

Avaliação Técnico-Econômica da Viabilidade de Projetos de Geração Distribuída

N. Kagan C. C. B. Oliveira J. C. Guaraldo - Enerq/USP
C. R. Benedik; A. Conceição - Elektro S.A.

RESUMO

A instalação de geração distribuída (GD) nas redes de distribuição de energia elétrica no Brasil é um assunto relativamente novo, que apresenta novos desafios, principalmente do ponto de vista técnico. A conexão e operação de novas unidades de geração distribuída demandam um estudo preliminar para avaliar seus impactos na rede de energia elétrica, de tal forma que alguns efeitos indesejáveis sejam evitados. Neste contexto, estudos de fluxo de potência e curto circuito constituem a base para avaliação do impacto de novas unidades de GD sobre o carregamento dos equipamentos, sobre o perfil de tensão e sobre o sistema de proteção da rede de distribuição. Este artigo apresenta a metodologia que permite a realização destes estudos, os quais foram implementados num sistema computacional, que foi implementado na ELEKTRO, integrado ao seu Sistema de Gerenciamento da Distribuição (SGD). O trabalho é resultante do projeto de P&D, que agora se encontra em seu segundo ciclo, quando estão sendo analisados aspectos relacionados à otimização da alocação de unidades de geração distribuída na rede de distribuição. A metodologia e sua implementação representam uma contribuição efetiva, que facilitam sobretudo o estudo de inserção de GDs em redes de distribuição, de modo a otimizar o suprimento de energia elétrica no país, o que coloca a pesquisa como sendo de grande relevância, permitindo a rápida avaliação técnica de novas unidades de GD no sistema de distribuição.

PALAVRAS-CHAVE

Curto circuito; desequilíbrios; fluxo de potência; geração distribuída; redes de distribuição.

I. METODOLOGIA DE FLUXO DE POTÊNCIA

A. Introdução

As ferramentas mais importantes para avaliar o impacto de novas unidades de GD em redes de distribuição são os programas de fluxo de potência e curto circuito. As metodologias aqui estabelecidas permitem a análise integrada de redes de subtransmissão e redes primárias, aqui denominadas, respectivamente, como redes de distribuição AT e MT.

A maioria das redes MT, principalmente as aéreas, opera em configuração radial, com uma fonte apenas (representada por uma barra de suprimento na subestação de distribuição). A análise de fluxo de potência para redes radiais é muito eficiente, pois leva em consideração a es-

trutura da rede (cada nó da rede é 'alimentado' por um único trecho de rede), resultando em ordenação conveniente dos elementos da rede. Além disso, como será mostrado mais adiante neste artigo, um fluxo de potência trifásico permitirá a análise de redes e cargas desequilibradas.

Entretanto, quando uma ou mais unidades de GD são instaladas, o sistema opera com mais de uma fonte, o que pode ser tratado de duas formas:

- Representação de unidades de GD como cargas negativas, isto é, as potências ativa e reativa injetadas por cada unidade são supostamente conhecidas e o modelo de fluxo de potência em redes radiais pode ser utilizado;
- Representação de unidades de GD como barras de geração (para cada unidade, potência ativa e magnitude da tensão são conhecidos), isto é, um método de fluxo de potência convencional, como o método de Newton-Raphson, poderia ser usado.

A metodologia de fluxo de potência desenvolvida nesta pesquisa realmente utiliza as duas formulações acima.

O método de Newton-Raphson permite a determinação da potência reativa injetada por cada unidade de GD. Isto é realizado sobre uma rede reduzida, que incorpora a rede AT e uma parcela representativa da rede de distribuição MT, na qual trechos e cargas equivalentes são pré-determinados por método a ser detalhado neste artigo.

Uma vez que a injeção de potência reativa é obtida por unidades de GD, estas podem ser representadas por uma carga negativa, o que permite o uso do fluxo de potência trifásico para cada alimentador de distribuição.

O enfoque acima é muito eficiente, dado que um algoritmo de fluxo de potência convencional é executado sobre uma rede de tamanho reduzido e um fluxo de potência trifásico, eficiente e específico para redes radiais, é executado sobre redes completas e desequilibradas devido as cargas ou devido a assimetria dos componentes da rede (por exemplo, não transposição das linhas de distribuição).

Os itens seguintes descrevem o método de Newton-Raphson convencional, bem como o método para determinação da rede reduzida e o algoritmo de fluxo de potência trifásico para redes radiais.

B. O Algoritmo de Newton-Raphson

Este item apresenta uma descrição simplificada de um algoritmo de fluxo de potência convencional, usado para determinação de fluxos de potência e níveis de tensão em

N. Kagan e C. C. B. Oliveira são professores da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (e-mails: nelsonk@pea.usp.br e barioni@pea.usp.br).

J. C. Guaraldo é pesquisador sênior do Enerq/USP (email: jcguaraldo@terra.usp.br).

C. R. Benedik e A. Conceição são engenheiros da Elektro S/A.

redes integradas MT/AT. Em métodos de fluxo de potência, é mais comum serem definidos três tipos de barras, quais sejam:

- Barra swing (ou barra de referência), na qual o ângulo e magnitude da tensão são conhecidos. Em alguns casos específicos, quando múltiplas barras são conectadas os sistemas de transmissão, múltiplas barras swing podem ser consideradas.
- Barra PV ou de geração, na qual são conhecidos a potência ativa injetada e a magnitude de tensão. Este tipo de barra é útil para a representação de geradores conectados no sistema, como é o caso de unidades de GD.
- Barra PQ ou de carga, na qual as potências ativa e reativa injetadas são conhecidas.

Assumindo-se conhecidos:

- $\dot{e}_n = e_n | \underline{\delta}_n$ - tensão, em pu, para uma barra genérica n ;
 - $\bar{y}_{nk} = y_{nk} | \underline{\theta}_{nk}$ - elemento "n-k" da matriz de admitâncias nodais;
 - $p_n + j q_n$ - potência complexa injetada, em pu, numa barra n ,
- a equação abaixo relaciona a potência injetada na barra n e as tensões em outras barras da rede através da matriz de admitâncias nodais:

$$p_n - j q_n = \dot{e}_n^* \sum_k \bar{y}_{nk} \dot{e}_k = \sum_k e_n e_k y_{nk} | \underline{\delta}_k + \underline{\theta}_{nk} - \underline{\delta}_n \quad (1)$$

ou:

$$\begin{aligned} p_n &= \sum_k e_n e_k y_{nk} \cos(\delta_k + \theta_{nk} - \delta_n) \\ q_n &= \sum_k e_n e_k y_{nk} \sin(-\delta_k - \theta_{nk} + \delta_n) \end{aligned} \quad (2)$$

Dada uma rede com n_v barras de geração, n_L barras de carga e uma barra swing, existem $n_v + n_L$ variáveis correspondendo ao ângulo δ de tensões em barras e n_L variáveis relativas às magnitudes de tensão em barras. A linearização das equações (2) fornece a relação entre as variações de injeções de potência ativa (nas barras de geração e de carga) e de potência reativa (nas barras de carga) como função das variações de ângulo e de magnitude de tensão, o que pode ser escrito como:

$$\begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta e \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde J_i são as sub-matrizes da matriz do Jacobiano:

$$J_1 = \frac{\partial p}{\partial \delta} \quad J_2 = \frac{\partial p}{\partial e} \quad J_3 = \frac{\partial q}{\partial \delta} \quad J_4 = \frac{\partial q}{\partial e} \quad (4)$$

O método Newton-Raphson utiliza as equações (2), (3) e (4) em um processo iterativo, resolvido através dos seguintes passos:

- Magnitudes e ângulos de fase de tensões são assumidos (usualmente 1 pu para as magnitudes e 0° para os ângulos de tensão).

- Potências ativas e reativas injetadas nas barras de carga e potências ativas injetadas nas barras de geração são calculadas pelas equações (2). Se estes valores não diferem, dentro de uma tolerância, dos valores especificados nesta barra, o processo alcançou convergência.
- A matriz do Jacobiano é avaliada e a solução do sistema de equações (3) leva à determinação das variações de ângulo em barras de carga e de geração e à determinação das variações de magnitude de tensão em barras de carga. Isto permite a determinação das magnitudes e ângulos de tensão para a iteração seguinte:

$$\delta^{k+1} = \delta^k + \Delta \delta \quad e^{k+1} = e^k + \Delta e \quad (5)$$

- Quando a convergência é alcançada, as potências ativa e reativa injetadas na barra swing e as potências reativas injetadas em barras de geração são determinadas. Também são avaliados os fluxos de potência e perdas ativas e reativas em componentes do sistema.

A aplicação do método acima para redes integradas AT/MT é direta, dado que o método contempla redes em malha e um ou mais pontos de suprimento.

C. Redução da Rede MT

Quando unidades de GD são conectadas ao sistema de distribuição MT, o método de Newton-Raphson aqui descrito pode ser utilizado de forma eficiente, desde que a rede primária seja convenientemente reduzida para uma rede equivalente, com menor número de barras e trechos. A rede reduzida é avaliada de forma que apenas os nós que estejam no caminho entre as unidades de GD (ou de algumas outras barras específicas previamente selecionadas) e a barra da subestação de distribuição sejam mantidos. O procedimento pode ser descrito como se segue:

- A barra MT da subestação de distribuição, as barras com unidades de GD e, eventualmente, algumas barras especificadas pelo usuário, são mantidas.
- As barras no caminho entre uma dada barra com GD e a barra da subestação são mantidas.
- As barras no caminho entre barras especificadas pelo usuário e a barra da subestação são mantidas.
- As demais barras do sistema são descartadas, e suas demandas são transferidas para as barras mais próximas no alimentador.

Na determinação da rede reduzida, um passo adicional pode ser realizado, no qual as barras de carga conectando até dois trechos de rede, com demandas significativamente baixas, são convenientemente eliminadas. Da mesma forma, a demanda correspondente, apesar de pequeno valor, é transferida para a barra subsequente mantida.

Uma vez que o método de Newton-Raphson é aplicado para a rede integrada, que considera a rede MT e a rede reduzida MT, as injeções de potência ativa e reativa nas unidades de GD podem ser usadas como entrada para um

método de fluxo de potência mais preciso, especialmente projetado para configurações radiais com desequilíbrios, como descrito no item seguinte.

D. Fluxo de potência trifásico para redes radiais

Como explicado acima, as unidades de GD podem ser consideradas como 'cargas negativas', de modo que o alimentador primário possa ser considerado como radial. Neste caso, o algoritmo de fluxo de potência é muito eficiente, pois utiliza a estrutura ordenada da rede, isto é, cada barra do sistema é suprida por um único trecho (ramo).

Para modelar sistemas de distribuição MT, capacitores em derivação, relativos às linhas de distribuição, podem ser desprezados. Para obter a queda de tensão em trechos de redes desequilibradas, o método utiliza a matriz de impedâncias dos elementos de rede, que compreende as impedâncias próprias e mútuas entre as fases A, B e C e o cabo neutro N, conforme mostrado na figura 1. Esta matriz relaciona as quedas de tensão nas três fases e no neutro de um trecho de rede com as correspondentes correntes de fase e de neutro, conforme equação abaixo:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_A \\ \Delta V_B \\ \Delta V_C \\ \Delta V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} & Z_{AN} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} & Z_{BN} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} & Z_{CN} \\ Z_{NA} & Z_{NB} & Z_{NC} & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

Valores das demandas em cada fase são avaliados para cada consumidor conectado a cada transformador de distribuição e para os consumidores primários através de curvas típicas de carga e consumos mensais obtidos do sistema de gerenciamento da rede. Além disso, de acordo com o tipo de transformador de distribuição (trifásico, monofásico, etc.), é possível avaliar as características de desequilíbrio da carga. As curvas de carga são simplificadas para 4 períodos diários, por exemplo, representando a madrugada, manhã, tarde e noite.

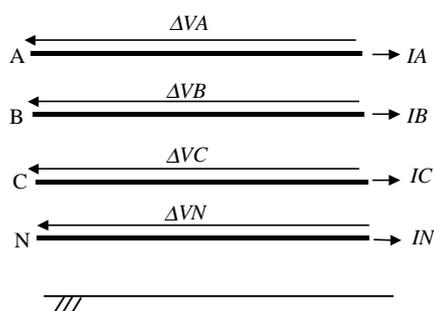


FIGURA 1 - Trecho da rede

A determinação de correntes nos trechos e níveis de tensão baseia-se no método de Gauss, estruturado para tratar eficientemente as redes radiais:

- correntes injetadas nas barras de carga (consumidores primários, transformadores de distribuição, iluminação pública, bancos de capacitores e unidades de GD) são

avaliadas, por fase, assumindo-se tensão nominal (1pu) em toda a rede;

- uma lista ordenada é usada para mover das barras terminais do alimentador (as mais distantes eletricamente da subestação) em direção ao início do alimentador, quando são determinadas gradualmente as correntes de trechos; as correntes de fase e de neutro de um dado trecho permitem a avaliação das quedas de tensão, conforme equação (6);
- partindo da barra da subestação, onde o nível de tensão é conhecido, as tensões nas demais barras da rede são gradualmente determinadas em direção às barras terminais da rede, utilizando-se a lista ordenada e as quedas de tensão nos trechos obtidas no passo anterior;
- de acordo com o modelo de carga (isto é, a maneira como a corrente de carga varia com a tensão aplicada), correntes nos pontos de carga são atualizadas de acordo com as tensões determinadas no passo anterior, e outra iteração é realizada até que as tensões entre duas iterações sucessivas não variem, dentro de uma determinada tolerância.

II. METODOLOGIA PARA O CURTO CIRCUITO

Para representação dos pontos de suprimento, impedâncias equivalentes são utilizadas. Estas são representadas pelas correspondentes impedâncias seqüenciais. Quando o sistema é suprido por múltiplos pontos, trechos fictícios podem ser utilizados na rede equivalente para complementar a representação do sistema externo.

A figura 2 ilustra o procedimento, onde Z_1 , Z_2 e Z_{12} são as impedâncias representativas do sistema externo. Unidades de GD são representadas pelas suas correspondentes impedâncias, considerando os transformadores de conexão.

- rede completa
- rede equivalente

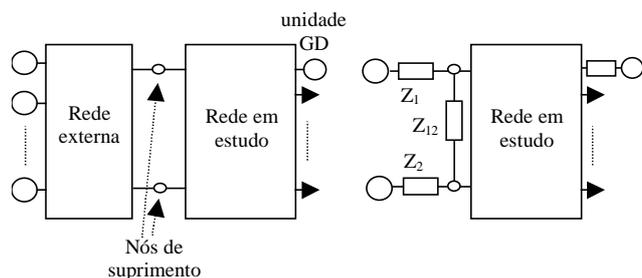


FIGURA 2 - Modelo de rede para estudos de curto circuito

O algoritmo de cálculo de curto circuito é baseado na avaliação de impedâncias seqüenciais equivalentes para as barras onde as correntes de defeito são determinadas. O procedimento de análise do curto circuito, para uma da barra i , pode ser resumido nos passos a seguir:

- As matrizes de admitâncias nodais, de seqüência positiva e zero, são obtidas com base em modelos convencionais de linhas de subtransmissão e de distribuição pri-

mária, transformadores de potência (com correspondentes conexões de enrolamentos), pontos de suprimento e unidades de GD;

- As iésimas colunas das matrizes de impedâncias nodais, seqüências positiva e zero, são determinadas pela solução do seguinte sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 1 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{1i} & Y_{1n} \\ Y_{i1} & Y_{ii} & Y_{in} \\ Y_{n1} & Y_{ni} & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{i1} \\ \dots \\ Z_{ii} \\ \dots \\ Z_{in} \end{bmatrix}$$

A impedância equivalente Z_{ii} permite a avaliação das correntes de curto circuito no ponto de defeito, enquanto que as impedâncias de transferência Z_{ik} permitem a avaliação das tensões em outras barras e as contribuições de corrente nos componentes da rede.

Quando analisando sistemas integrados AT / MT, nas quais unidades de GD são conectadas, existe uma forte necessidade de verificação das contribuições de corrente por estas unidades quando ocorrem curtos circuitos em outras barras especificadas (no sistema AT ou MT). Além disso, os resultados obtidos permitem a análise de como os esquemas de proteção operam em condições de curto circuito na rede.

III. SISTEMA COMPUTACIONAL E EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Um sistema computacional foi desenvolvido para estudar o impacto de novas unidades de GD nos sistemas de distribuição de energia elétrica. A análise é realizada considerando os sistemas MT e AT, usando a metodologia descrita previamente no artigo. Além disso, a ferramenta é integrada aos sistemas de bases de dados da Empresa, para que os engenheiros possam realizar as simulações considerando os sistemas de subtransmissão, conjuntamente com as subestações de distribuição e correspondentes alimentadores primários.

Para ilustrar a metodologia e a ferramenta computacional, a figura 3 mostra um sistema de distribuição AT, onde duas barras de suprimento B1 e B2, correspondendo às subestações de suprimento S1 e S2, são identificadas.

Este subsistema supre duas subestações de distribuição e um consumidor AT, denominado CGa.

Uma das subestações contém 2 transformadores de potência TR1 e TR2 e a outra subestação um único transformador TR3.

A Figura 4 mostra uma rede de distribuição MT (seis alimentadores primários), na qual duas unidades de GD são instaladas.

O usuário controla onde as unidades são instaladas e fornece informações relativas às condições de operação, por exemplo, potências injetadas e ajustes de tensão em GDs, conforme ilustrado em uma janela da figura 4. A figura ainda apresenta a rede reduzida dinamicamente avaliada, e identificada pelos caminhos que conectam as unidades de GD à barra da subestação.

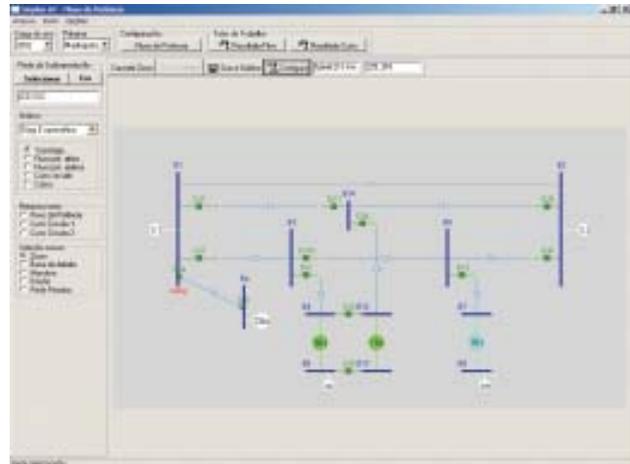


FIGURA 3 - Sistema de Subtransmissão (AT)

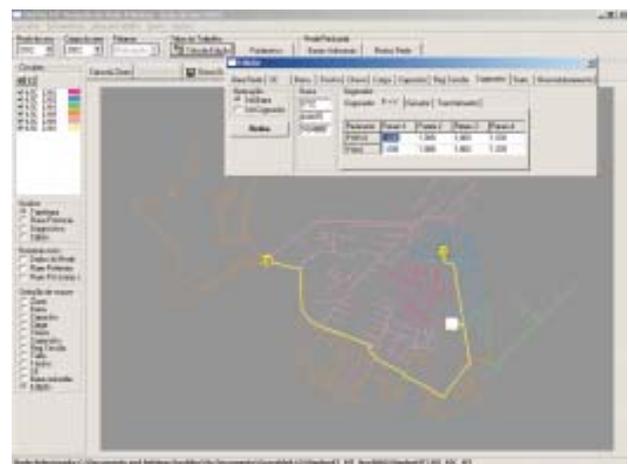


FIGURA 4 - Sistema de Distribuição Primária e Rede Reduzida

Uma vez que as unidades de GD são incorporadas ao sistema MT, a ferramenta computacional é capaz de transferir as informações relevantes para serem incorporadas à rede AT, conforme mostrado na figura 5, na qual as unidades DG1 e DG2 foram conectadas ao sistema. O programa de fluxo de potência é então executado. Alguns recursos para visualização dos resultados (por exemplo, diferentes cores de trechos em função de faixas de carregamento e diferentes cores de barras em função de faixas de tensão) foram introduzidos na ferramenta para facilitar a análise. Na figura, a janela de resultados apresenta os fluxos de potência e correntes passantes no trecho de linha T4.

Uma vez que os fluxos de potência reativa injetados por unidades de GD são avaliados, estes são usados pelo algoritmo de fluxo de potência trifásico para a rede MT, aplicada à rede de distribuição completa da figura 4.

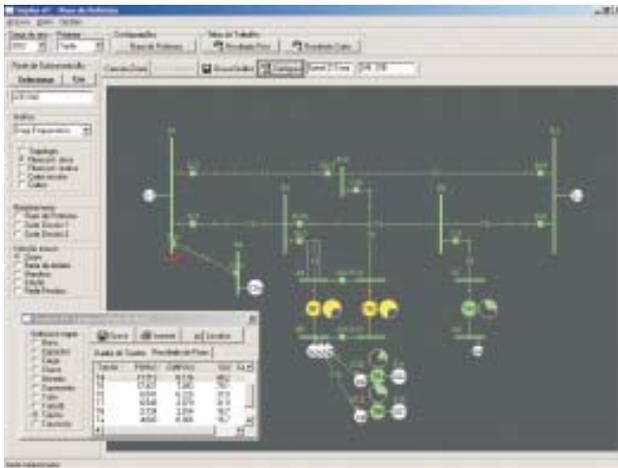


FIGURA 5 - Estudo de fluxo de potência

A figura 6 ilustra a ferramenta de análise de curto circuito, com as duas unidades de GD incorporadas. Deve-se notar que o trecho fictício (TF1) foi incluído entre as barras B1 e B2, para melhor representar o sistema externo em condições de crto circuito nas barras do sistema em estudo (vide figura 2). A figura 6 ilustra como a unidade DG2, localizada na barra B11, contribui para um curto circuito trifásico na barra B3 e mostra como outros resultados podem ser apresentados, como por exemplo as contribuições de corrente nos trechos, níveis de tensão para os diferentes tipos de defeito, etc.

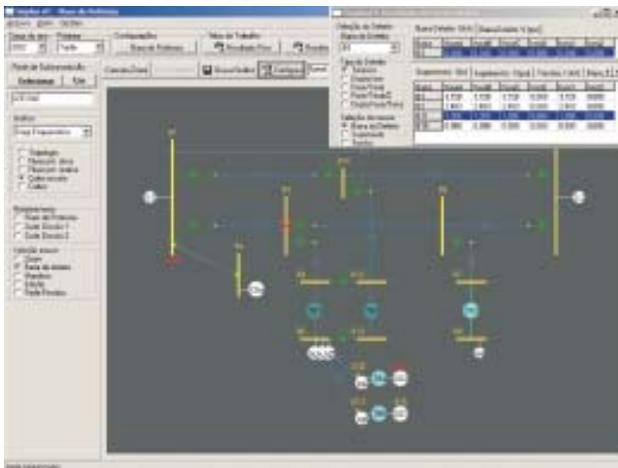


Figura 6 - Estudo de curto circuito

IV. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou metodologia e ferramenta computacional, que permitem a engenheiros de empresas de distribuição avaliar aspectos técnicos relacionados com a instalação de unidades de geração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica. Os resultados aqui alcançados representam uma parte das atividades do Projeto de P&D desenvolvido pelo Enerq/USP com a Elektro. As atividades atuais concentram-se em ferramentas de

otimização da instalação de novas unidades de GD no sistema, e deverão ser publicados num próximo artigo.

O modelo desenvolvido permite a inclusão, de forma simples, de unidades de GD no sistema de distribuição. A redução da rede MT permite que modelos convencionais para análise de fluxo de potência e curto circuito sejam eficientemente utilizados, de forma que os engenheiros possam realizar estudos globais, considerando não só o sistema MT como também o sistema AT.

Como resultado da análise de fluxo de potência com o modelo convencional, aplicado à rede MT/AT, são obtidos os fluxos de potência injetados nas unidades de GD em diferentes níveis de carga. O sistema de distribuição primária (MT) pode então ser analisado em detalhe pelo algoritmo de fluxo de potência trifásico, que é executado de forma eficiente em configurações radiais, como é o caso de redes MT aéreas.

O módulo de curto circuito permite a simulação de diferentes tipos de defeitos em qualquer barra selecionada, seja na rede MT ou AT. Os resultados são apresentados ao usuário de forma amigável, de forma que as contribuições de unidades de GD, níveis de tensão em barras da rede e correntes nos trechos e componentes da rede possam ser analisados. A avaliação do impacto nos esquemas de proteção da rede de distribuição e seu comportamento para condições de curto circuito podem ser realizados a partir da ferramenta desenvolvida.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Kagan, N.; Silva, J. C. B. Otimização do Planejamento de Sistemas de Distribuição introduzindo Fontes Alternativas e Gerenciamento do Lado da Demanda. Proceedings CIER 2000. Buenos Aires, Argentina, Nov. 2000.
- [2] Kagan, N.; Silva, J. C. B. Inclusão de Geração Distribuída na Otimização do Planejamento de Sistemas de Distribuição. Proceedings da Latin Power & Gas Conference. Rio de Janeiro, Brazil, Aug. 2001.
- [3] Kagan, N.; Silva, J. C. B.; Lima, W. S. Economical Comparison of Distributed and Central Station Generation in the Brazilian Whole-sale Energy Market. VIII SEPOPE - Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Brasília, Brazil, 2002.
- [4] Kagan, N.; Silva, J. C. B.; Lima, W. S.; Silva, J. C. R. Distribution Systems Planning Considering Distributed Generation Within a Competitive Environment. IEEE/PES T & D 2002 Latin America Conference, São Paulo, Brazil, 2002.