a população inicial é gerada de forma aleatória. Esse método proporciona boa diversidade populacional mas não pode ser aplicado diretamente ao problema de reconfiguração principalmente devido à exigência da topologia radial das configurações geradas. Além da possibilidade da geração de configurações infactíveis, pode ocorrer a geração de um grande número de configurações que, embora radiais, apresentem qualidade muito baixa. Isso pode retardar de forma pronunciada a convergência do algoritmo, aumentando desnecessariamente o esforço computacional e inviabilizando-o para aplicações em redes de maior porte.

Outro problema inerente aos AGs é a definição do tamanho da população inicial. Se a população for muito grande, corre-se o risco de não conseguir a convergência em tempo computacional aceitável, e se for pequena demais pode-se incorrer no que se chama “convergência prematura”, que leva o algoritmo a perder diversidade e convergir para um ótimo local. Uma característica importante que os AGs devem ter é uma boa diversidade populacional, portanto o ideal seria uma implementação com uma população média e bem diversificada.

Para o problema da reconfiguração foi desenvolvido um algoritmo heurístico que trabalha com o princípio dos laços formados em um sistema radial quando uma chave normalmente aberta (NA) é fechada.

A Figura 4.3 ilustra os laços que podem ser formados com o fechamento das chaves 5 e 6.

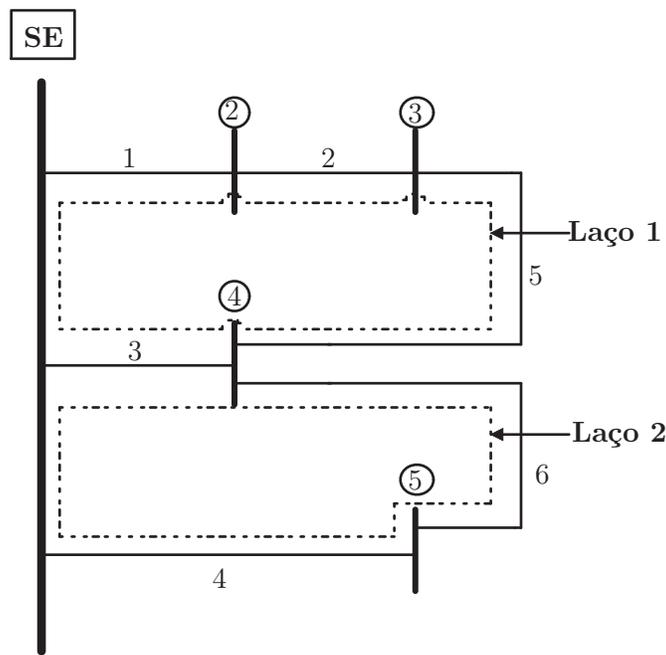


Figura 4.3: Loops para a rede de 5 barras

Para o sistema de 5 barras mostrado na Figura 4.1 por exemplo, percebe-se que as chaves 5 e 6 estão abertas na configuração base. Também observa-se que se for fechada por exemplo a chave 5, um laço é formado, sendo que as chaves 1, 2, 3 e 5 pertencem ao laço formado. Assim, para esse laço em particular, e considerando apenas a primeira parte do indivíduo, tem-se a possibilidade da geração de 4 configurações: [1 6], [2 6], [3 6] e [5 6]. Fechando-se a chave 6, as chaves 3, 4 e 6 são as chaves pertencentes ao laço formado. Assim temos a possibilidade das configurações [3 5], [4 5] e [6 5]. Dessa forma, tem-se a geração das seguintes configurações: [1 6], [2 6], [3 6], [3 5], [4 5] e [5 6]. Percebe-se que as configurações geradas são sempre radiais, resolvendo um dos problemas cruciais no desenvolvimento de AGs eficientes. Apesar do algoritmo desenvolvido gerar sempre configurações radiais, para sistemas de maior porte pode ocorrer a geração de um grande número de configurações de baixa qualidade, o que é inconveniente por conta do aumento do esforço computacional do algoritmo. Dessa forma no algoritmo desenvolvido, quando do fechamento do laço, a corrente por todos os ramos pertencentes ao laço formado é calculada, e assim tem-se um parâmetro para a classificação das soluções geradas. Assim, pode-se não utilizar todas as configurações geradas pelo algoritmo, mas apenas uma parte, as quais contêm as chaves percorridas pela menor corrente quando o laço é formado. A seguir é apresentado o algoritmo básico desenvolvido para a geração da população inicial. Deve-se observar que é analisado um laço por vez, sendo que após a análise de um determinado laço, e o armazenamento das opções de chaveamento geradas, deve-se voltar o laço à sua condição inicial e proceder a análise do próximo laço.

- (1) Ler os dados da rede;
- (2) Inicializar a população inicial (matriz \overline{VCH}) com zeros;
- (3) Fechar uma chave de interconexão formando um laço;
- (4) Armazenar os indivíduos formados através das “opções de chaveamento”² na matriz \overline{VCH} ;
- (5) Retornar a rede à sua condição inicial abrindo a chave de interconexão fechada no passo (3);
- (6) Repetir os passos (3) a (5) até que todos os possíveis laços sejam analisados;
- (7) Avaliar os indivíduos armazenados na matriz \overline{VCH} através da equação 4.2;
- (8) Fim.

A Figura 4.4 mostra a geração da população inicial para o sistema de 5 barras apresentado como exemplo.

²Denomina-se “opção de chaveamento” uma possível abertura de chave no laço formado de forma a retornar a rede à sua condição radial.

$$(1) \overline{VCH} = \left[\begin{array}{cc|ccccc} 1, & 00 & | & 00000 \\ 2, & 00 & | & 00000 \\ 3, & 00 & | & 00000 \\ 4, & 00 & | & 00000 \\ 5, & 00 & | & 00000 \end{array} \right]$$

(2) Fechar chave 5 → Laço 1

(3) Opções: [1 6], [2 6] e [3 6]

(4) Fechar chave 6 → Laço 2

(5) Opções: [3 5] e [4 5]

$$(6) \overline{VCH} = \left[\begin{array}{cc|ccccc} 1, & 16 & | & 00000 \\ 2, & 26 & | & 00000 \\ 3, & 36 & | & 00000 \\ 4, & 35 & | & 00000 \\ 5, & 45 & | & 00000 \end{array} \right]$$

(7) Avaliar os indivíduos 1 a 5 através da equação 4.2

Figura 4.4: Exemplo da aplicação do algoritmo

A Tabela 4.1 apresenta alguns resultados para a geração da população inicial do sistema de distribuição de 69 barras, cujos dados estão em [20] e no Apêndice C, e o diagrama unifilar na Figura C.1.

Tabela 4.1: Sistema de 69 barras - População inicial

Indivíduo Num.	Representação (Chaves abertas)	FOB (US\$) ³
1 - Caso base	70 71 72 73 74	146390,00
2	70 71 72 59 74	85741,23
3	70 71 72 56 74	85741,23
4	70 71 72 55 74	87126,76
5	70 71 72 53 74	89012,18

O pior indivíduo gerado (5) apresenta uma redução de 39,20% em relação ao caso base (rede com as chaves no estado original), o que mostra ser uma configuração promissora para o objetivo de reconfiguração do sistema de distribuição.

³Os valores da função objetivo (*FOB*) para esse exemplo foram calculados de acordo com a equação 4.2.

No algoritmo desenvolvido, existe também a possibilidade de classificar os ramos de acordo com a corrente após a formação do laço. Assim, se for desejado, é possível reduzir a quantidade de indivíduos da população, e trabalhar apenas com aqueles que apresentam maior probabilidade de gerar bons descendentes⁴.

4.2.3 Algoritmo de seleção

Após a geração da população inicial, alguns indivíduos dessa população são escolhidos, normalmente aos pares para, numa próxima etapa, serem submetidos ao processo de cruzamento. Parte das características genéticas dos indivíduos são trocadas, permitindo o surgimento de novos indivíduos (filhos), que podem ser melhores ou piores que os indivíduos que os geraram (pais). A seleção é fundamental para o bom funcionamento dos AGs, afetando diretamente a sua característica de convergência e também exercendo um importante papel no controle da pressão seletiva. O capítulo 2 mostra com detalhe o funcionamento dos operadores de seleção, suas vantagens e desvantagens. Para o algoritmo desenvolvido, foi adotado o operador de seleção por torneio, que promove um torneio entre grupos de indivíduos. Cada grupo é formado por dois indivíduos aleatoriamente tomados da população e o indivíduo com a melhor avaliação no grupo é selecionado. Neste método a pressão seletiva pode ser controlada através do número de grupos de torneio.

A seguir é apresentado o algoritmo simplificado de seleção por torneio desenvolvido. A cada jogo, dois indivíduos são escolhidos aleatoriamente da população e têm seus valores da função de avaliação calculados. Vence aquele que possuir a melhor avaliação.

- (1) Inicializar um vetor \bar{S} com zeros;
- (2) A partir da população inicial (\overline{VCH}) já obtida, Fazer:
 - (2a) Selecionar aleatoriamente dois indivíduos de \overline{VCH} ;
 - (2b) Armazenar no vetor \bar{S} o indivíduo com melhor avaliação⁵;
 - (2c) Repetir os passos (2a) a (2c) até atingir o número de jogos desejado;
- (3) Fim.

A posição do indivíduo vencedor em relação à população inicial é armazenado no vetor \bar{S} e um novo jogo é realizado. A quantidade de jogos disputados é determinado pelo valor de N que deve ser sempre par.

⁴Indivíduos formados abrindo a chave do laço na qual a corrente é mínima.

⁵No programa desenvolvido apenas a posição do indivíduo na matriz \overline{VCH} é armazenada em \bar{S} .

4.2.4 Algoritmo de cruzamento

O modelo de cruzamento adotado neste trabalho é o de dois pontos, onde os pontos de corte são definidos de forma determinística, como um parâmetro a ser definido antes da execução do algoritmo. O operador de cruzamento é responsável pela troca de material genético entre os indivíduos da população, sendo assim, responsável diretamente pelo sucesso ou fracasso de uma implementação baseada em AGs. Nos AGs convencionais ou “clássicos”, onde os indivíduos são codificados através de números binários, o cruzamento é normalmente realizado escolhendo-se aleatoriamente os pontos de corte. O cruzamento entre indivíduos pode ser diretamente, sem a preocupação de gerar indivíduos ineficazes, na maioria dos casos. No problema de reconfiguração, uma posição dentro do indivíduo representa uma chave que pode estar aberta ou fechada. Assim é fácil perceber que se os indivíduos forem cruzados de forma aleatória, poderá ser gerado um grande número de indivíduos ineficazes, o que com certeza degradará o desempenho dos AGs. Para evitar o problema mencionado, foi desenvolvido nesse trabalho um novo tipo de representação para o indivíduo, de forma a evitar o problema de geração de indivíduos ineficazes e também de forma a preservar as informações presentes nos indivíduos quando passados dos pais para os filhos.

O modelo de indivíduo mostrado na Figura 4.2 representa apenas as chaves abertas do sistema, sendo que todas as demais chaves estão fechadas. Para a realização do cruzamento, no entanto, é utilizado um modelo completo, onde todas as chaves são representadas.

A Figura 4.5 apresenta sistema de 14 barras [5], largamente conhecido na literatura. Observa-se que as chaves 14, 15 e 16 estão abertas na configuração inicial.

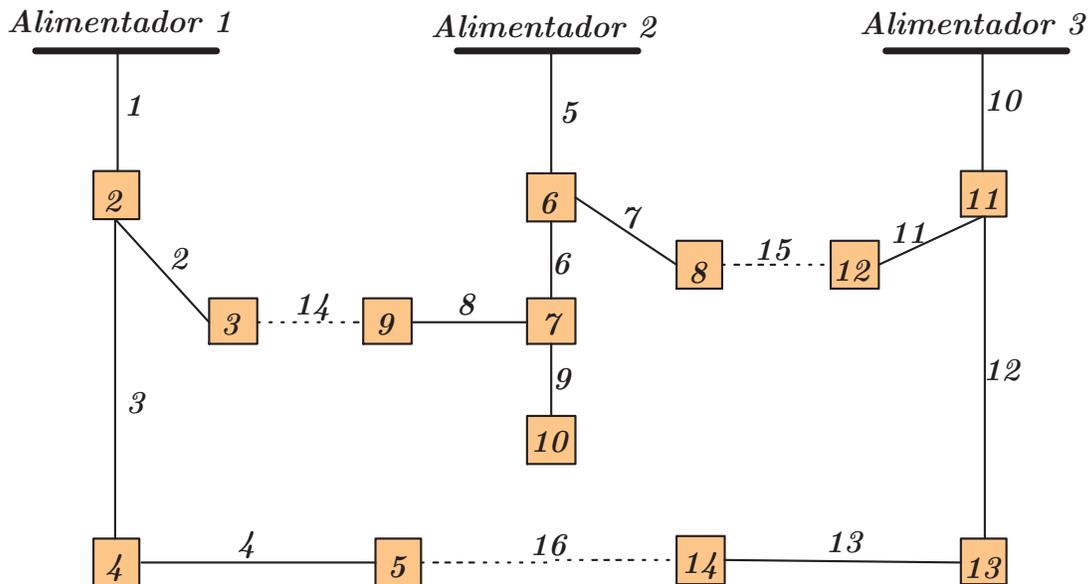


Figura 4.5: Sistema de 14 barras [5].

A Figura 4.6 apresenta a codificação utilizada para o indivíduo tendo a finalidade da

realização do cruzamento. A parte superior da figura apresenta a representação simplificada e a parte inferior, a codificação completa.

Codificação simplificada

$$ch = \begin{array}{c} \textit{pai 1} \\ \begin{array}{|c|c|c|} \hline 14 & 15 & 16 \\ \hline \end{array} \end{array}$$

$$ch = \begin{array}{c} \textit{pai 2} \\ \begin{array}{|c|c|c|} \hline 8 & 15 & 16 \\ \hline \end{array} \end{array}$$

Codificação completa

$$sch = \begin{array}{c} \textit{pai 1} \\ \begin{array}{cccccccccccccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 \\ \hline 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 99 & 99 & 99 \\ \hline \end{array} \end{array}$$

$$sch = \begin{array}{c} \textit{pai 2} \\ \begin{array}{cccccccccccccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 \\ \hline 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 99 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 99 & 99 \\ \hline \end{array} \end{array}$$

Figura 4.6: Representação do indivíduo

Na codificação completa as chaves fechadas são representadas por 1, e as chaves abertas são representadas por 99. A adoção desse sistema de representação é importante em função da utilização de um algoritmo gerador de árvore mínima [56] para a geração dos descendentes. O apêndice A apresenta de forma detalhada o funcionamento do algoritmo de *Kruskal*.

A Figura 4.7 mostra a operação de cruzamento realizada entre dois indivíduos da população. Para uma melhor visualização foi adotado como ponto inicial de corte (PIC) 50% e para o ponto final de corte 100%. Dessa forma, o cruzamento de 2 pontos se transforma em cruzamento de um único ponto. Nota-se facilmente que o filho 1 é infactível (geração de laço) e o filho 2 é infactível pois gerou uma rede desconexa.

	<i>Ponto de corte = 100 % (PFC)</i>																		
	<i>Ponto de corte = 50 % (PIC)</i>																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	<i>Avaliação</i>	
<i>pai 1</i>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	99	99	99	= 511,44
<i>pai 2</i>		1	1	1	1	1	1	1	99	1	1	1	1	1	1	99	99	= 493,15	
		↓																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
<i>filho 1</i>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	99	99	= ?	
<i>filho 2</i>		1	1	1	1	1	1	1	99	1	1	1	1	1	99	99	99	= ?	

Figura 4.7: Realização do cruzamento

A aplicação de um algoritmo gerador de árvore mínima para essas situações pode resolver o problema, e de forma adicional, preservar as informações contidas no indivíduo. Como os valores para as chaves abertas é muito maior que os das chaves fechadas, a tendência do algoritmo de *Kruskal* é gerar uma árvore mínima, mantendo sempre que possível os ramos com maior valor fora da árvore.

A Figura 4.8 apresenta a saída apresentada pelo algoritmo de *Kruskal* aos indivíduos infactíveis gerados.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	<i>Avaliação</i>
<i>filho 1</i>		1	99	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	99	99	= 676,63
<i>filho 2</i>		1	1	1	1	1	1	99	1	1	1	1	1	1	99	1	99	= 483,86

Figura 4.8: Indivíduos após a execução do algoritmo de *Kruskal*

A função de avaliação adotada nesse exemplo corresponde à perda de potência ativa do sistema. Assim, verifica-se que após a execução do algoritmo de *Kruskal* foram gerados dois filhos factíveis, sendo o filho 1 de pior qualidade e o filho 2 de melhor qualidade entre todos os indivíduos.

Verifica-se também que os indivíduos processados pelo algoritmo de *Kruskal*, guardam

semelhanças com as configurações ascendentes (pais) o que é uma característica desejável dos AGs. Isso pode ser explicado pela teoria dos blocos construtivos apresentada no Capítulo 2.

A seguir é ilustrado o algoritmo básico do operador de cruzamento desenvolvido neste trabalho.

- (1) Inicializar uma matriz auxiliar (VCH_H) com zeros;
- (2) Gerar um número aleatório (m) entre zero e um;
- (3) Se m for menor que PC_{ch} (Probabilidade de cruzamento para reconfiguração), Fazer:
 - (3a) Obter dois indivíduos de \overline{VCH} através dos índices armazenados em \overline{S} ;
 - (3b) Gerar dois novos indivíduos através de cruzamento utilizando a codificação completa mostrada na Figura 4.6;
 - (3c) Aplicar o algoritmo de *Kruskal* nos indivíduos obtidos;
 - (3d) Avaliar os indivíduos gerados através da equação 4.2;
 - (3e) Armazenar os indivíduos gerados na população auxiliar VCH_H ;
 - (3f) Repetir os passos (3a) a (3e) até que todos os pares de indivíduos indicados por \overline{S} tenham sido cruzados;
- (4) Fim.

A matriz $\overline{VCH_H}$ armazena os indivíduos da população auxiliar. Inicialmente obtém-se o valor de m , que corresponde a um número aleatório entre 0 e 1. Se m for menor que PC_{ch} , que corresponde ao valor percentual de cruzamento, então realiza-se o cruzamento. Toma-se dois indivíduos e gera-se os seus descendentes. O algoritmo de *Kruskal* é aplicado nos indivíduos obtidos. Os indivíduos gerados pelo algoritmo de *Kruskal* são armazenados em $\overline{VCH_H}$. O processo se repete até que todos os indivíduos indicados por \overline{S} tenham sido processados.

4.2.5 Algoritmo de mutação

O operador de mutação é muito importante durante o processo evolutivo. Depois de algum tempo, as soluções geradas pelos AGs tendem a perder diversidade, o que não é uma característica desejável, pois pode levar o algoritmo a uma convergência a um ponto de ótimo local. A mutação é bastante importante nesse sentido, pois com pequenas alterações nos indivíduos, é possível aumentar a diversidade da população.

Nos AGs convencionais, o operador de mutação consiste em simplesmente alterar um ou mais genes do indivíduo utilizando algum método aleatório. No entanto, o modelo de codificação adotado nesse trabalho não comportaria uma alteração aleatória de valores dos genes, o que poderia ocasionar infactibilidades nas configurações. Devido a esses fatores, foi desenvolvido um novo operador de mutação, evitando os problemas mencionados. O procedimento adotado é o seguinte:

- (1) Gerar um número aleatório N ;
- (2) Se $N \geq PM_{cf}$ ⁶, parar. Caso contrário, continue;
- (3) Selecionar um indivíduo A com melhor avaliação na matriz \overline{VCH}_H ;
- (4) Fechar aleatoriamente uma chave de A , formando um laço;
- (5) Calcular as correntes do laço e abrir a chave com a menor corrente, criando um novo indivíduo B ;
- (6) Se a avaliação de B for melhor que de A , salvar o indivíduo B em \overline{VCH}_H . Caso contrário, desprezar a mutação.

O algoritmo tem por objetivo tentar contornar um dos problemas da mutação nos processos naturais, onde quase sempre as alterações genéticas são degenerativas. Dessa forma o algoritmo desenvolvido aceita apenas mutações que tragam benefícios ao indivíduo.

4.2.6 Substituição da população

Após a execução dos operadores de cruzamento e mutação, temos na população intermediária \overline{VCH}_H novos indivíduos que, dependendo da sua avaliação, poderão passar para a próxima geração. Um procedimento simples compara as avaliações dos indivíduos de \overline{VCH}_H com as avaliações de \overline{VCH} , sendo substituídos os piores indivíduos desta última.

4.2.7 Algoritmo completo

O algoritmo completo proposto para a reconfiguração é apresentado na figura 4.9.

⁶Probabilidade de mutação para os capacitores fixos.

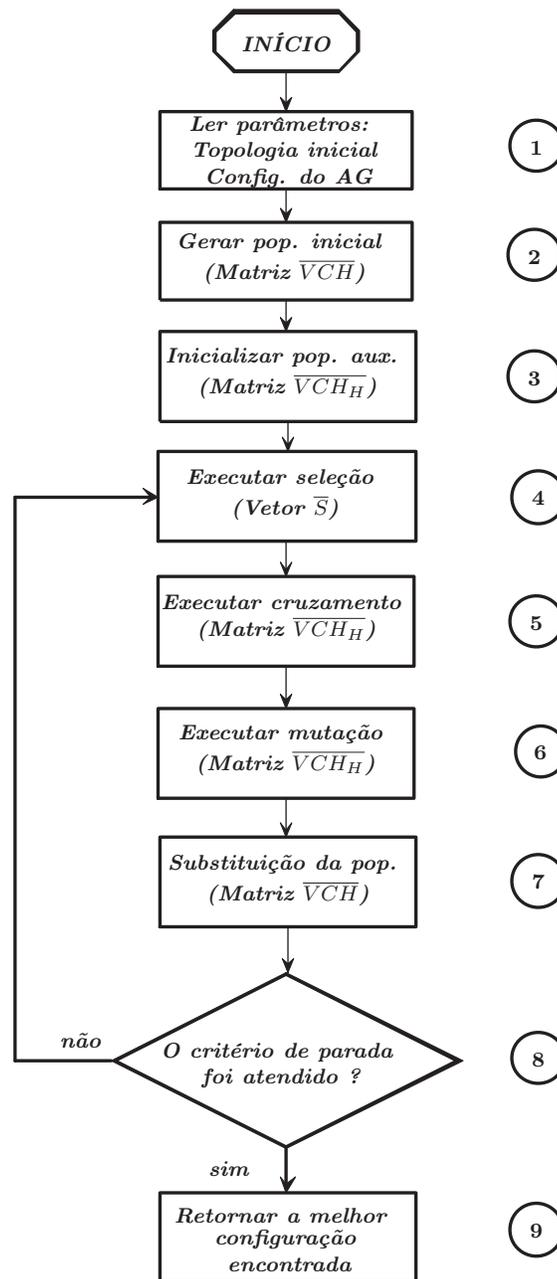


Figura 4.9: Algoritmo genético - reconfiguração.

Segue o detalhamento dos blocos da Figura 4.9.

1. Leitura da configuração inicial e parâmetros ajustados;
2. Inicializar as matrizes (\overline{VCH}) e (\overline{VCH}_H) vazias, para armazenar posteriormente a população inicial e auxiliar;
3. Gerar a população inicial e armazenar na matriz \overline{VCH} ;
4. Selecionar os pares de indivíduos que irão sofrer os processos de cruzamento e mutação. Armazena no vetor \overline{S} , os índices dos indivíduos selecionados da população inicial (\overline{VCH}) ;
5. Executa as operações de cruzamento nos pares selecionados e armazena em \overline{VCH}_H ;
6. Executa as operações de mutação (de acordo com pm) no melhor indivíduo da população auxiliar;
7. Substituir os piores indivíduos de \overline{VCH} pelos indivíduos de \overline{VCH}_H , somente se houver melhoria da avaliação. Retorna a matriz \overline{VCH} ;
8. O critério de parada adotado nesse trabalho baseia-se em um número predefinido de gerações;
9. Retorna a melhor configuração encontrada, tendo como opção retornar também as configurações encontradas durante o processo de busca.

O algoritmo foi desenvolvido na linguagem Fortran, apresentando excelente desempenho, sendo possível encontrar as mesmas soluções da literatura, inclusive com menores tempos computacionais.

Deve-se ressaltar que, até o momento, o algoritmo envolve apenas a primeira parte do indivíduo, dedicado apenas à reconfiguração. O algoritmo completo para realizar a reconfiguração e alocação de capacitores será apresentado adiante.

4.2.8 Resultados obtidos

A seguir serão apresentados os resultados obtidos com a aplicação do AG desenvolvido para a reconfiguração do sistema de distribuição de 69 barras [57]. Para fins de comparação considera-se a faixa de tensões [0,95 - 1,05] pu como aceitável⁷.

A Tabela 4.2 apresenta os valores da FOB e também das perdas de potência ativa para cada nível de carregamento da rede de 69 barras, quando o sistema está no caso base (sem manobra de chaves). Os valores utilizados para o cálculo da FOB são : $T_0 = 1000$, $T_1 = 6760$, $T_2 = 1000$, $S_0 = 0.5$, $S_1 = 1.0$, $S_2 = 1.8$, $K_e = 0.06$ \$/kWh. T_0 , T_1 e T_2 correspondem ao tempo

⁷A Resolução N° 505 da ANEEL [58] determina que a tensão mínima adequada para tensão nominal está entre 0,93 e 1,05 pu, no entanto, considera-se um mínimo de 0,95 pu para maior segurança.

de cada perfil de carga (horas), S_0 , S_1 e S_2 correspondem valor do carregamento para cada perfil de carga e K_e é o custo da energia elétrica em \$/kWh.

Tabela 4.2: Sistema de 69 barras: caso base

Configuração Inicial (Chaves abertas)	FOB [\$]
70 71 72 73 74	146390,00
Níveis de carga (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas [kW]
Leve	51,60
Médio	224,97
Pesado	867,25

A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos quando o sistema é otimizado através de reconfiguração, tendo por objetivo a minimização das perdas de potência ativa.

Tabela 4.3: Rede de 69 barras : reconfiguração

Configuração final (Chaves abertas)	FOB [\$]
15 56 62 70 71	62987,04
Níveis de carga (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas [kW]
Leve	23,72
Médio	99,62
Pesado	352,62

A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros ajustados no algoritmo.

Tabela 4.4: Parâmetros ajustados: sistema de 69 barras

População inicial	100
Num. gerações	300
Prob. mutação	6%
Probab. <i>cruzamento</i>	50%
Indiv. do torneio	2
Ponto inicial de corte	70%
Ponto final de corte	100%

A Figura 4.10 apresenta a evolução de convergência para o sistema de 69 barras. Nota-se que a convergência ocorre na geração 217.

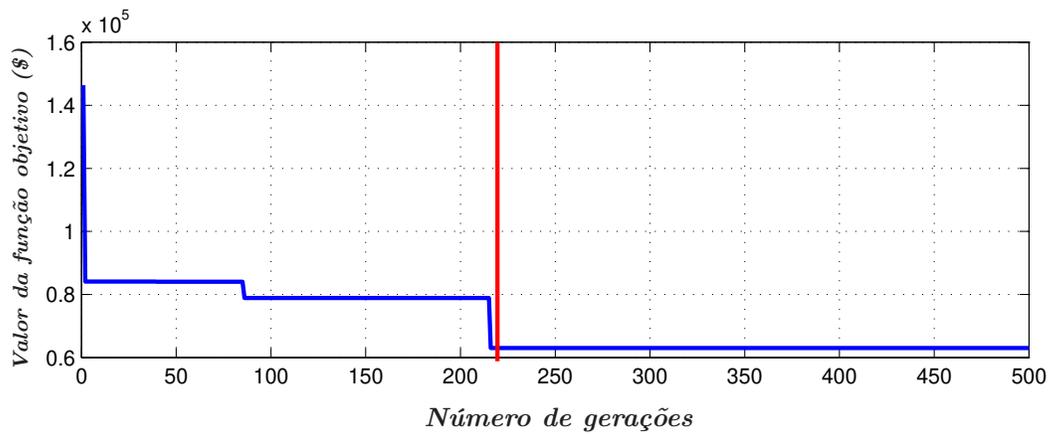


Figura 4.10: Convergência do AG: sistema de 69 barras.

A Figura 4.11 apresenta o estado inicial e final da rede. Observa-se que o perfil de tensão melhora após a reconfiguração, porém, a barra 62 apresenta tensão abaixo de 0,9 pu no carregamento pesado mesmo após a realização da reconfiguração.

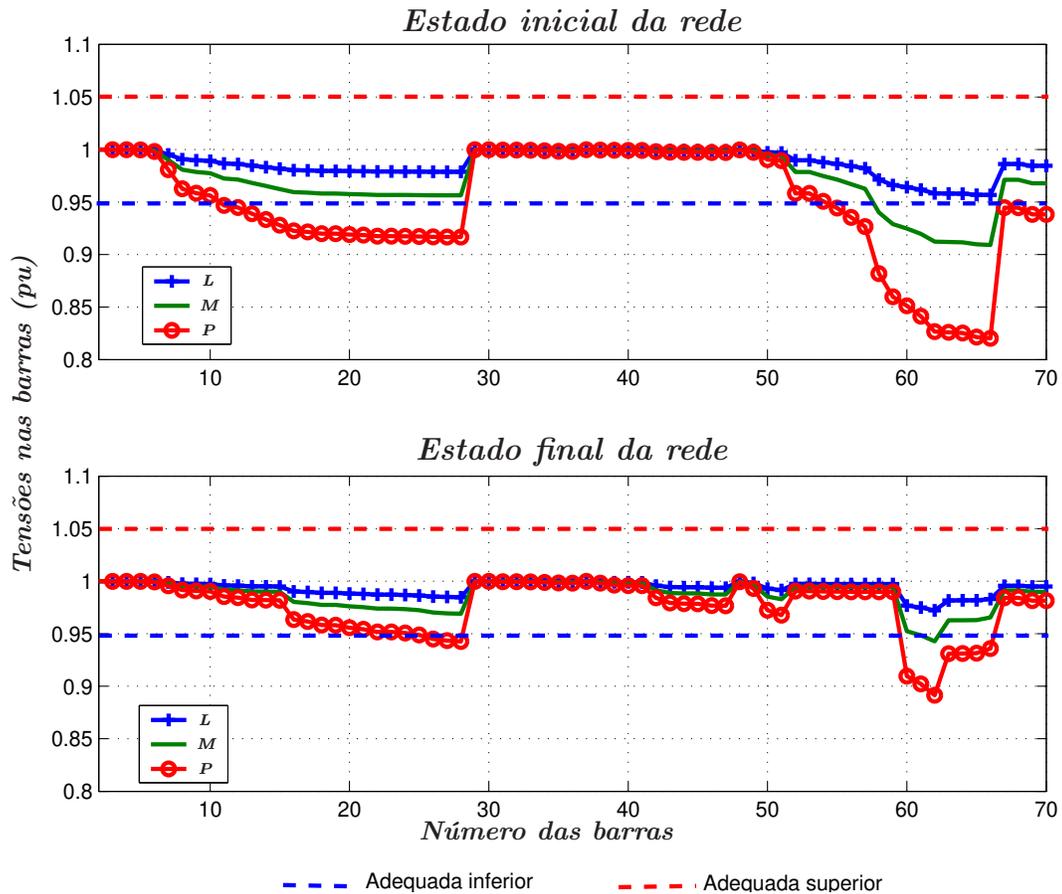


Figura 4.11: Estado da rede antes e após a reconfiguração.

A Tabela 4.5 apresenta os valores das tensões obtidas antes e após a reconfiguração da rede. Nota-se que para o caso da reconfiguração, aparecem problemas para o carregamento pesado, onde a barra 62 apresentou a tensão de 0,89 pu, tendo ficado abaixo do mínimo aceitável que é 0,95 pu. Também acontece uma pequena violação em carga média na barra 62 com um valor de 0,94 pu. O motivo disso é que o *tap* do transformador da subestação está fixado em 1,0 pu, e nesse modelo de reconfiguração o *tap* não faz parte da codificação do indivíduo, ficando fixo durante todo o processo iterativo.

Tabela 4.5: Menores tensões antes e após a reconfiguração

Barras com menor tensão (Caso base)					
Carregamento					
Leve		Médio		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
66	0,96	66	0,91	66	0,82
Barras com menor tensão (Rede reconfigurada)					
Carregamento					
Leve		Médio		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
62	0,97	62	0,94	62	0,89

Tentou-se reconfigurar a rede mudando a função objetivo de modo a melhorar ainda mais a regulação da tensão do sistema. A equação 1.2, mostrada no Capítulo 1, foi utilizada aqui. Um critério baseado na transferência de cargas entre alimentadores foi utilizado com a expectativa de minimizar as perdas de potência ativa e melhorar o perfil de tensão.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos após executar o algoritmo desenvolvido por 2000 gerações. Os demais parâmetros ajustados no algoritmo foram mantidos idênticos ao caso da reconfiguração para minimização de perdas de potência ativa.

Tabela 4.6: Rede de 69 barras: minimização de ΔV

Configuração final (Chaves abertas)	FOB [\$]
15 59 70 71 74	78863.90
Níveis de carga (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas [kW]
Leve	28,76
Médio	123,07
Pesado	453,64

Observa-se que houve um aumento do valor da função objetivo, e também das perdas de potência ativa em relação ao caso da reconfiguração para minimização de perdas.

A Figura 4.12 ilustra os perfis de tensão para os três níveis de carga adotados, antes e após a reconfiguração tendo por objetivo a minimização de ΔV .

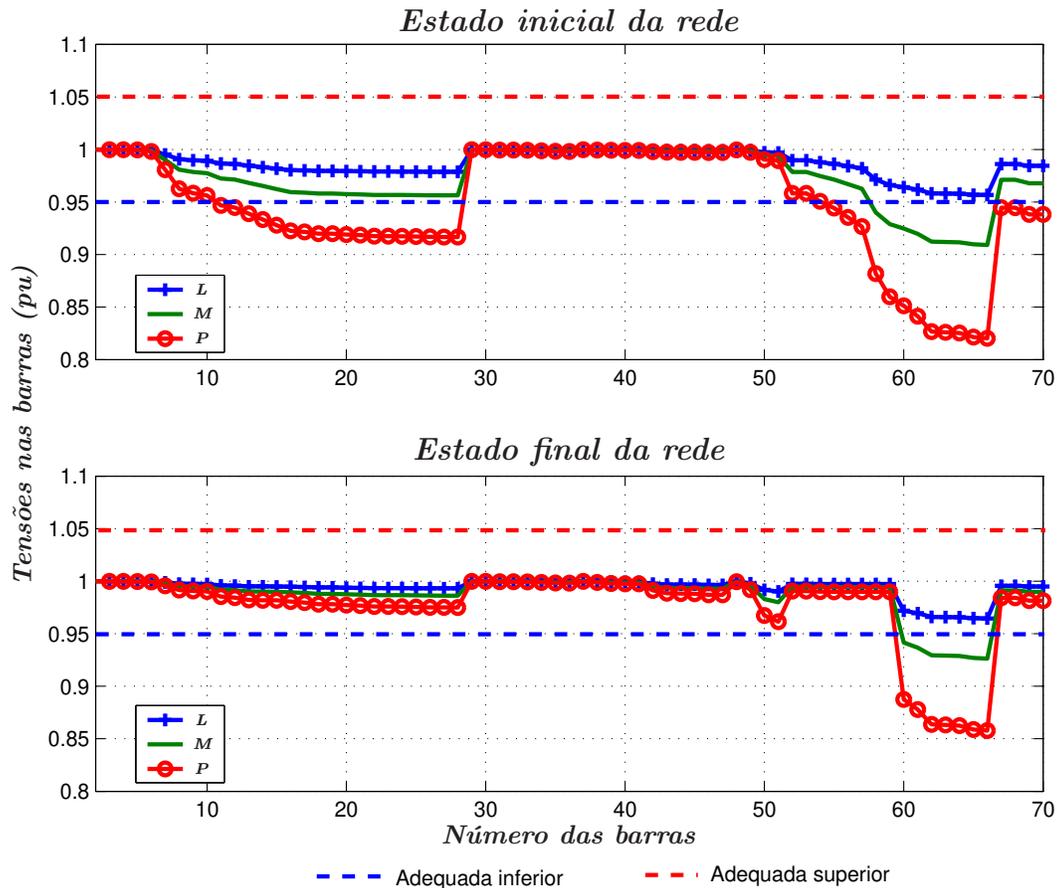


Figura 4.12: Estado da rede antes e após a reconfiguração.

Observa-se um nivelamento das tensões entre as barras 10 e 30, embora a barra 66 ainda apresente um valor fora dos limites especificados (0,86 pu) no carregamento pesado estando abaixo inclusive do limite considerado crítico (0,93 pu) [58]. No caso destas simulações, a utilização da equação 1.2 como função objetivo resultou em melhoria do perfil de tensão e aumento das perdas de potência ativa mas a menor tensão no sistema piorou comparado com o teste anterior (0,89 a 0,86 pu).

Para resolver o problema de sub-tensão na barra 66 é necessário liberar a comutação dos *taps* do transformador da subestação, de modo a tentar melhorar o perfil de tensão seletivamente, nos níveis de carga leve, médio e pesado.

4.2.9 Transformador com comutador de *taps*

Os sistemas de distribuição são dinâmicos, com a carga variando durante o dia. As variações de carga causam variações da tensão, que, dependendo do valor, pode trazer prejuízos ao consumidor e levar a possíveis penalidades do órgão regulador.

Normalmente os transformadores instalados em subestações primárias com potência igual ou acima de 10/12,5 MVA são equipados com comutador de *taps* sob carga (*OLTC*) para atuarem sob o comando de relé regulador de tensão (relé 90). A função deste comutador é de fazer com que a tensão de operação da barra MT (média tensão) esteja sempre dentro de uma faixa pré-determinada, normalmente entre 1,015 e 1,045 pu da tensão nominal. De forma geral os *taps* disponíveis, em relação à tensão nominal são: 16 *taps* de 1,25% onde: +8 x 1,25% e -8 x 1,25%. Os transformadores com potência inferior a 10 MVA são equipados com comutação de *taps* sob carga, instalado no enrolamento de AT, possuindo 1 posição de *tap* de 2,5 % acima da tensão nominal e 4 posições abaixo de 2,5 % abaixo da tensão nominal. O intervalo de manutenção do comutador de *taps* deve ser de aproximadamente 7 anos ou 100.000 operações [59]. O controle do ajuste de *tap* pode ser realizado analisando-se a tensão de entrada tendo por objetivo manter tensão de saída o mais próximo possível de um valor especificado. O comutador de *tap* trabalha em conjunto com relé regulador automático de tensão já mencionado, conhecido como “relé 90”, que tem a função de monitorar a tensão do secundário do transformador e comandar as operações de comutação de *tap* conforme necessário. A comutação do *tap* é realizada de forma automática através de motores especiais que respondem ao comando do relé de forma a ajustar a tensão dentro do nível especificado. Uma temporização da atuação é incluída (tempo morto) de forma a prevenir oscilações abruptas. A Figura 4.13 ilustra um sistema de controle de tensão [60]. Normalmente, na prática são utilizados controles de tensão bem mais complexos que o mostrado na Figura 4.13, no entanto, para efeito das simulações desse trabalho, esse modelo será suficiente.

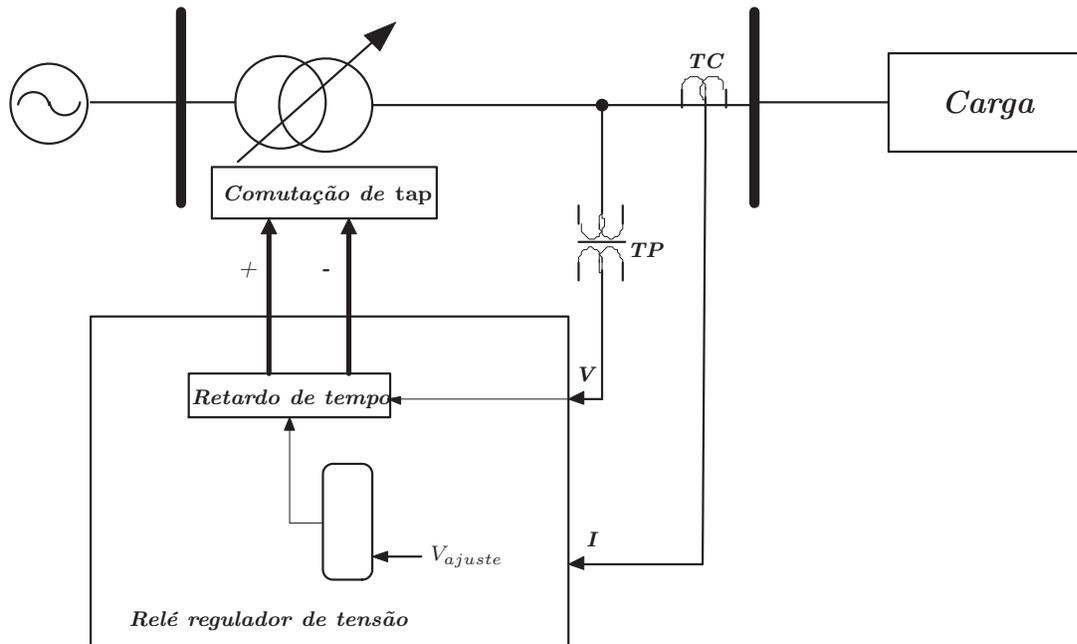


Figura 4.13: Regulador automático de tensão.

A literatura mostra que é vantajoso exercer o controle sobre a atuação dos *taps* do transformador. O trabalho de Liang [61], por exemplo, desenvolve uma metodologia baseada em programação dinâmica para determinar a posição ótima dos *taps* de modo a melhorar o perfil de tensão e diminuir as perdas de potência ativa. Uma das restrições importantes é limitar o número de manobras com os *taps* do transformador, para aumentar a expectativa de vida do mesmo. Além da operação dos *taps* do transformador, é considerado também o controle sobre os capacitores automáticos instalados na rede, de forma a realizar uma otimização conjunta.

Em [60] é proposto um relé regulador de tensão baseado em metodologia *fuzzy* que irá atuar diretamente no comutador de *tap* dos transformadores de potência de sistemas de distribuição.

Um método de controle baseado em AGs é proposto em [62] para coordenar o *OLTC* em conjunto com capacitores automáticos de forma a reduzir o número de operações dos dois dispositivos. O método consiste em dois estágios. No primeiro estágio o despacho do controle de capacitores é realizado levando em conta a curva de carga, de modo a reduzir as perdas de potência ativa e melhorar o perfil de tensão. No segundo estágio, cada capacitor é operado de acordo com o despacho pré-calculado e os *taps* do *OLTC* são atualizados de acordo com essa operação.

Em [63] é proposto um esquema de coordenação de um *SVC* (*Static Var Compensator*) e um *OLTC* de modo a conseguir uma boa margem para a operação do *SVC* para um controle de emergência. De acordo com os autores o método de controle convencional pode causar uma ausência de margem de operação do *SVC* em algumas condições. No método proposto há uma

coordenação entre a operação do *SVC* e o *OLTC* resultando ainda em melhoria do perfil de tensão da rede.

A operação correta do *OLTC* é de grande importância para o sistema de distribuição, contribuindo para a melhoria do perfil de tensão da rede e tendo como consequência direta a melhoria da qualidade de energia.

Conforme ilustrado na Figura 4.12, mesmo com a reconfiguração da rede não foi possível solucionar o problema de sub-tensão nas barras 60 a 66. Para tentar amenizar o problema os *taps* do transformador foram liberados a atuar de forma conjunta com a reconfiguração. Foi elaborado um algoritmo para gerar as posições de *tap* do transformador nos 3 níveis de carga (leve, médio e pesado) e um algoritmo de mutação que permite modificar os *taps* em conjunto com a reconfiguração. A seguir é apresentado de forma simplificada o algoritmo desenvolvido.

- (1) Obter a tensão da barra secundária (V_2) utilizando um fluxo de carga;
 - (1a) Se $0,95 \text{ pu} \leq V_2 \leq 1,05 \text{ pu}$, Vá para o passo (4);
 - (1b) Se $V_2 < 0,95 \text{ pu}$ e $TAP = TAP_{max}$, Vá para o passo (4);
 - (1c) Se $V_2 < 0,95 \text{ pu}$ e $TAP \neq TAP_{max}$, Vá para o passo (2);
 - (1d) Se $V_2 > 1,05 \text{ pu}$ e $TAP = TAP_{min}$, Vá para o passo (4);
 - (1e) Se $V_2 > 1,05 \text{ pu}$ e $TAP \neq TAP_{min}$, Vá para o passo (3);
- (2) Aumentar 1 unidade do *TAP* do *OLTC*, vá para o passo (5);
- (3) Diminuir 1 unidade do *TAP* do *OLTC*; vá para o passo (5);
- (4) Manter o *TAP* na posição atual; vá para o passo (5);
- (5) Repetir os passos (1a) a (1e) para todos os níveis de carregamento adotados;
- (6) Fim.

O algoritmo é simples, fazendo testes da tensão V_2 para cada nível de carga e verificando se há possibilidade de melhora através do ajuste do *tap*. Quando é encontrado um *tap* que permita verificar a expressão $(0,95 \leq V_2 \leq 1,05)$, este é armazenado na posição correspondente do indivíduo, dependendo do nível de carga em que está sendo feita a análise.

O objetivo principal do algoritmo apresentado é diminuir o tamanho do espaço de busca necessário para alocar todas as possibilidades de *taps* nos 3 níveis de carga.

Durante o processo iterativo cada indivíduo é submetido a um algoritmo de mutação que dá uma certa diversidade à população com relação aos ajustes de *taps*. A seguir é apresentado de forma simplificada o algoritmo desenvolvido para essa finalidade.

- (1) Gerar um número aleatório (m) entre zero e um;

- (2) Se m for menor que a probabilidade de mutação do tap do $OLTC$ (pm_{tr}), Fazer:
- (2a) Obter a posição do tap do $OLTC$ (TAP) para o nível de carregamento L;
 - (2b) Gerar um número aleatório ($m1$), podendo assumir os valores zero ou um;
 - (2c) Se $m1 = 0$ e $TAP \neq TAP_{max}$, vá para o passo (3);
 - (2d) Se $m1 = 0$ e $TAP = TAP_{max}$, vá para o passo (4);
 - (2e) Se $m1 = 1$ e $TAP \neq TAP_{min}$, vá para o passo (4);
 - (2f) Se $m1 = 1$ e $TAP = TAP_{min}$, vá para o passo (3);
 - (2g) Armazenar as novas posições de TAP obtidas;
- (3) Aumentar 1 unidade do TAP do $OLTC$, vá para o passo (5);
- (4) Diminuir 1 unidade do TAP do $OLTC$, vá para o passo (5);
- (5) Repetir os passos (2a) a (2g) para os níveis de carregamento desejados;
- (6) Fim.

O algoritmo inicia com a geração de um número aleatório m . Se m for menor que pm_{tr} , a mutação é permitida. A seguir é obtida a informação da posição do tap para os 3 níveis de carga (L, M e P). Uma outra execução do gerador de números aleatórios irá determinar se será acrescentada ou diminuída uma posição do tap . Caso o tap esteja em sua posição máxima haverá decréscimo de 1 posição de tap , caso contrário haverá acréscimo de 1 posição de tap . Após o termino da execução a nova posição do tap é armazenada no indivíduo nas suas respectivas posições. A Tabela 4.8 ilustra os resultados para o sistema de 69 barras após a inclusão de um transformador com regulador de tap entre as barras 1 e 2. Observa-se um pequeno aumento do nível das perdas de potência ativa, o que acarretou um aumento do valor da função objetivo.

Tabela 4.7: Rede de 69 barras: $taps$ na posição inicial

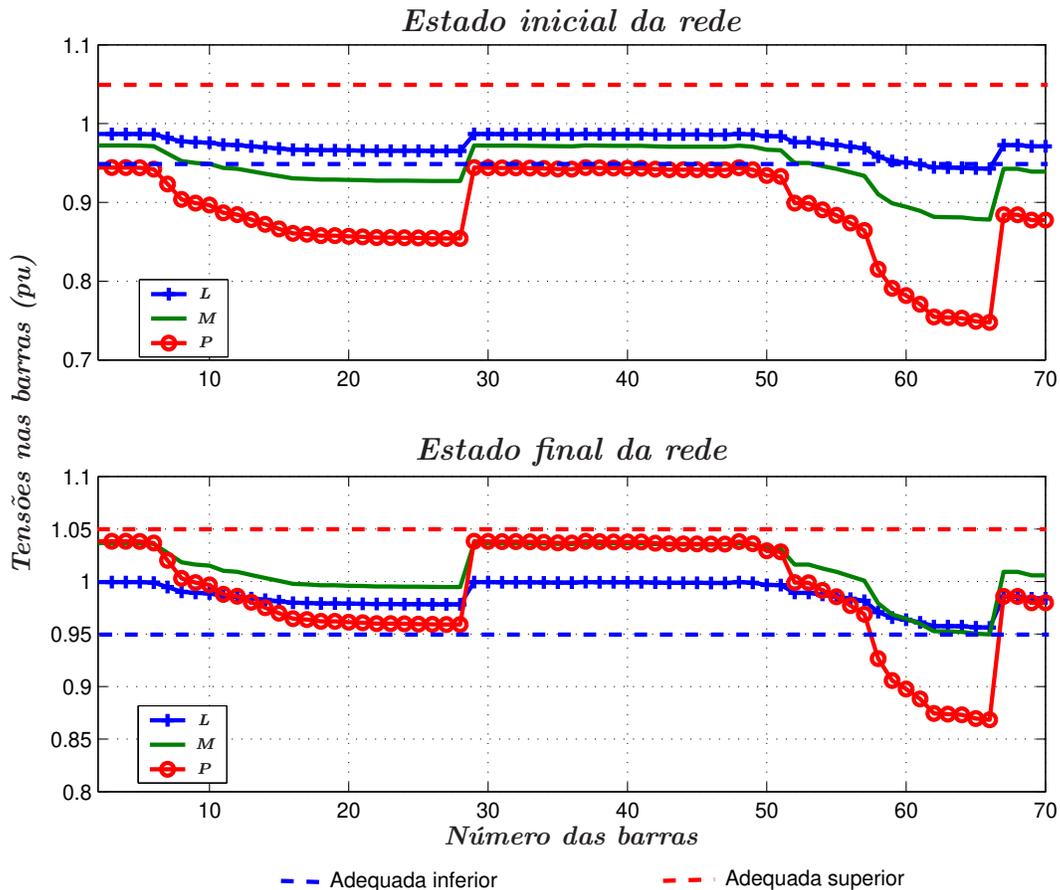
Configuração Inicial (Chaves abertas)	FOB [US\$]	Transformador
70 71 72 73 74	162667,70	1
Níveis de carga (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas [kW]	Taps
Leve	53,08	0
Médio	240,54	0
Pesado	1031,96	0

A Tabela 4.8 apresenta uma simulação realizada com a finalidade de otimizar o ajuste de $taps$ do transformador. Salienta-se que essa simulação foi realizada com a rede no caso base, sem reconfiguração e sem alocação de capacitores.

Tabela 4.8: Rede de 69 barras: otimização dos *taps* do transformador

Configuração final (Chaves abertas)	FOB [US\$]	Transformador
70 71 72 73 74	133594,23	1
Níveis de carga (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas [kW]	Taps
Leve	51,64	1
Médio	206,62	5
Pesado	778,21	7

Observa-se uma ligeira redução das perdas de potência ativa da rede e uma melhoria do perfil de tensão em relação à situação de *tap* fixo, que pode ser observada na Figura 4.14.

Figura 4.14: Estado da rede após otimização dos *taps*.

A Tabela 4.9 apresenta uma comparação entre as barras que apresentaram menor mag-

nitude de tensão após a execução do algoritmo de otimização.

Tabela 4.9: Menores tensões após a otimização dos *taps*.

Barras com menor tensão (Caso base + otimização de <i>taps</i>)					
Carregamento					
Leve		Médio		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
66	0,96	66	0,95	66	0,87

Observa-se que mesmo com a otimização dos *taps* as barras 58-66 permanecem com valores abaixo de 0,95 pu, significando que é necessário realizar outros tipos de intervenções na rede para restaurar os níveis de tensão. A seguir são apresentados os resultados quando a rede é submetida simultaneamente a otimização de *taps* e reconfiguração.

A Tabela 4.10 apresenta os resultados obtidos quando o algoritmo de reconfiguração é executado em conjunto com a otimização dos *taps*. Observa-se uma expressiva redução do valor da função objetivo bem como as perdas de potência ativa para os níveis de carregamento adotados.

Tabela 4.10: Rede de 69 barras: Reconfiguração e otimização dos *taps* do transformador

Configuração final (Chaves abertas)	FOB [US\$]	Transformador
15 57 62 70 71	57959,80	
Níveis de carga (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas [kW]	<i>Taps</i>
Leve	22,52	3
Médio	91,58	5
Pesado	321,65	7

A Figura 4.15 ilustra o perfil de tensões para o sistema de 69 barras antes e após a reconfiguração, dessa vez atuando em conjunto com o algoritmo de otimização dos *taps* desenvolvido. Nota-se um bom nivelamento das tensões perto de 1 pu, sendo que apenas as barras 61 e 62 ainda apresentaram tensões abaixo de 0,95 pu.

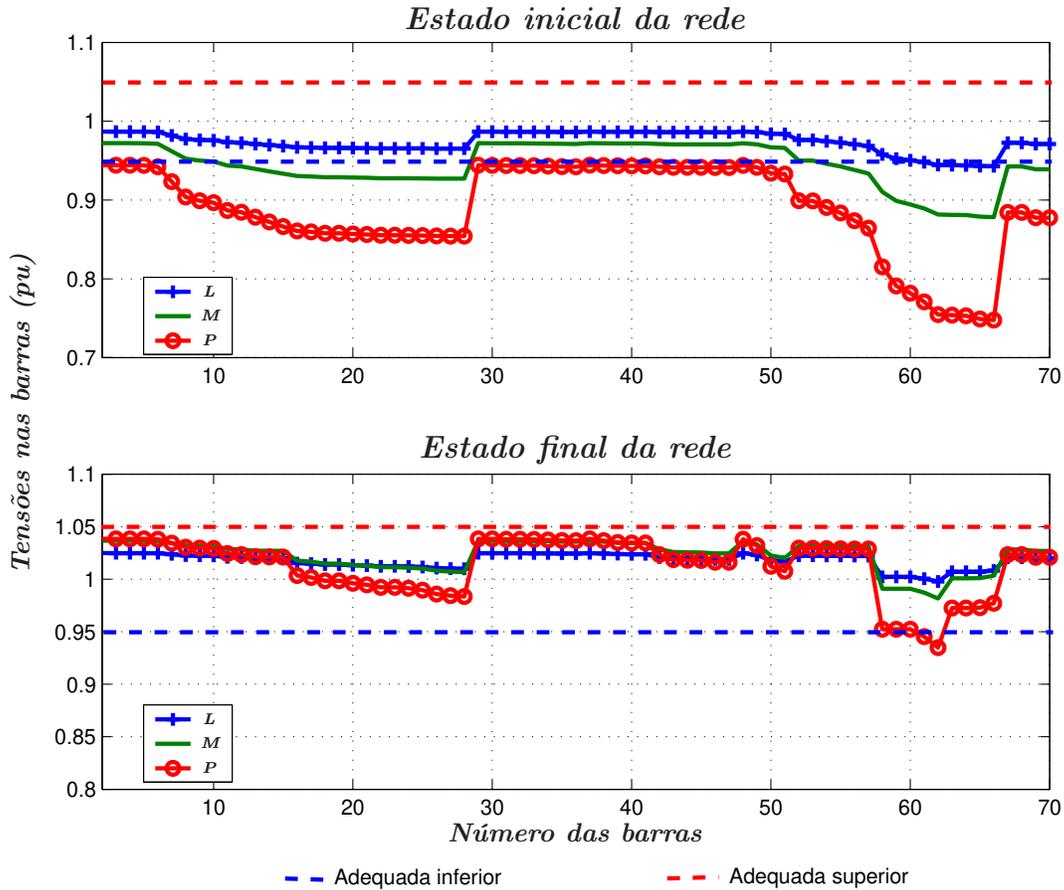


Figura 4.15: Estado da rede após otimização dos *taps* e reconfiguração.

A Tabela 4.11 mostra os valores das menores tensões após a execução dos algoritmos. A barra 62 continua apresentando problemas de tensão abaixo do esperado (0,95 pu) mesmo após os procedimentos de otimização adotados. Nota-se que, por exemplo, no caso de carga pesada, o *tap* do transformador foi ajustado na posição 7, sendo que há 8 posições disponíveis. Embora possa-se imaginar que o ajuste do *tap* na posição 8 poderia melhorar ainda mais o perfil de tensão, observando-se a Figura 4.15 nota-se que para algumas barras da rede o limite superior de tensão (1,05 pu) já está sendo alcançado. O ajuste do *tap* na posição 8 iria ocasionar uma sobre-tensão nestas barras.

Tabela 4.11: Menores tensões após a reconfiguração e otimização dos *taps*.

Barras com menor tensão (Reconfiguração + otimização de <i>taps</i>)					
Carregamento					
Leve		Médio		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
62	0,99	62	0,98	62	0,93

4.2.10 Considerações

Os testes realizados com o AG desenvolvido com a finalidade de redução de perdas de potência ativa, foram considerados bastante promissores, tendo encontrado com facilidade a melhor configuração conhecida na literatura para o sistema de 69 barras, bem como outras configurações com perdas também pequenas.

A rede de 69 barras estudada tem problemas de subtensão nas barras 68-66, não sendo possível a solução completa desse problema apenas com a reconfiguração da rede.

Com a instalação de transformador com *tap* ajustável entre as barras 1 e 2 houve uma ligeira piora do nível das perdas de potência ativa, devido ao fato da inserção da impedância do transformador no sistema. No entanto essas perdas foram compensadas com o aumento dos *taps* do transformador, feito de forma automática pelo algoritmo desenvolvido.

A otimização conjunta de reconfiguração e ajuste dos *taps*, conseguiu nivelar as tensões em uma região bastante confortável, perto de 1 pu, não sendo possível no entanto, resolver o problema de sub-tensão na barra 62 que se encontra em 0,93 pu.

O próximo passo para resolver esse problema é a instalação de capacitores fixos e/ou automáticos na rede. Isso será feito utilizando a representação do indivíduo já apresentada.

Capítulo 5

Alocação de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

5.1 Introdução

As empresas concessionárias, responsáveis pelos sistemas de distribuição de energia elétrica, têm se preocupado cada vez mais com a qualidade da energia fornecida aos seus clientes. Isso se deve a uma maior fiscalização do órgão regulador, mas também porque uma energia entregue com maior qualidade em geral significa que o sistema está operando com bom rendimento, com perdas de potência ativa reduzidas e com seus limites de transmissão de energia dentro das tolerâncias especificadas. É desejável ao cliente que o fornecimento seja constante, com o mínimo de interrupções possíveis, que a tensão esteja dentro dos limites especificados pelo órgão regulador e que se mantenha com o mínimo possível de componentes harmônicas. Com respeito ao controle da tensão de fornecimento, várias ferramentas podem ser utilizadas, como: transformadores com *tap* variável automaticamente na subestação (*OLTC*), instalação de bancos de reguladores de tensão (RT) e a instalação de capacitores *shunt* em locais estratégicos da rede. Considerando que os bancos reguladores de tensão ainda têm um custo muito elevado, as empresas preferem utilizar alternativas mais baratas e igualmente eficientes para a manutenção do perfil de tensão da rede. Os capacitores *shunt*, instalados na rede primária, têm se mostrado uma alternativa boa e econômica, desde que devidamente dimensionados e alocados em locais apropriados. A instalação de capacitores no sistema de distribuição tem outras vantagens, a saber:

1. Diminuição da potência reativa circulante no sistema

Em geral os sistemas de distribuição possuem os mais diversos tipos de carga instalados, e as cargas que possuem algum tipo de acionamento por campo magnético (como motores) necessitam de potência reativa da rede para funcionar e essa potência tem de ser provida pelo sistema de distribuição. A potência reativa não realiza trabalho, sendo trocada entre a fonte (subestação) e o dispositivo consumidor. Dessa forma a presença de potência

reativa circulante na rede diminui a disponibilidade do sistema, pois é necessário prever uma capacidade adicional do condutor para a transmissão dessa potência. Os capacitores são fontes de potência reativa, portanto, se instalados de maneira adequada, podem prover a potência reativa necessária ao funcionamento das cargas reativas, evitando a circulação da mesma pelos cabos do sistema de distribuição;

2. Diminuição das perdas de potência ativa na rede

Por motivo já exposto, a instalação de capacitores pode, desde que devidamente dimensionados, diminuir as perdas de potência ativa da rede. Isso é bastante interessante, pois em geral, as perdas de potência ativa são consideradas pela concessionária como uma carga, sendo que essa carga não reverte em faturamento. Obviamente é interessante eliminar, ou minimizar essa “carga”, aumentando a eficiência do sistema como um todo;

3. Aumento da disponibilidade dos circuitos

Com a instalação dos capacitores, haverá uma redução da potência reativa e do módulo da corrente elétrica circulante pelo sistema, podendo assim o carregamento ser aumentado, o que pode trazer inúmeros benefícios como: postergação de investimentos em novas subestações e diminuição dos custos em melhorias na rede, como por exemplo, o recondutoramento;

4. Melhoria do perfil de tensão

Com a diminuição da potência reativa circulante e diminuição das perdas de potência ativa, o sistema irá trabalhar mais aliviado, diminuindo as quedas de tensão nos cabos. Isso ocasionará uma melhora do perfil de tensão da rede, sendo muito interessante porque pode evitar investimentos em aquisição de bancos de reguladores de tensão;

5. Aumento do faturamento

Considerando que parte da carga presente nos alimentadores é de impedância constante (iluminação incandescente, aquecimento resistivo), é de se esperar um aumento do consumo em razão do aumento da tensão no alimentador. Assim, é interessante para a concessionária manter a tensão no seu limite máximo, dentro dos limites estabelecidos pelo órgão regulador;

6. Aumento da margem de lucro da energia/demanda distribuída

A portaria 1569 do DNAEE de 23/12/93 permite a cobrança de excedente de energia tarifada na forma de demanda e energia de potência ativa reprimidos, com base no fator de potência horário mínimo de 0,92. Portanto, é de grande interesse operar o sistema de distribuição com fator de potência o mais próximo possível da unidade, reduzindo assim o custo da energia adquirida do sistema de transmissão, tendo como consequência o aumento da margem de lucro desta energia vendida pela empresa através do seu sistema de distribuição.

Portanto, a instalação dos capacitores pode trazer muitos benefícios ao sistema. Por outro lado, também pode trazer alguns problemas tais como:

- **Sobrecompensação**

Na maioria das vezes são utilizados bancos fixos de capacitores, que possuem menor custo por kVAr. No entanto essa metodologia de instalação pode trazer problemas de sobrecompensação principalmente em horários de carga reduzida. A sobrecompensação pode trazer problemas como aumento excessivo da tensão podendo ocasionar danos aos equipamentos e também multa por parte do órgão regulador;

- **Ressonância**

Com o aumento da incidência de cargas não lineares na rede, é cada vez maior a ocorrência de correntes harmônicas. Dependendo dos locais onde forem instalados, os capacitores podem interagir com os transformadores, agindo assim como um circuito ressonante LC para determinadas frequências, o que pode ocasionar danos aos capacitores, cabos ou transformadores. Assim, deve-se efetuar um estudo de quantificação de frequências harmônicas no sistema antes da instalação do banco de capacitores.

5.2 Metodologias para resolução do problema

O problema da alocação de potência reativa consiste em determinar o tipo da compensação (capacitor fixo ou automático), o tamanho (em kVAr) e a localização dos bancos de capacitores. Também é necessário determinar de que forma será feito o controle dos bancos instalados. Devido ao número de variáveis envolvidas e do grande número de barras candidatas a receber um capacitor, o problema torna-se de difícil resolução através de métodos tradicionais. Normalmente o problema é tratado como uma minimização de uma função objetivo na qual estão incluídos o custo dos capacitores, perdas de potência ativa e restrições, como por exemplo limites de tensão nas barras e limite de correntes nos ramos. Devido à presença de restrições envolvendo equações não lineares (fluxo de carga) e variáveis que assumem valores 1 ou 0 (capacitor alocado ou não) o problema pode ser caracterizado como não linear, inteiro misto. O problema pode ser resolvido utilizando diversas técnicas de otimização empregando algoritmos heurísticos e metaheurísticos. Nesse trabalho foi escolhida uma metodologia baseada em AGs para a solução do problema. O principal motivo da escolha dos AGs é a sua robustez para a resolução de problemas dessa natureza e sua relativa facilidade de implementação computacional. Existem vários trabalhos publicados na literatura, utilizando as mais diversas abordagens. A seguir será apresentado um estudo bibliográfico do problema de alocação de capacitores em sistemas de distribuição.

Os trabalhos de Baran e Wu [57, 64] apresentam uma formulação e uma metodologia para a resolução do problema de alocação de capacitores em sistemas de distribuição radial. O objetivo é reduzir as perdas de potência ativa principalmente em horário de pico mantendo o custo de aquisição dos capacitores o mínimo possível. A metodologia de solução é realizada através de um algoritmo de dois níveis. O primeiro nível, chamado *Mestre*, é usado para alocar os capacitores, determinando o número e localização nas barras. O segundo nível, chamado *Escravo* é utilizado pelo programa Mestre como uma subrotina para determinar o tipo e o tamanho dos capacitores alocados.

Uma formulação que leva em conta aspectos práticos, restrições de carga em vários níveis de carregamento é proposta em [10,11]. O problema de alocação de capacitores fixos e automáticos é resolvido com a aplicação de um algoritmo *SA*. A primeira parte do trabalho apresenta a formulação e o algoritmo de *SA*, e a segunda parte apresenta os resultados obtidos para um sistema de 69 barras.

Em [65] é proposto um método baseado em AGs para alocação de capacitores tendo por objetivo principal diminuir as perdas de potência ativa no período de carregamento pesado. Para diminuir o espaço de busca é utilizada uma análise de sensibilidade que calcula a variação das perdas de potência ativa em função da variação da potência reativa nas barras.

Uma proposta conjunta para reconfiguração e controle de capacitores automáticos com o objetivo de minimização de perdas de potência ativa, utilizando *SA*, é proposto em [66]. Nesse trabalho foram consideradas duas abordagens:

1. Realizar o controle de capacitores de forma simultânea com a reconfiguração (*full search*);
2. Realizar primeiro a reconfiguração e depois encontrar o controle ótimo para os capacitores com respeito a essa configuração (*quick search*).

O trabalho também considera uma terceira abordagem, intermediária, onde é feito o controle dos capacitores a cada iteração do algoritmo de reconfiguração. Essa abordagem, que autores denominaram *Feasible Search*, obtém bons resultados a um custo computacional bem menor que as outras abordagens.

Em [67] um algoritmo de busca tabu dedicado é utilizado para realizar a alocação de capacitores fixos e automáticos. Uma análise de sensibilidade com base na variação das perdas do sistema em relação ao acréscimo de potência reativa nas barras permite a redução do espaço de busca a um tamanho aceitável sem perda de qualidade dos indivíduos.

O algoritmo de otimização colônia de formigas (*ACSA*¹) é utilizado em [68] para resolver o problema de alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição. Através de comparação com várias metaheurísticas, o algoritmo proposto se mostrou bastante promissor, com tempos computacionais menores e conseguindo resultados muito próximos aos conseguidos pelos AGs. Mostra-se também que a convergência obtida pelo algoritmo *ACSA* foi a mais rápida entre os algoritmos testados.

Um algoritmo baseado em sistemas imunológicos é aplicado para resolver o problema de alocação de capacitores fixos e automáticos em *S. Huang* [69].

Em [70] o problema é também abordado através de sistemas imunológicos artificiais. Os resultados são apresentados para os sistemas de 69 barras [57] e um sistema brasileiro real de 135 barras [12].

Um algoritmo de pontos interiores é proposto para a alocação ótima de bancos de capacitores em [71]. O algoritmo de pontos interiores proposto é incorporado a um algoritmo

¹Ant colony search algorithm

heurístico construtivo. São fornecidos os resultados para os sistemas de 32 barras [7] e 69 barras [57].

Uma abordagem via AGs é utilizada em [72]. São feitas várias considerações sobre a instalação dos capacitores em sistemas de distribuição, principalmente com relação à correntes de *inrush*, e também vários aspectos práticos relevantes com relação a capacitores automáticos.

5.3 Modelo matemático

O modelo matemático utilizado nesse trabalho de pesquisa é aquele proposto em [57] contemplando capacitores fixos e automáticos. O problema é formulado como:

$$\begin{aligned} \min v &= K_e \sum_{i=0}^{nt} T_i p_i(x^i) + \sum_{k=1}^{nc} (r_{ck} u_k^0 + c_k) e_k \\ \text{s.a.} \quad & G^i(x^i, u^i) = 0; \\ & H^i(x_i) \leq 0; \quad i = 0, 1, \dots, nt \\ & 0 \leq u^0 \leq u^{max}.e \\ & 0 \leq u_k^i \leq u_k^0; \quad k \in C_1 \quad \text{ou} \\ & u_k^i = u_k^0; \quad k \in C_2 \\ & e_k \in \{0, 1\} \end{aligned} \tag{5.1}$$

onde:

- nt : representa o número de níveis de carga;
- $G^i(x^i, u^i) = 0$: representa as equações de fluxo de carga para o nível i de carga, sendo x_i as variáveis de estado e u_i as variáveis de controle;
- $H^i \leq 0$: representa as restrições de operação para o nível i de carga, como por exemplo, limites de magnitude de tensão nas barras;
- u_k^0 : representa o tamanho do banco de capacitores que pode ser alocado na barra k ;
- u_k^i : representa o nível de operação do capacitor alocado na barra k para um determinado nível de carga i ;
- C_1, C_2 : representam os conjuntos de barras candidatas a receber capacitores variáveis e fixos respectivamente;
- r_{ck} : representa o custo marginal do capacitor da barra k ;

- e_k : é um vetor de decisão, sendo que 0 indica que o capacitor não é alocado na barra k , e 1 indica o contrário;
- K_e : representa o custo unitário da energia elétrica em $\$/\text{kWh}$;
- T_i : representa o tempo de operação do sistema em horas;
- p_i : representa a perda de potência ativa no nível de carga i ;
- nc : representa o número de barras candidatas à alocação de capacitores;
- x_i : são as variáveis de estado (tensões) no nível de carga i ;
- c_k : representa o custo fixo da instalação dos capacitores na barra k .

Conforme já exposto na análise bibliográfica, várias propostas de otimização aplicadas a sistemas de distribuição de energia elétrica utilizam os AGs como principais ferramentas computacionais. Os AGs têm se mostrado ferramentas de otimização bastante robustas, além dos seus desenvolvimentos serem relativamente simples. No entanto, para aplicações na área de engenharia, o algoritmo deve, além da robustez, apresentar soluções de boa qualidade a um custo computacional aceitável. Para conseguir tal intento, é necessário codificar e representar adequadamente o problema a ser estudado. Nesse trabalho foi desenvolvida uma nova metodologia de representação que contempla tanto o problema de alocação de capacitores como a reconfiguração. Neste capítulo, entretanto será considerada apenas a parte do indivíduo correspondente ao armazenamento das informações correspondentes aos capacitores fixos e automáticos.

Com relação à população inicial, foi desenvolvida uma heurística de geração da população baseada em sensibilidades de tensão, perdas e potência reativa instalada na barra, o que permite uma redução significativa do espaço de busca sem prejudicar a qualidade das configurações geradas. A seguir será feita uma análise mais detalhada da proposta de análise de sensibilidade desenvolvida.

5.4 Análise de Sensibilidade

Existem diversas propostas de análise de sensibilidade na literatura utilizando diversas técnicas. Neste trabalho optou-se por métodos simplificados, de forma a reduzir o custo computacional do algoritmo, embora proporcionando uma boa estimativa das melhores barras candidatas à receber alocação de capacitores.

A seguir será feita uma análise das propostas estudadas neste trabalho. As análises consistem em executar o algoritmo desenvolvido para alocação de capacitores fixos no sistema no caso base (sem capacitores alocados e com as chaves na posição inicial). Observa-se que o sistema apresentado, conta com capacitores instalados na configuração inicial, logo os custos desses capacitores não serão incluídos no cálculo da função objetivo.

1. Sensibilidade por tensão nas barras

Utiliza-se as informações presentes no estado inicial da rede (caso base), executando-se um fluxo de carga completo com fator de carga máximo. O fator de carga é um número multiplicado por todas as cargas ativas e reativas do sistema, de forma a simular um aumento de carga que ocorreria na prática. Neste trabalho os fatores de carga adotados são 0,5 (carga leve), 1,0 (carga normal) e 1,8 (carga pesada). Uma vez determinado o estado da rede, define-se um valor percentual desejado, que representará o número de barras candidatas à receber um banco de capacitores. A informação obtida é armazenada em um vetor e será utilizada pelo algoritmo de geração da população inicial e pelo algoritmo de mutação. Os passos básicos do algoritmo são:

- (1) Ler o valor de S (%);
- (2) Executar um fluxo de carga, com $load = max$;
- (3) Guardar em um vetor o valor das S (%) barras com menor tensão.

onde:

$S(\%)$ - Percentual de barras candidatas desejado, em relação ao número total de barras do sistema;

$load$ - Carregamento desejado para o fluxo de carga;

max - Fator máximo de carregamento adotado;

2. Sensibilidade por análise da variação das perdas

A análise de sensibilidade por variação das perdas em função da variação da injeção de potência reativa nas barras já foi objeto de estudo de vários pesquisadores como em [65], onde é analisado o impacto nas perdas de potência ativa do sistema causado por uma variação da potência reativa nas barras.

Considerando que as perdas de potência ativa podem ser calculadas por:

$$P_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) \quad (5.2)$$

A sensibilidade das perdas de potência ativa com relação à variação da potência reativa nas barras pode ser dada por:

$$(\partial P_L / \partial Q) = (\partial P_L / \partial V) (\partial V / \partial Q) \quad (5.3)$$

Calculando as derivadas parciais de P_L em relação a V_i e θ_i tem-se:

$$(\partial P_L / \partial V_i) = 2 \sum_{j=1}^N V_j Y_{ij} \cos \delta_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (5.4)$$

$$(\partial P_L / \partial \theta_i) = -2V_i \sum_{j=1}^N V_j Y_{ij} \cos \delta_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (5.5)$$

A relação entre a perda incremental e a matriz jacobiana é dada por:

$$\begin{bmatrix} \partial P_L / \partial \theta \\ \partial P_L / \partial V \end{bmatrix} = [J^T] \begin{bmatrix} \partial P_L / \partial P \\ \partial P_L / \partial Q \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Então:

$$\begin{bmatrix} \partial P_L / \partial P \\ \partial P_L / \partial Q \end{bmatrix} = [J^T]^{-1} \begin{bmatrix} \partial P_L / \partial \theta \\ \partial P_L / \partial V \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Conseqüentemente:

$$[\partial P_L / \partial Q] = [J_{L_3} | J_{L_4}] \begin{bmatrix} \partial P_L / \partial \theta \\ \partial P_L / \partial V \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

onde $J_{L_3} = \partial \theta / \partial Q$ e $J_{L_4} = \partial V / \partial Q$ são as submatrizes de $[J^T]^{-1}$.

As barras são ordenadas de acordo com os valores determinados pelo equacionamento exposto, sendo que duas ou três barras de cada ramo lateral são selecionadas como candidatas.

Uma das propostas estudadas nesse trabalho é o cálculo de sensibilidade através da variação das perdas em função da variação da injeção de uma certa quantidade de potência reativa nas barras utilizando um algoritmo iterativo.

A seguir é ilustrado o algoritmo desenvolvido para essa finalidade.

- (1) Inicializar um vetor \overline{DPL} com zeros;
- (2) Inicializar as variáveis DIF , P_1 e P_2 com zero;
- (3) Executar um fluxo de carga, calcular as perdas de potência ativa e armazenar em P_1 ;
 - (3a) Inicializar o contador de barras k , ($k = 1$);
 - (3b) Alocar um banco (Q_c) de tamanho 1 (300 kVAr) na barra k ;
 - (3c) Executar um fluxo de carga, calcular as perdas de potência ativa e armazenar em P_2 ;
 - (3d) Calcular: $DIF = P_1 - P_2$ e armazenar na posição k do vetor DPL ;
 - (3e) $k = k + 1$;
 - (3f) Executar os passos (3b) a (3e) enquanto $k \neq nb + 1$;
- (4) Parar.

No algoritmo mostrado tem-se:

- P_1 e P_2 - variáveis auxiliares;

- k - contador de barras;
- Q_c - banco de capacitor de menor capacidade; disponível (no caso, 300 kVAr);
- DPL - vetor onde são armazenados os resultados da diferença entre as perdas obtidas no caso base e as perdas obtidas com a alocação de Q_c na barra k .

3. Sensibilidade por carga reativa nas barras

Esse critério é o mais simples estudado, sendo apenas necessário as informações referentes às cargas reativas presentes no sistema, o que é facilmente obtido do vetor de cargas lido diretamente do banco de dados da rede. O método pode ser resumido como:

- (1) Ler o valor de S ;
- (2) Obter as S % barras com a maior carga reativa;
- (3) Armazenar as S % barras em um vetor.

Para os testes de sensibilidade, foi utilizado o sistema de 69 barras [20], composto de 69 barras e 74 ramos, cujos dados são apresentados no Apêndice C e o diagrama unifilar é apresentado na Figura C.1.

Para efeito de comparação, o AG desenvolvido foi configurado para executar um máximo de 2000 gerações, com uma população inicial de 100 indivíduos para todos os casos.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos com as análises de sensibilidade estudadas.

Tabela 5.1: Comparação das análises de sensibilidade

Opção	NGEN	FOB (\$)/1000	Bancos alocados Barra(núm. de bancos)	Tempo (s)
Sem sensib.	2000	108,97	24(1), 58(1), 63(2), 64(1)	5,70
Tensão	2000	108,87	21(1), 63(2), 66(2)	5,50
Perdas	2000	110,28	63(2), 66(2), 70(2)	7,70
Pot. reat. na barra	2000	105,68	19(1), 62(4)	5,80

Para a realização dos testes foram utilizados $S=10\%$. Observa-se que para esse sistema, o critério de sensibilidade de potência reativa da barra obteve os melhores resultados, sendo que, utilizando esse critério, o AG encontra a melhor solução em 2000 gerações com um tempo computacional de 5,80s.

5.5 Representação do indivíduo

Conforme já mencionado, a representação adequada do indivíduo é de importância fundamental no sucesso do AG implementado. O objetivo principal do trabalho é apresentar

um algoritmo unificado, que realize a reconfiguração e alocação dos capacitores utilizando um único indivíduo. O Capítulo 4 apresentou os detalhes de implementação relacionada com a reconfiguração. Neste capítulo, as análises levarão em conta somente a parte do indivíduo correspondente à alocação de capacitores. A Figura 5.1 apresenta o mesmo sistema simples de 5 barras, 4 ramos e 2 chaves de conexão já utilizado como exemplo no Capítulo 4.

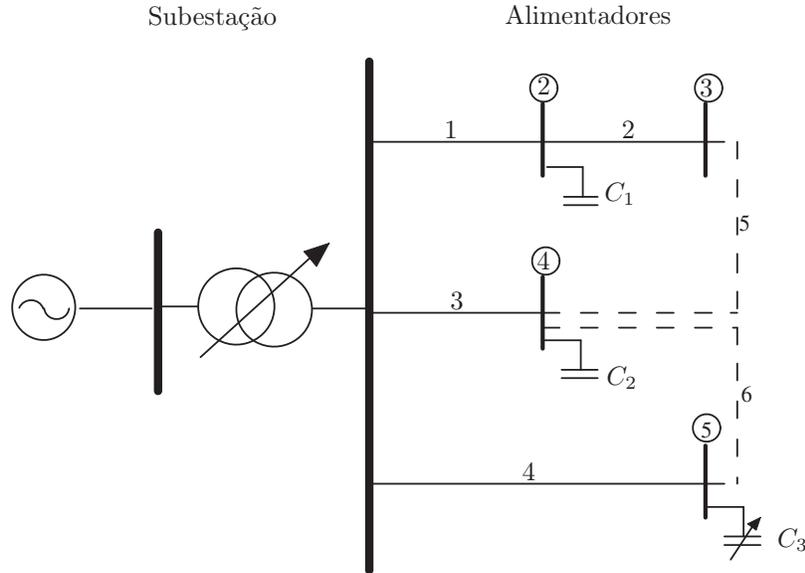


Figura 5.1: Sistema de 5 barras

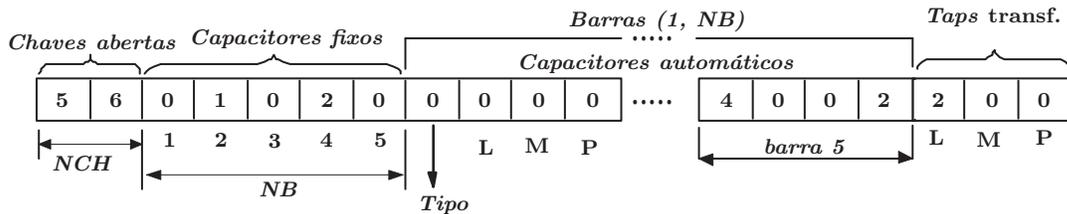


Figura 5.2: Representação do indivíduo.

A Figura 5.2 apresenta a codificação utilizada para representar chaves de interconexão, capacitores fixos, automáticos e *taps* do transformador da subestação. Somente serão consideradas as posições do indivíduo responsáveis pelo armazenamento das informações referentes aos capacitores fixos e automáticos. Assim, como se pode observar, os capacitores fixos são armazenados a partir da posição $(NCH + 1)$ ocupando NB posições no indivíduo. Neste trabalho foi considerada a alocação de um banco de capacitores por barra, sendo que a alocação inicial

(população inicial), é realizada através das análises de sensibilidade já expostas. Os capacitores automáticos são alocados a partir da posição $(NCH + NB + 1)$ ocupando $4NB$ posições no indivíduo. Verifica-se que são necessárias $(5NB + NCH + 3)$ posições para o armazenamento de todas as informações. O algoritmo desenvolvido prevê a instalação de bancos de capacitores fixos com as seguintes capacidades: 300, 600, 900 e 1200 kVAr (que corresponde aos tipos 1, 2, 3 e 4) e para os capacitores automáticos um banco adicional de 1800 kVAr pode ser alocado, sendo que os *taps* foram atribuídos da seguinte forma:

Tabela 5.2: Capacitores automáticos-posições dos *taps*

Tipo	Pot.(kVAr)	<i>Taps</i>			
2	600	0	300	600	
3	900	0	600	900	
4	1200	0	600	900	1200
5	1800	0	600	1200	1800

5.6 População inicial

Conforme já exposto, o objetivo principal deste trabalho de pesquisa é desenvolver uma ferramenta computacional que unifique os recursos de otimização normalmente presentes nos sistemas de distribuição. Para atingir tal intento, um único indivíduo foi desenvolvido de forma a armazenar as informações do sistema de distribuição a ser estudado. Para uma maior flexibilidade do programa computacional, o programa desenvolvido permite a alocação na rede em seu estado base, ou seja com as chaves em sua condição original. Isso permite também comparações úteis, que serão realizadas no momento oportuno. No entanto, o mais interessante é realizar a alocação em conjunto com a reconfiguração, pois consegue-se uma redução significativa da função objetivo, e conseqüentemente das perdas de potência ativa da rede. O procedimento adotado para a formação da população inicial, foi o seguinte:

- (1) Para cada indivíduo armazenando em \overline{VCH} (população inicial) obtida na etapa da reconfiguração, Fazer:
 - (1a) Alocar os capacitores fixos e/ou automáticos de acordo com o critério de sensibilidade adotado, ou seja, a barra escolhida pertence ao vetor de barras obtido pela análise de sensibilidade;
 - (1b) Recalcular a função de avaliação do indivíduo através da equação 4.2;
- (4) Fim.

Se houver a intenção de realizar a alocação sobre a rede em seu estado base, ou seja, sem realizar a reconfiguração, é necessário obviamente repetir tantas vezes quanto necessário o indivíduo que representa a rede em seu estado base e alocar os capacitores nesses indivíduos.

A Figura 5.3 ilustra a geração da população inicial para o sistema de 5 barras. Observa-se que foram gerados 5 indivíduos através da análise de laços, e capacitores fixos foram alocados em cada indivíduo.

$$(1) \overline{VCH} = \begin{bmatrix} 1, & 16 & | & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2, & 26 & | & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3, & 36 & | & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4, & 35 & | & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5, & 45 & | & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$(2) \overline{VCH} = \begin{bmatrix} 1, & 16 & | & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 2, & 26 & | & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 3, & 36 & | & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \\ 4, & 35 & | & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 5, & 45 & | & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura 5.3: Exemplo da geração da população inicial - sistema de 5 barras.

5.7 Cruzamento

Para os capacitores fixos, não há dificuldades em realizar o cruzamento da forma tradicional, e nesse trabalho foi adotado o cruzamento de dois pontos conforme mostrado na Figura 5.4.

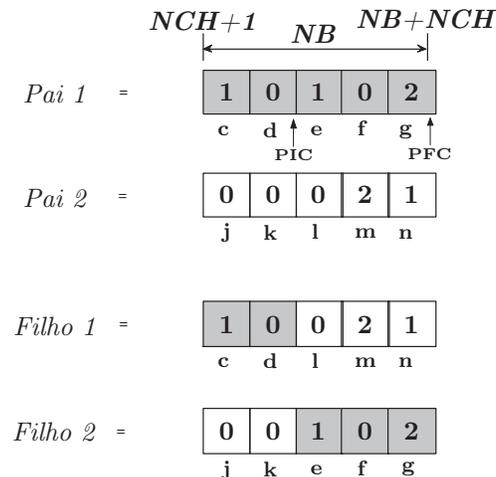


Figura 5.4: Cruzamento - alocação de capacitores fixos

Na Figura 5.4, PIC e PFC são os pontos inicial e final do corte no indivíduo, respectivamente.

Para os capacitores automáticos, não se pode utilizar esse tipo de cruzamento diretamente, pois isso poderia destruir a coerência da configuração², pois os capacitores automáticos têm *taps* que podem ser alocados nos níveis de carga L, M e P. Assim, quando feito o cruzamento do material genético de dois indivíduos, o indivíduo não pode ser “quebrado” aleatoriamente, e sim conservando a informação sobre os níveis de carregamento presentes. Assim, para realizar o cruzamento de forma consistente, é necessário adotar os pontos de corte de acordo com a Figura 5.5, por exemplo.

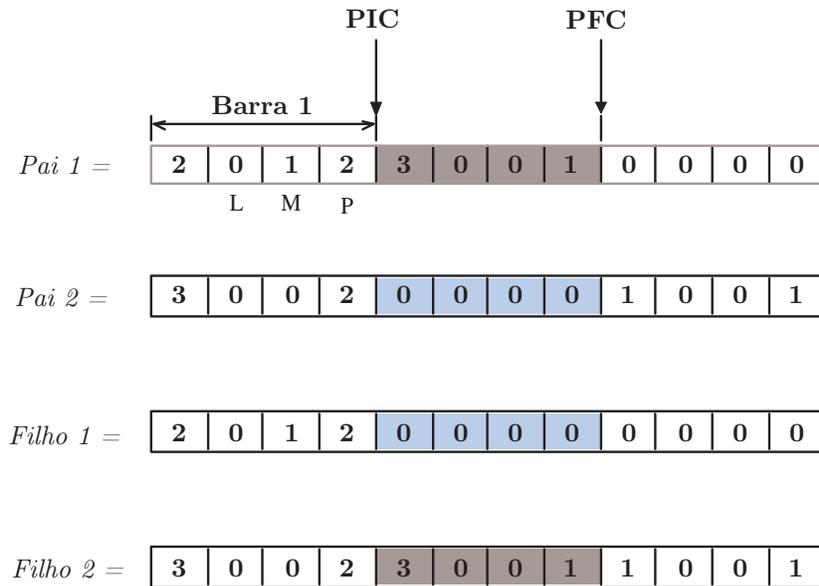


Figura 5.5: Cruzamento - alocação de capacitores automáticos.

De acordo com a Figura 5.5, observa-se que os pontos de corte situam-se nos pontos divisórios entre as barras da rede. Dessa forma, quando é feito o cruzamento, as informações referentes a uma determinada barra, com relação à alocação do capacitor automático e os respectivos *taps* fica preservada, sendo transportada em um bloco único de um indivíduo a outro.

5.8 Mutação

Para os capacitores fixos, o processo de mutação é realizado de maneira bastante simples, de acordo com o algoritmo apresentado a seguir.

- (1) Obter o indivíduo com a melhor avaliação armazenado na população auxiliar (VCH_H);
- (2) Escolher uma barra do sistema de forma aleatória;

²Poderiam ser alocados mais capacitores no nível de carga leve do que no pesado por exemplo.

- (3) Se na barra escolhida não houver banco de capacitores alocado, alocar um banco tipo 1 (300 kVAr);
- (4) Se na barra escolhida houver um banco tipo 4 (1200 kVAr), diminuir uma unidade, passando para banco tipo 3 (900 kVAr);
- (5) Se na barra escolhida houver um banco tipo diferente do tipo 4, então aumentar ou diminuir 1 unidade (300 kVAr) de banco de capacitores fixos de forma aleatória;
- (6) Fim.

O processo de mutação começa com a seleção do indivíduo com melhor avaliação da matriz \overline{VCH}_H . Se na barra escolhida não houver um banco de capacitores fixos alocado, então é alocado um banco tipo 1 (300 kVAr). Se o banco alocado na barra for igual a 4 (1200 kVAr) então esse é o banco máximo permitido, e a alteração é feita subtraindo-se uma unidade. Se na barra escolhida houver um banco de capacitores fixos diferente do tipo 4 então aumenta-se ou diminui-se uma unidade de banco de capacitores fixos. A metodologia utilizada permite que o operador de mutação opere de forma mais suave, evitando mudanças bruscas nos bancos alocados, o que poderia ocasionar uma grande alteração no valor da função de avaliação.

Para os capacitores automáticos, o processo de mutação é um pouco mais complexo devido ao fato dos mesmos possuírem *taps* que são ajustados de acordo com determinado perfil de carga. Outro problema que pode ocorrer é a possível geração de configurações infactíveis, no tocante à alocação não desejada de mais capacitores (*taps*) em níveis de carga leve do que em níveis de carregamento pesado. A seguir é apresentado um algoritmo simplificado para a realização de mutação dos capacitores automáticos.

- (1) Obter o indivíduo com a melhor avaliação armazenado na população auxiliar (VCH_H);
- (2) Escolher uma barra do sistema de forma aleatória;
- (3) Se na barra escolhida não houver banco de capacitores automáticos alocado, alocar um banco tipo 2 (600 kVAr);
- (4) Se na barra escolhida houver um banco tipo 5 (1800 kVAr), diminuir uma unidade, passando para banco tipo 4 (1200 kVAr);
- (5) Se na barra escolhida houver um banco tipo diferente do tipo 5, então aumentar ou diminuir 1 unidade de banco de capacitores automáticos de forma aleatória;
- (6) Para o banco alocado ajustar um *tap* de forma aleatória de acordo com os valores apresentados na Tabela 5.2;
- (7) Fim.

Como no algoritmo de mutação para capacitores fixos, a rotina inicia escolhendo o indivíduo com melhor avaliação da matriz \overline{VCH}_H . A seguir uma barra do sistema é escolhida

de forma aleatória. Se na barra escolhida não houver um banco de capacitores automáticos alocado, então é alocado um banco tipo 2 (600 kVAr). Se o banco alocado na barra for igual a 5 (1800 kVAr) então esse é o banco máximo permitido, e a alteração é feita subtraindo-se uma unidade. Se na barra escolhida houver um banco diferente do tipo 5 então aumenta-se ou diminui-se aleatoriamente uma unidade de banco de capacitores automáticos. De forma adicional aloca-se um *tap* para o banco alocado observando-se a coerência dos *taps* alocados em relação ao nível de carregamento.

5.9 Resultados obtidos

A seguir serão realizadas simulações com o algoritmo desenvolvido para o sistema de 69 barras [57]. A Tabela 5.3 ilustra o estado inicial da rede a ser utilizada como exemplo. Os valores utilizados para o cálculo da *FOB* são $T_0 = 1000$, $T_1 = 6760$, $T_2 = 1000$, $S_0 = 0.5$, $S_1 = 1.0$, $S_2 = 1.8$, $K_e = 0.06$ \$/kWh, $K_c = 3.0$ \$/kVAr. O custo adotado pela infraestrutura de instalação de bancos de capacitores em cada barra é de \$ 1000,00 por barra.

Tabela 5.3: Sistema de 69 barras: caso base

Configuração Inicial (Chaves abertas)	FOB [\$]
70 71 72 73 74	146390,00
Níveis de carga (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas [kW]
Leve	51,60
Médio	224,97
Pesado	867,25

A Tabela 5.4 apresenta as menores tensões do sistema de 69 barras para o caso base.

Tabela 5.4: Menores tensões sistema de 69 barras - caso base.

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Médio		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
66	0,9567	66	0,9092	66	0,8203

Nota-se que a barra 66 apresenta as menores tensões, estando apenas acima do mínimo estabelecido por norma no nível de carregamento leve. A Tabela 5.5 ilustra as injeções de potência pela subestação para o caso base.

Tabela 5.5: Injeções de potência na subestação sistema de 69 barras - caso base.

Fluxos de potência da subestação			
Carregamento			
	Leve	Médio	Pesado
P(kW)	1952,70	4027,19	7711,27
Q(kVAr)	1370,85	2796,76	5240,40
S(kVA)	2385,84	4803,07	9323,39

5.9.1 Alocação de capacitores fixos

A Tabela 5.6 apresenta os resultados obtidos para a alocação de capacitores fixos. A configuração obtida é um pouco diferente da obtida em [71], alocando um banco de capacitores na barra 19, com ligeira redução no valor da *FOB*.

Tabela 5.6: Sistema de 69 barras: alocação de capacitores fixos

Configuração final (Chaves abertas)	FOB [\$]
70 71 72 73 74	105688,77
Níveis de carga (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas [kW]
Leve	47,48
Médio	146,88
Pesado	612,73
Capacitores alocados	Barra (número de bancos)
300 kVAr	19(1), 62(4)

Observa-se na Tabela 5.6 que foi obtida uma redução de 29,30% das perdas de potência ativa para o carregamento máximo, 34,7% para o carregamento médio e 7,90% para o carregamento leve. Para o horizonte calculado (1 ano) a economia obtida é de \$ 40700,00 o que representa em torno de 27% de economia por ano.

Na Tabela 5.7 são apresentados os valores referentes à menor tensão para o sistema de 69 barras após a alocação de capacitores fixos. Houve uma melhoria no nível de tensão, mas ainda insuficiente para atingir a tensão mínima de 0,95 pu.

Tabela 5.7: Menores tensões após a alocação de capacitores fixos

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Médio		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
66	0,9753	66	0,9298	66	0,8467

A Tabela 5.8 mostra as injeções de potência pela subestação após a alocação dos capacitores fixos. Observa-se uma diminuição de 11% no fluxo de potência aparente pela subestação para o caso de carregamento máximo.

Tabela 5.8: Injeções de potência na subestação após a alocação de capacitores fixos

Fluxos de potência da subestação			
Carregamento			
	Leve	Médio	Pesado
P(kW)	1948,57	3949,07	7456,67
Q(kVAr)	-131,32	1263,11	3631,75
S(kVA)	1952,99	4146,15	8294,07

5.9.2 Alocação de capacitores automáticos

Os valores adotados para as simulações são idênticos aos adotados para o caso da alocação de capacitores fixos, com exceção do custo do banco que passa a ser \$ 4,00 por kVAr. O estado inicial de rede de 69 barras a ser estudada encontra-se na Tabela 5.3. A Tabela 5.9 apresenta os resultados obtidos para a alocação de capacitores automáticos.

Tabela 5.9: Sistema de 69 barras: alocação de capacitores automáticos

Configuração final (Chaves abertas)	FOB [\$]
70 71 72 73 74	106812,23
Níveis de carga (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas [kW]
Leve	34,95
Médio	146,88
Pesado	558,98
Capacitores alocados	Barra (número de bancos)
300 kVAr	18(2,2,2), 62(2,4,6)

Para o nível de carregamento pesado foi obtida uma redução de perdas de potência ativa da ordem de 35,54%, contra 29,30% alocando apenas capacitores fixos. Observa-se com isso, que é bastante interessante a alocação de capacitores automáticos no sistema. Na prática, entretanto, existem certos impedimentos que limitam o uso desses equipamentos tais como custo mais elevado que os capacitores fixos, menor durabilidade e maior custo de manutenção.

A Tabela 5.10 mostra que a barra 66 tem o seu nível de tensão melhorado em cerca de 3,3% aumentando de 0,8293 pu para 0,8500 pu. No entanto esse valor ainda é inferior aos 0,95 pu pretendidos.

Tabela 5.10: Menores tensões após a alocação de capacitores automáticos

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Médio		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
66	0,9657	66	0,9298	66	0,8500

Observa-se pela Tabela 5.11 que a injeção de potência aparente pela subestação diminuiu em 14,29% passando de 9323,39 kVAr para 7990,88 kVAr.

Tabela 5.11: Injeções de potência na subestação após alocação capacitores automáticos.

Fluxos de potência da subestação			
Carregamento			
	Leve	Médio	Pesado
P(kW)	1936,05	3949,08	7402,93
Q(kVAr)	463,56	1263,11	3008,46
S(kVA)	1990,77	4146,16	7990,88

5.9.3 Alocação de capacitores fixos e automáticos

O estado inicial de rede de 69 barras a ser estudada encontra-se na Tabela 5.3. A Tabela 5.12 apresenta os resultados obtidos com a alocação de capacitores fixos e automáticos.

Tabela 5.12: Rede de 69 barras : alocação de capacitores fixos e automáticos

Configuração final (Chaves abertas)	FOB [\$]
70 71 72 73 74	105312,23
Níveis de carga (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas [kW]
Leve	34,95
Médio	146,88
Pesado	558,98
Capacitores fixos	Barra (número de bancos)
300 kVAr	18(1)
Capacitores automáticos	Barra(número de bancos)
300 kVAr	62(2,4,6)

Observa-se que o valor das perdas de potência ativa é exatamente igual para o caso de alocação de apenas capacitores automáticos, no entanto houve uma redução do valor da função objetivo, que passou de \$ 106812,23 para \$ 105312,23 que representa uma redução de cerca de

1,4%. Deve-se salientar que o montante de redução das perdas em horário de pico é de 35,55%, o maior valor obtido até então. As injeções de potência através da subestação apresentaram valores idênticos ao caso com apenas capacitores automáticos.

A Tabela 5.13 mostra que a barra 66 tem o seu nível de tensão melhorado em cerca de 3,0% aumentando de 0,8293 pu para 0,8600 pu. Observa-se uma pequena melhora em relação ao caso anterior, mas esse valor ainda é inferior aos 0,95 pu pretendidos.

Tabela 5.13: Menores tensões após a alocação de capacitores fixos e automáticos

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Médio		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
66	0,9700	66	0,9300	66	0,8600

5.9.4 Alocação de capacitores fixos, automáticos e otimização dos *taps* do transformador

A Tabela 5.14 apresenta os resultados obtidos para a alocação de capacitores fixos, automáticos e otimização dos *taps* do transformador.

Tabela 5.14: Rede de 69 barras : alocação de capacitores fixos e automáticos e otimização de *taps*

Configuração final (Chaves abertas)	FOB [\$]
70 71 72 73 74	98547,19
Níveis de carga (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas [kW]
Leve	36,64
Médio	141,37
Pesado	508,49
Capacitores fixos	Barra (número de bancos)
300 kVAr	62(2)
Capacitores automáticos	Barra(número de bancos)
300 kVAr	62(0,2,4)

Observa-se uma expressiva diminuição do valor da função objetivo e das perdas de potência ativa para o nível máximo de carregamento da rede.

A Tabela 5.15 apresenta os valores das menores tensões para o sistema após a alocação de capacitores fixos, automáticos e otimização dos *taps* do transformador. Pode-se observar uma melhoria no perfil de tensão da rede, embora a barra 65 ainda apresente tensão abaixo de 0,95

pu.

Tabela 5.15: Menores tensões após a alocação de capacitores fixos, automáticos e otimização de *taps* do transformador

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Médio		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
65	0,9541	65	0,9667	65	0,9156

A Tabela 5.16 mostra as injeções de potência na subestação. Neste caso, nota-se uma redução média de 12% na injeção de potência aparente da subestação considerando os três níveis de carregamento.

Tabela 5.16: Injeções de potência na subestação após alocação capacitores fixos, automáticos e otimização dos *taps* do transformador

Fluxos de potência da subestação			
Carregamento			
	Leve	Médio	Pesado
P(kW)	1937,73	3943,55	7352,43
Q(kVAr)	792,39	2947,78	3656,37
S(kVA)	2093,49	4281,12	8211,41

A Figura 5.6 ilustra os perfis de tensão do sistema de 69 barras após a execução do algoritmo de alocação de capacitores fixos e automáticos, e otimização dos *taps* do transformador.

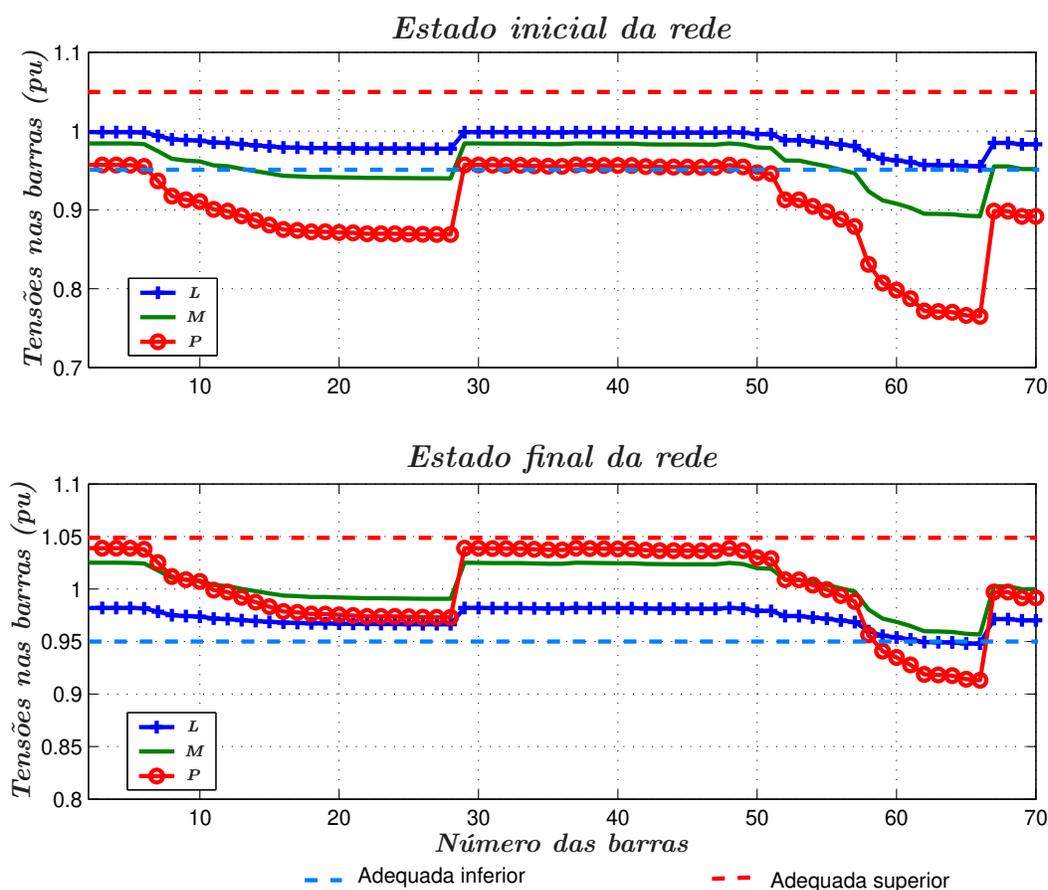


Figura 5.6: Estado da rede de 69 barras após a alocação de capacitores fixos e automáticos, e otimização dos *taps* do transformador.

5.9.5 Resumo das simulações

A Tabela 5.17 mostra um resumo com os principais resultados obtidos para o sistema de 69 barras. A tabela apresenta os resultados divididos em casos da seguinte forma:

- (1) Alocação de capacitores fixos;
- (2) Alocação de capacitores automáticos;
- (3) Alocação de capacitores fixos e automáticos;
- (4) Alocação de capacitores fixos, automáticos e otimização dos *taps* do transformador.

Os resultados mostram que a condição mais interessante é a alocação de capacitores fixos em conjunto com os capacitores automáticos e com o ajuste dos *taps* do transformador da subestação. Observa-se que esse é o caso que proporciona a maior economia financeira e maior diminuição das perdas de potência ativa no horário de pico (carga pesada).

Tabela 5.17: Resumo dos resultados obtidos

Casos	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>FOB</i> inicial	146390,00			
<i>FOB</i> final	105688,77	106812,23	105312,23	98547,00
Custo dos capacitores (\$)	4500,00	9600,00	8100,00	6600,00
Economia (\$)/Ano	40701,23	39577,77	41077,77	47843,00
Diminuição das perdas - pico (%)	29,30	31,45	35,55	44,09
Diminuição da pot.(kVA) de saída da <i>SE</i> - pico (%)	11,04	14,29	14,29	15,35

A Tabela 5.18 apresenta os valores dos parâmetros ajustados no AG desenvolvido.

Tabela 5.18: Parâmetros ajustados

Casos	(1)	(2)	(3)	(4)
População inicial	100	100	100	200
Num. Gerações	1000	1000	2000	6000
Indiv. no torneio	4	4	4	4
Ponto inicial de corte (%)	50	80	[50,80]	[50,80]
Ponto final de corte (%)	100	100	[100,100]	[100,100]
Cruzamento (%)	30	60	[30,60]	[30,60]
Mutação (%)	9	5	[8,10]	[9,10]

5.10 Considerações

O principal objetivo deste capítulo foi demonstrar o desenvolvimento dos algoritmos responsáveis pela alocação de capacitores fixos e automáticos. O algoritmo para análise de sensibilidade, apesar de simples, mostrou-se bastante eficiente, não deixando nada a desejar em relação aos métodos matriciais que foram descritos. A heurística para a geração da população inicial é bastante flexível, podendo trabalhar em conjunto com o algoritmo de reconfiguração, ou separadamente, se for necessário. Foi desenvolvido um algoritmo responsável pela realização da mutação dos capacitores fixos e automáticos, que teve um bom desempenho, encontrando as soluções já conhecidas na literatura. A comparação entre os diversos casos foi bastante benéfica pois ajudou a mostrar que é vantajosa a alocação de capacitores fixos e automáticos em conjunto com a otimização dos *taps* do transformador da subestação, obtendo-se uma maior economia anual e permitindo uma maior diminuição das perdas de potência ativa em horário de pico. Deve-se ressaltar no entanto, que em geral as concessionárias de energia elétrica procuram evitar a instalação de capacitores automáticos na rede. Isso se deve, principalmente, a problemas relacionados com manutenção e maior custo de instalação e manutenção. Os valores ajustados no algoritmo foram adotados para permitir comparações com os encontrados na literatura.

Capítulo 6

O algoritmo integrado

6.1 Introdução

Nos capítulos anteriores foi mostrado o desenvolvimento dos algoritmos de reconfiguração e alocação de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica. Para facilitar a explicação e entendimento dos exemplos, considerou-se cada módulo separadamente, incluindo também o ajuste do *tap* do *OLTC* da subestação como forma de melhorar o perfil de tensão da rede. A seguir serão apresentados os desenvolvimentos relativos ao algoritmo unificado, onde o sistema de distribuição será otimizado utilizando todas as ferramentas já desenvolvidas em um único algoritmo. Serão mostradas simulações utilizando as redes de 69 barras [57] e 135 barras [21]. Esta última é uma rede de distribuição real.

6.2 Reconfiguração e alocação de capacitores

Conforme já exposto, os procedimentos de alocação de capacitores e reconfiguração podem trazer grandes benefícios ao sistema de distribuição desde que realizados de forma adequada. A reconfiguração altera a topologia da rede através da manobra de chaves, realocando cargas e alterando os fluxos de potência nas linhas. Essas manobras podem ser emergenciais, quando o sistema sofre alguma falta, por exemplo, ou planejada, para atingir determinado objetivo. A reconfiguração será realizada para diminuir as perdas do sistema de distribuição, o que já se mostrou bastante atraente, pois a diminuição das perdas permite que o sistema trabalhe mais “aliviado”, melhorando também o perfil de tensão da rede. No entanto, para sistemas bastante carregados como o sistema de 69 barras estudado, apenas a reconfiguração não se mostrou suficiente para resolver o problema de sub-tensão em algumas barras. A adoção do ajuste do *tap* do *OLTC* da subestação em conjunto com a reconfiguração amenizou, mas não resolveu de fato o problema de sub-tensão na barra 62, que mesmo após a reconfiguração e otimização do *tap*, permaneceu em 0,93 pu. Pode-se ainda contar com o recurso da alocação de capacitores para melhorar o perfil de tensão, trazendo ainda outros benefícios como melhoria

do fator de potência e diminuição das perdas na rede, desde que a alocação seja feita de forma criteriosa. A seguir será apresentado o algoritmo desenvolvido para realizar a reconfiguração e alocação de capacitores fixos e automáticos simultaneamente. Deve-se salientar que o algoritmo desenvolvido permite a alocação em três níveis de carga, de acordo com o adotado na literatura, e assumindo um horizonte de um ano para o cálculo da função objetivo. O Algoritmo 1 ilustrado na Figura 6.1 apresenta de forma resumida o algoritmo integrado desenvolvido.

Algoritmo 1:

LER dados e parâmetros da rede
GERAR e avaliar a população inicial (\overline{VCH})
enquanto $t > NMAX$ **faça**
 SELECIONAR os pares de indivíduos para *cruzamento*;
 se $rand[0,1] < PC_{ch}$ **então EXECUTAR** *cruzamento(ch)*;
 se $rand[0,1] < PC_{cf}$ **então EXECUTAR** *cruzamento(cf)*;
 se $rand[0,1] < PC_{ca}$ **então EXECUTAR** *cruzamento(ca)*;
 AVALIAR os indivíduos gerados e **ARMAZENAR** na matriz (VCH_H);
 TOMAR o indivíduo com a melhor avaliação armazenado na matriz (VCH_H);
 se $rand[0,1] < PM_{ch}$ **então EXECUTAR** *mutação(ch)*;
 se $rand[0,1] < PM_{cf}$ **então EXECUTAR** *mutação(cf)*;
 se $rand[0,1] < PM_{ca}$ **então EXECUTAR** *mutação(ca)*;
 se $rand[0,1] < PM_{tap}$ **então EXECUTAR** *mutação(tap)*;
 AVALIAR o indivíduos gerado;
 ARMAZENAR o indivíduo gerado em $\overline{VCH_H}$;
 SUBSTITUIR os piores indivíduos de \overline{VCH} pelos melhores de $\overline{VCH_H}$;
 $t = t + 1$;
RETORNAR o melhor indivíduo gerado

Figura 6.1: Algoritmo Genético Integrado

O algoritmo inicia lendo os dados da rede a ser otimizada e também todos os parâmetros relacionados ao ajuste da operação do Algoritmo Genético. A seguir a população inicial é gerada e avaliada utilizando os critérios já apresentados nos capítulos correspondentes. Durante um número determinado de gerações ($NMAX$), os operadores genéticos de mutação e cruzamento são executados para a reconfiguração (ch), alocação de capacitores fixos (cf) e automáticos (ca) de acordo com as respectivas probabilidades. Para a otimização do tap é realizada a mutação no vetor correspondente. Os indivíduos gerados após a execução dos operadores são armazenados na matriz $\overline{VCH_H}$ que contém a população intermediária. A cada geração, os piores indivíduos da população corrente¹, são substituídos pelos melhores indivíduos da sub-população ($\overline{VCH_H}$). Ao final de um certo número de gerações pré-determinado, a melhor configuração obtida é apresentada. As características principais do programa desenvolvido são:

¹A população inicial (\overline{VCH}) passa a ser a população corrente.

- Ajuste de todos os parâmetros relacionados à otimização incorporados no banco de dados da rede estudada;
- Possibilidade de realizar reconfiguração e alocação (capacitores fixos e automáticos), somente alocação ou somente reconfiguração;
- Possibilidade de ajustar o *tap* do *OLTC* da subestação manualmente ou de forma automática;
- Possibilidade de usar um orçamento máximo para a alocação dos capacitores;
- Emissão de relatório de fácil leitura, e possibilidade da impressão dos gráficos em *Matlab*;
- Programação em linguagem *Fortran*, o que permite maior rapidez de processamento.

6.3 Resultados obtidos

A seguir serão apresentados os resultados obtidos estudando-se as principais possibilidades de otimização para os sistemas de 69 barras e 135 barras. Para facilitar a apresentação, os estudos serão divididos por casos, numerados da seguinte forma:

- (1) Reconfiguração para diminuição de perdas de potência ativa;
- (2) Alocação de capacitores fixos na rede estado inicial (caso base);
- (3) Alocação de capacitores automáticos na rede estado inicial (caso base);
- (4) Alocação de capacitores fixos e automáticos na rede estado inicial (caso base);
- (5) Reconfiguração e alocação de capacitores fixos;
- (6) Reconfiguração e alocação de capacitores automáticos;
- (7) Reconfiguração e alocação de capacitores fixos e automáticos;
- (8) Reconfiguração e alocação de capacitores fixos e automáticos com ajuste automático do *tap* do *OLTC* da subestação.

6.3.1 Sistema de 69 barras

Os dados para o sistema de 69 barras podem ser obtidos em [21], sendo que as chaves abertas na configuração base são: [70 71 72 73 74].

A Tabela 6.1 apresenta os principais resultados obtidos nos diversos casos estudados com relação ao sistema de 69 barras. Analisando os resultados obtidos verifica-se que a opção de

menor custo é a correspondente ao caso 8, onde todos os recursos presentes no sistema são utilizados. No entanto, deve-se ressaltar que o caso 5 (reconfiguração e alocação de capacitores fixos), apresenta excelentes resultados, bastante próximos do caso 8, inclusive com um custo menor de aquisição de capacitores. A simulação para esse caso apresenta custo computacional bastante reduzido em comparação com o caso 8.

Tabela 6.1: Resultados obtidos - sistema de 69 barras

Casos	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>FOB</i> inicial (\$)/1000	146,39							
<i>FOB</i> final (\$)/1000	62,98	105,68	106,30	105,35	50,21	52,37	50,93	47,55
Custo dos caps. (\$)/1000	-	4,50	9,60	8,10	3,60	6,00	4,50	4,50
Economia (\$)/Ano/1000	83,41	40,70	40,00	41,48	96,20	94,03	95,46	98,85
Red. das perdas - pico (%)	59,34	29,36	36,56	35,59	69,66	70,12	69,66	72,12
Red. kVA de saída da <i>SE</i> - pico (%)	4,41	11,04	15,55	14,29	12,76	14,33	12,75	13,08
Red. kW de saída da <i>SE</i> - pico (%)	6,67	3,30	4,10	4,00	7,83	7,88	7,83	8,11
Red. kVAR de saída da <i>SE</i> - pico (%)	-0,29	30,69	48,39	42,59	24,50	30,31	24,50	24,97
Menor <i>V</i> (Caso base)- pico	Barra 66 - 0,82 pu							
Menor <i>V</i> (final) - Barra	62	66	66	66	62	62	62	62
Tensão (pu)	0,89	0,84	0,86	0,87	0,91	0,91	0,91	0,96
ΔV (base) - pico	5,09 %							
ΔV (final) - pico (%)	2,37	4,39	4,02	4,15	2,12	1,91	2,29	2,20
<i>Red.</i> ΔV - pico (%)	53,37	13,81	21,11	18,50	58,32	62,39	54,95	56,90
Carreg. máximo inicial (Caso base)	3,22							
Carreg. máximo final	4,83	3,48	3,60	3,60	5,16	5,16	5,17	5,60
Aumento do Carreg. máximo final (%)	50,00	8,07	11,80	11,80	60,24	60,24	60,56	73,91
População inicial	100	100	300	300	300	500	400	500
Num. gerações	500	1900	2000	3000	2000	3000	4000	6000
Indiv. Torneio	2	2	2	2	2	4	4	4
Reconfiguração								
Ponto inicial de corte (%)	40	-	-	-	40	10	10	10
Ponto final de corte (%)	100	-	-	-	100	100	100	100
Probab. cruzamento (%)	40	-	-	-	20	70	70	70
Probab. mutação (%)	9	-	-	-	10	15	10	10
Capacitores Fixos								
Ponto inicial de corte (%)	-	70	-	70	70	-	50	50
Ponto final de corte (%)	-	100	-	100	100	-	100	100
Probab. <i>crossover</i> (%)	-	40	-	40	40	-	30	30
Probab. mutação (%)	-	4	-	4	4	-	30	30
Capacitores automáticos								
Ponto inicial de corte (%)	-	-	80	80	-	80	80	80
Ponto final de corte (%)	-	-	100	100	-	100	100	100
Probab. cruzamento (%)	-	-	50	50	-	90	90	90
Probab. mutação (%)	-	-	10	10	-	30	30	30
Tempo médio de execução (s) ²	1,70	5,8	6,64	14,39	9,89	39,37	59,76	97,47

A Tabela 6.2 apresenta as configurações encontradas pelo algoritmo, agora detalhando as

²Utilizando PC com processador pentium IV e 4 GB de memória

chaves abertas na configuração final do sistema.

Tabela 6.2: Chaves abertas - Sistema de 69 barras

Casos	1	5	6	7	8
Chaves abertas	15 59 62 70 71	15 58 62 70 71	15 58 62 70 71	15 56 62 70 71	15 56 62 70 71

A Tabela 6.3 apresenta os bancos de capacitores fixos e automáticos alocados nas barras do sistema.

Tabela 6.3: Capacitores alocados - Sistema de 69 barras

Casos	2	3	4	5	6	7	8
Capacitores fixos	20(1), 62(4)	-	22(1)	62(3), 65(1)	-	65(1)	65(1)
Capacitores automáticos	-	19(0,1,2) 62(2,4,6)	62(2,4,6)	-	62(2,3,3) 64(1,1,2)	62(2,3,3)	62(2,3,3)

A Figura 6.2 apresenta o estado final do sistema de 69 barras para o caso 8, onde todos os recursos do sistema são utilizados. Note que agora não há violação de tensão.

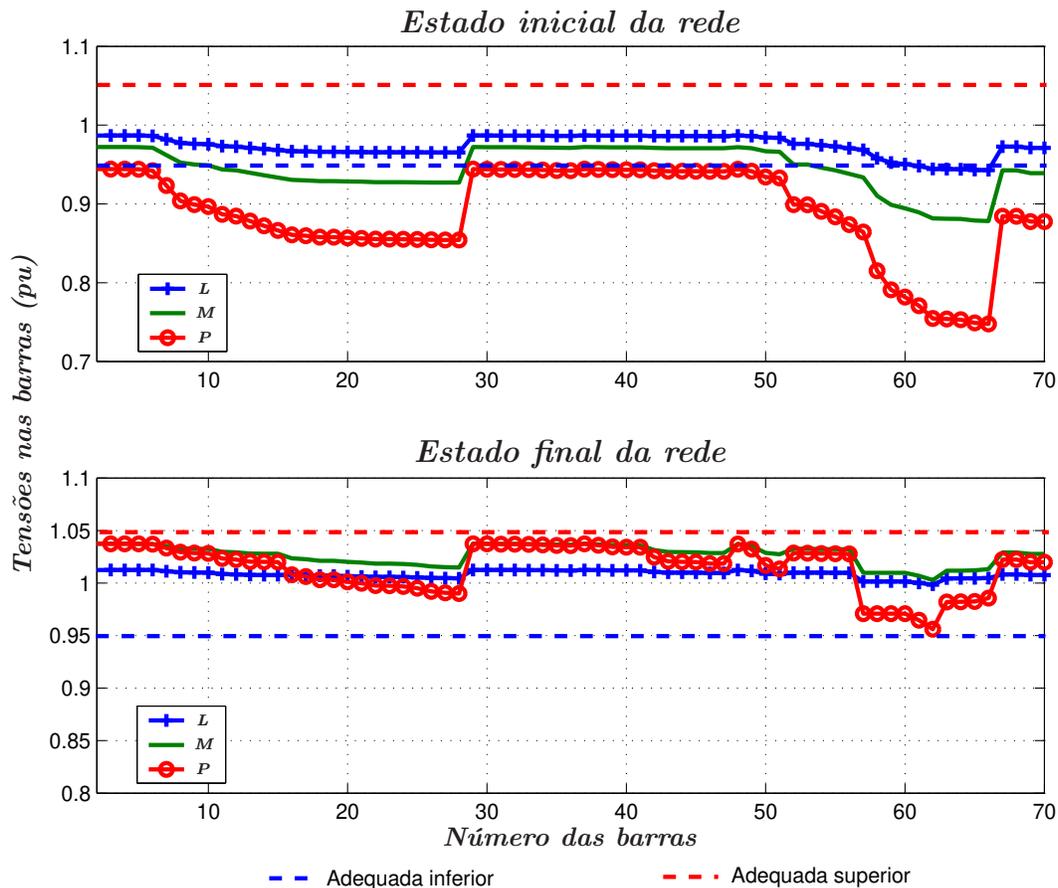


Figura 6.2: Estado da rede de 69 barras antes e após a otimização.

6.3.2 Sistema de 135 barras

Os dados para o sistema de 135 barras podem se obtidos em [21], sendo que as chaves abertas na configuração base são: [137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157]. Os parâmetros tais como T_0 , T_1 , T_2 , S_0 , S_1 e S_2 são os mesmos do caso de 69 barras. A Tabela 6.4 apresenta os resultados obtidos para esse sistema.

Tabela 6.4: Resultados obtidos - sistema de 135 barras

Casos	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>FOB</i> inicial (\$)/1000	201,57							
<i>FOB</i> final (\$)/1000	174,98	192,55	193,75	193,37	172,18	174,35	172,54	161,89
Custo dos caps. (\$)/1000	0	7,20	4,80	8,40	6,30	6,00	6,90	6,00
Economia (\$)/Ano/1000	26,59	9,35	7,90	8,20	29,40	27,22	29,04	39,70
Red. das perdas - pico (%)	14,65	8,98	3,90	8,90	19,33	18,46	19,52	27,34
Red. kVA de saída da <i>SE</i> - pico (%)	0,82	3,09	1,72	3,09	3,33	2,67	3,35	3,45
Red. kW de saída da <i>SE</i> - pico (%)	0,48	0,29	0,22	0,29	0,64	0,60	0,64	0,89
Red. kVAR de saída da <i>SE</i> - pico (%)	2,25	15,70	8,22	15,70	15,45	11,77	15,54	14,88
Menor <i>V</i> (Caso base)- pico	Barra 118 - 0,86 pu							
Menor <i>V</i> (final) - Barra Tensão (pu)	107 (0,93)	86 (0,90)	118 (0,89)	118 (0,90)	76 (0,94)	118 (0,94)	86 (0,94)	86 (0,99)
ΔV (base) - pico	4,70 %							
ΔV (final) - pico	4,18	4,09	4,28	4,09	3,83	3,93	3,78	3,61
Red. ΔV - pico (%)	11,04	12,83	8,90	12,83	18,44	16,33	19,50	23,18
Carreg. máximo inicial (Caso base)	3,70							
Carreg. máximo final	6,00	3,98	3,97	3,98	6,10	5,88	6,20	6,70
Aumento do Carreg. máximo final (%)	62,16	7,56	7,29	7,56	64,86	60,24	58,92	81,08
População inicial	100	100	100	100	100	100	200	300
Num. gerações	1800	2000	2000	2500	2500	2500	5000	5000
Indiv. Torneio	2	2	2	4	4	4	4	4
Reconfiguração								
Ponto inicial de corte (%)	60	-	-	-	60	60	60	60
Ponto final de corte (%)	100	-	-	-	100	100	100	100
Probab. cruzamento (%)	20	-	-	-	20	20	20	20
Probab. mutação (%)	13	-	-	-	13	13	13	13
Capacitores Fixos								
Ponto inicial de corte (%)	-	50	-	50	50	-	50	50
Ponto final de corte (%)	-	100	-	100	100	-	100	100
Probab. cruzamento (%)	-	40	-	30	30	-	30	30
Probab. mutação (%)	-	10	-	10	10	-	10	10
Capacitores automáticos								
Ponto inicial de corte (%)	-	-	50	50	-	50	50	50
Ponto final de corte (%)	-	-	100	100	-	100	100	100
Probab. cruzamento (%)	-	-	40	40	-	50	50	50
Probab. mutação (%)	-	-	15	16	-	16	16	16
Tempo médio de execução (s)	68,33	24,10	25,10	52,70	121,93	141,34	277,10	278,00

A Tabela 6.5 apresenta as configurações encontradas pelo algoritmo, agora detalhando as

chaves abertas na configuração final do sistema.

Tabela 6.5: Chaves abertas - sistema de 135 barras

Casos	1	5	6	7	8
Chaves abertas	8 39 52 54 91 97 107 119 138 139 145 146 147 148 149 151 152 142 127 156 157	8 39 52 91 107 119 136 138 139 142 143 145 146 85 148 149 151 152 153 127 156	8 52 54 85 91 97 107 119 127 129 138 139 140 145 146 148 149 151 152 142 157	138 52 54 91 97 107 119 127 8 139 140 142 145 146 136 148 149 151 152 156 157	8 39 52 54 91 97 107 119 127 129 138 139 142 145 146 147 148 149 151 152 157

A Tabela 6.6 apresenta os bancos de capacitores fixos e automáticos alocados nas barras do sistema.

Tabela 6.6: Capacitores alocados - sistema de 135 barras

Casos	2	3	4	5	6	7	8
Capacitores fixos	12(2), 33(2) 107(4)	- -	10(2) 33(2)	49(2), 57(3) 107(2)	- -	30(3) 64(2)	33(2) 113(2)
Capacitores automáticos	- -	107(2,4,4)	107(2,4,4)	- -	60(1,2,2) 107(2,3,3)	107(1,2,2)	107(1,2,2)

A Figura 6.3 apresenta o estado final do sistema de 135 barras para o caso 8, onde todos os recursos do sistema são utilizados.

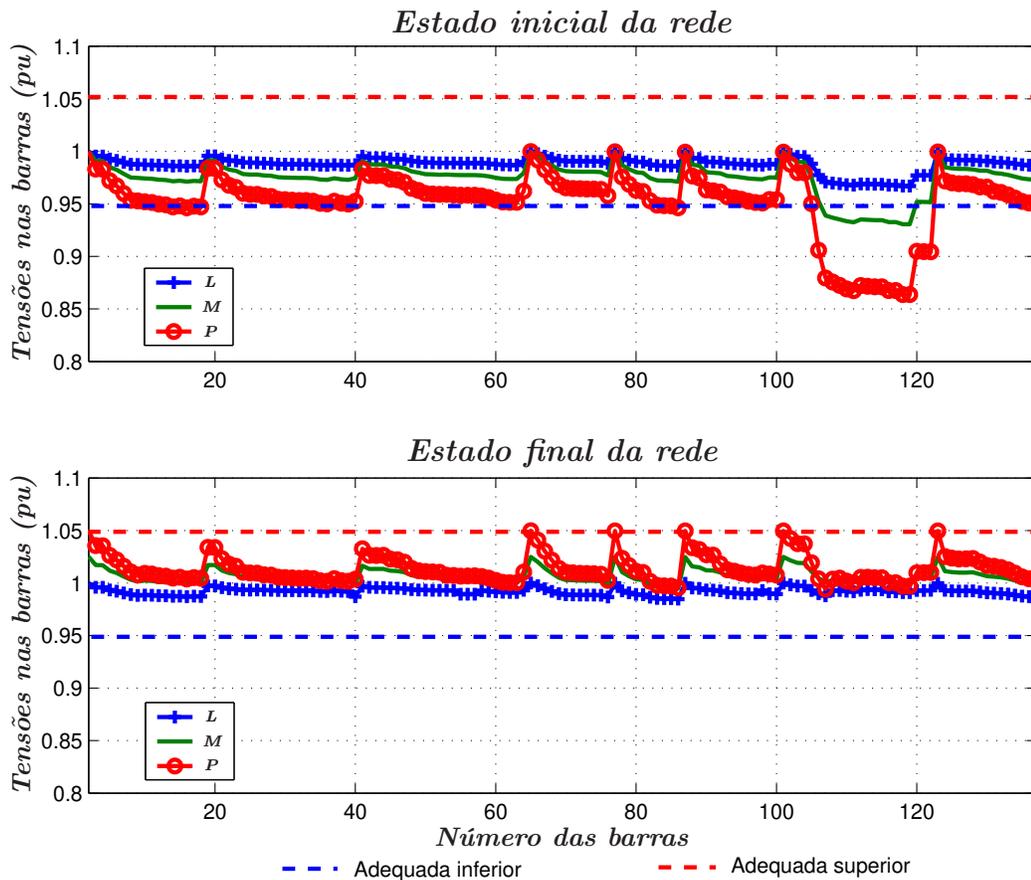


Figura 6.3: Estado da rede de 135 barras antes e após a otimização.

6.3.3 Considerações

Os algoritmos desenvolvidos no decorrer deste trabalho, mostraram-se bastante eficientes no sentido de encontrar excelentes configurações, para todos os casos testados.

Embora seja difícil realizar comparações com relação aos tempos de execução, percebe-se que o tempo máximo obtido para o sistema de 135 barras é inferior a 5 minutos, o que permite que o algoritmo seja utilizado para simulações em tempo real para redes de pequeno/médio porte.

Analisando os resultados obtidos para o sistema de 69 barras, observa-se que a economia máxima obtida é para o caso 8, onde todos os recursos de otimização são utilizados. Deve-se ressaltar os resultados obtidos para o caso 5, onde o valor final da função objetivo é bem próximo daquele obtido para o caso 8.

Para os sistemas de 69 e 135 barras, verifica-se que, para conseguir o pleno atendimento das cargas nas tensões normalizadas, é necessário utilizar todos os recursos presentes na rede.

As configurações finais obtidas para os dois sistemas testados, e considerando as condições

de carregamento e horizonte impostas, atendem plenamente às restrições de limite de tensão, condição importante para uma boa qualidade de energia elétrica suprida aos clientes.

6.4 Coordenação entre o *OLTC* e capacitores automáticos

Nos capítulos anteriores os sistemas de distribuição foram otimizados através da reconfiguração, alocação de capacitores fixos e automáticos e ajuste do *tap* do *OLTC* da subestação. Para os casos estudados foi considerado um horizonte de um ano e três níveis de carga (leve, médio e pesado). Ao final do processo de otimização, uma configuração de boa qualidade é obtida, com menor custo possível, minimizando as perdas de potência ativa. Isso significa que, se mantidos os níveis de carregamento para o sistema, essa configuração obtida deve atender as expectativas com relação à confiabilidade e atendimento dos clientes de forma satisfatória no horizonte estudado. Na prática no entanto, a carga não varia apenas na faixa adotada, mas sim de acordo com uma curva de carga diária específica para cada tipo de cliente que, de forma geral, são divididos em residencial, comercial e industrial. A Figura 6.4 ilustra uma curva de carga tipicamente residencial [52].

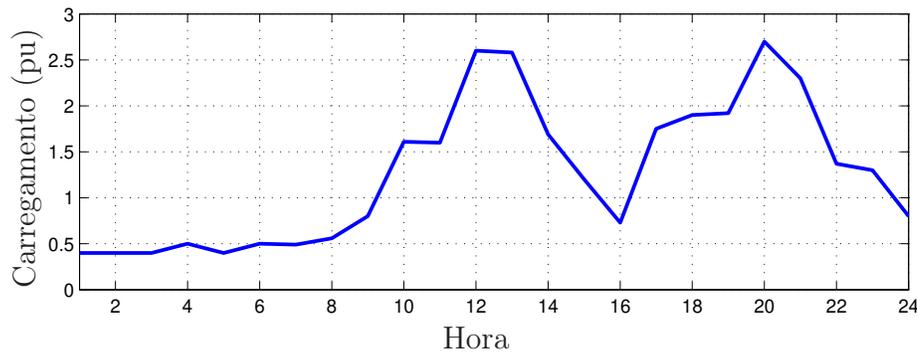


Figura 6.4: Curva típica de carga residencial

Observa-se na Figura 6.4 que existe uma grande variação de carga no decorrer do dia e, para manter a tensão o mais constante possível, as subestações em geral possuem transformadores com ajuste de tensão automático sob carga (*OLTC*) e reguladores automáticos de tensão (AVR). A seção 4.2.9 apresenta alguns detalhes da metodologia utilizada para o ajuste do *tap* do *OLTC*. No problema em questão não foram considerados limites diários do número de operações do comutador de *tap* pois foram considerados apenas três níveis de carga. Na prática, no entanto, o comutador de *tap* pode ser manobrado diversas vezes, de acordo com a curva de carga diária. De acordo com [59] o intervalo típico de manutenção do *OLTC* é de aproximadamente 7 anos ou 100.000 operações. Isso significa que aproximadamente 39 operações diárias é o número máximo de operações com o *tap*. Para tentar minimizar o número de manobras com os *tap*, é proposto nessa seção um algoritmo baseado em *simulated annealing* [45], que otimizará as operações do *tap* do *OLTC*, realizando o controle de potência de forma coordenada com os capacitores automáticos instalados na rede. Para essa finalidade será utilizada a melhor configuração obtida com o algoritmo integrado, que contém todas as informações a respeito dos capacitores fixos, automáticos e topologia final da rede obtida. A Figura 6.5 ilustra o diagrama de blocos básico para a estratégia proposta.

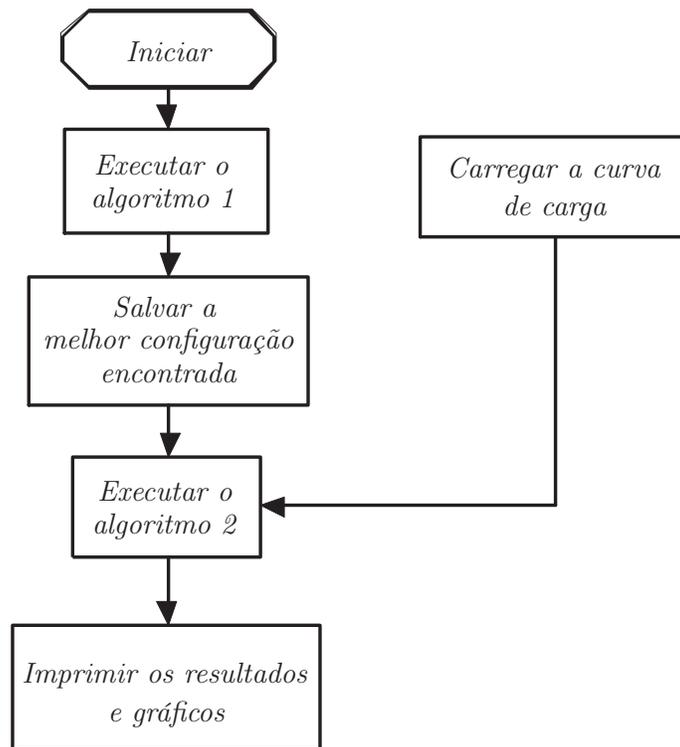


Figura 6.5: Algoritmo integrado.

Na Figura 6.5, o algoritmo 1 realiza toda a otimização com relação à reconfiguração e alocação de capacitores e o algoritmo 2 realiza a otimização do controle de *tap* através da coordenação do *tap* do *OLTC* e da comutação dos capacitores automáticos previamente alocados. Salienta-se que o algoritmo 2 realiza a otimização considerando que os capacitores automáticos possuem apenas dois *taps* (0) = desligado e (1) = ligado.

Para estimar a tensão no secundário do transformador é utilizado o modelo mostrado em [73], e apresentado na Figura 6.6.

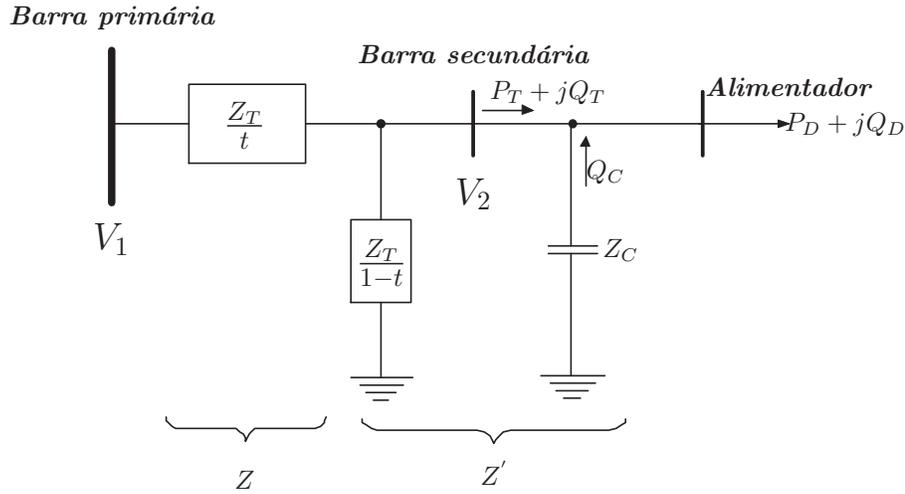


Figura 6.6: Modelo do transformador da subestação.

Na Figura 6.6 tem-se:

V_1 - tensão no primário do transformador;

V_2 - tensão no secundário do transformador;

Z_T - impedância do transformador;

t - relação de transformação do *OLTC*;

P_D - potência ativa demandada;

Q_D - potência reativa demandada.

A resistência ôhmica dos enrolamentos bem como a admitância de magnetização serão ignoradas no presente estudo. Para calcular a tensão no secundário do transformador $|V_2|$, serão utilizadas as equações de potência ativa e reativa:

$$P_D = \frac{|V_1||V_2|}{|Z|} \text{sen}(\angle V_1 - \angle V_2) \quad (6.1)$$

$$P_D = \frac{|V_1||V_2|}{|Z|} \text{sen}(\theta_{12}) \quad (6.2)$$

$$Q_D = \left(-\frac{|V_2|}{|Z|} + \frac{|V_1||V_2|}{|Z|} \cos \theta_{12} \right) - \frac{|V_2|^2}{|Z'|} \quad (6.3)$$

A equação (6.3) pode ser reescrita como:

$$\left[Q_D + \frac{|V_2|^2}{|Z|} + \frac{|V_2|^2}{|Z'|} \right]^2 = \frac{|V_1|^2 |V_2|^2}{|Z|^2} \cos^2 \theta_{12} \quad (6.4)$$

Combinando as equações (6.2) e (6.4):

$$\left[Q_D + \frac{|V_2|^2}{|Z''|} \right]^2 = \frac{|V_1|^2 |V_2|^2}{|Z|^2} - P_D^2 \quad (6.5)$$

onde:

$$|Z''| = \left[\frac{1}{|Z|} + \frac{1}{|Z'|} \right]^{-1}$$

Expandindo a equação (6.5):

$$|V_2|^4 + \left(2Q_D |Z''| - \frac{|Z''|^2}{|Z|^2} |V_1|^2 \right) |V_2|^2 + (P_D^2 + Q_D^2) |Z''|^2 = 0 \quad (6.6)$$

A partir da equação (6.6) a tensão no secundário do transformador V_2 pode ser escrita como:

$$|V_2|^2 = \frac{1}{2} \frac{|Z''|^2}{|Z|^2} |V_1|^2 - Q_D |Z''| \pm \left[\frac{1}{4} \frac{|Z''|^4}{|Z|^4} |V_1|^4 - P_D^2 |Z''|^2 - Q_D \frac{|Z''|^3}{|Z|^2} |V_1|^2 \right]^{1/2} \quad (6.7)$$

Considerando que o capacitor *shunt* Z_C esteja desligado tem-se: $Z' = Z_T/(1-t)$ e:

$$|Z''| = |Z_T| = \left(\frac{1}{|Z|} + \frac{1}{Z'} \right)^{-1} = \left(\frac{t}{|Z_T|} + \frac{1-t}{|Z_T|} \right)^{-1} \quad (6.8)$$

$$\frac{|Z''|}{|Z|} = \frac{|Z_T|}{|Z_T|/t} = t \quad (6.9)$$

Através das equações (6.8) e (6.9) a relação de tensões t pode ser obtida das equações (6.5) e (6.6):

$$t = \left\{ \frac{|Z_T|^2}{|V_1|^2|V_2|^2} \left[\left(Q_D + \frac{|V_2|^2}{|Z_T|} \right)^2 + P_D^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (6.10)$$

$$|V_2|^2 = \frac{1}{2}t^2|V_1|^2 - |Z_T|Q_D + \left[\frac{1}{4}t^4|V_1|^4 - |Z_T|^2P_D^2 - t^2|Z_T|Q_D|V_1|^2 \right]^{1/2} \quad (6.11)$$

Um dos objetivos a serem alcançados no controle de potência reativa e controle de tensão é manter a tensão no secundário do transformador da subestação $|V_2|$ o mais próximo possível de uma certa tensão especificada, apesar das variações da carga ($P_D + jQ_D$) em função do tempo. Para alcançar esse objetivo, a relação de transformação do transformador da subestação deve ser alterada, de forma a compensar as variações de carga que ocorrem durante o dia. De forma geral essa relação pode ser alterada em múltiplos de 0,0125 pu. Assim, t pode ser relacionado à posição do *tap* do *OLTC* da seguinte forma:

$$t = 1 + tap \cdot (0.0125) \quad (6.12)$$

A tensão no secundário do transformador pode ser obtida a partir da equação (6.11). Admitindo-se que o capacitor *shunt* Z_C está ligado, a impedância Z' é:

$$Z' = \left[\left(\frac{|Z_T|}{1-t} \right)^{-1} - (Z_C)^{-1} \right]^{-1} \quad (6.13)$$

Assim:

$$|Z''| = k|Z_T| \quad (6.14)$$

$$\frac{|Z''|}{|Z|} = kt \quad (6.15)$$

onde:

$$k = \frac{|Z_C|}{|Z_C| - |Z_T|} \quad (6.16)$$

Substituindo nas equações (6.10) e (6.11) tem-se:

$$t = \left\{ \frac{|ZT|^2}{|V_1|^2|V_2|^2} \left[\left(Q_D + \frac{|V_2|^2}{k|Z_T|} \right)^2 + P_D^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (6.17)$$

$$|V_2|^2 = \frac{1}{2}(kt)^2|V_1|^2 - (k|Z_T|)Q_D + \left[\frac{1}{4}(kt)^4|V_1|^4 - (k|Z_T|)^2P_D^2 - (kt)^2(k|Z_T|)Q_D|V_1|^2 \right]^{1/2} \quad (6.18)$$

A equação (6.18) permite calcular de maneira aproximada a tensão na barra 2 (secundário do transformador), desde que as potências ativas e reativas demandadas sejam conhecidas. A vantagem é evitar a execução de um fluxo de carga completo apenas com o objetivo de calcular a tensão na barra 2.

6.5 Função Objetivo

Conforme já exposto, as configurações geradas pelo algoritmo 1 são propostas de reconfiguração e alocação de capacitores para um horizonte de estudo de 1 ano (8760 horas) utilizando três níveis de carregamento (leve, médio e pesado). Para um estudo mais preciso, onde as variações horárias de carga são constantes, é necessário utilizar um período de estudo de 24 horas e analisar quais posições de *taps* do *OLTC* são necessárias para manter a tensão na barra 2 o mais próximo possível do valor desejado. Havendo capacitores automáticos instalados, esses serão utilizados para melhorar o perfil de tensão da rede nos períodos de carga mais elevada, de forma a diminuir a solicitação de manobras do *tap* do *OLTC*. Assim, a função objetivo proposta para representar o problema pode ser escrita como [73]:

$$\min F = \sum_{i=1}^{24} (|V_2| - |V_{2,i}|) + \sum_{i=1}^{24} |Q_{T,i}| \quad (6.19)$$

s.a.

$$\sum_{i=1}^{24} |TAP_i - TAP_{i-1}| \leq 30;$$

$$\sum_{i=1}^{24} |X_{n,i} - X_{n,i-1}| \leq M_n \quad n = 1, 2, \dots, N_{ca}$$

$$|V_2^{min}| \leq |V_{2i}| \leq |V_2^{max}| \quad i = 1, 2, \dots, 24$$

onde:

- $|V_2|$: é a tensão especificada para a barra 2;
- $|V_{2,i}|$: representa a tensão na hora i na barra 2;
- $|Q_{T,i}|$: é o fluxo de potência reativa pelo transformador;
- $|TAP_i|$: representa a posição do *tap* do transformador na hora i . Por exemplo para um transformador com 16 posições de *tap* fora do nominal, as posições são dadas por $TAP = [-8, -7, \dots, 0, 1 \dots, 8]$;
- $|X_{n,i}|$: representa o estado do capacitor n na hora i ;
- N_{ca} : é o número de capacitores automáticos instalados no sistema;
- M_n : é o número máximo de manobras do *tap* do capacitor por dia.

A equação (6.19) representa o modelo matemático para a coordenação da manobra do *tap* do *OLTC* da subestação e os *taps* dos capacitores automáticos instalados no sistema. Para a determinação das posições ótimas dos *taps* foi desenvolvido um algoritmo de *SA*, sendo que a equação (6.19), em conjunto com as restrições, são integradas em uma função que representa a “energia” do sistema. No problema estudado a função “energia” pode ser escrita como [73]:

$$\begin{aligned}
E = & \sum_{i=1}^{24} (|V_2| - |V_{2,i}|) + \sum_{i=1}^{24} |Q_{T,i}| + p_1 \max \left\{ 0, \sum_{n=1}^{24} |TAP_i - TAP_{i-1}| - 30 \right\} \\
& + p_2 \left[\sum_{n=1}^{n_{ca}} \max \left\{ 0, \sum_{i=1}^{24} |X_{n,i} - X_{n,i-1}| - M_n \right\} \right] \\
& + p_3 \left[\sum_{i=1}^{24} \max \{ 0, |\Delta V_{2,i}| - 0.05 \} \right] \tag{6.20}
\end{aligned}$$

onde p_1 , p_2 e p_3 são fatores de penalidade (números positivos).

6.6 Codificação das soluções candidatas

Cada solução do problema deve conter todas as informações necessárias para o cálculo da função “energia”, necessária para avaliar as soluções candidatas. Assim, para a representação do problema, é necessário um conjunto de vetores, sendo que para cada hora do dia será representada uma posição do *tap* do *OLTC* e dos capacitores instalados na rede. Uma possível solução para o problema a ser estudado é ilustrada na Figura 6.7.

1	Hora						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2	Tr	70	71	15	58	62	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2	2	4	3	3	3	1
3	C_1	62	1	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0
4	C_2	68	1	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0
5	C_3	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	C_4	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

1
 NCH
 $NCH+24$

$NCH+1$

Figura 6.7: Representação de uma solução do problema

Na linha 1 é representada a hora em que são realizados as comutações dos capacitores automáticos e o *tap* do *OLTC*.

A linha 2 armazena as informações referentes à topologia do sistema e do *tap* do *OLTC*, sendo que as colunas $(1, \dots, NCH)$ armazenam as posições das chaves e as colunas $(NCH+1, \dots, NCH+24)$ armazenam as posições do *tap* do *OLTC*.

As linhas 3 a 6 armazenam as informações referentes aos capacitores automáticos instalados no sistema, sendo que a coluna 1 contém a barra em que o banco de capacitores está instalado e a coluna 2 a capacidade do respectivo banco. A partir da coluna $(NCH+1)$ até a posição $(NCH+24)$ são armazenadas as informações referentes ao *tap* dos capacitores, que podem assumir as posições 1 ou 0 (ligado ou desligado).

Verifica-se para esse exemplo que o ajuste do *tap* do *OLTC* é maior no período de ponta (entre 18 e 22 horas), onde também ambos os capacitores automáticos estão com os *taps* em *on*.

6.7 Geração da solução inicial

A geração da solução inicial é importante pois influi diretamente no desempenho global do algoritmo. As abordagens tradicionais de SA recomendam que as soluções sejam geradas aleatoriamente, pois assim consegue-se uma maior diversidade de soluções candidatas, de modo a aumentar a probabilidade de alcançar a solução ótima global. Essa abordagem é bastante coerente e interessante para problemas como otimização de funções e outros problemas de otimização que envolvam codificação binária por exemplo. Para o problema estudado, fica claro que essa abordagem não seria eficiente, bastando para tanto atentar para o fato que o vetor de soluções para o *tap* do *OLTC* possui 17 variáveis ($[-8, -7, \dots, 0, 1, \dots, 8]$). Adotando-se a proposta de geração aleatória, em uma determinada hora i pode-se gerar qualquer posição de *tap*. Assim por exemplo para a hora 4, poderia haver um *tap* -8, e para a hora 5 *tap* 8. Sabe-se que na prática isso não ocorre, sendo que o *tap* varia poucos *steps* de cada vez, controlado inclusive por um dispositivo de retardo (tempo morto). Esse dispositivo tem por finalidade evitar a manobra do *tap* para a correção de desvios de tensão de curta duração. Considerando esses problemas, foi desenvolvido um algoritmo para a geração da solução inicial que realiza

pequenas alterações em torno de uma posição de *tap* pré-definida qualquer.

A Figura 6.8 representa de forma simplificada o algoritmo desenvolvido para a geração da solução (indivíduo) inicial.

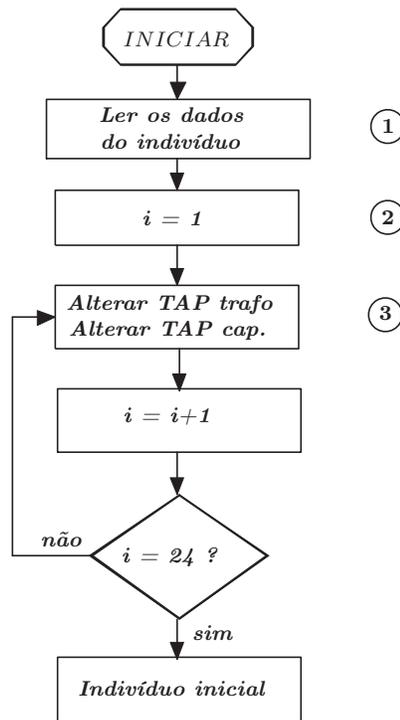


Figura 6.8: Geração da solução inicial.

O módulo (1) realiza a leitura dos dados do melhor indivíduo encontrado pelo algoritmo 1 com relação à topologia da rede, capacitores fixos e automáticos instalados, posições ajustadas no *tap* do *OLTC* e curva de carga desejada. O módulo (2) corresponde a um contador de hora. O módulo (3) realiza uma pequena alteração no *tap* do *OLTC* e dos capacitores na hora i . Essa alteração consiste em alterar o *tap* para cima ou para baixo no caso do *OLTC* (+1, -1). Para os capacitores automáticos, os mesmos são desligados ou ligados. Para cada alteração efetuada é realizado um cálculo da função objetivo. A alteração é permitida somente se houver melhoria do indivíduo.

A geração do indivíduo inicial já leva em conta a curva de carga carregada, tendo como vantagem que a solução inicial já é de boa qualidade (com ajustes dos *taps* em posições que melhorem a função objetivo), o que contribui para uma melhoria da solução final encontrada pelo algoritmo de *SA*.

6.8 Mecanismo de perturbação

A partir da solução gerada pelo algoritmo apresentado, uma pequena alteração deverá ser realizada no indivíduo. Através do cálculo da “energia” verifica-se se essa perturbação foi benéfica, diminuindo a “energia” ou maléfica, em caso contrário. O mesmo raciocínio é utilizado no mecanismo de perturbação, evitando alterações de grande monta, o que não corresponde a uma realidade prática. A seguir é ilustrado de forma simplificada o algoritmo desenvolvido para a realização da perturbação das soluções.

- (1) Obter uma solução inicial a partir do algoritmo da Figura 6.8;
- (2) Calcular a tensão da barra 2 (V_2) através da equação 6.18;
- (3) Escolher aleatoriamente um hora entre 1 e 24 para realização da alteração do *tap* do *OLTC*;
- (4) Obter o *tap* do *OLTC* (TAP) na hora escolhida,
 - (4a) Se $V_2 < 1$ pu e $TAP < TAP_{max}$, aumentar 1 posição de TAP ;
 - (4b) Se $V_2 > 1$ pu e $TAP > TAP_{min}$, diminuir 1 posição de TAP ;
- (5) Armazenar a nova posição do TAP ;
- (6) Escolher aleatoriamente um dos bancos de capacitores automáticos instalados;
- (7) Determinar aleatoriamente uma hora de 1 a 24;
- (8) Ligar ou desligar aleatoriamente na hora determinada o banco de capacitores automáticos escolhido;
- (9) Fim.

O algoritmo inicia com o cálculo das tensões na barra 2, levando em conta a curva de carga diária desejada, através da equação (6.18). Um número aleatório é gerado para determinar em qual hora será efetuada a alteração do *tap* do *OLTC*. O *tap* para a hora determinada é ajustado para cima ou para baixo, dependendo da tensão da barra 2 na hora selecionada. Para os bancos de capacitores automáticos, são escolhidos de forma aleatoria o banco a ser alterado e a hora da alteração sendo que o *tap* do banco escolhido pode assumir aleatoriamente os valores zero e um (ligado ou desligado).

6.9 Algoritmo proposto

A Figura 6.9 ilustra de forma simplificada o algoritmo *SA* desenvolvido.

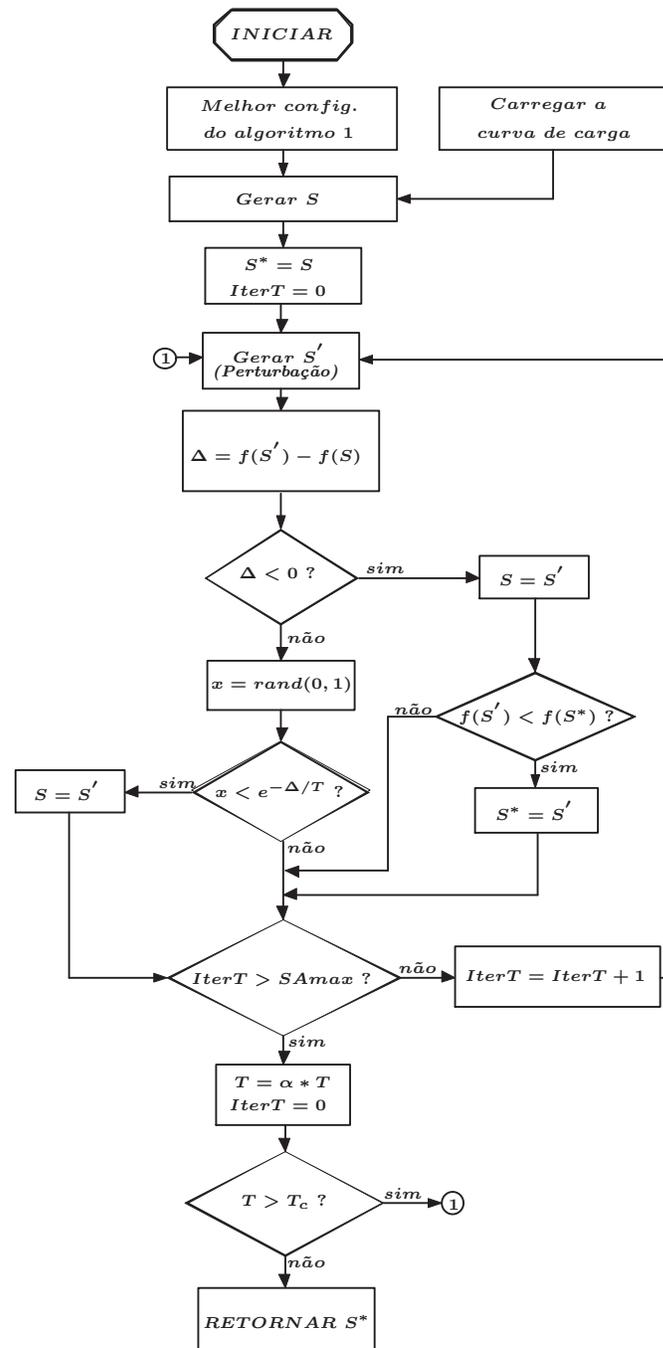


Figura 6.9: Algoritmo SA proposto

O algoritmo inicia carregando a melhor configuração obtida pelo algoritmo 1 e a curva de carga desejada. Baseando-se na configuração inicial e utilizando os valores de carregamento horário da curva de carga, uma solução inicial (S), é gerada através do algoritmo já apresentado na Figura 6.8. A solução gerada é considerada a melhor até o momento (S^*) e o contador de iterações a uma dada temperatura ($IterT$) é inicializado. A partir de (S) uma nova solução (S')

é gerada através do mecanismo de perturbação. A “energia” da configuração obtida é comparada com a anterior ($\Delta = f(S') - f(S)$), sendo aceita caso tenha valor inferior. Caso contrário, pode ser aceita com certa probabilidade dada por ($x < e^{-\Delta/T}$). Um número de iterações a uma dada temperatura T é determinada por SAm_{ax} . O processo se repete enquanto a temperatura T for menor que a temperatura de “congelamento” (T_c).

6.10 Resultados obtidos

A seguir serão apresentados os resultados obtidos para os sistema de 69 e 135 barras. As configurações de partida para o algoritmo SA serão retiradas das tabelas 6.1 e 6.4, onde serão utilizados para os testes os casos base, 4 e 8. A otimização pelo algoritmo de SA será realizada considerando a curva de carga mostrada na Figura 6.4.

A apresentação dos resultados será dividida em casos da seguinte forma:

- (1) Otimização para o sistema no caso base. Nesse caso apenas o *tap* do $OLTC$ será otimizado;
- (2) Otimização para o sistema no caso base com capacitores fixos e automáticos alocados (caso 4 das tabelas 6.1 e 6.4);
- (3) Otimização para o sistema no caso base com capacitores fixos e automáticos alocados e o sistema reconfigurado (caso 8 das tabelas 6.1 e 6.4).

6.10.1 Sistema de 69 barras

A figura 6.10 ilustra as tensões na barra 2 do sistema de 69 barras antes da execução do algoritmo SA .

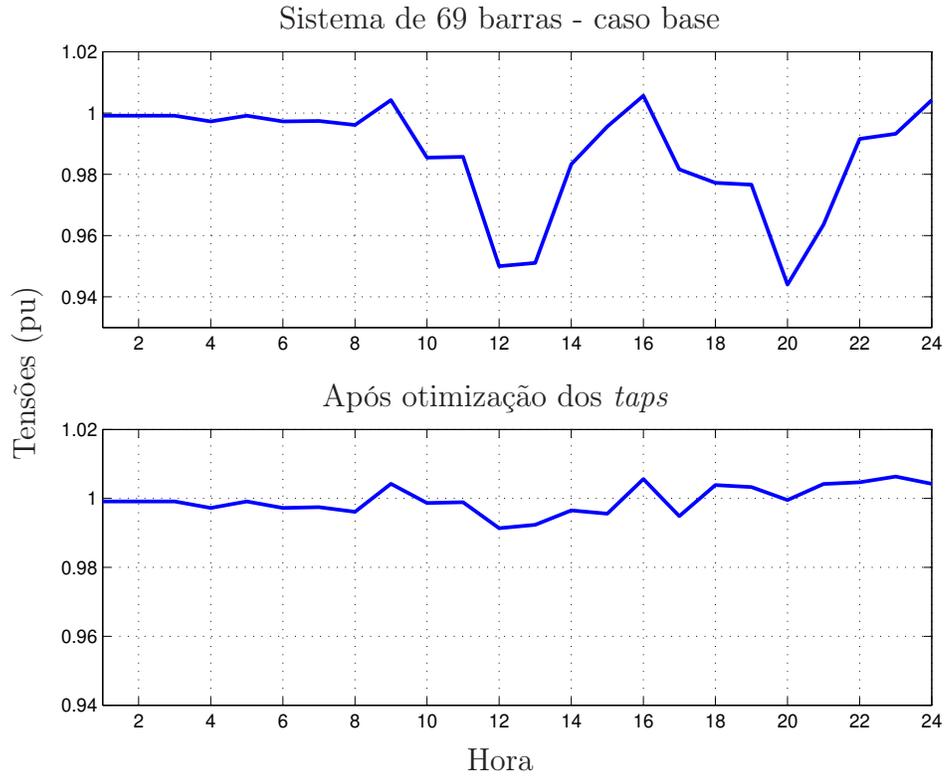


Figura 6.10: Tensões na barra 2 - antes e após a otimização.

Observa-se uma grande variação no nível de tensão, em especial no horário das 19 as 21 horas, onde ocorre o maior carregamento do sistema, de acordo com a Figura 6.4. O efeito da otimização do *tap* do *OLTC* nas tensões da barra 2 para o sistema de 69 barras estudado é o de uniformizar as tensões em torno do valor de 1 pu.

A Figura 6.11 apresenta as posições do *tap* do *OLTC* em função da hora para a obtenção do perfil de tensão mostrado na Figura 6.10.

1	Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2	<i>Taps OLTC</i>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	1	3	3	1	0	0	1	2	2	4	3	1	1	0
3	C_1	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	C_2	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	C_3	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	C_4	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 6.11: Posições do *tap* do *OLTC* em função do tempo.

Para esse caso, foram necessárias 15 manobras no *tap* do *OLTC* para a manutenção da tensão dentro da faixa de aproximadamente 1 pu.

A Figura 6.12 ilustra de forma gráfica a operação do *OLTC* em função do tempo.

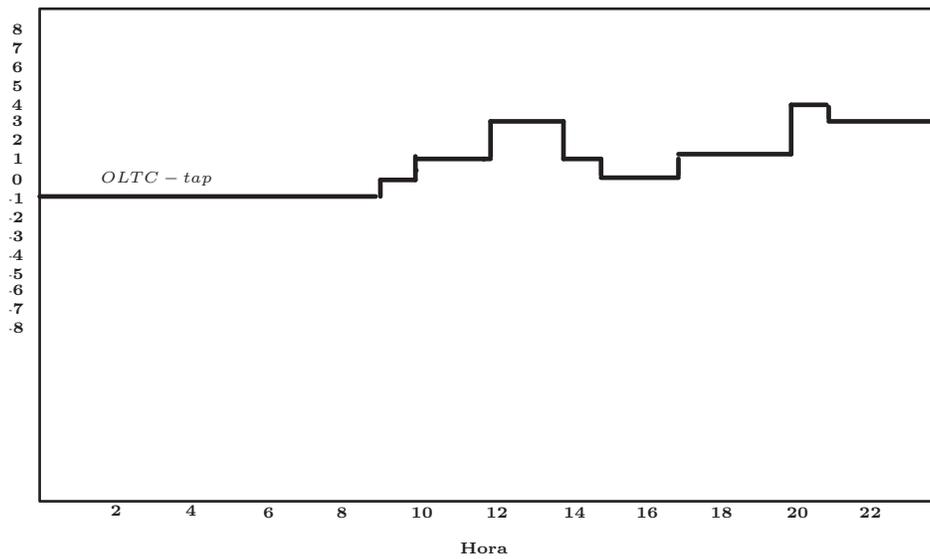


Figura 6.12: Posições do *tap* do *OLTC* - caso 1.

Com a alocação de capacitores fixos e automáticos na rede (caso 4 da Tabela 6.1), obtém-se o perfil de tensão da barra 2 ilustrado na Figura 6.13.

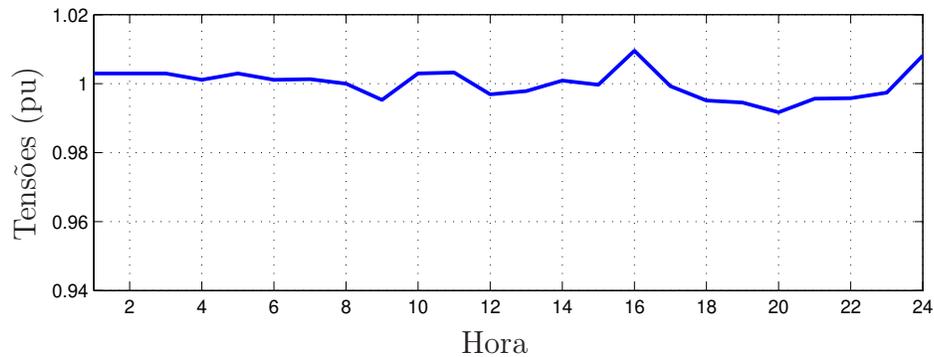


Figura 6.13: Tensões na barra 2 - após a otimização do *tap* do *OLTC* e capacitores automáticos.

Houve uma diminuição de 15 para 13 manobras do *tap* do *OLTC*, sendo que as respectivas posições com relação à hora do dia pode ser observado na Figura 6.14.

1	Hora																									
2	<i>Tap OLTC</i>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	3	3	1	0	0	1	1	1	1	3	2	0	0	0
3	C_1	19	2	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	C_2	6	5	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
5	C_3	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	C_4	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 6.14: Posições do *tap* do *OLTC* e capacitores automáticos.

Observa-se que o capacitor C_1 alocado na barra 19 permanece na posição ligado durante todo o período, comportando-se como um capacitor fixo.

A Figura 6.15 ilustra graficamente a operação do *OLTC* e dos capacitores em função do tempo.

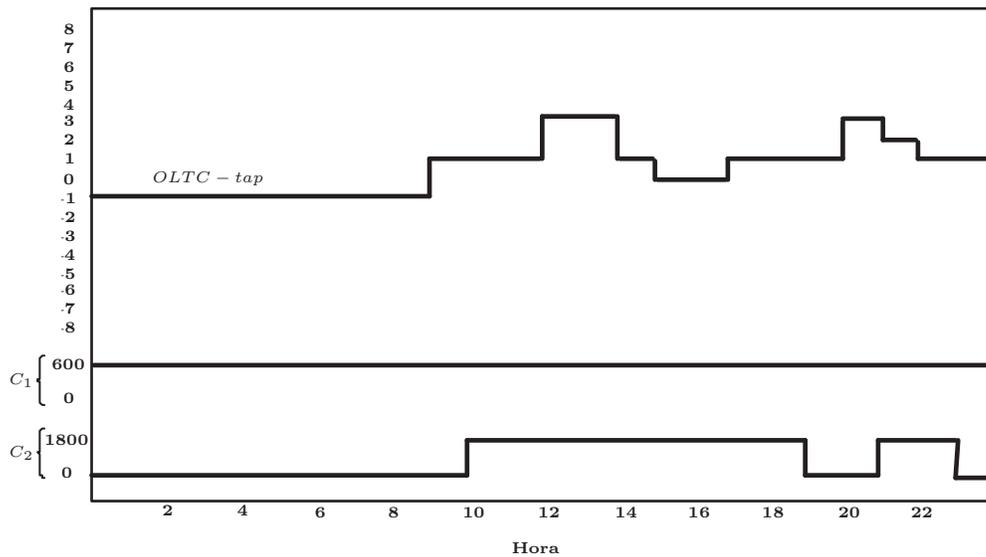


Figura 6.15: Posições do *tap* do *OLTC* e capacitores automáticos - caso 2.

Com a utilização de todos os recursos de otimização (caso 8 da tabela 6.1), obtém-se o perfil de tensão da barra 2 ilustrado na Figura 6.16.

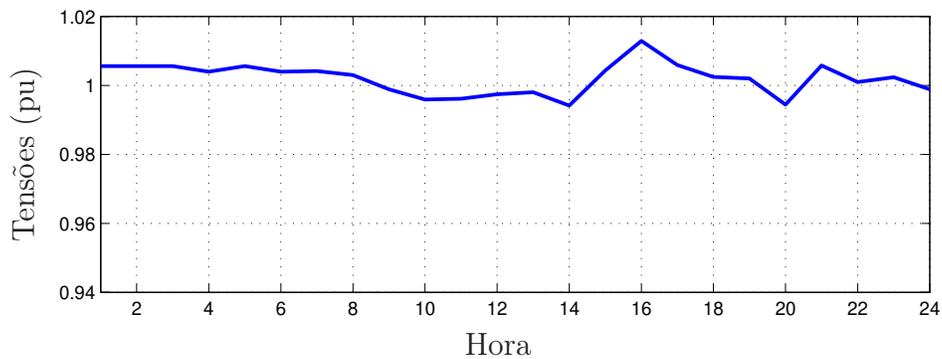


Figura 6.16: Tensões na barra 2 - otimização a partir do caso 8 da Tabela 6.1.

Para esse caso foi necessário realizar 10 manobras no *tap* do *OLTC*, sendo que as respectivas posições com relação à hora do dia pode ser observado na Figura 6.17.

1	Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2	Tap OLTC	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	2	2	0	0	0	1	1	1	2	2	0	0	-1
3	C_1	3	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
4	C_2	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	C_3	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	C_4	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 6.17: Posições do *tap* do OLTC e capacitor automático.

A Figura 6.18 ilustra de forma gráfica a operação do OLTC e do capacitor automático em função do tempo.

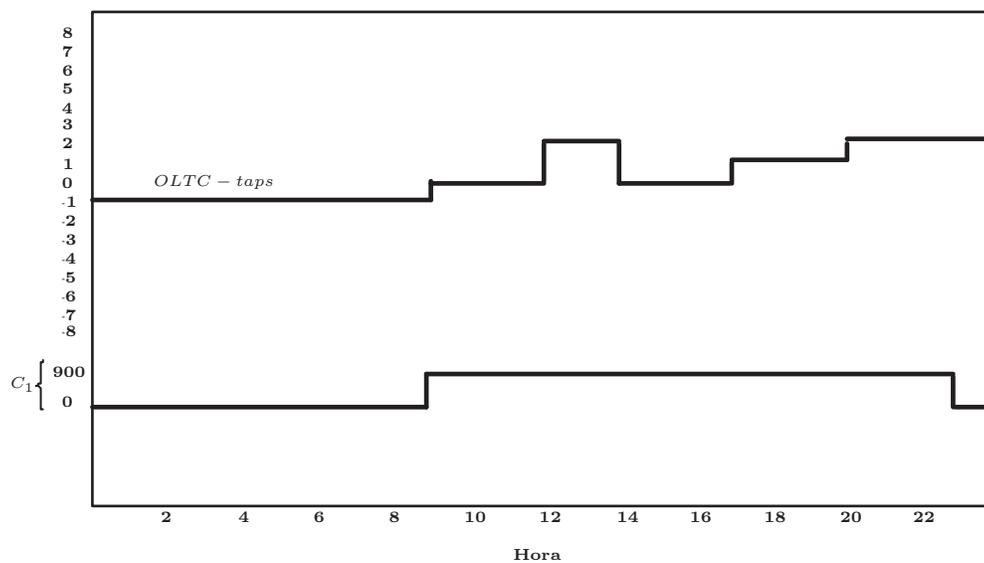


Figura 6.18: Posições do *tap* do OLTC e capacitores automáticos - caso 3.

A Tabela 6.7 apresenta de forma resumida os resultados obtidos.

Tabela 6.7: Resumo dos resultados - Sistema de 69 barras

Casos	Base	1	2	3
<i>FOB</i>	1,52	1,37	1,22	0,85
ΔV	0,34	0,084	0,067	0,10
Num. Manobras diárias do OLTC	3	15	13	10
Intervalo de manutenção do OLTC (anos)	-	10	21	27

Observa-se pela Tabela 6.7 uma redução significativa do número de operações do *tap* do OLTC, o que significa um aumento do intervalo de manutenção de 7 anos ou cerca de 39 operações por dia, para cerca de 27 anos, com 10 operações por dia.

6.10.2 Sistema de 135 barras

A figura 6.19 ilustra as tensões na barra 2 do sistema de 135 barras antes e após a execução do algoritmo SA para o caso (1) onde apenas a otimização da operação do *tap* do *OLTC* é considerada.

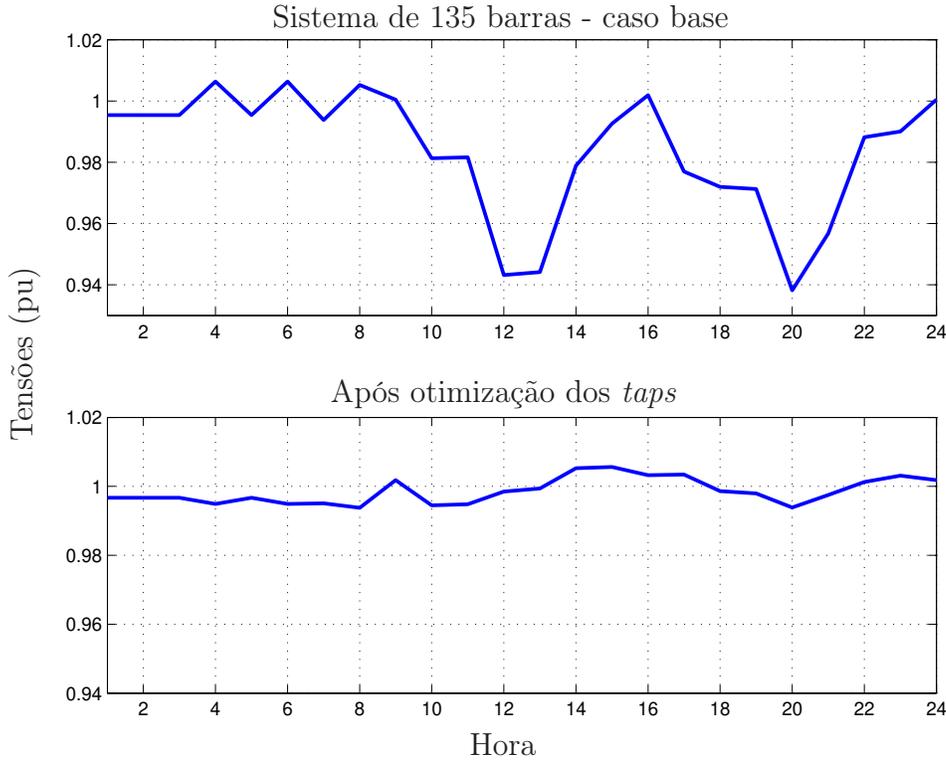


Figura 6.19: Tensões na barra 2 - antes e após a otimização.

Observa-se um bom nivelamento das tensões em torno de 1 pu, sendo que a Figura 6.20 apresenta as posições do *tap* do *OLTC* em função da hora do dia.

1	Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2	<i>Taps OLTC</i>	-1	-1	-1	0	-1	0	0	0	0	2	2	5	5	2	1	0	2	3	3	6	4	1	1	0
3	C_1	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	C_2	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	C_3	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	C_4	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 6.20: Posições do *tap* do *OLTC* para o caso base após a otimização.

Foram necessários 25 manobras do *tap* para conseguir um bom nivelamento das tensões em torno de 1 pu. A Figura 6.21 ilustra de forma gráfica a posição do *tap* em função do tempo.

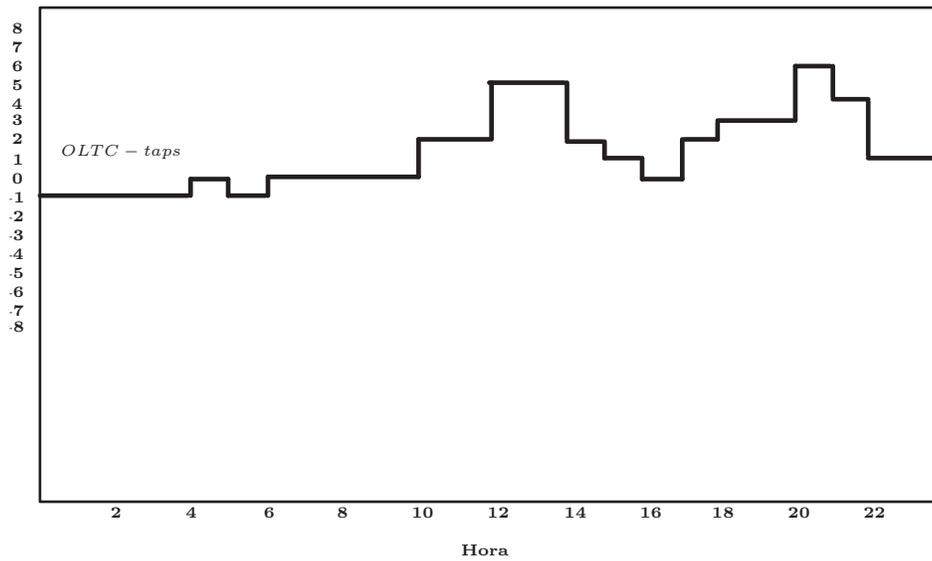


Figura 6.21: Posições do *tap* do *OLTC* - caso 1.

Executando o algoritmo incluindo agora capacitores fixos e automáticos, obtém-se o perfil de tensão mostrado na Figura 6.22.

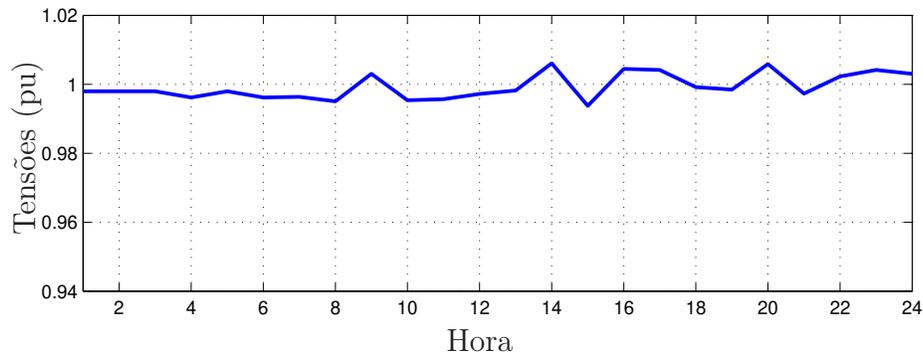


Figura 6.22: Tensões na barra 2 após a otimização.

A Figura 6.23 apresenta as posições do *tap* do *OLTC* ajustadas de forma coordenada com o capacitor automático instalado na barra 107. Para esse caso foram necessários 19 manobras do *tap*.

1	Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
2	<i>Taps OLTC</i>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	1	4	4	2	0	0	2	2	2	5	3	1	1	0				
3	C_1	107	4	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0
4	C_2	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	C_3	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	C_4	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 6.23: Posições do *tap* do *OLTC* e capacitor automático para o caso base após a otimização.

A Figura 6.24 ilustra o gráfico das posições do *tap* do *OLTC* e do capacitor automático em função da hora do dia.

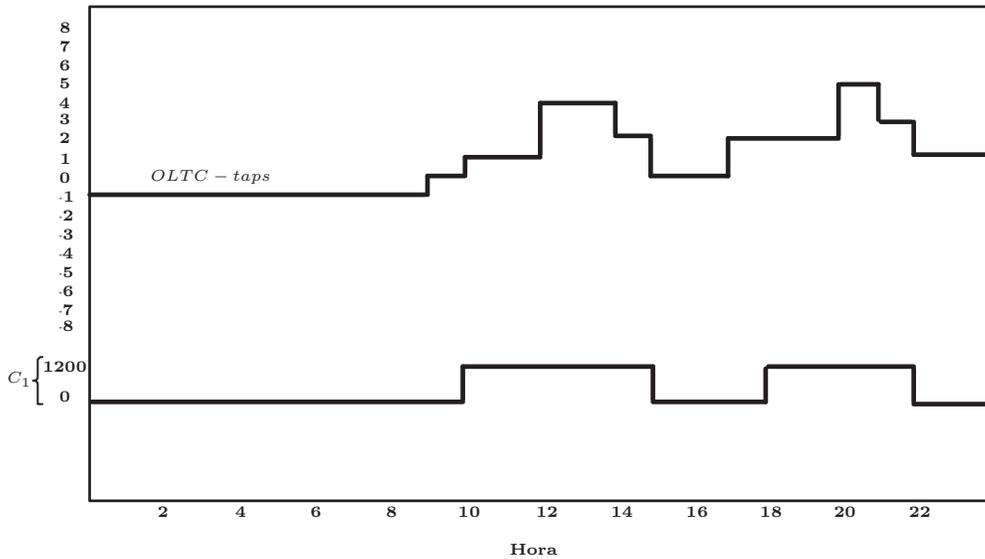


Figura 6.24: Posições do *tap* do *OLTC* e capacitor automático - caso 2.

A Figura 6.25 mostra o perfil de tensão na barra 2 em função da hora do dia quando o ajuste do *tap* do *OLTC* é otimizado na rede reconfigurada e com capacitores fixos e automáticos instalados.

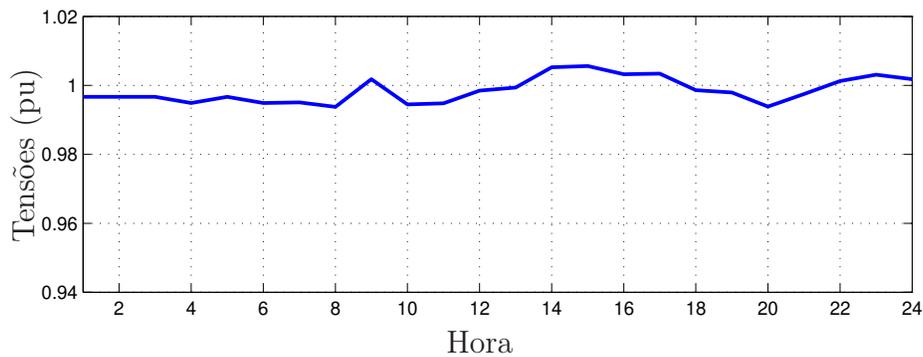


Figura 6.25: Tensões na barra 2 após a otimização.

A Figura 6.26 ilustra as posições do *tap* do *OLTC* e do capacitor automático instalado no sistema para a obtenção do perfil de tensão apresentado na Figura 6.25.

1	Hora		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
2	<i>Taps OLTC</i>		-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	1	4	4	2	1	0	2	2	2	4	3	1	1	0	
3	C_1	107	2	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	C_2	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	C_3	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	C_4	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 6.26: Posições do *tap* do *OLTC* e capacitor automático para a rede reconfigurada e após a otimização dos *taps*.

Observando-se a Figura 6.26, verifica-se que são necessárias 17 manobras do *tap* do *OLTC* para a manutenção do perfil de tensão adequado. A Figura 6.27 ilustra de forma gráfica as posições do *tap* do *OLTC* e do capacitor automático instalado na barra 107.

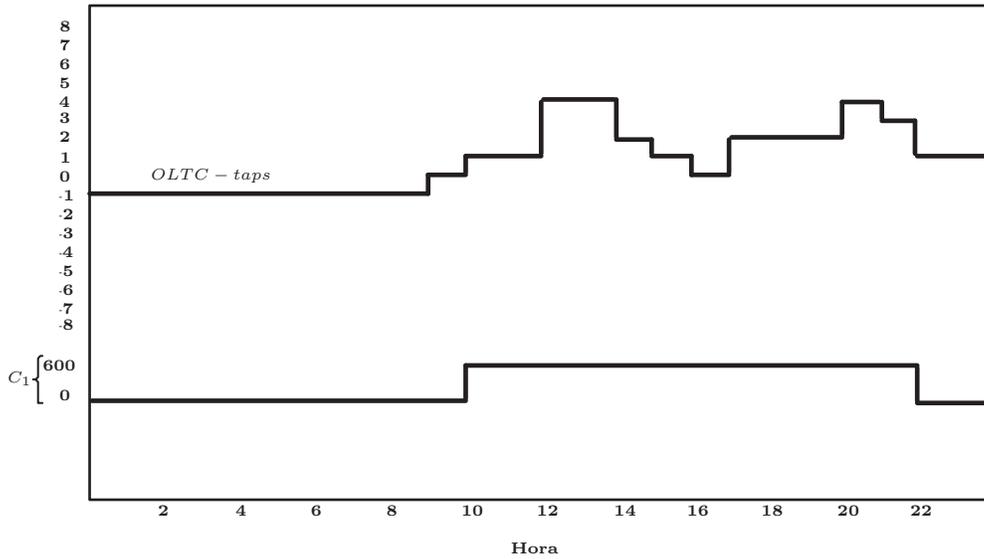


Figura 6.27: Posições do *tap* do *OLTC* e capacitor automático - caso 3.

A Tabela 6.8 apresenta um resumo dos resultados obtidos para o sistema de 135 barras.

Tabela 6.8: Resumo dos resultados - sistema de 135 barras

Casos	Base	1	2	3
<i>FOB</i>	4,012	3,74	2,93	2,92
ΔV	0,49	0,078	0,082	0,085
Num. Manobras diárias do <i>OLTC</i>	7	25	19	17
Intervalo de manutenção do <i>OLTC</i> (anos)	-	10	14	16

Pode-se observar na Tabela 6.8 uma redução considerável do número de manobras no *tap*, e, considerando o limite de 100.000 operações, a manutenção do *OLTC* seria realizada em aproximadamente 16 anos.

6.11 Considerações

O presente capítulo propôs uma estratégia que combina a reconfiguração, alocação de capacitores fixos e automáticos nos sistemas de distribuição, que foi denominado “algoritmo 1”. De forma adicional é proposto um algoritmo baseado em *SA* que realiza o despacho coordenado do *OLTC* em conjunto com os capacitores alocados no algoritmo 1. Observando os resultados obtidos pelo algoritmo 1, observa-se que o maior benefício é obtido quando a reconfiguração é utilizada em conjunto com a alocação de capacitores. A melhor configuração obtida pelo algoritmo 1 é utilizada pelo algoritmo 2 na realização da otimização da operação do *tap* do *OLTC* em conjunto com os capacitores automáticos. A grande vantagem da estratégia proposta

é diminuição do número de manobras do *tap* do *OLTC* necessárias para a manutenção do perfil adequado da rede em função da variação da carga, o que pode ser observado nas Tabelas 6.7 e 6.8.

Capítulo 7

Conclusões

As ferramentas propostas neste trabalho de pesquisa vêm ao encontro do modelo atual do setor elétrico, podendo postergar o investimento em obras de melhorias no sistema de distribuição tendo como principal motivação a redução das perdas técnicas.

Uma das principais inovações apresentadas neste trabalho refere-se ao desenvolvimento de um algoritmo genético dedicado, que, utilizando as características dos sistemas de distribuição, realiza a otimização através de reconfiguração, alocação de capacitores fixos e automáticos e ajustes do *tap* do *OLTC* de forma conjunta. É utilizado um único indivíduo onde estão armazenadas todas as informações do sistema a ser otimizado.

Para o algoritmo funcionar de forma eficiente, foi necessário o desenvolvimento de operadores genéticos especializados de cruzamento e mutação. Não menos importante, um algoritmo para a geração da população inicial foi desenvolvido de forma que os indivíduos gerados sempre sejam factíveis com relação à topologia radial e apresentando relativa boa qualidade.

A reconfiguração da rede se mostrou uma ferramenta valiosa pois permite, além da redução das perdas, um aumento considerável no limite de carregamento.

Assim, a otimização conjunta permite melhorar de forma significativa o perfil de tensão do sistema bem como prolongar a utilização do sistema de distribuição em função de um maior limite de carregamento.

Outra importante inovação consiste na coordenação do *tap* do *OLTC* com os capacitores automáticos instalados na rede em função de uma determinada curva de carga diária, mas utilizando o sistema já otimizado pelo AG.

Essa abordagem mostrou-se bastante interessante, pois permitiu a diminuição do número de operações do *tap* do *OLTC*, o que na prática significa uma considerável diminuição do intervalo de manutenção do equipamento, resultando em um aumento de sua vida útil.

Todas as ferramentas propostas foram integradas em um único *software* desenvolvido na linguagem Fortran podendo realizar todas as etapas da otimização ou cada etapa de forma independente conforme seja necessário o que garante uma grande flexibilidade de aplicação.

O trabalho de pesquisa desenvolvido admite alguns possíveis desdobramentos, como os que se propõe a seguir:

- (1) O trabalho proposto baseia-se no fato que o sistema de distribuição possui chaves que podem ser manobradas no sentido de realizar a reconfiguração com a intenção de reduzir as perdas de potência ativa. Sabendo-se que existem sistemas de distribuição que não possuem tais chaves, seria interessante propor uma metodologia para a instalação de chaves em pontos estratégicos da rede, levando em conta os custos envolvidos.
- (2) Os resultados obtidos através das metodologias desenvolvidas nesta tese baseiam-se em dados precisos a respeito dos sistemas de distribuição estudados. Isso significa assumir que existe um pleno conhecimento de todo o sistema, com precisão. Na prática isso é bastante difícil de ser alcançado, e por esse motivo existem diversos métodos de cálculo de perdas técnicas baseados em aproximações. Devido ao modelo atual do setor, uma intervenção na rede com objetivo de redução de perdas técnicas deve ser embasado em dados concretos, e seu custo-benefício deve ser muito bem avaliado. Por isso seria interessante desenvolver uma metodologia que, em um horizonte pré-determinado, permitisse calcular o reflexo das melhorias propostas para sistemas de distribuição que não tenham uma base de dados atualizada.
- (3) Para o caso da instalação de capacitores na rede primária, seria interessante um estudo mais aprofundado das consequências da proliferação de cargas não lineares quanto à geração de harmônicos e sua interação com os capacitores instalados.
- (4) O algoritmo 2 realiza a otimização levando em conta uma determinada curva diária proposta, sendo que as cargas ativas e reativas da rede são alteradas de forma uniforme, de acordo com a variação horária da curva. Entretanto sabe-se que as cargas não variam de forma uniforme, e há diferenças entre variações das cargas ativas e reativas durante todo o período. Pode-se propor um algoritmo adicional que proporcione essas variações, baseando-se em algum método estatístico, ou mesmo através da observações de casos reais obtidos junto a uma concessionária.

Referências Bibliográficas

- [1] W. H. Kersting, "Distribution System Modeling and Analysis," CRC Press, 2001.
- [2] D. G. Hart, D. Uy, J. Northcote-Green, C. LaPlace, D. Novosel, "Automated solutions for distribution feeders," *IEEE Computer Applications in Power*, 2000.
- [3] M. Chakravorty and D. Das, "Voltage stability analysis of radial distribution networks," *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 4, No 2, pp. 129-135, May 2000.
- [4] C. A. Castro, "Reconfiguração Automática de Redes de Distribuição de Energia Elétrica," *Dissertação de Mestrado*, UNICAMP, 1985.
- [5] S. Civanlar, J. J. Grainger and S.S.H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction," *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 3 No 3, pp. 1217- 1223, July 1988.
- [6] D. Shirmohammadi, H.W Hong, "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction," *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 4, No 2, pp. 1492-1498, April 1989.
- [7] M. E. Baran, F. Wu, "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.
- [8] S. K. Goswami and S. K. Basu., "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.
- [9] R. D. Zimmerman, "Network Reconfiguration for Loss Reduction in Three-Phase Power Distribution Systems," *Dissertação de Mestrado*, Cornell University, 1992.
- [10] H. Chiang, R. Jean-Jumeau, "Optimal Network Reconfigurations in Distribution Systems: Part 1: A New Formulation and a Solution Methodology," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No 4, pp. 1902-1909, October 1990.
- [11] H. Chiang, R. Jean-Jumeau, "Optimal Network Reconfigurations in Distribution Systems: Part 2: Solution Algorithms and Numerical Results," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No 3, pp. 1568-1574, July 1990.

- [12] M. A. Q. Duarte, "Algoritmo de Busca Tabu usado no Problema da Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Radial," *Dissertação de Mestrado*, UNESP, 1999.
- [13] C. C. Kuo, H. C. Chan, "Applying a Refined Genetic Algorithms to Network Reconfiguration for Loss Reduction," *IEEE of Japan Power & Energy*, 1994.
- [14] K. Nara, A. Shiose, M. Kitagawa, T. Ishihara, "Implementation of Genetic Algorithm for Distribution Systems Loss Minimum Reconfiguration," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No 3, August 1992.
- [15] B. Venkatesh, R. Ranjan, H. B. Gooi, "Optimal Reconfiguration of Radial Distribution Systems to Maximize Loadability," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No 1, pp. 260-266, February 2004.
- [16] M. A. N. Guimarães, J. F. C. Lorenzetti, C. A. Castro, "Reconfiguration of distribution systems for voltage stability enhancement using tabu search," *IEEE PES International Conference on Power System Technology*, Powercon, 2004, Cingapura.
- [17] A. Augugliaro, L. Dusonchet, S. Favuza, E. R. Sanseverino "Voltage Regulation and Power Losses Minimization in Automated Distribution Networks by a Evolutionary Multiobjective Approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No 3, pp. 1516-1527, August 2004.
- [18] A. Méffe, "Metodologia para cálculo de perdas técnicas por segmento do sistema de distribuição," *Dissertação de Mestrado*, USP, 2001.
- [19] Y. Hong, S. Ho, "Determination of Network Configuration Considering Multiobjective in Distribution Systems Using Genetic Algorithms," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No 2, pp. 1062-1069, May 2005.
- [20] M. E. Baran, F. F. Wu, "Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems," *IEEE transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No 1, pp. 725-734, January 1989.
- [21] M. A. N. Guimarães, "Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica utilizando algoritmos de Busca Tabu," *Dissertação de Mestrado*, Unicamp, 2005.
- [22] J. H. Holland, "Adaptation in natural and artificial system," Ann Arbor, The University of Michigan Press, 1975.
- [23] L. N. Castro, F J. Von Zuben, "Computação Evolutiva," 2006.
- [24] *Jornal da Ciência*, 19/04/2005.
- [25] [<http://www.ib.usp.br/evolucao/QTL/historiaqtl.html>].
- [26] L. N. Castro, F J. Von Zuben, "Computação Evolutiva," Tópico 5-02, pp. 1-29, 2002.
- [27] [<http://www.ufv.br/dbg/labgen/crom.html>].

- [28] [<http://www.todabiologia.com/citologia/cromossomos.htm>].
- [29] R. Daekins, "The Selfish Gene," Oxford University Press, 1990.
- [30] D. B. Fogel, "Evolutionary Computation: Toward a New Philosophy of Machine Intelligence," IEEE Press, 1995.
- [31] E. Mayr, "Populations, Species, and Evolution," Belknap Press, 1970
- [32] D.L. Hartl, A.G. Clark, "Principles of Population Genetics," Sinauer, 1989.
- [33] W. Atmar , "On the Rules and Nature of Simulated Evolutionary Programming," Proc. of the First Ann. Conf. On Evolutionary Programming, pp. 17-26, 1992.
- [34] W. Atmar, "Notes on the Simulation of Evolution," IEEE Trans. on Neural Networks, Vol. 5, No 1, pp. 130-148, 1994.
- [35] R. A. Fisher, " The Genetical Theory of Natural Selection," Clarendon Press, 1930.
- [36] K. A. De Jong, "An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems," Ph.D. Thesis, The University of Michigan, 1975.
- [37] J. H. Holland, "Adaptation in natural and artificial system," 2nd edition, The MIT Press, 1992.
- [38] Z. Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs," 3rd edition, Springer, 1996.
- [39] T. Bäck, "Selective Pressure in Evolutionary Algorithms: A Characterization of Selection Mechanisms", Proc. Of the 1st IEEE Conf. on Evolutionary Computation, Orlando, FL, pp. 57-62, 1994.
- [40] D. E. Goldberg, K. Deb, "A Comparison of Selection Schemes Used in Genetic Algorithms", Foundations of Genetic Algorithms, G. J. E. Rawlins (ed.), Morgan Kaufmann, pp. 69-93, 1991.
- [41] D. E. Goldberg, "Messy Genetic Algorithms: Motivation, Analysis, and First Results," Complex Systems, pp. 493-530, 1989.
- [42] L. N. Castro, F J. Von Zuben, "Computação Evolutiva," Tópico 9-02, pp. 17-24, 2002.
- [43] A. Bertoni, M. Dorigo, "Implicit parallelism in genetic algorithms," Artificial Intelligence: an int. Jour., Vol. 61, 2, pp. 307-313, 1993.
- [44] A. J. Monticelli, R. Romero, "Fundamentals of Simulated Annealing," *Tutorial on Modern Heuristic Optimization Techniques with Applications to Power Systems*, pp. 52-66.
- [45] S. Kirkpatrick, C. D. Gellat Jr. and M. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing," Science, 220(4598), pp. 498-516, 1983.

- [46] V. Cerny, "Thermodynamical Approach to the Traveling Salesman Problem: an Efficient Simulation Algorithm," *Journal of Optimization Theory and Application*, 45(1), pp. 41-51, 1985.
- [47] E. Aarts, J. Korst, "Simulated Annealing and Boltzmann Machines," *John Wiley & Sons*, 1989.
- [48] A. Diaz, F. Glover, H. M. Ghaziri, J. L. Gonzales, M. Laguna, P. Moscato and F. T. Tseng, "Optimización Heurística y Redes Neuronales," *Editorial Paraninfo*, Madrid, 1996.
- [49] R. Romero, "Reconfiguração de Alimentadores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica usando um Algoritmo Genético modificado," *SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Campos do Jordão, 6 a 9 de novembro de 2001.
- [50] S. F. Pereira Saramago, "Métodos de Otimização Randômica: Algoritmos Genéticos e Simulated Annealing," *Minicurso do XXVI CNMAC*, MG, 2003.
- [51] F. V. Gomes, S. Carneiro, Jr, J. L. R. Pereira, M. P. Vinagre, P. A. N. Garcia e L. R. de Araujo, "A New Distribution System Reconfiguration Approach Using Optimum Power Flow an Sensitivity Analysis for Loss Reduction," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 21 , No 4, pp. 1616-1623, November 2006.
- [52] E. López, H. Opazo, L. Garcia and P. Bastard, "Online Reconfiguration Considering Variability Demand: Applications do Real Network," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No 1, pp. 549-553, February 2004.
- [53] A. C. B. Dalbem, A. C. P. L. F. de Carvalho, N. G. Bretas, "Main Chain Representation for Evolutionary Algorithms Applied to Distribution System Reconfiguration," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No 1, pp. 425-436, February 2005.
- [54] J. Mendoza, R. López, D. Morales, E. López, P. Dessante, R. Moraga, "Minimal Loss Reconfiguration Using Genetic Algorithms With Restricted Population and Addressed Operators: Real Application," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 21, No 2, pp. 1062-1069, May 2006.
- [55] J. C. C. Amasifen, R. Romero, J. R. S. Mantovani, "Algoritmos Evolutivos dedicados à Reconfiguração de Redes Radiais de Distribuição sob Demandas Fixas e Variáveis - Estudo dos Operadores Genéticos e Parâmetros de Controle," *Revista Controle e Automação*, Vol.16, No 3, pp. 303-317, Julho, Agosto e Setembro 2005.
- [56] H. J. Greenberg, "Greedy Algorithms for Minimum Spanning Tree," *University of Colorado at Denver* , <http://www.cudenver.edu/~hgreenbe/>, March 28, 1998.
- [57] M. E. Baran and F. Wu, "Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No 1, pp. 725-734, April 1989.
- [58] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, "Resolução N° 505," 26 de Novembro, 2001.

- [59] C. R. Benedik, A. L. A. Costa, "Planejamento de Sistemas de Distribuição," *Curso Empresarial - Elektro*, Setembro, 2008.
- [60] W. F. Usida, "Controle Fuzzy para Melhoria do Perfil de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica," *Dissertação de Mestrado*, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2007.
- [61] R. Liang, C. Cheng, "Dispatch of Main Transformer ULTC and Capacitors in a Distribution System," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 16, No 4, pp. 625-630, October 2001.
- [62] J. Park, S. Nam, J. K. Park, "Control of a ULTC Considering the Dispatch Schedule of Capacitors in a Distribution System," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No 2, pp. 755-761, May 2007.
- [63] K. M. Son, K. S. Moon, S. K. Lee, J. K. Park, "Coordination of an SVC with a ULTC Reserving Compensation Margin of Emergency Control," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No 4, pp. 1193-1198, October 2000.
- [64] M. E. Baran and F. Wu, "Optimal Sizing of Capacitors Placed on a Radial distribution System," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No 1, pp. 735-743, April 1989.
- [65] S. Sundhararajan, A. Pahwa, "Optimal Selection of Capacitors for Radial Distribution Systems using Genetic Algorithm," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No 3, pp. 1499-1507, August 1994.
- [66] D. Jiang, R. Baldick, "Optimal Electric Distribution System Switch Reconfiguration and Capacitor Control," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No 2, pp. 890-897, May 1996.
- [67] R. A. Gallego, A. J. Monticelli and R. Romero, "Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 16, No 4, pp. 630-637, November 2001.
- [68] C. Su, C. Chang, J. Chiou, "Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems Employing Ant Colony Search Algorithm," *Electric Power Components and Systems*, pp. 931-946, April 2004.
- [69] S. Jier, "An Immune-Based Optimization Method to Capacitor Placement in a Radial Distribution System" *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No 2 pp. 744-749, April 2000.
- [70] R. S. Takehara, R. Romero, "Artificial Immune Systems Applied to Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Networks," *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, Venezuela*, pp. 1-7, Jun 2006.
- [71] C. S. S. Salas, "Alocação Ótima de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição Radiais," *Dissertação de Mestrado*, Univ. Estadual Paulista - UNESP, Março de 2006.

- [72] R. Terplak Beê, "Alocação de Bancos de Capacitores em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Algoritmos Genéticos," *Dissertação de Mestrado*, Univ. Federal do Paraná, Março de 2007.
- [73] F. C. Lu, Y. Y. Hsu, "Reactive power/voltage control in a distribution substation using dynamic programming," *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 142, No 6, pp. 639-645, November 1995.
- [74] R. H. Liang, Y. S. Wang, "Main transformer ULTC and capacitors scheduling by simulated annealing approach," *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 23, pp. 531-538, November 2000.
- [75] W. M. Lin, F. S. Cheng and M. T. Tsay, "Distribution feeder reconfiguration with refined genetic algorithm," *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 147, No 6, pp. 349-354, November 2000.
- [76] D. A. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen and G. X. Luo, "Compensation - Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3, No 2, pp. 753-762, May 1988.
- [77] Y. T. Hsiao, "Multiobjective Evolution Programming Method for Feeder Reconfiguration," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No 1, pp. 594-599, February 2004.
- [78] C. Chang, "Reconfiguration and Capacitor Placement for Loss Reduction of Distribution Systems by Ant Colony Search Algorithm," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No 4, pp. 1747-1755, November 2008.
- [79] H. M. Khodr, J. M. Yusta, Z. Vale, C. Ramos, "An Efficient Method for Optimal Location and Sizing of Fixed and Switched Shunt Capacitors in Large Distribution Systems," *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pp. 1-9, 20-24 July 2008.
- [80] D. Zhang, Z. Fu, L. Zhang, "Joint Optimization for Power Loss Reduction in Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No 1, pp. 161-169, February 2008.
- [81] M. A. N. Guimarães, C. A. Castro, R. Romero, "Minimização de perdas de potência ativa em sistemas de distribuição utilizando reconfiguração e alocação de capacitores," *Congresso Brasileiro de Automática - CBA-2008*, pp. 1-6, Setembro, 2008.
- [82] [<http://www.professeurs.polymtl.ca/michel.gagnon/>].
- [83] F. Sato, "Cálculos de Curto circuito em Sistemas de Energia Elétrica," *Disciplina de pós graduação Unicamp*, 1983.

Apêndice A

Árvore Geradora mínima

Uma árvore é um grafo conexo sem circuito. Como um grafo precisa conter no mínimo um vértice, uma árvore contém no mínimo um vértice. Também temos que uma árvore é um grafo simples, pois laços e arestas paralelas formam circuitos. Um grafo não conexo que não contém circuitos é denominado floresta. Nesse caso tem-se um grafo onde cada componente é uma árvore.

Uma árvore T é denominada *árvore geradora* de um grafo desconexo G se T é um sub-grafo de G e contém todos os vértices de G . Por exemplo, na Figura A.1, o sub-grafo indicado em linhas grossas é uma árvore geradora do grafo representado [82].

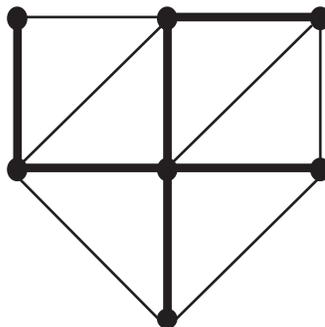


Figura A.1: Árvore geradora.

Se um grafo é desconexo, não podemos identificar nenhuma árvore geradora. Mas podemos identificar no mínimo uma floresta de árvores geradoras, uma para cada componente do grafo. O algoritmo para obter uma árvore geradora de um grafo G é muito simples. Se G não contém nenhum circuito, ele já é a sua própria árvore geradora. Suponha agora que ele contém um circuito. Tirando uma aresta desse circuito, o grafo resultante ainda é conexo. Continuando assim até que não haja nenhum circuito, o grafo obtido é um grafo conexo que é uma árvore.

A.1 Circuitos fundamentais e busca de todas as árvores

Considere uma árvore geradora T de um grafo G . O acréscimo de um dos elos de T resulta em um circuito. Tal circuito é denominado *circuitofundamental*. É muito importante notar que um circuito fundamental é definido somente em relação a uma árvore geradora específica. Usando o conceito de circuito fundamental, tem-se um algoritmo relativamente simples para identificar todas as árvores geradoras do grafo. Começa-se com uma árvore geradora qualquer. Toma-se um dos elos do grafo e acrescenta-se essa aresta. Como tem-se agora um circuito, tira-se uma aresta desse circuito, obtendo-se assim uma nova árvore geradora. Faz-se assim com todas as arestas desse circuito fundamental e todos os outros elos. Obtém-se assim um conjunto de árvores geradoras. Repete-se o processo todo com todas as árvores obtidas. Evidentemente, o algoritmo tem de eliminar as redundâncias. Usando esse algoritmo pode-se obter todas as árvores começando com qualquer árvore. A figura A.2 ilustra a aplicação desse algoritmo.

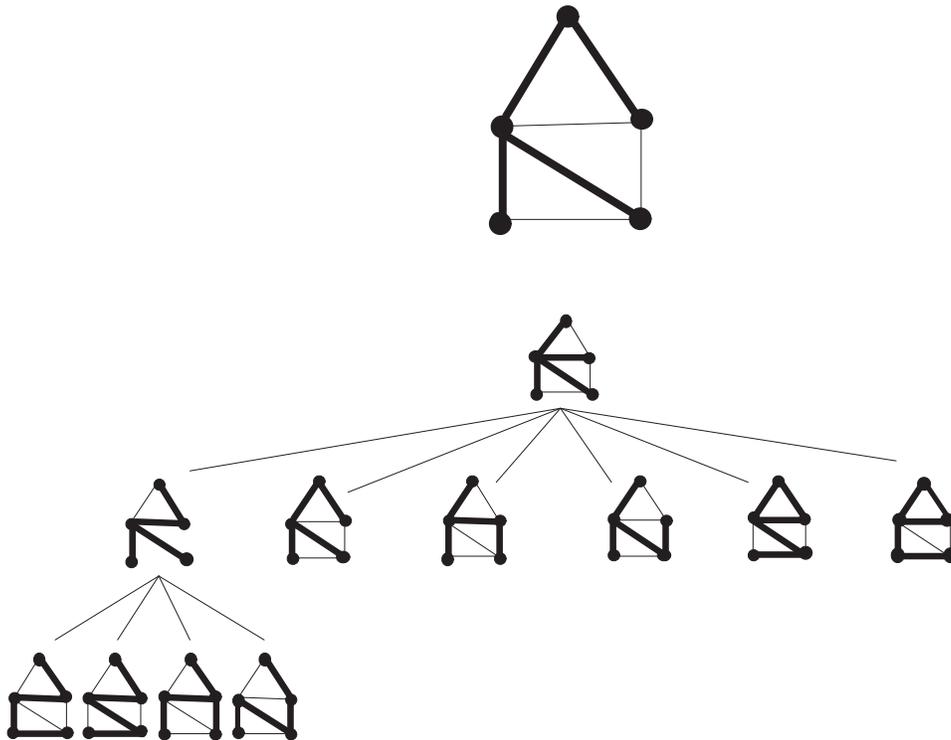


Figura A.2: Conjunto de árvores geradoras.

A.2 Árvore geradora em grafo valorado

Supondo um grafo valorado, isto é, onde a cada aresta é atribuído um peso, podemos distinguir as árvores geradoras desse grafo em relação à soma total dos pesos. Tem-se aqui um problema interessante: como identificar a árvore que minimiza essa soma. Chama-se tal

árvore de árvore geradora mínima. Para identificar a árvore geradora mínima de um grafo, existem dois algoritmos populares, o algoritmo de *prim* e o algoritmo de *Kruskal*. Esses dois algoritmos são algoritmos gulosos. Um algoritmo guloso é usado normalmente em problemas de otimização, tendo por objetivo achar um conjunto de candidatos que otimizam o valor de uma função objetivo. Inicialmente, o conjunto é vazio. A cada passo, o algoritmo seleciona um candidato a ser acrescentado no conjunto. Ele tenta selecionar o melhor elemento do conjunto de candidatos. Se o acréscimo desse elemento no conjunto solução é viável, ele será colocado no conjunto, senão ele será rejeitado e nunca mais será considerado. Se ele é viável, o algoritmo testa se esse conjunto é uma solução. Se sim, o algoritmo pára e retorna essa solução. Senão, ele continua. Esse tipo de algoritmo é dito guloso porque ele sempre tenta tomar o melhor pedaço, sem considerar as consequências no futuro. Uma vez que um candidato é incluído no conjunto de solução, assim ele permanece definitivamente. Isso significa que, para retornar uma solução ótima, a função de seleção do próximo candidato é crucial.

A.2.1 Algoritmo de *Kruskal*

Seja $G = (V, E)$ um grafo conexo não direcionado e valorado. O problema consiste em achar um subconjunto T forme uma árvore cuja soma dos pesos é a menor possível. Aplicando o algoritmo guloso nesse caso, teremos as seguintes definições:

- O conjunto S de candidatos é um conjunto de arestas distintas de G .
- O conjunto S é viável se ele não contém nenhum circuito.
- O conjunto S é uma solução se ele contém todos os vértices de G .
- Um conjunto S de arestas é promisor se ele pode ser completado para produzir uma solução ótima. Em particular, o conjunto vazio é promisor.
- Uma aresta toca um conjunto S de vértices se exatamente um vértice ligado por essa aresta existe em S .

Seja $G = (V, E)$ um grafo de n vértices. No início, T é vazio, e supondo-se um grafo nulo composto dos n vértices (isto é, um grafo de n vértices isolados). O conjunto B é o conjunto das arestas de G . Seleciona-se a aresta de B que tem o menor valor. Se ela conecta dois componentes diferentes, coloca-se no conjunto T e junta-se os dois componentes. Se ela liga dois vértices de um mesmo componente, ele é rejeitado, pois isso formaria um circuito. Continua-se assim até a obtenção de um componente só. Nesse caso, o conjunto T constitui uma solução.

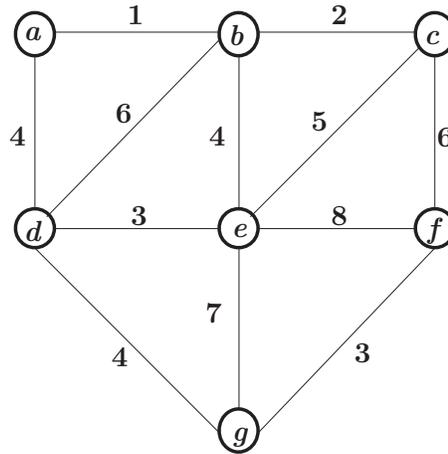


Figura A.3: Grafo valorado.

Considere o grafo ilustrado na Figura A.3. A primeira aresta a ser considerada é a que liga o vértice a com o vértice b (peso 1). O resultado é um grafo que contém os seguintes componentes: $\{a,b\}$, $\{c\}$, $\{d\}$, $\{e\}$, $\{f\}$, e $\{g\}$. Eis a sequência total:

Passo	Aresta	Componentes
Início		$\{a\}$ $\{b\}$ $\{c\}$ $\{d\}$ $\{e\}$ $\{f\}$ $\{g\}$
1	(a,b)	$\{a,b\}$ $\{c\}$ $\{d\}$ $\{e\}$ $\{f\}$ $\{g\}$
2	(b,c)	$\{a,b,c\}$ $\{d\}$ $\{e\}$ $\{f\}$ $\{g\}$
3	(d,e)	$\{a,b,c\}$ $\{d,e\}$ $\{f\}$ $\{g\}$
4	(f,g)	$\{a,b,c\}$ $\{d,e\}$ $\{f,g\}$
5	(a,d)	$\{a,b,c,d,e\}$ $\{f,g\}$
6	(b,e)	Rejeitada
7	(d,g)	$\{a,b,c,d,e,f,g\}$

A Figura A.4 ilustra a progressão na composição da árvore geradora.

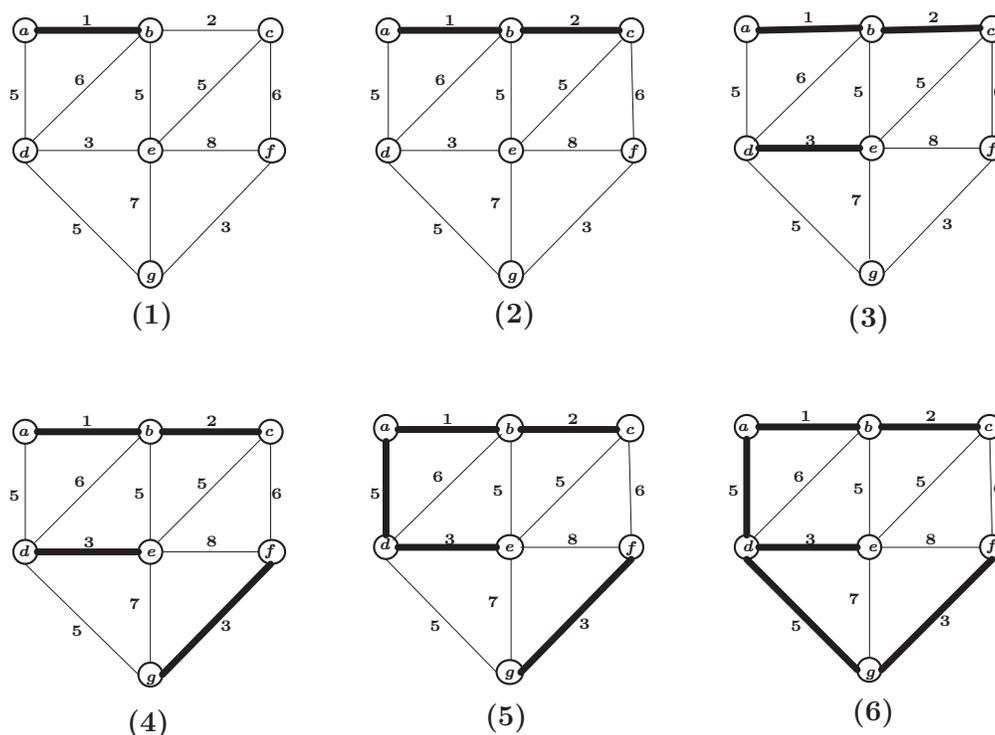


Figura A.4: Formação da árvore geradora.

O mais complicado no algoritmo de *Kruskal* é o teste que verifica se a nova aresta considerada liga dois vértices de um mesmo componente. Uma solução seria a criação de uma lista para cada componente. Mas isso não seria muito eficiente, pois deve-se percorrer potencialmente todas as listas para saber se uma aresta liga dois vértices de um mesmo componente. Obtém-se uma solução melhor se, para cada componente do grafo, for escolhido um de seus vértices para identificá-lo. No início tem-se n conjuntos de um elemento aponta para si mesmo. Para juntar dois conjuntos, toma-se o “representante” de um deles e faz-se o mesmo apontar no “representante” do outro conjunto. Será utilizada a notação $[v_i]$ para representar um componente representado pelo vértice v_i . Assim, um conjunto é representado por uma árvore direcionada onde todos os caminhos chegam a um nó que é o representante. Esse representante pode ser chamado de índice. Pode-se utilizar uma tabela onde cada elemento representa um vértice do grafo. No início, todos apontam para si mesmo:

a	b	c	d	e	f	g
1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7

Depois dos primeiros passos, os vértices a e b devem fazer parte do mesmo componente. Para representar isso, o b vai apontar para a:

a	b	c	d	e	f	g
1	2	3	4	5	6	7
1	1	3	4	5	6	7

Depois dos dois próximos passos, o componente [c] se junta ao componente [a] e [d] se junta com [e]:

a	b	c	d	e	f	g
1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	4	4	6	7

Depois do quinto passo o componente [d] tem que ser fusionado com o componente [a]. Agora o elemento d vai apontar para a:

a	b	c	d	e	f	g
1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	4	6	7

Para saber se dois vértices são no mesmo componente, é muito fácil. Percorre-se a partir do índice de cada um até chegar a um vértice que apontar para si mesmo. Se nos dois casos chegamos ao mesmo vértice, eles são no mesmo componente.

Agora, pode-se apresentar o algoritmo em detalhes. Nesse caso, é fácil ver que a melhor representação do grafo é a que utiliza um conjunto de arestas. Isso porque deve-se visitar todas as arestas uma vez só. Supondo uma representação dos componentes que utiliza o método explicado acima e duas funções $find(u)$, que retorna o índice que representa um componente, e $merge(u,v)$, que efetua a fusão de dois componentes tem-se o algoritmo mostrado na Figura A.5.

Algoritmo 2:

$Kruskal(G = (N, A) : \text{grafo})$: conjunto de arestas

Ordenar A pelos valores de peso;

n : Número de vértices em N ;

$T := \{\}$;

Inicializar conjunto de componentes (vértices de G)

enquanto T contém menos de $n - 1$ arestas e A não vazio **faça**

$(u, v :=)$ aresta de menor peso de A ;

$A := A - (u, v)$;

$comp_u := find(u)$;

$comp_v := find(v)$;

se $comp_u \neq comp_v$ **então**

$merge(comp_u, comp_v)$;

$T := T \cup (u, v)$;

fim

fim

Retornar T

Figura A.5: Algoritmo de Kruskal

Apêndice B

Algoritmos de fluxo de carga utilizados em sistemas de distribuição de energia elétrica

B.1 Introdução

O problema de fluxo de carga (*load flow*) consiste na obtenção do estado de operação de uma rede (ângulos e magnitudes dos fasores de tensão nodal). Uma vez obtido o estado da rede, as demais grandezas como: fluxo de potência nos ramos, correntes nos ramos, dentre outras poderão ser facilmente determinadas. Vários métodos de fluxo de carga têm sido propostos ao longo dos anos e atualmente o método mais robusto é o método de Newton e suas versões desacopladas. A robustez do método de Newton tradicional no entanto esbarra no problema da construção e inversão da matriz Jacobiana, o que acrescenta um grande esforço computacional ao algoritmo. No estudo de reconfiguração de redes de distribuição, quase sempre há a necessidade do processamento de numerosos fluxos de carga, portanto tal método seria inviável.

B.2 Método *back forward sweep* por soma de correntes

Principalmente tendo por objetivo a diminuição do esforço computacional, diversos algoritmos de fluxo de carga dedicados a sistemas de distribuição foram propostos. A Figura B.2 apresenta um modelo que representa uma linha de um sistema de distribuição radial. Deve-se salientar que de forma geral, nos sistemas de distribuição os valores das admitâncias shunt ($j b^{sh}$) são desprezados.

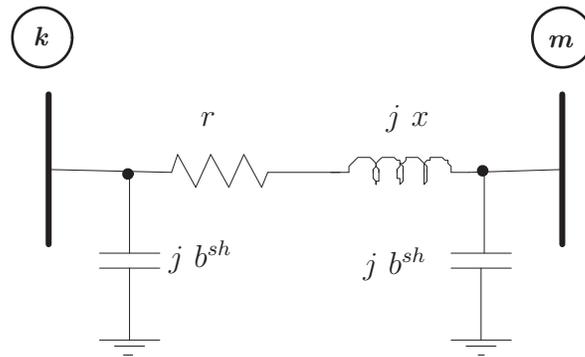


Figura B.1: Modelo de uma linha de um sistema de distribuição

Nesse trabalho de pesquisa foi utilizado um algoritmo baseado em *back forward sweep* para o cálculo de fluxo de carga para os sistemas puramente radiais. Nesse algoritmo, o processo de solução começa atribuindo-se um valor de tensão para todas as barras da rede. De forma geral é atribuído o mesmo valor da tensão da subestação. Assim, para cada barra k assume-se que $V_k = V_{ref} + 0$ onde V_{ref} é o módulo de tensão da subestação. Conhecendo-se as tensões nas barras, as correntes de carga de cada barra são calculadas, e assim, iniciando-se pelas barras extremas em direção à subestação (processo *backward*) calcula-se todas as correntes de ramos. Através das correntes de ramos já calculadas é possível estimar as perdas ativas e reativas do sistema. Assim, é possível calcular a corrente que sai da subestação. Com os valores de corrente dos ramos já calculadas, calcula-se novamente o valor das tensões de todas as barras dessa valor partindo da subestação (processo *forward*). Os novos valores de tensão calculados permitem encontrar as novas correntes de carga das barras e as novas correntes de ramo, e também as novas perdas de potência ativa da rede. O processo todo repete-se até que um critério de convergência seja alcançado. No algoritmo desenvolvido o critério adotado analisa a variação das perdas de duas iterações consecutivas, parando quando essa variação for menor que um certo valor pré-determinado.

Usando como exemplo a rede de 5 barras e 6 ramos apresentada na Figura B.2, a resolução do fluxo de carga baseado em *back-forward-sweep* é apresentada a seguir:

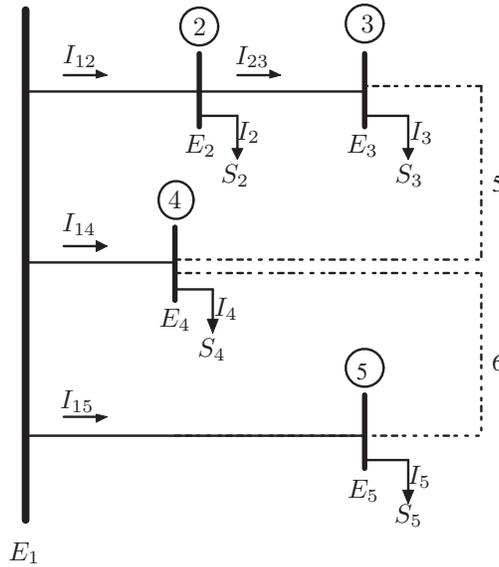


Figura B.2: Sistema de 5 barras.

Supondo-se que os ramos 5 e 6 estejam desligados temos:

- (1) Arbitrar as tensões nodais:

$$E_k, \quad k = 1, \dots, nb \quad (E_k = V_{ref} + j0) \quad (\text{B.1})$$

Fazer $P_{per1} = 0$. Escolher a tolerância ϵ .

- (2) Calcular as correntes nodais:

$$I_k = \left(\frac{S_k}{E_k} \right)^* - Y_k^{sh} E_k \quad (k = 1, \dots, nb) \quad (\text{B.2})$$

- (3) *Back sweep*: Começando pelos ramos terminais e caminhando em direção à subestação, calcular as correntes nos ramos que conectam os nós k e m :

$$I_{km} = I_m + \sum_{j \in F_m} I_{mj} \quad (\text{B.3})$$

onde F_m é o conjunto das barras alimentadas pela barra m .

Para o sistema de 5 barras em análise:

$$\begin{aligned}
I_{12} &= I_2 + I_{23} \\
I_{23} &= I_3 \\
I_{14} &= I_4 \\
I_{15} &= I_5
\end{aligned}$$

(3) Calcular as perdas ativas do sistema:

$$P_t = \sum_{i=1}^{nr} r_i I_i^2 \quad (\text{B.4})$$

onde r_i representa a resistência do ramo i e nr representa o número de ramos da rede.

Fazer $P_{per2} = P_t$

- (4) Teste de convergência: Se $\Delta P_{per} = |P_{per2} - P_{per1}| \leq \epsilon$, parar o processo pois foi atingida a convergência. Caso contrário, fazer $P_{per1} = P_{per2}$ e passar para o próximo passo.
- (5) *Forward sweep*: Atualizar as tensões nodais começando pela subestação em direção às barras terminais. Para uma certa barra m :

$$V_m = V_k - Z_{km} \cdot I_{km} \quad (\text{B.5})$$

onde a barra k é a outra barra terminal do ramo km , que alimenta a barra m . Para a rede exemplo:

$$\begin{aligned}
E_2 &= E_1 - Z_{12} \cdot I_{12} \\
E_3 &= E_2 - Z_{23} \cdot I_{23} \\
E_4 &= E_1 - Z_{14} \cdot I_{14} \\
E_5 &= E_1 - Z_{15} \cdot I_{15}
\end{aligned}$$

Voltar ao passo (2).

O algoritmo é bastante rápido, sendo que, 3000 fluxos de carga para o sistema de 135 barras são realizados em 5 segundos.

B.3 Método Matriz Z_{bus}

O método *Back Forward Sweep* apresenta bom desempenho para sistemas de distribuição radiais, no entanto, quando o sistema apresenta laços essa metodologia não pode ser aplicada. Para a resolução de sistemas fracamente malhados, pode-se utilizar a metodologia proposta por Shirmohammadi [76] onde são criados pontos de interrupção (*breaking points*) nos laços criados e a partir desses pontos são injetadas correntes compensadoras de modo que o sistema fracamente malhado comporte-se novamente como um sistema puramente radial. Nesse trabalho foi utilizado um método baseado na matriz Z_{bus} quando é necessário realizar algum processamento em que o sistema apresente laços. Para os algoritmos desenvolvidos nesse trabalho, o método da matriz Z_{bus} é utilizado somente para a geração da população inicial e quando ocorre uma mutação em um indivíduo.

A matriz Z_{bus} pode ser obtida através da inversão da matriz Y ou através da aplicação de um algoritmo de montagem direta. Nesse trabalho de pesquisa a matriz Z_{bus} foi obtida através da montagem direta, passo a passo, simulando a própria construção da rede a partir da barra de referência, acrescentando-se um ramo por vez. parte-se da matriz de dimensão unitária e, através de modificações sequenciais, obtém-se a matriz do sistema completo. Este procedimento exige a ordenação prévia das impedâncias dos ramos, o que garante a conexidade da rede em qualquer fase da formação da matriz, evitando-se dessa forma problemas de singularidade das matrizes parciais, durante o processo de construção. A formação da matriz por este método tem rotinas distintas, conforme os tipos de ramos a serem incluídos na rede [83].

- (1) Ramo que liga a barra de referência a uma nova barra;

A figura B.3 ilustra a inclusão da linha tipo 1 e abaixo as respectivas equações.

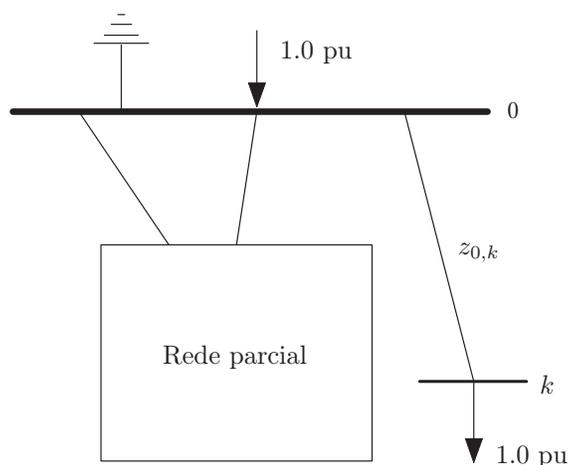


Figura B.3: Inclusão de linha tipo 1.

$$Z_{k,k} = z_{0,k} \quad (\text{B.6})$$

$$Z_{i,k} = Z_{k,i} = 0 \quad i \neq k \quad (\text{B.7})$$

(2) Ramo que liga uma barra já incluída na rede a uma nova barra

A figura B.4 ilustra a inclusão da linha tipo 2 e abaixo as respectivas equações.

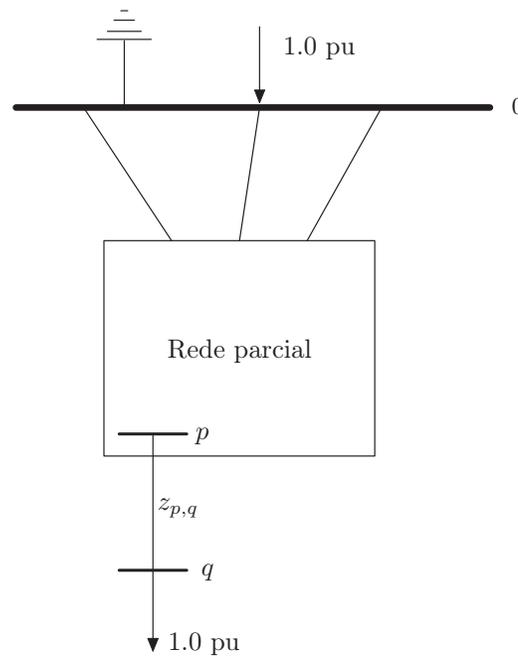


Figura B.4: Inclusão de linha tipo 2.

$$Z_{q,q} = Z_{p,p} + z_{p,q} \quad (\text{B.8})$$

$$Z_{q,i} = Z_{p,i} = 0 \quad i \neq q \quad (\text{B.9})$$

$$Z_{i,q} = Z_{i,p} = 0 \quad i \neq q \quad (\text{B.10})$$

(3) Ramo que liga duas barras já incluídas na rede

A figura B.5 ilustra um sistema no qual se deseja uncluir um ramo interligando as barras p e q que já fazem parte da rede.

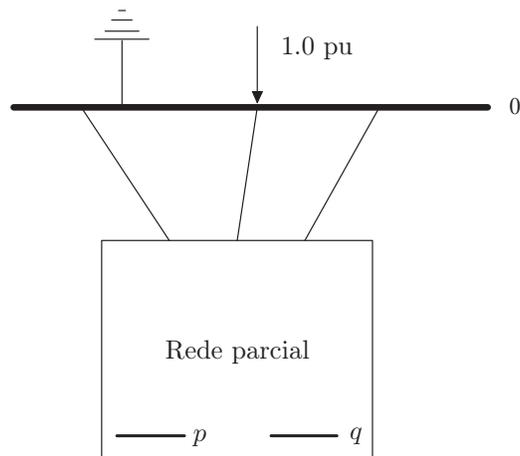


Figura B.5: Inclusão de linha tipo 3

A inclusão do ramo do tipo 3 é iniciada simulando-se a injeção da corrente de 1,0 pu na barra p que é drenada pela barra q . A figura B.6 ilustra esta etapa.

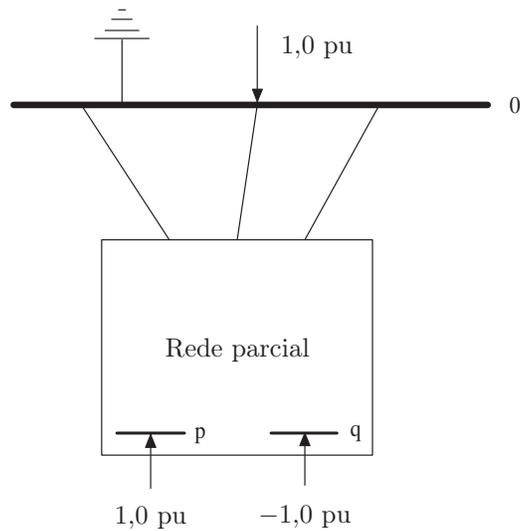


Figura B.6: Injeção de corrente de 1,0 pu através das barras p e q .

A representação matricial é dada por:

$$\begin{bmatrix} Z_{1,1} & Z_{1,2} & \dots & Z_{1,p} & \dots & Z_{1,q} & \dots & Z_{1,n} \\ Z_{2,1} & Z_{2,2} & \dots & Z_{2,p} & \dots & Z_{2,q} & \dots & Z_{2,n} \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & Z_{p,p} & \dots & Z_{p,q} & \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & Z_{q,p} & \dots & Z_{q,q} & \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & Z_{n,p} & \dots & Z_{n,q} & \dots & Z_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ 1.0 \\ \cdot \\ -1.0 \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1,p} - Z_{1,q} \\ Z_{2,p} - Z_{2,q} \\ \cdot \\ Z_{p,p} - Z_{p,q} \\ \cdot \\ Z_{q,p} - Z_{q,q} \\ \cdot \\ Z_{n,p} - Z_{n,q} \end{bmatrix} \quad (\text{B.11})$$

ou

$$\begin{bmatrix} Z_{1,p} - Z_{1,q} \\ Z_{2,p} - Z_{2,q} \\ \cdot \\ Z_{p,p} - Z_{p,q} \\ \cdot \\ Z_{q,p} - Z_{q,q} \\ \cdot \\ Z_{n,p} - Z_{n,q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \cdot \\ e_p \\ \cdot \\ e_q \\ \cdot \\ e_n \end{bmatrix} \quad (\text{B.12})$$

A impedância equivalente entre as barras p e q pode ser obtida pela equação:

$$Z_{eq} = \frac{(e_p - e_q)}{1.0} \quad (\text{B.13})$$

$$Z_{eq} = Z_{p,p} + Z_{q,q} - 2Z_{p,q} \quad (\text{B.14})$$

Finalmente, a inclusão de um ramo entre as barras p e q , de impedância $z_{p,q}$ é simulada conforme ilustrada na figura B.7.

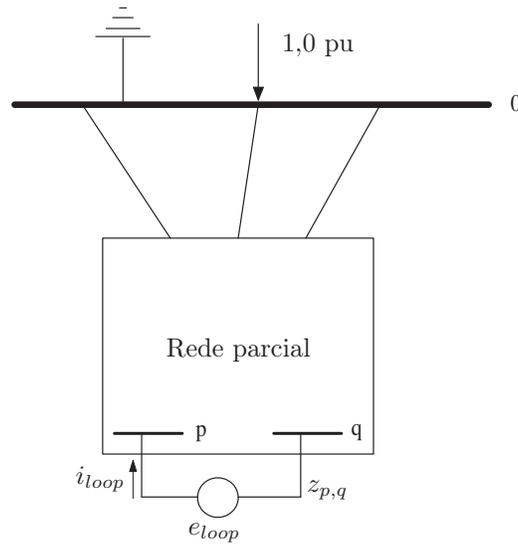


Figura B.7: Simulação da inclusão de um ramo fechando malha através das barras p e q .

A figura B.7 possibilita obter:

$$e_{loop} = (Z_{eq} + z_{p,q})i_{loop} \quad (\text{B.15})$$

ou

$$e_{loop} = (Z_{p,p} + Z_{q,q} - 2Z_{p,q} + z_{p,q})i_{loop} \quad (\text{B.16})$$

Finalmente,

$$Z_{loop,loop} = Z_{p,p} + Z_{q,q} - 2Z_{p,q} + z_{p,q} \quad (\text{B.17})$$

A inclusão do ramo tipo 3 não acrescenta uma nova barra ao sistema, mas ocasiona a inclusão de uma linha e uma coluna na matriz de impedância parcial, ou seja:

$$\begin{bmatrix} Z_{1,1} & Z_{1,2} & \dots & Z_{1,p} & \dots & Z_{1,q} & \dots & Z_{1,n} & Z_{1,loop} \\ Z_{2,1} & Z_{2,2} & \dots & Z_{2,p} & \dots & Z_{2,q} & \dots & Z_{2,n} & Z_{2,loop} \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & Z_{p,p} & \dots & Z_{p,q} & \dots & \dots & Z_{p,loop} \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & Z_{q,p} & \dots & Z_{q,q} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & Z_{n,p} & \dots & Z_{n,q} & \dots & Z_{n,n} & Z_{n,loop} \\ Z_{loop,1} & Z_{loop,2} & \dots & Z_{loop,p} & \dots & Z_{loop,q} & \dots & Z_{loop,n} & Z_{loop,loop} \end{bmatrix} \quad (\text{B.18})$$

A coluna e a linha $n + 1$ que surgem no processo de inclusão do ramo do tipo 3 são dadas pelas equações:

$$\begin{bmatrix} Z_{1,loop} \\ Z_{2,loop} \\ \cdot \\ Z_{p,loop} \\ \cdot \\ Z_{q,loop} \\ \cdot \\ Z_{n,loop} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1,p} - Z_{1,q} \\ Z_{2,p} - Z_{2,q} \\ \cdot \\ Z_{p,p} - Z_{p,q} \\ \cdot \\ Z_{q,p} - Z_{q,q} \\ \cdot \\ Z_{n,p} - Z_{n,q} \end{bmatrix} \quad (\text{B.19})$$

e

$$\begin{bmatrix} Z_{loop,1} \\ Z_{loop,2} \\ \cdot \\ Z_{loop,p} \\ \cdot \\ Z_{loop,q} \\ \cdot \\ Z_{loop,n} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} Z_{p,1} - Z_{q,1} \\ Z_{p,2} - Z_{q,2} \\ \cdot \\ Z_{p,p} - Z_{q,p} \\ \cdot \\ Z_{p,q} - Z_{q,q} \\ \cdot \\ Z_{p,n} - Z_{q,n} \end{bmatrix}^T \quad (\text{B.20})$$

Em seguida, a linha e a coluna são descartadas pela redução de *Kron*. Isso implica que o efeito da inclusão do ramo tipo 3 repercutirá em todos os elementos da matriz de impedâncias até então formados, conforme a equação

$$Z' = Z_{i,j} - \frac{(Z_{i,p} - Z_{i,q})(Z_{p,j} - Z_{q,j})}{Z_{p,p} + Z_{q,q} - 2Z_{p,q} + z_{p,q}} \quad (\text{B.21})$$

A partir das equações apresentadas foi desenvolvido o algoritmo 3 que monta a matriz Z_{bus} de forma direta.

Algoritmo 3:

```

 $\overline{Z}_{bus}(NB, NB) \leftarrow 0;$ 
 $\overline{Z}(NB, NB) \leftarrow 0;$ 
 $\overline{DE} \leftarrow$  Barras iniciais
 $\overline{PARA} \leftarrow$  Barras finais
 $NR =$  Número de ramos;
 $NBB = 0;$ 
para  $I=1, NR$  faça
   $K = \overline{DE}(I);$ 
   $M = \overline{PARA}(I);$ 
   $ZZ = R(I) + jX(I);$ 
  se  $M \leq NBB$  e  $K > 1$  então /* Inclusão de linha tipo 3 */
     $Z_{KMEQ} = \overline{Z}_{bus}(K, K) + \overline{Z}_{bus}(M, M) - (2\overline{Z}_{bus}(M, K));$ 
    para  $A=1, NBB$  faça
      para  $B=1, NBB$  faça
         $ZQ = Z_{KMEQ} + ZZ;$ 
         $ZQ1 = ((\overline{Z}_{bus}(A, K) - \overline{Z}_{bus}(A, M)) * (\overline{Z}_{bus}(K, B) - \overline{Z}_{bus}(M, B)));$ 
         $\overline{Z}(A, B) = \overline{Z}_{bus}(A, B) - (ZQ1/ZQ)$ 
      fim
    fim
    para  $II=1, NBB$  faça
      para  $JJ=1, NBB$  faça
         $\overline{Z}_{bus}(II, JJ) = \overline{Z}(II, JJ)$ 
      fim
    fim
  fim
  se  $K=1$  então /* Inclusão de linha tipo 1 */
     $\overline{Z}_{bus}(M, M) = ZZ;$ 
     $NBB = NBB + 1;$ 
    para  $A=1, K-1$  faça
       $\overline{Z}_{bus}(A, K) = 0;$ 
       $\overline{Z}_{bus}(K, A) = 0;$ 
    fim
  fim
  se  $M > NBB$  então /* Inclusão de linha tipo 2 */
     $\overline{Z}_{bus}(M, M) = \overline{Z}_{bus}(K, K) + ZZ;$ 
     $NBB = NBB + 1;$ 
    para  $A=1, M-1$  faça
       $\overline{Z}_{bus}(A, M) = \overline{Z}_{bus}(A, K);$ 
       $\overline{Z}_{bus}(M, A) = \overline{Z}_{bus}(K, A);$ 
    fim
  fim
fim

```

Figura B.8: Montagem da matriz Z_{bus}

Obtida a matriz Z_{bus} pode-se propor o seguinte algoritmo de fluxo de carga:

- Enquanto um critério de parada não for atendido faça:
 1. Calcular as correntes nodais (\bar{I}_b)
 2. Calcular o vetor ($\bar{\Delta V}$), $\bar{\Delta V} = [Z_{bus}][\bar{I}_b]$
 3. Calcular as novas tensões de barra, $\bar{V} = V_0 + \bar{\Delta V}$
- Calcular as correntes de ramo (\bar{I}_R)
- Fim

Conforme já mencionado, a matriz Z_{bus} é utilizada nesse trabalho quando existe a necessidade do cálculo do fluxo de potência da rede apresentando laços. Essa condição ocorre exclusivamente quando da formação da população inicial, e quando é necessário a realização de mutação para o caso da reconfiguração. Assim, como visto no Capítulo 4, a população inicial é gerada através do armazenamento das opções de abertura das chaves pertencentes a um determinado laço da rede. Dessa forma, uma chave é fechada de cada vez, e deve-se determinar quais são as chaves que pertencem ao laço formado. Uma vez determinadas as chaves pertencentes ao laço formado, pode-se armazená-las em um vetor, e através disso construir a população inicial. Para uma maior eficiência, pode-se armazenar somente as chaves onde a corrente é menor, e com isso ganha-se em qualidade da população, pois sabe-se que as melhores configurações em geral, são aquelas em que as opções escolhidas são as que apresentam menor corrente pelas chaves [8]. Nesse contexto a matriz Z_{bus} pode ser de grande utilidade, pois além de possibilitar o cálculo da rede com laços, é possível também determinar com facilidade quais as chaves pertencem a um laço formado e qual a corrente circulante pelas chaves pertencentes ao laço. Dessa forma foi desenvolvido um algoritmo que utiliza a matriz Z_{bus} para a determinação dos ramos (chaves) pertencentes a um laço formado devido ao fechamento de uma chave normalmente aberta. O algoritmo desenvolvido é apresentado na figura B.9.

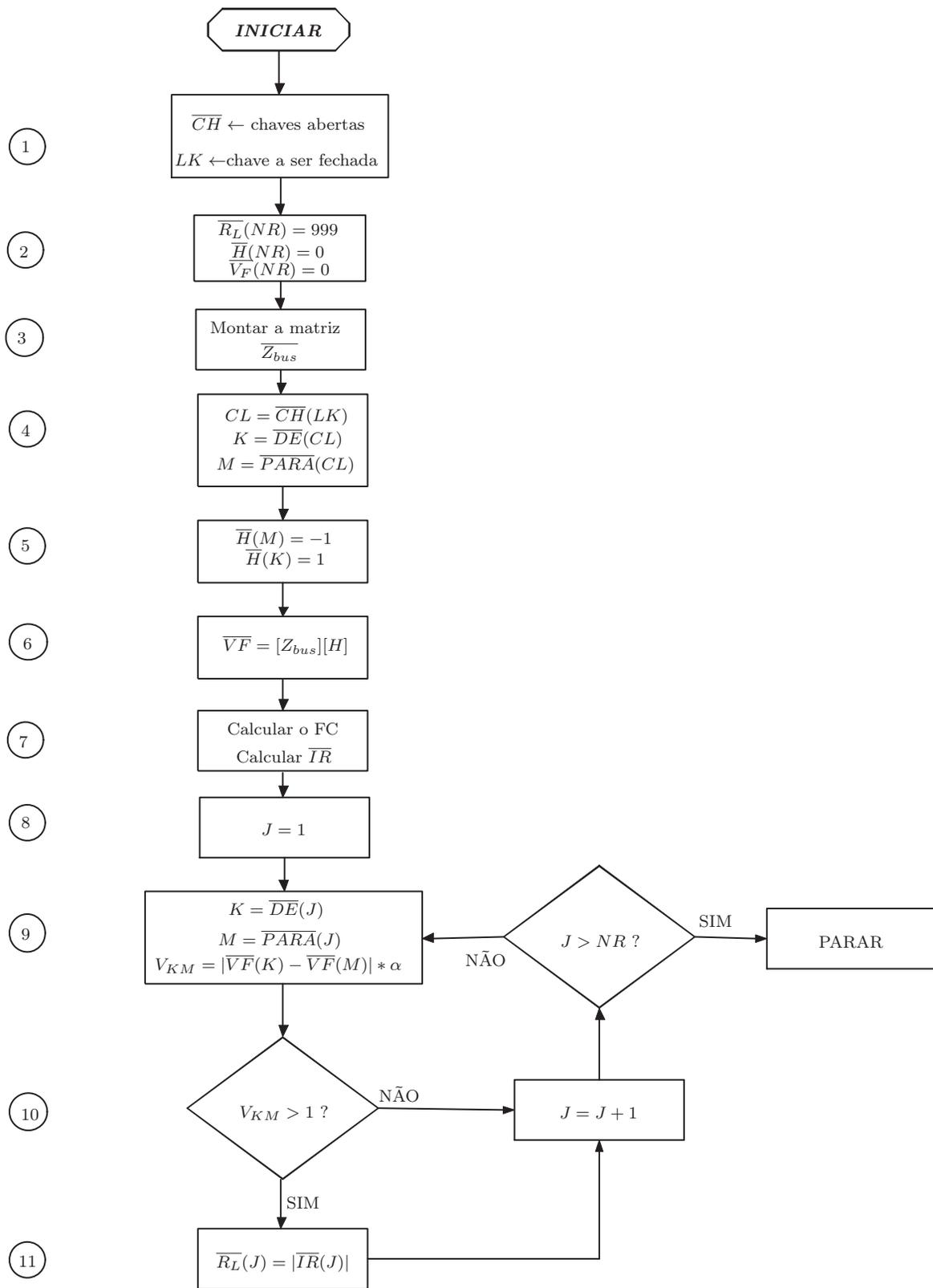


Figura B.9: Algoritmo para determinação das chaves pertencentes a um laço

A seguir detalha-se os blocos do algoritmo mostrado na Figura B.9.

1. Obter o vetor \overline{CH} que armazena as chaves abertas dos sistema e LK que é o apontador que indica qual chave será fechada.
2. Inicializar os vetores $\overline{R_L}$, \overline{H} e $\overline{V_F}$
3. Montar a Matriz Z_{bus} de acordo com o algoritmo 3
4. Obter CL , K e M a partir do apontador LK
5. Definir o vetor H como uma injeção de corrente de 1 pu nas barras K e retorno pela barra M
6. Calcular o vetor \overline{VF} através da multiplicação de $\overline{Z_{bus}}$ e \overline{H}
7. Calcular um fluxo de carga utilizando a matriz Z_{bus} e calcular as correntes de ramo \overline{IR}
8. Inicializar o contador J
9. Determinar o valor de V_{KM} para cada ramo da rede utilizando os valores das tensões obtidas no bloco 6
10. Considerar somente valores de V_{KM} maiores que 1
11. Se o valor de V_{KM} em determinado ramo for maior que 1, então armazenar o valor da corrente já calculada no vetor R_L
12. Repetir o procedimento até que todos os ramos da rede tenham sido processados

Percebe-se que a idéia do algoritmo é bastante simples, baseando-se no fato que a injeção de corrente nas barras terminais de uma chave aberta, haverá uma variação de corrente em todos os ramos que pertencerem ao laço formado pelo fechamento dessa chave. Como houve variação de corrente, haverá queda de tensão nos respectivos ramos, que pode ser calculada de maneira simples. Uma vez identificadas as quedas de tensão, estão automaticamente identificados os ramos que fazem parte do laço, e assim, atribui-se a cada ramo identificado a sua respectiva corrente, previamente calculada pelo fluxo de carga. Essas correntes são armazenadas no vetor R_L que foi inicializado com valores elevados (999). Dessa forma, é possível ordenar as correntes em ordem crescente, e utilizar somente alguns valores (as corrente de menor valor) como opção de abertura de chaves, para retornar a rede à sua condição radial.

Apêndice C

Dados dos Sistemas Testados

C.1 Sistema de 69 barras

Tabela C.1: Dados do sistema de 69 barras

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVAr)
1	1	2	0,0005	0,0012	0,0000	0,0000
2	2	3	0,0005	0,0012	0,0000	0,0000
3	3	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	4	5	0,0015	0,0036	0,0000	0,0000
5	5	6	0,0251	0,0294	0,0000	0,0000
6	6	7	0,3660	0,1864	0,8780	0,7200
7	7	8	0,3811	0,1941	13,4550	0,7200
8	8	9	0,0922	0,0470	24,8870	17,8100
9	9	10	0,0493	0,0251	10,0000	7,2080
10	10	11	0,8190	0,2707	9,3330	6,6660
11	11	12	0,1872	0,0619	48,5000	34,6090
12	12	13	0,7114	0,2351	48,5000	34,6090
13	13	14	1,0300	0,3400	2,7100	1,8210
14	14	15	1,0440	0,3450	2,7100	1,5210
15	15	16	1,0580	0,3496	0,0000	0,0000
16	16	17	0,1966	0,0650	15,1760	10,1980
17	17	18	0,3744	0,1238	16,5000	11,7750
18	18	19	0,0047	0,0016	16,5000	11,7750
19	19	20	0,3276	0,1083	0,0000	0,0000
20	20	21	0,2106	0,0696	0,3160	0,2120
21	21	22	0,3416	0,1129	37,9830	27,1000
22	22	23	0,0140	0,0046	1,7620	1,1840
23	23	24	0,1591	0,0526	0,0000	0,0000
24	24	25	0,3463	0,1145	9,3900	6,6700
25	25	26	0,7488	0,2475	0,0000	0,0000
26	26	27	0,3089	0,1021	4,6670	3,3300
27	27	28	0,1732	0,0572	4,6670	3,3301
28	3	29	0,0044	0,0108	8,6670	6,1850
29	29	30	0,0640	0,1565	8,6670	6,1850

Tabela C.2: Continuação - Dados do sistema de 69 barras

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVAr)
30	30	31	0,3978	0,1315	0,0000	0,0000
31	31	32	0,0702	0,0232	0,0000	0,0000
32	32	33	0,3510	0,1160	0,0000	0,0000
33	33	34	0,8390	0,2816	4,5820	3,2600
34	34	35	1,7080	0,5646	6,5010	5,5490
35	35	36	1,4740	0,4873	1,9200	1,2900
36	4	37	0,0044	0,0108	8,6670	6,1850
37	37	38	0,0640	0,1565	8,6670	6,1850
38	38	39	0,1053	0,1230	0,0000	0,0000
39	39	40	0,0304	0,0355	8,0000	5,7090
40	40	41	0,0018	0,0021	8,0000	5,7090
41	41	42	0,7283	0,8509	0,3920	0,3250
42	42	43	0,3100	0,3623	0,0000	0,0000
43	43	44	0,0410	0,0478	2,0000	1,4270
44	44	45	0,0092	0,0116	0,0000	0,0000
45	45	46	0,1089	0,1373	3,0760	8,7870
46	46	47	0,0009	0,0012	3,0760	8,7870
47	5	48	0,0034	0,0084	0,0000	0,0000
48	48	49	0,0851	0,2083	26,3500	18,8000
49	49	50	0,2898	0,7091	28,2260	91,4920
50	50	51	0,0822	0,2011	128,2260	91,4920
51	9	52	0,0928	0,0473	13,5120	9,4420
52	52	53	0,3319	0,1114	1,2020	0,8940
53	10	54	0,1740	0,0886	1,4490	1,1620
54	54	55	0,2030	0,1034	8,7870	6,3220
55	55	56	0,2842	0,1447	8,0000	5,7080
56	56	57	0,2813	0,1433	0,0000	0,0000
57	57	58	1,5900	0,5337	0,0000	0,0000
58	58	59	0,7837	0,2630	0,0000	0,0000
59	59	60	0,3042	0,1006	0,6670	24,0250
60	60	61	0,3861	0,1172	0,0000	0,0000
61	61	62	0,5075	0,2555	414,6670	295,9100
62	62	63	0,9740	0,0496	10,6670	7,6120
63	63	64	0,1450	0,0738	0,0000	0,0000
64	64	65	0,7105	0,3619	75,6700	53,8730
65	65	66	1,0410	0,5302	19,6700	13,9120
66	12	67	0,2012	0,0611	6,0000	4,2820
67	67	68	0,0047	0,0014	6,0000	4,2820
68	13	69	0,7394	0,2444	9,3330	6,6600
69	69	70	0,0047	0,0016	9,3330	6,6604
70	12	44	0,5000	0,5000		
71	14	22	0,5000	0,5000		
72	16	47	1,0000	1,0000		
73	51	60	2,0000	2,0000		
74	28	66	1,0000	1,0000		

C.1.1 Diagrama unifilar do sistema de 69 barras

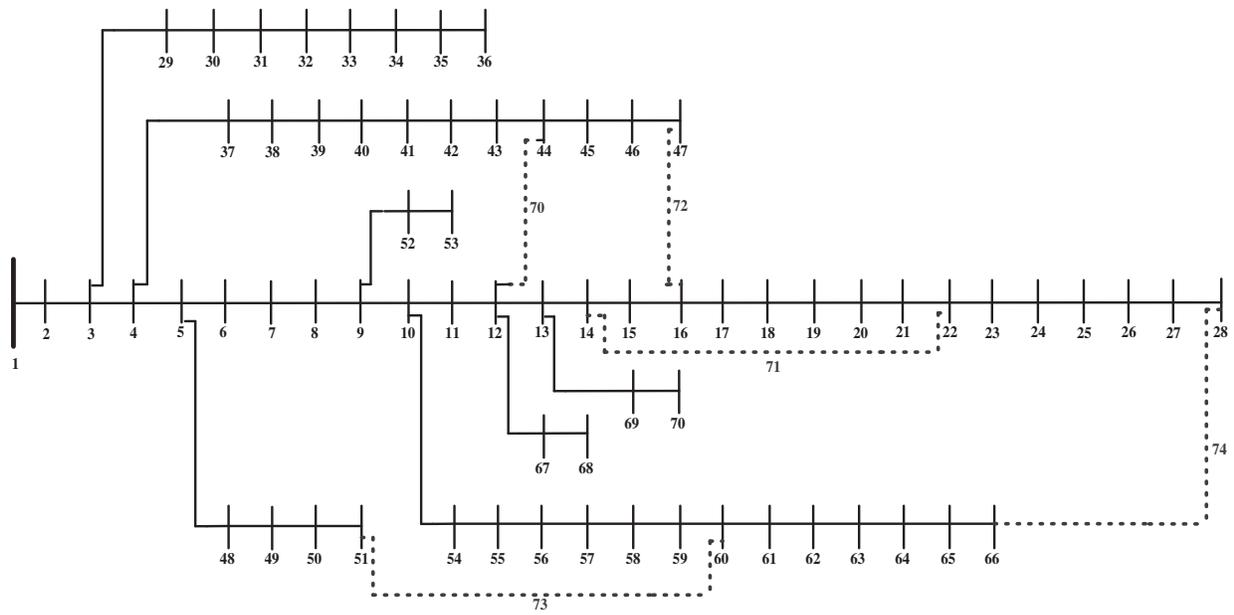


Figura C.1: Sistema de 69 barras.

C.2 Sistema de 135 barras

Tabela C.3: Dados do sistema de 135 barras

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVAr)
1	1	2	0,33205	0,76653	0,000	0,000
2	2	3	0,00188	0,00433	47,780	19,009
3	3	4	0,22340	0,51535	42,551	16,929
4	4	5	0,09943	0,22953	87,0220	34,622
5	5	6	0,15571	0,35945	311,310	123,855
6	6	7	0,16321	0,37677	148,869	59,228
7	7	8	0,11444	0,26417	238,672	94,956
8	7	9	0,05675	0,05666	62,299	24,786
9	9	10	0,52124	0,27418	124,598	49,571
10	9	11	0,10877	0,10860	140,175	55,768
11	11	12	0,39803	0,20937	116,813	46,474
12	11	13	0,91744	0,31469	249,203	99,145
13	11	14	0,11823	0,11805	291,447	115,592
14	14	15	0,50228	0,26421	303,720	120,835
15	14	16	0,05675	0,05666	215,396	85,695
16	16	17	0,29379	0,15454	198,586	79,007
17	1	18	0,33205	0,76653	0,000	0,000
18	18	19	0,00188	0,00433	0,000	0,000
19	19	20	0,22324	0,51535	0,000	0,000
20	20	21	0,10881	0,25118	30,127	14,729
21	21	22	0,71078	0,37388	230,972	112,920
22	21	23	0,18197	0,42008	60,256	29,459
23	23	24	0,30326	0,15952	230,972	112,920
24	23	25	0,02439	0,05630	120,507	58,915
25	25	26	0,04502	0,10394	0,000	0,000
26	26	27	0,01876	0,04331	56,981	27,857
27	27	28	0,11823	0,11230	364,665	178,281
28	28	29	0,02365	0,02361	0,000	0,000
29	29	30	0,18954	0,09970	124,647	60,939
30	30	31	0,39803	0,20937	56,981	27,857
31	29	32	0,05675	0,05666	0,000	0,000
32	32	33	0,09477	0,04985	85,473	41,787
33	33	34	0,41699	0,21934	0,000	0,000
34	34	35	0,11372	0,05982	396,735	193,960
35	32	36	0,07566	0,07555	0,000	0,000
36	36	37	0,36960	0,19442	181,152	88,563
37	37	38	0,26536	0,13958	242,172	118,395
38	36	39	0,05675	0,05660	75,316	36,821
39	1	40	0,33205	0,76653	0,000	0,000
40	40	41	0,11819	0,27283	1,254	0,531
41	41	42	2,96288	1,01628	6,274	2,660
42	41	43	0,00188	0,00433	0,000	0,000
43	43	44	0,06941	0,16024	117,880	49,971
44	44	45	0,81502	0,42872	62,668	25,566
45	44	46	0,06378	0,14724	172,285	73,034
46	46	47	0,13132	0,30315	458,556	194,388
47	47	48	0,06191	0,14291	262,962	111,473
48	48	49	0,11444	0,26417	235,761	99,942

Tabela C.4: Continuação - Dados do sistema de 135 barras

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVAr)
49	49	50	0,28374	0,28331	0,000	0,000
50	50	51	0,28374	0,28321	109,215	46,298
51	49	52	0,04502	0,10394	0,000	0,000
52	52	53	0,02626	0,06063	72,809	30,865
53	53	54	0,06003	0,13858	258,473	109,570
54	54	55	0,03002	0,06929	69,169	29,322
55	55	56	0,02064	0,04764	21,843	9,260
56	53	57	0,10881	0,25118	0,000	0,000
57	57	58	0,25588	0,13460	20,527	8,702
58	58	59	0,41699	0,21934	150,548	63,819
59	59	60	0,50228	0,26421	220,687	93,552
60	60	61	0,33170	0,17448	92,384	39,163
61	61	62	0,20849	0,10967	0,000	0,000
62	48	63	0,13882	0,32047	226,693	96,098
63	1	64	0,00750	0,01732	0,000	0,000
64	64	65	0,27014	0,62362	294,016	116,974
65	65	66	0,38270	0,88346	83,015	33,028
66	66	67	0,33018	0,76220	83,015	33,028
67	67	68	0,32830	0,75787	103,77	41,285
68	68	69	0,17072	0,39409	176,408	70,184
69	69	70	0,55914	0,29412	83,015	33,028
70	69	71	0,05816	0,13425	217,917	86,698
71	71	72	0,70130	0,36890	23,294	9,267
72	72	73	1,02352	0,53839	5,075	2,019
73	71	74	0,06754	0,15591	72,638	28,899
74	74	75	1,32352	0,45397	405,99	161,523
75	1	76	0,01126	0,02598	0,000	0,000
76	76	77	0,72976	1,68464	100,182	42,468
77	77	78	0,22512	0,51968	142,523	60,417
78	78	79	0,20824	0,48071	96,042	40,713
79	79	80	0,04690	0,10827	300,454	127,366
80	80	81	0,61950	0,61857	141,238	59,873
81	81	82	0,34049	0,33998	279,847	118,631
82	82	83	0,56862	0,29911	87,312	37,013
83	82	84	0,10877	0,10860	243,849	103,371
84	84	85	0,56862	0,29911	247,75	105,025
85	1	86	0,01126	0,02598	0,000	0,000
86	86	87	0,41835	0,96575	89,878	38,101
87	87	88	0,10499	0,13641	1137,280	482,108
88	87	89	0,43898	1,01338	458,339	194,296
89	89	90	0,07520	0,02579	385,197	163,290
90	90	91	0,07692	0,17756	0,000	0,000
91	91	92	0,33205	0,76653	79,608	33,747
92	92	93	0,08442	0,19488	87,312	37,013
93	93	94	0,13320	0,30748	0,000	0,000
94	94	95	0,29320	0,29276	74,001	31,370
95	95	96	0,21753	0,21721	232,05	98,369
96	96	97	0,26482	0,26443	141,819	60,119
97	94	98	0,10318	0,23819	0,000	0,000

Tabela C.5: Continuação - Dados do sistema de 135 barras

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVAr)
98	98	99	0,13507	0,31181	76,449	32,408
99	1	100	0,00938	0,02165	0,000	0,000
100	100	101	0,16884	0,38976	51,322	21,756
101	101	102	0,11819	0,27283	59,874	25,381
102	102	103	2,28608	0,78414	9,065	3,843
103	102	104	0,45587	1,05236	2,092	0,887
104	104	105	0,69600	1,60669	16,735	7,094
105	105	106	0,45774	1,05669	1506,522	638,634
106	106	107	0,20298	0,26373	313,023	132,694
107	107	108	0,21348	0,27737	79,831	33,842
108	108	109	0,54967	0,28914	51,322	21,756
109	109	110	0,54019	0,28415	0,000	0,000
110	108	111	0,04550	0,05911	202,435	85,815
111	111	112	0,47385	0,24926	60,823	25,874
112	112	113	0,86241	0,45364	45,618	19,338
113	113	114	0,56862	0,29911	0,000	0,000
114	109	115	0,77711	0,40878	157,070	66,584
115	115	116	1,08038	0,56830	0,000	0,000
116	110	117	1,06633	0,57827	250,148	106,041
117	117	118	0,47385	0,24926	0,000	0,000
118	105	119	0,32267	0,74488	68,809	28,593
119	119	120	0,14633	0,33779	32,072	13,596
120	120	121	0,12382	0,28583	61,084	25,894
121	1	122	0,01126	0,02598	0,000	0,000
122	122	123	0,64910	1,49842	94,622	46,26
123	123	124	0,04502	0,10394	49,858	24,375
124	124	125	0,52640	0,18056	123,164	60,214
125	124	126	0,02064	0,04764	78,350	38,304
126	126	127	0,53071	0,27917	145,475	71,121
127	126	128	0,09755	0,22520	21,369	10,447
128	128	129	0,11819	0,27283	74,789	36,564
129	128	130	0,13882	0,32047	227,926	111,431
130	130	131	0,04315	0,09961	35,614	17,411
131	131	132	0,09192	0,21220	249,295	121,877
132	132	133	0,16134	0,37244	316,722	154,842
133	133	134	0,37832	0,37775	333,817	163,199
134	134	135	0,39724	0,39664	249,295	121,877
135	135	136	0,29320	0,29276	0,000	0,000
136	8	74	0,13132	0,30315		
137	10	25	0,26536	0,13958		
138	16	84	0,14187	0,14166		
139	39	136	0,08512	0,08499		
140	26	52	0,04502	0,10394		
141	51	97	0,14187	0,14166		
142	56	99	0,14187	0,14166		
143	63	121	0,03940	0,09094		
144	67	80	0,12944	0,29882		
145	80	132	0,01688	0,03898		
146	85	136	0,33170	0,17448		

Tabela C.6: Continuação - Dados do sistema de 135 barras

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVAr)
147	92	105	0,14187	0,17166		
148	91	130	0,07692	0,17756		
149	91	104	0,07692	0,17756		
150	93	105	0,07692	0,17756		
151	93	133	0,07692	0,17756		
152	97	121	0,26482	0,26443		
153	111	48	0,49696	0,64567		
154	127	77	0,17059	0,08973		
155	129	78	0,05253	0,12126		
156	136	99	0,29320	0,29276		

Apêndice D

Divulgação da Pesquisa

Durante a realização deste trabalho de pesquisa foram submetidos os seguintes artigos:

- GUIMARÃES, M. A. N.; CASTRO, C. A; Romero R., Reconfiguration of distribution systems by a modified genetic algorithm, In: Power Tech 2007, Lausanne, p. 1-6, 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: XVII Congresso Brasileiro de Automática (CBA), Juiz de Fora/MG., p. 1-6, 2008.
- GUIMARÃES, M. A. N.; CASTRO, C. A; Romero R., Distribution systems operation optimization through reconfiguration and capacitor allocation by a dedicated genetic algorithm, In: Submetido IET Generation, Transmission & Distribution.