

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS  
Área de Concentração: Automação

**REDUÇÃO DE PERDAS EM REDES  
PRIMÁRIAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA POR INSTALAÇÃO E CONTROLE  
DE CAPACITORES**

Autor: José Federico Vizcaino González

Orientador: Prof. Dr. Christiano Lyra Filho

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rubén A. Romero  
Prof. Dr. Ariovaldo V. Garcia  
Prof. Dr. Christiano Lyra Filho  
Prof. Dr. Paulo Morelato França

Tese de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Agosto de 2003

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

V839r Vizcaino González, José Federico  
Redução de perdas em redes primárias de distribuição de  
energia elétrica por instalação e controle de capacitores /  
José Federico González Vizcaino. --Campinas, SP: [s.n.],  
2003.

Orientador: Christiano Lyra Filho  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de  
Computação.

1. Energia elétrica - Distribuição. 2. Capacitores. 3.  
Programação dinâmica. 4. Computação evolutiva. I. Lyra  
Filho Christiano. II. Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III.  
Título.

RMS

Titulo em Inglês: Capacitor placement and control for loss reduction in electric power distribution systems.

Palavras-chave em Inglês: Electric power distribution, Capacitor banks, Dynamic programming e Evolutionary computation

Área de concentração: Automação

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Rubén <sup>a</sup> Romero, Ariovaldo V. Garcia e Paulo Morelato França

Data da defesa: 08/08/2003

# Resumo

As perdas técnicas de energia nas redes primárias de distribuição são decorrentes das resistências elétricas nas linhas. Pela natureza indutiva de algumas cargas e reatâncias das linhas, parte da energia dissipada é devida aos fluxos de potências reativas entre a subestação e os pontos de carga. Capacitores instalados próximo às cargas podem fornecer energia reativa local, diminuindo as perdas de energia na rede. Este trabalho apresenta inovações conceituais e de implementação que permitem o resgate da abordagem por programação dinâmica para a solução do problema de instalação e dimensionamento de capacitores fixos em redes de distribuição, para perfis de cargas fixos ou variáveis. O trabalho também aborda o problema de controle de capacitores chaveados, propondo duas novas abordagens. A primeira abordagem desenvolve uma versão de sistemas complexos adaptativos, também chamados sistemas classificadores. A segunda abordagem corresponde a uma especialização dos conceitos de programação dinâmica desenvolvidos para o problema de instalação de capacitores. Estudos de casos em redes reais de grande porte ilustram as possibilidades das metodologias desenvolvidas.

# Abstract

Technical energy losses in primary distribution networks are due to electrical resistances in lines. Due to reactance of power lines and inductive nature of some loads, part of the energy dissipated is due to reactive power that travels back and forth in lines, all the way from power sources to load points. Capacitors installed near load points can provide local complementary reactive power that decrease losses. This work presents conceptual and implementation innovations that allows to rescue the dynamic programming approach for the capacitors sizing and allocation problem in distribution networks, for fixes and variables loads. The work also presents two approaches to the capacitors control problem. The first approach is the development of a complex adaptive system (a classifier systems). The second approach to the capacitor control problem is a specialization of dynamic programming concepts, developed for the capacitors placement problem. Case studies in large real networks illustrate the possibilities of the developed methodologies.

À minha família

Este trabalho teve o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

## **Agradecimentos**

A Martha e as minhas queridas filhas, Anabel e Ana Paula, pelo apoio sempre com compreensão, carinho e muito amor. Minha eterna gratidão à minha família pela compreensão e dedicação que me permitiram dar seqüência aos meus estudos.

Ao Christiano, por sua dedicação e amizade. Suas orientações foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Ao Celso pelo apoio, possibilitando discussões bastante proveitosas. Aliás, discussões e bate-papos proveitosos não faltaram em meio aos colegas de laboratório. Entre eles estão Edílson, Vinícius, Eduardo, Marcelo, Luiz, Cris, Luciana, Martha Inês, Aníbal e André - grandes amigos. Juntos convivemos em um ambiente agradável.

Agradeço ainda ao Luis e ao Rodrigo, atentos na manutenção da rede, equipamentos dos laboratórios e ajuda aos usuários.

A todos do *DENSIS*, pela amizade e companheirismo demonstrados, aos professores que participaram da minha formação e aqueles que, direta ou indiretamente, estiveram ao meu lado.

Aos amigos Lizet, Frank, Jose, Diana, Wilson e a todos que, de uma forma ou de outra, me apoiaram.

Gostaria também de agradecer os apoios institucionais da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) e da CPFL Piratininga.

## Índice

<b>Capítulo 1- Apresentação.....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 2- Perdas nas Redes de Distribuição de Energia Elétrica.....</b>	<b>4</b>
2.1    Introdução.....	4
2.2    Caracterização do Problema de Redução de Perdas por Injeção de Reativos.....	5
2.3    Formulação do Problema de Localização de Capacitores.....	11
2.3.1    Formulação Geral do Problema.....	12
2.4    Formulação do Problema de Controle de Capacitores.....	14
<b>Capítulo 3- Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>17</b>
3.1    Localização de Capacitores.....	17
3.2    Controle de Capacitores.....	21
<b>Capítulo 4- Conceitos Básicos de Programação Dinâmica e Especialização para o Problema de Localização de Capacitores.....</b>	<b>23</b>
4.1    Introdução à Programação Dinâmica.....	23
4.2    Solução de um Problema de Otimização Seqüencial por Programação Dinâmica.....	25
4.3    Programação Dinâmica com Várias Dimensões.....	27
4.4    Programação Dinâmica para Abordagem do Problema de Instalação de Capacitores.....	28
<b>Capítulo 5- Ampliação da Abordagem do Problema de Localização de Capacitores por Programação Dinâmica.....</b>	<b>32</b>
5.1    Especialização de Programação Dinâmica para o Problema.....	34
5.1.1    Função Objetivo.....	34
5.2    Generalização do Método para um Alimentador com Ramificações.....	37
5.3    Descrição do Algoritmo de Programação Dinâmica.....	39
5.3.1    Breve Descrição da Implementação do Algoritmo de PD.....	42
5.3.2    Exemplo Ilustrativo do Algoritmo.....	44

<b>Capítulo 6- Controle de Reativos.....</b>	<b>48</b>
6.1    Breve introdução a Sistemas Classificadores.....	49
6.2    Sistemas Classificadores Aplicados ao Controle de Reativos.....	51
6.2.1    Interface.....	52
6.2.2    Descrição da Implementação do Algoritmo.....	56
6.3    Controle de Reativos usando Programação Dinâmica.....	60
<b>Capítulo 7- Estudos de Casos.....</b>	<b>64</b>
7.1    Resultados para o Problema de Localização de Capacitores por Programação Dinâmica.....	65
7.1.1    Perfil com Demanda Fixa.....	65
7.1.2    Demandas Variáveis.....	68
7.2    Resultados para o Problema de Controle de Capacitores.....	71
7.2.1    Sistemas Classificadores.....	72
7.2.2    Programação Dinâmica .....	80
<b>Capítulo 8- Conclusões.....</b>	<b>82</b>
8.1    Continuidade do Trabalho.....	84
<b>Apêndice A- Cálculo dos Parâmetros do Sistema Classificador.....</b>	<b>85</b>
<b>Apêndice B- Informações Complementares sobre Estudos de Casos.....</b>	<b>87</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>94</b>

# Capítulo 1

## Apresentação

Uma das linhas de atuação para redução das perdas na distribuição é a redução dos fluxos de energia reativa nas redes, através da instalação e controle adequado de capacitores. Quando bem sucedidas, essas iniciativas proporcionam, além da redução de perdas, melhoras nos níveis de tensão dos alimentadores e aumento da capacidade útil das redes.

A escolha dos melhores locais para instalação de capacitores fixos ou chaveados (isto é, com possibilidade de fornecer níveis diferentes de energia reativa), e suas respectivas capacidades, é realizada nos procedimentos de planejamento. A definição dos níveis de atuação para cada um dos capacitores instalados, levando-se em consideração as variações de carga ao longo do período em estudo, é parte dos procedimentos de controle da rede.

Metodologias para definir os melhores locais para instalação e dimensionamento de capacitores vêm sendo estudadas desde a década de 50. Existem metodologias capazes de produzir boas soluções para o problema, mas a pesquisa na área é ainda intensa. Os trabalhos recentes procuram incluir aspectos mais detalhados nas representações de redes e melhorar a qualidade das soluções, inovando na abordagem do problema de otimização.

Novos métodos de otimização combinatória, exploração das possibilidades de computação evolutiva e identificação de novas propriedades estruturais do problema, estão entre as principais componentes dos trabalhos mais recentes.

Este trabalho explora o uso da programação dinâmica para a solução do problema de instalação de capacitores em redes de distribuição de energia elétrica, retomando as idéias apresentadas por Durán (1968) nos anos 60, mas “esquecidas” para abordagens de problemas de maior porte. Suas principais contribuições são a extensão do método de programação dinâmica para redes com ramificações e a incorporação de conceitos e estruturas de dados da área de otimização em grafos; a associação dessas contribuições permite o uso de programação dinâmica para abordagens do problema em redes reais de grande porte.

O problema de controle do estado dos capacitores, procurando definir as melhores estratégias de chaveamentos de capacitores para situações de variações de carga, é bem mais recente do que o problema de localização e dimensionamento; como veremos, a bibliografia sobre o tema é ainda pequena. O trabalho faz duas contribuições a este problema. A primeira contribuição é a extensão para o problema de controle dos conceitos de programação dinâmica desenvolvidos para o problema de instalação de capacitores. A segunda contribuição é a abordagem do problema de controle do estado dos capacitores em situações de variações de carga e indeterminações sobre os seus valores. As principais fontes de subsídios metodológicos são os trabalhos recentes desenvolvidos na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP na área de computação evolutiva; em especial, destacam-se as pesquisas sobre a aplicação dos métodos de sistemas complexos adaptativos (também denominados sistemas classificadores) ao problema de reconfiguração de redes de distribuição em situações de demandas variáveis.

O trabalho está dividido em oito capítulos, organizados na forma a seguir. O Capítulo 2 apresenta uma introdução ao problema de redução das perdas técnicas em redes de energia elétrica, incluindo a formulação matemática do problema de redução dessas perdas por alocação de capacitores e a formulação do problema de redução de perdas por controle de

capacitores instalados. O Capítulo 3 faz uma revisão bibliográfica de trabalhos nas áreas de instalação e controle de capacitores. Os conceitos fundamentais de programação dinâmica são introduzidos no Capítulo 4, onde também se discute o trabalho pioneiro de Durán (1968). O Capítulo 5 apresenta a abordagem proposta neste trabalho para a instalação de capacitores fixos por programação dinâmica

O Capítulo 6 faz uma breve revisão das idéias de sistemas classificadores, seguida de discussão da especialização desses conceitos para a abordagem do problema de controle de reativos capacitivos, para situações de variações de demandas e indeterminação de seus valores. A abordagem por programação dinâmica para o problema de controle de reativos com demandas variáveis e conhecidas é também descrita nesse capítulo. Os estudos de casos são apresentados no Capítulo 7. Seguem-se discussões, conclusões e sugestões no Capítulo 8. O apêndice A apresenta as equações para o cálculo dos parâmetros do Sistema Classificador. No apêndice B são apresentados aspectos adicionais dos estudos de casos.

## Capítulo 2

# Perdas nas Redes de Distribuição de Energia Elétrica

### 2.1 Introdução

As perdas técnicas nos sistemas de energia elétrica são decorrentes das resistências elétricas nas linhas e equipamentos dos subsistemas de transmissão e distribuição de energia. Essas perdas na literatura internacional são estimadas em 7% da energia total produzida; 2% na transmissão e 5% na distribuição (Buch *et al.*, 1982). No Brasil elas podem alcançar 15% da energia total produzida no país, correspondendo 7% a transmissão e 8% a distribuição (Cavellucci, 1998).

A redução das perdas de energia é uma forma de aumentar a disponibilidade global de energia elétrica. No mercado brasileiro, com um consumo de energia médio anual de aproximadamente 310 TWh\*, uma diminuição de 2% nas perdas, possibilidade factível

\* <http://www.eletrobras.gov.br/mercado>

com metodologias eficientes, equivale a energia média produzida por uma usina hidroelétrica de 1500MW.

Existem várias formas de reduzir as perdas de energia elétrica nas redes de distribuição. As mais importantes são, provavelmente, a substituição de linhas de distribuição e equipamentos associados, reconfigurações das redes e instalação de bancos de capacitores.

A substituição de linhas e alimentadores antigos por outros, com materiais mais modernos e bitolas mais adequadas, permite diminuir a resistência elétrica dos cabos e equipamentos. Estratégias de reconfigurações procuram mudar as topologias das redes para encontrar caminhos com menores resistências elétricas. A alocação e controle de capacitores, em pontos adequados da rede, permitem reduzir os fluxos de energia reativa; conseqüentemente, proporciona a redução das perdas resistivas associadas a esses fluxos. Este trabalho traz contribuições à redução de perdas técnicas por localização e controle de capacitores.

## ***2.2 Caracterização do Problema de Redução de Perdas por injeção de reativos***

Capacitores são fontes de energia reativa. O objetivo de sua aplicação em sistemas de potência é a compensação de energias reativas produzidas por cargas indutivas ou reatâncias de linhas. Quando adequadamente utilizados, permitem a obtenção de um conjunto de benefícios correlatos, que incluem a redução de perdas de energia, correção dos perfis de tensões, controle dos fluxos de potência e aumento da capacidade dos sistemas. No contexto deste trabalho, a instalação de capacitores será avaliada, principalmente, sob a ótica de redução de perdas.

As perdas técnicas de energia em redes de distribuição estão associadas aos produtos dos quadrados dos fluxos de correntes pelas resistências das linhas. As correntes ao longo dos condutores podem ser separadas em duas componentes: componente “em fase” ( $i_p$ ),

necessária para o transporte da potência ativa (ou “útil”) e componente “em quadratura com a tensão” ( $i_Q$ ), associada aos fluxos de potências reativas.

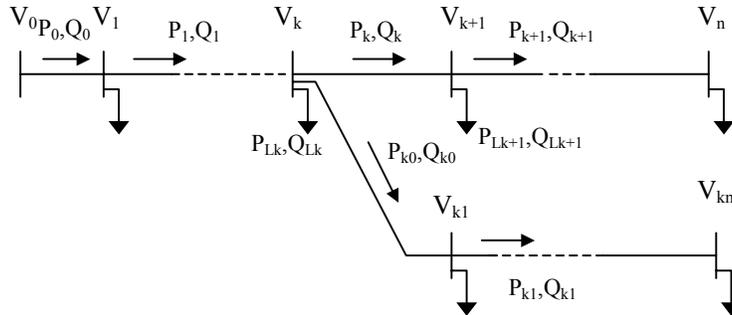


Figura 2.1: Diagrama de um alimentador em uma rede de distribuição.

Considerando essas duas componentes, as perdas  $p_k$  em um determinado trecho  $k$  (Figura 2.1) podem ser caracterizadas pela equação a seguir.

$$p_k = r_k (i_{P_k}^2) + r_k (i_{Q_k}^2) \quad (2.1)$$

Onde:

- $p_k$  é o total de perdas no trecho  $k$ ;
- $r_k$  é a resistência elétrica do trecho  $k$ ;
- $i_{P_k}$  é o valor da componente de corrente associada ao fluxo de potência ativa;
- $i_{Q_k}$  é o valor da componente de corrente associada ao fluxo de potência reativa.

As perdas técnicas podem ser reduzidas pela instalação e controle de capacitores em pontos adequados da rede, proporcionando “fonte” de energia reativa nas proximidades das cargas. Desta forma, diminui-se (ou, no limite, elimina-se) as componentes associadas aos fluxos de corrente reativas ( $i_Q$ ) nas linhas.

Capacitores podem ser instalados em sistemas de distribuição de duas formas: em paralelo com as cargas ou em série com as linhas. A utilização de capacitores em paralelo procura atingir os benefícios de sua utilização pela correção do fator de potência (ou seja, pela “injeção” adequada de reativos) nos pontos de instalação. Os capacitores em série são utilizados quase que exclusivamente no controle de “flickers” (Murphy and Wu, 1990). Assim, tendo em vista o objetivo desta tese, abordaremos apenas o problema de instalação de capacitores em paralelo às cargas.

Para a caracterização formal do problema de redução de perdas por injeção de reativos é vantajoso nos apoiarmos nos recursos de representação por grafos (Ahuja, Magnanti and Orlin, 1993; Cavelucci and Lyra, 1997). Grafos são entidades matemáticas formadas por um conjunto de *nós* ( $\mathcal{N}$ ) e ligações entre esses nós, denominados *arcos* ( $\mathcal{A}$ ); os modelos de grafos são abstrações muito intuitivas da rede e, normalmente, indicam alternativas para aumentar a eficiência dos algoritmos de solução.

Quando se utiliza um grafo  $\mathcal{G}=[\mathcal{N}, \mathcal{A}]$  para representar um sistema de distribuição, os *nós* do conjunto  $\mathcal{N}$  são associados a pontos significativos da rede, como transformadores, barramentos de carga e pontos de ramificações de linhas - um *nó raiz* é também incluído em  $\mathcal{N}$  para evitar dificuldades associadas com o manuseio computacional e aspectos de conectividade da rede. Os *arcos* do conjunto  $\mathcal{A}$  estão associados a linhas de distribuição e disjuntores (podem também representar outros componentes, eventualmente necessários para estudos específicos) - os arcos que fazem a conexão das subestações ao nó raiz podem ser identificados com as linhas de transmissão. A Figura 2.2 ilustra uma representação por grafo do alimentador apresentado na Figura 2.1.

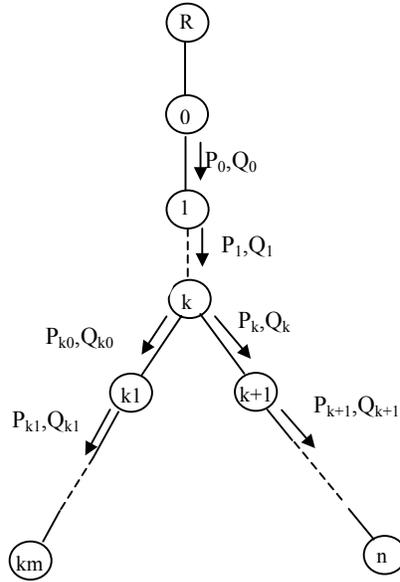


Figura 2.2: Representação em grafo do alimentador da figura 2.1.

Considerando um perfil de demanda fixo  $D_\lambda$  as perdas técnicas de energia elétrica em uma rede de distribuição podem ser descritas pela equação (2.2) a seguir (Baran e Wu, 1989a):

$$p = \sum_{k \in \mathcal{N}} \sum_{i \in \mathcal{A}_k} r_{ki} \frac{P_{ki}^2 + Q_{ki}^2}{V_k^2} \quad (2.2)$$

s.a.:

$$P_k = \sum_{i \in \mathcal{A}_k} P_{ki} + P_{Lk} \quad (2.3)$$

$$Q_k = \sum_{i \in \mathcal{A}_k} Q_{ki} + Q_{Lk} \quad (2.4)$$

$$V_i^2 = V_k^2 - 2(r_{ki}P_{ki} + y_{ki}Q_{ki}) \quad (2.5)$$

Onde:

$\mathcal{A}_k$  é o conjunto de arcos com origem em  $k$ ;

$P_k$  é o fluxo de potência ativa no arco  $k$ ;

$Q_k$  é o fluxo de potência reativa no arco  $k$ ;

$V_k$  é a tensão no nó  $k$ ;

$V_i$  é a tensão no nó  $i$ ;

$P_{Lk}$  é a demanda de potência ativa no nó  $k$ ;

$Q_{Lk}$  é a demanda de potência reativa no nó  $k$ ;

$r_{ki}$  e  $y_{ki}$  representam, respectivamente, resistências e reatâncias associadas ao arco  $ki$  (com origem no nó  $k$ ).

A Figura 2.3 mostra os arcos  $ki$ , que representam ramificações na rede de distribuição com origem no nó  $k$ .

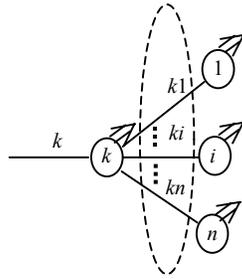


Figura 2.3: Ramificação em um trecho de rede de distribuição observando-se os  $ki$  arcos com origem no nó  $k$ .

As equações (2.3), (2.4) e (2.5) são utilizadas neste trabalho para determinar o estado da rede ( $P$ ,  $Q$ ,  $V$ ). Estas equações recursivas foram propostas no trabalho de Baran e Wu (1989a), acrescidas de generalizações para considerar as ramificações nas redes, propostas por Vargas *et al.* (2002).

Deve-se também observar que as equações (2.3) e (2.4) adotam a hipótese de que os alimentadores primários de distribuição operam geralmente de forma radial (i.e, sem anéis). Expressando esta observação em termos formais, o grafo  $G'=[\mathcal{N}, \mathcal{A}']$ , onde  $\mathcal{A}'$  é o conjunto de arcos com fluxos diferentes de zero, é uma *árvore* (um subgrafo conexo e sem ciclos).

Os capacitores, quando presentes em uma rede de distribuição de energia elétrica, injetam potência reativa capacitiva (de acordo com sua capacidade), reduzindo os fluxos de potências reativas na rede. A

Figura 2.4 apresenta um diagrama esquemático e grafo associado de um alimentador, quando é alocado um capacitor no nó  $k$ .

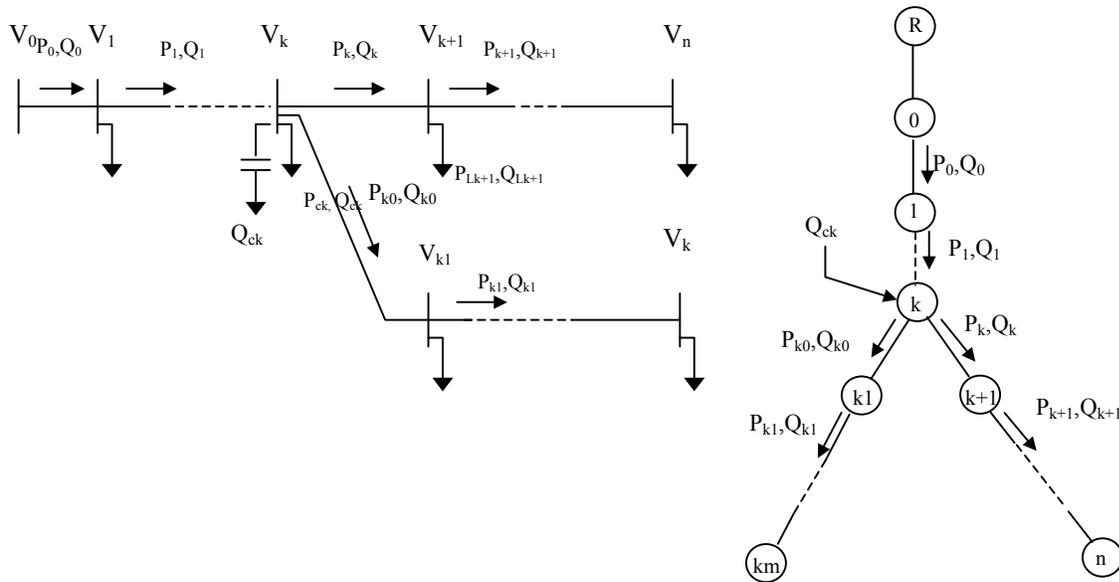


Figura 2.4: Diagrama do alimentador e grafo com um capacitor no nó  $k$ .

O efeito da instalação de capacitores na redução do total de fluxos de reativos na rede é mostrado na equação 2.6, a seguir.

$$Q_k = \sum_{i \in \mathcal{A}_k} Q_{ki} + Q_{Lk} - Q_{Ck} \quad (2.6)$$

Onde,  $Q_{Ck}$  representa a potência reativa injetada no nó  $k$  pelo capacitor.

Uma rede de distribuição opera geralmente sob cargas variáveis com o tempo. Normalmente, nas abordagens de problemas de planejamento e operação de sistemas de distribuição, supõe-se uma variação discreta dos perfis de carga, como ilustra a Figura 2.5, a seguir.

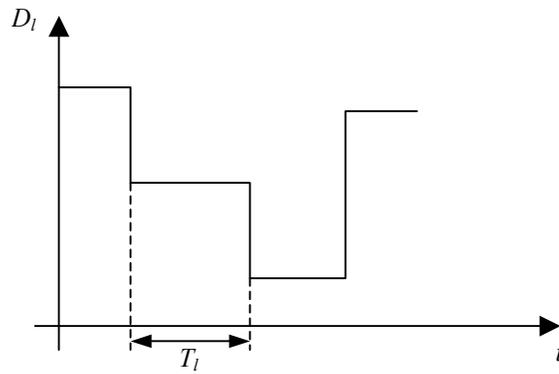


Figura 2.5: Perfis de carga uniforme.

O valor monetário total das perdas associadas a um conjunto de perfis de carga com  $n$  segmentos, como o mostrado na Figura 2.5, pode ser caracterizado na forma a seguir.

$$k_e \sum_{l=1}^n T_l p_l \quad (2.7)$$

Onde:

$K_e$  é o custo médio da energia;

$T_l$  é o tempo de duração do perfil  $l$ ;

$p_l$  são as perdas na rede para o perfil  $l$ .

## 2.3 Formulação do Problema de Localização de Capacitores

A redução de perdas por injeção de reativos requer a solução do problema de localização e dimensionamento de capacitores em redes de distribuição de energia elétrica. Este problema procura definir, da melhor forma possível, o número de capacitores a serem instalados nos alimentadores da rede, suas localizações precisas, bem como o tipo (fixo ou chaveado) e tamanho de cada capacitor - normalmente, deseja-se encontrar o compromisso ideal entre os recursos gastos com a aquisição (e manutenção) de capacitores e os

benefícios obtidos com a redução de perdas na rede. Níveis de tensão em todos os pontos da rede devem ficar entre valores máximos e mínimos, previamente especificados.

A bibliografia sobre o problema de instalação de capacitores considera situações de cargas fixas ou variáveis. É importante ressaltar que os trabalhos que lidam com demandas variáveis supõem variações uniformes (i.e., proporcionais) em todos os pontos de carga - esta situação é bem distinta do problema de controle de capacitores chaveados, onde cada ponto de carga segue padrões próprios de variação.

É possível formular três problemas diferentes de localização de capacitores, considerando demandas fixas e variáveis, assim como a utilização de bancos de capacitores fixos ou controlados (com vários taps ou níveis de operação). A formulação para a situação de demandas fixas é apenas uma simplificação do problema para demandas variáveis. De forma análoga, a localização de capacitores fixos pode ser vista como uma simplificação do problema de localização de capacitores chaveados. De fato, sob a hipótese de uniformidade, as variações de carga não acrescentam dificuldade ao problema. No item a seguir, apresenta-se uma formulação geral do problema de localização de capacitores.

### **2.3.1 Formulação geral do problema.**

Para formular o problema de alocação de capacitores para redes de distribuição de energia elétrica como um problema de otimização, usa-se uma formulação proposta por Baran e Wu (1989a) e, mais recentemente, adotada em Romero *et al.* (2001).

$$Min_{Q_c} \left\{ \left( \sum_{k \in \mathcal{N}} f(Q_{ck}^0) \right) + k_e \sum_{l=1}^n T_l P_l \right\} \quad (2.8)$$

s.a:

$$P_l = \sum_{k \in \mathcal{N}} \sum_{i \in \mathcal{N}_k} r_{ki} \frac{P_{ki}^2 + Q_{ki}^2}{V_k^2} \quad (2.9)$$

$$P_k = \sum_{i \in \mathcal{A}_k} P_{ki} + P_{Lk} \quad (2.10)$$

$$Q_k = \sum_{i \in \mathcal{A}_k} Q_{ki} + Q_{Lk} - Q_{Ck}^j \quad (2.11)$$

$$V_i^2 = V_k^2 - 2(r_{ki}P_{ki} + y_{ki}Q_{ki}) \quad (2.12)$$

$$0 \leq Q_{Ck}^j \leq Q_{Ck}^0 \quad k \in C_1 \quad (2.13)$$

$$Q_{Ck}^j = Q_{Ck}^0 \quad k \in C_2 \quad (2.14)$$

$$\underline{v}_k \leq v_k \leq \overline{v}_k \quad (2.15)$$

$$Q_k \geq Q_{ck} \quad (2.16)$$

Onde:

$Q_C$  é o conjunto de capacitores instalados na rede;

$f(Q_{ck}^0)$  é a função que representa o custo anualizado de um capacitor capaz de fornecer a potência reativa no nó  $k$ ;

$k_e$  é o custo médio da energia no horizonte de estudo;

$T_l$  é o tempo de duração do perfil de carga  $l$ ;

$p_l$  são as perdas de energia na rede para  $l$ ;

$A_k$  é o conjunto de arcos com origem em  $k$ ;

$P_k$  é o fluxo de potência ativa no arco  $k$ ;

$Q_k$  é o fluxo de potência reativa no arco  $k$ ;

$V_k$  e  $V_i$  são as tensões nos nós  $k$  e  $i$  respectivamente;

$P_{Lk}$  é a demanda de potência ativa no nó  $k$ ;

$Q_{Lk}$  é a demanda de potência reativa no nó  $k$ ;

$Q_{Ck}^j$  é a potência reativa injetada pelo capacitor instalado no nó  $k$  (não havendo capacitor instalado, a potência é nula);

$Q_{Ck}^0$  é a potência reativa máxima que pode ser injetada pelo capacitor alocado no nó  $k$ ;

$r_{ki}$  e  $y_{ki}$  representam, respectivamente, resistências e reatâncias associadas ao arco  $ki$  (com origem no nó  $k$ );

$\underline{v}_k$  e  $\overline{v}_k$  são os limites (inferior e superior) admitidos para a tensão no nó  $k$ ;

$C_1$  é o conjunto de capacitores variáveis para instalação;

e  $C_2$  é o conjunto de capacitores fixos para instalação.

Observa-se que a primeira parcela da função objetivo representa o valor total anualizado do investimento com a instalação de capacitores; a segunda parcela da função objetivo representa o valor total da energia dissipada ao longo de um ano, na rede de distribuição em estudo.

Para um capacitor chaveado existem  $m+1$  diferentes níveis de operação  $Q_{Ck}^j$  com  $j=0, \dots, m$ ,  $0 \leq Q_{Ck}^j \leq Q_{Ck}^0$ .

Como já comentado, existem casos particulares para a formulação apresentada: formulação para demandas fixas e alocação capacitores fixos, formulação para demandas variáveis e capacitores fixos e formulação com demandas variáveis e capacitores variáveis.

## **2.4 Formulação do Problema de Controle de Capacitores**

O Problema de Controle de Capacitores (PCC) define a melhor estratégia para chaveamento de capacitores variáveis, considerando as variações das demandas nos pontos de carga. Nesse problema, deve-se considerar que as variações de demanda em cada ponto da rede seguem padrões distintos.

No problema de controle, os capacitores estão previamente instalados na rede. Resolver o problema equivale a encontrar o conjunto de pontos de operação para os capacitores do conjunto  $Q_C$  que minimize as perdas na rede, considerando-se perfis de demanda distintos

( $D_\lambda$ ). A função objetivo que caracteriza o total de perdas está representado na equação (2.17).

$$\text{Min}_{Q_c} \left\{ \sum_{k \in \mathcal{N}} \sum_{i \in \mathcal{A}_k} r_{ki} \frac{P_{ki}^2 + Q_{ki}^2}{V_k^2} \right\} \quad (2.17)$$

s.a:

$$P_k = \sum_{i \in \mathcal{A}_k} P_{ki} + P_{Lk} \quad (2.18)$$

$$Q_k = \sum_{i \in \mathcal{A}_k} Q_{ki} + Q_{Lk} - Q_{ck}^j \quad (2.19)$$

$$V_i^2 = V_k^2 - 2(r_{ki}P_{ki} + y_{ki}Q_{ki}) \quad (2.20)$$

$$0 \leq Q_{ck}^j \leq Q_{ck}^0 \quad (2.21)$$

$$\underline{v}_k \leq v_k \leq \overline{v}_k \quad (2.22)$$

$$Q_k \geq Q_{ck} \quad (2.23)$$

Onde:

$Q_c$  é o conjunto de capacitores instalados na rede;

$\mathcal{A}_k$  é o conjunto de arcos com origem em  $k$ ;

$P_k$  é o fluxo de potência ativa no arco  $k$ ;

$Q_k$  é o fluxo de potência reativa no arco  $k$ ;

$V_k$  e  $V_i$  são as tensões nos nós  $k$  e  $i$  respectivamente;

$P_{Lk}$  é a demanda de potência ativa no nó  $k$ ;

$Q_{Lk}$  é a demanda de potência reativa no nó  $k$ ;

$Q_{ck}^j$  é a potência reativa injetada pelo capacitor instalado no nó  $k$  (não havendo capacitor instalado, a potência é nula);

$r_{ki}$  e  $y_{ki}$  representam, respectivamente, resistências e reatâncias associadas ao arco  $ki$  (com origem no nó  $k$ );

$\underline{v}_k$  e  $\overline{v}_k$  são os limites (inferior e superior) admitidos para a tensão no nó  $k$ .

A função objetivo representa o valor total da potência dissipada ao longo de um ano na rede de distribuição em estudo, para um determinado perfil de demanda.

Quando alguma mudança significativa no perfil de carga  $D_l$  é detectada, novas posições para os *taps* (posição de controle) do conjunto  $Q_c$  de capacitores deverão ser encontradas, para compensar o novo fluxo de reativos na rede.

No próximo Capítulo faz-se uma revisão bibliográfica sobre o problema de alocação de capacitores (PLC) e o problema de controle de capacitores (PCC).

# Capítulo 3

## Revisão Bibliográfica

### ***3.1 Localização de Capacitores***

Antes da década de 50, os capacitores para redução de perdas eram colocados nas subestações, no início dos alimentadores (Bortignin and El-Hawary, 1995). Com a verificação das vantagens de instalar os capacitores em pontos próximos às cargas e o aparecimento de equipamentos de menor porte, que podiam ser instalados nos postes de distribuição, o problema de localização e dimensionamento de capacitores foi ganhando importância. Metodologias para definir os melhores locais e dimensões dos capacitores para a redução de perdas vêm sendo estudadas desde então.

Os primeiros métodos propostos foram métodos analíticos, usando hipóteses muito simplificadoras. Por exemplo, Neagle e Samson (1956) desenvolveram uma metodologia analítica, baseada em curvas de perdas, para alocação de bancos de capacitores fixos nos alimentadores de sistemas de distribuição (um único banco para cada alimentador).

Cook (1959) estende a formulação de Neagle e Samson, levando em consideração as variações periódicas nas cargas. Mostrou também que a regra dos “dois terços”, considerada na época uma boa aproximação para colocação de capacitores, poderia causar aumento das perdas - a regra dos “dois terços” supunha que a maior redução de perdas seria obtida com a instalação de um banco de capacitores capaz de fornecer dois terços da potência reativa total máxima do alimentador, a uma distância da subestação igual a dois terços do comprimento do alimentador.

Durán (1968) propôs abordar o problema de instalação de capacitores por programação dinâmica, um método formal de otimização que permite a obtenção da melhor solução, para uma determinada representação do problema. Ainda hoje, a abordagem proposta por Durán é vista como uma metodologia atraente para abordar o problema de instalação de capacitores (Peponis *et al.*, 1995).

Grainger e Lee (1981) abordam o problema de instalação de capacitores fixos com cargas não uniformes. Usando o conceito de “alimentador equivalente normalizado”, propõem um procedimento de decomposição simples, com dois subproblemas que interagem até a obtenção de uma situação de convergência. No mesmo ano, publicam outro trabalho para tratar a situação de capacitores chaveados.

Kaplan (1984) desenvolve um método gráfico analítico para o PLC, considerando situações mais realistas: alimentadores com ramificações, presença de capacitores já instalados, capacitores fixos ou variáveis e distribuição da carga não uniforme. O autor comenta os benefícios da utilização do método, mas não apresenta resultados.

Em um trabalho dividido em três partes, Grainger e Cinvalar (1985a, 1985b, 1985c) formulam um problema de controle de reativos e tensões, para redes de distribuição radiais. A formulação tem como objetivo minimizar o pico de potência e diminuir as perdas, mantendo a tensão dentro dos limites, em situação de cargas variáveis. Eles consideram a alocação de capacitores fixos e variáveis de tipo ON/OFF e formulam dois

subproblemas: o problema de alocação de capacitores e o problema de alocação de reguladores de tensão.

Salama, Chikhani e Hackan (1985) utilizam também o conceito de “alimentador equivalente” para determinar localização e dimensão de capacitores, em situação de cargas fixas. No mesmo ano estendem a abordagem para cargas variáveis.

Mais recentemente Salama e Chikhani (1993) procuram novamente abordar o problema por técnicas analíticas simples, como alternativa aos métodos de otimização mais sofisticados que dominam a cena.

Os autores Ponnavaikko e Prakasa (1983) implementaram um algoritmo que chamaram de método de variações locais para resolver o problema de localização de capacitores (PLC), com capacitores fixos e variáveis.

Baran e Wu (1989b, 1989c) formularam o problema de instalação de capacitores como um problema de otimização não linear com variáveis reais e inteiras. Nesses artigos, métodos de programação matemática são associados a heurísticas para determinar a localização, tipo e dimensão dos capacitores, considerando restrições de tensões e variações nas demandas.

Muitos outros autores utilizaram técnicas de otimização para resolver o problema. Como exemplo, temos os trabalhos de Augugliaro, Dusanchet e Mangione (1990), Chung e Shaoyun (1997), e Medeiros e Pimentel (2000). No entanto Baran e Wu (1989b, 1989c) propuseram a abordagem mais detalhada, sendo os autores mais citados quando se menciona abordagens por otimização tradicional.

Os enfoques heurísticos, como Simulated Annealing, Busca Tabu, e Algoritmos Populacionais, apesar de não garantirem soluções ótimas para o problema, ganharam muito espaço na solução deste problema ao longo da última década. Chiang *et al.* (1990a, 1990b) aplicaram Simulated Annealing na resolução de um problema de

localização de capacitores, onde a função de custo de instalação dos capacitores é não diferenciável e os tipos de capacitores são representados por variáveis inteiras. Em artigo posterior Chiang *et al.* (1995) propuseram uma nova formulação para o PLC, incorporando aspectos mais realistas das redes de distribuição, como consideração de redes desbalanceadas. A técnica empregada também é Simulated Annealing, mas o sua utilização em redes de tamanho realista parece encontrar sérios problemas relacionados ao tempo computacional consumido pelo método.

O trabalho de Huang, Yang e Huang (1996) aplica a metaheurística busca tabu ao PLC. Eles primeiramente escolhem locais potenciais para instalação dos bancos de capacitores, identificados por análise de sensibilidade, através do mesmo procedimento heurístico utilizado por Ghose, Goswami e Basu (1999).

Gallego, Monticelli e Romero (2001) utilizam um algoritmo híbrido para resolver o PLC, baseado em Busca Tabu. Na formulação do problema são considerados capacitores variáveis, assim como variação uniforme nos perfis de carga. A metodologia apresentou bons resultados em redes de pequeno porte utilizadas na literatura.

Uma abordagem de busca em grafos foi usada por Carlisle e El-Keib (2000) para solucionar o PLC, considerando capacitores fixos e variáveis. A formulação do problema considera variações da demanda e alimentadores balanceados.

O primeiro artigo usando computação evolutiva para solução do PLC deve-se a Boone e Chiang (1993). A proposta implementava um algoritmo genético (AG) bem simples e incorporava apenas elementos básicos da metodologia dos AGs. No trabalho de Iba (1994) a implementação do AG é mais elaborada, acrescentando no cromossomo a posição dos taps dos capacitores, número de bancos de capacitores a serem instalados e tensão de referência. O trabalho adota um procedimento confuso para avaliar a qualidade das soluções obtidas com duas redes de teste, tentando “provar” estatisticamente a optimalidade das soluções. O AG desenvolvido por Sundhararajan e Pahwa (1994) se assemelha ao proposto por Iba (1994). Neste trabalho, a função objetivo inclui o custo

de perda de energia de pico e o cromossomo considera os locais potenciais para instalação de capacitores na forma de um string binário. São testadas duas redes, de 30 e 9 barras, com economias de 15,5% e 5,8 %, respectivamente, em relação à situação de ausência de capacitores.

O enfoque de dois estágios proposto por Miu, Chiang e Darling (1997) é uma contribuição original, já que usa um AG restrito numa fase inicial com a finalidade de conseguir soluções de boa qualidade e, em uma segunda fase, utiliza uma análise de sensibilidade para melhorar as soluções conseguidas inicialmente. Eles consideram a possibilidade de tratar redes com bancos de capacitores já instalados, permitindo a retirada ou substituição por outros de tamanhos diferentes.

Um AG com indivíduos compostos de 4 substrings, codificados na forma binária, é proposto por Ghose, Goswami e Basu (1999). Os resultados computacionais em duas redes mostram que o algoritmo apresenta bons resultados, quando o AG incorpora a decisão sobre os locais de instalação dos capacitores.

Levitin *et al.* (2000) apresentaram um novo método evolutivo para o PLC, cuja maior contribuição foi uma representação compacta do cromossomo, que faz com que um número inteiro, associado a cada local potencial para instalar um capacitor, contenha informação tanto da localização do capacitor quanto de seu tamanho.

O artigo de Mendes *et al.* (2002) aplica uma abordagem por algoritmos meméticos (Moscatto, 1989), com resultados ligeiramente superiores aos apresentados por Gallego, Monticelli e Romero (2001). Essa metodologia foi avaliada com bons resultados em redes grandes (milhares de barramentos).

## **3.2 Controle de Capacitores**

A literatura sobre o problema de controle de capacitores (PCC) é escassa e recente.

Programação dinâmica (PD) foi usada por Hsu e Kuo (1993). Uma abordagem mista por programação dinâmica (PD) e redes neurais (RN) foi proposta por Hsu e Yang (1994). Nessa abordagem, o algoritmo de PD soluciona o PCC off-line para um número grande de perfis de carga. A rede neural identifica o perfil de carga ativo e encontra na base de dados a solução associada ao perfil; em seguida faz um ajuste fino da solução encontrada.

Uma solução heurística mista é proposta por Deng *et. al* (2002) para determinar o valor do ponto de operação de capacitores e transformadores, para as 24 horas do dia seguinte ao momento do estudo.

No Capítulo 4 são introduzidos alguns conceitos fundamentais de programação dinâmica e analisa-se a primeira utilização de PD para o problema de redução de perdas em redes de distribuição por alocação de capacitores, proposta por Durán (1968).

## Capítulo 4

# Conceitos Básicos de Programação Dinâmica e Especialização para o Problema de Localização de Capacitores

### *4.1 Introdução à Programação Dinâmica*

A Programação Dinâmica (PD) é um método de programação matemática baseado em uma seqüência de decisões inter-relacionadas, que leva à solução ótima para um determinado problema.

A abordagem de um problema por PD, na essência, consiste de uma decomposição do problema em uma seqüência de subproblemas mais simples, interligados de forma recursiva. Geralmente, os problemas podem ser abordados com PD se neles foram identificadas as características descritas a seguir:

- O problema pode ser dividido em várias etapas, ou estágios de decisão, com uma estratégia, ou política de decisão associada a cada etapa;
- Cada etapa tem associado um número de estados da solução;
- Em cada estado de uma etapa é decidido o estado da etapa seguinte que incorpora o maior benefício à função de retorno - desta forma, se estabelece um caminho condutor, que vai ligando a melhor seqüência de decisões;
- Para um determinado estado, a política de decisão dos estados remanescentes é independente da decisão adotada nos estados anteriores - este é o *princípio de optimalidade* na programação dinâmica concebido por Richard Bellman (1957);
- O procedimento de solução, na sua forma mais usual é iniciado na última etapa e procede no sentido “backward” (inverso);
- Existe uma relação recursiva que identifica a solução ótima para a etapa  $n$  tendo disponível a solução em  $n+1$ .

Os problemas de programação dinâmica podem ser determinísticos ou probabilísticos e tratados de forma discreta ou contínua. A Figura 4.1 representa o caso determinístico de PD. Na etapa  $n$ , o processo estará em um estado  $x_n$ ; tomando-se uma decisão  $u_n$  no estado  $x_n$ , encontra-se um estado  $x_{n+1}$ , na etapa  $n+1$ . A contribuição na função objetivo baixo essa política de decisão já foi previamente calculada  $f_{n+1}^*(x_{n+1})$ .

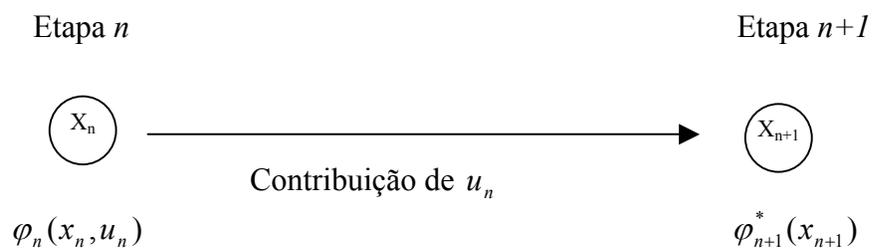


Figura 4.1: Transição de estados na programação dinâmica determinística.

## 4.2 Solução de um Problema de Otimização Seqüencial por Programação Dinâmica

Normalmente, define-se resolver por programação dinâmica um problema de otimização na forma a seguir:

$$\text{Min}_{u_0, u_1, \dots, u_{T-1}} \left\{ \sum_{j=0}^{T-1} \varphi_j(x_j, u_j) + \psi(u_T) \right\} \quad (4.1)$$

s.a:

$$x_{k+1} = f_k(x_k, u_k) \quad (4.2)$$

$$\underline{x} \leq x_j \leq \bar{x} \quad (4.3)$$

$$\underline{u} \leq u_j \leq \bar{u} \quad (4.4)$$

Onde:

$\varphi_j(x_j, u_j)$  é a função de retorno no estágio  $j$ ;

$x_j$  é o estado na etapa  $j$ ;

$u_j$  é a variável de controle aplicada no estado  $x_j$  da etapa  $j$ ;

$\psi(u_T)$  é a função de contorno na última etapa ( $T$ ).

Para aplicar programação dinâmica à solução de um problema de otimização, define-se a função de custo ótimo associado ao estado  $x_k$ , no estágio  $k$ ,  $F_k(x_k)$ ,

$$F_k(x_k) = \min_{u_k, u_{k+1}, \dots, u_{T-1}} \left\{ \sum_{j=k}^{T-1} \varphi_j(x_j, u_j) + \psi(u_T) \right\} \quad (4.5)$$

Das equações (4.1), (4.2) e (4.5) pode-se deduzir a equação recursiva de optimalidade, a seguir:

$$F_k(x_k) = \min_{u_k} \{ \varphi_k(x_k, u_k) + F_{k+1}(x_{k+1}) \} \quad (4.6)$$

É fácil ver que o processo de solução de um problema por programação dinâmica é concluído quando a equação recursiva é aplicada no estágio inicial, ou seja,

$$\min_{u_0} \{ \varphi_0(x_0, u_0) + F_1(x_1) \} \quad (4.7)$$

A Figura 4.2 apresenta um exemplo unidimensional de programação dinâmica com  $T$  etapas.

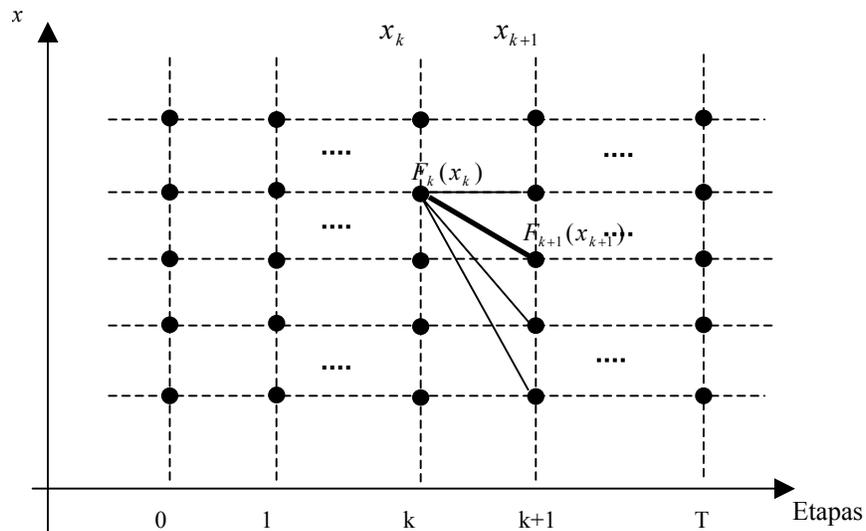


Figura 4.2: Diagrama de estados em um problema de otimização resolvido por PD.

No processo de otimização por programação dinâmica, para cada estágio são armazenados o valor da função de custo ótimo e o controle ótimo,  $(F_k(x_k), u_k)$ . A função  $F_k(x_k)$  é usada para encontrar a função de custo ótimo nos estados do estágio  $k-1$  (i.e.  $F_{k-1}(x_{k-1})$ ). O

controle ótimo em cada estado é usado para recuperar a trajetória ótima, a partir do estágio inicial.

A recuperação da trajetória começa no estado ótimo inicial  $x_0^*$ , onde foi aplicado o controle ótimo  $u_0^*$ . Usando as informações previamente armazenadas para cada estágio, vai-se encontrando a trajetória e os controles ótimos, a partir da equação,

$$x_{k+1}^* = f_k(x_k^*, u_k^*) \quad (4.8)$$

### **4.3 Programação Dinâmica com várias dimensões**

Se no problema que está sendo modelado por PD os estados e ou controles não podem ser representados em uma dimensão (a Figura 4.3 representa um problema bidimensional), o problema passa a ser multidimensional. Neste caso, cada estado ( $x_k$ ) é representado por um vetor de dimensão  $m$  e os controle em cada estado ( $u_k$ ) são vetores de dimensão  $n$  (no caso mais geral  $m \neq n$ ). Ou seja,

$$x_k = \begin{bmatrix} x_k^1 \\ x_k^2 \\ \vdots \\ x_k^m \end{bmatrix}, u_k = \begin{bmatrix} u_k^1 \\ u_k^2 \\ \vdots \\ u_k^n \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

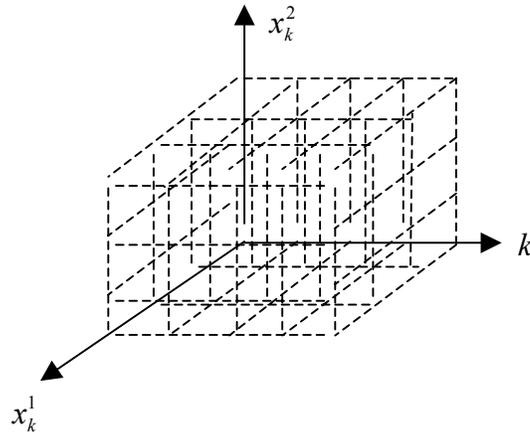


Figura 4.3: Exemplo de um problema em que o estado é bidimensional.

Conceitualmente, a equação recursiva de otimalidade é a mesma. No entanto, o número de valores discretizados de estados em cada estágio e o número de valores quantizados de controle aplicáveis a cada estado crescem exponencialmente com a dimensão do estado e a dimensão do vetor de controle. Conseqüentemente, o esforço computacional para avaliar a função recursiva de otimalidade cresce exponencialmente com a dimensão dos estados e controles. Este efeito é chamado de “maldição da dimensão” (Bellman, 1959). Apesar de existirem algumas técnicas para tentar diminuir o efeito das várias dimensões sobre o tempo computacional do algoritmo, na maioria das vezes o crescimento da dimensão limita fortemente as possibilidades de aplicação da programação dinâmica.

#### ***4.4 Especialização da Programação Dinâmica para Abordagem do Problema de Instalação de Capacitores.***

A primeira abordagem do problema de alocação de capacitores em redes de distribuição de energia elétrica utilizando a programação dinâmica foi proposta por Durán (1968). Durán utiliza técnicas de programação dinâmica para encontrar o número, lugar e tamanho ótimo dos bancos de capacitores fixos a serem alocados em uma rede de distribuição, para

maximizar o lucro líquido obtido com a aquisição de capacitores e diminuição das perdas elétricas.

Na modelagem do problema, foi considerado um alimentador simples como o apresentado na seguinte figura.

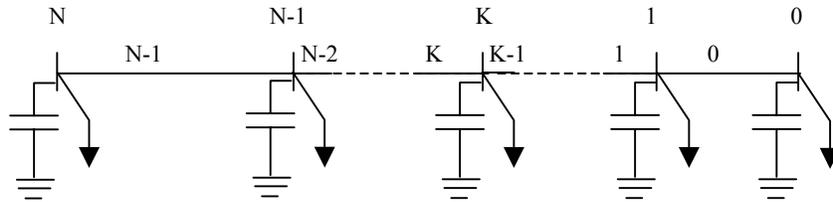


Figura 4.4: Diagrama de um alimentador simples.

Os arcos e os nós foram numerados na ordem decrescente, desde o começo do alimentador (N) até o final (0).

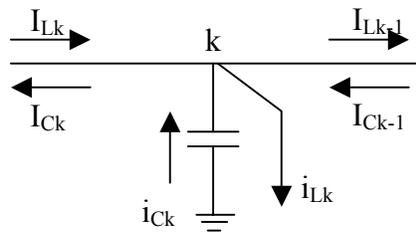


Figura 4.5: Representação das correntes no nó  $k$ .

A Figura 4.5 mostra a distribuição das correntes associadas ao nó  $k$ , onde:  $i_{Ck}$  representa a corrente reativa injetada pelo capacitor em  $k$ ,  $i_{Lk}$  está associada ao consumo de corrente reativa pela carga em  $k$ ,  $I_{Ck}$  é a corrente capacitiva total que flui pelo arco  $k$  e  $I_{Lk}$  representa a corrente reativa total circulando no arco  $k$ .

O ganho total obtido com a instalação de capacitores na rede é representado pela equação a seguir,

$$F = \sum_{m=1}^n [SL_m(I_m) - C(i_{cm})] \quad (4.10)$$

Onde:

$SL_m(I_m)$  é o ganho obtido pela redução das perdas no arco  $m$ ;

$C(I_{cm})$  é o custo do banco de capacitores instalado em  $m$ .

Durán utiliza programação dinâmica para maximizar a função de retorno  $F$ , i.e.,

$$\max_{i_c} \{F\} = \max_{i_c} \left\{ \sum_{m=1}^n [SL_m(I_m) - C(i_{cm})] \right\} \quad (4.11)$$

A única restrição considerada por Durán, em cada estágio, é que a corrente capacitiva total, no sentido da subestação, seja não negativa. Ou seja,

$$i_{cm} \geq 0, \quad m = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (4.12)$$

Resumidamente, pode-se destacar os seguintes pontos da abordagem de Durán:

- Associado a cada nó do alimentador há uma etapa ou estágio no processo de maximização da função de retorno;
- O *estado* do processo na etapa  $k$  é definido como a corrente total capacitiva que flui nesse arco ( $I_{ck-1}$ );
- A decisão em cada etapa  $k$  corresponde à escolha do valor da corrente capacitiva injetada no nó  $k$ ;
- As restrições de que a corrente capacitiva total seja não negativa impedem que o fluxo de corrente capacitiva que chega ao nó  $k$  seja menor que o fluxo que parte de  $k$  ( $I_{ck} \geq I_{ck-1}$ );
- A política ótima consiste em escolher um conjunto  $I_{ck}$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots, n$  que maximize a função de retorno.

Durán considerou três alternativas para o custo dos capacitores:

1. Custo dos capacitores igual a zero (fornece um limitante para a redução de perdas);
2. Custo dos capacitores proporcionais às capacidades instaladas.
3. Custo dos capacitores proporcionais às capacidades instaladas, mais um custo fixo por banco instalado.

O trabalho foi uma contribuição de destaque, por desenvolver todo o ferramental para a utilização de programação dinâmica no problema de alocação de capacitores para a redução de perdas em redes de distribuição de energia elétrica. Mais do que isso, mostrou a possibilidade de encontrar soluções ótimas para o problema.

Apesar dos bons resultados da abordagem proposta no trabalho de Durán (1968), a literatura sobre aplicações de programação dinâmica no problema ainda é escassa e, com frequência, associada ao problema de controle de capacitores instalados. Quase sempre é referida como uma abordagem com *tempo computacional excessivo* para uso em aplicações reais. Por isso, métodos heurísticos de otimização que não garantem a obtenção da solução ótima são geralmente usados.

O Capítulo 5 faz uma análise detalhada da abordagem proposta neste trabalho para abordar o problema de instalação de capacitores em redes de distribuição por programação dinâmica. Em grandes linhas estende-se as idéias de Durán para obtenção de soluções ótimas em redes de grande dimensão. A extensão inclui a abordagem do problema em situações onde os alimentadores têm ramificações.

## Capítulo 5

# Ampliação da Abordagem do Problema de Localização de Capacitores por Programação Dinâmica.

Para generalizar a idéia proposta em Durán (1968), o modelo considera os fluxos de potência como mostra a rede da Figura 5.1.

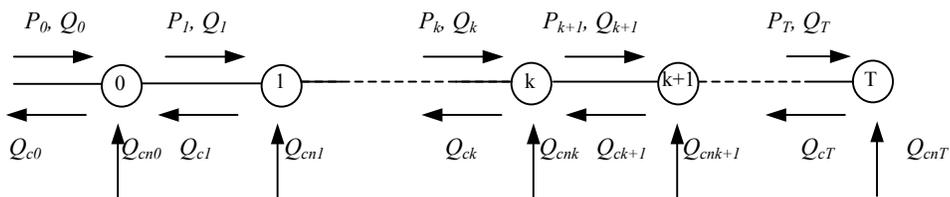


Figura 5.1: Diagrama de um alimentador simples.

Na Figura 5.1:

$P_k, Q_k$  são os fluxos de potencia ativa e reativa no arco  $k$ ;

$Q_{ck}$  é o fluxo de reativo capacitivo que circula pelo arco  $k$ ;

$Q_{cnk}$  é a potencia reativa capacitiva injetada pelo capacitor no nó  $k$ .

Para aplicar programação dinâmica à resolução do problema, o passo inicial é definir os estados e as variáveis de controle. Define-se como estados  $x_k$  os fluxos de reativos capacitivos circulando pela rede, que são decorrentes da alocação de capacitores nos nós. As variáveis de controle  $u_k$  são as potências reativas capacitivas, fornecidas pelos capacitores alocados na rede.

A representação da rede da Figura 5.1 com os estados e as variáveis de controle é apresentado na Figura 5.2.

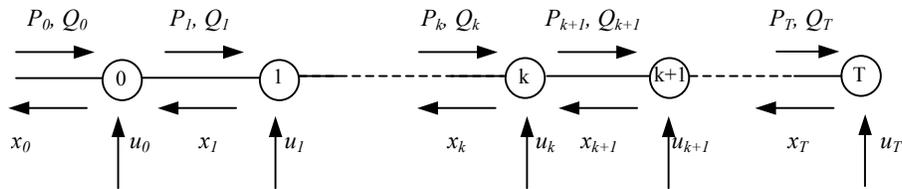


Figura 5.2: . Diagrama do alimentador com representação dos estados e variáveis de controle

A relação entre os estados e a variável de controle é linear, como representa a equação a seguir:

$$x_k = x_{k+1} + u_k \quad (5.1)$$

## 5.1 Especialização de Programação Dinâmica para o problema

A função objetivo do problema de alocação de capacitores deve caracterizar o compromisso entre redução de perdas elétricas na rede e investimento em capacitores, como foi apresentado na equação 2.7.

A equação 2.7 pode ser rescrita como (5.2)

$$\min \{f_p(P, Q, V) + f_c(u)\} \quad (5.2)$$

Onde:

$f_p(P, Q, V)$  representa o custo das perdas (R\$);

$f_c(u)$  é o custo dos capacitores instalados (R\$).

Na abordagem do problema por programação dinâmica desenvolvida neste trabalho, a função objetivo, a ser maximizada, expressa o benefício líquido caracterizado pela diferença entre o ganho alcançado com a instalação de capacitores e o custo dos capacitores. Essa função objetivo será desenvolvida na próxima seção.

### 5.1.1 Função Objetivo

Para o cálculo do custo das perdas para um determinado perfil de carga (uniforme ou não), consideram-se as seguintes equações:

$$P_k = r_k \frac{(P_k^2 + Q_k^2)}{V_k^2} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} P_k &= P_{k+1} + P_{Lk} \\ Q_k &= Q_{k+1} + Q_{Lk} \\ V_k^2 &= V_{k+1}^2 + 2(r_k P_k + y_k Q_k) \end{aligned} \quad (5.4)$$

Onde:

$p_k$  são as perdas de energia no arco  $k$ , da rede;

$P_k, Q_k$  são os fluxos de potências ativas e reativas no arco  $k$ ;

$V_k$  é a tensão no nó  $k$ ;

$r_k$  e  $y_k$  são a resistência e a reatância do trecho  $k$ , respectivamente;

$P_{Lk}, Q_{Lk}$  são as potências ativas e reativas das cargas no nó  $k$ .

Nas deduções a seguir, supõe-se  $V_k \cong 1.0 p.u$  (Elgerd, 1971). Assim, na presença de um determinado fluxo de potência reativa capacitiva  $x_k$  circulando no arco  $k$  da rede, as perdas ( $p_k^c$ ) são:

$$p_k^c = r_k (P_k^2 + (Q_k - x_k)^2) \quad (5.5)$$

A redução nas perdas ( $p_k^e$ ) de energia alcançada pela presença do fluxo capacitivo  $x_k$  é igual a  $p_k - p_k^c$ .

$$p_k^e = r_k (Q_k^2 - (Q_k - x_k)^2) \quad (5.6)$$

O valor econômico da redução de perdas em um arco, para um determinado período de tempo ( $T$ ), pode ser expresso na forma a seguir:

$$c_k = k_e T p_k^e \quad (5.7)$$

Onde  $k_e$  é o custo médio da energia para um determinado período de tempo ( $R\$/kWh$ ).

O ganho líquido obtido com a redução de perdas no arco  $k$  para um determinado período de tempo pode ser expressa por  $\varphi_k(x_k)$

$$\varphi_k(x_k) = c_k - f(u_k) \quad (5.8)$$

Onde:

$\varphi_k(x_k)$  é a função de retorno que caracteriza o compromisso de custos (“valor da redução de perdas” - “custo instalação de capacitores”) para o fluxo  $x_k$  de potência reativa capacitiva no arco  $k$ ;

$c_k$  é o ganho obtido com a redução de perdas no arco  $k$ ;

$f(u_k)$  é a função que caracteriza o custo anualizado do nível  $u_k$  de potência reativa capacitiva instalada no nó  $k$ ; o custo anualizado, para um determinado período de amortização e uma certa taxa de juros, pode incluir também custos de manutenção.

Considerando-se todos os arcos da rede, o problema de otimização a ser abordado por programação dinâmica pode ser caracterizado pela equação a seguir.

$$\max_u \left\{ \sum_{k \in N_I} \varphi_k(x_k) + \sum_{j \in N_F} \psi_j(x_j) \right\} \quad (5.9)$$

s.a:

$$x_{k+1} = x_k - u_k \quad (5.10)$$

$$\underline{x} \leq x_j \leq \bar{x} \quad (5.11)$$

$$\underline{u} \leq u_j \leq \bar{u} \quad (5.12)$$

Onde:

$N_I$ : conjunto dos nós interiores e raízes do grafo.

$N_F$ : conjunto dos “nós-folhas” do grafo.

A função de contorno  $\psi_j$  (para um certo nó folha) é igual à economia alcançada no arco  $j$  menos o custo anualizado dos capacitores alocados no nó  $j$ .

$$\begin{aligned} \psi_j &= c_j - f_j(x_j) \\ x_j &= u_j \end{aligned} \quad (5.13)$$

A recuperação da trajetória ótima começa com a obtenção do valor da função de otimalidade para o nó raiz do alimentador.

$$x_0^* = \arg\{\max[F_0(x_0)]\} \quad (5.14)$$

Com a informação do primeiro estágio e os valores dos controles ótimos armazenados em cada estado ( $u_k^*(x_k)$ ), recupera-se a trajetória ótima (eq. 5.15), a qual indica a estratégia ótima de instalação de capacitores no alimentador.

$$x_{k+1}^* = x_k^* - u_k^* \quad (5.15)$$

## 5.2 Generalização do método para um alimentador com ramificações.

As redes de distribuição de energia elétrica geralmente possuem alimentadores com ramificações. Um alimentador com ramificação está representado na figura a seguir.

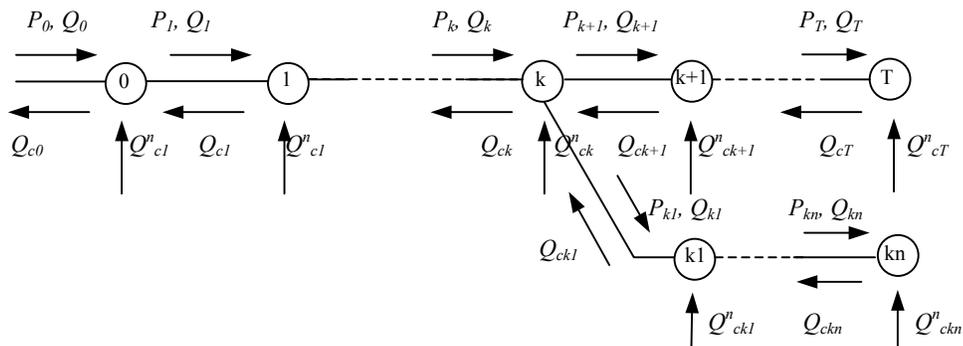


Figura 5.3: Alimentador com ramificação no nó  $k$ .

O alimentador da Figura 5.3 apresenta uma ramificação no nó  $k$ , com dois nós a montante.

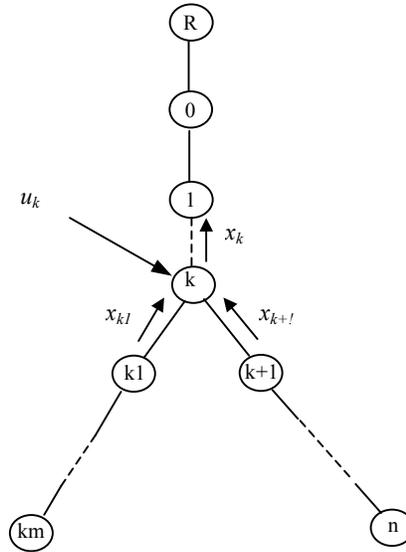


Figura 5.4: Grafo equivalente do alimentador

No grafo equivalente (Figura 5.4) da rede apresentada observa-se que:

$$x_k = x_{k1} + x_{k+1} + u_k \quad (5.16)$$

A equação (5.16) ilustra que o fluxo de capacitivos no trecho  $k$  é igual à soma dos fluxos dos arcos que chegam a ele mais os reativos injetados no nó  $k$ .

Devido à ramificação poderíamos pensar em representar o problema em  $k$  através de uma variável de estado com duas dimensões ( $x_{k1}$  e  $x_{k+1}$ ). A representação do estado em duas dimensões aumentaria significativamente o tempo computacional para a implementação do algoritmo. Nessas condições, a solução do problema para uma rede com milhares de barramentos e ramificações (fato bastante comum) seria inviável.

No entanto, se consideramos que o fluxo  $x_k$  jusante de uma ramificação é a soma dos fluxos em cada ramo, pode-se evitar a representação em mais de uma dimensão.

Para isso, vamos considerar um nó  $k$ , onde existem ramificações. O algoritmo de PD começa a ser executado desde as folhas até chegar ao nó  $k$ , para todos os arcos que

convergem em  $k$ . Nesse instante é calculado um fluxo “virtual”, igual à soma dos fluxos de cada arco.

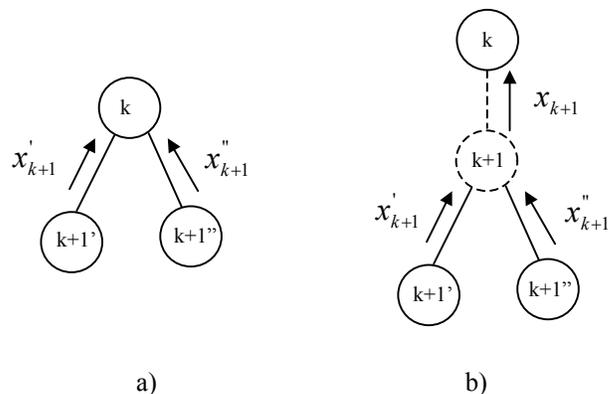


Figura 5.5: . Representação da modelagem para 2 arcos.

Na Figura 5.5 a) são apresentados inicialmente os estados correspondentes aos arcos que ramificam a partir de  $k$  ( $k+1'$  e  $k+1''$ ). Na Figura 5.5 b) é representado o estado “virtual” em  $k+1$  que corresponde à soma das componentes  $k+1'$  e  $k+1''$ . É possível usar o estado “virtual” no algoritmo de programação dinâmica, em lugar da utilização de várias dimensões.

Através do uso desse modelo, consegue-se representar *qualquer* alimentador em uma rede de distribuição sem *deteriorar* a eficiência do algoritmo. Alguns aspectos do algoritmo são detalhados na próxima seção.

### 5.3 Descrição do Algoritmo de Programação Dinâmica

Para modelar a rede de distribuição de energia elétrica foi usado um modelo de grafo. Na implementação do método, utiliza-se estruturas desenvolvidas na área de otimização de fluxos em redes (Brown *et al.*, 1977) que vão permitir explorar o grafo com eficiência.

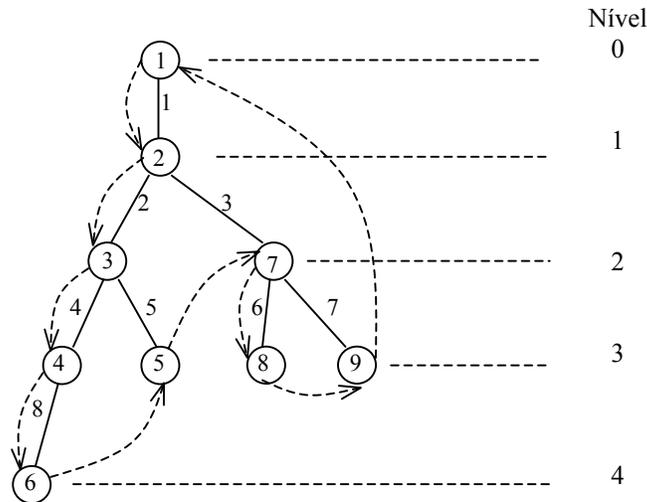


Figura 5.6: Exemplo de grafo

Associadas a cada arco  $i$  do grafo, são armazenadas as seguintes informações: parâmetros físicos e elétricos do arco  $i$ , nó *origem* de  $i$  e nó *destino* de  $i$ . Associadas a cada nó  $j$  da rede, são armazenadas as seguintes informações: nó antecessor de  $j$  (*pai*), arco que liga  $j$  ao seu antecessor (*arco pai*), próximo nó da árvore, quando percorrida em *pré-ordem* (“*suc*”) e nível do nó  $j$  - o nível de um nó  $j$  é igual ao número de nós existentes entre o nó raiz e o nó  $j$  (Jensen e Barnes, 1980).

A Tabela 5.1 ilustra os principais parâmetros do grafo apresentado na Figura 5.6:

Nós	Pai	Arco pai	Nível	Suc
1			0	2
2	1	1	1	3
3	2	2	2	4
4	3	4	3	8
5	4	5	3	7
6	3	8	4	5
7	2	3	2	8
8	7	6	3	9
9	7	7	3	1

Arcos	Orig.	Dest.
1	1	2
2	2	3
3	2	7
4	3	4
5	3	5
6	7	8
7	7	9
8	4	6

Tabela 5.1: Valores dos parâmetros fundamentais do grafo da Figura 5.6.

Um diagrama em blocos simplificado da implementação é apresentado na Fig. 5.7 ressaltando os principais blocos do programa, descritos a seguir.

1. **Inicialização.** Na inicialização são executados o processo de leitura do arquivo com os dados da rede, leitura do perfil de carga, conjunto de capacitores disponíveis para instalação e construídas as estruturas do grafo associado à rede, a partir desses dados.
2. **Alimentadores.** Determina o número  $n$  de alimentadores da rede, assim como os nós onde começam os alimentadores.
3. **Programação Dinâmica.** O algoritmo de PD realiza o processo de otimização, determinando o conjunto de capacitores a serem instalados em cada alimentador.

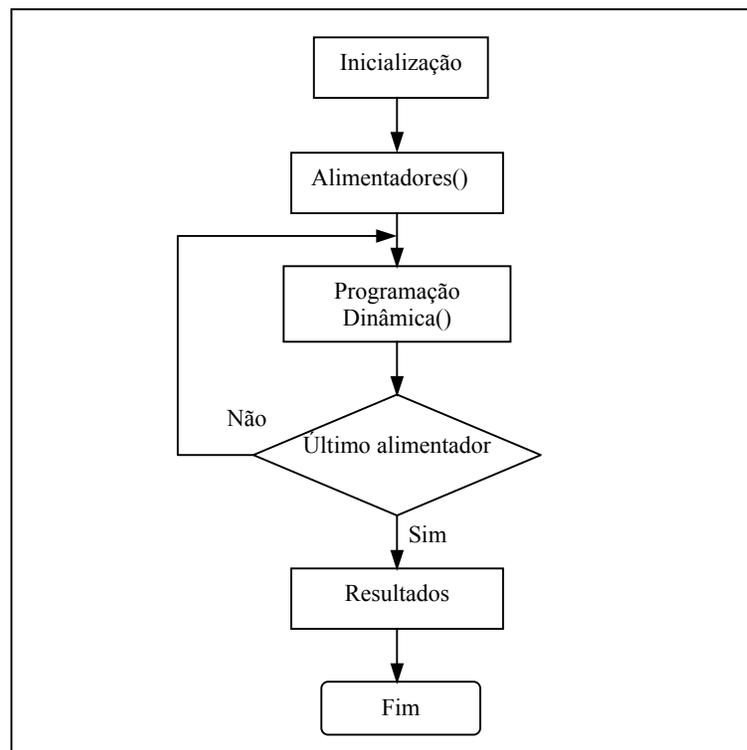


Figura 5.7: Fluxograma simplificado do programa principal.

No processo de inicialização destacam-se em particular duas fases: leitura da rede e cálculo dos valores de fluxo de carga e tensão nos arcos para o qual usam-se as equações (2.3), (2.4) e (2.5).

### 5.3.1 Breve descrição da implementação do algoritmo de PD

O método começa explorando o último nó de um alimentador (um nó folha). A partir deste nó, percorre o grafo em pré-ordem, construindo um vetor com os  $m$  nós do alimentador. Supondo que na rede representada no grafo da Figura 5.6 o nó 1 é o transformador da subestação, constrói-se o vetor representado na Figura 5.8. Como o processo recursivo de PD começa pelo último nó, o algoritmo percorre esse vetor em ordem inversa.

1	2	3	4	6	5	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Figura 5.8: Vetor F construído percorrendo o alimentador em preordem a partir do nó raiz.

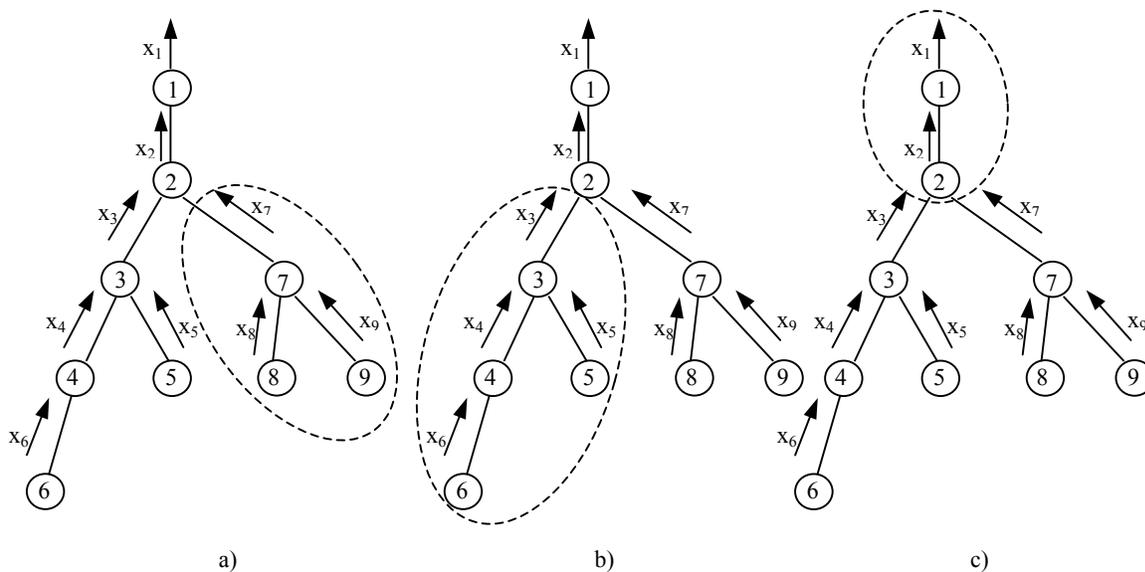


Figura 5.9: Ordem no qual é processada a rede da Figura 5.3 pelo algoritmo.

A Figura 5.9 mostra a ordem em que o algoritmo processa a rede apresentada na Figura 5.6, em 3 passos:

- São determinados inicialmente  $F_9(x_9), F_8(x_8)$  e  $F_7(x_7)$ , usando  $x_7 = x_8 + x_9 + u_7$ ;
- Em seguida, são calculados  $F_5(x_5), F_6(x_6), F_4(x_4)$  e  $F_3(x_3)$ , sendo  $x_3 = x_4 + x_5 + x_6 + u_3$ ;

c) Por último são determinados  $F_2(x_2)$  e  $F_1(x_1)$ , usando  $x_2 = x_3 + x_7 + u_2$ .

Um fluxograma simplificado do algoritmo é apresentado na Figura 5.10, onde  $T$  representa o último nó do alimentador (percorrendo o grafo em pré-ordem). O processo recursivo termina ao alcançar o nó inicial do alimentador ( $k=0$ ). Em seguida, inicia-se a recuperação da trajetória ótima utilizando-se as informações armazenadas em cada estado.

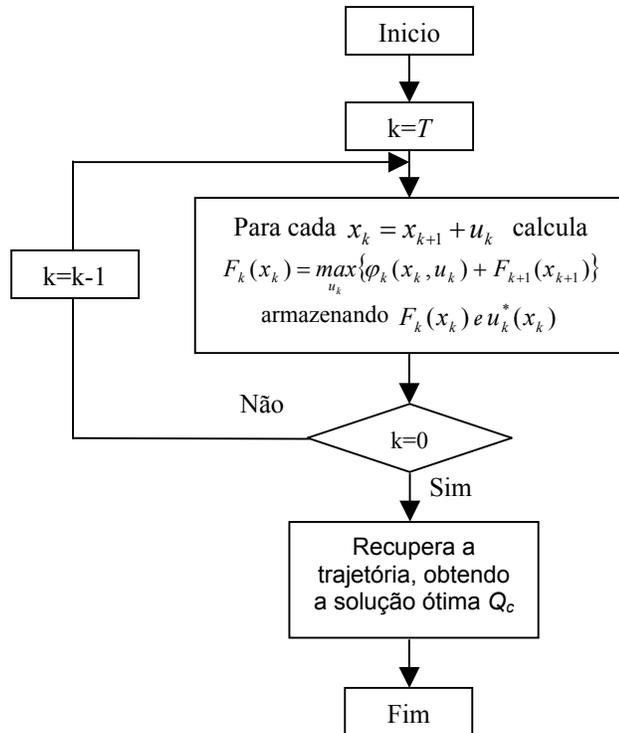


Figura 5.10: Fluxograma simplificado do algoritmo.

A seguir, apresenta-se um exemplo de pequeno porte para ilustrar o funcionamento do algoritmo proposto.

### 5.3.2 Exemplo Ilustrativo do Algoritmo

Na Figura 5.11 mostra-se três arcos de um alimentador de uma rede de distribuição de energia elétrica, onde o nó  $T$  é folha do grafo.

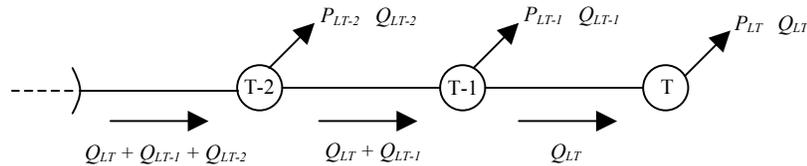


Figura 5.11: Rede de exemplo mostrando o trecho final de um alimentador.

No exemplo a seguir, utiliza-se as seguintes hipóteses:

- Só pode ser alocado um banco de capacitores ( $u_k$ ) por nó da rede;
- O fluxo de potência reativa capacitiva não deve ultrapassar o fluxo de potência reativa no arco  $k$  ( $x_k \leq Q_k$ ).

Considera-se os seguintes dados:

- A resistência elétrica em todos os arcos é igual a  $0.1 p.u.$ ;
- O tempo do estudo ( $T$ ) é igual a  $1000$  horas;
- Custo da energia ( $k_e$ ) igual a  $0.20 R\$/kWh$ ;
- Potência base ( $S_B$ ) igual a  $10000 kW$ ;
- Apenas capacitores com  $0.01 p.u.$  e  $0.02 p.u.$  podem ser instalados na rede, com custos  $f(u_k)$  de  $400$  e  $600 R\%$ , respectivamente;
- $V_k = 1.0 p.u.$

Considerando-se os fluxos nos arcos para p.u., o ganho com redução de perdas no arco  $k$  é obtido a partir das equações (5.6) e (5.7) – observando-se que é necessário multiplicar pela potência base  $S_B$ :

$$c_k(x_k) = k_e Tr_k (Q_k^2 - (Q_k - x_k)^2) S_B \quad (5.17)$$

A Figura 5.12 mostra os valores de potência reativa  $Q_k$  circulando pelos arcos da rede exemplo.

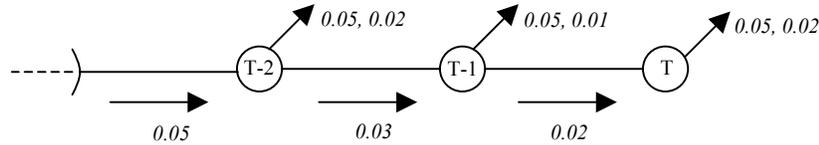


Figura 5.12: Demanda de potência ativa e reativa nos nós e fluxo de reativos nos arcos em p.u.

Os estados  $x_k$ , a funções de retorno  $\varphi_k$  e as funções de custo ótimo associadas aos estados  $x_k$ ,  $F_k(x_k)$ , são calculados pelas equações a seguir.

$$\begin{aligned} x_k &= u_k + x_{k+1} \\ \varphi_k(x_k) &= c_k(x_k) - f(u_k) \\ F_k(x_k) &= \max_{u_k} \{ \varphi_k(x_k) + F_{k+1}(x_{k+1}) \} \end{aligned} \quad (5.18)$$

No processo de otimização, quando estados iguais são obtidos, armazena-se aquele de maior benefício acumulado, definindo-se  $F(x_k)$  e  $u^*(x_k)$ .

Na primeira iteração o algoritmo gera os estados  $x_T$  para o nó  $T$ , fazendo  $x_T = u_T$ .

*Iteração 1:*

Estados armazenados em  $T$

$x_k$	$u_k$	$x_{k+1}$	$Q_k$	$c(x_k)$	$f(u_k)$	$F(x_k)$	$F(x_{k+1})$
0	0	-	0,02	0	0	0	-
0,01	0,01	-	0,02	600	400	200	-

*Iteração 2:*

Estados obtidos em  $T-1$ :

$x_k$	$u_k$	$x_{k+1}$	$Q_k$	$c(x_k)$	$f(u_k)$	$F(x_k)$	$F(x_{k+1})$
0	0	0	0,03	0	0	0	0
0,01	0,01	0	0,03	1000	400	600	0

0,02	0,02	0	0,03	1600	600	1000	0
0,01	0	0,01	0,03	1000	0	1200	200
0,02	0,01	0,01	0,03	1600	400	1400	200
0,03	0,02	0,01	0,03	1800	600	1400	200

Informações armazenadas em  $T-1$

$x_k$	$u_k$	$x_{k+1}$	$Q_k$	$c(x_k)$	$f(u_k)$	$F(x_k)$	$F(x_{k+1})$
0	0	0	0,03	0	0	0	0
0,01	0	0,01	0,03	1000	0	1200	200
0,02	0,01	0,01	0,03	1600	400	1400	200
0,03	0,02	0,01	0,03	1800	600	1400	200

Iteração 3:

Estados obtidos em  $T-2$ :

$x_k$	$u_k$	$x_{k+1}$	$Q_k$	$c(x_k)$	$f(u_k)$	$F(x_k)$	$F(x_{k+1})$
0	0	0	0,05	0	0	0	0
0,01	0,01	0	0,05	1800	400	1400	0
0,02	0,02	0	0,05	3200	600	2600	0
0,01	0	0,01	0,05	1800	0	3000	1200
0,02	0,01	0,01	0,05	3200	400	4000	1200
0,03	0,02	0,01	0,05	4200	600	4800	1200
0,02	0	0,02	0,05	3200	0	4600	1400
0,03	0,01	0,02	0,05	4200	400	5000	1400
0,04	0,02	0,02	0,05	4800	600	5600	1400
0,03	0	0,03	0,05	4200	0	5600	1400
0,04	0,01	0,03	0,05	4800	400	5600	1400
0,05	0,02	0,03	0,05	5000	600	5800	1400

Informações armazenados em  $T-2$ :

$x_k$	$u_k$	$x_{k+1}$	$Q_k$	$c(x_k)$	$f(u_k)$	$F(x_k)$	$F(x_{k+1})$
0	0	0	0,05	0	0	0	0
0,01	0	0,01	0,05	1800	0	3000	1200
0,02	0	0,02	0,05	3200	0	4600	1400
0,03	0	0,03	0,05	4200	0	5600	1400
0,04	0,02	0,02	0,05	4800	600	5600	1400
0,05	0,02	0,03	0,05	5000	600	5800	1400

Caso o arco  $T-2$  fosse o primeiro arco da rede, o diagrama de estados com a trajetória ótima seriam os representados na Figura 5.13:

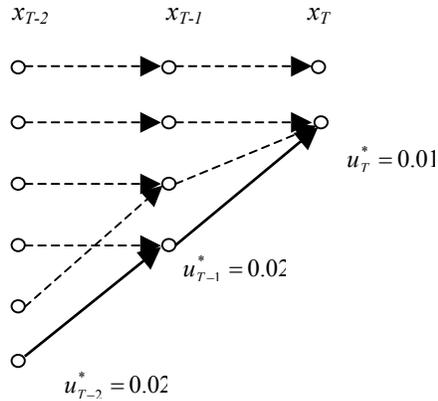


Figura 5.13: Diagrama de estados da rede com a trajetória ótima.

Para encontrar a solução ótima, utiliza-se a equação (5.14). Para se construir a trajetória ótima, usa-se recursivamente a equação (5.15). A figura mostra a configuração ótima de capacitores para os três nós da rede, obtida da seguinte forma:

Para  $T-2$ :

$$x_{T-2}^* = \arg\{\max F(x_{T-2})\}$$

$$x_{T-2}^* = 0.05 \rightarrow u_{T-2}^* = 0.02$$

Para  $T-1$ :

$$x_{T-1}^* = x_{T-2}^* - u_{T-2}^*$$

$$x_{T-1}^* = 0.03 \rightarrow u_{T-1}^* = 0.02$$

Para  $T$ :

$$x_T^* = x_{T-1}^* - u_{T-1}^*$$

$$x_T^* = 0.01 \rightarrow u_T^* = 0.01$$

No exemplo, pode-se observar que a restrição nos fluxos por arco ( $x_k \leq Q_k$ ) limita o crescimento no número de estados.

O próximo Capítulo aborda o estudo de dois métodos para o controle de reativos nas redes de distribuição, com demandas variáveis no tempo.

# Capítulo 6

## Controle de reativos

Outro aspecto importante na redução de perdas em redes de energia elétrica por injeção de reativos é a solução do problema de controle de capacitores (PCC). O problema pressupõe que os capacitores já estão instalados na rede de distribuição e que pelo menos alguns deles têm possibilidade de operar em diferentes pontos de operação (injetando diferentes níveis de reativos). Como já foi mencionado no Capítulo 2, onde é descrito o problema de controle de capacitores, seu objetivo é diminuir as perdas de energia na rede por modificação dos níveis de potências reativas entregues pelos capacitores instalados, quando uma mudança significativa no perfil das cargas é detectada.

Neste capítulo serão descritos dois métodos para tratar o problema de controle de reativos. O primeiro método é desenvolvido a partir da área de computação evolutiva denominada Sistemas Classificadores. A segunda abordagem é baseada em Programação Dinâmica, usando conceitos desenvolvidos no Capítulo 5.

## 6.1 Breve introdução a Sistemas Classificadores

Os Sistemas Classificadores (LCS) são sistemas complexos adaptativos propostos pela primeira vez por Holland (Holland, 1975). Em linhas gerais são metodologias para manter e evoluir um conjunto de regras, chamadas *classificadores*, adequando-as a ambientes variantes no tempo. Entende-se por ambiente um problema do mundo real, geralmente de controle, identificação ou otimização, como representado na (Figura 6.1).

Cada classificador tem duas partes, chamadas de *antecedente* e *conseqüente*. Associa-se a cada classificador, uma energia (*fitness, strength*), usada pelo sistema classificador para avaliar sua adaptação ao ambiente. A energia de um classificador pode ser interpretada como um resumo do histórico do seu comportamento.

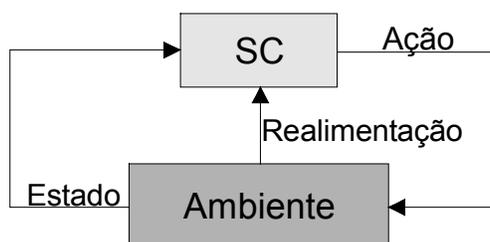


Figura 6.1: Sistema classificador interagindo com o ambiente.

O antecedente do classificador é associado às condições do ambiente nas quais o classificador pode ser ativado. O conseqüente caracteriza a decisão a ser tomada, se ele for selecionado para atuação. Os antecedentes dos classificadores são utilizados para identificação com as mensagens do ambiente, geralmente são compostos por vetores de elementos do alfabeto ternário  $\{\#, 1, 0\}$ , para representar o estado do ambiente com o qual ele vai se identificar. O caractere “#” (don't care na literatura em inglês) pode ser associado com “ $\{0, 1\}$ ” na mensagem do ambiente. Por outro lado, os caracteres “0” e “1” podem ser associados somente com caracteres idênticos na mensagem.

Um Sistema Classificador (Figura 6.2) comunica-se com o ambiente através da troca de mensagens, usando *detectores* (sensores) e *atuadores* (executores). Os detectores recebem e

decodificam as *mensagens* advindas do ambiente, que devem retratar seu estado, os atuadores decodificam a ação proposta pelo Sistema Classificador para ser aplicada sobre o ambiente. Esses aspectos estão ilustrados na Figura 6.2.

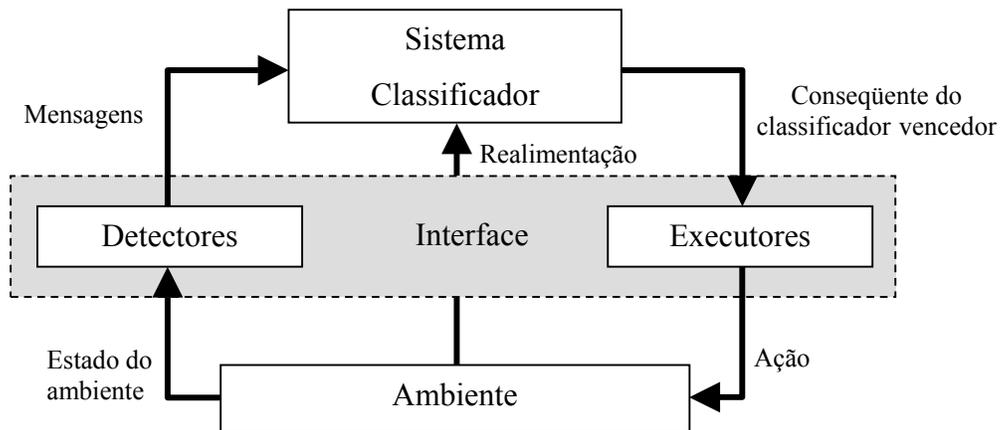


Figura 6.2: Sistema classificador interagindo com o ambiente através da interface.

O conjunto de classificadores "*aprende*" quais ações são apropriadas para ser tomadas a cada momento, usando um algoritmo de *apropriação de crédito*. Baseado em uma *realimentação* recebida do ambiente, o algoritmo reforça a energia dos classificadores que realizam "boas ações" e debilita aqueles com atuações ruins.

A realimentação recebida do ambiente define a *recompensa* para o classificador ativo (podem ser vários). A recompensa está relacionada diretamente com a função objetivo do problema. Se forem obtidos bons resultados (melhorou a função objetivo), uma boa recompensa é atribuída ao classificador ativo, aumentando sua energia; caso contrario, se os resultados são ruins, o sistema punirá o classificador ativo, diminuindo sua energia (recompensa negativa).

Muitos tipos de sistemas classificadores têm sido desenvolvidos nos últimos anos, mas podemos distinguir dois mais populares: Sistemas Classificadores Baseados na Energia e os Sistemas Classificadores Baseados em Precisão (*Strength Based Classifier Systems (SB-LCS) and Accuracy Based Classifier Systems (XCS)*) - este último, foi proposto por Wilson

(Wilson, 1995). A principal diferença entre as duas variantes é que nos SB-LCS o *fitness* do classificador depende da magnitude da recompensa que recebe pela sua atuação sobre o ambiente e, nos XCS, o *fitness* de cada classificador é baseado na precisão da predição da recompensa que receberá do ambiente (Wilson, 1995).

Para aplicar os SC ao problema de minimização das perdas em redes de distribuição de energia elétrica, controlando a configuração dos capacitores instalados, propõe-se um Sistema Classificador baseado na energia (SB-LCS). A motivação para a escolha desta alternativa foi o fato de um SC com as mesmas características ter sido usado com sucesso para minimizar perdas de energia em uma rede de distribuição, através de reconfigurações da rede (Vargas, 2000).

## **6.2 Sistemas Classificadores aplicados ao Controle de Reativos**

Para controlar os reativos capacitivos na rede de distribuição o Sistema Classificador deverá ser capaz de apontar qual configuração de chaveamento dos capacitores é a mais adequada, para um determinado perfil de carga (Figura 2.5). Em outras palavras, o objetivo do problema é encontrar um conjunto de classificadores cujas ações reduzam as perdas para um determinado perfil de carga. Para isso, usa-se um algoritmo de reforço no "*aprendizado*" que, combinado com um algoritmo genético (AG), determina quais classificadores estarão presentes e ausentes da população para um perfil de carga  $D_\lambda$  - em sistemas classificadores do tipo SB-LCS, a generalização das regras é feita através do algoritmo genético.

Para o controle de reativos através de sistemas classificadores, supõe-se conhecidos todos os dados da rede, incluindo a sua topologia, lugares e capacidades dos capacitores instalados. A seguir, descreveremos a interface do sistema classificador com a rede de distribuição e a implementação do mesmo.

## 6.2.1 Interface

O Sistema Classificador comunica-se com o ambiente (modelo da rede de distribuição) através da *interface* (Figura 6.3). Esta interface está formada por detectores, executores e a realimentação.

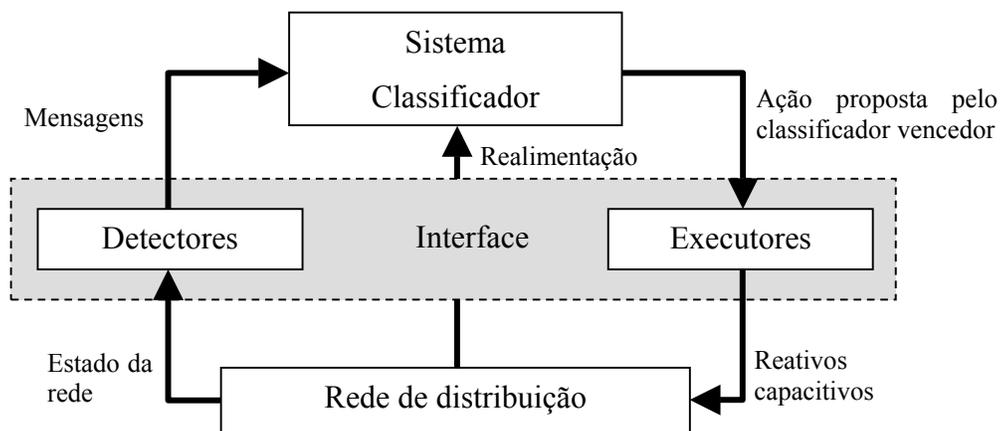


Figura 6.3: Sistema classificador com sua interface.

### 6.2.1.1 Detectores

O Sistema Classificador deve receber informação sobre os fluxos de potência nos arcos da rede, para, usando essa informação, avaliar o estado da rede - os fluxos de potências ativas e reativas nos arcos são funções do perfil de demanda nos nós da rede.

Os detectores devem receber a informação do estado da rede e codificar essa informação em uma mensagem que possa ser interpretada pelo Sistema Classificador. Portanto, a informação recolhida pelos sensores do SC deve ser convertida de um valor real para um valor binário (pela natureza do antecedente); o número de bits adotado para a representação binária define a *sensibilidade* do sistema às mudanças nos fluxos de potências na rede.

Se a mensagem elaborada pelos detectores contivesse a codificação das potências reativas de todos os arcos da rede e são usados  $k$  bits por arco, o vetor binário resultante para uma rede  $n$  arcos teria um tamanho igual a  $kn$ . Mesmo para, redes de tamanho pequeno teríamos um vetor relativamente grande; por exemplo, para uma rede de 100 arcos e 8 níveis de codificação (usando 3 bits), teríamos uma mensagem de 300 bits.

A codificação usada no presente trabalho não propõe a codificação dos fluxos de reativos em todos os arcos, em vez disso, é usada uma codificação que utiliza apenas os fluxos nos arcos em cujos nós destinos estão instalados capacitores. A motivação para essa escolha pode ser observada no exemplo representado na Figura 6.4. De fato é fácil verificar no exemplo que a codificação dos fluxos nos arcos 6 e 7 não traria informações relevantes para a decisão sobre os níveis de reativos injetados pelo capacitor no nó 5. De forma análoga, decisões sobre reativos injetados no nó 2, precisam apenas de informações sobre os fluxos de reativos no arco 2.

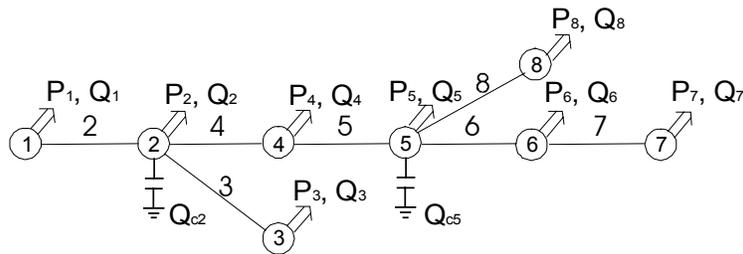


Figura 6.4: Diagrama simplificado de uma rede de distribuição.

Se  $m$  é o número de capacitores instalados e  $k$  o número de bits usados para codificar a mensagem, com a codificação adotada teremos um vetor de bits com comprimento  $km$ . Como, tipicamente, o número de capacitores instalados em uma rede é muito menor que os nós da rede ( $m \ll n$ ), o tamanho da mensagem é muito menor da que teríamos com uma codificação completa (i.e., para todos os arcos da rede).

### 6.2.1.2 Codificação da mensagem

Para codificar a mensagem usam-se neste trabalho 4 bits, o que permite a codificação de até 16 níveis de reativos nos arcos. O vetor da mensagem, neste caso, tem um comprimento igual a  $4m$ . Por exemplo, para a rede da Figura 6.4, a mensagem teria um comprimento de 8 bits porque ela tem 2 capacitores instalados. Supondo que o fluxo de reativos máximo admitido por cada arco é conhecido (a demanda máxima por nó é conhecida) é possível dividir a informação em 16 níveis diferentes desde  $q_{max}/16$  até  $q_{max}$ .

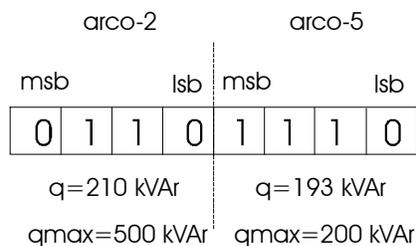


Figura 6.5: Exemplo de codificação da mensagem para a rede na Figura 6.4.

Pode-se observar na Figura 6.5 a representação binária dos fluxos de reativos nos arcos 2 e 5 da rede da Figura 6.4. Neste exemplo, foi suposto que, para uma determinada demanda, os fluxos de reativos nos arcos 2 e 5 são iguais a 210 kVAr e 193 kVAr. Adotou-se também a hipótese de que os valores máximos para os fluxos são 500 kVAr e 200 kVAr, respectivamente.

### 6.2.1.3 Codificação dos classificadores

Os classificadores são formados pelo antecedente, que representa a *regra*, e o conseqüente, que representa a *ação*.

O antecedente deve ter uma estrutura que lhe permita ser comparado à mensagem. Portanto, estará representado por um vetor de tamanho igual a quatro vezes o número de capacitores instalados - cada bit do vetor estará ocupada por um dos símbolos {#, 0, 1}.

#	1	#	0	#	#	#	#	300	100
---	---	---	---	---	---	---	---	-----	-----

Figura 6.6: Codificação de um classificador para o problema

Uma característica importante de cada classificador é a sua especificidade que é dada pelo número de “#s” no antecedente - a especificidade caracteriza a capacidade de generalização do classificador.

A parte conseqüente ou ação do classificador é um vetor real de tamanho igual ao número de capacitores instalados na rede. Cada componente do vetor indica o valor de injeção de reativos proposto para um determinado capacitor. A Figura 6.6 mostra a estrutura de um classificador para a rede da Figura 6.4.

Pode-se observar que o antecedente do classificador da Figura 6.6 se ajusta ao estado do ambiente representado pela mensagem da Figura 6.5. Caso este classificador seja ativado, os pontos de operação indicados para os capacitores serão C2=300kVAr e C5=100kVAr.

#### **6.2.1.4 Executores**

Quando o classificador ganhador é selecionado pelo subsistema de tratamento de regras e mensagens, os executores do Sistema Classificador são responsáveis pela decodificação e aplicação na rede da ação proposta.

### **6.2.1.5 Realimentação**

Após a aplicação da ação proposta pelo classificador ativo, a interface calcula os fluxos e as perdas na rede de distribuição. O valor das perdas é transmitido, como realimentação, para o Sistema Classificador.

### **6.2.2 Descrição da implementação do algoritmo**

O Sistema Classificador inicializa as estruturas de dados que representam a rede de distribuição, cria a população inicial de classificadores e estabelece os parâmetros internos do classificador no programa principal. Após a inicialização, é executado o algoritmo Sistema Classificador para o perfil de carga atual. O pseudocódigo do programa principal é ilustrado na Figura 6.7. A seguir, faremos uma breve descrição do algoritmo principal do Sistema Classificador (SC), executado no Passo 3 da Figura 6.7.

- 1- Inicializar as estruturas de dados, ler a rede, localizar os capacitores instalados.
- 2- Inicializar o SC, criar população inicial de classificadores aleatoriamente e inicializar parâmetros.
- 3- Executar o algoritmo principal do SC.

Figura 6.7: Programa principal do Sistema Classificador implementado.

Para um determinado perfil de demanda  $D_\lambda$ , são calculados os fluxos de reativos que passam por cada arco da rede. A partir do fluxo de reativos nos arcos de interesse é codificada a mensagem que vai ser transmitida ao subsistema de tratamento de regras e mensagens. A partir da mensagem, o SC forma o conjunto  $[M]$  de classificadores cujos antecedentes se ajustam à mensagem. A Figura 6.8 mostra o algoritmo simplificado do Sistema Classificador.

## Algoritmo principal do SC

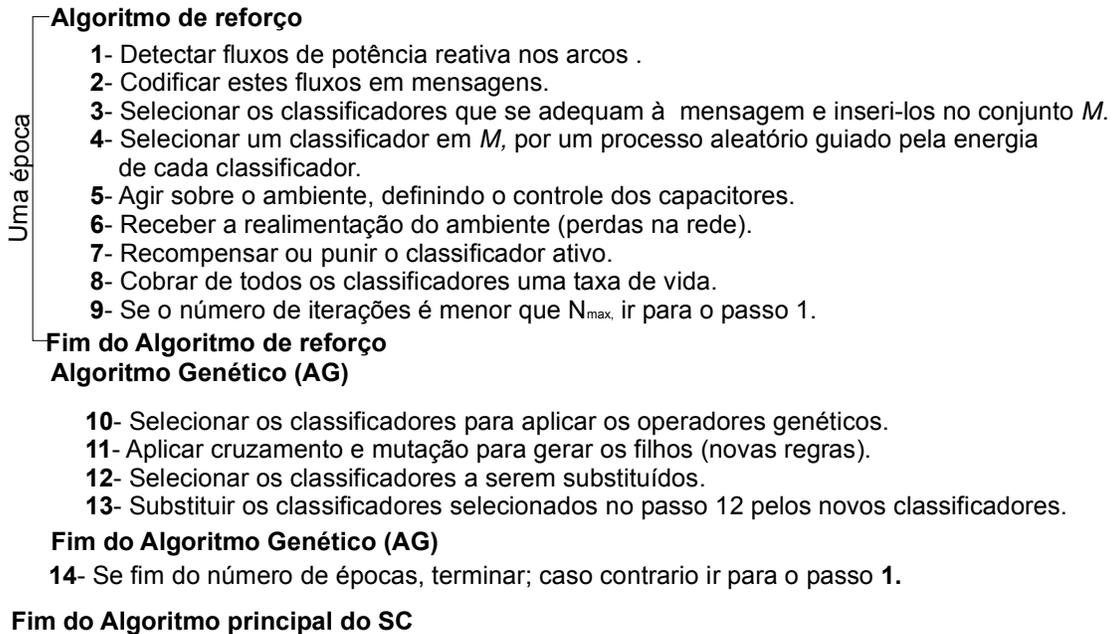


Figura 6.8: Algoritmo simplificado do SC.

Os classificadores selecionados participam de uma competição para ganhar o direito de agir sobre os capacitores da rede. A competição é realizada através de um algoritmo de apropriação de crédito, que atribui mais chances de ganhar para os classificadores melhor adaptados (de maior energia) ao perfil de carga  $D_\lambda$ . No algoritmo de apropriação de crédito são calculados vários parâmetros (Richards, 1995), entre os quais se destacam:

- A especificidade (*spec*), que representa a capacidade de generalização do classificador;
- O *bid*, que estabelece uma relação entre a *energia* e a *spec* do classificador;
- O bid efetivo (*ebid*), que determina o classificador ganhador da competição; para encontra-lo, acrescenta-se um ruído gaussiano modulado ao *bid*, agregando aleatoriedade à competição.

Informação detalhada sobre o cálculo desses parâmetros podem ser encontrada no Apêndice A.

O classificador com maior valor de *ebid* é escolhido como ganhador. O classificador vencedor ganha o direito de agir sobre os capacitores instalados na rede, modificando o chaveamento dos mesmos e, conseqüentemente, as perdas na rede; cobra-se do classificador vencedor uma taxa (em termos de sua energia), pelo “direito” de atuar sobre o ambiente. A realimentação para o Sistema Classificador é o novo valor das perdas na rede; usa-se o valor das perdas *antes* e *depois* da atuação do classificador, o Sistema Classificador atribui a recompensa adequada, especificada na equação (6.1).

$$R_t = k_r (P_{t-1} - P_t) \quad (6.1)$$

Onde:

$k_r$  é uma constante positiva e menor que 1 ( $0 < k_r < 1$ );

$P_{t-1}$  é o valor das perdas na iteração  $t-1$ ;

$P_t$  é o valor das perdas na iteração  $t$ ;

$R_t$  é o valor da recompensa.

Quando acontece diminuição das perdas a recompensa é positiva, provocando um aumento da energia do classificador ganhador. Caso contrário, se o valor das perdas aumenta, haverá uma redução da energia do classificador.

No final do algoritmo de reforço, uma taxa de vida é cobrada de todos os classificadores da população. O processo continua até completar  $n$  iterações (época). Após cada época, alguns classificadores estão melhor adaptados e outros menos adaptados, na população de classificadores. Inicia-se, então, o processo de descoberta de novas regras.

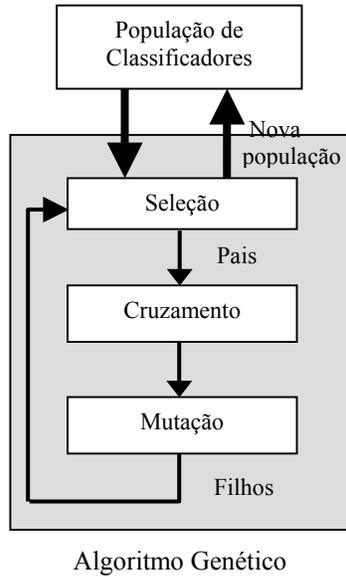


Figura 6.10: Diagrama simplificado do algoritmo genético.

A descoberta de novas regras é feita através de um *Algoritmo Genético* (AG) como ilustrado na Figura 6.10. O Algoritmo Genético aplica *operadores* (seleção, cruzamento e mutação) sobre um determinado número de classificadores, para gerar *novos classificadores* que serão inseridos na população, substituindo os menos adaptados.

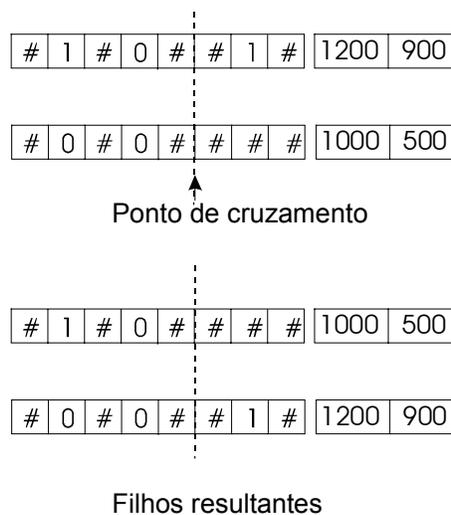


Figura 6.11: Cruzamento de um ponto.

No Algoritmo Genético são selecionados  $k$  classificadores, usando-se o método da roleta (*Roulette Wheel*). Existe uma maior probabilidade de seleção para classificadores melhor adaptados (com mais alto valor de energia). Com os classificadores selecionados (*pais*) é

realizado um *cruzamento* de um ponto, como ilustrado na Figura 6.11. Desse cruzamento, são obtidos novos classificadores (*filhos*).

Após o cruzamento, é aplicado um operador de *mutação* sobre os antecedentes ou os conseqüentes de classificadores selecionados, segundo uma probabilidade de mutação predefinida. Quando a mutação acontece no antecedente, troca-se o alelo escolhido por um entre os dois outros do conjunto ternário  $\{\#, 0, 1\}$ , com probabilidade de 50% para cada um. A mutação no conseqüente corresponde a soma ou subtração (aleatoria) de um passo de controle no capacitor selecionado, tomando o cuidado de não ultrapassar os limites do capacitor.

Os novos classificadores gerados, por cruzamento e mutação, substituem os classificadores menos adaptados (i.e., com menor energia), selecionados para sair da população por um processo aleatório de roleta ponderada.

O algoritmo principal do Sistema Classificador termina quando são completadas  $m$  épocas. Após  $m$  épocas com um determinado perfil de carga, existe um conjunto de classificadores especializados para esse perfil. O Sistema Classificador fica *inativo* até ser detectada alguma mudança significativa no perfil de cargas da rede.

A cada mudança no perfil de demanda o Sistema Classificador indicará novas configurações para o chaveamento dos capacitores, modificando as perdas na rede de distribuição.

### **6.3 Controle de Reativos usando Programação Dinâmica**

No Capítulo anterior, uma abordagem baseada em programação dinâmica foi implementada para encontrar a solução ótima do problema de localização de capacitores (PLC). Este item desenvolve a especialização dessas idéias para a abordagem do problema de controle.

Para controlar o chaveamento de capacitores instalados (PCC), é necessário mudar o ponto de operação dos capacitores ao perceber uma mudança *significativa* no perfil de carga da rede. A mudança no perfil de cargas torna inadequado o ajuste dos capacitores, provocando um aumento dos fluxos de potências reativas pelos arcos da rede e, como consequência, o aumento das perdas.

Na metodologia de abordagem por programação dinâmica, as variáveis de controle a cada estágio são conhecidas a priori (os capacitores já estão instalados). Portanto, o número de estados a serem considerados é menor do que no problema de alocação de capacitores. A abordagem proposta minimiza as perdas na rede, explorando somente o *espaço de busca* formado pelos nós da rede com capacitores alocados.

Considerando-se o problema de controle de capacitores (equação 2.17) apresentado na Seção 2.4, a abordagem por programação dinâmica pode ser vista como uma versão simplificada da abordagem do problema de alocação de capacitores.

A função objetivo do problema é a minimização das perdas na rede de distribuição. Portanto, a função de retorno  $\varphi_k$  para um arco  $k$  são as perdas para esse arco, como ilustrado na equação 6.2.

$$\varphi_k(u_k) = p_k \quad (6.2)$$

Onde  $p_k$  representa as perdas em um arco  $k$  da rede.

Para cada nó da rede onde existe um capacitor instalado, os estados  $x_k$  são obtidos por combinação dos estados anteriores  $x_{k+1}$  com os possíveis pontos de operação ( $u_k^i$ ) do capacitor alocado no nó  $k$  – naturalmente, são também consideradas as restrições do problema.

$$\begin{aligned} x_k &= x_{k+1} + u_k^i \\ 0 &\leq u_k^i \leq u_k^0 \end{aligned} \quad (6.3)$$

Caso não exista nenhum capacitor instalado em  $k$ , o estado  $x_k$  é igual ao estado na etapa anterior ( $x_{k+1}$ ):

$$x_k = x_{k+1} \quad (6.4)$$

A equação recursiva de otimalidade pode ser caracterizada na forma a seguir:

$$F_k(x_k) = \min_{u_k^i} \{ \varphi_k(u_k^i) + F_{k+1}(x_{k+1}) \} \quad (6.5)$$

A solução ótima ( $u_k^*$ ) é obtida pela recuperação da trajetória a partir do estado  $x_0$ , usando as equações (6.6) e (6.7):

$$x_0^* = \arg\{\min[F_0(x_0)]\} \quad (6.6)$$

$$x_{k+1}^* = x_k^* - u_k^* \quad (6.7)$$

Um diagrama em blocos simplificado da implementação é apresentado na Fig. 6.11, onde estão destacados os principais blocos do programa, descritos a seguir.

1. **Inicialização.** Na inicialização é realizada a leitura dos dados da rede, do perfil de cargas e do conjunto de capacitores disponíveis para controle de reativos. A partir desses dados, são construídas as estruturas do grafo associado à rede.
2. **Alimentadores.** Determina o número  $n$  de alimentadores da rede, assim como os nós onde começam os alimentadores.
3. **Capacitores.** Caracteriza os capacitores instalados e as características de cada um deles.

4. **Programação Dinâmica.** O algoritmo de PD realiza o processo de otimização, determinando o chaveamento dos capacitores em cada alimentador.

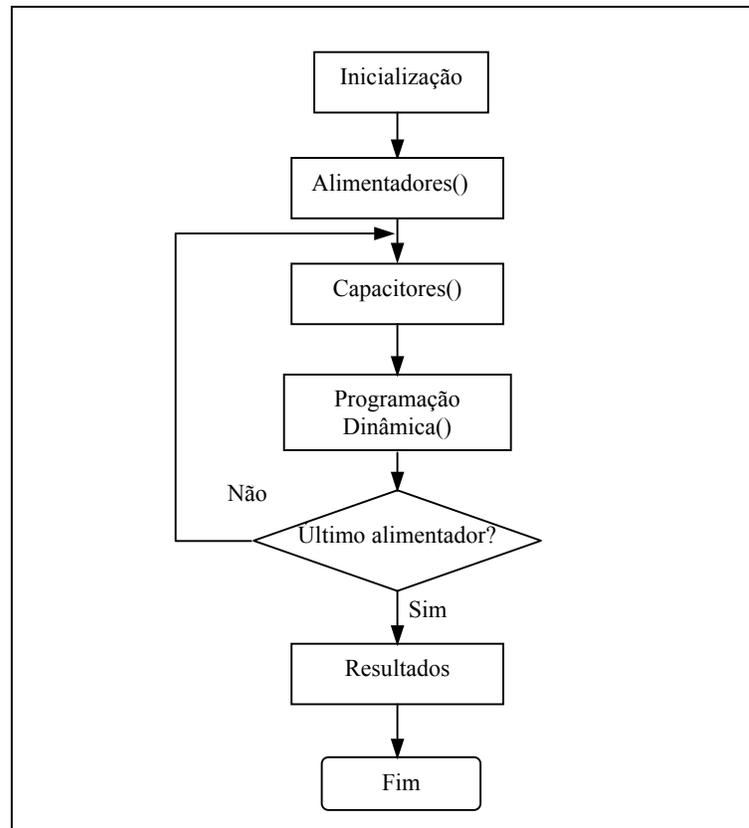


Figura 6.12. Fluxograma do algoritmo para controle de capacitores.

A metodologia desenvolvida permite achar a solução ótima do problema em um tempo computacional pequeno, como veremos no capítulo de estudos de casos.

# Capítulo 7

## Estudo de casos

As abordagens desenvolvidas neste trabalho para resolver os problemas de localização e controle de capacitores, foram submetidas a testes computacionais cujos resultados serão mostrados neste Capítulo.

Para os testes computacionais foram utilizadas 4 instâncias pequenas (b09, b34, b70 e b135) utilizadas em Grainger e Lee (1982) que representam redes de 10, 35, 70 e 135 barras respectivamente, também foram feitos testes para duas redes de grande porte (b1596 e b2448) com 1596 e 2448 barras respectivamente.

Inicialmente o método por programação dinâmica é aplicado para o problema de localização de capacitores em dois cenários: perfil com carga fixa e perfil de carga variável.

Depois são apresentados os estudos realizados com o sistema classificador e programação dinâmica para o controle de reativos, para 4 instâncias: b34, b70, b1596 e b2448.

## **7.1 Resultados para o Problema de Localização de Capacitores por Programação Dinâmica**

Dois tipos de testes computacionais foram realizados para comprovar o desempenho do algoritmo de programação dinâmica proposto neste trabalho.

Para os testes usou-se o compilador *Borland C++ 5.5* rodando em um computador P4-2.2 GHz com sistema operacional Windows 2000™.

### **7.1.1 Perfil com demanda fixa**

No estudo utilizando demanda fixa na rede usa-se a seguinte função objetivo:

$$f = \min \left\{ k_e TP + k_c \sum_{k \in \mathcal{N}} Q_{ck} \right\} \quad (7.1)$$

Onde,

$k_e$  - Custo do *kwh* (R\$), considerado fixo para todo o horizonte de estudo.

$T$  - Tempo no qual a rede permanece no perfil de carga (*horas*).

$P$  - Perdas na rede para uma determinada demanda (*kw*).

$k_c$  - Custo do *kVAr* instalado (R\$).

$Q_{ck}$  - Capacidade instalada no nó  $k$  (*kVAr*).

Para rodar os testes foram usados os seguintes valores para as constantes na função objetivo:  $k_e = 0,08RS/kwh$ ,  $k_c = 5,00RS/kVAr$ ; o período de estudo foi de um ano ( $T = 8760 horas$ ), os bancos de capacitores a instalar são fixos e com capacidade de 150, 300, 450, 600, 900 e 1200  $kVAr$ , só poderá ser instalado um banco por nó da rede.

B09	
Nó	Capacidade instalada (kVAr)
5	900
6	600
7	150
9	150
10	150
Total	1950

B34			
Nó	Capacidade instalada (kVAr)	Nó	Capacidade instalada (kVAr)
8	150	22	150
9	150	23	150
11	150	24	150
18	150	25	150
19	150	26	150
20	150	31	150
21	150	Total	1950

B70	
Nó	Capacidade instalada (kVAr)
12	150
13	150
19	150
62	900
65	150
Total	1500

B135			
Nó	Capacidade instalada (kVAr)	Nó	Capacidade instalada (kVAr)
17	150	130	150
20	150	144	150
39	150	155	450
42	150	156	150
44	150	157	150
69	150	158	150
87	150	220	150
128	150	221	150
		Total	2700

Figura 7.1. Tabelas mostrando a alocação de bancos de capacitores por instâncias.

As tabelas da Figura 7.1 apresentam a distribuição de capacitores em cada uma das instâncias e o total de reativos capacitivos instalados.

Instância	Custo inicial $v_0$ (R\$)	Custo final $v$ (R\$)	Capacidade instalada (kVAr)	Redução nos custos(%)
B09	426039	412345	1950	3,21
B34	142123	114180	1950	19,66
B70	134217	92196	1500	31,31
B135	208337	200349	2700	3,83

Tabela 7.1. Resultados econômicos da alocação de capacitores nas 4 primeiras instâncias.

A Tabela 7.1 apresenta uma comparação entre o custo inicial das perdas em um ano, e o custo após a otimização.

B1596		B2448			
Nó	Capacidade instalada (kVAr)	Nó	Capacidade instalada (kVAr)	Nó	Capacidade instalada (kVAr)
198	600	116	150	1080	1200
219	150	163	150	1121	150
241	150	346	450	1291	150
273	150	377	150	1330	150
440	150	405	150	1373	150
456	150	428	150	1414	150
470	150	484	300	1417	150
508	300	487	1200	1595	150
509	150	520	150	1628	150
530	150	740	150	1732	150
575	150	761	150	1747	150
682	150	828	150	1770	150
701	600	844	150	1816	300
922	300	845	150	1824	150
955	150	865	300	2121	150
Total	3450	875	150	2123	150
				Total	7800

Figura 7.2. Tabelas que representam a alocação dos bancos de capacitores nas instâncias b1596 e b2448.

Instância	Custo inicial $v_0$ (R\$)	Custo final $v$ (R\$)	Capacidade instalada (kVAr)	Redução nos custos(%)
B1596	309994	288772	3450	6,84
B2448	708623	595322	7800	16

Tabela 7.2. Resultados econômicos da alocação de capacitores nas instâncias b1596 e b2448.

Para as redes representadas pelas instâncias b1596 e b2448, embora a redução porcentual dos custos seja semelhante às alcançadas nas redes representadas na Tabela 7.1, a redução em termos absolutos é significativa, já que se tratam de redes reais de porte grande.

### 7.1.2 Demandas variáveis

Para a rede submetida a variações uniformes da demanda nas barras, a seguinte função objetivo foi utilizada:

$$f = \min \left\{ k_e \sum_{i=1}^n \lambda_i^2 T_i P + k_c \sum_{k \in \mathcal{N}} Q_{ck} \right\} \quad (7.2)$$

Onde,

$k_e$  - Custo do *kwh* (R\$), considerado fixo para todo o horizonte de estudo.

$\lambda_i$  - Parâmetro do perfil de demanda *i*.

$T_i$  - Tempo no qual a rede permanece no perfil de demanda *i* (*horas*).

$P$  - Perdas na rede, em *kW*, para um perfil de referência dado.

$k_c$  - Custo do *kVAr* instalado (R\$).

$Q_{ck}$  - Capacidade instalada no nó *k* (*kVAr*).

Os valores adotados para  $k_e$  e  $k_c$  foram, respectivamente,  $k_e = 0,08RS/kwh$ ,  $k_c = 5,00RS/kVAr$ . O período de estudo foi de um ano, sendo  $T_0 = 1000$ ,  $T_1 = 6760$ ,  $T_2 = 1000$ . Os valores do parâmetro  $\lambda_i$  para os perfis de carga foram:  $\lambda_0 = 1$ ,  $\lambda_1 = 0.8$ ,  $\lambda_2 = 0.5$ . Os bancos de capacitores fixos a serem instalados, têm capacidade de 150, 300, 450, 600, 900 e 1200  $kVAr$ , e só poderá ser instalado um banco por nó da rede.

Os resultados obtidos com a realização do processo de otimização por PD estão apresentados nas Figuras 7.3 e 7.4 e nas Tabelas 7.3 e 7.4.

B09	
Nó	Capacidade instalada (kVAr)
5	450
6	450
7	150
9	150
10	150
Total	1350

B34	
Nó	Capacidade instalada (kVAr)
9	150
11	150
18	150
20	150
21	150
22	150
24	150
25	150
26	150
32	150
Total	1500

B135	
Nó	Capacidade instalada (kVAr)
20	150
42	150
69	150
130	150
144	150
155	150
156	150
157	150
158	150
221	150
Total	1500

B70	
Nó	Capacidade instalada (kVAr)
13	150
19	150
61	150
62	600
65	150
Total	1200

Figura 7.3. Tabelas mostrando a alocação de bancos de capacitores para perfis de carga variável.

Instância	Custo inicial $v_0$ (R\$)	Custo final $v$ (R\$)	Capacidade instalada (kVAr)	Redução nos custos(%)
B09	271206	264243	1350	2,57%
B34	90471,9	74703,4	1500	17,43%
B70	85437,6	59661,7	1200	30,17%
B135	132622	129451	1500	2,40%

Tabela 7.3. Resultados da alocação de capacitores para perfis de carga variável em 4 instâncias.

B1596		B2448			
Nó	Capacidade instalada (kVAr)	Nó	Capacidade instalada (kVAr)	Nó	Capacidade instalada (kVAr)
198	300	116	150	875	150
219	150	163	150	1080	900
241	150	346	300	1121	150
440	150	351	150	1373	150
456	150	386	150	1417	150
470	150	405	150	1595	150
530	150	428	150	1628	150
575	150	484	150	1732	150
682	150	487	900	1770	150
922	300	761	150	1816	300
Total	1800	828	150	2123	150
		865	300	Total	5400

Figura 7.4. Alocação de bancos de capacitores nas instâncias b1596 e 2448 para perfis de carga variável.

Instância	Custo inicial $v_0$ (R\$)	Custo final $v$ (R\$)	Capacidade instalada (kVAr)	Redução nos custos(%)
B1596	197335	186907	1800	5,28%
B2448	451092	386008	5400	14,43%

Tabela 7.4. Resultados econômicos da alocação de capacitores para perfis de carga variável para as instâncias 1596 e b2448.

É possível observar nestes resultados que na maioria dos casos, a economia resultante da instalação de capacitores é importante (geralmente entre 5 e 15%). Além disso, existem benefícios paralelos não tratados neste trabalho, como o melhoramento do perfil de tensão da rede.

A Tabela 7.5, a seguir., apresenta os tempos computacionais do algoritmo para todas as instâncias.

Instância	Tempo computacional (seg)
B09	0,015
B34	0,016
B70	0,016
B135	0,032
B1596	0,172
B2448	0,297

Tabela 7.5. Tempos computacionais da PD para alocação de capacitores.

Como pode ser observado na Tabela 7.5, o tempo computacional gasto pelo algoritmo para as 6 instâncias é muito pequeno, inclusive para redes de grande porte não ultrapassa um segundo.

## **7.2 Resultados para o Problema de Controle de Capacitores**

Para estudar o desempenho do sistema classificador e programação dinâmica no controle de capacitores, foram usadas 4 instâncias: b34, b70, b1596 e b2448.

Nos testes computacionais foram alocados capacitores de 300, 600, 900 e 1200 kVAr nas redes, na forma apresentada na Figura 7.5. Os capacitores foram instalados como fixos para um perfil de carga alta, usando programação dinâmica.

B34	
Nó	Capacidade instalada (kVAr)
8	300
10	300
17	300
19	300
21	300
23	300
25	300
Total	2100

B70	
Nó	Capacidade instalada (kVAr)
13	300
56	900
62	300
Total	1500

B2448			
Nó	Capacidade instalada (kVAr)	Nó	Capacidade instalada (kVAr)
265	300	1427	300
338	300	1435	300
376	300	1617	300
452	300	1760	300
485	300	1793	300
821	300	1804	300
844	300	2116	300
863	300	2263	1200
877	300	2291	300
1079	1200	2341	300
Total			7800

B1596	
Nó	Capacidade instalada (kVAr)
198	600
217	300
241	300
456	300
508	300
509	300
701	900
896	300
922	300
Total	3300

Figura 7.5. Distribuição dos capacitores variáveis nas instâncias.

Os dois algoritmos implementados supõem que o *tap* dos capacitores instalados é igual, em todos os capacitores, a 100 kVAr.

## 7.2.1 Sistemas classificadores

O sistema classificador implementado tem as características apresentadas no Capítulo 6. A função objetivo utilizada foi a mesma apresentada no Capítulo 2.

Ao sistema foram apresentados vários perfis de carga uniformes e variantes no tempo, com  $\lambda_0 = 1$ ,  $\lambda_1 = 0.8$ ,  $\lambda_2 = 0.4$  os quais chamaremos de I, II e III, respectivamente. A partir desses perfis foram construídos os seguintes cenários:

1. Os três perfis, sem mudanças, são apresentados com a mesma seqüência, duas vezes, como mostra a Figura 7.6.
2. Os três perfis são apresentados na mesma seqüência duas vezes, sendo que na segunda vez as cargas são moduladas por um ruído uniforme de 30% sobre o valor das mesmas; a Figura 7.7 ilustra o segundo cenário.

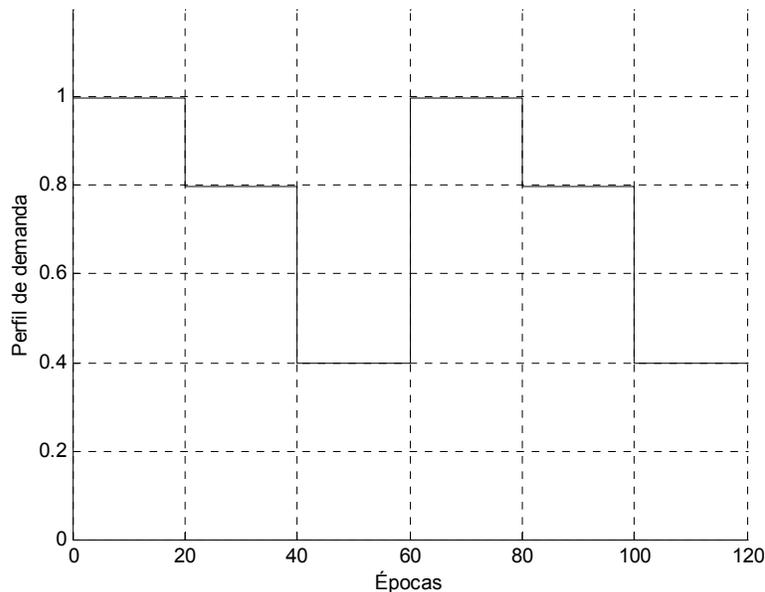


Figura 7.6. Gráfico representando o cenário 1.

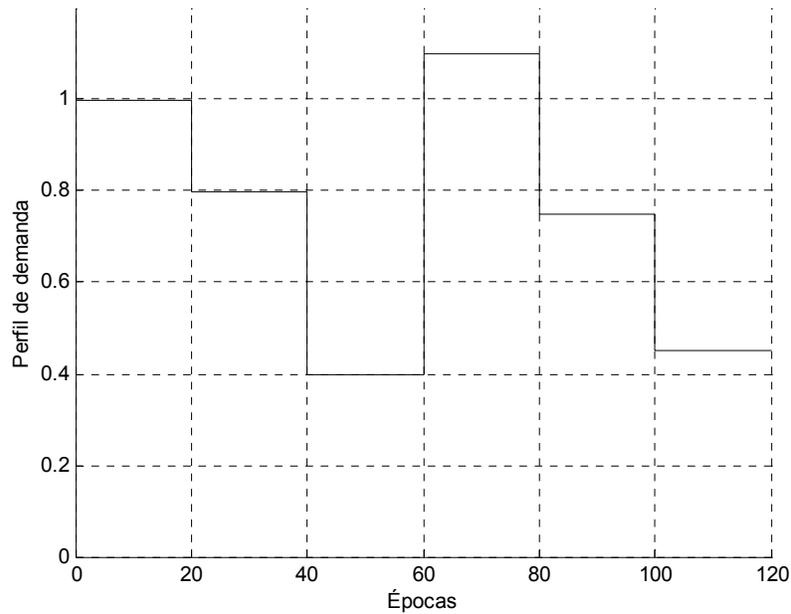


Figura 7.7. Gráfico representando o cenário 2.

Os valores dos parâmetros internos do sistema classificador foram determinados por avaliações empíricas. Esses valores estão representados na Tabela 7.6.

Parâmetro	Valor
$k_0$	0,3
$k_1$	0,1
$k_2$	0,05
$Spow$	2
$\sigma bid$	0,5
$Taxa bid$	0,05
$k_r$	0,1

Tabela 7.6. Valores dos parâmetros do sistema classificador.

O sistema tem uma população fixa de 50 classificadores inicializados aleatoriamente. A energia de cada classificador foi inicializada em 20 unidades.

Seguindo o algoritmo descrito no Capítulo 6, Figura 6.8, cada época está definida por 100 iterações. Cada perfil de demanda, nos dois cenários, estará presente por 20 épocas.

O algoritmo genético gera dois novos classificadores a cada época de iterações, com uma taxa de mutação igual a 0.2.

A Figura 7.8 apresenta, para a instância b34, as perdas da rede em cada iteração após a ação do sistema classificador, para o primeiro cenário.

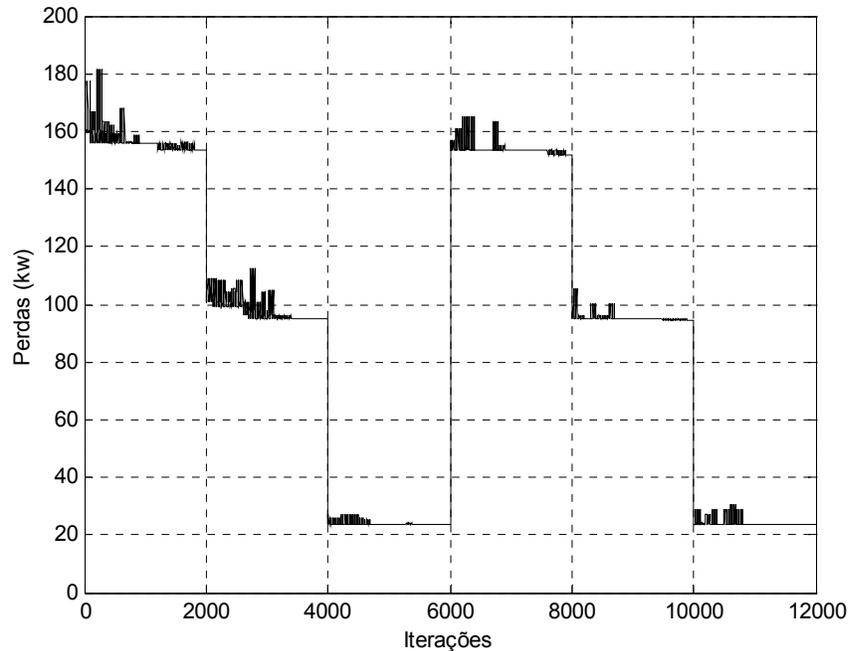


Figura 7.8. Comportamento das perdas na rede da instância b34 no cenário 1.

O sistema classificador está interagindo constantemente com o ambiente. Essa interação inclui a degradação no desempenho com a aplicação de determinados classificadores, como mostra a Figura 7.8, ou seja, nos momentos iniciais após mudanças nas demandas, o sistema classificador indica configurações que aumentam as perdas da rede. Essa degradação é importante para a evolução da população de classificadores no sistema.

Em uma primeira fase, após mudanças nas demandas, o sistema classificador está em um regime que poderia ser chamado de *transitório*, no qual os classificadores estão se *adaptando* ao novo perfil de carga apresentado. Nesse processo de *adaptação*, os classificadores que atuam sobre a rede e provocam aumento das perdas são punidos,

sofrendo um decréscimo significativo na energia. Em sentido oposto, os que conseguem diminuir as perdas são recompensados com um aumento da energia. Esse algoritmo de reforço, em conjunto com a criação de novos classificadores pelo algoritmo genético, faz com que ao final das 20 épocas de cada perfil, as perdas alcancem valores mais estáveis e de melhor qualidade; nessas situações, os classificadores melhores adaptados atuam sobre a rede.

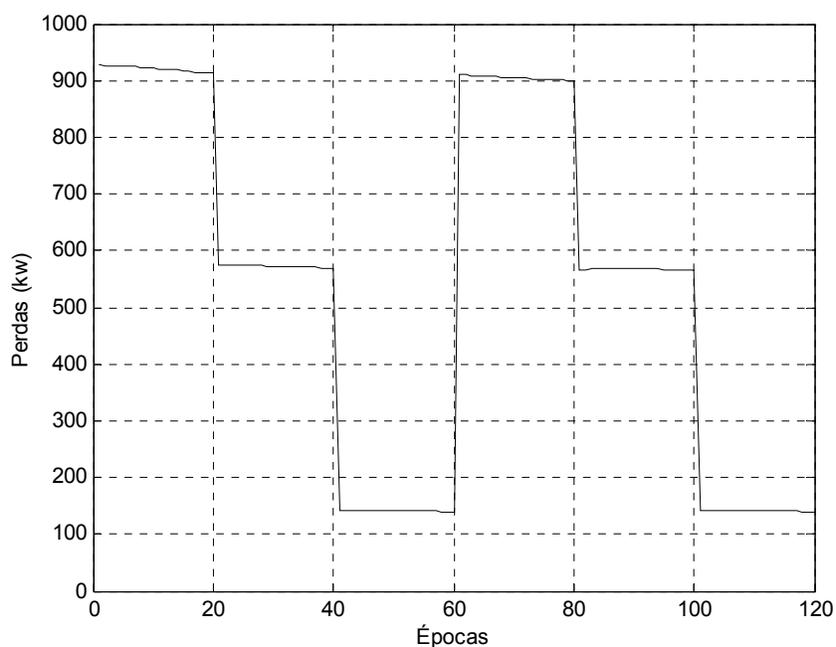


Figura 7.9. Comportamento da média das perdas da população de classificadores na rede da instância b34 no cenário 1.

Na Figura 7.9 pode-se observar a evolução da população de classificadores para cada perfil. Nota-se que a média das perdas decresce em cada perfil, como resultado da adaptação do conjunto de classificadores ao ambiente apresentado.

Perfil	Perdas iniciais (KW)	Perdas calculadas para o melhor classificador	Redução de perdas (%)
I	152,65	151,69	0,6
II	102,42	94,16	8,0
III	30,04	23,57	21,5

Tabela 7.7. Desempenho do Sistema classificador para o cenário 1.

A Tabela 7.7 apresenta o resultado (em perdas) alcançado pelo melhor indivíduo do sistema classificador, para cada perfil, em comparação com as perdas obtidas, com os capacitores fixos em seus valores máximos. Nota-se que o percentual de redução nas perdas aumenta a medida que diminuem as demandas na rede. Naturalmente, esse resultado não surpreende, já que os capacitores foram alocados para carga alta.

No segundo cenário, os perfis de demanda são expostos a perturbações aleatórias no segundo ciclo. A Figura 7.10 mostra o comportamento das perdas para a instância b34, a cada iteração.

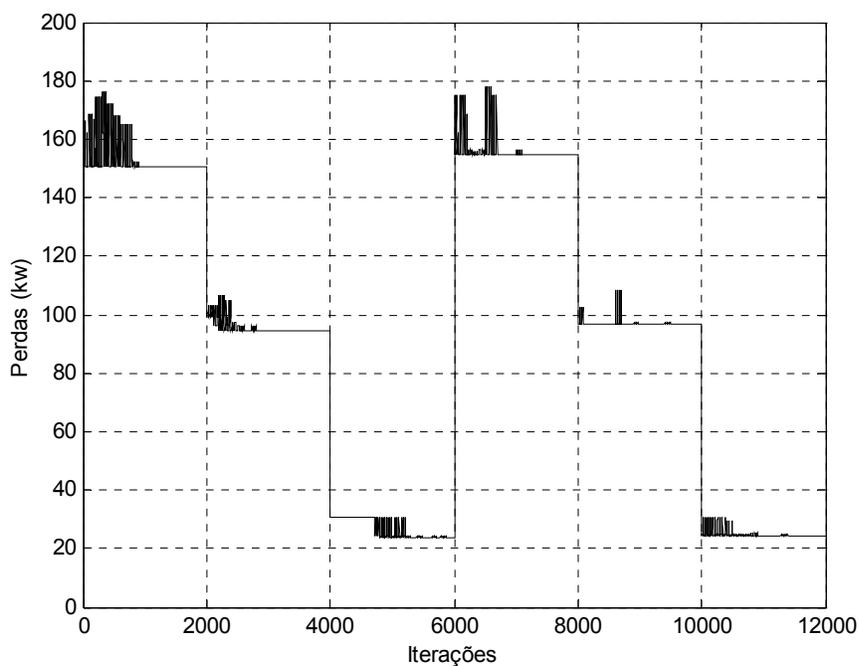


Figura 7.10. Comportamento das perdas na rede da instância b34 no cenário 2.

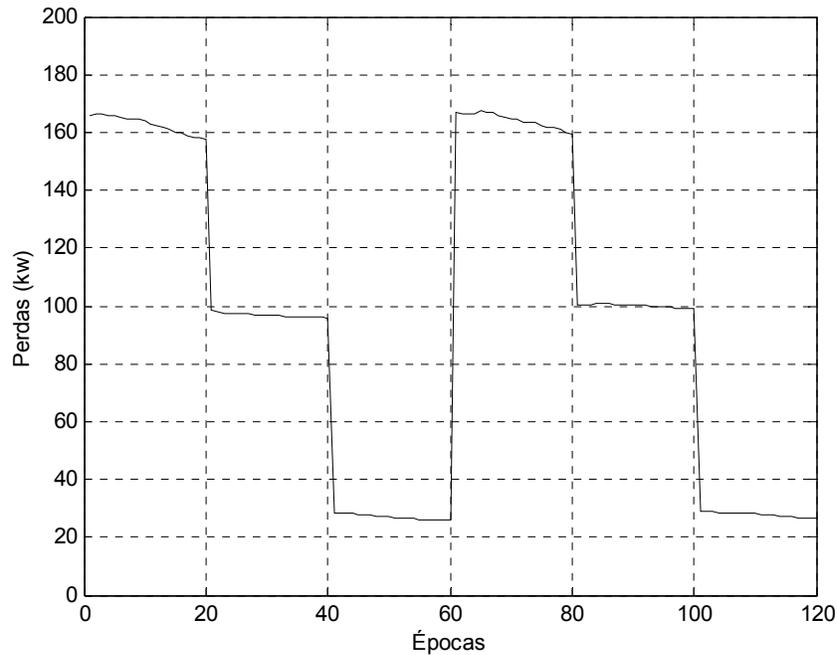


Figura 7.11. Comportamento da média das perdas da população de classificadores na rede da instância b34 no cenário 2.

Quando apresentado o cenário 2 (o segundo ciclo com demanda perturbada) o sistema classificador manteve um desempenho similar ao observado no cenário 1, tanto em relação as perdas do sistema como na média das perdas da população dos classificadores, apesar de encontrar no segundo ciclo perfis de carga perturbados por um ruído significativo. Esse teste mostra a flexibilidade dos sistemas classificadores para enfrentar ambientes expostos a variações, sem sofrer degradações no desempenho.

Os gráficos do desempenho do sistema classificador para as redes das instâncias b70, b1596 e b2448 são mostrados no Apêndice B.

A Tabela 7.8 apresenta os tempos computacionais do sistema classificador para as instâncias testadas.

Instância	Tempo computacional (seg)
B34	2,5
B70	2,8
B1596	104
B2448	220

Tabela 7.8. Tempos computacionais do sistema classificador para controle de capacitores no cenário 1 apresentado no Capítulo 7.

Observa-se que incluso para as instâncias maiores, o tempo computacional fica em torno dos quatro minutos.

É importante destacar que a degradação do valor das perdas durante o *transitório*, além de necessárias para o *treinamento* do sistema classificador, não prejudicaria o perfil das perdas na rede em uma aplicação em tempo real, já que uma configuração que aumente as perdas no alimentador não seria adotada.

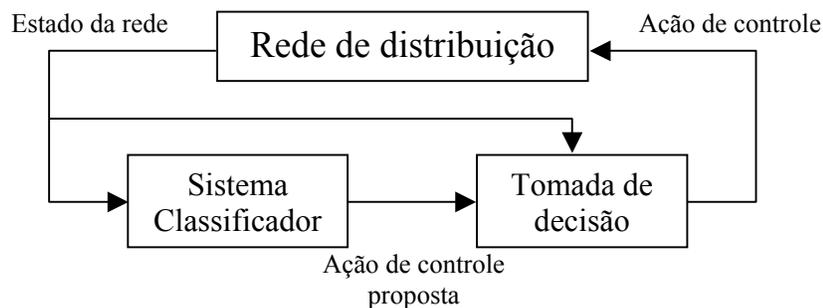


Figura 7.12. Controle dos reativos em uma rede de distribuição, através de um sistema classificador.

A Figura 7.12 mostra uma proposta da interface entre o sistema classificador e a rede real, na qual o classificador não atuaria diretamente sobre a rede (*on-line*), senão através de um algoritmo de tomada de decisão, que determinaria quando aplicar a ação proposta pelo sistema classificador. O algoritmo de tomada de decisão baseado em informações

sobre a dinâmica do sistema e da rede decidiria o momento de aplicar a ação de controle sobre a rede.

### 7.2.2 Programação Dinâmica

Para verificar o comportamento do algoritmo de programação dinâmica, discutido no Capítulo 6, no controle de capacitores, adotou-se a função objetivo descrita no Capítulo 2. Foram adotados os mesmos cenários utilizados nos testes com sistemas classificadores.

A solução apresentada pelo algoritmo para cada perfil de carga é ótima, porém o perfil de carga que vai ser apresentado à rede deve ser conhecido a priori.

Nas tabelas a seguir mostram-se os resultados do algoritmo para 4 instâncias: b34, b70, b1596 e b2448.

B34			
Nó	Capacidade		
	$\lambda_0=1,0$	$\lambda_1=0,8$	$\lambda_2=0,4$
8	300	300	100
10	300	300	200
17	300	300	200
19	300	300	100
21	300	200	100
23	300	300	100
25	300	300	200
Perdas (KW)	148,55	94,09	23,51

B70			
Nó	Capacidade		
	$\lambda_0=1,0$	$\lambda_1=0,8$	$\lambda_2=0,4$
13	300	300	200
56	300	200	0
62	900	900	500
Perdas (KW)	132,73	83,31	20,82

Figura 7.13. Configuração dos capacitores e perdas para cada perfil as instâncias b34 e b70.

Pode-se notar que, conforme a carga vai diminuindo, o *tap* dos capacitores tende a diminuir, acompanhando o nível de reativos da rede.

B1596			
Nó	Capacidade		
	$\lambda_0=1,0$	$\lambda_1=0,8$	$\lambda_2=0,4$
198	600	600	500
217	300	300	300
241	300	300	200
456	300	300	200
508	300	300	300
509	300	300	300
701	900	900	800
896	300	300	200
922	300	300	200
Perdas (KW)	390,14	245,42	59,15

B2448			
Nó	Capacidade		
	$\lambda_0=1,0$	$\lambda_1=0,8$	$\lambda_2=0,4$
265	300	300	100
338	300	300	200
376	300	300	100
452	300	300	200
485	300	300	300
821	300	300	200
844	300	300	200
863	300	300	100
877	300	300	100
1079	1200	1200	700
1427	300	300	300
1435	300	300	200
1617	300	300	200
1760	300	300	200
1793	300	300	100
1804	300	300	100
2116	300	300	100
2263	1200	1200	700
2291	300	300	300
2341	300	300	300
Perdas (KW)	875,11	553,13	137,04

Figura 7.14. Configuração dos capacitores e perdas para cada perfil nas instâncias b1596 e b2448.

O tempo computacional consumido pelo algoritmo é similar ao tempo consumido para alocação de capacitores (Tabela 7.5)

No próximo Capítulo comentam-se os resultados e contribuições do trabalho, assim como sugestões nessa linha de pesquisa.

# Capítulo 8

## Conclusões

Este trabalho trouxe contribuições para as metodologias de redução de perdas técnicas associadas aos fluxos de energia reativa em redes primárias de distribuição de energia elétrica. Especificamente, apresentou inovações para os problemas de localização e controle de capacitores nessas redes.

A principal contribuição do trabalho para o problema de localização e dimensionamento de capacitores foi o resgate da abordagem por programação dinâmica para a localização de capacitores fixos na rede. Esta abordagem, proposta por Durán há mais de três décadas, tem a vantagem de garantir a obtenção da solução ótima. No entanto, os trabalhos que abordam o problema de localização de capacitores para redes grandes não utilizam programação dinâmica – provavelmente devido aos requisitos computacionais para implementação da abordagem clássica desta técnica.

O trabalho propõe duas inovações que, em conjunto, viabilizaram a obtenção de soluções ótimas para o problema de instalação de capacitores por programação

dinâmica. A primeira foi uma análise teórica do problema, mostrando que o mesmo tem a característica de “falso multidimensional”, podendo ser projetado em um problema equivalente com apenas uma variável de estado. A segunda inovação, foi a importação de idéias e estruturas de dados da área de otimização de fluxo em redes, para implementar o algoritmo de programação dinâmica.

As inovações apresentadas permitiram obter soluções ótimas para o problema de instalação de capacitores fixos em redes reais de grande porte. A título de exemplo, os estudos de casos consideraram redes reais com 5000 nós.

As contribuições para o problema de controle de capacitores foram a especialização para o problema das técnicas de programação dinâmica desenvolvidas para instalação de capacitores e a proposta da metodologia baseada em sistemas complexos adaptativos (também conhecidos como sistemas classificadores). A abordagem por programação dinâmica tem o aspecto atraente de garantir a obtenção de controles ótimos, para um perfil de demandas conhecido. A abordagem por sistemas complexos adaptativos tem como aspectos atraentes a identificação, através de aprendizagem, da necessidade de mudanças nos controles dos capacitores (quando as demandas variam) e a capacidade de generalização – útil, por exemplo, para perceber que pequenas modificações nas demandas não exigem, necessariamente, mudanças nos controles dos capacitores.

A Tabela 8.1 permite uma comparação entre os resultados obtidos por programação dinâmica e por sistemas classificadores. Observa-se que as soluções obtidas pelo Sistema Classificador são próximas das soluções ótimas.

Perfil I			
Instâncias	Solução Ótima	Solução do SC	Desvio %
B34	148,55	151,69	2,1
B70	132,73	133,69	0,7
B1596	390,14	397,50	1,8
B2448	875,11	892,17	1,9
Perfil II			
B34	94,09	94,16	0,07
B70	83,31	83,71	0,4
B1596	245,42	248,90	1,4
B2448	553,13	559,83	1,2
Perfil III			
B34	23,51	23,57	0,2
B70	20,82	21,47	3,1
B1596	59,15	59,41	0,4
B2448	137,04	138,12	0,7

Tabela 8.1. Comparação da melhor solução do classificador com a solução ótima encontrada com programação dinâmica para os perfis de carga.

## 8.1 Continuidade do trabalho

A continuidade das pesquisas relacionadas com este trabalho incluirá os seguintes pontos:

- estudo da possibilidade de abordar por programação dinâmica o problema de instalação de capacitores variáveis.
- planejamento integrado de alternativas de reconfigurações com a instalação de capacitores fixos e variáveis.
- controle integrado da rede para redução de perdas, considerando alternativas de reconfigurações e chaveamento dos capacitores.
- considerar na representação matemática as variações de tensões nos alimentadores ( $v_k \neq 1$ ).

## Apêndice A

# Cálculo dos parâmetros do Sistema Classificador

Neste apêndice são apresentadas as equações utilizadas para o cálculo dos parâmetros do Sistema Classificador.

$$spec = \frac{n - total\_#}{n}$$

Onde:

$n$  é o total de bits no antecedente do classificador;

$total\_#$  é o total de bits contendo o caractere # no antecedente do classificador.

$$bid_i = k_0 * (k_1 + k_2 * spec^{spow}) * s_i$$

Onde:

$k_0$  é o coeficiente referente à energia do classificador ( $0 < k_0 < 1$ );

$k_1$  é o coeficiente referente à parte não específica do classificador ( $0 < k_1 < 1$ );

$k_2$  é o coeficiente referente à parte específica do classificador ( $0 < k_2 < 1$ );

$spec$  é a especificidade do classificador;

$spow$  é um parâmetro de controle da influência da especificidade no valor do “bid”;

$S_t$  é a energia do classificador no instante  $t$ .

$$ebid_t = bid_t + \sigma * N_t$$

Onde:

$ebid_t$  é o “bid efetivo” no instante  $t$ ;

$bid_t$  é o “bid” no instante  $t$ ;

$N_t$  é uma modulação caracterizada por um ruído com distribuição gaussiana de média 0 e variância 1;

$\sigma$  é o nível de perturbação do ruído  $N_t$ .

$$taxa\_bid = bid\_tax * bid_t$$

Onde:

$taxa\_bid$  é a taxa de participação na competição;

$bid\_tax$  é uma constante aplicada sobre o “bid” do classificador;

$bid_t$  bid do classificador no instante  $t$ .

$$taxa\_vida = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{nt}}$$

Onde:

$taxa\_vida$  é a taxa cobrada de cada classificador a cada iteração;

$nt$  é a meia vida do classificador (número de iterações).

$$s_{t+1} = (1 - taxa\_vida) * s_t + R_t - bid_t - taxa\_bid$$

Onde:

$S_{t+1}$  é a nova energia do classificador após a atuação sobre o ambiente;

$R_t$  é o valor da recompensa dado ao classificador.

## **Apêndice B**

# **Informações Complementares sobre Estudos de Casos**

Neste apêndice são apresentados os gráficos correspondentes aos resultados da aplicação dos sistemas classificadores sobre as instâncias b70, b1596 e b2448 para os dois cenários construídos.

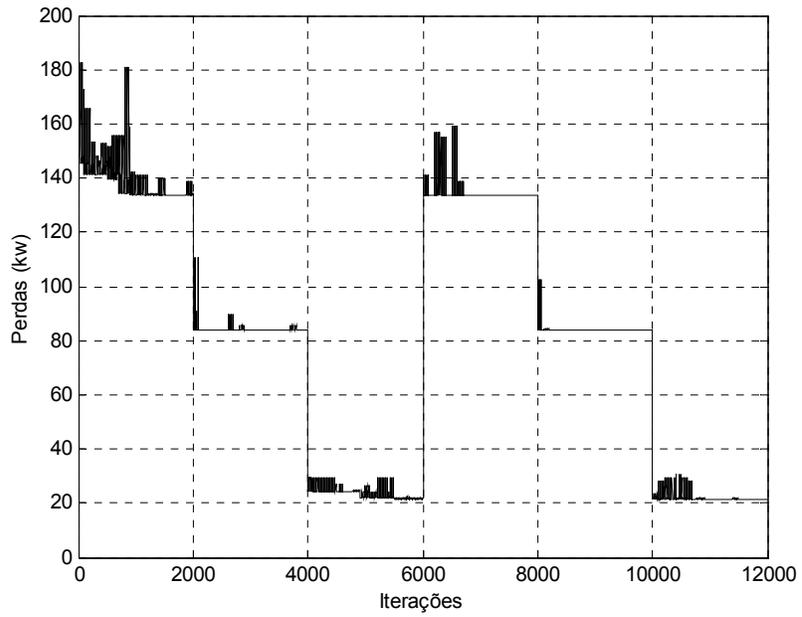


Figura B.1. Comportamento das perdas na rede da instância b70 no cenário 1.

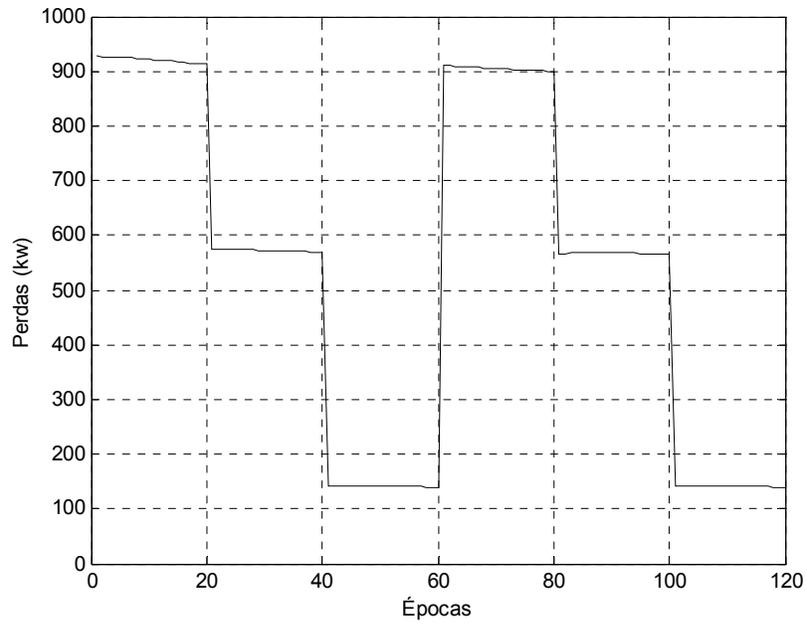


Figura B.2. Comportamento da média das perdas da população de classificadores na rede da instância b70 no cenário 1.

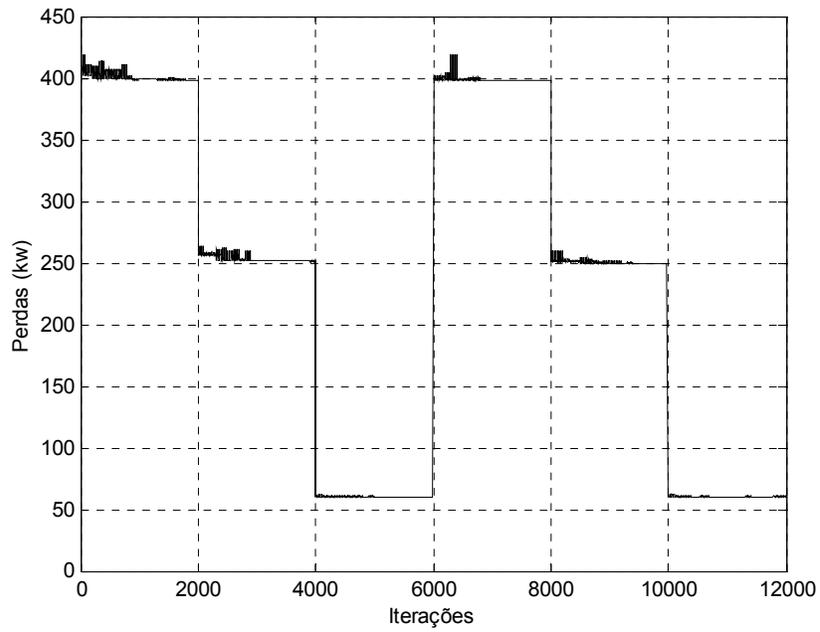


Figura B.3. Comportamento das perdas na rede da instância b1596 no cenário 1.

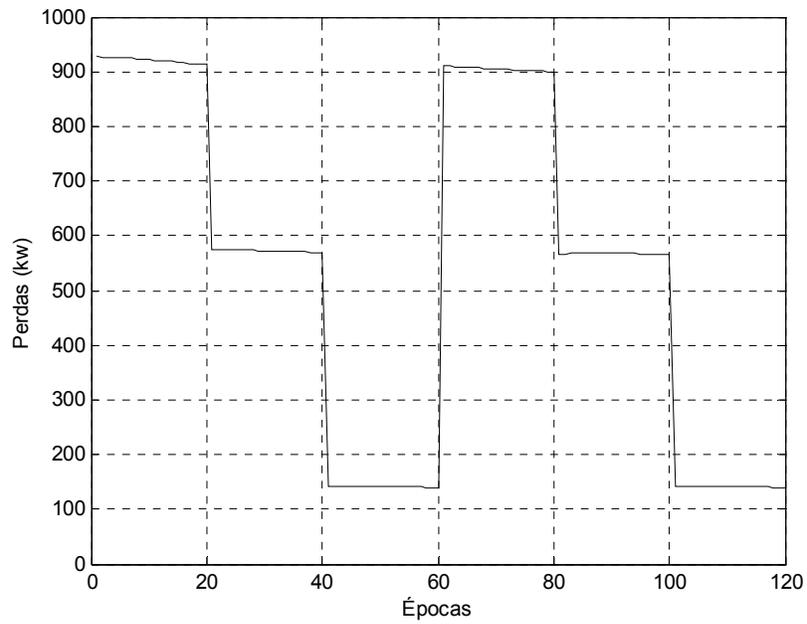


Figura B.4. Comportamento da média das perdas da população de classificadores na rede da instância b1596 no cenário 1.

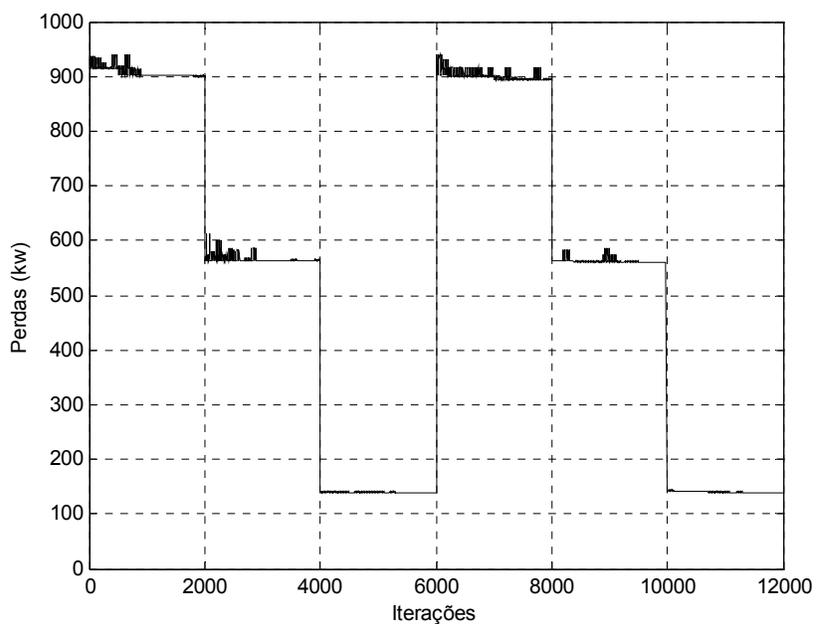


Figura B.5. Comportamento das perdas na rede da instância b2448 no cenário 1.

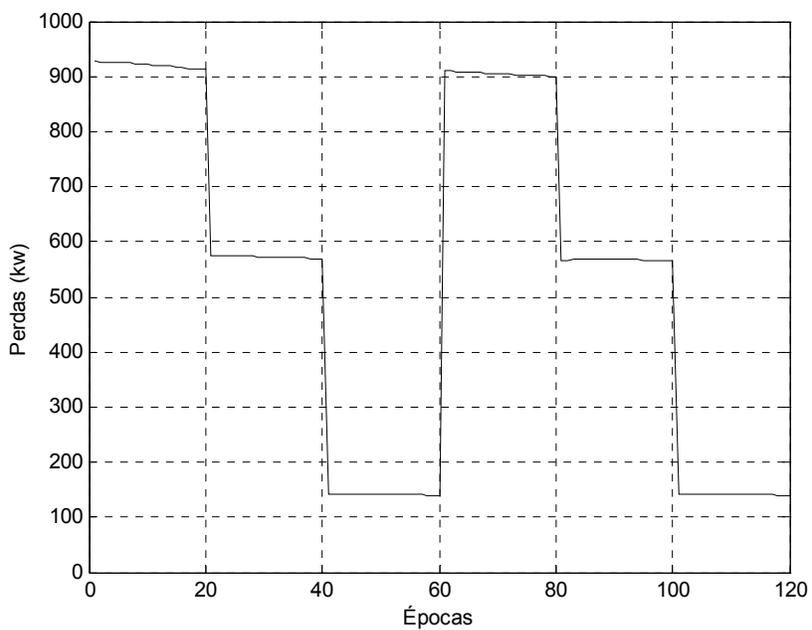


Figura B.6. Comportamento da média das perdas da população de classificadores na rede da instância b2448 no cenário 1.

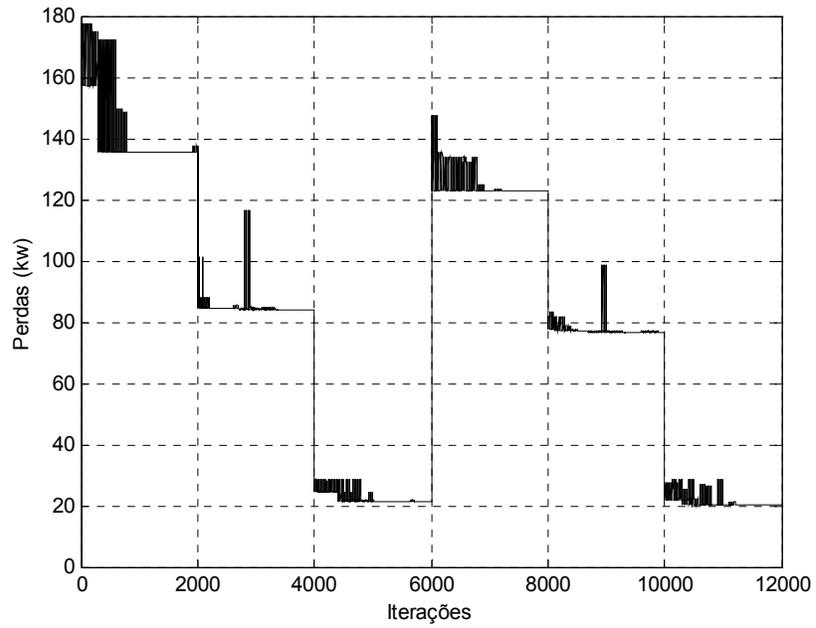


Figura B.7. Comportamento das perdas na rede da instância b70 no cenário 2.

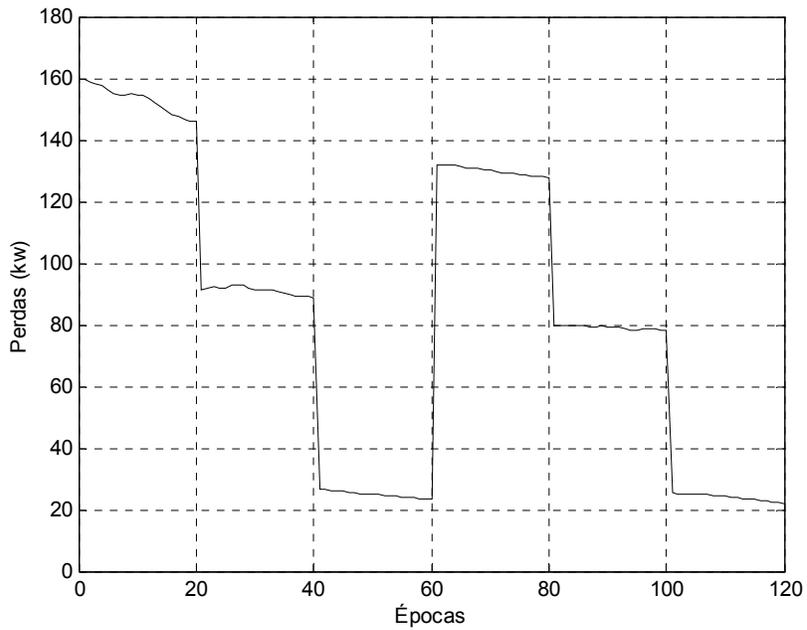


Figura B.8. Comportamento da média das perdas da população de classificadores na rede da instância b70 no cenário 2.

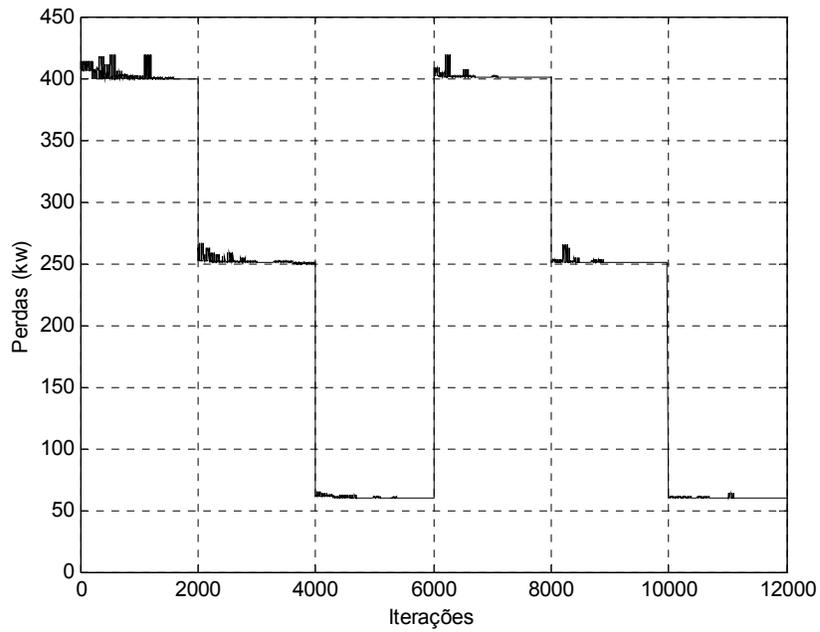


Figura B.9. Comportamento das perdas na rede da instância b1596 no cenário 2.

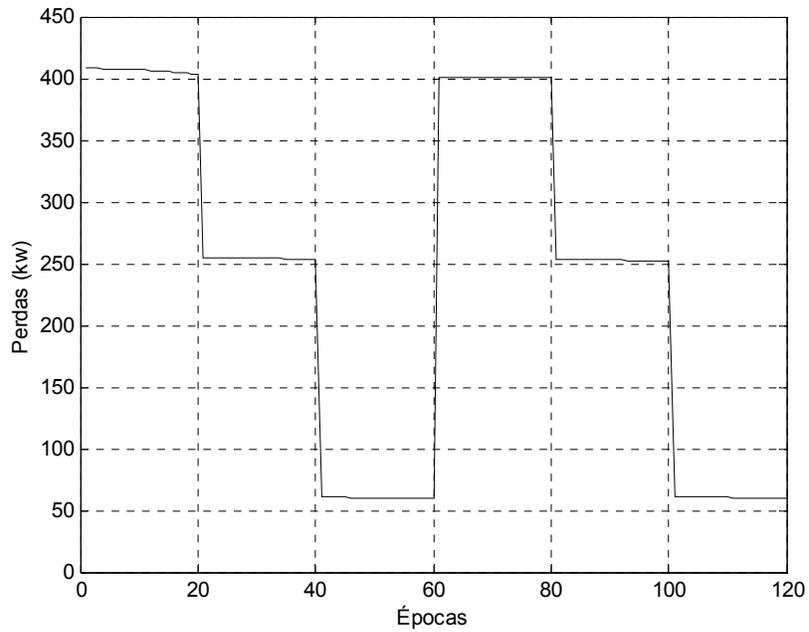


Figura B.10. Comportamento da média das perdas da população de classificadores na rede da instância b1596 no cenário 2.

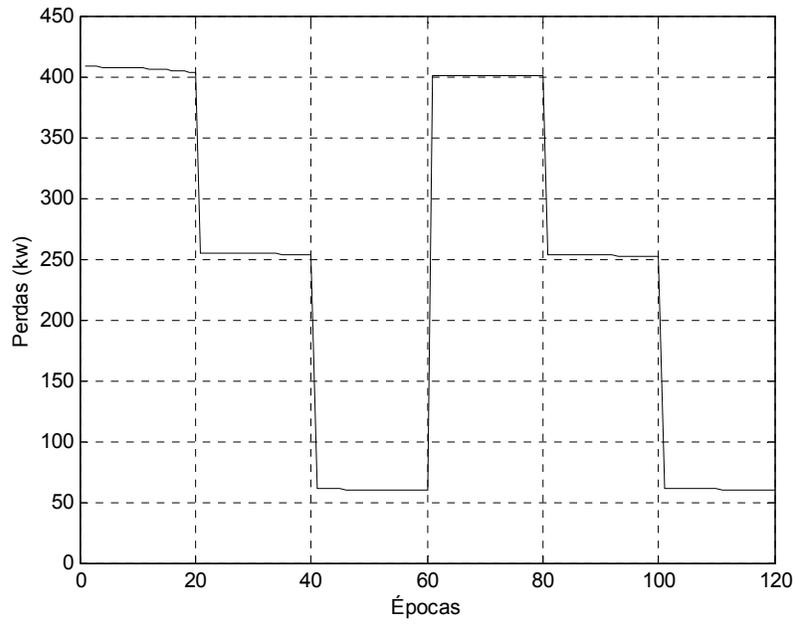


Figura B.11. Comportamento das perdas na rede da instância b2448 no cenário 2.

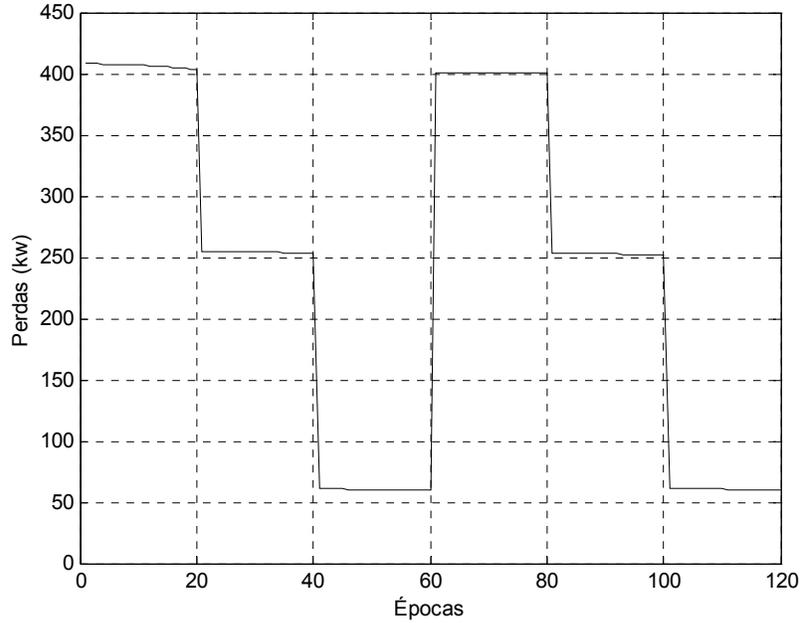


Figura B.12. Comportamento da média das perdas da população de classificadores na rede da instância b2448 no cenário 2.

## Bibliografia

- Ahuja, R., Magnanti, T. and Orlin, J. (1993). *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Augugliaro, A., Dusonchet, L. and Mangione, S. (1990). *Optimal capacitive compensation on radial distribution systems using nonlinear programming*, Electric Power Systems Research 19: 129–135.
- Baran, M. E, Wu, F. F., (1989a) *Optimal capacitor placement on radial distribution systems*, IEEE Trans. Power Delivery 4.(1): 725-733.
- Baran, M. E, Wu, F. F.,( 1989b) *Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution systems*, IEEE Trans. Power Delivery 4(1): 735-743,.
- Bellman, R. E., (1957) *Dynamic Programming*, Princeton, N. J.: Princeton University.
- Boone, G. and Chiang, H. (1993). *Optimal capacitor placement in distribution systems by genetic algorithm*, Electric Power & Energy Systems 15(3): 155–162.
- Brown, D. R. (1981). *Performance analysis of a variable source of reactive power in distribution system primary feeders*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-100(11): 4364–3372.
- Carlisle, J. C. and El-Keib, A. A. (2000). *A graph search algorithm for optimal placement of fixed and switched capacitors on radial distribution systems*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 15(1): 423–428.
- Chiang, H., Wang, J., Cockings, O. and Shin, H. D. (1990a). *Optimal capacitor placements in distribution systems: Part 1: A new formulation and the overall problem*, IEEE Transactions on Power Delivery 5(2): 634–642.
- Chiang, H., Wang, J., Cockings, O. and Shin, H. D. (1990b). *Optimal capacitor placements in distribution systems: Part 2: Solution algorithms and numerical results*, IEEE Transactions on Power Delivery 5(2): 643–649.
- Chiang, H., Wang, J. and Darling, G. (1995). *Optimal capacitor placement, replacement and control in large-scale unbalanced distribution systems: System modeling and a new formulation*, IEEE Transactions on Power Systems 10(1): 356–362.

- Chung, T. S. and Shaoyun, G. (1997). *A recursive lp-based approach for optimal capacitor allocation with cost-benefit consideration*, Electric Power Systems Research 39: 129–136.
- Cook, R. F. (1959). *Analysis of capacitor application as affected by load cycle*, AIEE Transactions pt. III 78: 950–957.
- Duran, H. (1968) *Optimum Number, Location, and Size of Shunt Capacitors in Radial Distribution Feeders: A Dynamic Programming Approach*, IEEE Transaction. On Power Apparatus and Systems, vol. 87, pp. 1769-1774, Sept..
- Deng, Y., Ren, X., Zhao, C., Zhao, D. (2002) *A Heuristic and Algorithmic Approach for Reactive Power Optimization with Time-Varying Load Demand in Distribution Systems*, IEEE Transactions On Power Systems, 17(4): 1068-1072.
- Elgerd, O. (1971). *Electric energy systems theory: an introduction*. McGraw-Hill.
- Gallego, R. A., Monticelli, A. J., Romero, R.( 2001) *Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Networks*, IEEE Transactions On Power Systems, 16(4): 630–637.
- Ghose, T., Goswami, S. and Basu, S. (1999). *Solving capacitor placement problems in distribution systems using genetic algorithms*, Electric Machines and Power Systems 27: 429–441.
- Grainger, J. J., Civanlar, S. and Lee, S. H. (1983). *Optimal design and control scheme for continuous capacitive compensation of distribution feeders*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-102(10): 3271–3278.
- Grainger, J. J. and Lee, S. H. (1981). *Optimum size and location of shunt capacitors for reduction of losses on distribution feeders*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-100(3): 1105–1118.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press.
- Hsu, Y. Y., Kuo, H. C.( 1993) *Dispatch of capacitors on distribution system using dynamic programming*, IEEE Proceedings-C, 140(6): 433–438.
- Lu, F. C., Hsu, Y. Y.( 1995) *Reactive power/voltage control in a distribution substation using dynamic programming*, IEEE Proceedings, 142(6)
- Hsu, Y.-Y. and Yang, C.-C. (1994). *A hybrid artificial neural-dynamic programming approach for feeder capacitor scheduling*, IEEE Transactions on Power Systems 9(2): 1069–1075.

- Huang, Y., Yang, H. and Huang, C. (1996). *Solving the capacitor placement problem in a radial distribution system using tabu search approach*, IEEE Transactions on Power Systems 11(4): 1868–1873.
- Iba, K. (1994). *Reactive power optimization by genetic algorithm*, IEEE Transactions on Power Systems 9(2): 685–692.
- Jensen, P., Barnes J. (1980) *Network flow programming*. New York. John Wiley.
- Kaplan, M. (1984) *Optimization of number, location, size, control type, and control setting of shunt capacitors on radial distribution feeders*, IEEE on Power Apparatus and Systems, PAS-103(9): 2659-2663.
- Lee, S. H. and Grainger, J. J. (1981). *Optimum placement of fixed and switched capacitors on primary distribution feeders*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-100(1): 345–352.
- Levitin, G., Kalyuzhny, A., Shenkman, A. and Chertkov, M. (2000). *Optimal capacitor allocation in distribution systems using a genetic algorithm and a fast energy loss computation technique*, IEEE Transactions on Power Delivery 15(2): 623–628.
- Mendes, A., França, P., Lyra, C., Pissarra, C. and Cavellucci, C. (2002). *An evolutionary approach for capacitor placement in distribution networks*, Proceedings of Third International NAISO Symposium on Engineering of Intelligent Systems, Natural and Artificial Intelligence Systems Organizations (NAISO), Malaga, Spain.
- Miu, K., Chiang, H. and Darling, G. (1997). *Capacitor placement, replacement and control in large-scale distribution systems by a ga-based two-stage algorithm*, IEEE Transactions on Power Systems 12(3): 1160–1166.
- Moscato, P. (1989). *On evolution, search, optimization, genetic algorithms, and martial arts: Towards memetic algorithms*, Technical Report, Caltech Concurrent Computation Program, C3P Report 826.
- Murphy, L. and Wu, F. (1990). *A comprehensive analysis of distribution automation systems*, Memorandum no. ucb/erl m90/72, Electronics Research Laboratory, College of Engineering, University of Berkeley.
- Neagle, N. M. and Samson, D. R. (1956). *Loss reduction from capacitor installed on primary feeders*, AIEE Transactions pt. III 75: 950–959.

- Ponnaivaikko, M., Prakasa Rao, K.S (1983). *Optimal choice of fixed and switched capacitors on radial distributors by method of local variations*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 102(6): 1607-1615.
- Richards, R. A. (1995). *Zeroth-Order Shape Optimization Utilizing Learning Classifier Systems*. <http://www.stanford.edu/~buc/SPHINcsX/book.html>
- Salama, M. M. A., Chikhani, A. Y. and Hackam, R. (1985). *Control of reactive power in distribution systems with an end-load and fixed load condition*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-104(10): 2779–2788.
- Salama, M. M. A. and Chikhani, A. Y. (1993). *A simplified network approach to the var control problem for radial distribution systems*, IEEE Transactions on Power Delivery 8: 1529–1535.
- Sundhararajan, S., Pahwa, A. (1994) *Optimal selection of capacitors for radial distribution systems using genetic algorithm*, IEEE Transactions. On Power Systems, 9(3): 1499-1505.
- Vargas, P. A., Zuben, F. V. and Lyra, C. (2002a). *Learning classifiers on guard against losses in distribution networks*, in J. Jardini (ed.), Proceedings of the IEEE 2002 Latin American Transmission and Distribution Conference—paper170, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- Vargas, P. A., Lyra, C. and Zuben, F. V. (2002b). *On-line approach for loss reduction in electric power distribution networks using learning classifier systems*, in P. L. Lanzi, W. Stolzmann and S. W. Wilson (eds), Lecture Notes on Artificial Intelligence-Learning Classifier Systems, Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 181–196.
- Wilson, S. W., (1995). *Classifier Fitness based on Accuracy*, Stewart W. Wilson, in Evolutionary Computation, 3(2):149-175.