

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UFCG

**ALGORITMOS GENÉTICOS PARA
LOCALIZAÇÃO E AJUSTES ÓTIMOS
DE REGULADORES DE TENSÃO EM
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

Angelo Márcio Formiga de Almeida

Campina Grande - Paraíba - Brasil
Agosto de 2004

Angelo Márcio Formiga de Almeida

**ALGORITMOS GENÉTICOS PARA
LOCALIZAÇÃO E AJUSTES ÓTIMOS
DE REGULADORES DE TENSÃO EM
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

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

Área de Concentração: Processamento da Energia

Benemar Alencar de Souza, D.Sc.

Orientador

Campina Grande - Paraíba – Brasil

Agosto de 2004



Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da UFCC.

A447a
2004 Almeida, Angelo Márcio Formiga de
Algoritmos Genéticos Para Localização e Ajustes
Ótimos de Reguladores de Tensão em Sistemas de
Distribuição Utilizando. Campina Grande: UFCC, 2004.

77 p.

Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica) UFCC /
CCT.

Inclui Bibliografia.

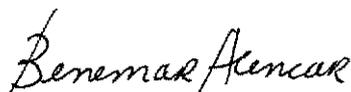
I. Sistemas de Distribuição. II. Algoritmos Genéticos.
III. Localização e Ajustes de Reguladores de Tensão.

CDU: 621.316.722

**ALGORITMOS GENÉTICOS PARA LOCALIZAÇÃO E AJUSTES ÓTIMOS DE
REGULADORES DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

ÂNGELO MÁRCIO FORMIGA DE ALMEIDA

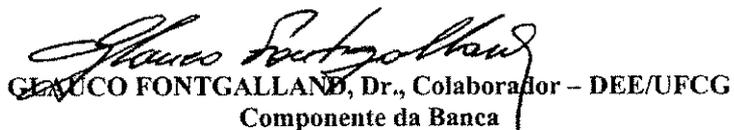
Dissertação Aprovada em 27.08.2004



BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Orientador



WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFCG
Componente da Banca



GLAUCIO FONTGALLAND, Dr., Colaborador – DEE/UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
Agosto - 2004

Dedicatória

*À memória de meu pai, Manoel Lourenço de Almeida,
que com seu amor, trabalho e dedicação, proporcionou
todas as condições para que eu chegasse até aqui.
DEDICO.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus, acima de tudo, pelo dom da vida.

À COPELE e ao CNPq, pela oportunidade e apoio financeiro em poder realizar este trabalho.

Ao meu Orientador, Prof. Benemar Alencar de Souza, incentivador e amigo em todos os momentos.

Aos professores: Washington L. A. Neves, Benedito Antônio Luciano e Edson Guedes da Costa, pelos conhecimentos adquiridos durante este trabalho.

Aos demais professores e funcionários do Laboratório de Alta Tensão.

Aos funcionários da Miniblio e COPELE, Eleonôra, Pedro e Ângela.

Aos colegas de trabalho: Franklin, Helon, Luciano, José Antônio, Estácio, Andréa, Josivan e Damásio, pela amizade e convivência.

À minha esposa Socorro, por todo o apoio, compreensão e carinho dedicados sempre.

À minha mãe Socorro, por todo amor e dedicação em todos os momentos.

Aos meus estimados irmãos Arnoud, Aldo e Adriana, por todo incentivo e apoio recebidos.

E aos demais que mesmo indiretamente participaram da realização deste trabalho, digo sinceramente,

Muito obrigado.

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	x
Resumo	xi
Abstract	xii
Capítulo 1 – Introdução	01
1.1 Considerações Iniciais.....	01
1.2 Perdas em Sistemas de Distribuição.....	02
1.3 Regulação de Tensão em Sistemas de Distribuição.....	03
1.4 O Método da Soma de Potências.....	04
1.5 Revisão Bibliográfica.....	07
1.6 Objetivos.....	12
1.7 Organização do Trabalho.....	13
Capítulo 2 – Reguladores Automáticos em Sistemas de Distribuição	15
2.1 Aplicação de reguladores Automáticos em Sistemas de Distribuição.....	15
2.2 Regulador Trifásico.....	16
2.3 Banco de Reguladores Monofásicos em Delta Fechado.....	18
2.4 Banco de Reguladores Monofásicos em Delta Aberto.....	20
2.5 O Compensador de Queda de Tensão.....	21

2.5.1 Ajustes do Compensador de Queda de Tensão para Reguladores Trifásicos ou Banco em Y.....	23
2.5.2 Ajustes do Compensador de Queda de Tensão para Banco em Δ	26
2.6 Dimensionamento de Reguladores de Tensão.....	27
2.7 Controles e Ajustes de Reguladores de Tensão.....	29
Capítulo 3 – Algoritmos Genéticos.....	31
3.1 Uma Breve Introdução.....	31
3.2 Operadores Básicos de um Algoritmo Genético.....	34
3.3 Convergência do Método.....	37
3.4 Desempenho de um Algoritmo Genético.....	39
Capítulo 4 – A Formulação do Problema.....	42
4.1 A Codificação.....	42
4.1.1 Codificação para Um Regulador.....	43
4.1.2 Codificação para Dois Reguladores.....	44
4.2 Funções de Aptidão.....	45
4.3 Formulação para Regulador Trifásico.....	46
4.4 Formulação para Banco de Reguladores Monofásicos.....	48
4.5 O Algoritmo Proposto.....	49
Capítulo 5 – Estudos de Casos e Análises de Resultados.....	51
5.1 Implementação para o Regulador Trifásico.....	51
5.2 Implementação para Um Banco de Reguladores Monofásicos.....	57
5.3 Implementação para Dois Bancos de Reguladores Monofásicos.....	60
Capítulo 6 – Conclusões.....	65

Referências Bibliográficas	67
Apêndice A – Dados dos Alimentadores Utilizados	71
Apêndice B – Formulação Matemática do Método da Soma de Potências	76

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Modelo do alimentador radial.....	05
Figura 2.1a – Modelo do regulador trifásico.....	17
Figura 2.1b – Circuito equivalente por fase do regulador trifásico.....	17
Figura 2.2 – Modelo do regulador de tensão.....	17
Figura 2.3 – Banco de reguladores monofásicos ligados em delta fechado.....	18
Figura 2.4 – Banco de reguladores monofásicos ligados em delta aberto.....	20
Figura 2.5 – Diagrama simplificado do compensador de queda de tensão.....	21
Figura 3.1 – Representação do método da roleta.....	35
Figura 3.2 – Cruzamento c/ 01 ponto de corte em cromossomos c/ codificação binária.....	36
Figura 4.1 – Cromossomo relativo a um regulador.....	43
Figura 4.2 – Cromossomo para dois reguladores instalados.....	44
Figura 4.3 – Esquema simplificado do algoritmo genético utilizado.....	50
Figura 5.1 – Alimentador de 34 barras (11 kV) a que o algoritmo foi aplicado.....	52
Figura 5.2 – Perfil de tensão do alimentador da Figura 5.1 no caminho da barra terminal 27.....	55
Figura 5.3 – Perfil de tensão do alimentador da Figura 5.1 no caminho da barra terminal 34.....	55
Figura 5.4 – Perfil de tensão do alimentador da Figura 5.1 no caminho da barra terminal 12.....	56

Figura 5.5 – Perfil de tensão do alimentador da Figura 5.1 no caminho da barra terminal 30	56
Figura 5.6 – Alimentador PNO-007, 70 barras (13,8 kV) da CEAL, a que o algoritmo foi aplicado	57
Figura 5.7 – Perfil de tensão no caminho mais longo do alimentador radial de 34 barras	59
Figura 5.8 – Perfil de tensão no caminho mais longo do alimentador radial PNO-007 de 70 barras da CEAL	60
Figura 5.9 – Perfil de tensão, para dois bancos de reguladores, do alimentador expresso de 17 barras	62
Figura 5.10 – Perfil de tensão, para dois bancos de reguladores, no caminho mais longo do alimentador radial PNO-007 de 70 barras da CEAL	62
Figura B.1 – Trecho de um alimentador radial	76

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Relação entre a faixa de regulação e a capacidade em kVA de um regulador de $\pm 10\%$	30
Tabela 3.1 – Equivalência de termos entre biologia e AGs.....	33
Tabela 5.1 – Localização e ajustes ótimos utilizando a função de aptidão s/ penalidade...	53
Tabela 5.2 – Localização e ajustes ótimos utilizando a função de aptidão c/ penalidade...	53
Tabela 5.3 – Redução das perdas com a instalação do regulador.....	54
Tabela 5.4 – Parâmetros do algoritmo genético para um banco de reguladores.....	58
Tabela 5.5 – Localização e ajustes ótimos do banco de reguladores.....	58
Tabela 5.6 – Redução das perdas após a instalação do banco de reguladores.....	59
Tabela 5.7 – Localização e ajustes ótimos para o alimentador expresso de 17 barras.....	61
Tabela 5.8 – Localização e ajustes ótimos para o alimentador de 70 barras.....	61
Tabela 5.9 – Redução das perdas após a instalação dos bancos de reguladores.....	61
Tabela 5.10 – Parâmetros do algoritmo genético para dois bancos de reguladores.....	63
Tabela 5.11 – Dimensionamento da potência em kVA dos reguladores de tensão.....	64
Tabela A.1 – Dados do alimentador radial de 34 barras em 11 kV.....	72
Tabela A.2 – Dados do alimentador radial expresso de 17 barras em 11 kV.....	73
Tabela A.3 – Dados do alimentador radial de 70 barras em 13.8 kV, PNO-007 da CEAL.....	75

Resumo

Nesta dissertação trata-se do problema da localização e ajustes ótimos de reguladores de tensão trifásicos e bancos de reguladores monofásicos em alimentadores de distribuição radiais. O problema é resolvido mediante um algoritmo genético que minimiza o desvio das tensões de barra em relação à tensão nominal do sistema, acompanhado de redução de perdas com a instalação dos reguladores. As condições de carga leve e de pico são consideradas. Os degraus de operação e a localização dos reguladores são tomados como variáveis discretas. O cálculo de fluxo de carga é feito utilizando-se o método da soma de potências. O modelo de carga usado é o da potência constante. O algoritmo implementado é validado por meio do estudo de um sistema conhecido na literatura. O algoritmo genético implementado também é aplicado a um sistema regional de distribuição.

Abstract

This work deals with the localization and optimal adjustment of tri-phase voltage regulators and single phase regulators banks in radial distribution systems. Low and peak system loading conditions are considered. This problem is solved using an Genetic Algorithm which minimizes the bar voltage deviation related to the system rated voltage and losses reduction with the regulators installation. The operation taps and the regulators localization are assumed as discrete variables. The load flow calculation is made with the Power Summation Method and a constant power modeling is used for the load representation. The implemented algorithm is validated by study of a distribution system presented in technical literature. In addition, an analysis of a regional distribution system is presented.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

O cenário atual das empresas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica está bastante mudado em relação às décadas passadas. Estas empresas que eram predominantemente estatais, entraram em um grande processo de privatização ainda inacabado. Novas regras foram estabelecidas após ser constituída a *Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL*, que tem por finalidade regular e fiscalizar a produção, transmissão e comercialização de energia elétrica. Também foi criado o *Operador Nacional do Sistema Elétrico*, uma entidade de direito privado, cujo objetivo é coordenar e operar o *Sistema Interligado Nacional* que engloba aproximadamente 97% das empresas geradoras de energia do país (ONS, 2001).

A *Centrais Elétricas Brasileiras S.A.*, empresa pública de propriedade do governo federal que dá sustentação às concessionárias de geração, transmissão e distribuição, tem operado programas para redução de desperdícios na produção e na

utilização de energia, bem como para eletrificação rural em larga escala e para reestruturação da iluminação pública urbana. Dentre estes, o *Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica* tem como uma de suas principais metas a redução de perdas de energia em sistemas de transmissão e distribuição. Espera-se que em 2015 as perdas nestes sistemas, que atualmente representam 17% do total da energia gerada, sejam reduzidas para 10% (PROCEL, 2001). É dentro do contexto de qualidade de energia elétrica, no que se refere principalmente a manter sempre os níveis de tensão entregues ao consumidor dentro dos limites aceitáveis e também na temática de redução de perdas em sistemas de distribuição, que se insere esta dissertação.

1.2 Perdas em Sistemas de Distribuição

Existem dois tipos de perdas em um sistema de distribuição: *fixas* e *variáveis* (Souza, 1997). As perdas fixas são aquelas essencialmente constantes, inerentes ao funcionamento dos equipamentos que compõem o sistema. Portanto, para compensá-las deve ser reservada uma parte da capacidade instalada. Em geral, o custo associado às perdas fixas é baixo. As perdas variáveis modificam-se de acordo com a carga, sendo mais preocupantes. Para fins de estudo, as perdas variáveis podem ser compreendidas de dois modos: *perdas de potência* e *perdas de energia*.

As perdas de potência, especialmente nos horários de maior consumo (ditos como horários de pico), são de grande importância para o sistema de distribuição. Reduzi-las significa aliviar o sistema e permitir que novos consumidores sejam atendidos. As perdas de energia são as perdas de potência contabilizadas ao longo de um período de tempo que pode ser diário, semanal, mensal ou anual. A diminuição das perdas de energia representa um aumento no faturamento por parte das concessionárias de distribuição, uma

vez que uma parcela da energia que antes estava sendo perdida passa a ser efetivamente vendida. O consumidor também é beneficiado, pois com a redução das perdas de energia, há uma melhoria nos níveis de tensão ao longo do alimentador de distribuição. Para a redução das perdas de energia em um alimentador radial de distribuição, várias ações podem ser realizadas, dependendo de cada caso. Dentre elas podemos destacar: aplicação de bancos de capacitores e de reguladores de tensão, que são soluções mais econômicas e exigem investimentos menores. Em situações críticas é necessário recondutoramento ou reconfiguração de rede, redistribuição das cargas e até implantação de novos alimentadores, construção ou ampliação de subestações.

1.3 Regulação de Tensão em Sistemas de Distribuição

A regulação de tensão é a diferença percentual entre as tensões máxima e mínima em determinado ponto do sistema para que se conheça desta forma a faixa de variação da tensão do referido ponto. Neste trabalho será considerada a regulação de tensão que trata da diferença percentual do módulo da tensão na barra onde será instalado o regulador de tensão.

$$\%R = \frac{|V_{cr}| - |V_{sr}|}{|V_{sr}|} \cdot 100 \quad (1.1)$$

em que:

$\%R$ é o percentual de regulação de tensão na barra onde será instalado o regulador;

$|V_{cr}|$ é o módulo da tensão na barra com regulador de tensão;

$|V_{sr}|$ é o módulo da tensão na barra sem o regulador de tensão.

O cálculo da regulação de tensão é feito nas duas condições de carregamento, ou seja, é calculada uma regulação de tensão para carga de pico e outra para a condição de carga leve. O ponto de regulação é aquele em que a tensão é a mesma qualquer que seja a condição de carga.

1.4 O Método da Soma de Potências

O método da soma de potências (Cespedes, 1990) para cálculo de fluxo de carga em alimentadores radiais é de eficiência comprovada. Trata-se de um método iterativo nas variáveis perdas ativa e reativa e converge mesmo em condições severas de carga e próximas do limite de estabilidade do sistema, quando métodos como os de Newton-Raphson não conseguem. Para condições de carga normal, o método da soma de potências converge em três ou quatro iterações muito mais rápidas que as iterações de Newton-Raphson, pois não trabalha com inversão de matrizes.

O método da soma de potências foi concebido com base no modelo de alimentador radial por trecho da Figura 1.1, segundo o qual a admitância em derivação é desprezível. Os dados requeridos são:

- a configuração do alimentador: barra de origem, resistência e reatância de cada trecho, carga em cada barra;
- a amplitude da tensão na barra da subestação;
- uma estimativa inicial das perdas de potência em cada trecho.

Geralmente se começa considerando nulas essas perdas. Em cada iteração, as amplitudes das tensões de barra são calculadas sequencialmente no sentido da subestação para as barras terminais enquanto que os fluxos são calculados no sentido das barras terminais para a subestação.

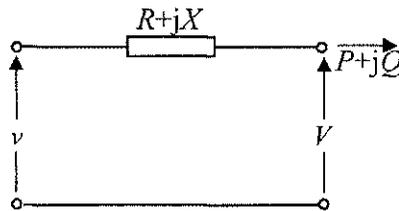


Figura 1.1. Modelo do alimentador.

A amplitude da tensão na barra final de um trecho genérico do alimentador radial, conforme demonstrado em Das et al (1995), corresponde à solução da seguinte equação biquadrada:

$$V^4 - 2AV^2 + B = 0 \quad (1.2)$$

em que:

$$A = \frac{v^2}{2} - (RP + XQ) \quad (1.3)$$

e

$$B = (R^2 + X^2)(P^2 + Q^2) \quad (1.4)$$

R e X são a resistência e a reatância do trecho e v , a tensão em seu início. A seguir é visto como determinar os fluxos P e Q na barra fim de cada trecho.

Seja i um trecho genérico do alimentador e que termina na barra j . Se Ω_j é o conjunto de todos os trechos que começam nessa mesma barra j , então os fluxos no final do trecho i são:

$$P_i = P_{L_j} + \sum_{k \in \Omega_j} (P_k + \Delta P_k) \quad (1.5)$$

e

$$Q_i = Q_{L_j} + \sum_{k \in \Omega_j} (Q_k + \Delta Q_k) \quad (1.6)$$

sendo:

$P_i(Q_i)$ Fluxo de potência ativa (reativa) no fim do trecho i ;

$P_{Lj}(Q_{Lj})$ Carga ativa (reativa) instalada na barra j ;

$\Delta P_k(\Delta Q_k)$ Perdas de potência ativa (reativa) no trecho k e que estão após a barra j .

No caso de j ser uma barra terminal, Ω_j é um conjunto vazio. Logo, $P_i = P_{Lj}$ e $Q_i = Q_{Lj}$. Uma iteração se completa quando o procedimento acima é repetido para todas as barras. Depois de calculada V , as estimativas das perdas de potência ativa e reativa podem ser refinadas:

$$\Delta P = \frac{R(P^2 + Q^2)}{V^2} \quad (1.7)$$

e

$$\Delta Q = \frac{X}{R} \Delta P \quad (1.8)$$

O processo iterativo converge quando a diferença entre as perdas totais (somatórios das perdas em cada trecho) em uma iteração e a iteração precedente é menor que uma tolerância especificada.

1.5 Revisão Bibliográfica

A determinação dos pontos mais adequados de instalação de reguladores de tensão, ou de bancos de capacitores, se constitui um problema típico de otimização e é desta forma que é tratado nesta dissertação. De acordo com o método de otimização aplicado, pode-se obter excelentes resultados na correção do perfil de tensão para alimentadores radiais de distribuição.

A evolução dos recursos computacionais permitiu a implementação de métodos de otimização cada vez mais sofisticados. Estes métodos podem ser classificados de acordo com o processo de otimização que utilizam. São divididos em quatro categorias, tendo evoluído cronologicamente nesta ordem:

- Métodos analíticos;
- Métodos de programação matemática;
- Métodos heurísticos;
- Métodos baseados em inteligência artificial.

As primeiras técnicas propostas tratavam de métodos analíticos e eram utilizadas em uma época em que os recursos computacionais eram escassos. Em geral, usavam o *Cálculo Diferencial* para determinar o máximo de uma função que envolvia os custos dos capacitores ou reguladores de tensão e a economia obtida após a aplicação dos mesmos na rede de distribuição. Quando se usam métodos analíticos, as variáveis que indicam a localização e o valor dos capacitores ou *tap* de operação dos reguladores, em geral, são contínuas. Isto acarreta dois problemas: o valor calculado para o capacitor ou *tap* do regulador pode não corresponder aos valores padronizados dos capacitores existentes ou número de *taps* dos reguladores (normalmente de 32 degraus), bem como os pontos

indicados para localização dos bancos podem não coincidir fisicamente com uma barra real do sistema de distribuição. Os resultados eram então arredondados para mais ou menos, de acordo com os valores práticos mais próximos, o que poderia resultar em uma redução de perdas menor do que o esperado, ou até mesmo no aparecimento de sobretensões.

A literatura sobre aplicação de bancos de capacitores em redes de distribuição é vasta. No entanto, trabalhos que tratam da aplicação de reguladores de tensão são mais raros. Uma série de três artigos publicados em 1985 se destaca por tratar do controle integrado de tensão e reativo (volt/var).

Em (Grainger e Civanlar, 1985a) é feito o modelamento do alimentador e regulador como um circuito π -nominal. O problema de localização e ajustes do regulador de tensão, bem como de localização, dimensionamento e tempo de chaveamento dos bancos de capacitores são mostrados que podem ser feitos como dois problemas separadamente, ou seja, de forma desacoplada.

Civanlar e Grainger (1985b) faz o tratamento analítico para os dois subproblemas, primeiro o do capacitor e depois do regulador de tensão. Para cada caso, a redução das perdas de potência em horário de pico e das perdas totais de energia, são calculadas com base em expressões analíticas, envolvendo o somatório de integrais. Nas integrais são calculadas funções de distribuições de corrente para as cargas nos ramais do alimentador, sendo cada função distribuição de corrente calculada através de somatório de termos envolvendo produtos de potências ativas e reativas pelas funções trigonométricas cosseno e seno, respectivamente e das tensões de barra. Considera um equivalente monofásico (tipo π) de um regulador trifásico e não trata de banco de reguladores monofásicos, além de não levar em conta a defasagem no ângulo da tensão de saída do regulador.

Civanlar e Grainger (1985c) mostra os resultados obtidos para um alimentador radial de 30 barras e 6 ramais, na tensão de 23 kV. A localização e ajuste dos reguladores são feitos considerando os bancos de capacitores já instalados, sendo que para o regulador é feita a localização e depois o ajuste do *tap*. Foi adotado o modelo de potência constante para todas as cargas do alimentador. Este trabalho, no entanto, não leva em conta as características discretas do problema, tendo em vista que o número de barras e número de degraus do regulador formam um conjunto finito e discreto. O primeiro regulador também é levado a operar no degrau mais alto (caso necessite de mais de um regulador), conforme modelo de potência constante, sem margem para atuação do mesmo, no caso de crescimento de carga.

Salama et al (1992) também considera a interdependência entre o perfil de tensão e as perdas na rede de distribuição. Faz uma explanação da configuração do sistema e utiliza o método de Gauss-Sidel para o cálculo do fluxo de carga e distribuição uniforme para a carga. São indicadas neste artigo, rotinas já prontas e o algoritmo de como estas rotinas funcionam para alocação de capacitores e reguladores de tensão. Laframboise et al (1995) é uma continuação de Salama et al (1992) e traz a implementação, para um alimentador de 34 barras, através de um sistema especialista que utiliza métodos heurísticos para a alocação e chaveamento de capacitores e também para reguladores de tensão através do uso de uma *Shell* disponível comercialmente que efetua os cálculos de fluxo de carga e redução de perdas e leva em conta os custos das perdas anuais de potência ativa em horário de pico, custos das perdas totais de energia e custos da aplicação dos capacitores. O trabalho não apresenta modelo de alimentador nem de regulador de tensão adotado. O método de Gauss-Sidel, empregado no cálculo do fluxo de carga, como se sabe, não tem convergência garantida para sistemas radiais de distribuição, principalmente em condições de carregamento elevado.

Oliveira e Kagan (1998) sugeriram um método heurístico para a seleção e alocação de bancos de capacitores e reguladores de tensão em redes de distribuição, que considera o modelo de corrente constante para as cargas. Os métodos heurísticos baseiam-se principalmente na intuição e experiência. São compostos de um conjunto de regras que formam estratégias rápidas e práticas.

De forma sucinta, através da redução do espaço de busca, apresentam soluções que com um certo grau de confiança são próximas da solução ótima. Em geral, os métodos heurísticos são de fácil entendimento e implementação se comparados aos métodos analíticos e métodos de programação matemática. Contudo, não há garantias de que as soluções obtidas através de métodos heurísticos sejam ótimas.

Civanlar et al (1988) também utilizaram um procedimento heurístico para redução de perdas em sistemas de distribuição por meio da reconfiguração de alimentadores.

Safigianni e Salis (2000) apresentam um algoritmo para localização ótima de reguladores de tensão em alimentadores radiais que leva em conta os custos. Procura a solução mais econômica, utilizando o mínimo de reguladores e colocando sempre os *taps* mais elevados, ou seja, elevando o perfil de tensão o mais alto possível e desta forma, não tendo também margem para ajustes necessários com o crescimento de carga. Para isso, também é feita a suposição de que todas as cargas do alimentador radial são de potência constante. Neste trabalho é considerado o modelamento e tratamento analítico feitos para o alimentador e regulador de tensão que foi apresentado em Grainger e Civanlar (1985a e 1985b) e portanto, também não leva em conta a característica discreta do problema (número de barras e *taps*). Não trata de banco de reguladores monofásicos e só encontra o ajuste do *tap* do regulador para a condição de carga de pico. A elevação do perfil de tensão

ao máximo permitido leva a aumento das perdas nos trechos onde o tipo de carga não seja predominantemente de potência constante.

Medeiros Jr. e Pimentel Filho (2002) resolvem o problema do controle de tensão com bancos de reguladores em alimentadores radiais pelo método do gradiente negativo, que é um método clássico de otimização não-linear. Este no entanto, se afasta da realidade, pois os ajustes do regulador (*taps*) são discretos e os pontos indicados de instalação (barras do alimentador) formam um conjunto finito e o método do gradiente negativo exige que a função objetivo seja contínua e diferenciável.

A questão da alocação e ajustes ótimos de reguladores de tensão em redes de distribuição é melhor formulado como um problema de otimização combinatória, tendo em vista a característica discreta do problema. Métodos baseados em inteligência artificial têm demonstrado grande eficiência quando aplicados a problemas desta natureza. Como exemplos de métodos baseados em inteligência artificial, podem ser citados: *algoritmos genéticos, têmpera simulada, lógica fuzzy e redes neurais artificiais*.

Souza et al (2004a) resolve o problema para um regulador trifásico, utilizando um algoritmo genético como método de otimização, levando em conta a característica discreta do problema. São apresentados os resultados para um alimentador de 34 barras em 11 kV. O problema também é resolvido em Souza et al (2004b) para um banco de reguladores monofásicos utilizando um algoritmo genético. São apresentados os resultados para dois alimentadores radiais, um de 34 barras em 11 kV e outro de 70 barras em 13,8 kV. O modelo de carga adotado foi o de potência constante e também foi considerada a tensão plana na otimização, ou seja, a localização e ajustes são considerados ótimos quando o perfil de tensão do alimentador estiver o mais próximo possível da tensão nominal.

1.6 Objetivos

Os trabalhos voltados para a correção do perfil de tensão e redução de perdas estiveram tradicionalmente mais ligados à compensação reativa, conforme a revisão bibliográfica feita na seção anterior, vários trabalhos focaram o controle integrado de tensão e reativo (vol/var), em que a aplicação de reguladores de tensão teve um papel secundário. Nos trabalhos que trataram da localização ótima de reguladores de tensão, não foi levada em conta a característica discreta do problema.

O objetivo principal deste trabalho é a correção do perfil de tensão e a redução das perdas de alimentadores radiais através de reguladores de tensão. Será feito o desenvolvimento e implementação de uma rotina computacional para obter a solução ótima do problema de localização e ajustes ótimos de reguladores automáticos, utilizando um algoritmo genético como método de otimização. A rotina computacional implementada deverá determinar: as barras de instalação dos reguladores, o degrau de operação em carga leve e o degrau de operação em carga de pico.

A ênfase do trabalho é considerar as variáveis do problema discretas, utilizando a curva de duração de carga segmentada em três níveis: carga leve, carga intermediária e carga de pico, sendo calculadas a redução das perdas de potência ativa (kW), nos horários de pico e a redução das perdas de energia (kWh). Será considerado o modelo de potência constante para as cargas do alimentador. Os objetivos complementares deste trabalho são:

- Considerar o perfil plano de tensão do alimentador como critério de otimalidade;
- Fazer a alocação e ajustes ótimos de reguladores trifásicos;

- Fazer a alocação e ajustes ótimos de bancos de reguladores monofásicos em delta fechado e em delta aberto;
- Dimensionar os reguladores a serem instalados;
- Oferecer um método que possa ser aplicado a qualquer sistema de distribuição de energia elétrica.

1.7 Organização do Trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em 6 capítulos. Segue uma breve descrição do conteúdo dos capítulos seguintes.

O capítulo 2 trata da aplicação de reguladores de tensão automáticos em sistemas de distribuição, mostrando o modelo e as equações correspondentes ao regulador trifásico e também para bancos de reguladores monofásicos em delta aberto e delta fechado, bem como os ajustes do compensador de queda de tensão e o dimensionamento de cada um destes.

O Capítulo 3 descreve a técnica de otimização utilizada neste trabalho: os algoritmos genéticos. É comentada a origem desses algoritmos, seus princípios de funcionamento e fatores que influenciam diretamente o seu desempenho.

O capítulo 4 trata da formulação do problema. É feito o detalhamento da codificação para um regulador e para dois reguladores instalados no alimentador. Em seguida, a formulação para regulador trifásico e para bancos de reguladores monofásicos, mostrando o algoritmo para a implementação do método.

No capítulo 5 é feito o estudo de casos e análise de resultados. Primeiro para o regulador trifásico e depois para o banco de reguladores monofásicos, sendo este feito para um banco e dois bancos. São utilizados dois alimentadores, um de 34 barras,

conhecido da literatura e outro de 70 barras do sistema de distribuição da Companhia Energética de Alagoas - CEAL.

No capítulo 6, são apresentadas as conclusões desta dissertação nas quais procurou-se resumir as contribuições e limitações deste trabalho, bem como apontar possíveis pontos para pesquisas futuras.

O apêndice A traz, em detalhe, os dados dos alimentadores utilizados e no Apêndice B é feita a formulação matemática do método da soma de potências.

Capítulo 2

Reguladores Automáticos em Sistemas de Distribuição

Este capítulo descreve os critérios para a localização ótima de reguladores em alimentadores de distribuição, detalhando o modelo de cada tipo de regulador, trifásico e banco de reguladores monofásicos. Em seguida é feito um estudo sobre o compensador de queda de tensão. Logo após é mostrado o dimensionamento e finalmente os controles e ajustes presentes em reguladores automáticos.

2.1 Aplicação de Reguladores Automáticos em Sistemas de Distribuição

A carga de um sistema de distribuição varia ao longo do tempo e a partir do conhecimento da *curva de carga* ou da *curva de duração de carga segmentada* do sistema, é possível utilizar reguladores automáticos que mudam os degraus de operação, com o objetivo de corrigir o perfil de tensão da rede e conseqüentemente, a redução das perdas quando o tipo predominante de carga seja de potência constante, o que ocorre em

alimentadores radiais urbanos (Rahardjo, 2003). A localização dos reguladores usualmente é feita na barra imediatamente antes da barra que já tem tensão abaixo do limite inferior permitido, na condição de carga de pico e já se prevendo um horizonte de crescimento de carga. O número de reguladores depende do perfil de tensão original e do carregamento do alimentador, sendo mais comum se ter até dois reguladores em série quando um só não for suficiente. As opções para o tipo e a configuração utilizados são: reguladores trifásicos em estrela aterrado ou banco de reguladores monofásicos em delta fechado e delta aberto.

O uso de bancos de reguladores monofásicos em delta fechado é o mais viável devido a ter maior faixa de regulação de tensão e uma maior flexibilidade na operação, pois pode operar em delta aberto quando uma unidade sair de operação por falha ou por programação de manutenção. No entanto, quando o espaço físico para a instalação do regulador for muito reduzido o regulador trifásico é recomendável.

2.2 Regulador Trifásico

O regulador de tensão automático é um autotransformador dotado de dispositivo comutador de derivação em carga. Na Figura 2.1a é esquematizado um regulador trifásico cujo equivalente por fase é mostrado na Figura 2.1b. Se as bobinas de controle e de excitação têm respectivamente n e N espiras, a relação de transformação é:

$$\frac{V}{v} = 1 + \frac{n}{N} = 1 + a \quad (2.1)$$

Como a relação de transformação $(1+a)$ difere apenas ligeiramente da unidade, a corrente $I - i$ é muito pequena em comparação com I ou i individualmente. Esse fato, inclusive, permite se empregar fio muito mais fino na bobina de excitação. Assim, o

enrolamento e o próprio regulador tornam-se menores e com um custo mais baixo que o transformador convencional de dois enrolamentos.

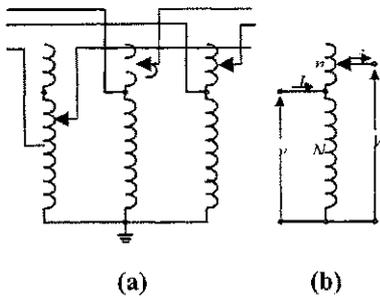


Figura 2.1 (a) Regulador trifásico e (b) circuito equivalente por fase.

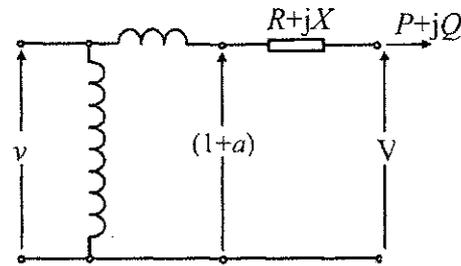


Figura 2.2 - Modelo do regulador de tensão.

A Figura 2.1b corresponde à situação ideal. Para se aproximar melhor da realidade se coloca em série uma impedância que represente a resistência e a reatância de dispersão da bobina de controle, conforme a Figura 2.2. Dependendo da polaridade (aditiva ou subtrativa) com que os enrolamentos são ligados, podemos ter o regulador como elevador ($V = (1+a).v$) ou abaixador de tensão ($V = (1-a).v$).

O regulador de tensão mais usual tem 32 degraus e faixa de regulação de $\pm 10\%$, ou seja, 16 degraus para o limite de $+10\%$ e 16 degraus para -10% . Nesse caso, os valores possíveis a , em p.u, de cada degrau são múltiplos de 0,00625, pois:

$$16a = 10\% \Rightarrow a = 5/8 \% \Rightarrow a = 0,00625$$

Se $d > 0$ o regulador é elevador, se $d < 0$, é abaixador e $d = 0$, o regulador é sem efeito. A impedância $R + jX$ é variável, sendo $R_{lim} + jX_{lim}$ seu valor máximo, quando o regulador opera nos limites: degraus $+16$ ou -16 . De um modo geral, considera-se que o valor da impedância seja:

$$R + jX = \frac{|d|}{16} (R_{\text{lim}} + jX_{\text{lim}}) \quad (2.2)$$

$|d|$ é o degrau em operação, independente de ser elevador ou abaixador. Isto é, d é um inteiro e pertence a $\{-16, -15, \dots, -1, 0, 1, \dots, 15, 16\}$.

2.3 Banco de Reguladores Monofásicos em Delta Fechado

O banco de reguladores monofásicos é a configuração mais usual em sistemas de distribuição trifásicos. Na configuração delta fechado a faixa de regulação é 50% maior. Isso significa que se as unidades monofásicas têm faixa de regulação de $\pm 10\%$, cada uma, a regulação efetiva do banco é de $\pm 15\%$.

Outra vantagem é que se uma das unidades monofásicas sair de operação por falha, as outras duas podem se manter em operação na configuração delta-aberto, mantendo ainda os níveis de tensão regulados, limitando-se contudo, a faixa de regulação, que será novamente de $\pm 10\%$. A Figura 2.3 mostra um banco de reguladores na configuração delta fechado.

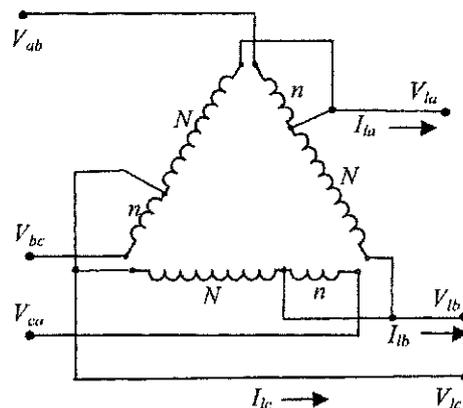


Fig. 2.3 - Banco de reguladores monofásicos ligados em delta fechado.

A seguir são mostradas as equações que relacionam o módulo da tensão e ângulo na saída do banco de reguladores monofásicos ligados em delta fechado, de acordo com o degrau d utilizado.

$$V = v\sqrt{(1+3a+3a^2)} \quad (2.3)$$

$$\Delta = \tan^{-1}\left(\frac{a\sqrt{3}}{2+3a}\right) \quad (2.4)$$

sendo:

$$a = d\left(\frac{0,1}{16}\right) \quad (2.5)$$

v → módulo da tensão de entrada do banco;

V → módulo da tensão de saída do banco;

d → degrau de operação;

Δ → defasagem no ângulo da tensão na saída do banco

No degrau mínimo (-16), a tensão na saída do banco é 15% menor que na entrada e a defasagem no ângulo da tensão é de $-5,8^\circ$ (Bishop et al, 1996). Já no degrau máximo (+16), a tensão na saída do banco é 15% maior e a defasagem no ângulo da tensão é $+4,3^\circ$. Esta defasagem no ângulo da tensão de saída, em relação ao ângulo de tensão de entrada, do banco de reguladores em delta fechado, é pequena e não afeta o fluxo de potência ativa em alimentadores radiais de distribuição (Gross, 1986).

Dois tipos de circuito delta fechado são possíveis: *lagging* e *leading*. Estes termos se referem ao ângulo de fase da corrente em relação à tensão. Para a configuração delta *lagging*, todas as unidades monofásicas têm a corrente atrasada da tensão em $(30^\circ+\phi)$ e para a configuração delta *leading*, todas as unidades monofásicas têm a corrente adiantada da tensão em $(30^\circ-\phi)$, sendo ϕ o ângulo de fator de potência da carga.

2.4 Banco de Reguladores Monofásicos em Delta Aberto

A configuração em delta aberto, vista na Figura 2.4, tem a vantagem de manter o sistema operando apesar de ter uma unidade monofásica a menos. Neste caso, se antes, na configuração delta fechado, a faixa de regulação do banco era de $\pm 15\%$, em delta aberto, a faixa de regulação do banco volta a ser de $\pm 10\%$, o mesmo de cada unidade monofásica e não há defasagem no ângulo da tensão de saída do banco em relação ao ângulo de tensão de entrada. Entretanto, ainda ocorre rotação de fase entre corrente e tensão de saída do banco, sendo que uma unidade monofásica tem a corrente atrasada da tensão em $(30^\circ + \phi)$, enquanto que a outra unidade tem a corrente adiantada da tensão em $(30^\circ - \phi)$.

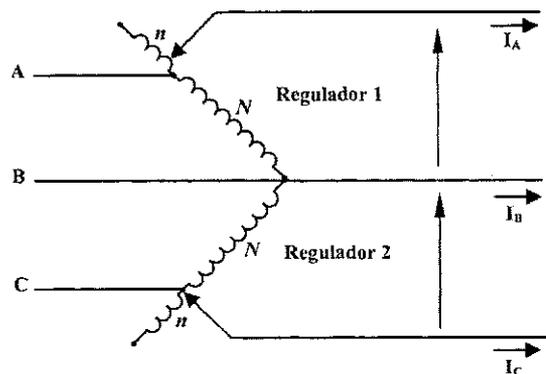


Fig. 2.4 - Banco de reguladores monofásicos ligados em delta aberto.

Portanto, em delta aberto, um regulador trabalha adiantado e o outro trabalha atrasado. A relação entre tensão de entrada e saída no banco de reguladores em delta aberto é mostrada na equação (2.6):

$$V = av \quad (2.6)$$

em que:

$a \rightarrow$ valor do degrau de operação, conforme definido na equação (2.5);

$v \rightarrow$ módulo da tensão de entrada do banco;

$V \rightarrow$ módulo da tensão de saída do banco;

2.5 O Compensador de Queda de Tensão

Quase todos os reguladores são instalados a alguma distância do centro de carga teórico. Isto significa que a carga não será atendida com o nível de tensão nominal devido a perdas na linha entre o regulador e a carga. Além disso, quando a carga aumenta, as perdas na linha também aumentam, causando uma condição de baixa tensão que ocorre durante o tempo de maior carga.

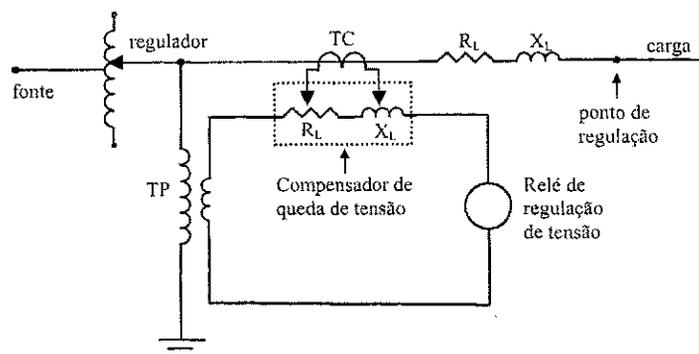


Fig. 2.5 - Diagrama simplificado do compensador de queda de tensão.

Para dar ao regulador a capacidade de regular ao centro de carga projetado, fabricantes incorporaram elementos de compensação da queda de tensão da linha nos controles. Este circuito usualmente consiste em um transformador de corrente (TC) que produz corrente proporcional à corrente de carga e elementos resistivos (R) e indutivos (X) através dos quais a corrente se estabelece.

Quando a carga aumenta, a corrente resultante que flui no TC através desses elementos produzem quedas de tensão que simulam a queda de tensão na linha primária. O compensador de queda de tensão é incluído no circuito de controle do regulador para que este possa manter a tensão num valor predeterminado em algum ponto remoto do local de instalação. A tensão neste ponto remoto, chamado ponto de regulação, é mantida a despeito de variação da carga, em kVA ou fator de potência.

O princípio de operação do compensador de queda de tensão é simples e se explica facilmente recorrendo-se a Figura 2.5. O relé de regulação de tensão tem completo controle sobre a operação do regulador, isto é, uma mudança na tensão sobre o relé, causa a comutação de derivação no sentido de restabelecer o valor inicial.

Para o regulador compensar a queda de tensão entre os pontos de instalação e de regulação, uma tensão proporcional à corrente de linha e dependente do fator de potência da carga deve ser introduzida entre o TP e o relé. Assim, a tensão aplicada ao relé é a tensão no TP menos a tensão no compensador. A resistência no secundário do TP é bem maior que a reatância, o que significa dizer que a corrente fornecida por ele está praticamente em fase com a tensão.

O transformador de corrente (TC) aplica uma corrente adicional aos elementos do compensador em fase e diretamente proporcional a corrente de linha. O relé é ajustado de tal modo que quando a corrente de carga for zero, a tensão na saída do regulador seja a desejada no ponto de regulação. Levando-se em conta a relação de transformação do TC, o compensador é ajustado para que seus elementos tenham valores proporcionais a resistência R_L e a reatância X_L do alimentador entre o regulador e o ponto de regulação.

2.5.1 Ajustes do Compensador de Queda de Tensão para Reguladores Trifásicos ou Banco em Y

A tensão introduzida no circuito de controle do regulador, pelo compensador de queda de tensão, deve ser igual, na base de tensão do circuito de controle, à queda de tensão no trecho do alimentador entre o regulador e o ponto de regulação. Se não há nenhuma carga neste trecho, é relativamente simples se obterem os ajustes. Para isto, podemos usar as seguintes equações:

$$R = \frac{TC_p}{TP} rl \quad (2.7)$$

c

$$X = \frac{TC_p}{TP} xl \quad (2.8)$$

em que:

R → ajuste da resistência do compensador em volts;

X → ajuste da reatância do compensador em volts;

TC_p → corrente nominal primária do TC em ampéres;

TP → relação de transformação do transformador de potencial;

r → resistência do alimentador (Ω/km), trecho entre o regulador e o ponto de regulação;

x → reatância do alimentador (Ω/km), trecho entre o regulador e o ponto de regulação;

l → distância (km) do regulador ao ponto de regulação.

Quando existem cargas ligadas ao alimentador, entre o regulador e o ponto de regulação, as correntes pelo TC e pelo ponto de regulação são diferentes. Portanto, as equações (2.7) e (2.8) não podem ser aplicadas diretamente como estão. As mesmas são então modificadas, respectivamente, para as seguintes:

$$R = \frac{TC_p}{TP} R_{ef} \quad (2.9)$$

e

$$X = \frac{TC_p}{TP} X_{ef} \quad (2.10)$$

em que R_{ef} e X_{ef} são as resistências e reatâncias efetivas do regulador ao ponto de regulação, ou seja, valores em ohm que quando multiplicados pela corrente no ponto de instalação, dão as quedas de tensão reais devidas a resistência e reatância, respectivamente.

Um modo de se determinar R_{ef} e X_{ef} é pelas equações:

$$R_{ef} = \frac{\sum_{k=1}^n I_k r_k l_k}{I_1} \quad (2.11)$$

e

$$X_{ef} = \frac{\sum_{k=1}^n I_k x_k l_k}{I_1} \quad (2.12)$$

em que:

n → número de seções do trecho do alimentador entre os pontos de instalação e de regulação. A primeira seção vai do regulador a primeira carga do trecho e a n -ésima seção vai da última carga ao ponto de regulação. A k -ésima seção para $k \neq 1$ e $k \neq n$, está entre a carga de ordem $k-1$ e a subsequente;

I_1 → corrente, em ampéres, pelo ponto de instalação do regulador;

I_k → corrente, em ampéres, na k -ésima seção;

r_k → resistência, em ohm/km, da k -ésima seção;

x_k → reatância, em ohm/km, da k -ésima seção;

l_k → distância, em km, da k -ésima seção;

Em alimentadores onde o cálculo de R_{ef} e X_{ef} , respectivamente, pelas equações (2.11) e (2.12) é trabalhoso, uma alternativa é medir a corrente pelo regulador e simultaneamente as tensões pelos pontos de instalação e de regulação. A partir destes valores medidos, calcula-se a queda de tensão entre esses dois pontos por:

$$\Delta V = I(R_{ef} \cos \phi + X_{ef} \sin \phi) \quad (2.13)$$

Conhecendo-se o fator de potência e a relação média r/x do alimentador, entre o regulador e o ponto de regulação, determinam-se:

$$R_{ef} = \frac{\Delta V}{I(\cos \phi + \frac{x}{r} \sin \phi)} \quad (2.14)$$

e

$$X_{ef} = \frac{\Delta V}{I(\frac{r}{x} \cos \phi + \sin \phi)} \quad (2.15)$$

O procedimento apresentado aqui se aplica sem restrição alguma à determinação dos ajustes para reguladores trifásicos, qualquer que seja a conexão interna (estrela ou triângulo). É igualmente válido para se determinarem os ajustes de reguladores monofásicos ligados em estrela. Geralmente os ajustes são os mesmos para os três reguladores. Porém, para alimentadores em que logo depois do banco de reguladores, cada fase segue uma direção, pode-se ter ajustes distintos. Isto porque cada fase poderá ter ponto de regulação a uma distância diferente do banco. Neste caso, os ajustes são feitos separadamente, considerando-se o circuito monofásico.

2.5.2 Ajustes do Compensador de Queda de Tensão para Banco em Δ

Quando reguladores monofásicos são ligados em delta aberto ou fechado, suas bobinas de excitação estão entre fases. Os TPs aplicam aos respectivos circuitos de controle a tensão de linha. Portanto, os compensadores devem introduzir as quedas de tensão de linha nos circuitos de controle. Logo, os valores calculados pelas equações (2.7) e (2.8) ou (2.9) e (2.10), devem ser multiplicados por $\sqrt{3}$. Além do mais, a tensão no circuito de controle e a corrente no compensador, para reguladores ligados em delta, não tem a mesma relação de fases que aquelas em reguladores ligados em estrela ou em circuitos monofásicos.

Na conexão estrela, a tensão no secundário do TP e a corrente no secundário do TC estão em fase. Não havendo rotação de fases e sim um defasamento apenas pelo ângulo (ϕ) de fator de potência da carga. Já para o banco ligado em delta aberto, a corrente está atrasada da tensão de um ângulo ($30^\circ + \phi$) para uma unidade e tem a corrente adiantada da tensão de um ângulo ($30^\circ - \phi$) para a outra unidade, ou seja, uma unidade está atrasada (*lagging*) e a outra está adiantada (*leading*).

A conexão em delta fechado possui o mesmo defasamento para as três unidades. Sendo assim, tem-se as três unidades em atraso (conexão *lagging*) ou as três unidades em avanço (conexão *leading*). Os ajustes do compensador de cada unidade seja em delta aberto ou delta fechado devem levar em conta a defasagem de ($30^\circ \pm \phi$) entre corrente e tensão. Para a unidade que estiver atrasada, multiplicam-se os valores de R e X, já determinados por ($\cos 30^\circ + j \sin 30^\circ$) e para a unidade que estiver adiantada multiplicam-se por ($\cos 30^\circ - j \sin 30^\circ$), assim:

$$\begin{aligned} \text{Unidade atrasada:} \quad R' - jX' &= (0,866 + j0,5)(R + jX) \\ R' &= (0,866R - 0,5X) \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$X' = (0,866X + 0,5R) \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \text{Unidade adiantada:} \quad R' - jX' &= (0,866 - j0,5)(R + jX) \\ R' &= (0,866R + 0,5X) \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$X' = (0,866X - 0,5R) \quad (2.19)$$

2.6 Dimensionamento de Reguladores de Tensão

A potência nominal em kVA, de um regulador de tensão é apenas a transformada por ele e não a potência pelo circuito no ponto em que ele está instalado. O cálculo é feito considerando o máximo percentual de regulação do regulador. Desta forma, temos:

$$\text{Potência total:} \quad S = \sqrt{3}|E||I| \quad (2.20)$$

$$\text{Regulador monofásico:} \quad S_R = \frac{\%R}{100}|E_a||I_a| \quad (2.21)$$

$$\text{Regulador trifásico:} \quad S_R = \frac{\%R}{100}S \quad (2.22)$$

$$\text{Banco de reguladores:} \quad S_R = \frac{\%R}{100}|E||I| \quad (2.23)$$

$$S_R = \frac{\%R}{100\sqrt{3}}S \quad (2.24)$$

em que:

S_R → potência nominal do regulador em kVA;

$\%R$ → percentual de regulação (normalmente de 10%);

E_a → tensão fase-neutro em kV;

E → tensão de linha em kV;

I e I_a → corrente na saída do regulador em ampéres;

A potência total trifásica na barra onde será instalado o regulador, incluindo cargas mais perdas é calculada na equação (2.20). A equação (2.21) é para a potência de um regulador em circuito monofásico, sendo calculada com a tensão fase-neutro. Para o regulador trifásico, a sua potência é calculada como o percentual de regulação em cima da potência total trifásica, conforme equação (2.22).

Para bancos de reguladores monofásicos ligados em delta aberto ou fechado, o cálculo da potência de cada unidade monofásica é feito utilizando tensão e corrente de linha na barra onde será instalado o banco, conforme equação (2.23), ou pela equação (2.24) que utiliza a potência total trifásica na barra, sendo que ambas levam ao mesmo resultado. Não há diferença na potência de cada unidade monofásica quando se muda de banco ligado em delta aberto para delta fechado, mas muda a faixa de regulação (de $\pm 10\%$ para ± 15), conforme foi visto na seção 2.4.

2.7 Controles e Ajustes de Reguladores de Tensão

O controle do regulador recebe o sinal das condições de tensão do circuito em que o regulador está localizado e comanda a operação do comutador de derivação para aumentar ou diminuir a tensão do circuito, conforme a necessidade. O desempenho adequado do regulador depende do cuidado com que seu controle é ajustado. Os ajustes possíveis são:

- **Nível de tensão.** É o ajuste que fixa uma referência de tensão para determinar se o relé de regulação de tensão comanda ou não a operação do comutador de derivação, sendo que esta tensão de referência corresponde à tensão de saída do regulador menos a tensão no compensador de queda de tensão, quando este está ativado.
- **Largura de Faixa.** Este ajuste fixa os limites acima e abaixo do nível de tensão, dentro do qual a tensão pode variar sem que isto implique em operação do comutador de derivação. Redução excessiva da largura de faixa aumenta o número de operações e conseqüentemente, a vida útil do regulador.
- **Retardação.** É conveniente evitar que o regulador opere com variações de tensão de curta duração. Este é o primeiro objetivo da retardação no regulador: para variações de tensão em intervalos de tempo inferior ao ajustado, o comutador de derivação é bloqueado. A segunda função na retardação é permitir a coordenação de reguladores em série. O regulador mais próximo da fonte deve operar mais rápido para poupar o subsequente de operação desnecessária.
- **Faixa de Regulação.** Os reguladores normalmente têm faixa de regulação de $\pm 10\%$ especificados para a sua potência nominal. É possível, no entanto, que o regulador opere com uma capacidade acima do kVA nominal desde que a faixa de regulação

seja reduzida. Este artifício é usado quando o perfil de tensão do alimentador não tem uma descida acentuada para a condição de carga de pico. A Tabela 2.1 mostra a capacidade (kVA) de um regulador monofásico de $\pm 10\%$ para várias faixas de regulação.

Tabela 2.1 – Relação entre a faixa de regulação e a capacidade (kVA) de um regulador de $\pm 10\%$.

% Reg	Capacidade (% do kVA nominal)	degraus
10	100	16
8,75	110	14
7,5	120	12
6,25	135	10
5	160	8

Capítulo 3

Algoritmos Genéticos

3.1 Uma Breve Introdução

Os algoritmos genéticos (AGs) são métodos probabilísticos de otimização e busca inspirados nos mecanismos de evolução natural. Foram introduzidos por John Holland em parceria com alguns de seus colegas e por estudantes da Universidade de Michigan durante a década de 70, mas realmente se popularizaram a partir da publicação, em 1989, do livro *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, de autoria de um de seus alunos, David Goldberg, que desde então é referenciado em qualquer trabalho que aborde o tema.

O princípio de funcionamento do algoritmo reside na sobrevivência do mais apto, da forma como o naturalista e fisiologista *Charles Darwin* enunciou em seu livro *A*

origem das espécies (1859). De acordo com Darwin, “Quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes”.

Desde a década de 90, os algoritmos genéticos têm sido aplicados com sucesso na resolução de diversos problemas de otimização combinatória em diferentes áreas do conhecimento. Os algoritmos genéticos têm sido aplicados com êxito a problemas com múltiplos objetivos, com grande número de restrições, com condições difíceis de modelar matematicamente e problemas com espaços de busca muito grandes.

Essa ampla aplicabilidade é resultado da capacidade que o algoritmo possui de realizar uma busca adaptativa, paralela e cega. Esta última se deve ao fato de que a operação do algoritmo é inerentemente independente da aplicação. Em resumo, os algoritmos genéticos possuem quatro características que os diferenciam dos métodos convencionais de busca e otimização:

- não operam com as soluções e sim com uma representação codificada das mesmas;
- realizam a busca com uma população de soluções, sendo, portanto, paralelos;
- usam aptidões para guiar a busca e não derivadas ou outros conhecimentos auxiliares;
- utilizam leis probabilísticas e não determinísticas.

O problema de otimização combinatória mais conhecido é o do *Caixeiro Viajante*. Trata-se da dúvida de um vendedor que deve visitar um certo número de cidades para negociar suas mercadorias. O vendedor deseja saber qual o caminho mais curto que passa por cada cidade uma única vez e termina no seu ponto de partida. Caso o número de cidades a ser visitada seja n , então existem $(n-1)!/2$ percursos possíveis para a realização

das visitas. Se for 8 o número de cidades, tem-se 2.520 possíveis soluções. Mas se forem 16 cidades, o número de soluções possíveis aumenta para 653.837.184.000 e evidentemente, seria inviável enumerá-las todas.

O primeiro passo ao se utilizar um algoritmo genético é a criação aleatória de um conjunto de soluções possíveis para o problema. Este conjunto forma a chamada *população inicial*, em que cada solução criada é denominada de *indivíduo*. Cada indivíduo é representado pelo seu *cromossomo* equivalente. Cada cromossomo, por sua vez, é formado por um conjunto de *genes*. Pode-se observar que são muitos os termos importados da biologia, contudo a familiarização a estes termos geralmente leva pouco tempo. A Tabela 3.1 mostra a equivalência entre os termos e o seu significado. O princípio fundamental é que todos os indivíduos da população evoluam, por meio de determinadas operações, até que sejam todos iguais e representem uma solução ótima. É interessante perceber que a idéia envolvida na aplicação de algoritmos genéticos é simples, se comparada aos princípios dos métodos tradicionais de otimização.

Tabela 3.1 – Equivalência de termos entre biologia e AGs.

Termo empregado	Significado no contexto dos AGs
Indivíduo	Uma solução potencial do problema codificada para uso no AG.
Cromossomo	Parte constituinte do indivíduo, com genes e alfabeto próprios.
Gene	Elemento de informação integrante do cromossomo.
Alelo	Conjunto de valores que um gene pode assumir.
Genótipo	Uma solução do problema no domínio do AG.
Fenótipo	Uma solução do problema no domínio da aplicação.
População	Um conjunto de indivíduos.
Geração	Cada iteração do processo evolutivo.
Codificação	Estratégia de tradução de soluções do domínio da aplicação para o domínio dos AGs.
Decodificação	Estratégia de tradução de soluções do domínio dos AGs para o domínio da aplicação.
Aptidão	Uma característica de cada indivíduo que denota a capacidade de gerar descendentes.

3.2 Operadores Básicos de um Algoritmo Genético

Os operadores têm a função de implementar o processo reprodutivo simulado que ocorre nos AGs. Foram propostos vários operadores, bem como diferentes estratégias para implementação. Contudo abordaremos nesta seção os operadores mais simples e populares: seleção, cruzamento e mutação.

Após a criação da população inicial, são realizadas operações específicas sobre esta população que tentam simular o que ocorre em um ambiente natural ao longo de vários anos. Como acontece na natureza, com o passar do tempo, a população se renova dando origem a uma nova *geração*. O tamanho da população de uma geração para outra, geralmente é fixo. As operações de *seleção natural*, *cruzamento* e *mutação* são responsáveis pela criação de uma nova geração. O princípio básico é que os indivíduos melhores adaptados ao ambiente tenham mais chances de perpetuar suas informações genéticas, passando-as adiante para as futuras gerações. Este processo, para saber qual indivíduo encontra-se melhor adaptado ao ambiente atribuindo-lhe maiores chances de perpetuar suas características, é a seleção natural.

Para identificar os indivíduos mais adaptados ao ambiente, é feita a atribuição de um valor a cada um deles, dado por uma fórmula denominada *fitness*, que nada mais é do que a função objetivo do problema para a qual deseja-se encontrar um máximo ou um mínimo. Uma vez que cada indivíduo representa uma solução, é possível avaliá-lo por meio da função *fitness*.

A seleção natural ocorre em cada geração, antes do processo de cruzamento, indicando os indivíduos mais aptos para reprodução. Esta atribuição de maiores chances aos indivíduos mais aptos é geralmente feita utilizando-se o procedimento conhecido como *método da roleta*. Este método consiste em representar as chances de cada indivíduo, que

são diretamente proporcionais à qualidade da solução que oferecem, em uma roleta comum de jogo. A Figura 3.1 é uma representação do método da roleta. Nela, todos os n indivíduos na população estão presentes. Para cada indivíduo é reservado um espaço na roleta proporcional as suas chances. Então, a roleta é girada e a seta pára em um ponto aleatório, indicando um indivíduo. A roleta é girada tantas vezes quantas forem necessárias para completar o número de indivíduos que participarão da próxima etapa: o cruzamento.

O número de cruzamentos que ocorrem em cada geração é determinado pela taxa de cruzamento, um percentual da população que indica o número de indivíduos que participarão deste processo. Quase sempre este percentual situa-se entre 50% e 80% do número de indivíduos da população.

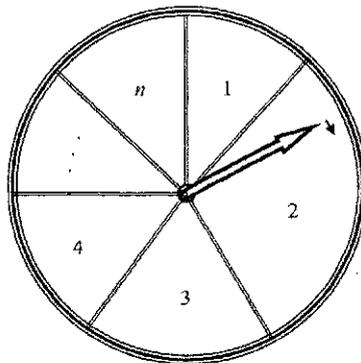


Figura 3.1 – Representação do método da roleta.

Os genes representam a informação genética mais elementar do indivíduo e são encadeados para formar o cromossomo. No caso de codificação binária, o cromossomo é formado por uma cadeia de bits que são os genes do indivíduo. A Figura 3.2 mostra o cruzamento entre um par de cromossomos com codificação binária de oito bits e um ponto de corte, gerando um par de filhos que, como no processo natural, traz a informação genética dos pais. O ponto de corte é escolhido de forma aleatória e divide o cromossomo

em duas partes que recombinam-se para gerar os descendentes. Também é possível utilizar dois ou mais pontos de corte no processo de cruzamento.

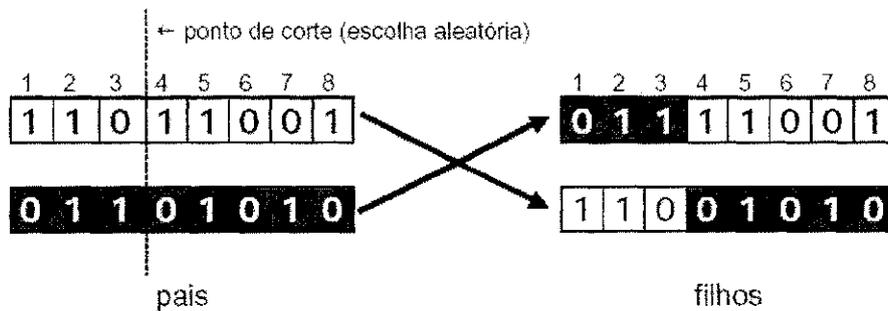


Figura 3.2 – Cruzamento com 01 ponto de corte em cromossomos com codificação binária.

Pela natureza aleatória dos cruzamentos, pode ocorrer que cromossomos gerados sejam defeituosos. Um cromossomo defeituoso é aquele que representa uma solução que viola alguma restrição ou mesmo uma solução fora do domínio de busca desejado para o problema. Por isso, para um indivíduo deste tipo lhe é atribuído menor chance de sobrevivência. Ainda assim, não é recomendado exterminá-lo, pois características desejáveis poderiam ser perdidas. Em um cruzamento envolvendo um indivíduo defeituoso, é possível que sejam gerados filhos normais, até mesmo melhores que aqueles gerados por pais saudáveis.

Os cruzamentos dão origem a uma população intermediária e que normalmente têm metade do número de indivíduos, ficando a população aumentada em 50%. Como o número de indivíduos de uma geração para outra é mantido constante, faz-se a redução da população aumentada através da técnica de torneio, que consiste em selecionar aleatoriamente um par de cromossomos e descartar o que tiver o pior valor de aptidão, repetindo o processo até que a população volte ao número inicial de indivíduos.

A etapa que conclui a formação de uma nova geração é a mutação. O número de indivíduos que participam deste processo é definido pela taxa de mutação que geralmente varia entre 2% e 5%. A mutação consiste em alterar um gene de um cromossomo. A escolha do cromossomo que sofrerá mutação e do gene a ser alterado é feita de forma aleatória. O novo valor que o gene assumirá também é escolhido aleatoriamente. É importante conservar a aleatoriedade em todas as operações básicas do algoritmo genético. Isto garante que o processo não se torne tendencioso e que as operações realizadas (seleção natural, cruzamento e mutação) aproximem-se do que realmente ocorre na natureza.

Finalmente, após a aplicação das operações descritas, tem-se a formação de uma nova geração de indivíduos. Todo o processo é então repetido até que praticamente todos os indivíduos da população sejam idênticos e iguais a uma solução ótima. É como se ficasse estabelecido o domínio de um indivíduo muito forte (que representa a solução ótima) sobre os demais indivíduos da população. Este indivíduo, que possui grandes chances de perpetuar suas informações genéticas, acaba por espalhar, ao longo das gerações, suas características em todos os indivíduos. A população, por fim, torna-se homogênea.

3.3 Convergência do Método

A convergência de um algoritmo genético depende de uma série de fatores, sendo os mais determinantes: o tamanho da população, a taxa de cruzamento e a taxa de mutação. O tamanho da população, usualmente, varia entre 60 e 200 indivíduos. Quanto maior o número de indivíduos na população, maior será a diversidade de material genético e mais gerações serão necessárias para que a população se torne homogênea. Por outro

lado, populações muito pequenas podem resultar em convergência prematura, impedindo que o AG realize uma busca satisfatória por falta de diversidade na população. Contudo, aumentar a população indefinidamente não implica em melhora de desempenho.

As taxas de cruzamento e mutação interferem diretamente na velocidade com que o algoritmo converge. Quanto maior for a taxa de cruzamento, devido ao maior número de reproduções e conseqüente mistura de material genético, mais rapidamente a população se tornará homogênea. A mutação age no sentido contrário, como sendo uma perturbação no processo. Quanto maior a taxa de mutação, mais indivíduos com novas características são formados a cada geração. A mutação contribui para diversificar o material genético da população, realizando uma exploração mais ampla do espaço de busca. Entretanto, atrasa o processo de tornar a população homogênea.

Uma outra interpretação para as operações de cruzamento e mutação é entendê-las como mecanismos de busca local e global respectivamente. Enquanto que os cruzamentos conduzem o processo para encontrar um ótimo local, as mutações, se bem sucedidas, desviam a busca na direção de um possível ótimo global. Caso uma mutação seja mal sucedida, dificilmente as características do indivíduo que sofreu esta mutação se perpetuarão. Logo, a busca continua no mesmo sentido em que estava antes. Quando as mutações tornam-se ineficazes, tem-se um indicativo de que possivelmente o processo de busca está se dirigindo a um ótimo global.

A função de aptidão também afeta a velocidade com que o algoritmo converge, desde que esteja mal condicionada ao problema. Uma taxa de variação muito grande nesta função pode privilegiar excessivamente algumas soluções em detrimento de outras, provocando convergência prematura. Efeito contrário é obtido com taxas de variação pequenas. Nestes casos, o método de seleção pode degenerar para uma seleção aleatória com probabilidades aproximadamente iguais, fazendo com que o algoritmo não

evolua. Ocorrências como estas são contornadas utilizando duas estratégias: a reformulação da função de aptidão, possibilitando uma taxa de variação melhor ajustada; ou a técnica de escalonamento.

A convergência de um algoritmo genético se dá quando não mais ocorrer um melhoramento significativo na diversidade da população entre gerações, ou seja, quando a maior parte dos cromossomos forem idênticos, indicando alto índice de homogeneidade, que normalmente acontece para um índice acima de 95%. O número máximo de gerações é outro critério adotado, sendo que normalmente este número varia de 200 a 1000 gerações.

3.4 Desempenho de um Algoritmo Genético

Com o intuito de melhorar o desempenho dos AGs foram propostas variações e extensões do algoritmo convencional. Em geral, essas modificações operam melhorando a resposta obtida, proporcionando operação em situações em que o AG convencional não opera satisfatoriamente, ou reduzindo o tempo de execução.

O elitismo opera favorecendo o resultado do AG e busca não perder a melhor solução encontrada entre uma geração e a seguinte. Foi proposto por De Jong (1975) em um dos trabalhos pioneiros sobre AGs e consiste em transferir para a próxima geração, sem a realização de seleção, o melhor indivíduo da população atual, sem alterações.

Outra alternativa é fazer o mapeamento da função objetivo, também chamada de escalonamento, quando ocorrer problemas como: ocorrência de valores negativos (a roda de roleta não funciona), valores muito próximos e que tornam a seleção totalmente aleatória, ou ainda pode ocorrer números muito grandes, forçando a

convergência prematura do algoritmo. O ordenamento linear da função objetivo é uma maneira de contornar este problema. Neste caso, os valores das aptidões não são calculados utilizando as aptidões antigas, mas suas posições relativas em uma série ordenada (*ranking*). Neste escalonamento, uma função de aptidão f_i de um indivíduo i é transformada em f'_i , de acordo com a seguinte expressão:

$$f'_i = K \frac{(N-i)}{N-1} \quad (3.1)$$

em que:

K é o valor desejado para aptidão da melhor solução;

i é o ranking de uma solução particular, ou seja, o índice do cromossomo na população em ordem decrescente de valor da função objetivo;

N é o número de indivíduos da população.

Assim, a cada geração é realizado um mapeamento de aptidões para o intervalo $[0, K]$ e os indivíduos participam do processo de seleção com uma distribuição favorável de chances. Ou seja, o melhor indivíduo da população participa do processo de seleção com chance K e o pior com chance nula.

A terceira técnica foi proposta por Souza *et al* (2003a) e é denominada de memória genética. Esta técnica tem como objetivo reduzir o tempo de processamento dos AGs por meio da redução do número de cálculos da função de aptidão. No AG, cada novo indivíduo gerado deve ter sua função de aptidão avaliada. Em alguns problemas, a maior parte do esforço computacional reside neste procedimento de avaliação, entretanto, depois

de algumas gerações, muitos dos indivíduos são cópias genuínas de indivíduos já existentes e cujas adaptações já foram avaliadas.

A memória genética é uma estrutura de armazenamento, de capacidade ajustável, que apóia o AG. Antes de avaliar a aptidão de um indivíduo recém-criado, é verificada a existência de uma cópia dele na memória. Se houver, o cálculo da função de aptidão é evitado e a memória reorganizada. Senão, o cálculo é efetuado e o resultado é memorizado juntamente com o indivíduo. Assim, os elementos da memória genética são duplas formadas por indivíduo e aptidão correspondente. Reduções significativas no número de avaliações da função de aptidão são obtidas com esta estratégia.

O ganho de tempo é diretamente proporcional à complexidade da função de aptidão utilizada. A verificação na memória da existência ou não de um cromossomo recém criado também demanda um tempo de processamento que pode vir a ser da mesma ordem de grandeza do cálculo da aptidão. Por isso, uma versão mais simples de implementação da memória genética é a que salva apenas o melhor cromossomo de cada geração juntamente com seu valor de aptidão. Desta forma, também se obtém economia de tempo de processamento com uma rápida verificação se o cromossomo recém criado é igual ao melhor da população, fato que ocorre bastante quando o AG se aproxima da convergência.

Capítulo 4

A Formulação do Problema

O problema de localização e ajustes ótimos de reguladores de tensão em redes de distribuição é formulado neste trabalho como um problema de otimização combinatória para ser resolvido utilizando um algoritmo genético. Resolver o problema significa determinar o trecho em que cada regulador deve ser instalado e os degraus em que deve operar nas condições de carga de pico e carga leve.

4.1 A Codificação

Uma solução do problema, não necessariamente ótima, é codificada numa seqüência de bytes. Para alimentadores de até 255 barras, três bytes para cada regulador que se cogita instalar são suficientes: um byte para o número do trecho em que o regulador se instalará e dois para os degraus (cargas máxima e mínima).

4.1.1 Codificação para Um Regulador

Esta é a codificação feita para um regulador trifásico ou para um banco de reguladores monofásicos, ligados em delta aberto ou fechado. Há duas maneiras de levar em conta na codificação o fato dos degraus poderem ser positivos ou negativos. Uma é convencionar um bit como de sinal, de modo que 1 signifique + e 0 signifique -. A outra possibilidade é adotar um *offset* de modo a transformar os valores todos em não-negativos.

Com seis bits podemos ter 64 representações diferentes, mas utilizamos apenas 33, 32 degraus mais o degrau número zero. Caso ocorra, após um cruzamento ou mutação, de um número de *tap* gerado estar acima do número 32, é feita uma rotação cíclica de modo que o número que antes estava fora pertença ao intervalo de 0 a 32. Por exemplo, se for gerado o número 40, fazemos: $40-33=7$. Desta forma o número vai estar sempre no intervalo de *taps* possíveis.

O cromossomo após ser decodificado para a representação decimal é passado para o cálculo do fluxo de carga. O primeiro dígito representa a barra de instalação do regulador, o segundo e o terceiro dígitos são os *taps* para cargas de pico e carga leve, respectivamente. Esses dois últimos dígitos são então decrescidos do número 16 cada um, pois o fluxo de carga é calculado considerando o degrau do regulador podendo ser positivo ou negativo.

REGULADOR																			
Barra			Ajustes da derivação em																
			carga máxima							carga mínima									
0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0

Figura 4.1 - Cromossomo relativo a um regulador.

Na Figura 4.1, é mostrado um cromossomo, para um regulador, na codificação binária e que após ser decodificado para a representação decimal fica: [21 23 20]. Estes valores representam então: barra 21, *tap* com carga máxima número 7 e *tap* com carga mínima número 4, pois cada dígito que representa um *tap* é subtraído de 16 antes de iniciar o cálculo do fluxo de carga. Para cada cromossomo, é feito o cálculo do fluxo de carga do sistema duas vezes, sendo uma vez para a condição de carga de pico e outra para a condição de carga leve.

4.1.2 Codificação para Dois Reguladores

No caso de dois reguladores a serem instalados no alimentador, a codificação do cromossomo é feita duplicando-se o cromossomo mostrado na Figura 4.1, ou seja, teríamos agora uma cadeia de 40 bits, para um alimentador de até 256 barras, mantendo a mesma ordem na codificação, ou seja, número de barra, degrau em carga máxima e degrau em carga mínima para o primeiro regulador e em seguida a mesma seqüência para o segundo regulador.

REGULADOR 01										REGULADOR 02																															
Barra	Ajustes da derivação em									Barra	Ajustes da derivação em																														
	carga máxima					carga mínima					carga máxima					carga mínima																									
0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0

Figura 4.2 - Cromossomo para dois reguladores instalados.

Após a decodificação, o cromossomo da Figura 4.2 fica com seis dígitos decimais, sendo os três primeiros para o primeiro regulador e os três últimos para o segundo regulador. A rotina do fluxo de carga também é modificada para contemplar a presença dos dois reguladores no alimentador. Os valores de tensão de barra de todo o

alimentador nas duas condições de carga são utilizadas nas funções de aptidão descritas a seguir.

4.2 Funções de Aptidão

Para localizar um regulador de tensão, o procedimento usual é considerar a condição de carga de pico e escolher a barra mais próxima da subestação depois da qual a queda de tensão está fora dos limites predeterminados. O algoritmo genético irá procurar uma solução que implique no menor erro possível, sendo este erro definido de acordo com as funções de aptidão mostradas a seguir.

A implementação estrita do procedimento usual de localização e ajuste de reguladores é possível mediante a seguinte função de aptidão (função objetivo a ser maximizada):

$$f(c) = -\sum_{i=1}^{n_b} \left[p(v_i)(v_{med} - v_i)^2 + p(u_i)(v_{med} - u_i)^2 \right] \quad (4.1)$$

sendo

$$v_{med} = \frac{1}{2}(v_{sup} + v_{inf}) \quad (4.2)$$

o valor médio da faixa de tensão,

n_b número de barras do alimentador;

c cromossomo: seqüência de bytes em que a solução está codificada;

$v_i(u_i)$ tensão na barra i em condições de carga máxima (mínima) com reguladores instalados e operando conforme codificado em c ;

p é uma função de penalidade, para inibir a escolha de solução que implique em tensão de barra fora dos limites superior ou inferior;

$v_{\text{sup(inf)}}$ limite superior (inferior) da faixa de tensão, respectivamente.

$$p(v_i) = \begin{cases} 1 & \text{se } v_i \in I = (v_{\text{inf}}, v_{\text{sup}}) \\ \alpha & \text{se } v_i \notin I \end{cases} \quad (4.3)$$

Valores típicos de α estão no intervalo [1;1,2]. Com a função de aptidão utilizando penalidade, o que se pretende é encontrar uma solução que mantenha o perfil de tensão entre os limites máximo e mínimo de tensão do alimentador. A função de aptidão alternativa empregada neste trabalho é a seguinte:

$$f(c) = -\sum_{i=1}^{n_b} \left[(v_{\text{med}} - v_i)^2 + (v_{\text{med}} - u_i)^2 \right] \quad (4.4)$$

Esta função de aptidão sem incluir a penalidade é de cálculo mais rápido que a anterior. A questão de se utilizar ou não uma função de penalidade no cálculo da aptidão é bastante relativa, uma vez que mesmo tomando mais tempo para calcular a aptidão, o fato de se usar penalidade pode levar o algoritmo a uma convergência mais rápida dependendo do ajuste que se dá à função de penalidade, conforme equação (4.3).

4.3 Formulação para Regulador Trifásico

A formulação para o regulador trifásico é feita utilizando o modelo do alimentador radial no método da soma de potências, conforme mostrado no item 1.4. Sem regulador, os parâmetros A e B, são conforme equações:

$$A = \frac{v^2}{2} - (RP + XQ) \quad (1.3)$$

e

$$B = (R^2 + X^2)(P^2 + Q^2) \quad (1.4)$$

Conhecidas a tensão na entrada do regulador e uma estimativa de sua carga, a tensão de saída pode ser determinada pela mesma equação (1.2), se as expressões dos parâmetros A e B são as seguintes:

$$A = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d}{160} \right)^2 v^2 - \frac{|d|}{16} (R_{\text{lim}} P + X_{\text{lim}} Q) \quad (4.5)$$

e

$$B = \frac{d^2}{256} (R_{\text{lim}}^2 + X_{\text{lim}}^2) (P^2 + Q^2) \quad (4.6)$$

Para obterem-se as equações (4.5) e (4.6) basta levar em conta a equação (2.2), que mostra a relação da impedância do regulador com o degrau em que está operando, observando a semelhança entre os modelos do trecho do alimentador e do regulador, os quais são mostrados respectivamente nas Figuras 1.1 e 2.2.

A validade da equação (1.2) se mantém no caso mais geral em que um regulador seja instalado no início de um trecho. Se esse regulador é de 32 degraus, regulação de $\pm 10\%$, impedância $R_{\text{lim}} + jX_{\text{lim}}$ e opera no degrau d . Para determinar a tensão do fim de um trecho genérico i , os parâmetros A e B são calculados pelas seguintes expressões:

$$A = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d}{160} \right)^2 v^2 - \left(\frac{|d|}{16} R_{\text{lim}} + R \right) P - \left(\frac{|d|}{16} X_{\text{lim}} + X \right) Q \quad (4.7)$$

$$B = \left[\left(\frac{|d|}{16} R_{\text{lim}} + R \right)^2 + \left(\frac{|d|}{16} X_{\text{lim}} + X \right)^2 \right] (P^2 + Q^2) \quad (4.8)$$

As equações (1.3) e (4.5) são meras particularidades da equação (4.7). Do mesmo modo que as (1.4) e (4.6) são particularidades da equação (4.8). Um trecho sem regulador corresponde a se ter $d = 0$ nas equações (4.7) e (4.8).

Por outro lado, fazendo-se $R = X = 0$, essas equações gerais se reduzem às equações (4.5) e (4.6). O restante do fluxo de carga é calculado normalmente, conforme formulado no item 1.4.

4.4 Formulação para Banco de Reguladores Monofásicos

Para bancos de reguladores monofásicos em delta fechado ou aberto, o fluxo de carga pelo método da soma de potências é calculado normalmente, ou seja, determina-se a tensão de barra do fim de cada trecho calculando-se os parâmetros A e B, em seguida resolvendo-se a equação biquadrada, conforme formulado em 1.4. A diferença é que, durante o cálculo das tensões, se uma determinada barra for a barra de instalação do banco de reguladores, a última tensão de barra calculada será a tensão v de entrada do banco e a tensão da barra passará a ser a tensão V , de saída do banco, conforme equação (2.3) ou equação (2.6), dependendo se a configuração é em delta fechado ou delta aberto, respectivamente.

Este procedimento é realizado durante a iteração do fluxo de carga, sendo os demais cálculos de fluxos e atualização de perdas dos trechos feitos normalmente,

conforme formulado na seção 1.4. O ângulo da tensão na saída do banco não precisa ser calculado durante o processo de otimização, bastando ser calculado após a convergência do algoritmo genético.

Para considerar o efeito das perdas nos enrolamentos dos reguladores, basta incluir os valores correspondentes de R e X em série com os valores de linha de cada trecho do alimentador, conforme modelo definido na seção 1.4. As perdas no núcleo, se conhecidas, podem ser somadas com o valor da potência ativa da carga da barra em que se instalará o banco. O valor da admitância em derivação do alimentador radial, se conhecido, pode ser colocado como mais uma carga reativa em cada barra. Desta forma, é possível corrigir o método da soma de potências para obter resultados ainda mais realistas.

4.5 O Algoritmo Proposto

Para resolver o problema da localização e ajustes ótimos de reguladores de tensão em alimentadores radiais do modo com que foi formulado, se propõe o algoritmo mostrado na Figura 4.3. Para este algoritmo, são feitas as seguintes observações:

- a definição da estrutura cromossômica é feita a partir do número de barras do alimentador;
- a seleção para cruzamento é feita utilizando o método da roleta;
- antes da mutação é feita a redução da população para voltar ao número inicial de indivíduos, utilizando o *método do torneio*;
- na mutação, os cromossomos e genes são escolhidos aleatoriamente;
- a homogeneidade é avaliada verificando-se a diferença entre os bits de cada cromossomo em relação aos bits do melhor cromossomo da população;

- pelo critério de parada o índice de homogeneidade h da população é testado se é superior ao estabelecido. O limite do índice de homogeneidade pode ser utilizado entre 95 e 100 %. Se não for especificado, 98 % é utilizado ;
- o elitismo de um indivíduo é empregado. Isto é, em cada geração é mantido o melhor cromossomo, juntamente com seu valor de aptidão.

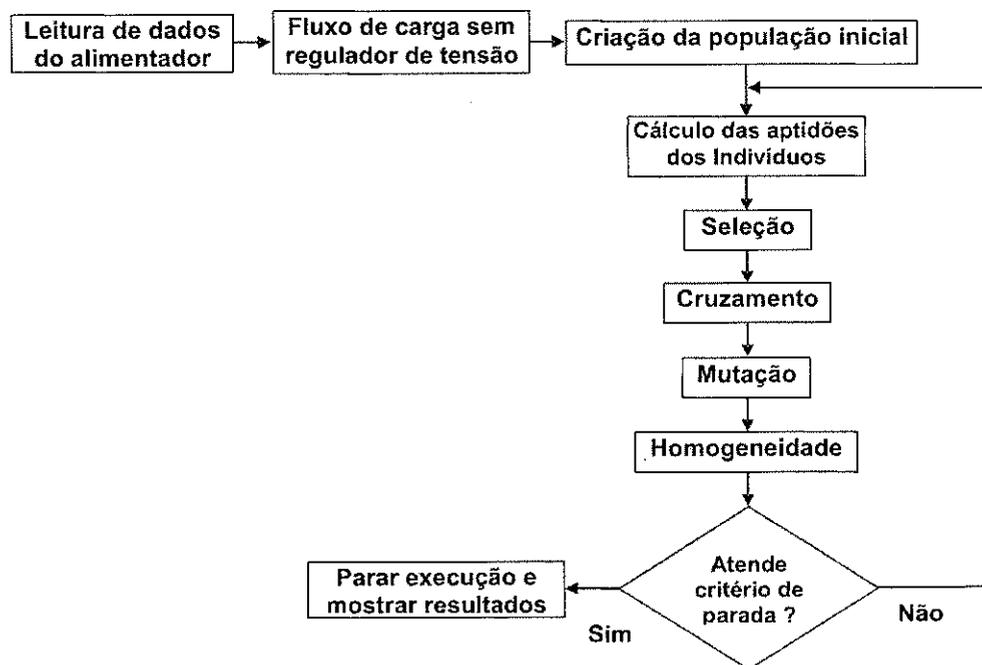


Fig. 4.3 - Esquema simplificado do algoritmo genético utilizado.

Capítulo 5

Estudo de Casos e Análise dos Resultados

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos para a localização e ajustes de um regulador trifásico, de um banco de reguladores monofásicos e dois bancos. Dois alimentadores de distribuição são considerados para estudo. O primeiro deles foi encontrado na literatura (Cris *et al*, 1997), objetivando a validação do algoritmo implementado. O segundo corresponde a um alimentador da CEAL, sendo, portanto um exemplo de aplicação real. A implementação foi feita em Matlab[®] 5.3 em um microcomputador Athlon[®] XP 2000.

5.1 Implementação para o Regulador Trifásico

O algoritmo proposto foi implementado utilizando-se o modelo do regulador de tensão trifásico, na configuração estrela aterrado, conforme codificado na seção 4.1.1 e formulado na seção 4.3. Foi utilizado um alimentador de 34 barras na tensão de 11 kV,

mostrado na Figura 5.1, cujos dados de linha e de carga desse alimentador estão no apêndice A.

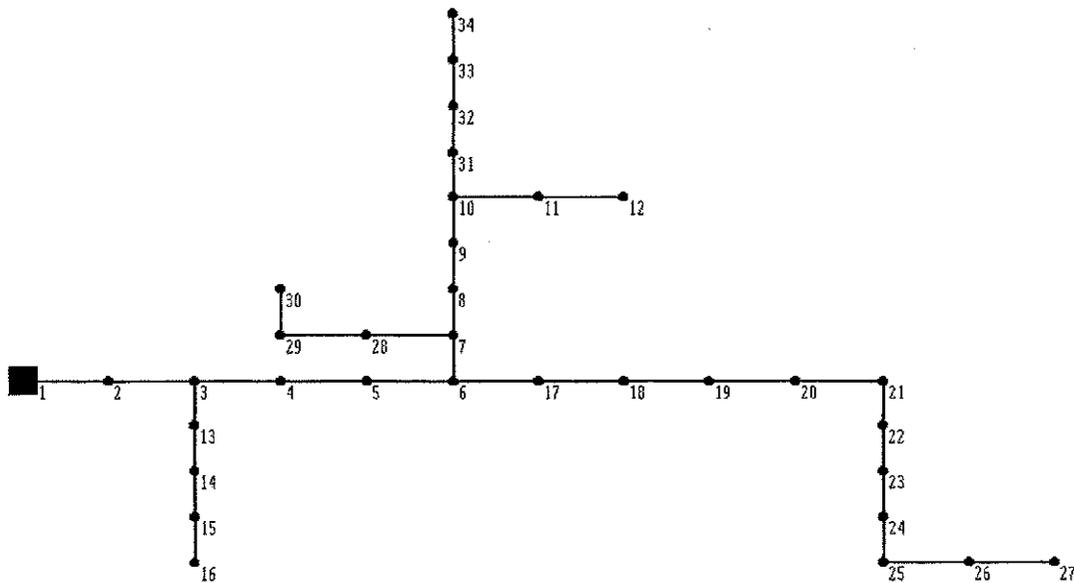


Figura 5.1 - Alimentador de 34 barras em 11 kV (Cris *et al*, 1997) a que o algoritmo foi aplicado.

O problema de aplicação escolhido para ser apresentado consistiu em determinar a localização e os ajustes ótimos de um regulador de 32 degraus. A impedância do regulador foi ignorada. Os parâmetros do algoritmo genético utilizados foram os seguintes:

- população de 100 cromossomos;
- taxa de cruzamento de 55%;
- taxa de mutação de 3%;
- taxa de homogeneidade de 98%;
- limite de geração de 1000.

A função de aptidão inicialmente utilizada foi a da equação (4.4), ou seja, sem usar penalidade. Também foi utilizada técnica de elitismo com um cromossomo da população em cada geração. A tensão média foi a própria tensão nominal.

O cromossomo com maior aptidão, que corresponde a erro mínimo é aquele que representa a barra 5, o *tap* com carga máxima número 5 e o *tap* com carga mínima número 4. O tempo médio de execução e a regulação nas duas condições de carga também são mostrados na Tabela 5.1. Cerca de 62,5% das vezes em que o programa foi executado, houve convergência para este valor. Nas outras vezes o programa convergiu para mínimos locais próximos e que também tinham erro pequeno e próximo do valor do que se supõe ser o mínimo global.

Em seguida foi utilizada a função de aptidão da equação (4.1), sendo a tensão média e a penalidade, definidas de acordo com as equações (4.2) e (4.3), respectivamente. A tensão superior foi considerada 2% acima da tensão nominal (11 kV) e a tensão inferior 2% abaixo. A penalidade foi de 1.05, aplicada às tensões de barra que estiveram fora da faixa, tanto para a condição de carga de pico quanto para a condição de carga leve. Houve convergência para o mínimo global em 65% das vezes em que o programa foi executado. A Tabela 5.2 mostra os resultados considerando a penalidade.

Tabela 5.1 – Localização e ajustes ótimos utilizando a função de aptidão sem penalidade.

barra	degrau (regulação) em carga		tempo médio de execução
	máxima	mínima	
05	5 (+3,125%)	4 (+2,5%)	24,35 s

Tabela 5.2 – Localização e ajustes ótimos utilizando a função de aptidão com penalidade.

barra	degrau (regulação) em carga		tempo médio de execução
	máxima	mínima	
05	5 (+3,125%)	4 (+2,5%)	28 s

A Tabela 5.3 mostra a redução das perdas para os valores encontrados de barra e *taps*, nas condições de carga leve e de pico.

Tabela 5.3 – Redução das perdas com a instalação do regulador.

Grandeza	horário	
	de pico	fora de pico
Duração	2920 h	5840 h
redução de perdas de potência	3,74 kW (3,65%)	4,33 kW (2,93%)
redução de perdas de energia	23,57 MWh (3,23%)	

O efeito do regulador sobre o perfil de tensão do alimentador é mostrado nas Figuras 5.2 a 5.5. Em cada figura são mostrados quatro perfis de tensão, sendo eles: alimentador operando em carga máxima com e sem regulador de tensão e também operando em carga mínima com e sem regulador de tensão. No ramal que começa na barra 3 a tensão se mantém inalterada, haja vista que o ponto de instalação do regulador está a jusante. O perfil de tensão original não é crítico. Mesmo no caminho mais longo, aquele que termina na barra 27 (Figura 5.2), a queda de tensão e a regulação máximas é da ordem de 4% e 1% respectivamente. Após a instalação do regulador a queda de tensão se reduz a 1,5% e a regulação a 0,26%.

As tensões na saída do regulador em carga máxima e mínima são diferentes. Isso significa que o ponto de regulação está adiante do ponto de instalação. Neste caso o ponto de regulação é a barra 19. Regulação em ponto remoto é possível acionando-se o compensador de queda de tensão do regulador automático.

Para este caso do regulador trifásico, foi feita a enumeração completa do problema, ou seja, a função de aptidão foi calculada para todas as barras e todos os *taps* possíveis, comprovando a solução encontrada pelo AG, de modo a validar o método proposto.

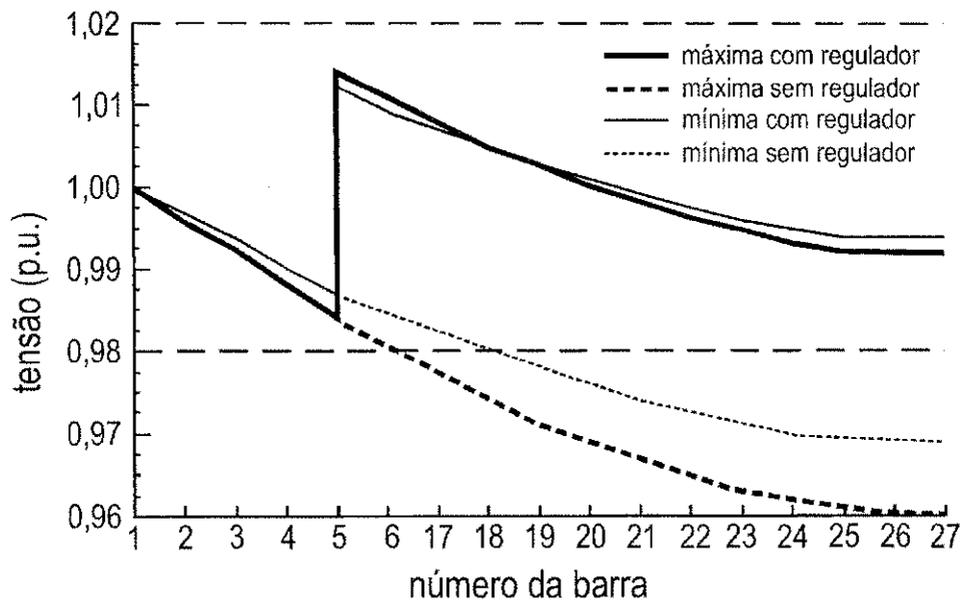


Figura 5.2 - Perfil de tensão do alimentador da Figura 5.1 no caminho da barra terminal 27.

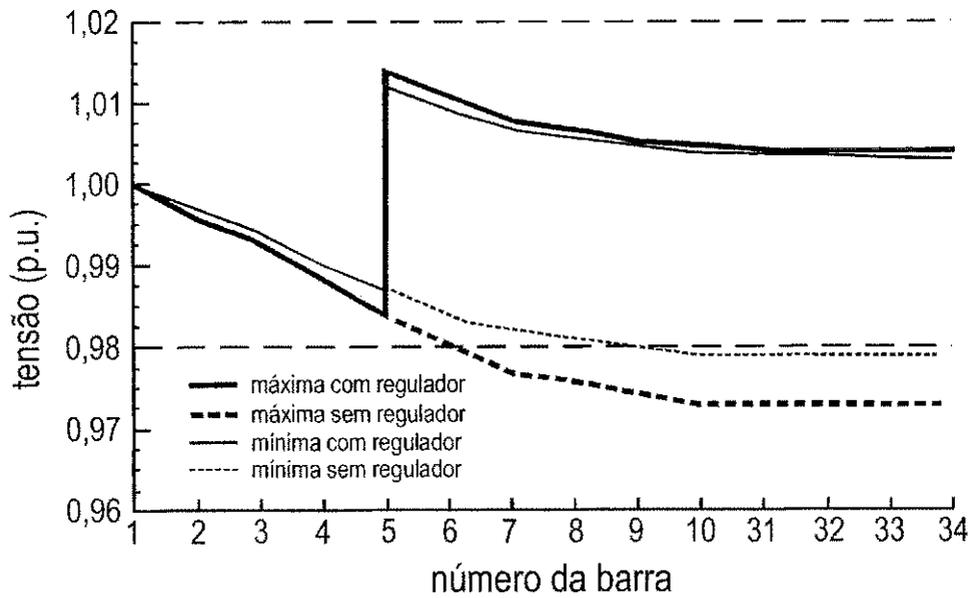


Figura 5.3 - Perfil de tensão do alimentador da Figura 5.1 no caminho da barra terminal 34.

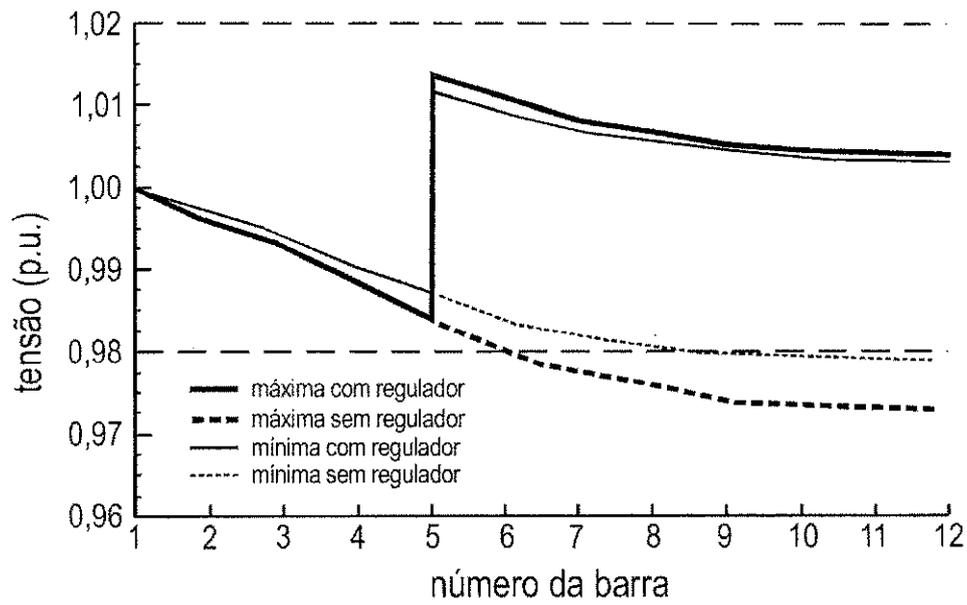


Figura 5.4 - Perfil de tensão do alimentador da Figura 5.1 no caminho da barra terminal 12.

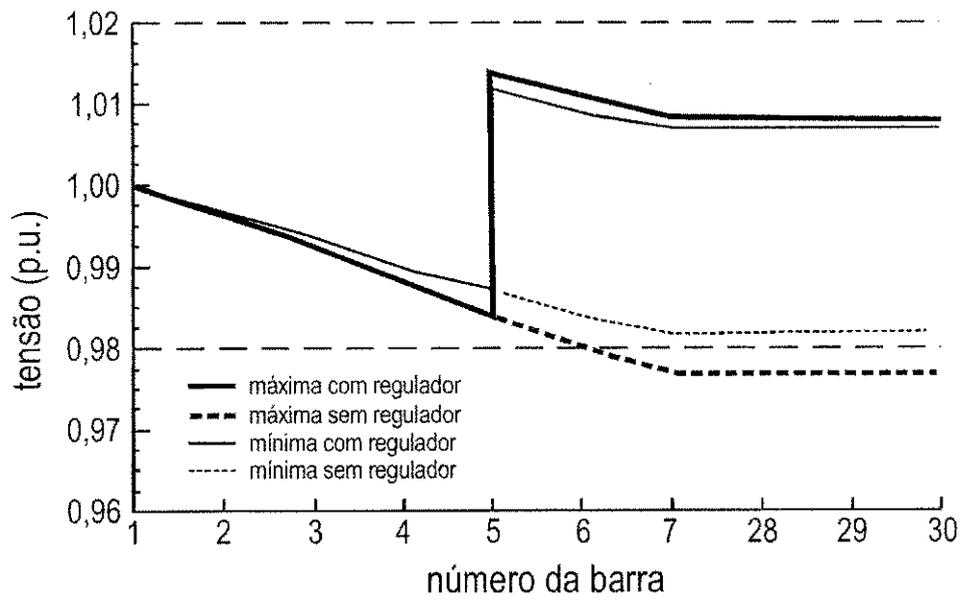


Figura 5.5 - Perfil de tensão do alimentador da Figura 5.1 no caminho da barra terminal 30.

5.2 Implementação para Um Banco de Reguladores Monofásicos

A implementação foi realizada utilizando-se o modelo do banco de reguladores monofásicos, ligados em delta fechado, codificado na seção 4.1.1 e formulado na seção 4.4. Inicialmente foi utilizado um alimentador de 34 barras em 11 kV e em seguida um alimentador de 70 barras (PNO-007) em 13.8 kV, do sistema de distribuição da CEAL, que é mostrado na Figura 5.6. Os dados de linha e de carga de ambos os alimentadores são encontrados no Apêndice A.

O fluxo de carga também foi executado nas condições de operação com e sem banco de reguladores, em carga leve e de pico, utilizando o programa ANAREDE (CEPEL, 1998).

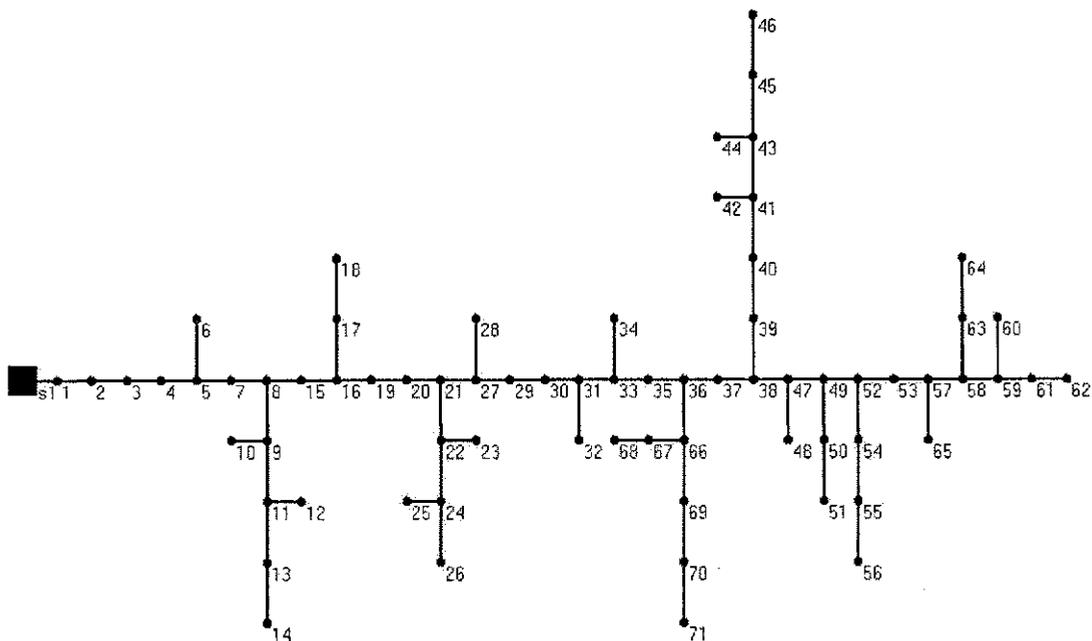


Figura 5.6 - Alimentador PNO-007, 70 barras (13,8 kV) da CEAL, a que o algoritmo foi aplicado.

O problema de aplicação escolhido para ser apresentado consistiu em determinar a localização e os ajustes ótimos de um banco de reguladores monofásicos de 32 degraus. A impedância dos reguladores foi ignorada. Os parâmetros do algoritmo genético utilizados estão na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Parâmetros do algoritmo genético para um banco de reguladores.

alimentador	população	taxas de			penalidade em carga	
		cruzamento	mutação	homogeneidade	leve	de pico
34 barras	100	55%	3%	98%	5%	5%
70 barras	100	55%	3%	98%	4%	3%

Em ambos os casos, foi utilizado *elitismo*, um limite de 1000 gerações e a tensão média foi a própria tensão nominal. A regulação de tensão também foi calculada nas condições de carga leve e de pico.

O limite de tensão superior, para o alimentador de 70 barras, foi considerado 4% acima da tensão nominal (13,8 kV) do alimentador e o limite de tensão inferior 4% abaixo. Para o de 34 barras, os limites de tensão superior e inferior foram, respectivamente, de +2% e -2% em relação à tensão nominal (11 kV). Na Tabela 5.5 são apresentados os valores ótimos para localização e ajustes do banco de reguladores, regulação de tensão e tempo médio de processamento.

Tabela 5.5 – Localização e ajustes ótimos do banco de reguladores.

alimentador	barra	degrau (regulação) em carga		tempo de execução
		de pico	leve	
34 barras	05	3 (2,83 %)	2 (1,88 %)	28 s
70 barras	05	6 (5,69 %)	4 (3,78 %)	48 s

A Tabela 5.6 mostra a redução das perdas de potência, calculada para o horário de pico e a redução total de perdas de energia.

Tabela 5.6 – Redução das perdas após a instalação do banco de reguladores.

alimentador		34 barras	70 barras
duração	horário de pico	2920 h	1300 h
Redução de perdas	de potência	3,40 kW (3,31%)	20,93 kW (6,31%)
	totais de energia	22,49 MWh (3,03%)	111,54 MWh (5,34%)

Os efeitos do banco de reguladores, em delta fechado, sobre o perfil de tensão dos alimentadores de 34 e 70 barras são apresentados nas Figuras 5.7 e 5.8, respectivamente. São mostrados os perfis de tensão do caminho mais longo de cada alimentador, sendo este de 7.85 km para o de 34 barras e 5.72 km para o de 70 barras, nas condições de operação em carga máxima com e sem regulador e também operando em carga mínima com e sem regulador.

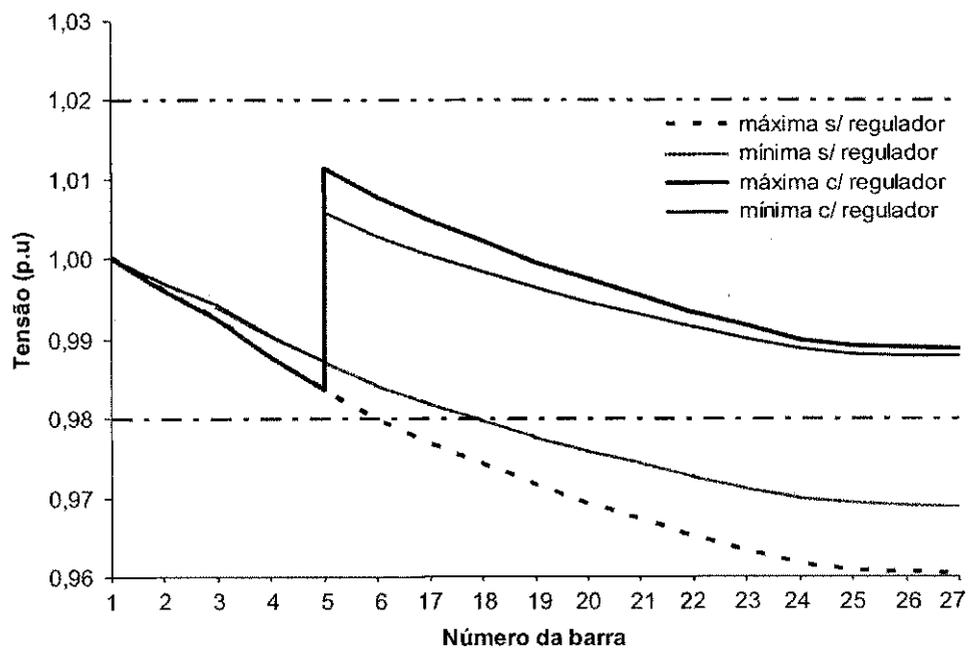


Fig. 5.7 - Perfil de tensão no caminho mais longo do alimentador radial de 34 barras.

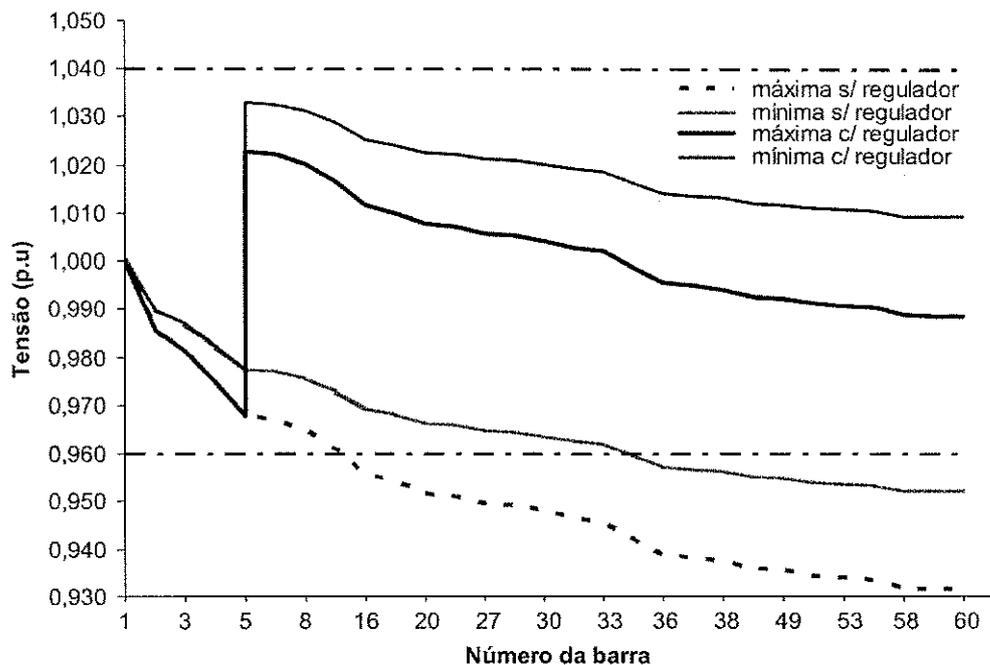


Fig. 5.8 - Perfil de tensão no caminho mais longo do alimentador radial PNO-007 de 70 barras da CEAL.

A queda de tensão máxima, no alimentador da CEAL, que ocorre na barra 62, era de 6,86% sem regulador e após a instalação do banco a queda máxima diminuiu para 1,14%. No alimentador de 34 barras, uma queda de tensão máxima de 3,96% sem regulador ocorre na barra 27. Após a colocação do banco a queda de tensão máxima diminuiu para 1,11%.

5.3 Implementação para Dois Bancos de Reguladores Monofásicos

A implementação para dois bancos de reguladores monofásicos em delta fechado foi realizada segundo codificação mostrada na seção 4.1.2 e formulação na seção 4.4. Uma configuração futura dos alimentadores foi gerada, aumentando-se as cargas (kVA) e os comprimentos (km). Assim, as perdas aumentam e o perfil de tensão piora o

suficiente para justificar a instalação de mais de um banco. Foi utilizado inicialmente o alimentador expresso de 17 barras, derivado do alimentador de 34 barras em 11 kV. Em seguida, o alimentador de 70 barras da CEAL, sendo que os resultados para ambos os alimentadores são mostrados nas Tabelas 5.7 e 5.8, respectivamente.

Tabela 5.7 – Localização e ajustes ótimos para o alimentador expresso de 17 barras.

banco de reguladores	barra	degrau (regulação) em carga		tempo de execução
		de pico	leve	
01	3	7 (6,65 %)	6 (5,69 %)	53 s
02	10	5 (12,55 %)	4 (10,22 %)	

Tabela 5.8 – Localização e ajustes ótimos para o alimentador de 70 barras.

banco de reguladores	barra	degrau (regulação) em carga		tempo de execução
		de pico	leve	
01	3	8 (7,63 %)	7 (6,66 %)	144 s
02	31	4 (12,47 %)	3 (11,25 %)	

Os tempos de processamento foram maiores do que na implementação para um só banco de reguladores, visto que o espaço de busca para dois bancos é consideravelmente maior. A redução das perdas advinda da instalação dos bancos nos dois alimentadores é mostrada na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Redução das perdas após a instalação dos bancos de reguladores.

alimentador		17 (34) barras	70 barras
duração anual de horário de pico		2920 h	1300 h
redução de perdas	de potência	45,37 kW (12,91%)	49,7 kW (13,70%)
	totais de energia	291,68 MWh (11,75%)	394,52 MWh (12,56%)

As Figuras 5.9 e 5.10 mostram respectivamente, os perfis de tensão para o alimentador expresso de 17 barras e para o caminho mais longo do alimentador de 70 barras da CEAL.

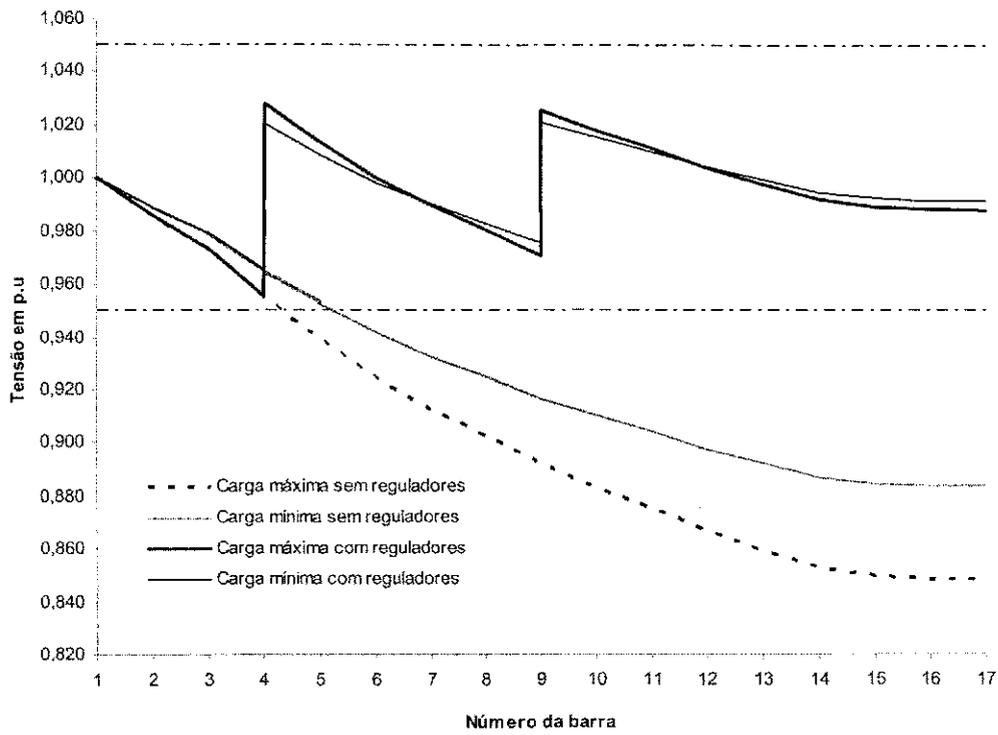


Fig. 5.9 - Perfil de tensão, para dois bancos de reguladores, do alimentador expresso de 17 barras.

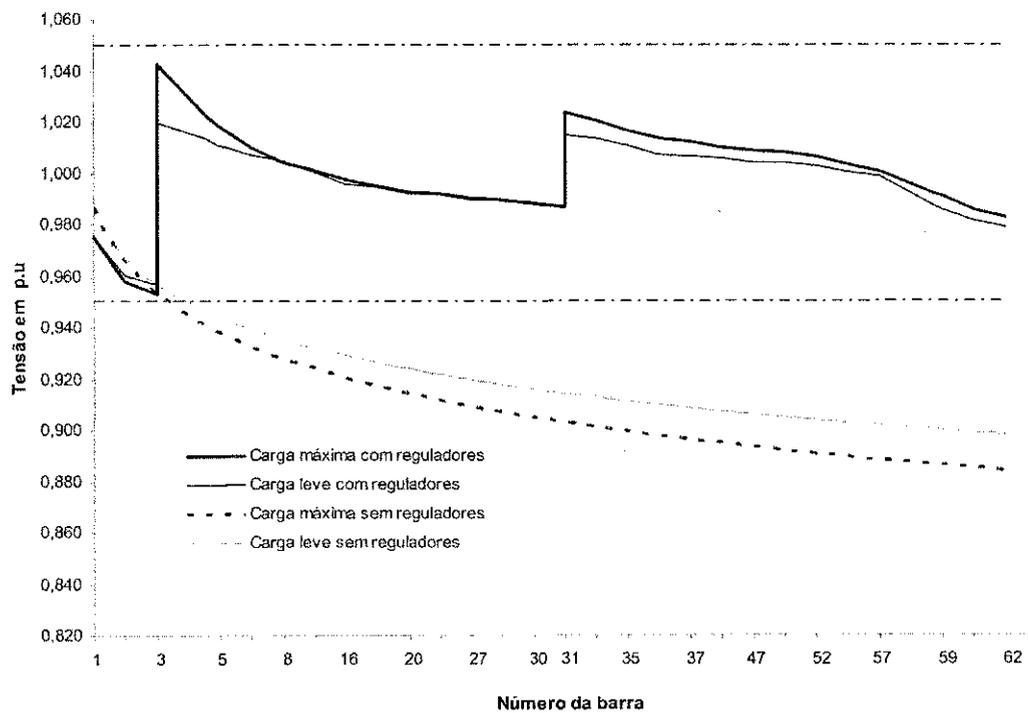


Fig. 5.10 - Perfil de tensão, para dois bancos de reguladores, no caminho mais longo do alimentador radial PNO-007 de 70 barras da CEAL.

As tensões de barra estão dentro dos limites estabelecidos após a inclusão dos dois bancos de reguladores nos dois alimentadores utilizados. A queda de tensão máxima de 11,68%, ocorrida na barra 17 do alimentador expresso, passa a ser de apenas 0,09%. A barra 62 do alimentador da CEAL tinha uma queda de tensão de 13,7 %, em horário de pico sem bancos de reguladores, sendo que esta passa a ser de apenas 1,78 % após a instalação dos dois bancos. É importante observar que nos dois casos, os perfis de tensão não foram elevados ao máximo possível após a inclusão dos bancos. Isto está de acordo com o critério de otimalidade, utilizado na função de aptidão, que foi o do perfil plano de tensão. Os parâmetros do algoritmo genético são apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Parâmetros do algoritmo genético para dois bancos de reguladores.

alimentador	população	taxas de			penalidade em carga	
		cruzamento	mutação	homogeneidade	leve	de pico
17 barras	100	55%	3%	96%	5%	4%
70 barras	100	55%	3%	96%	5%	4%

A função de penalidade também passou por ajustes que foram feitos com base no conhecimento especialista do problema. Um deles é que a barra de instalação do segundo banco de reguladores não deve estar antes da barra do primeiro banco. Outro ajuste é que o degrau em carga de pico do primeiro banco não deve ser negativo e a barra para se localizar um banco não deve ser uma barra terminal. Quando alguma solução implicava numa dessas ocorrências, o cromossomo era fortemente penalizado ($\alpha=1.25$) para que esta não voltasse a ocorrer.

Um refinamento visando acelerar a convergência do algoritmo foi feito com uma leve penalidade da ordem de 2% ($\alpha=1.02$) para o cromossomo que representava uma solução com perdas totais maiores que as perdas totais da solução do cromossomo anterior.

O problema para dois bancos de reguladores apresentou a particularidade de se ter várias soluções que atendem aos critérios estabelecidos, uma vez que como se tem dois bancos de reguladores em série, o efeito de um banco pode ser compensado pelo outro. O ordenamento linear conforme equação (3.1) no intervalo [0;4] também foi feito, de modo a diferenciar mais as soluções e fazer com que no processo de seleção, as chances dos melhores indivíduos fossem mais evidentes.

A potência de cada regulador foi determinada segundo formulação apresentada na seção 2.6, sendo considerada a potência trifásica do trecho em que se instala o regulador, obtida no cálculo de fluxo de carga em condições de carga de pico. A Tabela 5.11 mostra: a potência no trecho, o valor calculado para o regulador e finalmente, o valor padronizado superior mais próximo e que é disponibilizado pelos fabricantes.

Tabela 5.11 – Dimensionamento da potência em kVA dos reguladores de tensão.

alimentador	34 barras		70 barras	
	1°	2°	1°	2°
banco de reguladores				
potência no trecho em que se instala o banco	5363,3	2165,1	9948,1	6092,1
potência mínima de cada unidade monofásica	309,7	125	574,4	351,7
valor padronizado mais próximo	414	138	576	414

Os valores apresentados na Tabela 5.11 foram calculados considerando a capacidade máxima de regulação de cada unidade monofásica, ou seja, +10%, que corresponde ao degrau +16 do regulador. Portanto, como os degraus determinados no processo de otimização e apresentados nas Tabelas 5.7 e 5.8 estão abaixo do máximo, os bancos trabalharão com folga e podendo até regular mais carga, mantendo desta forma uma faixa de regulação mais baixa, conforme foi descrito na seção 2.7.

Capítulo 6

Conclusões

Um algoritmo genético para resolver o problema de localização e ajustes ótimos de reguladores de tensão em sistemas de distribuição foi elaborado. O algoritmo fornece a barra de instalação e os degraus de operação do regulador em carga leve e em carga de pico, e se aplica a reguladores trifásicos ou bancos de reguladores monofásicos. A redução das perdas de potência e energia, advinda da instalação dos reguladores e o dimensionamento das unidades também foi calculada.

O algoritmo implementado foi validado através do estudo de um sistema conhecido na literatura. Os resultados obtidos para este sistema podem ser considerados satisfatórios. Como exemplo de aplicação foi realizado um estudo de um sistema de distribuição regional de energia.

No capítulo 1, foram citados vários trabalhos para aplicação ótima e conjunta de capacitores e reguladores de tensão em sistemas de distribuição. Os trabalhos que tratam apenas de aplicação de reguladores de tensão desconsideram a natureza discreta do problema, além de sobreestimar o fato de que todas as cargas do alimentador são de potência constante, elevando o perfil de tensão ao máximo permitido para a redução das

perdas e como se sabe, nos trechos onde o tipo predominante de carga não seja de potência constante, a elevação do perfil aumenta as perdas. Este trabalho adota uma linha diferente, primeiro por tratar de um problema de otimização combinatória e que considera as variáveis do problema discretas. Depois por adotar um critério na otimização que é o perfil de tensão, centrado na faixa plana, corrigindo o perfil de tensão e reduzindo as perdas, considerando o modelo de potência constante.

Contudo, alguns procedimentos podem ser adotados para aumentar a abrangência da técnica e aprimorar sua eficiência:

- Avaliação da economia líquida considerando os custos na função de aptidão;
- Expressar o cromossomo de maneiras alternativas para melhoria do processo de otimização;
- Combinação de outras técnicas com o algoritmo genético para acelerar o processo de busca de uma solução ótima;
- Utilizar técnicas de estimação de estado junto com a localização e ajustes de reguladores;
- Fazer de forma conjunta a alocação e controles ótimos de capacitores e reguladores de tensão.

Por fim, é importante destacar que apesar das várias técnicas disponíveis para resolução do problema abordado nesta dissertação, da crescente sofisticação das metodologias e da constante melhoria dos recursos computacionais, não deve ser esquecido o conhecimento detalhado do sistema ao qual se pretende indicar uma solução e o bom senso para tomar a decisão final com segurança.

Referências Bibliográficas

- BISHOP, M.T, FOSTER, J.D, DOWN, D.A. "Single-Phase Voltage Regulators and Three-Phase Systems". IEEE Industry Applications Magazine, pp. 38-44, July/August 1996.
- BRAZ, H.D.M. "Algoritmos Genéticos para configuração ótima de redes de distribuição de energia elétrica", Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Departamento de Engenharia Elétrica – PPgEE, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, 2003.
- CASTRO, A.C. "Compensação Reativa de Alimentadores Radiais Baseada em Modelo Dependente da Tensão e Técnica de Programação Discreta Ascendente", Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Departamento de Engenharia Elétrica – PPgEE, Universidade Federal da Paraíba - UFPB, 2000.
- CEPEL, ELETROBRÁS, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. "Programa de Análise de Redes – ANAREDE". Manual do Usuário – V06, Março de 1998.
- CESPEDES, R. "New Method for The Analysis of Distribution Networks". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, pp. 391-396, Jan. 1990.
- CIVANLAR, S., GRAINGER, J.J. "Volt/Var Control on Distribution with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators. Part III: The Numerical Results". IEEE on Power Apparatus and Systems, vol. 104, pp. 3291-3297, Nov. 1985.

- CIVANLAR, S., GRAINGER, J. J., YIN, H., LEE, S. H. "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, no. 3, pp. 1217-1223, July 1988.
- COOPER POWER SYSTEMS, "Voltage Regulating Apparatus". Reference Data R225-01, April 1978.
- CRIS, M., SALAMA, M.M.A., JAYARAM, S. "Capacitor Placement in Distribution Systems Using Heuristic Search Strategies". IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, UK, vol. 144, pp. 225-230, Feb. 1997.
- DAS, D., KOTHARI, D.P., KALAM, A. "Simple and Efficient Method for Load Flow Solution of Radial Distribution Networks". Electrical Power & Energy Systems, vol. 17, pp. 335-346, May 1995.
- DE JONG, K. "The Analysis and Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems", University of Michigan, PhD thesis, 1975.
- FERREIRA, H.A. "Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica: Um Algoritmo Genético para Alocação Ótima de Capacitores," Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Departamento de Engenharia Elétrica – PPgEE, Universidade Federal da Paraíba - UFPB, 2002.
- GOLDBERG, D.E. "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning". Addison-Wesley, 412p. 1989.
- GÖNEN, T. "Electric Power Distribution System Engineering". NYk: McGraw-Hill, 1986.
- GRAINGER, J.J., CIVANLAR, S. "Volt/Var Control on Distribution with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators. Part I: The Overall Problem". IEEE on Power Apparatus and Systems, vol. 104, pp. 3278-3283, Nov. 1985.

- GRAINGER, J.J., CIVANLAR, S. "Volt/Var Control on Distribution with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators. Part II: The Solution Method". IEEE on Power Apparatus and Systems, vol. 104, pp. 3284-3290, Nov. 1985.
- GROSS, C.A. "Power System Analysis," 2nd Ed., John Wiley & Sons, 1986, pp. 329.
- GUIMARÃES, M. K. A. "Uma Implementação Vetorial do Método da Soma de Potência para Aplicação a Redes de Distribuição". Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 2000.
- HOLLAND, J.H. "Adaptation in Natural and Artificial Systems". University of Michigan Press, 211p. 1976.
- MEDEIROS Jr., M.F., PIMENTEL FILHO, M.C. "Localização Ótima de Bancos Trifásicos de Reguladores de Tensão em Alimentadores Radiais de Distribuição. XIV Congresso Brasileiro de Automática, p. 2066-2071, 2002.
- OLIVEIRA, C.C.B., KAGAN, N. "Modelagem Heurística para a Seleção e Locação de Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição de Energia Elétrica". – Congresso Latino Americano de Distribuição, p.602-606, 1998.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. [online] Disponível na Internet via <http://www.ons.org.br>. Visitado em 06/2004.
- PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. [online] Disponível na Internet via <http://www.elektrobras.gov.br/procel>. Visitado em 06/2004.
- RAHARDJO, PT. "Justification on the applications of automatic voltage regulator and capacitor on long Medium Voltage distribution feeders". CIREN 2003, p. 839-843, 2003.
- SAFIGIANNI, A.S, SALIS, G.J. "Optimum Voltage Regulator Placement in Radial Power Distribution Network". IEEE Transaction on Power Systems, vol. 15, pp. 879-886, Feb. 2000.

- SALAMA M.M.A., CHIKHANI, A.Y. "An Expert System for Reactive Power Control of a Distribution System. Part I: System Configuration". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, pp. 940-945, April 1992.
- SALAMA M.M.A., LAFRAMBOISE, J.R.P.R, FERLAND, G., CHIKHANI, A.Y. "An Expert System for Reactive Power Control of a Distribution System. Part II: System Implementation". IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, pp. 1433-1441, Aug. 1995.
- SEN, P.K., LARSON, S.L. "Fundamental Concepts of Regulating Distribution System Voltages". Rural Electric Power Conference. Colorado Springs, Colorado, C1/1-C1/10, 1994.
- SOUZA, B.A. "Distribuição de Energia Elétrica" Campina Grande: CCT/UFPB-REENGE/PAPE, 1997.
- SOUZA, B.A., BRAZ, H.D.M., ALVES, H.N. "Um Algoritmo Genético para Configuração Ótima de Alimentadores de Energia Elétrica. VI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente – SBAI, Bauru-SP, 2003.
- SOUZA, B.A., ALVES, H.N., ALMEIDA, A.M.F. "Um Algoritmo Genético para Localização Ótima de Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição". Aceito para o XV Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2004.
- SOUZA, B.A., ALMEIDA, A.M.F., ALVES, H.N., "Localização e Ajustes Ótimos de Bancos de Reguladores Automáticos em Redes de Distribuição Utilizando Algoritmos Genéticos". Aceito para o IEEE/PES T&D Latin America 2004
- TOSHIBA DO BRASIL S.A. "Manual de Instruções – Regulador de Tensão Monofásico tipo B, TI – 2318." Dezembro de 2000.
- WESTINGHOUSE ELETRIC CORPORATION. Electric Utility Reference Book – Distribution Systems, vol. 3, East Pittsburgh, Pa., 1965.

Apêndice A

Dados dos Alimentadores Utilizados

A seguir são mostrados os dados dos alimentadores usados na validação do algoritmo implementado. Na Tabela A.1 estão contidos os dados do alimentador de 34 barras em 11 kV, na Tabela A.2 o alimentador expresso de 17 barras referente ao de 34 barras e por último o alimentador radial de 70 barras em 13,8 kV PNO-007, do sistema de distribuição da CEAL.

Tabela A.1 – Dados do alimentador radial de 34 barras em 11 kV

de	para	R/km	X/km	Pleve (kW)	Qleve (kvar)	Palta (kW)	Qalta (kvar)	C(km)
0	1	0,195	0,08	126,5	78,38	161	99,75	0,6
1	2	0,195	0,08	0	0	0	0	0,55
2	3	0,299	0,083	126,5	78,38	161	99,75	0,55
3	4	0,299	0,083	126,5	78,38	161	99,75	0,5
4	5	0,299	0,083	0	0	0	0	0,5
5	6	0,524	0,09	0	0	0	0	0,6
6	7	0,524	0,09	126,5	78,38	161	99,75	0,4
7	8	0,524	0,09	126,5	78,38	161	99,75	0,6
8	9	0,524	0,09	0	0	0	0	0,4
9	10	0,524	0,09	126,5	78,38	161	99,75	0,25
10	11	0,524	0,09	68,5	42	82,2	50,4	0,2
2	12	0,524	0,09	32,4	20,25	46,8	29,25	0,3
12	13	0,524	0,09	32,4	20,25	46,8	29,25	0,4
13	14	0,524	0,09	32,4	20,25	46,8	29,25	0,2
14	15	0,524	0,09	8,1	4,5	9,45	5,25	0,1
5	16	0,299	0,083	126,5	78,38	161	99,75	0,6
16	17	0,299	0,083	126,5	78,38	161	99,75	0,55
17	18	0,378	0,086	126,5	78,38	161	99,75	0,55
18	19	0,378	0,086	126,5	78,38	161	99,75	0,5
19	20	0,378	0,086	126,5	78,38	161	99,75	0,5
20	21	0,524	0,09	126,5	78,38	161	99,75	0,5
21	22	0,524	0,09	126,5	78,38	161	99,75	0,5
22	23	0,524	0,09	126,5	78,38	161	99,75	0,6
23	24	0,524	0,09	126,5	78,38	161	99,75	0,4
24	25	0,524	0,09	126,5	78,38	161	99,75	0,25
25	26	0,524	0,09	68,5	42,5	82,2	51	0,2
6	27	0,524	0,09	41,25	26,4	56,25	36	0,3
27	28	0,524	0,09	41,25	26,4	56,25	36	0,3
28	29	0,524	0,09	41,25	26,4	56,25	36	0,3
9	30	0,524	0,09	32,49	19,66	35,91	21,74	0,3
30	31	0,524	0,09	32,49	19,66	35,91	21,74	0,4
31	32	0,524	0,09	32,49	19,66	35,91	21,74	0,3
32	33	0,524	0,09	32,49	19,66	35,91	21,74	0,2

Tabela A.2 – Dados do alimentador radial expresso de 17 barras em 11 kV

de	para	R/km	X/km	Pleve (kW)	Qleve (kvar)	Palta (kW)	Qalta (kvar)	C(km)
0	1	0,195	0,08	126,5	78,38	161	99,75	0,6
1	2	0,195	0,08	0	0	0	0	0,55
2	3	0,299	0,083	126,5	78,38	161	99,75	0,55
3	4	0,299	0,083	126,5	78,38	161	99,75	0,5
4	5	0,299	0,083	701,71	434,98	877,6	544,61	0,5
5	6	0,299	0,083	126,5	78,38	161	99,75	0,6
6	7	0,299	0,083	126,5	78,38	161	99,75	0,55
7	8	0,378	0,086	126,5	78,38	161	99,75	0,55
8	9	0,378	0,086	126,5	78,38	161	99,75	0,5
9	10	0,378	0,086	126,5	78,38	161	99,75	0,5
10	11	0,524	0,09	126,5	78,38	161	99,75	0,5
11	12	0,524	0,09	126,5	78,38	161	99,75	0,5
12	13	0,524	0,09	126,5	78,38	161	99,75	0,6
13	14	0,524	0,09	126,5	78,38	161	99,75	0,4
14	15	0,524	0,09	126,5	78,38	161	99,75	0,25
15	16	0,524	0,09	68,5	42,5	82,2	51	0,2

Tabela A.3 – Dados do alimentador radial de 70 barras em 13,8 kV, PNO-007 da CEAL.

de	para	R/km	X/km	Pleve (kW)	Qleve (kvar)	Palta (kW)	Qalta (kvar)	C(km)
0	1	0,1345	0,3822	125,85	57,34	176,19	80,28	0,72
1	2	0,1345	0,3822	191,65	87,32	268,3	122,24	0,2
2	3	0,1345	0,3822	219,13	99,84	306,78	139,77	0,36
3	4	0,1345	0,3822	177,45	80,85	248,43	113,19	0,36
4	5	1,4889	0,5003	157,43	71,73	220,4	100,42	0,16
4	6	0,1345	0,3822	39,4	17,95	55,16	25,13	0,04
6	7	0,1345	0,3822	177,45	80,85	248,43	113,19	0,12
7	8	1,4889	0,5003	177,45	80,85	248,43	113,19	0,22
8	9	1,4889	0,5003	72,44	33	101,41	46,2	0,1
8	10	1,4889	0,5003	41,04	18,7	57,46	26,18	0,23
10	11	1,4889	0,5003	30,03	13,68	42,04	19,15	0,23
10	12	1,4889	0,5003	19,66	8,96	27,52	12,54	0,09
12	13	1,4889	0,5003	160,71	73,22	224,99	102,51	0,12
7	14	0,1345	0,3822	197,47	89,97	276,46	125,96	0,24
14	15	0,1345	0,3822	177,45	80,85	248,43	113,19	0,34
15	16	1,4889	0,5003	179,63	81,84	251,49	114,58	0,31
16	17	1,4889	0,5003	28,85	13,14	40,39	18,4	0,23
15	18	0,1345	0,3822	39,59	18,04	55,42	25,25	0,12
18	19	0,1345	0,3822	41,77	19,03	58,48	26,64	0,16
19	20	0,1345	0,3822	177,45	80,85	248,43	113,19	0,04
20	21	0,6062	0,4418	20,02	9,12	28,03	12,77	0,11
21	22	1,4889	0,5003	61,33	27,94	85,87	39,12	0,39
21	23	0,6062	0,4418	70,62	32,17	98,86	45,04	0,28
23	24	0,6062	0,4418	268,45	122,31	375,83	171,23	0,16
23	25	1,4889	0,5003	219,58	100,04	307,42	140,06	0,16
20	26	0,1345	0,3822	177,45	80,85	248,43	113,19	0,13
26	27	0,9341	0,4891	48,96	22,31	68,54	31,23	0,03
26	28	0,1345	0,3822	61,7	28,11	86,38	39,35	0,03
28	29	0,1345	0,3822	51,78	23,59	72,49	33,03	0,12
29	30	0,1345	0,3822	177,45	80,85	248,43	113,19	0,12
30	31	0,9745	0,4803	64,16	29,23	89,82	40,92	0,11
30	32	0,1345	0,3822	177,45	80,85	248,43	113,19	0,08
32	33	0,4803	0,4346	328,87	149,84	460,42	209,78	0,03
32	34	0,1345	0,3822	42,68	19,45	59,75	27,22	0,38
34	35	0,1345	0,3822	177,45	80,85	248,43	113,19	0,34
35	36	0,1912	0,3954	29,58	13,47	41,41	18,86	0,09
36	37	0,1912	0,3954	177,45	80,85	248,43	113,19	0,09
37	38	0,2996	0,4348	20,66	9,41	28,92	13,18	0,07
38	39	1,4889	0,5003	51,87	23,63	72,62	33,09	0,19
39	40	1,4889	0,5003	177,45	80,85	248,43	113,19	0,05
40	41	0,9341	0,4891	55,33	25,21	77,46	35,29	0,17
40	42	1,4889	0,5003	177,45	80,85	248,43	113,19	0,09
42	43	0,9341	0,4891	55,51	25,29	77,71	35,41	0,1
42	44	1,4889	0,5003	82,36	37,52	115,3	52,53	0,17
44	45	1,4889	0,5003	20,38	9,29	28,54	13	0,21
37	46	0,1912	0,3954	177,45	80,85	248,43	113,19	0,28
46	47	0,9341	0,4891	40,4	18,41	56,57	25,77	0,12
46	48	0,1912	0,3954	12,01	5,47	16,82	7,66	0,04
48	49	0,1912	0,3954	30,03	13,68	42,04	19,15	0,12
49	50	0,9341	0,4891	30,3	13,81	42,42	19,33	0,17
48	51	0,1912	0,3954	177,45	80,85	248,43	113,19	0,25
51	52	0,1912	0,3954	39,59	18,04	55,42	25,25	0,1
51	53	0,1912	0,3954	40,77	18,57	57,08	26	0,22
53	54	0,1912	0,3954	177,45	80,85	248,43	113,19	0,32
54	55	0,9655	0,4609	41,22	18,78	57,71	26,29	0,06
52	56	0,1912	0,3954	177,45	80,85	248,43	113,19	0,16

de	para	R/km	X/km	Pieve (kW)	Qieve (kvar)	Palta (kW)	Qalta (kvar)	C(km)
56	57	1,4889	0,5003	177,45	80,85	248,43	113,19	0,24
57	58	0,9341	0,4891	177,45	80,85	248,43	113,19	0,13
58	59	0,9341	0,4891	20,66	9,41	28,92	13,18	0,04
58	60	0,9341	0,4891	12,47	5,68	17,45	7,95	0,04
60	61	0,9341	0,4891	12,47	5,68	17,45	7,95	0,04
57	62	1,4889	0,5003	71,53	32,59	100,14	45,62	0,08
62	63	0,9745	0,4803	12,01	5,47	16,82	7,66	0,14
56	64	0,1912	0,3954	577,03	262,9	807,84	368,06	0,18
35	65	0,1345	0,3822	177,45	80,85	248,43	113,19	0,04
65	66	0,4803	0,4346	177,45	80,85	248,43	113,19	0,36
66	67	0,5887	0,4652	198,02	90,22	277,22	126,31	0,1
65	68	0,1345	0,3822	26,03	11,86	36,44	16,6	0,04
68	69	0,1912	0,3954	177,45	80,85	248,43	113,19	2,29
69	70	0,5887	0,4652	96,46	43,95	135,04	61,53	0,18

Apêndice B

Formulação Matemática do Método da Soma de Potências

Segue a formulação matemática do Método da Soma de Potências, nos modos que faz Guimarães (2000). Novamente, considere um único trecho de um alimentador radial identificado pela sua barra de origem e sua barra de destino.

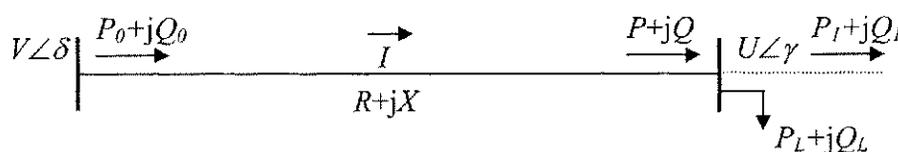


Figura B.1 – Trecho de um alimentador radial.

A partir daí podem ser escritas as seguintes equações, envolvendo a corrente I que percorre o trecho:

$$I = \frac{V\angle\delta - U\angle\gamma}{R + jX} \quad \text{e} \quad (\text{B.1})$$

$$P - jQ = U^* I \quad (\text{B.2})$$

Combinando as Equações B.1 e B.2, tem-se:

$$\frac{P - jQ}{U^*} = \frac{V \angle \delta - U \angle \gamma}{R + jX}. \quad (\text{B.3})$$

Mas, $U^* = U \angle -\gamma$. Então a Equação B.3 pode ser expressa por:

$$VU \angle (\delta - \gamma) - U^2 = (R + jX)(P - jQ). \quad (\text{B.4})$$

Em coordenadas retangulares e separando as partes real e imaginária:

$$VU \cos(\delta - \gamma) = U^2 + PR + QX \quad \text{e} \quad (\text{B.5a})$$

$$VU \sin(\delta - \gamma) = PX - QR. \quad (\text{B.5b})$$

Elevando ao quadrado e somando as Equações B.5, chega-se a:

$$U^4 + 2U^2(RP + XQ - \frac{1}{2}V^2) + (R^2 + X^2)(P^2 + Q^2) = 0. \quad (\text{B.6})$$

A Equação B.6 é biquadrada com relação a U . Pode ser escrita de forma mais conveniente:

$$U^4 + 2U^2 A + C = 0. \quad (\text{B.7})$$

Em que, $A = (RP + XQ - \frac{1}{2}V^2)$ e $C = (R^2 + X^2)(P^2 + Q^2)$.

Desta forma, definindo-se:

$$B = \sqrt{A^2 - C}, \quad (\text{B.8a})$$

chega-se ao valor de U :

$$U = \sqrt{B - A} \quad (\text{B.8b})$$