



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Otimização de Perdas Elétricas em Alimentadores da CELG através da Alocação de Capacitores via Algoritmos Genéticos

Diego Issicaba¹	Ana Barbara Knolseisen¹	Mauricio Sperandio¹
Jorge Coelho¹	Sérgio Luiz Zimath²	Márcio V. P. Alcântara³
¹ LabPlan / UFSC	² Quântico	³ CELG
	abarbara@labplan.ufsc.br	

Palavras-chave: Bancos de capacitores, otimização, perdas elétricas, sistemas de distribuição.

Resumo: Este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia de apoio ao planejamento da distribuição de energia elétrica, visando a redução de perdas elétricas e a melhoria do perfil de tensão na rede de distribuição da CELG (Companhia Energética de Goiás). O modelo proposto busca a alocação ótima de compensação reativa (localização, tipo, tamanho e controle de bancos de capacitores disponíveis em fornecedores do Brasil) em alimentadores de 13,8 e 34,5 kV da CELG, considerando variações de carga ativa e reativa medidas em subestações ao longo do ano. Para tanto, representa-se de forma aproximada a sensibilidade das perdas elétricas e tensões para com a injeção de potência reativa nas barras de rede. A busca pela solução ótima de alocação é realizada por um algoritmo genético, o qual é desenvolvido considerando critérios técnicos de instalação e controle dos bancos. A metodologia é aferida e validada com base nos dados de uma rede real da concessionária.

1. Introdução

As perdas técnicas associadas ao efeito ôhmico nos condutores elétricos são inerentes ao fornecimento de energia elétrica nos níveis de transmissão, subtransmissão e distribuição. Estima-se que as perdas técnicas nos sistemas de distribuição correspondam a 70% do total de perdas elétricas nos sistemas de energia [1, 2].

Em comparação com outras soluções técnicas, como a instalação de reguladores de tensão e a troca de bitola dos condutores (recondutoramento), a instalação de bancos de capacitores em paralelo se caracteriza como a alternativa mais econômica para redução das perdas em sistemas de distribuição. Tais perdas estão diretamente relacionadas à curva de carga dos consumidores supridos, curva esta variável ao longo do ano. Desta forma, a compensação de potência reativa deve considerar tal curva, permitindo a redução de corrente reativa nos ramais de distribuição. Adicionalmente, os níveis de tensão e o carregamento nominal dos alimentadores de distribuição podem ser significativamente melhorados, desde que a compensação reativa seja efetuada nas barras com maiores problemas de suporte de potência reativa.

Este trabalho aborda a otimização e controle de reativos em alimentadores da CELG (Companhia Energética de Goiás), considerando-se todas as características físicas dos alimentadores, como seu traçado completo, mudança de bitolas, posição e variação das cargas no tempo. O problema é então formulado como um problema de otimização combinatória, considerando objetivos conflitantes como minimização do custo de instalação e compra dos capacitores e máxima redução das perdas técnicas.

Como abordagem, representou-se matematicamente a sensibilidade das perdas e tensões nas barras de rede, para com a injeção de potência reativa. A busca pela solução ótima de alocação é realizada por um algoritmo genético, o qual foi desenvolvido considerando critérios técnicos de instalação e controle dos bancos. A metodologia é aferida e validada com base em uma rede real da concessionária.

O artigo está organizado como segue. Na seção 2, apresenta-se o método de fluxo de carga utilizado, o cálculo desenvolvido para a avaliação da sensibilidade de cada barra de rede, assim como uma breve descrição dos algoritmos genéticos. Na seção 3, a metodologia para compensação reativa é descrita, com foco na pré-seleção de barras, uso de sensibilidades, variação de curvas de carga, codificação do algoritmo genético, como também critérios para com o controle automático de bancos de capacitores. Na seção 4, resultados para um alimentador real da CELG são apresentados, com o fim de validar a metodologia desenvolvida. Na seção 5, conclusões finalizam o documento.

2. Metodologia de Análise e Otimização

2.1. Método Soma das Potências

Dentre os métodos de varredura utilizados na análise de redes de distribuição radiais, destaca-se o Método de Soma das Potências (MSP) [3, 4] pela eficiência e robustez. Para uma breve descrição do método, considere a representação genérica de uma rede de distribuição, mostrada na Figura 1.

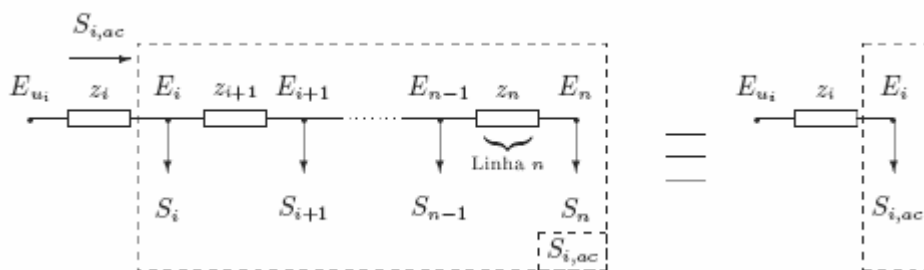


Figura 1: Rede radial genérica de distribuição – Método Somas das Potências.

Observa-se que, em função da topologia radial da rede, o fluxo de carga injetado na barra i por meio da linha i , denotado por $S_{i,ac} = P_{i,ac} + jQ_{i,ac} = s_{i,ac} \angle \delta_{i,ac}$, é o fluxo que supre as cargas e perdas dispostas à jusante da linha i . Esse fluxo pode também ser interpretado como uma carga acumulada na barra i , e escrito como uma função das cargas, cargas acumuladas e tensões complexas nas barras à jusante da linha i , como segue:

$$P_{i,ac} = P_i + \sum_{d \in D_i} P_{d,ac} + \sum_{d \in D_i} r_d \left(\frac{P_{d,ac}^2 + Q_{d,ac}^2}{V_d^2} \right) \quad (1)$$

$$Q_{i,ac} = Q_i + \sum_{d \in D_i} Q_{d,ac} + \sum_{d \in D_i} x_d \left(\frac{P_{d,ac}^2 + Q_{d,ac}^2}{V_d^2} \right) \quad (2)$$

nos quais D_i representa o conjunto de barras imediatamente à jusante da barra i .

Ademais, manipulando-se a equação de queda de tensão da rede, obtém-se a relação abaixo:

$$V_i = (B_i - A_i)^{0.5} \quad (3)$$

na qual,

$$A_i = r_i P_{i,ac} + x_i Q_{i,ac} - 0,5V_{u_i}^2 \quad (4)$$

$$B_i = \left[A_i^2 - (P_{i,ac}^2 + Q_{i,ac}^2)(r_i^2 + x_i^2) \right]^{0.5} \quad (5)$$

Por meio das equações acima, pode-se descrever o Método de Soma das Potências em duas partes fundamentais. Primeiramente, com o uso dos valores de tensão obtidos até então pelo método (para o caso da primeira iteração, utiliza-se uma solução aproximada ou estado plano), calculam-se os fluxos de carga injetados pela rede em cada barra, com uma varredura das barras finais em direção à barra da subestação, por (1)-(2). Em seguida, utilizam-se desses fluxos de carga para o cálculo da queda de tensão nas linhas por (3)-(5), a partir da subestação e em direção às barras finais da rede, e assumindo a barra da subestação como barra de referência angular com tensão constante. Esses dois procedimentos são repetidos até a convergência das tensões nas barras.

2.2. Análise de Sensibilidade

Uma das contribuições da metodologia desenvolvida está na determinação da sensibilidade da variação das tensões e das perdas técnicas em cada barra de um sistema de distribuição, sem que sejam necessárias novas soluções de fluxo de carga. Uma Matriz de Sensibilidade foi desenvolvida para aproximar o efeito das novas injeções de potência sobre o perfil de tensão de um alimentador, a partir do equacionamento do Método de Soma das Potências.

2.2.1. Considerações Iniciais

A matriz de sensibilidade proposta é obtida através das derivadas da tensão em relação às potências ativa e reativa acumuladas em cada barra, dado um ponto de operação pré-calculado. Realizou-se para tanto uma aproximação da variação da tensão para com a variação da carga, usando a expansão em série de Taylor. Tal variação ΔV_i em cada barra i é dada por,

$$\Delta V_i = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial V_i}{\partial P_k} \Delta P_k + \frac{\partial V_i}{\partial Q_k} \Delta Q_k \right) \quad (6)$$

Considerando que o foco é o impacto da compensação de potência reativa, pode-se eliminar a variação da injeção de potência ativa da análise, sem perda de informação. Como consequência, tem-se que:

$$\Delta V_i = \sum_{k=1}^n \frac{\partial V_i}{\partial Q_k} \Delta Q_k \quad (7)$$

Além disso, a equação (7) pode ser escrita na forma matricial,

$$\Delta \mathbf{V} = \mathbf{MS}_Q \Delta \mathbf{Q} \quad (8)$$

na qual $\Delta \mathbf{V}$ e $\Delta \mathbf{Q}$ são vetores com tamanho $(n \times 1)$ denotando, respectivamente, a variação das magnitudes de tensão e a variação de injeção de potência reativa nas n barras do sistema. Ademais, \mathbf{MS}_Q é uma matriz $(n \times n)$ denominada Matriz de Sensibilidade, e assume a seguinte forma:

$$\mathbf{MS}_Q = \begin{pmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial Q_1} & \frac{\partial V_1}{\partial Q_2} & \dots & \frac{\partial V_1}{\partial Q_n} \\ \frac{\partial V_2}{\partial Q_1} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \frac{\partial V_{n-1}}{\partial Q_n} \\ \frac{\partial V_n}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial V_n}{\partial Q_{n-1}} & \frac{\partial V_n}{\partial Q_n} \end{pmatrix} \quad (9)$$

Na equação (9) as linhas da \mathbf{MS}_Q são índices para as tensões, enquanto as colunas são indexadas pelas cargas. Uma vez construída, a matriz pode apontar em qual barra os capacitores podem/devem ser alocados de forma a obter uma máxima melhora no perfil de tensão da rede. Tal informação é utilizada na pré-seleção de barras de rede.

2.2.2. Derivadas Parciais

Conforme pode ser observado em (9), a matriz de sensibilidade reativa \mathbf{MS}_Q é formada por derivadas parciais, cuja dedução matemática completa foi apresentada em [5]. A derivada parcial de cada barra i em relação a injeções na barra i da rede é dada por:

$$\frac{\partial V_i}{\partial Q_i} = \frac{1}{2V_i} \cdot (B'_{ii} - A'_{ii}) \quad (10)$$

na qual,

$$A'_{ii} = X_i - \frac{1}{2} \frac{\partial V_{u_i}^2}{\partial Q_i} \quad (11)$$

$$B'_{ii} = \frac{1}{B_i} \left(R_i X_i P_i - R_i^2 Q_i - 0,5 X_i V_{u_i}^2 + \Lambda_{ii} \right) \quad (12)$$

$$\Lambda_{ii} = \frac{1}{8} \frac{\partial V_{u_i}^4}{\partial Q_i} - \frac{1}{2} \frac{\partial V_{u_i}^2}{\partial Q_i} (R_i P_i + X_i Q_i) \quad (13)$$

Pode-se notar ainda que, se $i=1$ então V_{u_i} é a tensão na barra da subestação. Desta forma, V_{u_i} é uma constante e, por conseguinte, $\frac{\partial V_{u_i}}{\partial Q_i} = 0$. Conseqüentemente, (11) e (12) podem ser simplificadas na primeira barra por:

$$\frac{\partial V_1}{\partial Q_1} = \frac{1}{2V_1} (B'_{11} - A'_{11}) \quad (14)$$

no qual,

$$A'_{11} = X_1 \quad (15)$$

$$B'_{11} = \frac{1}{B_1} \left(R_1 X_1 P_1 - R_1^2 Q_1 - \frac{1}{2} X_1 V_0^2 \right) \quad (16)$$

Expressões similares podem ser analiticamente obtidas para as outras sensibilidades. Um fator simplificador do cálculo dessas sensibilidades é apresentado em [5], no qual mostra-se que a relação,

$$rel = \frac{\partial V_{u_i}}{\partial Q_i} \left(\frac{\partial V_{u_i}}{\partial Q_{u_i}} \right)^{-1} \quad (17)$$

varia na prática entre 0,998 e 1,001 para redes reais. Assim, tem-se a sensibilidade da tensão na barra u_i relacionada com a injeção de potência reativa na barra i aproximada por:

$$\frac{\partial V_{u_i}}{\partial Q_i} \approx \frac{\partial V_{u_i}}{\partial Q_{u_i}} = \frac{1}{2V_{u_i}} (B'_{u_i} - A'_{u_i}) \quad (18)$$

Como conseqüência, tem-se que:

$$\frac{\partial V_{u_i}^2}{\partial Q_i} \approx \frac{\partial V_{u_i}^2}{\partial Q_{u_i}} = 2V_{u_i} \frac{\partial V_{u_i}}{\partial Q_{u_i}} \quad (19)$$

$$\frac{\partial V_{u_i}^4}{\partial Q_i} \approx \frac{\partial V_{u_i}^4}{\partial Q_{u_i}} = 4V_{u_i}^3 \frac{\partial V_{u_i}}{\partial Q_{u_i}} \quad (20)$$

As sensibilidades podem ser assim calculadas em uma varredura da subestação até as barras finais. Um algoritmo completo descrevendo esse cálculo é apresentado em [6].

2.3. Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são métodos numéricos de otimização simples, flexíveis, robustos e particularmente úteis na solução de problemas combinatórios sem tempo polinomial determinístico, como é o caso da alocação de capacitores [2, 7-11]. Seus passos principais são:

Passo 1: Gerar uma população inicial;

Passo 2: Avaliar a aptidão dos indivíduos da população;

Passo 3: Repetir

- i. selecionar ancestrais da população;
- ii. efetuar o cruzamento entre os ancestrais;
- iii. realizar mutação em alguns descendentes gerados;
- iv. avaliar a aptidão dos descendentes gerados;
- v. substituir alguns indivíduos da população (ou todos) pelos descendentes;

Até que uma solução satisfatória tenha sido encontrada

2.3.1. Estrutura do Cromossomo

Trata-se de um dos elementos fundamentais na formulação do processo evolutivo, sendo a estrutura onde são armazenadas as características das soluções. Cada solução (indivíduo) modela um ponto do espaço busca do problema, e é representada por um vetor de comprimento finito contendo elementos chamados genes.

2.3.2. Avaliação e Aptidão

Aptidão representa a capacidade do indivíduo se adaptar ao meio ambiente. No caso de problemas de otimização combinatória, a medida de aptidão se relaciona com o valor da função objetivo. Refere-se de uma quantificação da otimalidade de uma solução, permitindo uma comparação direta entre diferentes indivíduos. O valor de aptidão é usado para selecionar pares de indivíduos para cruzamento e para transcrever cromossomos para a próxima geração.

2.3.3. Processo de Seleção

A cada iteração do algoritmo, uma porção da população é selecionada para realizar cruzamentos de cromossomos, assim como produzir novos indivíduos. As soluções ocorrem por meio de processos baseados na avaliação da aptidão, nos quais indivíduos mais aptos têm maior probabilidade de serem escolhidos. Alguns métodos avaliam toda a população e fazem uma classificação decrescente, outros selecionam apenas uma amostra da população, se o processo de avaliação demandar muito tempo. A maioria das estratégias de seleção são estocásticas, assim como concebida de forma a manter uma pequena proporção de soluções com menor aptidão. Isto ajuda a manter a diversidade de soluções e evita uma convergência prematura do algoritmo para um ótimo local. Os métodos mais populares de seleção são: Classificação Direta, Roleta (Simple e Ponderada) e Torneio.

2.3.4. Processo de Reprodução

A reprodução (cruzamento) é um dos principais mecanismos do AG, a qual gera novas soluções a partir da troca de genes entre dois cromossomos. Os ancestrais são selecionados de acordo com um dos processos descritos anteriormente, e então um dos operadores de reprodução é aplicado. O modo de cruzamento mais comum é o cruzamento simples (*single point crossover*), que consiste em escolher um ponto de corte aleatório na estrutura dos cromossomos ancestrais, e combinar a parte à esquerda do corte de um ancestral com a parte à direita do corte do outro ancestral. Esta operação permite que para cada par de ancestrais selecionados, dois novos descendentes sejam gerados.

2.3.5. *Processo de Mutação*

Ao contrário do processo de cruzamento, o operador de mutação é um mecanismo importante para a diversificação do espaço de busca, o que ajuda o algoritmo a não ficar preso em soluções sub-ótimas. Por meio deste operador, informações que foram eliminadas pelo processo de reprodução, ou que ainda não faziam parte da população, poderão ser introduzidas na próxima geração. No caso de cromossomos com listas ordenadas, o espaço de estados visitados fica limitado às combinações possíveis entre indivíduos da população inicial se não ocorrer mutação.

2.3.6. *Processo de Convergência*

A resolução da maioria dos problemas formulados com AGs tende a exigir um grande número de iterações até a convergência. As condições mais comuns para se determinar a convergência do processo são: satisfação de um determinado critério, inspeção manual, número máximo de gerações (iteraões), limite de tempo ou caso o valor da melhor aptidão não melhore por um determinado número de gerações. A combinação das três últimas opções fornece uma completa caracterização da convergência do algoritmo. Uma das principais vantagens deste tipo de algoritmo é que ao final do processo se tem, além da solução principal, várias alternativas com valores próximos desta.

3. **Metodologia de Compensação Reativa**

3.1. *Pré-Seleção das Barras e Uso da Matriz de Sensibilidade*

Antes da execução do algoritmo de compensação reativa da rede, é possível reduzir o espaço de busca de solução com uma pré-seleção de barras de rede. Com esse procedimento, reduz-se o tempo computacional de simulação, bem como se podem priorizar barras nas quais é desejada uma elevação do perfil de tensão. Primeiramente, deve-se selecionar para execução do algoritmo apenas as barras nas quais se faz viável, em termos de infra-estrutura, a instalação de bancos de capacitores em derivação. O acesso ao ponto de carga também é fator a ser considerado, para o caso de inspeção periódica dos bancos pela CELG. Finalmente, dado um ponto de operação sob carga média e sem a alocação de capacitores, selecionam-se as barras mais sensíveis à injeção de carga reativa, de acordo com a modelagem apresentada na seção 2.2.

3.2. *Variação da Curva de Carga*

O projeto com a CELG conta a medição de variáveis elétricas como corrente, tensão e potência ativa e reativa, nas saídas de seus alimentadores, em intervalos de 10 minutos. Estes dados são armazenados diariamente em arquivos no formato *comtrade* para análise posterior.

A idéia básica da metodologia de compensação reativa é a obtenção de patamares de carga a partir de um histograma obtido de uma série de curvas de carga compreendidas em um período especificado pelo usuário, como é apresentado na Figura 2. Com isso, fatores de demanda são calculados e multiplicados às potências instaladas nos transformadores de distribuição, de forma a aproximar a variação pontual das cargas consumidoras. O algoritmo então busca uma configuração de alocação de kVAr que otimize a rede nesses patamares. Uma transição de patamares pode também significar uma transição entre estados de compensação quando forem considerados capacitores controlados.

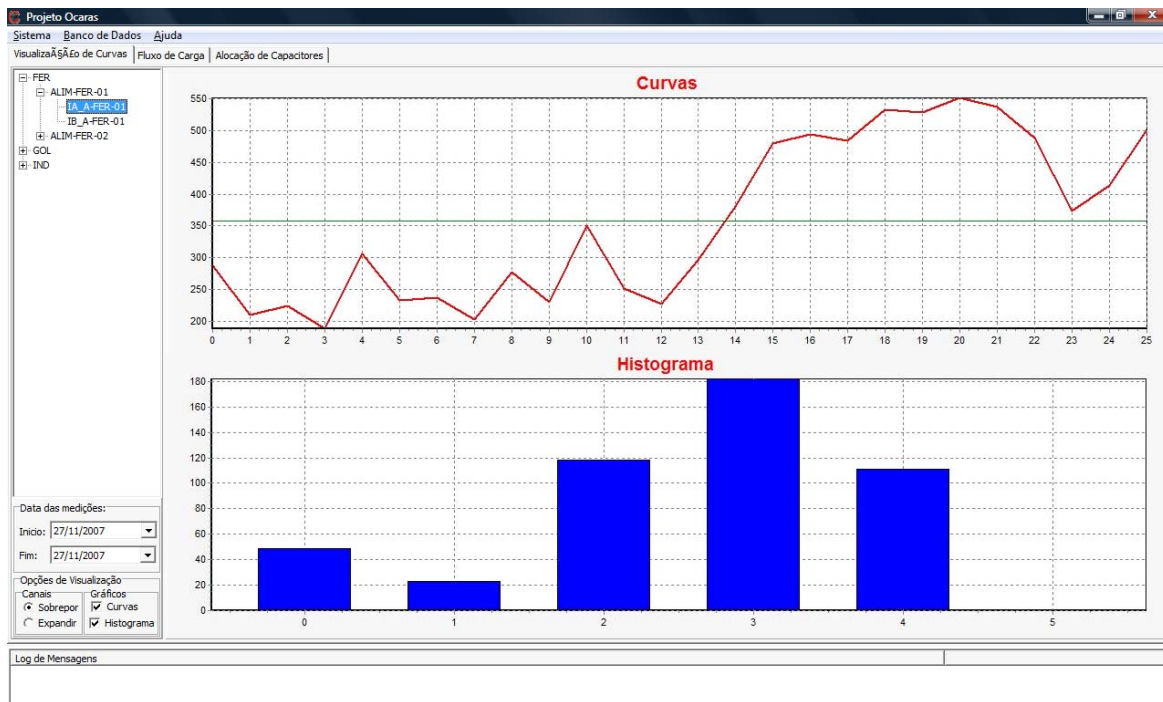


Figura 2: Variação da curva de carga – patamares de carga de curvas diárias médias.

A curva de carga também pode ser extrapolada para novos períodos de análise, com a utilização de uma taxa anual de crescimento da carga. Desta forma, é possível verificar soluções de alocação tanto em horizontes anuais completos, como em horizontes unicamente definidos por períodos sazonais específicos (alguns meses, por exemplo).

3.3. Codificação do AG

O problema de alocação ótima de capacitores, como apresentado em [12], consiste em determinar a localização, número, tamanho e tipo de bancos de capacitores a serem instalados nos alimentadores de distribuição. Quanto à aplicação de AGs para a otimização da alocação [13], salienta-se que a escolha da codificação cromossômica tem papel fundamental no adequado funcionamento da metodologia.

Nesta abordagem, estabelece-se que cada possível solução do problema de alocação é modelada como um indivíduo do AG. Dentre as representações cromossômicas, as mais utilizadas são aquelas nas quais os indivíduos contêm de 3 a 5 genes para cada barra, referentes a informações de tamanho, tipo, e patamares de carga para o acionamento dos bancos. Apesar do número de aplicações existentes com essa codificação, verifica-se que na prática não é esperado um número elevado de bancos alocados como solução. Por conseguinte, modela-se com essa codificação uma porção do espaço de busca que não deve ser explorada pelo método. Tal porção dificulta a convergência, bem como o estabelecimento de parâmetros padrão de execução do algoritmo.

Alternativamente, adotou-se uma codificação na qual se opta pelo número de bancos de capacitores a serem alocados antes da simulação propriamente dita. Desta forma, a partir das considerações técnicas quanto às estratégias de controle dos equipamentos (vide seção 3.4), se faz possível associar para cada banco quatro genes característicos. O primeiro gene armazena a barra na qual o banco é alocado enquanto o segundo armazena o patamar de carga no início do qual o capacitor deve ser acionado. Por sua vez, o terceiro gene armazena o patamar no fim do qual o capacitor deve ser desligado, e o quarto gene armazena um código para o tamanho (em kVAr) nominal do banco. Caso o segundo gene armazene o primeiro patamar de carga, e o terceiro gene armazene o último patamar de carga,

caracteriza-se a instalação de um banco fixo de capacitores. A codificação descrita compreende todo o espaço de busca de interesse (sem redundâncias), facilitando a escolha de parâmetros padrão.

Como exemplo, seja um alimentador de 510 barras, no qual se opta por considerar 152 barras sensíveis e uma a curva diária de carga dividida em 6 patamares. Dispõe-se de bancos de tamanho 300 kVAr (código 1) e 600 kVAr (código 2). Optando-se pela alocação de três capacitores na rede, um exemplo de indivíduo representado pela codificação desenvolvida é apresentado na Figura 3.

32	1	6	1	15	1	6	2	118	3	5	2
----	---	---	---	----	---	---	---	-----	---	---	---

Figura 3: Codificação de um cromossomo para o problema de alocação.

Para este indivíduo, é indicada a alocação de um banco de 300 kVAr na barra 32, bem como dois bancos de 600 kVAr nas barras 15 e 118. Os dois primeiros bancos de capacitores devem ser acionados no início do primeiro patamar, e desligados ao final do último patamar (6º patamar diário). Portanto, este banco se caracteriza como fixo. Analogamente, tem-se que o banco de capacitores na barras 118 é um banco automático, que deve ser acionado no início de terceiro patamar, e desligado ao final do quinto patamar.

Destaca-se que alguns cuidados devem ser tomados na aplicação dos operadores genéticos com este tipo de codificação. É preciso garantir que a mutação resulte em bancos que não serão desligados antes de acionados, assim como devem ser respeitados os limites máximos que cada gene (por exemplo, o primeiro gene assume valores inteiros de 1 até 152). Uma estratégia para melhorar a diversidade das soluções é introduzir via mutação, valores de pares que ainda não apareceram na população. Estratégias de elitismo são utilizadas e optou-se pela Roleta Ponderada como processo de seleção. O critério de parada foi o número máximo de gerações.

Considerando como objetivo do problema a redução das perdas elétricas, assim como custo dos bancos de capacitores, a função aptidão é dada por:

$$\min f(x, z) = \min f_C(x, z) + f_L(x, z) \quad (21)$$

sujeito a,

$$g(x, z) = 0 \quad (22)$$

nos quais $f_C(x, z)$ denota o custo de compra, instalação e inspeção dos bancos, $f_L(x, z)$ denota o custo das perdas elétrica no período de análise, assim como $g(x, z)$ representa as equações de balanço de potência.

Finalmente, destaca-se que a escolha do número de barras sensíveis permite que o critério de elevação de tensão seja considerado indiretamente, sem incluir ponderações heurísticas na função aptidão, e visando sempre um máximo retorno financeiro para a CELG. A priorização da elevação do perfil de tensão é realizada restringindo o espaço de busca a um número pequeno de barras sensíveis. Por outro lado, a priorização da elevação do retorno financeiro pela redução das perdas é realizada optando-se por um número elevado de barras sensíveis na análise. Desta forma, representam-se os critérios de tensão e perdas elétricas, sem alterar a interpretação monetária da função objetivo do problema.

3.4. Controle Automático de Compensação Reativa

Destaca-se inicialmente que, dentre os diversos tipos de controle para bancos de capacitores apresentados, apenas dois se mostraram interessantes para com o projeto, o controle por tempo e o por

tensão, sendo selecionados ambos em conjunto para se obter um resultado mais eficaz. De fato, os demais tipos de controles baseados em potência reativa e corrente exigem a instalação de sensores de corrente diretamente nos alimentadores, ou através de transformadores de corrente (TC), tornando mais cara a solução de controle automático. Devido a restrições econômicas, estes tipos de controle não foram considerados no projeto de pesquisa.

Salienta-se ainda, que o uso individual do controle por tempo não se mostra eficaz pois não leva em consideração a variação da carga em finais de semana e feriados, desta forma, o uso combinado com o nível de tensão serve como baliza para o acionamento somente em uma janela de tempo pré-determinada, e se o nível de tensão indicar que a compensação é necessária. Ademais, visando a melhora da vida útil do banco de capacitores, os controladores também possuem mecanismos de limitação da quantidade de operações de chaveamento do banco, além de *delays* programáveis entre chaveamentos de forma a se evitar chaveamentos sucessivos do banco.

Estabeleceu-se como estratégia do projeto que os bancos serão acionados, no máximo, apenas uma vez por dia, e sob os estados: ligado (1) e desligado (0). A tensão de referência para o acionamento dos bancos, bem como a janela de tempo de acionamento, são soluções de planejamento obtidas pelo algoritmo.

4. Simulações e Resultados

Nesta seção, apresenta-se resultados obtidos com a aplicação da metodologia desenvolvida em um alimentador da CELG, composto por 790 barras e 264 pontos de carga, mostrado na Figura 4.

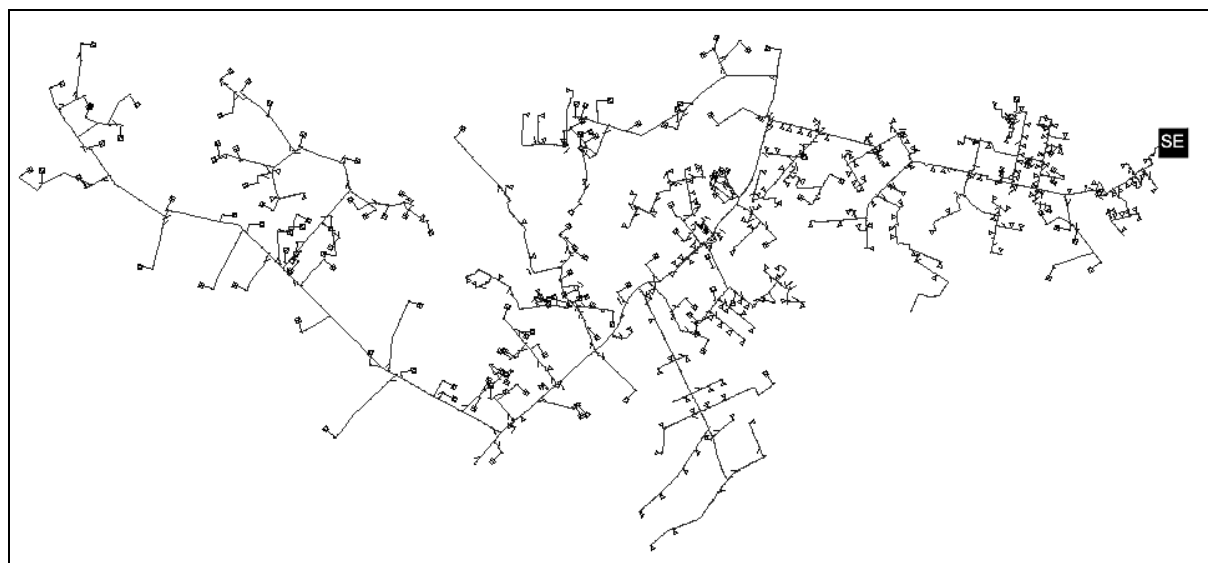


Figura 4: Alimentador da CELG utilizado na simulação.

Com a análise de fluxo de carga, obteve-se as perdas técnicas e as tensões mínimas do alimentador, dividindo-se a curva de carga em 6 patamares. Esses resultados são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Patamares de carga do alimentador.

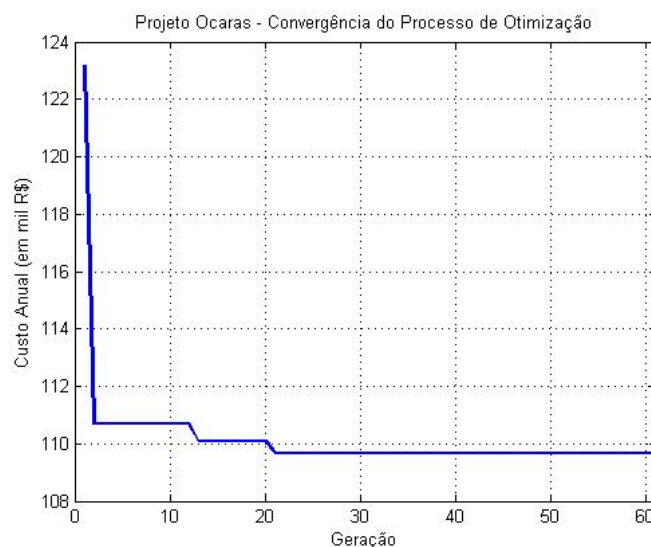
Patamar	Fator de Demanda	Perdas Elétricas (kW)	Tensão Mínima (p.u.)
1	0,1932	27,3600	0,9640
2	0,2383	42,2010	0,9553
3	0,3349	85,9780	0,9361
4	0,2834	60,5370	0,9464
5	0,2447	44,6030	0,9540
6	0,1159	9,6240	0,9787

Como a tarifa média para este alimentador é de 0,31219 R\$/kWh, tem-se um gasto anual de R\$ 123.202,85, referente às perdas técnicas deste alimentador. Conforme destacado, esses gastos podem ser consideravelmente reduzidos por meio de inserção de bancos de capacitores em derivação. Para tanto, disponibilizaram-se quatro diferentes tipos de bancos para instalação em postes (modelos comerciais comumente utilizados pela CELG), cujos preços médios são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Dados técnicos dos bancos de capacitores utilizados no estudo de caso.

Banco	Tamanho (kVAr)	Tipo	kV	Custo (R\$)
A	300	Fixo	13,8	9.000,00
B	600	Fixo	13,8	15.000,00
C	300	Automático	13,8	11.000,00
D	600	Automático	13,8	18.000,00

Para as simulações numéricas, foram utilizadas 250 barras sensíveis, e uma população de 100 indivíduos avaliados em 60 gerações. Escolheu-se como parâmetros de simulação: probabilidades de cruzamento e mutação de 0,85 e 0,05, respectivamente. Como resultado, obteve-se a alocação de dois bancos de 300 kVAr. O primeiro deles é de tipo fixo, e o segundo de tipo automático com janela de acionamento entre o primeiro e o quinto patamar. Na Figura 5, apresenta-se o gráfico de convergência do algoritmo, evidenciando-se o valor mínimo de função objetivo para a população, em geração do algoritmo.

**Figura 5:** Valor mínimo de função objetivo obtido em cada geração do algoritmo.

A Tabela 3 apresenta as perdas técnicas e tensão mínima por patamar, obtidos com a alocação dos capacitores no alimentador.

Tabela 3: Resultados comparativos da alocação de capacitores.

Patamar	Perdas Elétricas (kW)	Tensão Mínima (p.u.)
1	18,5310	0,9791
2	27,9700	0,9706
3	59,3320	0,9519
4	40,6620	0,9619
5	29,5810	0,9693
6	7,5040	0,9859

Como pode ser observado nas tabelas, verificou-se uma significativa redução das perdas técnicas assim como uma elevação das tensões mínimas do alimentador, em todos os patamares de carga. Com a instalação da compensação reativa indicada pela metodologia, os gastos referentes às perdas técnicas foram reduzidos para R\$ 83.675,61, gerando um retorno financeiro anual de R\$ 19.527,24.

5. Conclusões

Este trabalho apresenta uma metodologia baseada em algoritmos genéticos para a alocação ótima de compensação reativa em sistemas de distribuição radiais, com o fim de otimizar perdas técnicas. A abordagem apresenta um elevado grau de generalidade matemática juntamente com um elevado grau de praticidade. A busca pela solução ótima de alocação considera critérios técnicos de instalação e controle dos bancos (controle por tempo e por tensão, sendo selecionados ambos em conjunto), englobando a redução das perdas técnicas e o custo dos bancos de capacitores em sua função objetivo. A escolha do número de barras sensíveis à alocação, apontada por uma matriz de sensibilidade proposta, permite que o critério de elevação de tensão seja considerado indiretamente.

Antes da execução do algoritmo de compensação reativa, estabeleceu-se como procedimento a redução do espaço de busca de solução com uma pré-seleção de barras de rede, selecionando-se apenas as barras nas quais se faz viável, em termos de infra-estrutura, a instalação de bancos de capacitores em derivação. O acesso ao ponto de carga também é fator considerado, para o caso de inspeção periódica dos bancos pela CELG.

A aplicação da metodologia proposta em um alimentador de 13,8 kV da CELG (Companhia Energética de Goiás), empresa da região Centro-Oeste do Brasil, composto por 790 barras e 264 pontos de carga, apresentou resultados adequados. Com a alocação de bancos de capacitores houve redução significativa nas perdas elétricas do sistema, e conseqüente aumento na tensão mínima dos alimentadores. Ainda, em termos de custos, o investimento neste alimentador gera retorno financeiro à concessionária de forma a obter lucro já no ano seguinte.

Assim, a metodologia proposta se mostrou uma valiosa ferramenta de apoio ao planejamento, operação e gestão de sistemas de distribuição ao indicar a melhor solução técnica para a alocação de compensação reativa.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro proporcionado pela Companhia Energética de Goiás (CELG) e suporte a este trabalho.

7. Referências Bibliográficas

- [1] BUNCH, J.B., MILLER, R.D. Distribution system integrate voltage and reactive power control. IEEE Power Engineering Society, 101, 1982, p. 284–289.
- [2] MENDES A., FRANÇA, P.M. Capacitor placement in large-sized radial distribution networks, replacement and sizing of capacitor banks in distorted distribution networks by genetic algorithms. IEEE Proceedings Generation, Transmission & Distribution, Vol. 152, 2005, p. 498–516.
- [3] BROADWATER, R.P.; CHANDRASEKARAN, A.; HUDDLESTON, C.T.; KHAN, A.H. Power flow analysis of unbalanced multiphase radial distribution systems. Electric Power Systems Research, v. 14, n. 1, p. 23-33, February 1988.
- [4] CESPEDES, R.G. New method for the analysis of distribution networks. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 5, n. 1, p. 391-396, January 1990.
- [5] SAMBAQUI, A.B.K. Metodologias para Melhoria do Perfil de Tensão em Sistemas de Distribuição. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Julho 2005. 248p.
- [6] KNOLSEISEN, A.B.; ISSICABA, D.; SPERANDIO, M.; COELHO, J.; BETTIOL, A.L.; ALCÂNTARA, M.V.P. Sensitivity Matrix for the Capacitor Placement Problem in Radial Distribution System. CEE'07-2nd International Conference on Electrical Engineering, Coimbra, Portugal, Nov. 2007.
- [7] MASOUM, M.A.S.; LADJEVARDI, M. Optimal placement, replacement and sizing of capacitor banks in distorted distribution networks by genetic algorithms. IEEE Transactions on Power Delivery, 19 (4), 2004.
- [8] SANTOS, J.R.; EXPOSITO, A.G. A reduced-size genetic algorithm for optimal capacitor placement on distribution feeders. IEEE MELECON 2004, 2004.
- [9] AI-MOHAMMED, A.H. Capacitor placement in distribution systems using artificial intelligent techniques. IEEE Bologna PowerTech Conference, 2003.
- [10] RONG, Z., XIYUAN, P. Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems. IEEE TENCON02, 2002.
- [11] DELFANTI, M.; GRANELLI, G.P. Optimal capacitor placement using deterministic and genetic algorithms. IEEE Transactions on Power Delivery, 15 (3), 2000.
- [12] ISSICABA, D.; BETTIOL, A.L.; COELHO, J.; ALCANTARA, M.V.P.; Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Systems by Reinforcement Learning Approach. WSEAS Transactions on Power Systems, v. 1, p. 1389-1395, 2006.
- [13] COELHO, J.; BETTIOL, A.L.; ISSICABA, D.; KNOLSEISEN, A.B.; ALCANTARA, M.V.P.; Alocação de Compensação Reativa em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Radiais. III Congresso Cier de Energia, Medellin, 2007.