



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO II

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS – GPT

A APLICAÇÃO DOS COEFICIENTES DE SENSIBILIDADE DAS PERDAS (ITL) NA DETERMINAÇÃO DAS MELHORES BARRAS PARA CONEXÃO DE UMA GD

Edison Carlos dos Santos
Universidade de Brasília – UnB

Larissa de Matos Guedes
Universidade de Brasília – UnB

Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira*
Universidade de Brasília - UnB

RESUMO

O presente trabalho apresenta um método simples e rápido para identificar a melhor localização de unidades de geração distribuída em sistemas de distribuição radiais, visando minimizar as perdas técnicas. O método proposto utiliza os coeficientes ITL - *Incremental Transmission Losses*, que são obtidos a partir da solução do fluxo de carga da rede. As simulações foram feitas utilizando sistemas de 5 e 33 barras. Os resultados obtidos mostram que com apenas uma simulação é possível classificar as barras que apresentam os menores valores de perdas totais do sistema com a inserção de uma unidade de GD.

PALAVRAS-CHAVES

Geração distribuída, sistemas de distribuição, ITL, redução de perdas

1.0 - INTRODUÇÃO

A inclusão da GD no cenário de oferta de energia no país traz vantagens econômicas e ambientais sobre a geração centralizada, pois economiza investimentos em transmissão e reduz as perdas nestes sistemas, além de permitir o atendimento da demanda crescente de forma rápida e ainda ser adotada como uma alternativa para reduzir riscos de planejamento.

Os investimentos para implantação de uma unidade de GD requer a análise da influência da sua localização nas perdas totais de potência ativa da rede. Estas perdas indicam uma quantidade de energia que é gerada, mas não se traduz em benefício de utilização, portanto não se transforma em receita, podendo impactar a análise de viabilidade econômica de um empreendimento de GD.

Segundo BORGES e FALCÃO (1), muita atenção deve ser dada para a questão da localização e tamanho de uma GD, pois a instalação de uma GD em um local não ótimo pode resultar em um aumento considerável das perdas totais do sistema, implicando na inviabilização do projeto desejado.

SINGH et al. (2) apresenta uma técnica baseada em algoritmo genético para o posicionamento ótimo e dimensionamento de uma unidade de GD, visando a minimização das perdas. Trata-se de uma técnica de procura utilizando ferramentas computacionais. Devido a sua natureza combinatorial e permutacional, os casos de médio e grande porte são de difícil resolução ótima, envolvendo pesado esforço computacional.

Em (3), a autora apresenta em sua dissertação, estudo de localização e dimensionamento ótimo de uma unidade de GD, objetivando a minimização das perdas totais do sistema. O método adotado foi baseado no desenvolvimento de um modelo matemático do sistema, e então os métodos da aproximação quadrática e da coordenação de minimização cíclica foram aplicados ao modelo criado. Embora os resultados obtidos confirmem a

(*) Campus Univ. Darcy Ribeiro – Gleba A, L3 Norte – Cx.Postal 4386 – CEP 70.910-900 - Brasília - DF– Brasil
Tel: (+55 61) 3307-2308 – Fax: (+55 61) 3274-6651 – Email: mago@ene.unb.br

eficácia do método proposto, o seu desempenho fica comprometido em função do tempo de processamento, o qual requer a varredura de todas as barras do sistema.

O artigo de ACHARYA et al. (4) baseia-se no uso da expressão analítica para cálculo das perdas de transmissão desenvolvida por ELGERD (5). Entretanto, para a obtenção da localização e tamanho ótimo de uma unidade de GD que resulte na minimização das perdas de potência ativa totais do sistema, há necessidade do emprego da matriz impedância Z_{bus} (inverso da matriz Y_{bus}) o que é de difícil obtenção para sistemas de distribuição radiais, uma vez que a matriz admitância Y_{bus} é em geral singular.

Este trabalho tem por objetivo apresentar um método de fácil aplicação, capaz de identificar as barras mais susceptíveis a receber uma unidade de GD, em sistemas de distribuição radiais. Para tanto se utiliza de programação em MATLAB® e do pacote MATPOWER® como ferramentas computacionais na solução do fluxo de carga e determinação dos coeficientes de sensibilidade das perdas, conhecidos como ITL – *Incremental Transmission Losses*.

O método proposto para determinar a melhor localização de uma unidade GD foi testado em dois sistemas de distribuição radiais, utilizados como exemplo neste estudo. Como resultado obtém-se uma classificação das barras candidatas, reduzindo assim, significativamente, o tempo de processamento em relação aos métodos de varredura que avaliam todas as barras.

O artigo está organizado de forma que na seção 2.0 são apresentados: a definição dos coeficientes ITL, o seu comportamento para um sistema de transmissão de duas barras, a sua formulação com base na análise da sensibilidade das perdas em relação às variáveis de estado do sistema, e por fim, o procedimento computacional do método proposto. Na seção 3.0 apresentam-se os resultados das simulações nos sistemas radiais de 5 e 33 barras, bem como as discussões e análises pertinentes, e na seção 4.0 tem-se a conclusão do trabalho.

2.0 - ITL – INCREMENTAL TRANSMISSION LOSSES

2.1 Definição do ITL

Os estudos mencionados em (2), (3) e (4) buscam a determinação da melhor localização de uma GD e do seu tamanho ótimo dentro de um sistema de distribuição radial, de forma a propiciar o menor valor das perdas de potência ativa totais da rede. Tais perdas de potência ativa que se processam em uma linha de transmissão são apresentadas por MONTICELLI (6), através de análise do modelo equivalente π , que representa uma linha de transmissão conectando as barras K e M . A expressão, que representa uma função não-linear das variáveis de estado do sistema (módulos das tensões nodais e os ângulos das tensões nodais), é dada pela equação a seguir:

$$P_L = P_{KM} + P_{MK} = g_{KM} \left(|V_K|^2 + |V_M|^2 - 2|V_K||V_M|\cos\theta_{KM} \right) \quad (2.1)$$

O fator de sensibilidade das perdas de potência ativa com relação à injeção de potência ativa de uma GD é chamado de *ITL*, e indica a variação das perdas totais do sistema (∂P_L) em relação à variação da potência líquida injetada (∂P_i) em uma barra “ i ”.

$$ITL_i = \frac{\partial P_L}{\partial P_i} \quad (2.2)$$

Segundo ELGERD (5), aplicando a regra da cadeia nesta equação e valendo-se de hipóteses simplificadoras é possível tornar as equações exatas para o cálculo do ITL menos complexas, o que favorece o entendimento sobre a interpretação matemática destes coeficientes em cada barra. Entre as hipóteses simplificadoras, destacam-se: os módulos das tensões nodais iguais a um, a reatância da linha estabelecida bem maior do que a resistência e o fluxo de potência ativa transmitida na linha considerada tão pequena que o ângulo de potência assume valores conforme abaixo:

$$|V_K| = |V_M| = 1,0 pu, \quad X^2 \gg R^2, \quad \text{sen}\theta_{KM} \cong \theta \quad \text{e} \quad \cos\theta_{KM} \cong 1 - (1/2)\theta_{KM}^2$$

Assim, fazendo uso de tais hipóteses nas equações exatas, tem-se:

$$ITL_K \cong 2 \frac{R}{X} \theta_{KM} \quad ITL_M \cong -2 \frac{R}{X} \theta_{KM} \quad (2.3)$$

Tal coeficiente é calculado para cada barra, utilizando os valores das variáveis de estado obtidos da resolução do fluxo de carga, no ponto de operação para o caso base, nas condições iniciais de carregamento e geração. O seu valor corresponde ao da tangente no ponto em que a curva das perdas corta o eixo das ordenadas.

Assim a curva das perdas de potência ativa para uma determinada barra é desenhada para diferentes pontos de operação do sistema, isto é, para diferentes incrementos de injeção de potência ativa na referida barra.

Estas condições estão retratadas na Figura 2.1 – (a), onde o eixo das abscissas representa um vetor de injeção de potência ativa na barra M (barra de carga), correspondendo a diferentes valores de GD, e no eixo das ordenadas o valor referente às perdas de potência ativa totais para cada incremento de injeção de potência. Na Figura 2.1 – (b) tem-se a representação gráfica da curva das perdas na barra K (barra de geração), que caracteriza comportamento oposto ao da barra de carga, dado que o ITL possui o mesmo valor porem de sinal contrário.

Esta interpretação gráfica, sobre a não-linearidade da curva das perdas em função do valor da GD, é analisada por ACHARYA et al. (4). Em seu artigo é demonstrado que as barras que possuem as maiores inclinações na condição inicial, podem não ser as que apresentam as menores perdas de potência, conforme barra hipotética, representada pela curva pontilhada da Figura 2.1- (a). Observa-se que a inclinação da curva pontilhada na condição inicial é inferior à da curva cheia. Porém as perdas mínimas ocorrem para uma injeção de 6MW (curva pontilhada).

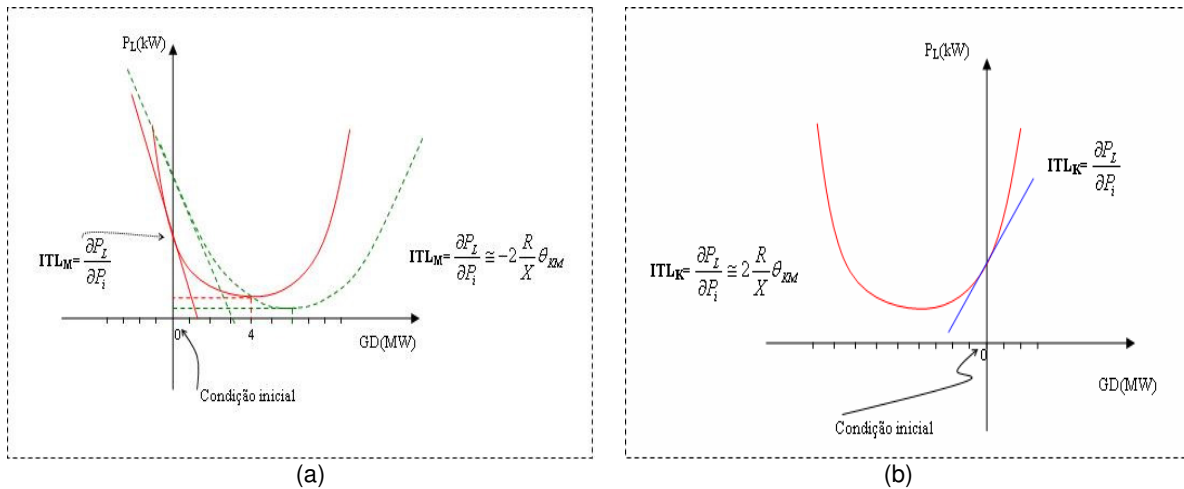


Figura 2.1 – Curva das perdas de potência ativa totais em função da injeção de potência ativa: (a) na barra M e; (b) na barra K .

2.2 A análise de sensibilidade

Segundo MENEZES e SILVA (7), é possível calcular a sensibilidade das perdas de potência ativa relacionada com mudanças na injeção de potência ativa e reativa em qualquer barra usando-se a teoria da diferenciação parcial, como segue:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_L}{\partial V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Como uma solução alternativa, o sistema de equações pode ser consideravelmente reduzido adotando as duas hipóteses simplificadoras utilizadas por ERWIN et al. (8), a saber: as perdas de potência ativa na transmissão são função somente da injeção de potência ativa; e esta é uma função somente dos ângulos de fase da tensão.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} \end{bmatrix}^{-1} \quad \text{onde: } \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P} \end{bmatrix} = ITL \quad (2.5)$$

Logo, o coeficiente de sensibilidade das perdas de potência ativa totais com relação à injeção de potência ativa nas barras de carga e de geração é dado por:

$$ITL = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} \end{bmatrix}^{-1} \quad \text{onde } \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} \end{bmatrix} \text{ é a sub-matriz } H \text{ da Jacobiana } J = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

A matriz das derivadas parciais das perdas em relação aos ângulos das tensões nas barras corresponde ao somatório das colunas da sub-matriz H . Para se obter as perdas em relação aos ângulos, deve-se eliminar a coluna da sub-matriz H relativa à barra de referência, cujo ângulo θ_1 é igual a zero, deixando-a com as dimensões (nb) por $(nb-1)$, onde nb representa o número de barras do sistema. Assim, para viabilizar a soma das colunas, utiliza-se o vetor unitário linha "e", de dimensão (1) por (nb) , conforme Equação 2.8-(a).

No caso da sub-matriz H atribui-se o valor zero para o ângulo da barra "s", barra de folga ou referência. Conseqüentemente, se elimina a linha e a coluna "s" da sub-matriz H , ficando esta com a dimensão $(nb-1)$ por $(nb-1)$ acabando assim, com a sua singularidade. Equação 2.8-(b). Uma vez eliminada a singularidade da sub-matriz H , ela pode ser invertida e, assim, é possível obter a solução da equação de ITL. Equação 2.8-(c).

$$\text{a) } \left[\frac{\partial P_L}{\partial \theta} \right] = e[H]_s \quad \text{b) } \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right]^{-1} = [H]_{SS}^{-1} \quad \Rightarrow \quad \text{c) } ITL = e[H]_s [H]_{SS}^{-1} \quad (2.8)$$

Neste ponto é importante frisar que esta equação de cálculo do ITL é aproximada e resulta da adoção das duas hipóteses simplificadoras utilizadas por ERWIN et al. (8). Logo, a aplicação deste cálculo de ITL em sistemas de distribuição radiais resulta em valores aproximados de ITL. Além disso, em alguns casos, os coeficientes ITL apresentam valores positivos para as barras de carga do sistema, para as quais se previam valores negativos. Esta incoerência deve ser corrigida utilizando a injeção de potência reativa MVAR nos barramentos que apresentam tensões muito baixas.

2.3 Procedimento computacional

O procedimento para localização de uma unidade de GD em um sistema de distribuição radial é descrita no diagrama a seguir. Figura 3.1.

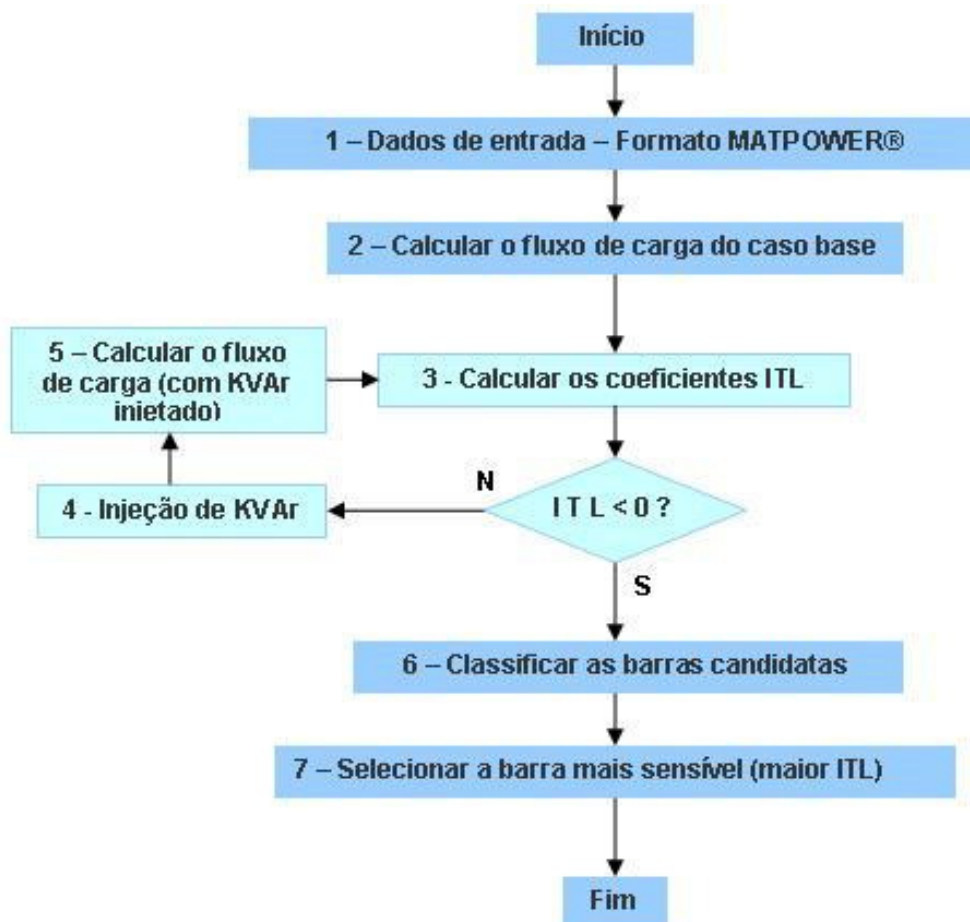


Figura 3.1– Fluxograma da localização de unidade de geração distribuída.

3.0 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Sistema de distribuição radial de 05 barras

O sistema de distribuição radial 05 barras possui características compatíveis com os objetivos didáticos pretendidos. Sua topologia é mostrada na Figura 3.1 e dados de entrada e carregamento na Tabela 3.1.

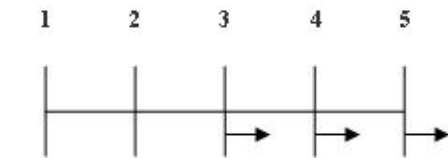


Figura 3.1 – Topologia Sistema 5 barras

Barra (de)	Barra (para)	$r (\Omega)$	$x (\Omega)$	Carga P (MW)	Carga Q (MVar)
1	2	0.1	0.5	0	0
2	3	0.1	0.5	0.008	0.006
3	4	0.1	0.5	0.012	0.009
4	5	0.1	0.5	0.024	0.018

Utiliza-se a ferramenta MATPOWER® para calcular o fluxo de carga do sistema nas condições iniciais e obter os dados referentes às variáveis de controle (potência ativa e reativa geradas) e de estado do sistema. Em seguida, calculam-se os coeficientes ITL para as barras de carga 2, 3, 4 e 5. A barra 1, de referência, gera 45 kW para atender a potência demandada e as perdas de potência ativa totais de 1,0 kW.

Os valores dos coeficientes ITL para as barras de carga do sistema, Figura 3.2 – (a), apontam para as barras 5 e 4, respectivamente, como a primeira e a segunda candidata a receber uma unidade de GD. Esta redução no número de barras a ser analisada possibilita que a escolha de uma, possa ser feita em função, por exemplo, das previsões de expansão da carga ou da disponibilidade dos recursos energéticos locais.

A curva das perdas de potência ativa totais para cada barra versus a variação da potência injetada, Figura 3.2 – (b), é usada também para representar o comportamento das perdas em função da variação do tamanho da unidade de GD a ser instalada em cada uma das barras de carga do sistema. Observa-se que as barras 5 e 4, selecionadas como candidatas, apresentam inclinações ($\partial PL/\partial P_i$) maiores na região mais próxima da condição inicial, indicando ser esta região a de maior sensibilidade das curvas das perdas em função da mudança incremental de potência ativa injetada.

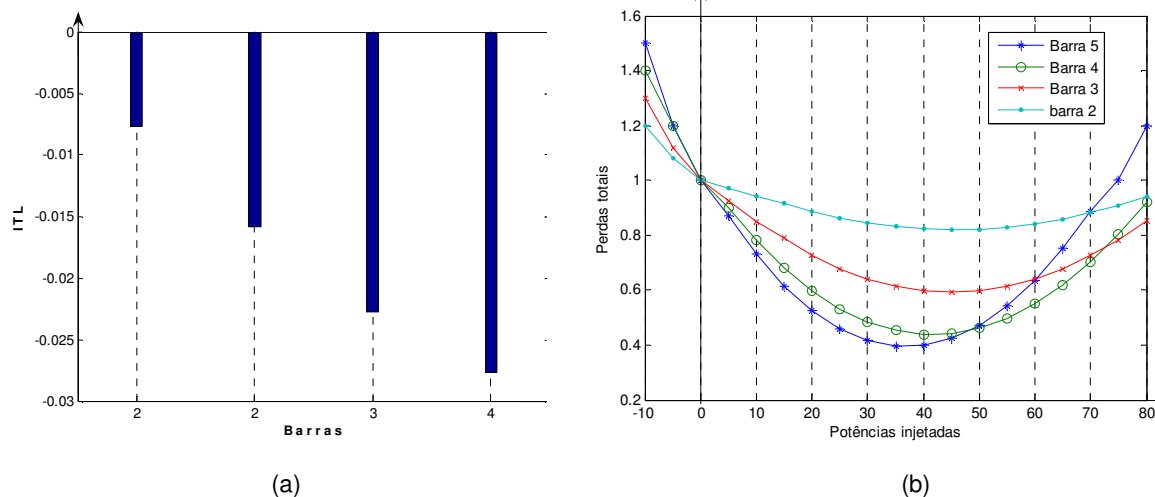


Figura 3.2 – Rede de distribuição radial 5 barras, onde: (a) Valores do ITL por barra, e (b) Comportamento das perdas de potência ativa totais por barra.

Determinada a barra 5, como a mais sensível à redução das perdas de potência ativa, o dimensionamento da unidade de GD pode ser obtido utilizando a programação MATPOWER® para cálculo do fluxo de carga do sistema, variando a potência injetada na barra até obter o menor valor das perdas de potência ativa do sistema. Pela figura 3.2 (b) verifica-se que a curva da barra 5 apresenta a menor perda para a potência injetada em torno de 35 kW. Assim, o dimensionamento ótimo da GD deve ser de no máximo 35 kW, pois acima deste valor, as perdas passam a ter comportamento diretamente proporcional ao aumento da potência injetada na barra 5.

3.2 Sistema de distribuição radial IEEE 33 barras

A fim de demonstrar a validade do método, repetiu-se o procedimento para o sistema IEEE 33 barras. Este sistema, clássico na literatura, possui topologia radial de tamanho médio, sem laço fechado e 32 trechos, Figura 3.3. Com carga ativa total de 3,72 MW e carga reativa total de 2,3 MVAR. Venkatesh, Ranjan e Gooi (9) apresentam em detalhes os dados de entrada deste sistema.

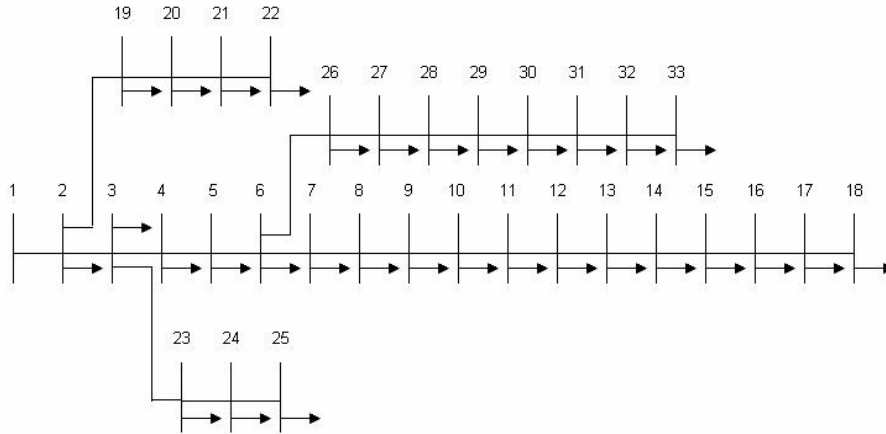


Figura 3.3 – Topologia do sistema IEEE 33 barras.

Seguindo o procedimento computacional apresentado, verifica-se que para a rede IEEE 33 barras, nas condições iniciais de operação, algumas barras de carga apresentaram valores positivos de coeficiente ITL. Neste caso, conforme previsto, a correção foi realizada com a injeção de potência reativa nas seguintes barras: barra 12 - 1,0 MVAR, barra 18 - 0,575 MVAR e 1,0 MVAR na barra 33.

A correção pode ser feita com a injeção adequada de uma quantidade de potência reativa em uma ou mais barras que apresentem tensões muito baixas, o que favorece a elevação do perfil de tensão do sistema para os limites apropriados ao seu funcionamento. Logo, qualquer correção diferente da acima apresentada não mudará o resultado final do procedimento para identificação e classificação das barras candidatas.

Observa-se que os valores dos coeficientes ITL para todas as barras de carga passaram a apresentar valores negativos, Figura 3.4. Isto possibilita destacar a barra 18, detentora do maior valor em módulo do coeficiente ITL, como a mais sensível à redução das perdas totais com a variação da potência ativa injetada. Desta forma é possível criar uma lista de barras candidatas a receber a instalação de uma unidade de GD, classificando-as da mais sensível (barra 18) até a menos sensível (barra 2). Assim, a primeira barra candidata é a 18, a segunda é a 17, a terceira é a 16, e assim sucessivamente.

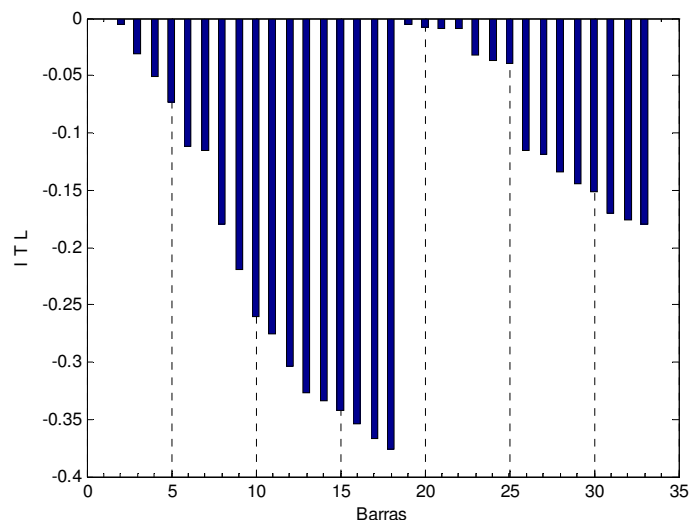


Figura 3.4 – Valores dos ITL - sist. IEEE 33 barras

Utilizando-se o programa de fluxo de carga do MATPOWER®; é possível obter, para cada barra candidata ou qualquer outra de interesse, o tamanho da GD que minimiza as perdas de potência ativa totais do sistema (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Classificação das barras IEEE 33

Ordem	Barra	GD (MW)	Perdas (MW)
1 ^a	18	0.8	0.1459
2 ^a	17	0.9	0.1426
3 ^a	16	1.0	0.1368
21 ^a	6	2.6	0.1110

Em (4), os autores concluem que para o sistema IEEE 33 barras a melhor localização de uma GD é na barra 6, onde se alcança o valor mínimo de 0,111 MW para as perdas de potência ativa, na condição de instalação de uma unidade GD de 2,6 MW. Trata-se de um método que objetiva determinar a melhor localização de uma GD por meio da minimização das perdas, não se importando com o tamanho final dessa GD e nem com o estudo de sensibilidade relacionado com a curva das perdas que caracteriza esta barra no sistema.

Na Tabela 3.2, verifica-se que a barra 6 possui classificação número 21, estando bem distante das três primeiras barras candidatas a receber uma unidade de GD. Pretende-se provar que a melhor opção na localização de uma unidade de GD não está no critério de minimização das perdas e sim na sua redução utilizando o método proposto. Neste caso são considerados os benefícios do uso dos coeficientes ITL na determinação da barra mais sensível às perdas de potência ativa totais do sistema, como também na oportunidade de trabalhar no melhor trecho da curva das perdas desta barra, obtendo, assim, resultados rápidos, projetos menores e mais eficientes de localização de GD.

A Figura 3.5, mostra de forma comparativa os efeitos de redução das perdas na barra 6 (classificação 21^a) e na barra 18 (classificação 1^a) quando da injeção de degraus de 0.1 MW de potência até o total de 0.8 MW. Verifica-se que, para a primeira injeção de 0,1 MW, a redução das perdas na barra 18 é 93% superior à da barra 6. A média é de 50% para injeção de 0,5 MW e à medida que se aumenta a injeção chegando a 0,8 MW, a redução das perdas na barra 18 mantém-se 20% superior ao da barra 6. Isto comprova a assertiva do parágrafo anterior e demonstra ainda, que o trecho mais sensível da curva das perdas é o mais próximo da condição inicial.

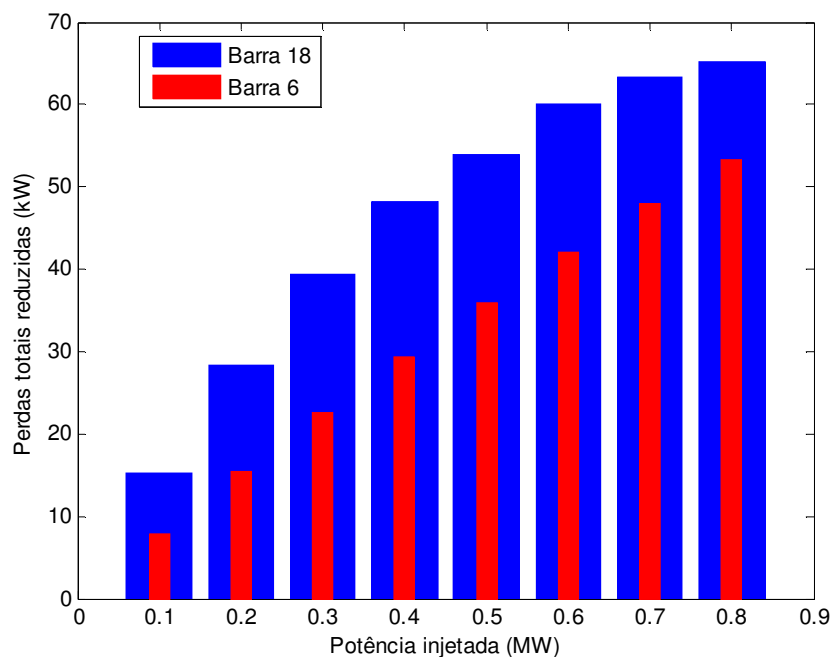


Figura 3.5 - Perdas reduzidas das barras 6 e 18.

4.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um método de fácil aplicação para localização ótima de uma unidade de GD em sistemas de distribuição radiais, baseado na análise dos coeficientes de sensibilidade das perdas ITL - *Incremental Transmission Losses*. Uma das vantagens deste método, além da utilização de uma única simulação para a identificação e classificação das barras mais sensíveis à inserção de uma unidade de GD, está no estudo de grandes sistemas de distribuição em comparação com outros métodos computacionais mais complexos que utilizam a varredura de todas as barras. Em decorrência do método proposto, a análise da localização da unidade de GD fica restrita às barras candidatas, obtendo-se assim, uma redução significativa no número de simulações e no tempo de processamento.

Constatou-se, também, que os métodos que objetivam determinar a melhor localização de uma unidade de GD utilizando o critério de minimização das perdas técnicas, não se importando com o valor final dessa unidade e nem com o estudo de sensibilidade relacionado com a curva das perdas que caracteriza cada barra do sistema, levam a projetos de grande porte e com sua eficiência técnico-econômica comprometida.

Observou-se que após a localização da melhor barra para inserção de uma unidade de GD, o seu dimensionamento deve prever a sua operação dentro da faixa da curva das perdas de maior sensibilidade, ou seja na região descendente da curva, mais próxima da condição inicial do que do vértice. Isto garante a utilização de unidades de GD menores e melhores resultados na redução das perdas

O critério econômico, indispensável em qualquer estudo de viabilidade de um projeto, favorecerá prioritariamente investimentos na barra com maior coeficiente de sensibilidade - ITL, projetos menores e instalações mais rápidas. Além disso, dimensionar uma unidade GD para trabalhar a maior parte do tempo na região mais sensível da curva das perdas, pode transformar um projeto, antes considerado grande e inviável, em oportuno e economicamente mais eficiente.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BORGES, Carmen L.T.; FALCÃO, Djalma M. "Impact of Distributed Generation Allocation and Sizing on Reliability, Losses and voltage profile". IEEE, 2003.
- (2) SINGH, Deependra; SINGH, Devender; VERMA, K.S. "GA based Optimal Sizing & Placement of Distributed Generation for Loss Minimization".- PWAST.ORG, December 2007.
- (3) GUEDES, Larissa M.; "Localização e Dimensionamento de Unidades de Geração Distribuída em Redes de Distribuição Radiais"; ENE/FT:UnB, Mestrado em Engenharia Elétrica, 2006.
- (4) ACHARYA, N.; MAHAT, P.; MITHULANANTHAN, N. "An Analytical Approach for DG Allocation in Primary Distribution Network". ELSEVIER. Electrical Power & Energy Systems. February 2006.
- (5) ELGERD Olle I.; "Electric energy theory: an introduction"; McGraw Hill; 1976.
- (6) MONTICELLI, ALCIR J. "Fluxo de carga em redes de energia elétrica". Editora Edgard Blucher Ltda, 1946.
- (7) MENEZES, Taciana V.; SILVA, Luiz. C.P. "A Method for Transmission Loss Allocation Based on Sensitivity Theory". University of Campinas, DSCE/FEEC/UNICAMP. Campinas, São Paulo, Brazil. IEEE 2006.
- (8) ERWIN, Samuel R.; FALLON, Scott A.; GIBSON Charles A. "On-line Calculation of Incremental Transmission Losses in a Electric Power System". The University of Alabama. IEEE 1988.
- (9) VENKATESH B.; RANJAN R.; GOOI H.B. "Optimal Reconfiguration of Radial Distribution Systems to Maximize Loadability". IEEE Transactions on Power Systems vol.19, nº1, February 2004.