



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Aplicativo Computacional Para Análise de Propagação Harmônica em Redes de Distribuição De Energia Elétrica

Carlos A. Canesin	Luís C. O. Oliveira	Danusia De Oliveira Lima
UNESP - FEIS	UNESP-FEIS	RGE – Rio Grande Energia
canesin@dee.feis.unesp.br	origa@dee.feis.unesp.br	dlima@rge-rs.com.br

Ney Álvares Cabral	Teobaldo	Paulo Ricardo
RGE – Rio Grande Energia	RGE – Rio Grande Energia	RGE – Rio Grande Energia
ncabral@rge-rs.com.br	tbohn@rge-rs.com.br	ppereira@rge-rs.com.br

Palavras-chave

análise harmônica
modelação de cargas não lineares
propagação de harmônicas
sistemas de distribuição de energia elétrica

Resumo

Nos últimos anos tem-se observado uma alteração significativa do perfil das cargas equivalentes nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Tal fato se deve principalmente ao incremento significativo dos processadores eletrônicos de energia elétrica que, em geral, se comportam como cargas não lineares, provocando distorções harmônicas nas correntes e tensões ao longo da rede elétrica. Os efeitos destas cargas não lineares, mesmo que concentradas em setores específicos da rede, se propagam ao longo dos ramais, influenciando o comportamento de toda rede elétrica. Para avaliação deste fenômeno é imprescindível a análise do fluxo das correntes harmônicas e o entendimento das causas e efeitos das conseqüentes distorções harmônicas de tensões. Os aplicativos usuais para cálculo do fluxo harmônico consideram redes equivalentes unifilares, admitindo-se sistemas balanceados e equilibrados, não sendo ferramentas apropriadas para análise da operação e da influência/interação de elementos de mitigação. Neste contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma ferramenta de análise da propagação trifásica de harmônicas, utilizando-se modelos modificados de Norton, considerando-se a natureza real de operação dos sistemas elétricos desbalanceados e desequilibrados.

1. Introdução

Na busca de facilidades à vida humana moderna, vários equipamentos e dispositivos têm sido disponibilizados para uso nos diferentes seguimentos de consumo. Estes equipamentos normalmente incorporam extensivamente recursos proporcionados pelo avanço da eletrônica de potência e se comportam como cargas não lineares, provocando distorções nas formas de onda de tensão e correntes.

Este cenário, de crescente aumento das distorções harmônicas nas correntes e tensões, apresenta contribuições de praticamente todos os seguimentos de consumo, os quais, também compartilham das conseqüências indesejáveis atribuídas à perda de qualidade da energia¹⁻⁸. De um modo geral as principais conseqüências se traduzem em desligamentos de cargas sensíveis, falhas em equipamentos eletro-eletrônicos e interrupção do fornecimento, causando grandes prejuízos, sobretudo, no setor industrial.

Para as empresas do setor de distribuição da energia elétrica a perda de qualidade da energia elétrica disponibilizada, traz também importantes conseqüências. No imediato, as principais conseqüências resumem-se no aumento das perdas elétricas no sistema e, por conseguinte, a diminuição dos lucros. No médio e longo prazo, caso nenhuma providencia seja encaminhada no sentido de manter sob rígido controle os efeitos de tais distorções harmônicas, o maior desafio será garantir o aumento do consumo e a satisfação dos clientes em um ambiente competitivo entre as empresas do setor.

Visando o entendimento das formas de geração das distorções harmônicas e dos mecanismos de propagação das correntes e tensões harmônicas pelos sistemas elétricos, é comum o uso de aplicativos computacionais para a simulação digital destes fenômenos. Neste contexto, os principais interessados são as concessionárias de energia elétrica as quais têm direcionado esforços para incorporar nos estudos de planejamento, expansão e operação das redes, procedimentos para avaliação dos índices de qualidade da energia elétrica. Os principais objetivos almejados com esta iniciativa envolvem a qualificação e quantificação dos efeitos das harmônicas nos equipamentos conectados, no custo operacional do sistema e na continuidade do serviço. Trata-se também de uma importante ferramenta para a análise técnica de pedidos de novas ligações, instalação de equipamentos de mitigação dos efeitos destas cargas não lineares, atendimento aos limites estabelecidos pela legislação vigente, dentre outros¹⁻¹¹.

Neste contexto, este trabalho tem o objetivo de apresentar um aplicativo computacional desenvolvido para estudos de propagação de harmônicas em redes de distribuição. O aplicativo apresenta como principais características a representação trifásica da rede elétrica e o uso de uma técnica de simulação mista que incorpora os aspectos positivos proporcionados pelo uso simultâneo de modelos no domínio do tempo e da frequência. A implementação computacional foi realizada sob uma plataforma gráfica e interativa, de tal forma a proporcionar uma interface amigável ao usuário fazendo-se uso de bases de dados preexistentes.

2. Metodologia para Análise da Propagação das Distorções Harmônicas

A ligação de uma carga não linear afeta o funcionamento global do sistema elétrico, uma vez que as correntes não senoidais circulantes provocam distorções harmônicas nas tensões dos diferentes barramentos, ou, pontos de acoplamento de cargas, conforme ilustração exemplo da Figura 1.

Considerando-se os efeitos adversos das cargas não lineares nos demais equipamentos de consumidores adjacentes, a magnitude das tensões e correntes harmônicas é de grande preocupação das concessionárias de distribuição de energia elétrica.

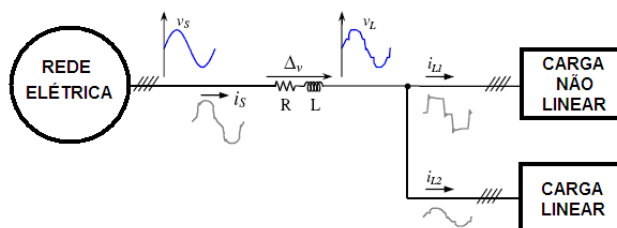


Figura 1 – Propagação das distorções harmônicas.

Os aplicativos computacionais para estudo da propagação das distorções harmônicas nos sistemas elétricos são atualmente ferramentas indispensáveis. Quanto melhor a representação do sistema maior

será a qualidade dos resultados obtidos, em termos de precisão. Neste contexto, um passo importante na elaboração destes aplicativos reside na caracterização e modelação das fontes geradoras de harmônicas. Por outro lado, o processo de cálculo a ser utilizado também constitui um fator decisivo na busca da fidelidade dos resultados tangíveis. Portanto, a análise dos sistemas de distribuição, quando da presença de cargas não lineares, envolve a necessidade da modelação destas cargas e dos principais dispositivos do sistema de distribuição.

As modelações disponíveis na literatura, para análise de penetração harmônica, podem ser divididas em dois grupos: modelagens no domínio do tempo e modelagens no domínio da frequência 1-8, 12-14. A modelagem no domínio da frequência normalmente é mais robusta, pois a solução é encontrada para cada frequência, individualmente, e os erros não são acumulativos. Utiliza-se o método das fontes de corrente para representação das cargas não lineares. Requer menor tempo de solução, porém, apresenta dificuldades em termos da dinâmica, controle, transitórios rápidos, e representação das cargas com características de descontinuidade.

A metodologia para modelagem no domínio do tempo baseia-se em integrações com tempos discretizados. Os períodos reais de operação, dentro de cada ciclo de operação do dispositivo, bem como, os sistemas de potência são descritos por equações diferenciais. A solução é obtida atribuindo-se um conjunto de condições iniciais para os estados do sistema e a estabilidade, bem como a precisão, dependem do passo de cálculo adotado. As componentes harmônicas das correntes e tensões são obtidas a partir das formas de onda resultantes, considerando-se a análise de Fourier discreta.

3. Modelação de Cargas

Um fator relevante é a escolha de uma técnica de modelação adequada para representação das cargas conectadas no sistema, sobretudo aquelas de natureza não-linear, em função das suas características operacionais, dos agrupamentos monofásicos, bifásicos e/ou trifásicos, bem como, de suas dependências com a tensão de suprimento³⁻⁴.

Na representação deste tipo de cargas, procura-se reproduzir a corrente drenada pelo equipamento quando submetido a condições nominais de operação. Para tanto, poder-se pensar na reprodução fiel dos circuitos elétricos, eletrônicos e eletromecânicos originais. Esta estratégia, embora dê resultados bastante precisos, leva a um aumento significativo da complexidade do modelo e das análises resultantes, sobretudo quando estão envolvidas simulações digitais. Há ainda grande dificuldade na obtenção dos circuitos correspondentes aos equipamentos, uma vez que não há interesse comercial dos fabricantes na divulgação deste tipo de informação. Adicionalmente, esta estratégia não pode ser diretamente aplicada para a representação de cargas compostas. Alternativamente, pode-se adotar a representação das cargas não-lineares por fontes de corrente ou tensões harmônicas equivalentes. Esta estratégia pode ser empregada quando se dispõe de informações precisas a respeito do conteúdo harmônico da corrente complexa drenada ou da tensão terminal em uma determinada carga. Há de se destacar ainda que, diferentemente do que ocorre com cargas não lineares industriais, em geral, a quais apresentam um comportamento de “fontes harmônicas de corrente”, as cargas não-lineares de uso doméstico e comercial têm um comportamento de “fontes harmônicas de tensão”⁵.

Para algumas aplicações específicas é possível efetuar uma análise harmônica a partir da medição das formas de ondas apresentadas pelas correntes das cargas não-lineares. Em estudos preliminares é comum utilizar o conteúdo harmônico desta corrente para compor modelos alternativos das cargas não-lineares, representando-as como fontes ideais de corrente harmônicas constantes. A norma IEEE 519 (utility version) recomenda a utilização desta metodologia, nos casos onde a distorção máxima de tensão na barra de interesse é igual ou inferior a 10%^{4, 6-7}.

Modelar um sistema como fonte de corrente ou tensão constante pode não ser preciso o suficiente, caso as condições de operação do sistema de alimentação variem muito em relação às condições em que o espectro harmônico da tensão ou da corrente fora determinado. Logo, como os sistemas de

distribuição consistem, geralmente, de várias impedâncias conectadas em paralelo, ao se mudar a condição de operação do sistema de alimentação, as correntes harmônicas injetadas nas barras, onde as medições foram realizadas, podem sofrer mudanças nos valores apresentados⁸.

A representação de cargas não lineares como fontes de corrente dependentes da tensão, torna-se importante na medida em que as correntes geradas por estas cargas sofrem influência direta da tensão de alimentação. Neste sentido, o modelo de Norton pode ser utilizado quando a característica da carga equivalente sugerir sua representação através de fonte de corrente⁶⁻⁸.

Para estimar um modelo de Norton, como o representado na Figura 2, medições da corrente harmônica (I_h) e tensão harmônica (V_h) devem ser feitas em duas condições distintas de operação.

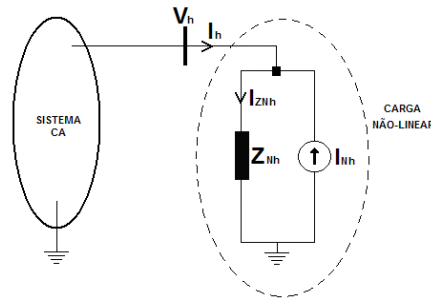


Figura 2 – Modelo de Norton.

Sendo:

V_h	- Tensão harmônica no ponto de conexão da carga;
I_h	- Corrente harmônica injetada no sistema de distribuição;
I_{Nh}	- Corrente harmônica de Norton;
I_{ZNh}	- Corrente harmônica através da impedância de Norton;
Z_{Nh}	- Impedância harmônica de Norton.

Quando se muda a condição operativa do sistema, a corrente injetada pelo sistema pode mudar. A informação, quanto à mudança e suas causas, são usadas para se estimar o modelo de Norton para o lado de carga de um sistema de distribuição. A corrente $I_{h,i}$, representa o valor da corrente harmônica obtida na medição i :

$$I_{h,i} = I_{Nh} - I_{ZNh,i} \quad (1)$$

As correntes harmônicas, através da impedância harmônica de Norton ($Z_{N,h}$) na i -ésima medição, podem ser calculadas, como:

$$I_{ZNh,i} = \frac{V_{h,i}}{Z_{Nh}} \quad (2)$$

Combinando-se as expressões (1), (2) tem-se:

$$I_{h,i} = I_{Nh} - \frac{V_{h,i}}{Z_{Nh}} \quad (3)$$

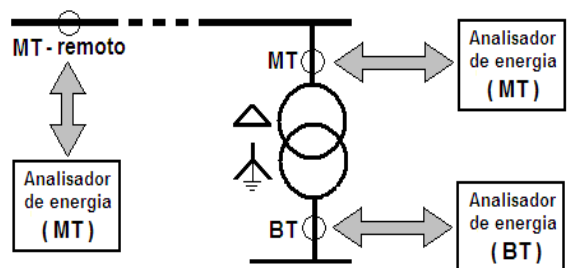
Considerando-se as medições em duas condições operacionais distintas do sistema alimentador, tem-se:

$$Z_{Nh} = \frac{(V_{h,i} - V_{h,i+1})}{(I_{h,i+1} - I_{h,i})} \quad (4)$$

$$I_{Nh} = I_{h,i} + \frac{V_{h,i}}{Z_{Nh}} \quad (5)$$

A. Procedimento de Medição

Os modelos de Norton para representação de um agrupamento de cargas pode ser obtido a partir de medições realizadas com um analisador de energia que forneça as componentes harmônicas das tensões e corrente trifásicas. Os modelos podem ser derivados diretamente na rede primária em qualquer nó de interesse ou na secundária no barramento de saída do transformador, Figuras 3.



(a) Pontos de medição



(b) Instalação dos medidores (MT e BT)

Figura 3 – Procedimento de Medição.

É importante destacar que, conforme estabelecido anteriormente, para a determinação do modelo de Norton pressupõe-se que a característica da carga composta, no que se refere ao tipo de carga predominante, não tenha sofrido alterações, sob pena de comprometer o desempenho do modelo. Destaca-se também que o estudo de penetração harmônica refere-se a uma condição estática do sistema. Assim, para o conhecimento detalhado do comportamento da rede, frente às distorções harmônicas, é indispensável que estudos recorrentes sejam encaminhados no sentido de compor os cenários mais críticos, sob o ponto de vista dos níveis de distorções harmônicas esperadas.

Neste sentido, considerando-se a dinâmica do sistema, recomenda-se que sejam utilizadas no mínimo duas medições por período e/ou seguimento horário onde o perfil de consumo não tenha sofrido alterações significativas. Desta forma, baseando-se nos resultados preliminares obtidos, estima-se que, a depender do tipo de alimentador e ramal secundário considerado, sejam necessários no mínimo de três a quatro modelos distintos, referenciados especificamente aos períodos da manhã, da tarde, de ponta de carga e da noite.

4. Modelação do Sistema e Método de Simulação

A adoção de uma representação trifásica da rede torna-se indispensável, sobretudo tratando-se de redes de distribuição onde os desequilíbrios normalmente são significativos.

Neste trabalho, são adotadas condições simplificadoras que visam atender, principalmente, requisitos tais como minimização do tempo computacional, adequação à capacidade de armazenamento de dados durante o processo de solução numérica e limitações com respeito ao comportamento dinâmico das diferentes cargas não lineares. Para isto, utiliza-se um procedimento de cálculo misto que aglutina as principais vantagens associadas às técnicas de simulação no domínio do tempo e da frequência. Desta forma, pretende-se aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos, sem a imposição de restrições significativas quanto à representação das cargas e do sistema elétrico, conforme fluxograma ilustrado na Figura 4.

Basicamente, no que se refere à representação da rede, nenhuma condição simplificadora será adotada, a menos daquelas tradicionalmente usadas, ou seja, o sistema continua sendo representado de forma trifásica e a variação das resistências e indutâncias com a frequência não são consideradas nos estudos envolvendo sistemas de distribuição.

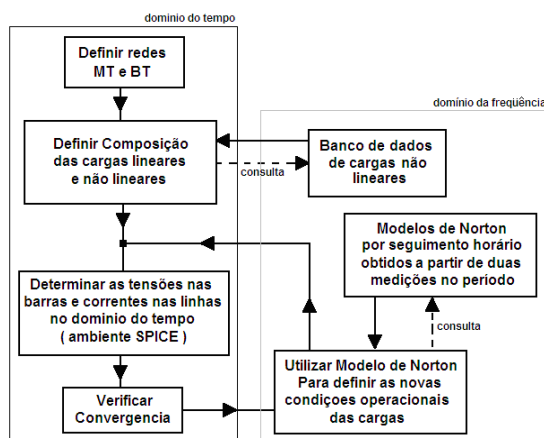


Figura 4 – Metodologia mista para modelação de cargas e simulação.

As cargas lineares conectadas às barras do primário são compostas por conjuntos R-L série, ligados em Y isolado. Os valores de R e de L são obtidos a partir das informações de consumo de energia registrados no banco de dados do alimentador.

Com relação às cargas não lineares, utiliza a metodologia baseada no modelo de Norton, descrita anteriormente. A inclusão de cargas não lineares nos estudos de simulação pode ser feita tanto na rede primária como na secundária. Quando o modelo de Norton é derivado de medições realizadas na rede secundária é indispensável a utilização de uma representação adequada para o transformador. Como se sabe¹², o efeito das conexões Y/ Δ sobre o fluxo de componentes de seqüência zero influencia significativamente os resultados, sobretudo no fluxo das componentes harmônicas múltiplas de três, notadamente concentradas nesta seqüência de fase. Considerando este fato, neste trabalho adotou-se para estes casos a modelagem proposta na referência¹²⁻¹⁴.

5. O aplicativo computacional

O aplicativo computacional desenvolvido é uma ferramenta de visualização, reconfiguração de rede e análise de propagação das distorções harmônicas de tensões e correntes.

Este aplicativo se organiza a partir de um banco de dados de redes de distribuição, atualmente utilizado pela empresa, que contem as coordenadas geográficas dos seus elementos constituintes, descrição dos equipamentos, bem como os dados de consumo de energia elétrica nos diferentes nós.

Ao se iniciar o aplicativo apenas o item “Abrir” encontra-se habilitado para seleção da rede que se deseja visualizar/analisar. Para selecionar a rede desejada, o usuário deve conhecer o caminho do arquivo de parâmetros da rede, que deverá ser obrigatoriamente um arquivo de extensão “.psc”, o qual é gerado a partir de outro aplicativo em uso pela concessionária. Uma vez selecionada a rede desejada, o aplicativo exibirá o esquema gráfico da mesma com todos os elementos disponíveis na base de dados.

Considerando-se a elevada densidade de parâmetros/elementos de determinadas redes, muitas vezes torna-se necessário a visualização ampliada de determinadas regiões e/ou equipamentos de interesse. Neste sentido o aplicativo disponibiliza várias ferramentas para controle de visualização dos diferentes elementos da rede, bem como de busca de dados físicos e de carregamento. A Figura 5 ilustra uma rede de distribuição visualizada em toda sua área de abrangência.

Para visualização dos parâmetros físicos da rede e dos carregamentos, foi implementada uma caixa de checagem referenciada como “Dados”. Ao selecionar tal ferramenta, uma tabela de apresentação de dados é exibida em sobreposição ao diagrama da rede. Nesta tabela apresentam-se dados sobre a localização geográfica dos nós, identificação dos parâmetros elétricos dos cabos, bem como os dados de consumo associados às diferentes cargas lineares e não-lineares.

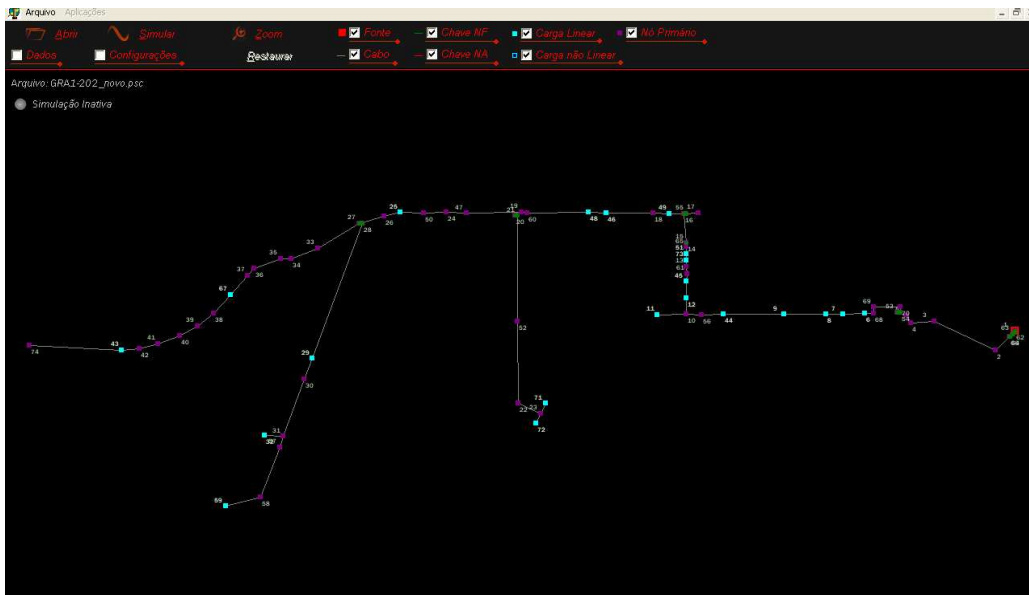


Figura 5 - Tela principal do ambiente interativo de simulação

A Figura 6 mostra a tabela de “Dados”, habilitada para ilustrar todos os trechos da rede sob análise. Para obter-se uma visualização ampliada da região adjacente a um nó selecionado, um trecho ou um ponto de consumo qualquer, basta clicar na linha da tabela em que se encontra exibido o elemento desejado.

Esta ferramenta também disponibiliza outros recursos de filtragem de dados a serem exibidos que podem ser selecionados por “categoria”. Observa-se nesta tabela que alguns itens somente serão habilitados para uso após a simulação digital de uma determinada condição operativa investigada.

A ferramenta “Zoom” pode ser utilizada pelo usuário, a qualquer momento, para se obter uma visualização ampliada de setores de rede. Esta ação é executada a partir do item “Zoom”, e em seguida selecionando-se a região da rede a ser detalhada. O aplicativo exibe, em um “Box” reduzido, uma orientação sobre a área visualizada em relação à rede global, o qual permite também o deslocamento da janela de visualização ativa. Destaca-se que a ferramenta de “Zoom” poderá ser aplicada consecutivamente na área ampliada anteriormente, com a finalidade de refinamento/melhoria da visualização do elemento desejado para análise. Para retornar à visualização inicial, basta clicar no botão “Restaurar”.

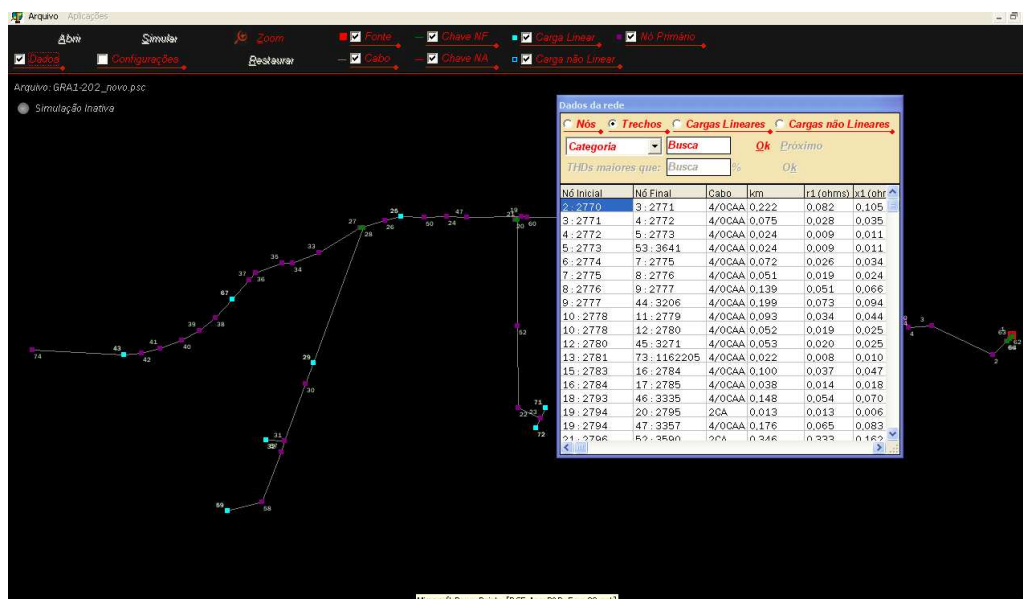


Figura 6 – Tabela ilustrativa dos dados da rede

Outro recurso igualmente importante é o que trata da reconfiguração da rede. Neste procedimento é possível alterar o estado das chaves de manobra bem como realizar a simplificação da rede através da concentração de cargas. A atuação sobre as chaves de manobra tem influencia direta sobre a topologia da rede e pode ser útil quando se deseja investigar a propagação das distorções harmônicas, sob determinadas condições operacionais em contingências. A Figura 7, ilustra uma visualização da rede com destaque apenas para o posicionamento das chaves de manobra com as ferramentas de “Zoom” e “Configuração ativadas”. A alteração do estado de uma chave é realizada diretamente selecionando-a na lista de chaves e em seguida escolhendo o item “Alterar Estado”. Uma vez realizada a alteração a nova configuração de rede pode ser armazenada em novo arquivo de dados para utilização/simulação futura.

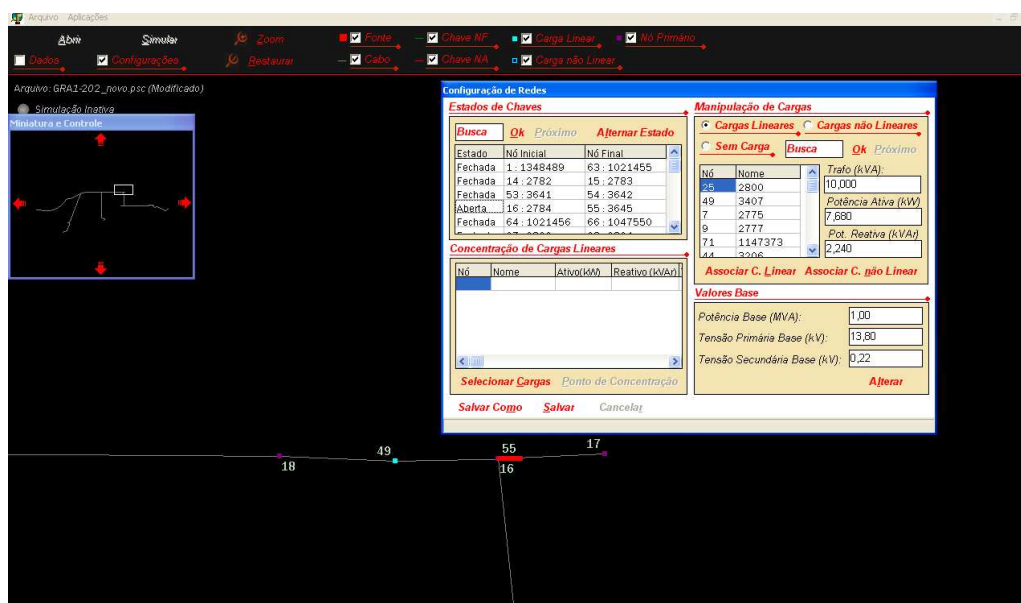


Figura 7 – Visualização da rede e tabela de configurações

Por outro lado, algumas investigações sobre a propagação de harmônicas podem ser direcionadas a determinados setores de interesse da rede, omitindo-se os demais ramos e nós. Para que os efeitos das cargas e ramos sobre o carregamento do sistema, omitidos na topologia da rede, sejam minimamente preservados, o processo de redução da rede deve ser cuidadosamente executado. O uso adequado desta ferramenta pode ser muito útil nos processos de análise para reduzir o tempo de simulação, sobretudo quando se deseja realizar análises setoriais em redes extensas.

A concentração de carga é executada ativando-se a ferramenta “Selecionar Cargas”. Com o uso do “mouse” o agrupamento de cargas selecionado para concentração se apresenta em destaque pela alteração da cor original e simultaneamente em uma lista com suas respectivas potências ativa e reativa.

O recurso de ampliação de imagem pode ser utilizado como apoio e o procedimento pode ser repetido tantas vezes quanto necessário para se obter o agrupamento desejado. Uma vez concluída a simplificação desejada, a carga total selecionada, ilustrada no “Box”, deve ser concentrada em um nó remanescente escolhido adequadamente de forma a preservar os conceitos básicos de fluxo de energia. A Figura 8 ilustra a tela correspondente à execução do procedimento descrito.

Além das cargas descritas na base de dados da rede, outras cargas lineares podem ser adicionadas aos diferentes pontos de consumos preexistentes. A alteração das condições de carregamento dos pontos de cargas é realizada através da ferramenta “Manipulação de Cargas”, ilustrada na Figura 9. Este “Box” dispõe de ferramenta de busca para identificar as cargas ou pontos de concentração de cargas de interesse e permite que novas cargas lineares ou não lineares sejam adicionadas. Para a adição de

cargas lineares o procedimento consiste na indicação dos novos níveis de potência ativa e reativa desejados nos pontos de interesse, acionando-se o procedimento “Associar C. Linear”.

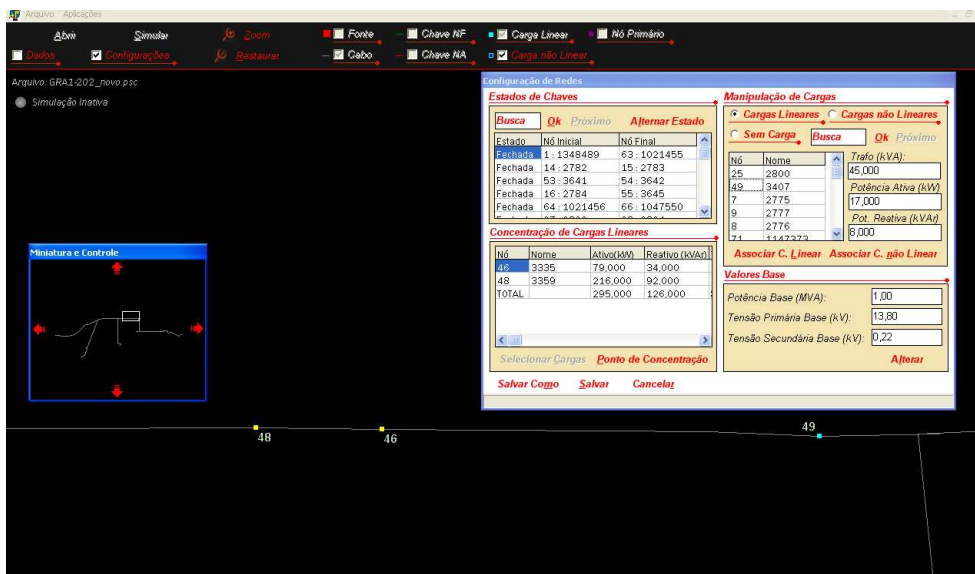


Figura 8 – Procedimento de concentração de cargas ativado

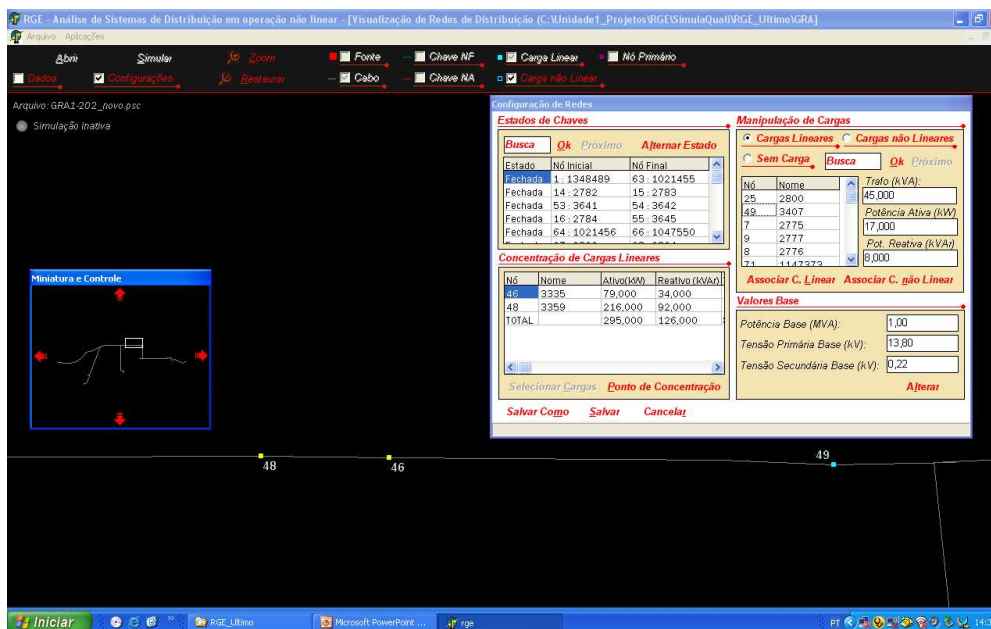


Figura 9 – Inserção de Cargas Lineares.

A adição de cargas não lineares é feita através da leitura de arquivos de medição extraídos da base de dados do equipamento de medida. Quando acionado o item “Associar C. não linear” o aplicativo abre uma janela para carregamento um arquivo de medição previamente disponibilizado. A partir da leitura deste arquivo é gerado um modelo de Norton, conforme Figura 10, de acordo com o procedimento descrito no item 3.

A simulação digital do sistema configurado é realizada a partir do botão “Simular”, disponível na parte superior da tela do aplicativo. Uma vez requisitada a simulação digital, o aplicativo gera o código da rede configurada no padrão PSpice e transfere o comando para este ambiente de simulação no domínio do tempo. Ao final da simulação o controle é retomado pelo aplicativo que fará as atualizações das correntes de Norton, segundo o modelo descrito anteriormente e remete o processo a uma nova simulação no domínio do tempo no ambiente PSpice. O processo é repetido até que a convergência seja atingida no nível de tolerância desejada para a variação da THD, na barra onde se encontra conectada a carga não linear.

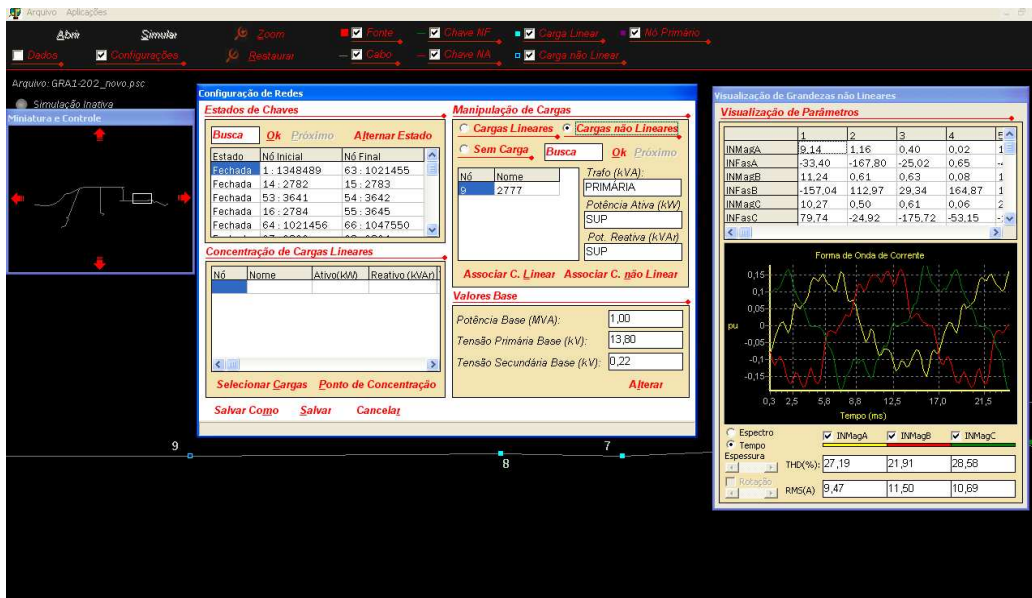


Figura 10 – Formas de onda de corrente e parâmetros do modelo de Norton

A Figura 11 mostra alguns resultados de simulação para a rede reduzida ilustrada. O sinalizador no canto superior esquerdo está ativado indicando que a simulação foi realizada e os resultados podem ser visualizados a partir da ferramenta “Dados da rede”. Como apoio à visualização de resultados a ferramenta disponibiliza alguns recursos de filtragem que podem ser utilizados para localizar trechos ou nós onde as distorções harmônicas excedem um valor limite especificado para a THD, nas corrente ou tensões, respectivamente. A Figura 11 ilustra o “Box” de resultados onde são apresentados todos os nós da rede. As formas de onda ou espectros harmônicos das tensões e correntes podem ser visualizadas, selecionando-se diretamente na lista apresentada no “Box” de resultados o nó ou trecho desejado. A Figura 11 ilustra os resultados obtidos para o nó 58 selecionado na lista, apresentando-se os principais parâmetros (valores eficazes e THD) para as tensões neste nó, além das formas de onda. Os resultados para as correntes em um dos trechos da rede são apresentados na Figura 12. Assim como no caso dos nós, um trecho de interesse pode ser selecionado para visualização das correntes circulantes. A ferramenta de filtragem pode ser utilizada, a qualquer momento, para identificar trechos de interesse. Para ambos os casos, tensões nos nós ou correntes nos trechos, além da apresentação das formas de onda ou espectros harmônicos, a tela de visualização apresenta também as amplitudes das componentes harmônicas individuais, além da THD e valores eficazes para cada uma das fases.

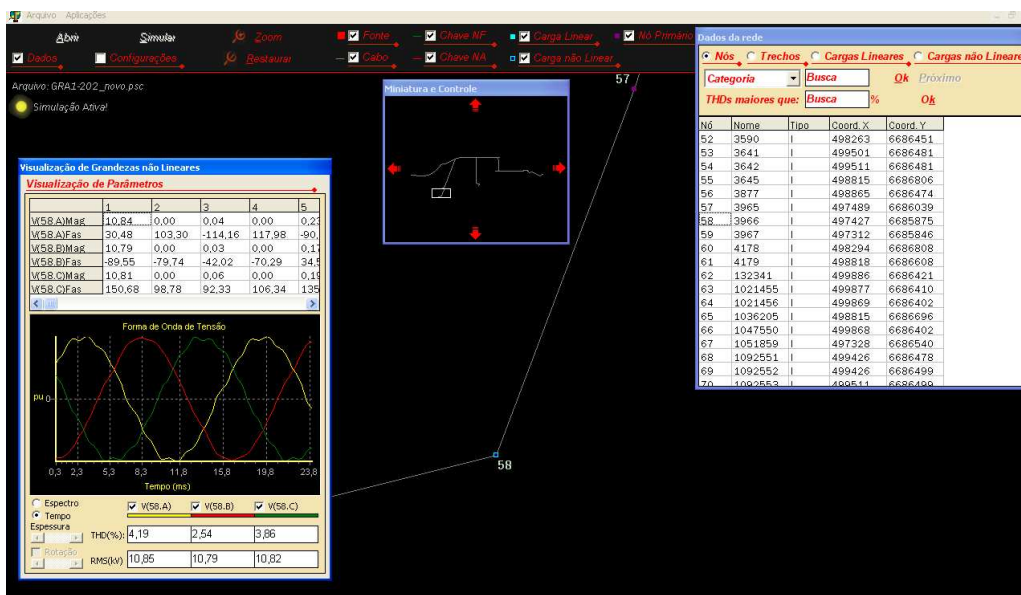


Figura 11 – Resultados para tensões em um nó selecionado

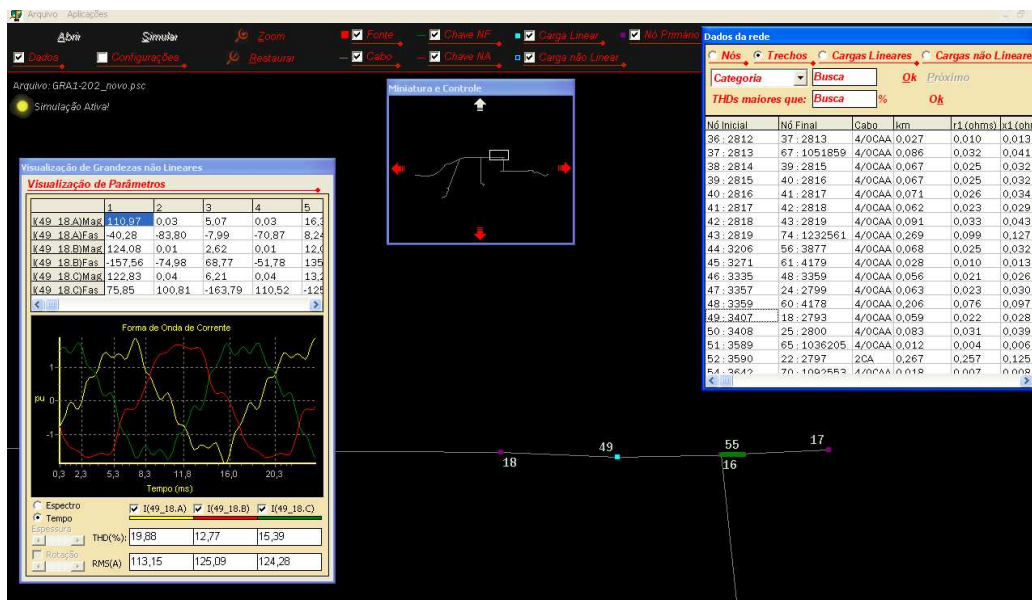


Figura 12 - Resultados para correntes em um trecho selecionado

Finalmente, o aplicativo disponibiliza ainda recursos para geração de relatórios contendo dados da rede e resultados do caso analisado. A geração e impressão do relatório é ativada a partir do “Menu” suspenso no item “Aplicações”, na página principal de entrada do aplicativo, e pode conter dados e resultados de interesse previamente selecionados durante os estudos de simulação digital. A ferramenta de composição de relatório disponibiliza um “box” para inserção de comentários e demais itens para identificação do usuário.

6. Conclusões

Os principais objetivos almejados com o uso de aplicativos computacionais para simulação digital da propagação de harmônicas em redes de distribuição são a qualificação e quantificação das distorções nos diferentes pontos da rede. Trata-se também de uma importante ferramenta para a análise técnica de pedidos de novas ligações (cargas críticas, não lineares), instalação de equipamentos de mitigação dos efeitos destas cargas não lineares, atendimento aos limites estabelecidos pela legislação vigente.

Neste contexto, apresentou-se um aplicativo computacional para estudos de propagação de harmônicas em redes de distribuição. O aplicativo utiliza uma representação trifásica da rede elétrica e faz uso de técnica de simulação mista incorporando modelagens no domínio do tempo e da frequência.

Os resultados preliminares obtidos a partir da metodologia proposta são animadores e compatíveis com comportamentos esperados para a resposta das redes primárias de distribuição, operando com cargas não lineares. Na seqüência deste trabalho novas investigações e medições serão realizadas no sentido de verificar de forma sistemática a qualidade e aderências dos resultados obtidos.

Informa-se ainda que, na versão apresentada do aplicativo os dados das redes são obtidos diretamente da base de dados da concessionária, sendo que o mesmo foi desenvolvido em uma plataforma gráfica e interativa, a qual proporciona uma interface amigável ao usuário.

7. Referências bibliográficas e/ou bibliografia

- 1 DUGAN, R. C. & MCGRANAGHAN, M. F. & BEATY, H. W., Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill, 265 pg., 1996;
- 2 WILLIAMS, S. M. & BROWNFIELD, G. T. & DUFFUS, J. W., Harmonic Propagation on the Electric Distribution System: Field Measurements Compared With Computer Simulation, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 8, nº. 2, January, pp. 547 – 552, 1993;

- 3 WANG, Y.-J. & O'CONNELL, R. M. & BROWNFIELD, G., Modeling and Prediction of Distribution System Voltage Distortion Caused by Nonlinear Residential Loads, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 16, nº. 4, October, pp. 744 – 751, 2001;
- 4 IEEE Task Force, Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, January 1996;
- 5 DECKMANN, S.M. & POMILIO J. A., Characterization and Compensation for Harmonics and Reactive Power of Residential and Commercial Loads, Anais do 8º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, COBEP 2005, Recife, 14-17 de junho de 2005.
- 6 THUNBERG, E. & SÖDER, L., On the Performance of a Distribution Network Harmonic Norton Model, Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, Vol. 3, October, pp. 932 – 937, 2000;
- 7 THUNBERG, E. & SÖDER, L., Influence of the Network Impedance on Distribution System Harmonic Norton Models, International Conference on Power System Technology, Vol.3, December, pp. 1143 – 1148, 2000;
- 8 THUNBERG, E. & SÖDER, L., A Harmonic Norton Model of a Real Distribution Network, Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, Vol. 3, October, pp. 932 – 937, 2000;
- 9 PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico, Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica”, ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;
- 10 IEC 61000-3-2 e 61000-3-4, Limits for Harmonic Current Emissions, International Electrotechnical Commission;
- 11 IEEE Std 519 - 1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems;
- 12 CANESIN, C. A. & alli, Model of Δ/Y Three-Phase Distribution Transformer, Suitable for Simulations in Pspice and Analyses of Harmonic Currents, Considering Unbalanced Nonlinear Loads, VI INDUSCON, Joinville (SC), October, 2004;
- 13 CANESIN, C. A. & alli, Simulation of three-phase distribution systems with unbalanced nonlinear loads, using Pspice, Brazilian Power Electronics Conference, COBEP, Recife(PE), pp. 115-122, 2005;
- 14 CANESIN, C. A. & alli, A New Three-Phase Transformer Modeling for Three-Phase Harmonic Analysis in Distribution Systems, IEEE-IECON 31st Annual Conference of the Industrial Electronics Society, Raleigh, North Carolina, USA, pp. 1266-1271, 2005.