

Estratégias Evolutivas para Otimização do Controle de Reativos com Sazonalidade das Demandas

N. R. Batista e Massayuki Suzuki, CPFL PIRATININGA, C. Lyra, UNICAMP, C. Cavellucci, THOTH, P. M. França, UNICAMP, J.F. V. Gonzales, UNICAMP e E. A. Bueno, UNICAMP

Resumo - Este artigo tem o objetivo de discutir uma metodologia para encontrar as melhores estratégias de instalação de capacitores e controle dos seus estados, considerando as variações das cargas e indeterminação de seus valores ao longo de determinado período de tempo, visando a redução das perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica. A metodologia proposta é baseada em dois paradigmas da computação evolutiva: algoritmos genéticos (em particular na família de algoritmos denominada “meméticos”), para localização de capacitores em redes primárias de distribuição, e em sistemas complexos adaptativos, para abordar o problema de controle dos capacitores localizados nos circuitos primários de distribuição.

Palavras-chave - Controle de Reativos, Demandas Variáveis, Estratégias Evolutivas, Redução de Perdas, Sistema de Distribuição.

I. INTRODUÇÃO

A instalação e controle adequado de capacitores é uma alternativa para a redução das perdas no sistema de distribuição. Além de reduzir os fluxos de energia reativa nos condutores da rede primária, obtêm-se melhores perfis de tensão dos alimentadores, redução do custo de manutenção e aumento da vida útil das redes.

No planejamento do sistema de distribuição definem-se os locais de instalação e capacidade dos bancos de capacitores, considerando um perfil de carga apropriado à variação da carga no horizonte de planejamento. Os bancos de capacitores adotados podem ser fixos ou variáveis, permitindo a injeção de diferentes níveis de energia reativa no sistema. 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, constituem procedimentos de operação da rede.

Metodologias para solucionar o problema de localização e dimensionamento de capacitores (PLDC) são estudadas desde a década de 50. Mesmo existindo metodologias capazes

de produzir boas soluções para o problema, ainda é uma área de intensa pesquisa. Trabalhos mais recentes procuram identificar novas propriedades estruturais do PLDC e explorar novos métodos em computação evolutiva, buscando melhorar a qualidade das soluções e tratar detalhes na representação do problema.

Antes da década de 50, os capacitores para redução de perdas eram instalados nas subestações [1]. Com a verificação das vantagens de instalar os capacitores em pontos próximos as cargas e o desenvolvimento de equipamentos de menor porte, que podem ser instalados nos postes de distribuição, o PLDC aumentou sua importância.

Os primeiros métodos propostos para resolver o PLDC foram analíticos, usando hipóteses simplificadoras. Por exemplo, Neagle e Samson [2] apresentam uma metodologia baseada em curvas de perdas, para alocação de um único banco de capacitores em cada um dos alimentadores. Cook [3] estende a formulação de Neagle e Samson, levando em consideração as variações periódicas nas cargas, mostrou que a regra dos “dois terços”, considerada na época uma boa aproximação para colocação de capacitores, poderia causar aumento das perdas ao invés de uma redução.

Durán [4] propõe uma abordagem utilizando programação dinâmica, um método formal de otimização que permite a obtenção da solução ótima, para uma representação simplificada do problema.

Usando o conceito de “alimentador equivalente normalizado”, Grainger e Lee [5] abordam o problema de instalação de capacitores fixos com cargas não uniformes. Kaplan [6] desenvolve um método gráfico analítico para o PLDC, considerando situações mais realistas: alimentadores com ramificações, presença de capacitores já instalados, capacitores fixos ou variáveis e distribuição da carga não uniforme.

Baran e Wu [7][8] formulam o PLDC como um problema de otimização não linear com variáveis reais e inteiras. Chiang, Wang, Cockings e Shin [9][10] aplicam a técnica de Simulated Annealing na resolução do PLDC, onde a função de custo de instalação dos capacitores é não diferenciável e os tipos de capacitores são representados por variáveis inteiras. Gallego, Monticelli e Romero [11] utilizam um algoritmo híbrido baseado, em Busca Tabu para resolver o PLDC.

O primeiro artigo usando enfoque evolutivo na solução do PLDC deve-se a Boone e Chiang [12]. Os autores propõem um algoritmo genético (AG) simples, incorporando apenas elementos básicos da metodologia dos AGs. Levitin, Kalyuzhny, Shenkman e Chertkov [13] apresentaram um novo método evolutivo para o PLDC, cuja maior contribui-

Este trabalho teve apoio financeiro da CPFL Piratininga e CNPq – Entidade do Governo Brasileiro voltada para pesquisa e desenvolvimento.

N.R. Batista é engenheiro da CPFL (e-mail: norberto@piratininga.net).

C. Lyra é professor na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação/UNICAMP (e-mail: chrlyra@densis.fee.unicamp.br).

C. Cavellucci é engenheiro da THOTH Consultoria (e-mail: thoth_celso@mpc.com.br).

P. França é professor na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação/UNICAMP (e-mail: franca@densis.fee.unicamp.br).

J. F. V. Gonzales é doutorando na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação/UNICAMP (e-mail: jfv@densis.fee.unicamp.br).

E. A. Bueno é doutorando na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação/UNICAMP (e-mail: edilson@densis.fee.unicamp.br).

ção foi uma representação compacta do cromossomo, fazendo com que um número inteiro, associado a cada local potencial para instalar um capacitor, contenha informação tanto da localização do capacitor quanto da sua capacidade. No artigo de Mendes, França, Lyra, Pissarra e Cavellucci [14], é apresentado uma abordagem por algoritmos meméticos [15]. Essa metodologia foi avaliada com bons resultados em redes de grande porte (mais de 2000 barras).

A solução do problema de controle do estado dos capacitores (PCEC), define as melhores estratégias de chaveamentos em bancos de capacitores.

A literatura sobre o PCEC é escassa e recente [16]. Hsu e Kuo [17] utilizam programação dinâmica na solução do PCEC, definindo uma política de chaveamento dos bancos de capacitores para um período de 24 horas, supondo conhecidas as variações de demanda em todos os barramentos da rede. Uma abordagem mista por programação dinâmica e redes neurais foi proposta por Hsu e Yang [18]. Nesta abordagem, o algoritmo de programação dinâmica resolve o PCEC off-line para vários perfis de carga. A rede neural associa o perfil de carga ativo a uma solução e em seguida, um algoritmo de programação dinâmica é utilizado para fazer um ajuste fino da solução encontrada. Uma metodologia combinando uma heurística e programação linear inteira é proposta por Deng, Ren, Zhao e Zhao [19] para determinar o valor do ponto de operação de capacitores e transformadores, para as 24 horas do dia seguinte ao momento do estudo.

Novas pesquisas tentam explorar propriedades estruturais do PLDC e PCEC, fazendo com que o esforço computacional para solução deixe de crescer exponencialmente com a dimensão do problema.

A próxima seção apresenta a caracterização do problema, o modelo e sua formulação matemática. A seção III apresenta a metodologia proposta para a solução do problema – Algoritmos Genéticos e Sistemas Classificadores para alocação e controle de capacitores. Na seção IV é apresentado o Estudo de Casos. Conclusões finalizam o artigo.

II. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Para a caracterização formal (e solução) do PLDC e PCEC, é vantajoso nos apoiarmos nos recursos de representação da rede de distribuição por grafos [20][21]. Grafos são entidades matemáticas formadas por um conjunto de nós (\mathcal{N}) e ligações entre esses nós, denominadas arcos (\mathcal{A}).

Quando se utiliza um grafo $G = [\mathcal{N}; \mathcal{A}]$ 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 de aspectos de conectividade da rede. Os arcos do conjunto \mathcal{A} estão associados a linhas de distribuição e chaves - os arcos que fazem a conexão das subestações ao nó raiz podem ser associados com as linhas de transmissão.

A. Formulação do Problema de Localização e Dimensionamento de Capacitores

Considerando-se o conjunto de perfis de demanda (L_λ) associado a um certo horizonte de planejamento ($\lambda = 1,$

$2, \dots, np$), o PLDC sob variações de demandas, para uma rede primária de distribuição representada pelo grafo $G = [\mathcal{N}; \mathcal{A}]$, pode ser caracterizado na forma a seguir.

$$\text{Min}_{Q_c} \left\{ \left(\sum_{i \in \mathcal{N}} \phi_a(Q_{Ci}) \right) + \varphi_e \eta \sum_{\lambda=1}^{np} T_\lambda \left(\sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{k \in \mathcal{A}_i} r_k \frac{P_{ik}^2 + Q_{ik}^2}{v_{ji}^2} \right) \right\} \quad (1)$$

s.a.:

$$P_{\lambda(k-1)} = \sum_{k \in \mathcal{A}_i} P_{ik} + P_{Li}, \quad \forall i \in \mathcal{N}, \quad \lambda = 1, 2, \dots, np \quad (2)$$

$$Q_{\lambda(k-1)} = \sum_{k \in \mathcal{A}_i} Q_{ik} + Q_{Li} - Q_{Ci}, \quad \forall i \in \mathcal{N}, \quad \lambda = 1, 2, \dots, np \quad (3)$$

$$v_{ji}^2 = v_{ji}^2 - 2(r_k P_{ik} + x_k Q_{ik}), \quad \forall j \in D_i, \quad k \in \mathcal{A}_i, \quad \forall i \in \mathcal{N}, \quad \lambda = 1, 2, \dots, np \quad (4)$$

$$\underline{v}_{ji} \leq v_{ji} \leq \overline{v}_{ji}, \quad \forall i \in \mathcal{N}, \quad \lambda = 1, 2, \dots, np \quad (5)$$

$$Q_{Ci} \in Q, \quad \forall i \in \mathcal{N} \quad (6)$$

Onde Q_c é o conjunto de capacitores instalados na rede; \mathcal{N} é o conjunto de nós da rede; \mathcal{A}_i é o conjunto de arcos com origem no nó i ; D_i é o conjunto de nós destinos de \mathcal{A}_i ; $\phi_a(Q_{Ci})$ representa o custo anualizado de um capacitor instalado no nó i capaz de fornecer a potência reativa Q_{Ci} ; φ_e é o valor médio da energia; η é o fator de transformação de kW em MWh ; np é o número de perfis de carga; T_λ é o tempo de duração (em horas) do perfil λ ; P_{ik} é o fluxo de potência ativa no arco k que sai do nó i para o perfil λ ; P_{Li} é a potência ativa consumida no nó i no perfil λ ; Q_{ik} é o fluxo de potência reativa no arco k que sai do nó i no perfil λ ; Q_{Li} é a potência reativa consumida no nó i para o perfil λ ; v_{ji} é a tensão no nó i no perfil λ ; v_{ji} é a tensão no nó j pertencente a D_i para o perfil λ ; r_k e x_k representam, respectivamente, resistências e reatâncias associadas ao arco k ; Q é o conjunto de capacitores disponíveis.

A primeira parcela em (1) representa o custo anualizado de um capacitor capaz de fornecer a potência reativa no nó k , enquanto a segunda parcela representa o valor total da energia dissipada ao longo de um ano na rede de distribuição em estudo.

B. Formulação do Problema de Controle de Capacitores

Para um determinado perfil de demandas D_λ , o PCEC, para a rede primária de distribuição representada pelo grafo $G = [\mathcal{N}; \mathcal{A}]$, pode ser caracterizado na forma a seguir.

$$\text{Min}_{Q_c} \left\{ \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{k \in \mathcal{A}_i} r_k \frac{P_k^2 + Q_k^2}{v_i^2} \right\} \quad (7)$$

s.a.:

$$P_{k-1} = \sum_{k \in \mathcal{A}_i} P_k + P_{Li} \quad (8)$$

$$Q_{k-1} = \sum_{k \in \mathcal{A}_i} Q_k + Q_{Li} - Q_{Ci}^j \quad (9)$$

$$v_j^2 = v_i^2 - 2(r_k P_k + x_k Q_k) \quad (10)$$

$$0 \leq Q_{Ci}^j \leq Q_{Ci}^0 \quad (11)$$

$$\underline{v}_j \leq v_j \leq \overline{v}_j \quad (12)$$

$$Q_{Ci} \in Q \quad (13)$$

Onde,

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

A função objetivo representada em (7) é o valor das perdas na rede para o perfil D_λ .

III. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta neste trabalho utiliza duas técnicas diferentes para resolver aos problemas de instalação de capacitores e definição de seus estados respectivamente [22]. A primeira implementa um algoritmo memético [15]

para localização e dimensionamento dos capacitores. A segunda técnica implementa um *sistema complexo adaptativo* [23] para tratar o controle de reativos na rede de distribuição por meio da alteração dos estados dos capacitores.

A Fig. 1 apresenta o algoritmo principal simplificado [24].

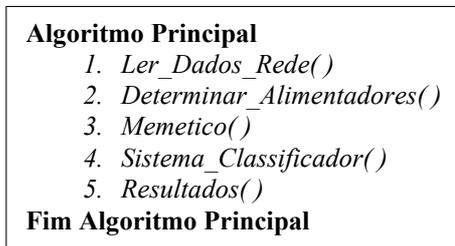


Figura 1. Programa principal.

Os itens a seguir descrevem as técnicas propostas e detalham a sua aplicação para cada um dos problemas tratados.

A. Solução do PLDC por Algoritmos Meméticos

O algoritmo memético (AM) é um algoritmo populacional que, como os AG, se utiliza de analogias com conceitos da natureza, tais como cromossomo, mutação, recombinação, seleção natural, etc. De forma geral consiste em fazer uma população de soluções evoluir através de processos de recombinação, mutação e seleção natural. Os indivíduos mais adaptados deverão sobreviver por mais tempo, perpetuando assim seu material genético. Após um número suficiente de gerações, espera-se que a população de soluções seja formada apenas por soluções de excelente qualidade, que representem boas configurações de localização de capacitores. A diferenciação básica dos AM em relação aos AG situa-se no emprego de uma fase de otimização a que são submetidos os novos indivíduos gerados [25]. A seguir mostramos um pseudo-código simplificado de um AM, ressaltando que é no passo 5 que se dá a caracterização memética do algoritmo:

1. Cria a população inicial
2. Seleciona indivíduos para recombinação.
3. Recombina os indivíduos selecionados, gerando descendentes mediante *crossover*.
4. Aplica a mutação aos descendentes.
5. Otimiza os descendentes mediante uma busca local.
6. Insere os descendentes na população, eliminando os indivíduos menos adaptados.
7. Enquanto houver gerações, volta ao passo (2).

A representação escolhida para o PLDC é a de um cromossomo cujos alelos assumem valores binários em uma parte dele e inteiros em outra. A primeira parte do cromossomo codifica os locais candidatos (nós dos alimentadores) que serão usados para possível instalação dos capacitores. Se o alelo correspondente à posição i tem valor 1, isso significa que deverá ser instalado um capacitor no nó i , caso contrário ele não receberá capacitores. Desta forma, a dimensão dessa *string* é igual ao número de nós. A segunda parte do cromossomo codifica a capacidade dos bancos de capacitores instalados. A Fig. 2 mostra um exemplo dessa codificação.

[011001 / 352124]	
Nós do alimentador / Capacidade dos bancos	
Tabela de Capacitores	
Valor	Capacidade em kVar
1	150
2	300
3	450
4	600
5	900

Figura 2. Estrutura do cromossomo e capacidade dos bancos.

Nesse trabalho, optamos por uma população hierarquicamente estruturada proposta por Mendes em [14]. A estrutura hierárquica é composta por uma única população estruturada segundo uma árvore ternária, representada na Fig. 3.

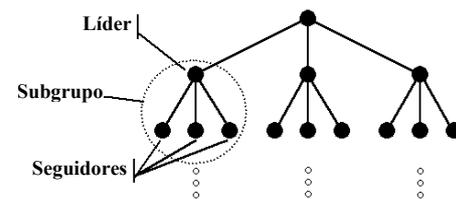


Figura 3. Estrutura populacional hierárquica.

Essa estrutura é formada por um conjunto de 4 subgrupos de 4 indivíduos, cada um composto por um *líder* e três *seguidores*. Em cada subgrupo, o líder é sempre o indivíduo mais adaptado dos quatro. Esta hierarquia faz com que indivíduos dos níveis superiores sejam mais bem adaptados que os dos níveis inferiores. Pode-se concluir facilmente que a melhor solução estará sempre presente como o líder do subgrupo “raiz” da árvore populacional.

A população inicial é criada de forma totalmente aleatória, tanto na localização dos bancos capacitores quanto nas suas respectivas capacidades. Na implementação, aproximadamente 20% dos locais candidatos recebem inicialmente um capacitor. A capacidade atribuída a esses capacitores varia entre os valores de 150 kVar e de 1200 kVar.

Na *seleção* dos indivíduos para recombinação, é escolhido um dos líderes, de forma aleatória e com igual probabilidade para todos. O próximo passo é escolher qual dos três seguidores do líder escolhido participará da recombinação. Essa seleção é também aleatória e com igual probabilidade para todos. Desta forma, quaisquer pares de pais sempre pertencem ao mesmo subgrupo. Este artifício restritivo na seleção imita um comportamento multi-populacional, pois as recombinações só ocorrem entre subpopulações. Essa característica confere robustez maior ao algoritmo, garantindo-lhe um desempenho superior quando comparado ao uso de populações não estruturadas [14].

Como resultado da *recombinação* é criado um novo indivíduo – um filho – a partir das informações contidas nos pais. Como o cromossomo é composto por duas partes distintas, elas devem permanecer separadas ao longo do processo de recombinação. Assim, há duas estratégias de recombinação: uma para a parte binária do cromossomo e outra para a parte inteira. Na parte binária foi adotado um *crossover* uniforme, onde o alelo do filho é determinado escolhendo-se aleatoriamente um dos dois pais e copiando o

valor atual do pai. Como consequência, se os pais possuem o mesmo alelo em uma determinada posição, o filho herdará esse valor. Se os valores forem distintos, o filho poderá herdar tanto o valor 0 quanto o valor 1, com a mesma probabilidade para ambos. Na parte inteira, faz-se uma média dos valores encontrados nos pais, passando-se para o filho o maior inteiro da média.

A *mutação* visa agregar diversidade à população de indivíduos. O operador escolhido possui duas partes: a primeira altera a porção binária do cromossomo, escolhendo aleatoriamente uma posição do indivíduo e trocando o valor de seu alelo. A segunda parte age nos valores inteiros do cromossomo, escolhendo aleatoriamente uma posição do indivíduo e somando ou subtraindo, também aleatoriamente uma unidade de seu valor. A escolha de somar ou subtrair é também determinada aleatoriamente. A mutação é aplicada em 10% dos novos indivíduos gerados.

A *otimização* dos descendentes é realizada através de três tipos de buscas locais detalhadas a seguir [24].

Busca local Add/Drop: Nessa estratégia, somente a primeira parte do cromossomo é alterada, ou seja, a busca local é feita apenas na localização dos capacitores. Cada bit do cromossomo é alterado, de forma sequencial, para seu valor oposto e verifica-se se tal mudança ocasionou uma melhora da função objetivo.

Busca local de capacidade: Essa busca local é feita sobre o tamanho dos capacitores. Essa busca local testa os tamanhos imediatamente inferior e superior do capacitor atualmente instalado.

Busca local Swap: Nessa estratégia tenta-se retirar um capacitor de uma posição e colocá-lo em outra.

Cada novo indivíduo gerado tem duas opções de inserção na população principal. Se ele for melhor que o do líder do subgrupo, ele toma o seu lugar. Caso contrário, é verificado se ele é melhor que o seguidor que participou como pai na recombinação. Se o for, ele substitui o seguidor. Se o novo indivíduo for pior que ambos os pais, ele é descartado. Uma vez inseridos todos os novos indivíduos, inicia-se a etapa de atualização da população, caracterizada pela reestruturação da mesma. Como deve-se manter a hierarquia em uma estrutura de árvore entre líderes e seguidores, verifica-se se algum indivíduo tornou-se melhor adaptado que o líder do seu subgrupo. Caso isso ocorra, eles trocam de posição.

A *função de avaliação* ou *fitness* tem por finalidade quantificar a qualidade dos indivíduos gerados. Para tanto ela deve guardar uma relação estreita com a função objetivo do problema em questão. Mantendo as características dos algoritmos evolutivos que manda valorizar o indivíduo com maior valor de *fitness*, ou adaptabilidade, uma escolha adequada para essa função no caso do PLDC precisa considerar diversos fatores.

O primeiro componente a ser considerado é o ganho com a redução de perdas decorrente da instalação de capacitores. Para isso, é necessário calcular as perdas no alimentador definidas em (1) pela seguinte parcela:

$$\sum_{\lambda=1}^T \left(\sum_{k \in \mathcal{N}} \sum_{i \in \mathcal{A}_k} r_{ki} \frac{P_{ki\lambda}^2 + Q_{ki\lambda}^2}{V_{k\lambda}^2} \right) \quad (14)$$

Para a avaliação dos fluxos de potência, utiliza-se um algoritmo de fluxo de carga adequado a redes de distribuição [26]. As perdas são avaliadas supondo-se instalados os capacitores da solução corrente. Em seguida, são comparadas com as perdas antes da instalação dos capacitores; a diferença é computada como um ganho de energia e transformada no total de MWh para o período estudado (multiplicando pela constante η apresentada em (1)). O ganho é multiplicado pelo valor médio da energia para o horizonte de estudo (φ_e), definindo o ganho em reais obtido com a redução de perdas, LA .

O outro componente da função de avaliação do indivíduo a ser incluído é o custo de compra e instalação dos capacitores, CC (transformado a bases anuais), definida pela primeira parcela de (1). A função $\phi_a(Q_{ck})$ pode ser expressa na equação a seguir.

$$\phi_a(Q_{ck}) = x_k C(Q_{ck}) \quad (15)$$

Onde,

x_k e uma variável binária que determina se o nó k recebe um capacitor ($x_k=1$), ou não ($x_k=0$),

$C(Q_{ck})$ representa o custo anual equivalente (em R\$) do capacitor Q_{ck} .

Para determinação do custo anual dos capacitores ($C(Q_{ck})$), considerando-se um determinado período de amortização do investimento e uma taxa anual de juros, utiliza-se a fórmula clássica de cálculo do custo anual equivalente,

$$C(Q_{ck}) = \frac{i C_c(Q_{ck})}{\left(1 - \frac{1}{(1+i)^T}\right)} \quad (16)$$

Onde,

i e a taxa anual de juros,

e T é o número de anos estabelecido para amortização do capital investido em capacitores (parâmetro de entrada do programa).

É possível fixar um teto orçamentário anual para dispêndio com a compra e instalação dos capacitores, uma vez que nem sempre há disponibilidade orçamentária para efetuar a compra e instalação de todos os capacitores sugeridos pelo algoritmo. Assim, o usuário pode definir o valor máximo que pode ser utilizado na aquisição dos capacitores. Classicamente, os algoritmos genéticos tratam esse tipo de restrição penalizando-a convenientemente na função de *fitness*; isto induz os indivíduos da população a respeitá-la na medida em que o processo evolutivo se desenvolve. A penalização da restrição de orçamento será realizada através de (17).

$$RO = \{\max[0, (\phi_a(Q_{ck}) - OM)]\}^2 \quad (17)$$

Onde,

RO representa a penalização relativa ao orçamento,

OM é o orçamento máximo anual para a colocação de capacitores, em R\$.

O *fitness*, LT , do indivíduo é então determinado pela seguinte equação.

$$LT = LA - CC - RO \quad (18)$$

Como o processo seletivo do algoritmo favorece os indivíduos de maior *fitness*, a tendência é favorecer os indivíduos com menor penalidade. Com o desenrolar do processo evolutivo, devem prevalecer os indivíduos com penalidade zero, ou seja, factíveis quanto à restrição orçamentária.

B. Solução do PCEC usando Sistemas Classificadores

Os Sistemas Classificadores (SC) são sistemas complexos adaptativos propostos pela primeira vez por Holland [27]. 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.

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. A Fig. 4 mostra esquematicamente a interação do SC com o ambiente.

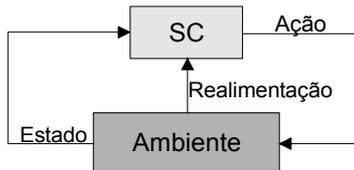


Figura 4. Sistema classificador interagindo com o ambiente.

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.

Para controlar os reativos capacitivos na rede de distribuição o Sistema Classificador deverá ser capaz de apontar qual configuração de estados é mais adequada para os bancos de capacitores que já foram instalados pelo algoritmo memético (Fig. 1), para um determinado perfil de carga. Em outras palavras, o objetivo do problema é encontrar um conjunto de classificadores cujas ações reduzam as perdas para um determinado perfil de carga. Portanto, 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_λ . Na Fig. 5 mostra a estrutura do sistema classificador proposto para o controle de capacitores.

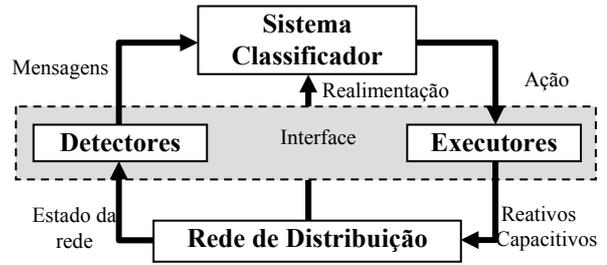


Figura 5. Sistema classificador para o controle de reativos em uma rede de distribuição.

Os detectores devem receber a informação do estado da rede e codificar essa informação em uma mensagem que possa ser interpretada pelo Sistema Classificador. A codificação usada no presente trabalho usa apenas os fluxos nos arcos em cujos nós destinos estão instalados capacitores.

Para codificar a mensagem usam-se 4 bits, o que permite a codificação de até 16 níveis de reativos nos arcos. O vetor da mensagem, tem um comprimento igual a 4 vezes o número de capacitores instalados. Supondo que o fluxo de reativos máximo (q_{max}) admitido para cada arco é conhecido é possível dividir a informação em 16 níveis diferentes desde $q_{max}/16$ até q_{max} . A Fig. 6 apresenta a codificação para um alimentador com dois capacitores instalados.

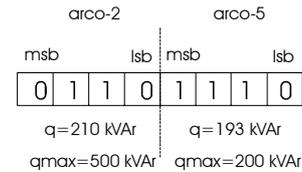


Figura 6. Exemplo de codificação da mensagem.

O antecedente tem uma estrutura que permite se ajustar à mensagem. Portanto, é representado por um vetor de tamanho igual ao tamanho da mensagem - cada bit do vetor estará ocupada por um dos símbolos $\{\#, 0, 1\}$, conforme ilustra a Fig. 7.



Figura 7. Codificação do classificador.

A parte conseqüente do classificador é um vetor real de tamanho igual ao número de capacitores instalados no alimentador. Cada componente do vetor indica o estado para cada banco de capacitores (Fig. 7).

Para um determinado perfil de demanda D_λ , são calculados os fluxos de reativos que passam em cada arco do alimentador estudado. 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.

Os classificadores escolhidos participam de uma competição para atuar sobre os bancos de capacitores da rede. A competição é realizada através de um algoritmo de apropriação de crédito, que atribui mais chances de ganhar para os classificadores melhores adaptados (de maior energia) ao perfil de carga D_λ .

No algoritmo de apropriação de crédito são calculados vários parâmetros [28]. O classificador vencedor ganha o

direito de agir sobre os bancos de capacitores existentes no alimentador, 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 os bancos de capacitores. A realimentação do SC é o valor das perdas na rede; usa-se esse valor *antes e depois* da atuação do classificador, para atribuir a recompensa adequada [29].

A descoberta de novas regras é realizada por um AG, aplicando *operadores* (seleção, cruzamento e mutação) sobre um determinado número de classificadores, para gerar *novos classificadores* que serão inseridos na população, substituindo os menos adaptados (com menor energia).

O algoritmo principal do SC 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 algoritmo do SC desenvolvido é apresentado na Fig. 8.

Algoritmo principal do SC

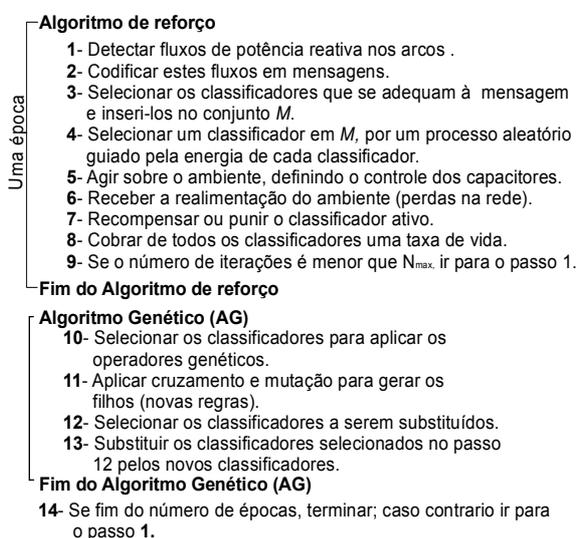


Figura 8. Algoritmo do sistema classificador.

O SC atua apenas quando são detectadas mudanças significativas no perfil de cargas da rede. A cada mudança no perfil de demanda o SC indicará novas configurações para os estados dos bancos de capacitores instalados em cada alimentador, reduzindo as perdas na rede de distribuição.

IV. ESTUDO DE CASOS

Os estudos de casos para a localização e controle de capacitores foram realizados utilizando duas instâncias reais. A primeira corresponde a rede de *Pedro Taques*, denominada *instância PTA*, tem 2645 nós, uma subestação, 2 transformadores e 11 alimentadores e a segunda correspondente a rede de *Praia Grande*, denominada *instância PRG*, contém 5722 nós, duas subestações, 4 transformadores e 27 alimentadores.

O estudo foi realizado considerando o perfil de carga diária representado na Fig. 9.

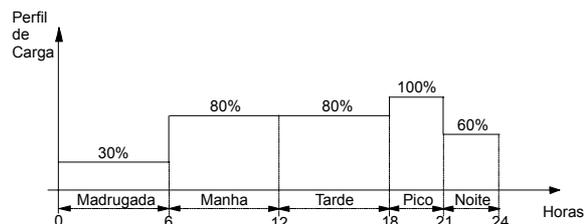


Figura 9. Perfis de carga horária considerada para o estudo de casos.

Para o estudo, utilizaram-se dois tipos de bancos, de 600 kVAr cujo custo foi estimado em R\$ 4.375,55, e de 1.200 kVAr com custo de R\$ 7.092,80. O preço médio da energia elétrica foi estimado em 100,00 R\$ /MWh, com juros de 12 % ao ano e uma taxa de amortização de 5 anos. Os resultados são apresentados a seguir.

Para os testes computacionais os algoritmos foram codificados em linguagem C++, compilador Borland C++ Builder V5.0, usando-se um computador Pentium 4 2,2 GHz com sistema operacional Windows 2000 como plataforma. Para a *instância PTA* foram alocados 18 bancos de capacitores com um total de 11.400 kVAr, sendo que somente um banco era de 1.200 kVAr. Na *instância PRG*, 41 bancos foram alocados, sendo 38 de 600 e 3 de 1200 kVAr, totalizando 26.400 kVAr. A Tabela 1 apresenta os benefícios econômicos da alocação para as duas instâncias.

TABELA I
CUSTOS DISCRIMINADOS DAS SOLUÇÕES PROPOSTAS.

Instâncias	Custo Inicial	Custo Final	Investimento	Custo Total	Ganho	
					R\$	%
PTA	1.109.258	926.893	26.676	953.569	155.689	14,04
PRG	1.799.907	1.506.523	61.405	1.567.928	231.978	12,89

A coluna *Custo Inicial* da Tabela 1 representa o custo anual das perdas na rede. A coluna *Custo Final* traz os valores das perdas após alocação. O *Ganho* representa a economia líquida anual obtida com a instalação dos bancos de capacitores, ou seja, a diferença entre o custo inicial das perdas e o custo total da solução. O valor percentual da coluna representa quanto a solução total (após otimização) melhora a solução inicial (sem bancos alocados). Os tempos computacionais do algoritmo para as instâncias *PTA* e *PRG* foram de 20 e 40 s respectivamente.

Os resultados do controle de reativos indicam quais bancos devem ser substituídos por chaveados (que podem estar ligados ou desligados) e o estado de cada banco nos diversos perfis. Privilegiam-se substituições que apresentem ganho em algum horário. O custo desse tipo de banco é estimado ser 20% maior em relação aos bancos fixos. Para a *instância PTA* são sugeridas seis substituições de bancos de 600 KVAR e uma de 1200 kVAr, devendo estes estar desligados no perfil “Madrugada”. Na *instância PRG* sugere-se a substituição de 15 bancos de 600 KVAR e também uma de 1200 kVAr, novamente desligados na “Madrugada”. A Tabela 2 mostra os benefícios econômicos obtidos com o controle dos bancos, para as duas instâncias no perfil “Madrugada”.

TABELA II
RESULTADOS ECONÔMICOS DO CONTROLE DE REATIVOS.

Instâncias	Custo Inicial	Custo Final	Investimento	Custo Total	Ganho	
					R\$	%
PTA	46.398	35.718	1.942	37.660	8.739	18,83
PRG	68.385	53.727	4.236	57.464	10.921	15,97

Os custos discriminados da solução proposta são apresentados na Tabela 2. A coluna *Investimento* é o resultado da diferença entre o custo do banco fixo (já alocado) e o automático. As vantagens financeiras estão expressas na coluna *Ganho*, que apresenta a diferença entre o *Custo Total* e o *Custo Inicial* das perdas, considerando apenas bancos fixos. O custo total é obtido pela soma do custo de perdas (considerando os bancos automáticos e seus estados) e o investimento anualizado. Para o controle de reativos, o algoritmo utilizou 45 s para a instância *PTA* e 90 s para a instância *PRG*.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma nova metodologia de redução de perdas técnicas associadas aos fluxos de energia reativa em redes primárias de distribuição por meio da localização, dimensionamento e controle de bancos de capacitores.

É proposto o uso de um algoritmo memético para a solução do problema de localização e dimensionamento de capacitores.

A contribuição deste trabalho para o problema de controle dos estados de bancos de capacitores é a especialização da técnica de sistemas complexos adaptativos (também conhecidos como sistemas classificadores). 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 bancos de capacitores.

Os resultados obtidos com redes da CPFL Piratininga validam as metodologias desenvolvidas. Reduções significativas de perdas são alcançadas trazendo ganhos expressivos, da ordem de 12%, quando comparados com a rede sem compensação de reativos, além de conservar os níveis de tensão dentro dos limites permitidos.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bortignon, G. A. and El-Hawary, M. E. (1995). "A review of capacitor placement techniques for loss reduction in primary feeders on distribution systems", *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., pp. 684–687.
- [2] Neagle, N. M. and Samson, D. R. (1956). "Loss reduction from capacitor installed on primary feeders", *AIEE Transactions* pt. III 75: 950–959.
- [3] Cook, R. F. (1959). "Analysis of capacitor application as affected by load cycle", *AIEE Transactions* pt. III 78: 950–957.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Baran, M. E, Wu, F. F., (1989) "Optimal capacitor placement on radial distribution systems", *IEEE Trans. Power Delivery* 4.(1): 725-733.
- [8] Baran, M. E, Wu, F. F., (1989) "Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution systems", *IEEE Trans. Power Delivery* 4(1): 735-743.
- [9] Chiang, H., Wang, J., Cockings, O. and Shin, H. D. (1990). "Optimal capacitor placements in distribution systems: Part 1: A new formulation and the overall problem", *IEEE Transactions on Power Delivery* 5(2): 634–642.
- [10] Chiang, H., Wang, J., Cockings, O. and Shin, H. D. (1990). "Optimal capacitor placements in distribution systems: Part 2: Solution algorithms and numerical results", *IEEE Transactions on Power Delivery* 5(2): 643–649.
- [11] 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
- [12] Boone, G. and Chiang, H. (1993). "Optimal capacitor placement in distribution systems by genetic algorithm", *Electric Power & Energy Systems* 15(3): 155–162.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Moscato, P. (1989). "On evolution, search, optimization, genetic algorithms, and martial arts: Towards memetic algorithms", *Technical Report, Caltech Concurrent Computation Program*, C3P Report 826.
- [16] Lyra, C., Vizcaino, J. F., França, P. M. e Cavellucci, C. (2002). "Estratégias Evolutivas para Otimização do Controle de Reativos com Sazonalidade das Demandas: Levantamento do Estado do Conhecimento e Indicação de Abordagens Metodológicas", *Relatório Técnico R1*, Contrato CPFL/UNICAMP 4600001348, Campinas, São Paulo, Brasil.
- [17] Hsu, Y. Y., Kuo, H. C. (1993) Dispatch of capacitors on distribution system using dynamic programming, *IEEE Proceedings-C*, 140(6): 433–438.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Ahuja, R., Magnanti, T. and Orlin, J. (1993). "Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications", Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- [21] Cavellucci, C. and Lyra, C. (1997). "Minimization of energy losses in electric power distribution systems by intelligent search strategies", *International Transactions in Operational Research* 4(1): 23-33.
- [22] Lyra, C., Vizcaino, J. F., França, P. M. e Cavellucci, C. (2003). "Estratégias Evolutivas para Otimização do Controle de Reativos com Sazonalidade das Demandas: Definição das técnicas e algoritmos", *Relatório Técnico R2*, Contrato CPFL/UNICAMP 4600001348, Campinas, São Paulo, Brasil.
- [23] Holland, J. H. (1975). "Adaptation in Natural and Artificial Systems", The University of Michigan Press.
- [24] Lyra, C., Vizcaino, J. F., França, P. M. e Cavellucci, C. (2003). "Estratégias Evolutivas para Otimização do Controle de Reativos com Sazonalidade das Demandas: Versão preliminar dos programas computacionais", *Relatório Técnico R3*, Contrato CPFL/UNICAMP 4600001348, Campinas, São Paulo, Brasil.
- [25] Moscato, P. "Memetic algorithms: A short introduction". In Glover F., Corne D. and Dorigo, M., editors, *New Ideas in Optimization*. McGraw-Hill, 1999
- [26] M. Baran and F. Wu "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, pp. 1401-1407, 1989.
- [27] Holland, J. H. (1975). "Adaptation in Natural and Artificial Systems," The University of Michigan Press.
- [28] Richards, R. A. (1995). "Zeroth-Order Shape Optimization Utilizing Learning Classifier Systems". Disponível no site <http://www.stanford.edu/~buc/SPHINCS/book.html>.
- [29] Vizcaino, J. F. (2003). "Redução de Perdas em Redes Primárias de Distribuição de Energia Elétrica por Localização e Controle de Capacitores" Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, Campinas – SP.