

Determinação ótima de pontos de conexão de geradores em redes de distribuição através de um algoritmo genético com suporte de gradiente em árvore

Rodrigo Augusto do Nascimento Gomes *

Max Chianca Pimentel Filho **

Manoel Firmino de Medeiros Jr. ***

(*) COSERN, (**) UFERSA, Caraúbas

(***) DCA, UFRN

Resumo— A conexão de gerações pode trazer benefícios para a rede elétrica, inclusive postergando investimentos financeiros pelas distribuidoras. Para isso, ferramentas de estudo são necessárias. Perdas elétricas, apesar de serem indesejadas, são inerentes a toda rede de distribuição de energia elétrica. A conexão de gerações, desde que previamente estudadas, poderá otimizar essas perdas da rede e provocar melhora no nível de tensão. A utilização conjunta de dois métodos de otimização mostrou-se uma boa estratégia implementada em software para estudo e tomada de decisões na conexão de geradores na rede.

Palavras Chaves—Otimização, perdas, conexão, geração.

I. INTRODUÇÃO

Esse artigo mostra os resultados de simulações realizadas com um software desenvolvido para a alocação ótima de geração de potência ativa nas barras de redes de distribuição, objetivando a otimização de perdas elétricas.

Atualmente a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis constitui uma tendência notável em diversos países, inclusive com a concessão de incentivos. Os incentivos financeiros e a revisão na legislação regulatória tem tornado isso um mercado atraente.

Os estímulos à geração distribuída justificam-se pelos potenciais benefícios que tal modalidade pode proporcionar ao sistema elétrico, tais como a postergação de investimentos em expansão dos sistemas de distribuição e transmissão, a redução no carregamento das redes, a redução de perdas elétricas e a diversificação da matriz energética, entre outros.

A otimização das perdas elétricas tem sido focada pelas distribuidoras, mas para que se consiga diminuí-las são necessários investimentos em recondutoramento de redes, construção de novas subestações, instalação de banco de capacitores, divisão e reconfigurações de circuitos. Todas

essas hipóteses demandam investimentos financeiros por parte das distribuidoras.

Poder otimizar perdas elétricas através da conexão de gerações distribuídas traz para a distribuidora a possibilidade de postergar esses investimentos financeiros que seriam necessários para a redução delas e proporciona uma melhora na eficiência de seu sistema.

Portanto, já que a redução das perdas pode ser alcançada através da conexão de gerações, surge a necessidade da criação de ferramentas que possam auxiliar na tomada de decisões antes da conexão desses geradores. Essa necessidade motivou este trabalho. A função objetivo da referência [1] foi utilizada e para minimizá-la criou-se um software que servirá como ferramenta para o Engenheiro de Planejamento, tendo sido utilizado para obtenção dos resultados apresentados neste trabalho.

II. O SOFTWARE

O software desenvolvido é composto por um algoritmo genético em conjunto com um fluxo de carga ótimo que usa o método do gradiente, para fazer a indicação das melhores barras para a conexão de gerações de potência ativa.

III. ALGORITMO GENÉTICO

A ideia básica de funcionamento dos algoritmos genéticos (AG's) é a de tratar as possíveis soluções do problema como indivíduos de uma população, que irá evoluir a cada iteração ou geração [2].

A população inicial do algoritmo genético foi composta por oito indivíduos, cada um composto por três genes. Os genes representam uma combinação de três possíveis barras escolhidas aleatoriamente, para conexão dos geradores. Para evitar que as barras escolhidas na formação do indivíduo estejam concentradas em uma única parte da rede, foi adotada a

estratégia de criação de três regiões, onde cada região contém um conjunto de possíveis barras para cada gene do indivíduo. Cada região é formada por um conjunto de barras cuja soma das cargas delas chega a 1/3 da carga da rede.

Na rede simulada, as três regiões criadas foram compostas pelas seguintes barras:

Região S: barras 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32 e 33

Região R: barras 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 e 21

Região T: barras 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12

Após serem escolhidas as barras e criados os indivíduos, cada indivíduo é avaliado em um processo que define a aptidão ou “fitness” do indivíduo. No software a aptidão representa o percentual de redução de perdas conseguido através da injeção de potência ativa apenas nas três barras selecionadas. Essa aptidão é obtida executando um fluxo de carga ótimo. Em seguida, através de um operador de seleção do tipo roleta, escolhem-se alguns indivíduos. Nessa operação os indivíduos de melhor aptidão possuem maior probabilidade de serem escolhidos.

Sobre esses indivíduos selecionados são aplicadas novas operações que misturem suas características, através do operador de cruzamento (*crossover*). No operador de cruzamento (*crossover*), uma parte dos cromossomos dos indivíduos selecionados pela roleta são permutados, dando origem a novos indivíduos. A intenção dessa operação é a criação de novos indivíduos que potencialmente combinem as melhores características dos indivíduos selecionados anteriormente pela roleta. No AG não foi utilizada mutação. Os indivíduos criados após a aplicação dos operadores de seleção e cruzamento constituem um novo conjunto de possíveis soluções, chamado de nova geração.

Os critérios de parada para os AG's podem ser quando o AG atingir um dado número de gerações, chegar ao valor ótimo da função objetivo se este for conhecido, ou atingir a convergência, isto quando ocorrer melhoramento significativo no cromossomo de maior aptidão por um dado número de gerações [3]. No algoritmo genético desse trabalho o critério de parada escolhido foi o número de gerações, nesse caso vinte. Tanto o número de indivíduos como também a quantidade de gerações não tiveram critérios pré-definidos para escolha.

IV. CRIAÇÃO DE MEMÓRIA DE APTIDÕES

O cálculo da aptidão apresentou-se como o fator decisivo para a velocidade de execução do programa, em virtude da complexidade do cálculo da matriz hessiana, conforme mencionado no item V. A cada novo indivíduo gerado uma nova aptidão teria que ser calculada.

À medida que a quantidade de gerações aumenta, as populações passam a ser formadas pelos indivíduos de melhores aptidões, muitas vezes repetindo os mesmos indivíduos, tendo que refazer cálculos de aptidões já calculadas anteriormente, comprometendo ainda mais a velocidade de execução do programa. Uma estratégia para evitar essa repetição de cálculos foi criar uma matriz de armazenamento de aptidões já calculadas, denominada “memória de aptidões”. Com isso, antes do cálculo da aptidão de um indivíduo, o programa consulta a matriz de armazenamento e caso a aptidão desse indivíduo já tenha sido calculada, o programa aproveita esse dado que já estava armazenado.

Algoritmo:

- 1º Cria a população inicial;
- 2º Calcula a aptidão de cada indivíduo;
- 3º Seleciona os indivíduos através da roleta;
- 4º Realiza o cruzamento (*crossover*) entre os genes dos indivíduos selecionados;
- 5º Verifica se a aptidão dos novos indivíduos já foi calculada e está disponível na memória; Se sim, aproveita o valor já calculado; Se não, procede com o cálculo da aptidão;
- 6º Repete o processo a partir do 3º passo até atingir o número máximo de gerações.

V. FLUXO DE CARGA ÓTIMO

O cálculo do fluxo de carga ótimo é utilizado para determinar uma condição ótima de operação. Essa condição ótima da rede estudada foi uma condição tal, que o sistema tivesse a menor quantidade de perdas elétricas possíveis, respeitando os limites operativos.

Os mais conhecidos métodos de fluxo de carga disponíveis na literatura são o Newton Rapson, Gauss-Seidel e o Desacoplado Rápido, os quais apresentam boa convergência e desempenho quando aplicados na análise de redes de transmissão de energia.

Alguns métodos clássicos, quando aplicados a redes de distribuição apresentam comprometimento da eficiência e possível divergência, causado pelo mau condicionamento das matrizes, em virtude das características predominantemente radiais das redes de distribuição e da alta relação r/x entre resistências e reatâncias da rede [4]. Em virtude disso foi escolhido o método Soma de Potências, devido ao bom desempenho desse método para sistemas fracamente malhados, que é uma característica muito comum dos alimentadores da rede de distribuição.

A. Equacionamento do Fluxo de Carga

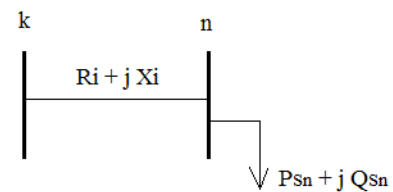


Fig 1. Sistema reduzido a duas barras

A partir do sistema reduzido na representação de duas barras da Figura 1, o cálculo das perdas foi feito utilizando a seguinte equação:

$$S_{perdas,i} = P_{Li} + jQ_{Li} = \Delta V_i \cdot I_i^* \quad (1)$$

Onde:

$$\Delta V_i = V_k - V_n ;$$

V_k = Tensão na barra a jusante (lado fonte);

V_n = Tensão na barra a montante (lado carga);

I_i^* = Conjugado da corrente no trecho estudado ($k-n$);

$S_{perdas,i}$ = Perdas complexas na linha índice i .

Dessa equação geral obtêm-se as seguintes outras equações de cálculo das perdas:

$$P_{Li} = \frac{R_i \cdot (P_{Sn}^2 + Q_{Sn}^2)}{V_n^2} \quad (2)$$

$$Q_{Li} = \frac{X_i \cdot (P_{Sn}^2 + Q_{Sn}^2)}{V_n^2} \quad (3)$$

Onde:

P_{Li} , Q_{Li} = Perdas ativa e reativa na linha índice i ;

P_{Sn} , Q_{Sn} = Cargas ativa e reativa equivalentes do sistema no nó índice n ;

i = Índice da linha;

R_i , X_i = Resistência e reatância da linha índice i ;

O cálculo das cargas ativas e reativas equivalentes do sistema (P_{Sn} e Q_{Sn}) é feito somando-se todas as potências próprias na barra n , mais o somatório das potências próprias das barras a jusante, e mais o somatório das perdas de todos os trechos que se encontram a jusante da barra n . Esse processo é feito partindo-se do nó final, em direção ao nó fonte (*backward sweep*) e está representado nas equações abaixo:

$$P_{Sn} = P_n + \sum P_{S(n+1)} + \sum PL_{n(n+1)} \quad (4)$$

$$Q_{Sn} = Q_n + \sum Q_{S(n+1)} + \sum QL_{n(n+1)} + Q_n^{sh} \quad (5)$$

Onde:

P_{Sn} = Potência ativa equivalente na barra n ;

Q_{Sn} = Potência reativa equivalente na barra n ;

P_n = Carga ativa na barra n ;

Q_n = Carga reativa na barra n ;

$\sum P_{S(n+1)}$ = somatório das potências equivalente na barra $n+1$ diretamente conectadas a barra n ;

$\sum Q_{S(n+1)}$ = somatório das potências reativas equivalente na barra $n+1$ diretamente conectadas a barra n ;

$\sum PL_{n(n+1)}$ = somatório das perdas ativas nos ramos conectados entre a barra n e a barra $n+1$;

$\sum QL_{n(n+1)}$ = somatório das perdas reativas nos ramos conectados entre a barra n e a barra $n+1$;

Q_n^{sh} = potência reativa shunt injetada na barra n (não considerada nesse trabalho).

Os termos P_{Sn} e Q_{Sn} são compostos pelas seguintes parcelas:

$$P_{Sn} = P_{somaP,n} + P_{somaZ,n} + P_{somaPerdas,n}$$

$$Q_{Sn} = Q_{somaP,n} + Q_{somaZ,n} + Q_{somaPerdas,n}$$

Onde:

$P_{somaP,n}$ = Soma das cargas ativas com potência constante no nó n ;

$P_{somaZ,n}$ = Soma das cargas ativas com impedância constante no nó n ;

$P_{somaPerdas,n}$ = Soma das perdas ativas das linhas conectadas em n ;

$Q_{somaP,n}$ = Soma das cargas reativas com potência constante em n ;

$Q_{somaZ,n}$ = Soma das cargas reativas com impedância constante em n ;

$Q_{somaPerdas,n}$ = Soma das perdas reativas das linhas conectadas em n .

Após serem calculadas as potências equivalentes para cada barra do sistema, iniciasse o cálculo das tensões através da equação biquadrada (Equação 6). Essa equação fornece o módulo da tensão nas barras de carga, conhecendo-se a tensão na barra fonte, a impedância da linha e a potência da carga. Esse processo inicia-se na barra fonte e vai em direção à barra final (*forward sweep*), tomando-se as barras duas a duas. Uma barra que se comporta como sendo de carga numa primeira fase do processo, torna-se barra fonte na fase seguinte após o cálculo da tensão. Essa sistemática repete-se até a barra terminal.

$$V_n^4 + V_n^2 \cdot [2 \cdot (R_i \cdot P_{Sn} + X_i \cdot Q_{Sn}) - V_k^2] + (P_{Sn}^2 + Q_{Sn}^2) \cdot (R_i^2 + X_i^2) = 0 \quad (6)$$

B. Cálculo do Gradiente

Um problema geral de otimização consiste em maximizar ou minimizar uma função objetivo, que no caso deste trabalho são as perdas elétricas da rede, dadas pela Equação 2. O gradiente utilizado para minimização da função objetivo foi o de máxima descida, caracterizado pela equação de busca abaixo:

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - \alpha \cdot \nabla f(X^{(k)}) \quad (7)$$

Onde:

α = passo da iteração;

k = estimativa;

$X^{(k)}$ = valor estimado inicial;

$X^{(k+1)}$ = valor estimado final;

$\nabla f(X^{(k)})$ = gradiente da função objetivo.

O cálculo do gradiente é feito derivando-se parcialmente a função objetivo (Equação 2) em relação às variáveis de controle, que no caso são as injeções de potência ativa nas barras, representadas por P_{Cj} , obtendo-se a Equação 8:

$$\nabla P_{Li} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{Li}}{\partial P_{C1}} \\ \frac{\partial P_{Li}}{\partial P_{C2}} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_{Li}}{\partial P_{Cn}} \end{pmatrix}$$

$$\nabla P_{Li} = \frac{2 \cdot R_i \cdot P_{Sn} \cdot \frac{dP_{Sn}}{dP_{Cj}} \cdot V_n^2 - R_i \cdot (P_{Sn}^2 + Q_{Sn}^2) \cdot \frac{dV_n^2}{dP_{Cj}}}{V_n^4} \quad (8)$$

Onde:

∇P_{Li} = Gradiente da função objetivo;

P_{Li} = Função objetivo;

P_{Cj} = Variáveis de controle;

j = Índice da barra onde ocorre a injeção de potência.

Para o cálculo do termo $\frac{dV_n^2}{dP_{Cj}}$ da Equação 8, explicitou-se o termo V_n^2 na Equação 6 (biquadrada), obtendo-se a seguinte equação:

$$\frac{\partial V_n^2}{\partial P_{Cj}} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \begin{array}{l} -2R_i \cdot \frac{\partial P_{Sn}}{\partial P_{Cj}} + \frac{\partial V_k^2}{\partial P_{Cj}} + 0,5 \cdot A^{-0,5} \cdot \\ \left[2B \cdot \left(2R_i \cdot \frac{\partial P_{Sn}}{\partial P_{Cj}} - \frac{\partial V_k^2}{\partial P_{Cj}} \right) - \right. \\ \left. 8 \cdot (R_i^2 + X_i^2) \cdot P_{Sn} \cdot \frac{\partial P_{Sn}}{\partial P_{Cj}} \right] \end{array} \right\}$$

$$A = B^2 - 4C$$

$$B = [2(R_i P_{Sn} + X_i Q_{Sn}) - V_k^2]$$

$$C = (R_i^2 + X_i^2)(P_{Sn}^2 + Q_{Sn}^2)$$

Mais uma vez surge o termo $\frac{dP_{Sn}}{dP_{Cj}}$. Para o cálculo

desse termo, observou-se que há uma dependência da posição da barra j de injeção de geração em relação à barra n , pois o termo P_{Cj} será uma variável que comporá a Equação 4 a ser derivada parcialmente.

Portanto, se $j > n$ (barra j localizada depois da barra n), ou seja, P_{Cj} estando incluso na formação de P_{Sn} , obteve-se que $\frac{\partial P_{Sn}}{\partial P_{Cj}} = 1$.

Se $j < n$ (barra j localizada antes da barra n), ou seja, P_{Cj} não incluso na formação de P_{Sn} , obteve-se que $\frac{\partial P_{Sn}}{\partial P_{Cj}} = 0$

O passo α da Equação 7 foi obtido por meio de uma busca linear exata, considerando uma aproximação quadrática da função objetivo, para que o processo não ficasse muito lento e nem que o passo fosse aleatório, podendo resultar em divergência do método.

Assim, para essa busca linear exata o passo utilizado foi obtido através da equação abaixo:

$$\alpha = \frac{[\nabla f(x)]^T \cdot \nabla f(x)}{[\nabla f(x)]^T \cdot \nabla^2 f(x) \cdot \nabla f(x)} \quad (9)$$

Onde:

x = Variável de controle;

α = Passo da aproximação quadrática;

$\nabla f(X)$ = Vetor gradiente da função objetivo;

$\nabla^2 f(X)$ = Matriz hessiana da função objetivo.

Apesar da matriz hessiana tornar a busca mais direta, os laços das iterações necessárias para a resolução das equações são os fatores principais no comprometimento da velocidade de execução do programa.

Algoritmo:

- 1º Inicializar as variáveis;
- 2º Executar uma iteração de cálculo de fluxo de carga;
- 3º Calcular o passo α e calcular o incremento de potência ativa que será injetado nas barras escolhidas;
- 3º Verificar os limites operacionais;
- 4º Voltar ao 2º passo e executar até atingir a convergência.

VI. RESULTADO DAS SIMULAÇÕES

A. Rede Simulada

Para a simulação foi utilizada uma rede composta por 34 barras de carga, retirada da referência [5]. A carga instalada da rede é de 4,63 MW e a tensão da barra fonte é de 11 kV.

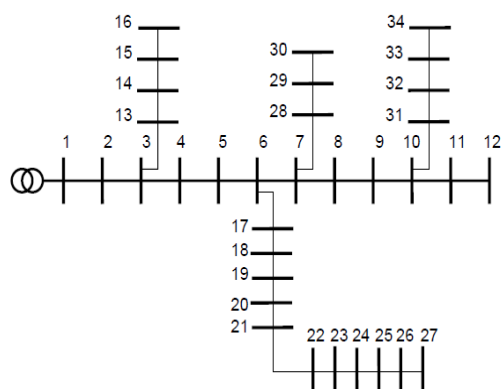


Fig.2 Rede de distribuição simulada

B. Resultados

Como resultado o programa indicou as barras 10, 20 e 26 para uma conexão que resultará na redução de 34,6% das perdas da rede, através da conexão de geradores de potência ativa até os limites de injeção. Os resultados apresentados pelo programa estão listados nas tabelas I e II.

TABELA I

Perdas da Rede	
Perda total antes da conexão	222 kW
Perda total depois da conexão	145 kW

TABELA II

Barras	10	20	26
Potência a ser injetada na barra (limite de injeção)	297 kW	386 kW	478 kW
Tensão antes da conexão	10,57 kV	10,50 kV	10,36 kV
Tensão após a conexão	10,65 kV	10,63 kV	10,53 kV

C. Perfil de Tensão da Rede

A conexão de geração de potência ativa nas barras indicadas pelo software proporcionou melhoria no perfil de tensão da rede, conforme se observa no gráfico da Fig. 3.

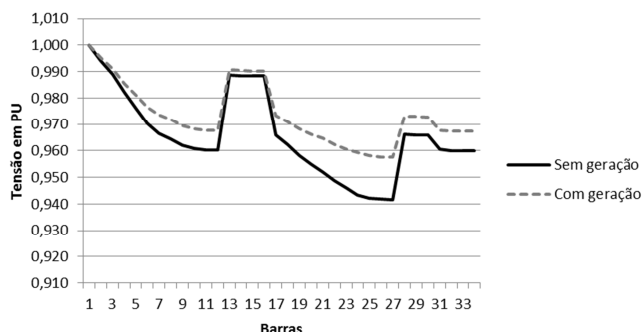


Fig.3 Perfil de tensão da rede

D. Perdas na Rede

A conexão de geração de potência ativa nas barras indicadas proporcionou a redução das perdas elétricas acumuladas ao longo da rede, conforme mostrado no gráfico da Fig. 4.

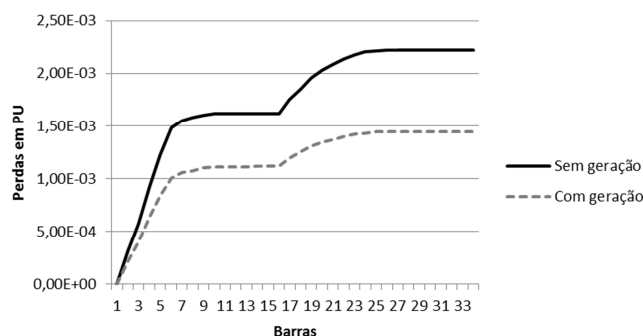


Fig.4 Perfil de perdas técnicas acumuladas ao longo da rede

VII. CONCLUSÃO

A conexão de gerações distribuídas, desde que previamente estudadas, poderá otimizar perdas elétricas da rede e provocar melhoria no nível de tensão.

O software apresenta-se como uma ferramenta importante para auxiliar as distribuidoras na conexão de agentes geradores.

O trabalho poderá evoluir para outras aplicações em conjunto com o smart grid, oferecendo, por exemplo, as melhores barras ou regiões para conexão de carga em dados momentos.

A implementação das curvas de carga no software poderão fornecer resultados mais precisos.

REFERÊNCIAS

- [1] FILHO, Max Chianca Pimentel. MEDEIROS JR, Manoel Firmino de. OLIVEIRA, Clóvis Bôsko Mendonça. A Mixed GA and Tree-Gradient Method for Optimization of Distributed Generation. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14). 8 a 10 abr. 2014. Córdoba/Espanha.
- [2] POZO, Aurora. CAVALHEIRO, Andrea de Fátima. ISHIDA, Celso. SPINOSA, Eduardo. RODRIGUES, Ernesto Malta. Computação Evolutiva. Disponível em <http://www.inf.ufpr.br/aurora/tutoriais>. Acesso em 08 set. 2015.
- [3] LACERDA, Estéfane. CARVALHO, André. Introdução aos Algoritmos Genéticos. Disponível em <http://www.dca.ufrn.br/~estefane/metaheurísticas>. Acesso em 02 ago. 2015.
- [4] ISSICABA, Diego. Métodos de Varredura para Redes Primárias de Distribuição Radiais e Fracamente Malhadas: Uma nova Abordagem e Análise de Convergência. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, 2008
- [5] CARVALHO, Marcus Rodrigo. Estudo Comparativo de Fluxos de Potência para Sistemas de Distribuição Radial. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo, 2006.