



# VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005  
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 11 7653  
Tópico: Modelagem e Simulações

## PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE HARMÔNICOS E DESEQUILÍBRIOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Kagan, N.  
Enerq/USP

Schmidt, H. P.  
Enerq/USP

Duarte, S. X.  
Enerq/USP

Matsuo, N. M.  
Enerq/USP

Ferrari, E. L.  
Enerq/USP

Arruda, E. F.  
Enerq/USP

Camilo, L.  
Enerq/USP

Almeida, C. F. M.  
Enerq/USP

Santos, W. B.  
CELPE

Costa, S.M.  
CELPE

### RESUMO

Este artigo apresenta as principais características do programa de simulação de desequilíbrios e distorções harmônicas em sistemas de potência, implantado na CELPE – Companhia Energética de Pernambuco como parte de um sistema de avaliação da qualidade de energia da rede de subtransmissão. Essa ferramenta de simulação possibilita realizar estudos de desequilíbrios e de distorções harmônicas causadas pela inclusão de cargas especiais na rede existente. Fornece como resultado as tensões nas barras e as correntes nas linhas e nos transformadores. Desse modo, é possível avaliar o impacto da inclusão de novas cargas na rede nos indicadores de qualidade de energia.

### 1.0 INTRODUÇÃO

Os programas para simulação de desequilíbrios de tensão e de harmônicos fazem parte de um sistema de avaliação de qualidade de energia, desenvolvido pela USP junto com a CELPE, para rede de subtransmissão, cuja concepção global está mostrada na Fig. 1.1.

O referido sistema incorpora um conjunto de recursos que utiliza medições de grandezas relativas à qualidade de energia realizando tratamentos de dados de medição e possui um conjunto de softwares que inclui um estimador de VTCDs (variações de tensão de curta duração), uma ferramenta de análise estatística de medições que produz indicadores de

desempenho do sistema cobrindo todos os fenômenos de qualidade de energia, e possui softwares para análise e avaliação do impacto da ligação de cargas que produzem perturbações na rede.

Este artigo enfoca os softwares de análise e avaliação de desequilíbrios e harmônicos.

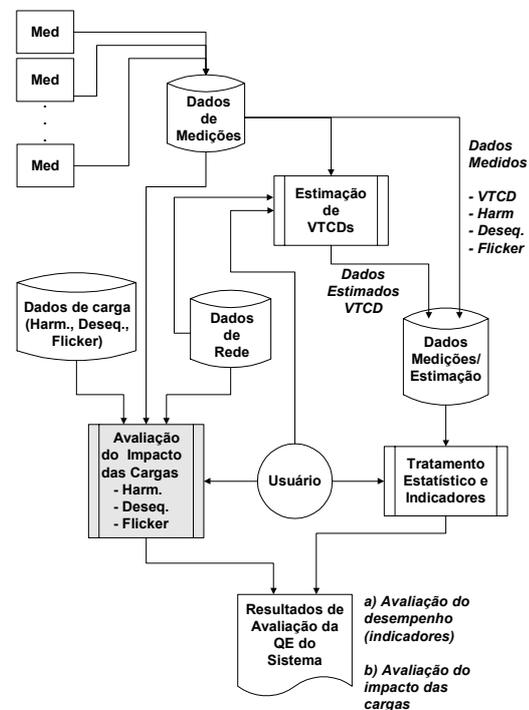


Figura 1.1 - Diagrama de blocos do sistema de avaliação da qualidade de energia da CELPE

## 2.0 MODELOS UTILIZADOS PARA A REPRESENTAÇÃO DA REDE

Os modelos de representação utilizados para as simulações computacionais para os cálculos dos graus de desequilíbrios e das distorções harmônicas utilizam componentes de fase. Os modelos utilizados possibilitam representar redes com 3 ou 4 fios.

### Transformador

Os transformadores trifásicos são modelados por suas matrizes de admitâncias. Cada elemento dessa matriz pode ser obtido diretamente alimentando o enrolamento  $i$  com tensão  $U_i$  e colocando em curto-circuito todos os outros enrolamentos, medindo em cada um desses as correntes ( $I_k$ ). Os elementos da matriz de admitância  $[Y]$  desse transformador, podem ser calculados por  $Y_{ki}=I_k/U_i$ . Essas admitâncias são obtidas a partir da impedância de curto-circuito do transformador conforme referência [1]. Para frequências harmônicas foi considerado que neste modelo apenas a reatância varia com a frequência.

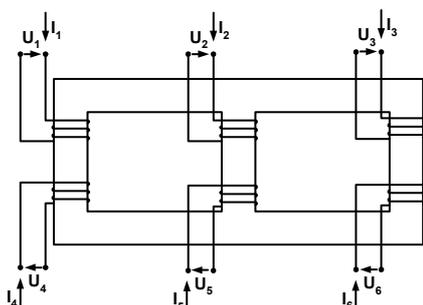


Figura 2.1 - Transformador trifásico

As correntes e tensões dos enrolamentos do transformador da Figura 2.1 relacionam-se de acordo com a equação (2.1):

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} & y_{16} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} & y_{26} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} & y_{36} \\ y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} & y_{45} & y_{46} \\ y_{51} & y_{52} & y_{53} & y_{54} & y_{55} & y_{56} \\ y_{61} & y_{62} & y_{63} & y_{64} & y_{65} & y_{66} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix}_h \quad (2.1)$$

onde:

- $I_k$  e  $U_k$  são as correntes e tensões em cada um dos enrolamentos do transformador,
- $y_{11}$ ,  $y_{22}$ ,  $y_{33}$ , são as admitâncias próprias dos enrolamentos de primário,

- $y_{44}$ ,  $y_{55}$  e  $y_{66}$  são as admitâncias próprias dos enrolamentos de secundário,
- $y_{14}$ ,  $y_{15}$ ,  $y_{16}$ ,  $y_{24}$ ,  $y_{25}$ ,  $y_{26}$ ,  $y_{34}$ ,  $y_{35}$ ,  $y_{36}$  são as admitâncias mútuas entre os enrolamentos de primário e secundário,
- $y_{41}$ ,  $y_{51}$ ,  $y_{61}$ ,  $y_{42}$ ,  $y_{52}$ ,  $y_{62}$ ,  $y_{43}$ ,  $y_{53}$ ,  $y_{63}$  são as admitâncias mútuas entre os enrolamentos de secundário e primário.

Matricialmente, pode-se escrever:

$$\begin{bmatrix} \tilde{I} \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} \tilde{Y} \end{bmatrix}_h * \begin{bmatrix} \tilde{U} \end{bmatrix}_h$$

Essa implementação permite obter automaticamente resultados interessantes tais como a ausência de fluxo de corrente de terceira harmônica equilibrada (seqüência zero) ao transpor um transformador ligado em delta.

Fica, também, possível verificar as correntes nos enrolamentos e no lado de linha de transformadores uma vez que o modelo polifásico trata adequadamente as ligações dos transformadores. Na implementação desse modelo foram considerados quatro tipos de ligação:

- a) delta – estrela aterrada,
- b) estrela aterrada – delta,
- c) estrela aterrada – estrela aterrada,
- d) delta – delta.

### Elementos em Derivação

Considerou-se a possibilidade de inclusão de elementos em derivação, como por exemplo capacitores para controle de reativos. Esses elementos podem ser representados por uma matriz diagonal de admitâncias, como indicado a seguir, para capacitores, em função da ordem harmônica ( $h$ ) e da reatância capacitiva para a fundamental:

$$\begin{bmatrix} Y_{SH} \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} \frac{h}{jX_c} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{h}{jX_c} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{h}{jX_c} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

onde:  $X_c$  é a reatância capacitiva na frequência fundamental.

Essa matriz de admitâncias pode ser incorporada diretamente na matriz de admitâncias nodais da rede, contribuindo unicamente para a admitância própria da barra onde esteja conectada.

Esse modelo aplica-se a banco de capacitores ligados em estrela aterrada. Para banco de capacitores com outras ligações a matriz é adequadamente modificada.

**Linha de Transmissão**

O modelo de linha de transmissão contém os termos que consideram as impedâncias séries e seus respectivos acoplamentos entre as fases e também as capacitâncias entre os condutores das fases e de fases para a terra. A seguir é ilustrada a obtenção desses dois termos considerados no modelo de linha, para cada ordem harmônica (h).

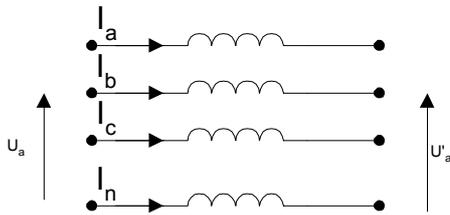


Figura 2.2 – Trecho de linha

Para a linha indicada na figura 2.2, pode-se escrever a equação matricial (2.3) para um trecho de linha.

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \\ \Delta U_n \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix}_h * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix}_h \quad (2.3)$$

Além das relações de impedâncias, para essa mesma linha escreve-se a matriz de capacitâncias da linha, como indicado a seguir:

$$[C'_{abcn}] = \begin{bmatrix} C_{aa} & -C_{ab} & -C_{ac} & -C_{an} \\ -C_{ba} & C_{bb} & -C_{bc} & -C_{bn} \\ -C_{ca} & -C_{cb} & C_{cc} & -C_{cn} \\ -C_{na} & -C_{nb} & -C_{nc} & C_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

onde:

[C'\_{abcn}] é a matriz de capacitâncias da linha de transmissão, obtida a partir da inversão da matriz de coeficientes de potencial da linha.

Obtidos os termos série e shunt de uma linha ik (entre os nós i e k), pode-se fazer a representação da mesma pelo modelo π, como ilustra a figura 2.3. Com base nessa pode-se escrever a equação matricial (2.5) indicada a seguir:

$$\begin{bmatrix} [I_i] \\ [I_k] \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} [Z_{ik}]^{-1} + [Y_{ik}]/2 & -[Z_{ik}]^{-1} \\ -[Z_{ik}]^{-1} & [Z_{ik}]^{-1} + [Y_{ik}]/2 \end{bmatrix}_h * \begin{bmatrix} [U_i] \\ [U_k] \end{bmatrix}_h \quad (2.5)$$

Nessa equação, os termos [I<sub>i</sub>] e [I<sub>k</sub>] são vetores colunas das correntes injetadas nas fases a,b, c e n, nos nós i e k, respectivamente, e os termos [U<sub>i</sub>] e [U<sub>k</sub>] são vetores colunas das tensões nas fases a,b, c e n, nos nós i e k, respectivamente.

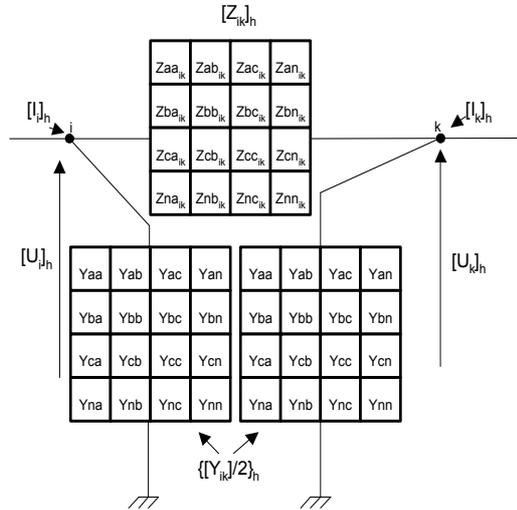


Figura 2.3 – Representação de uma linha trifásica por matrizes equivalentes (modelo π)

O modelo utilizado no programa permite representar linhas com 3 ou 4 fios (3 fases + neutro).

**3.0 CÁLCULOS PARA A AVALIAÇÃO DE DESEQUILÍBRIOS**

O módulo de programa para análise de desequilíbrios possibilita avaliar o impacto, na rede elétrica, da ligação de cargas que causam desequilíbrios na rede, fornecendo as tensões na freqüência fundamental em cada barra do sistema e os respectivos graus de desequilíbrios de tensão resultantes da inclusão dessas cargas em qualquer ponto. Assim, a ferramenta permite avaliar o nível de perturbação introduzido por essas cargas.

O cálculo é efetuado com as componentes de fase, considerando inclusive o desequilíbrio oriundo da assimetria da linha.

As cargas desequilibradas podem ser representadas por modelos desequilibrados de corrente constante, potência constante ou como impedância constante.

É possível representar vários tipos de ligação de cargas equilibradas ou desequilibradas: estrela com neutro aterrado ou isolado e delta.

As tensões originadas pelas cargas desequilibradas são obtidas para qualquer barra do sistema para a freqüência fundamental pelo

cálculo de fluxo de potência utilizando o método de Gauss.

Em cálculos que utilizam o modelo polifásico a relação entre as tensões nas barras e as correntes injetadas nas barras pode ser expressa da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} [I_1] \\ [I_2] \\ \cdot \\ \cdot \\ [I_n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Y_{11}] & [Y_{12}] & \cdot & \cdot & [Y_{1n}] \\ [Y_{21}] & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ [Y_{n1}] & \cdot & \cdot & \cdot & [Y_{nn}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [U_1] \\ [U_2] \\ \cdot \\ \cdot \\ [U_n] \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

onde:

$[I_k]$ ,  $k = 1 \dots n$  : vetor das correntes nas fases a, b, c e n injetadas na barra k;

$[Y_{ii}] = \sum_k [y_{ik}]$  (soma das matrizes de

admitâncias dos elementos que incidem na barra i;

$[Y_{ik}] = -[y_{ik}]$  ( $[y_{ik}]$ : matriz de admitâncias entre as barras i e k);

$[U_k]$ ,  $k = 1 \dots n$  : vetor das tensões nas fases a, b e c, na barra k.

Os principais dados de saída são:

- tensões e fator de desequilíbrio de tensão (grau de desequilíbrio) nas barras de interesse.

- correntes na linhas e nos transformadores

#### 4.0 CÁLCULOS PARA A AVALIAÇÃO DE HARMÔNICOS

O módulo de programa para análise de harmônicos possibilita avaliar o impacto, na rede elétrica, da ligação de cargas que causam distorções na forma de onda e cujas correntes sejam conhecidas, fornecendo as tensões harmônicas individuais e a distorção harmônica total produzidas por essas cargas em qualquer ponto, bem como as correntes harmônicas nos trechos da rede. Assim, a ferramenta permite avaliar o nível de distorção introduzido por essas cargas.

Muitos aplicativos de simulações de harmônicos trabalham com cálculos baseados na representação da rede pelos componentes de seqüência positiva. Esta simplificação, embora válida para situações equilibradas e aplicável em muitas situações, implica em algumas restrições, como no caso em que se queira incluir condições

desequilibradas, casos que envolvem passagens de corrente pelo neutro ou terra e nos casos em que se queira efetuar simulações a partir de dados de medições.

Na metodologia utilizada no programa desenvolvido essas restrições são eliminadas. Os cálculos são efetuados utilizando componentes de fase, considerando inclusive o desequilíbrio oriundo da assimetria da linha, assim como no programa de análise de desequilíbrio. A metodologia de cálculo empregada permite simular condições reais que o modelo de seqüência positiva não permite realizar, sendo, portanto a mais indicada para a sua aplicação nos estudos de simulação envolvendo distorções. A modelagem de linha utilizada inclui o condutor neutro (sistema a 4 fios), possibilitando avaliar as correntes harmônicas de ordem 3 e seus múltiplos, que podem sobrecarregar este condutor, devido à características de seqüência zero. É possível, também, representar sistemas a 3 fios.

As cargas passivas são representadas como combinação de resistências e reatâncias, podendo ser incluídas também capacitâncias. O programa contempla vários tipos de ligação de cargas passivas: estrela com neutro aterrado ou isolado e delta.

As componentes harmônicas das cargas não lineares são representadas como fontes de correntes harmônicas, sendo utilizados os dados das magnitudes das componentes fundamental e harmônicas, bem como os ângulos de fase dos coeficientes de Fourier da fundamental e dos harmônicos e o fator de potência de deslocamento (fator de potência fundamental). As correntes harmônicas das cargas não lineares são determinadas em função dos dados de entrada e dos resultados de cálculo de fluxo de potência na freqüência fundamental.

A matriz de admitâncias nodais é construída a partir das admitâncias dos elementos da rede, para cada ordem harmônica. As impedâncias harmônicas de entrada (Thévenin) e de transferência são obtidas a partir da matriz de admitâncias.

O cálculo do fluxo de potência harmônico é efetuado em duas etapas. Inicialmente considera-se apenas a freqüência fundamental (60 Hz), utilizando o mesmo algoritmo usado no aplicativo de desequilíbrio. Obtêm-se os valores das tensões e correntes do sistema.

Posteriormente, obtêm-se o valor e o ângulo de fase da corrente a ser injetada para cada ordem harmônica h considerando as tensões e as correntes resultantes do fluxo fundamental e as relações de magnitude e de ângulo de fase entre

as correntes harmônicas e a corrente fundamental (que são dados de entrada).

Concluído o cálculo das correntes harmônicas a serem injetadas nas barras, é efetuado o fluxo (modelo de corrente constante) para todas as ordens harmônicas presentes no espectro da carga considerada.

Os principais dados de saídas previstos são:

- tensões fundamentais e harmônicas (individuais) e distorção harmônica total nas barras;
- correntes fundamentais e harmônicas e distorção harmônica total nos trechos com linhas e transformadores.
- correntes fundamentais e harmônicas nos enrolamentos de transformadores.

## 5.0 AFERIÇÃO DOS PROGRAMAS

Para aferição dos cálculos realizados pelo programa de desequilíbrios foram feitas simulações com uma rede de subtransmissão em situações desequilibradas e os resultados produzidos foram comparados com simulações realizadas utilizando o programa ATP (Alternative Transients Program).

Para aferição dos cálculos realizados pelo programa de harmônicos os valores obtidos de simulações foram comparados com o programa SuperHarm, considerando a mesma rede.

Essas simulações mostraram a consistência dos programas desenvolvidos.

## 6.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou uma descrição do método de cálculo utilizado pelo programa de análise de desequilíbrio e distorções harmônicas em sistema de potência.

As figuras 5.1 e 5.2 apresentam exemplos de telas da interface do programa descrito.

O programa foi desenvolvido junto com um sistema de avaliação de qualidade de energia implantado em uma área piloto da rede de subtransmissão da CELPE.

Faz parte do plano para o futuro próximo, implementar recursos adicionais no programa apresentado, de forma a incluir maiores possibilidades e facilidades de simulação, bem como incluir o programa em uma grande plataforma computacional para sistema de potência que engloba outros aplicativos, como ferramentas para planejamento, ferramentas para análise de risco relativo a VTCDs (variações de tensão de curta duração) e interrupções, aplicativo de curto-circuito, etc.

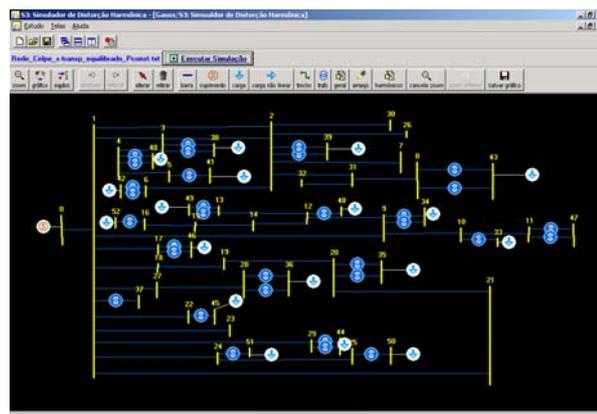


Figura 5.1 - Tela do aplicativo editando dados da rede

\*\*\* Resultado nas Barras \*\*\*

Bus	Tipo	Thom (kV)	C O R R E N T E S				T E N S Õ E S			
			Módulo (A)	Ang. (°)	SE (V)	Módulo (V)	Ang. (°)	SE (V)		
2	Carga	49.00	0.00000000	147.7679	0.00000	0.239020469	-120.5261	33.90820		
			80.23423236	0.00000	490.00000	0.238020422	-119.8600	33.90820		
			80.23448622	-49.00000	490.00000	0.238020762	-122.3229	33.90820		
			0.00000000	0.00000	0.00000	0.002098710	150.0000	9999.99999		
3	Dev.	49.00	0.00000000	0.00000	0.00000	0.239244420	-121.1709	33.90820		
			0.00000000	0.00000	0.00000	0.237923028	-119.8640	33.90820		
			0.00000000	0.00000	0.00000	0.238204936	-122.8781	33.90820		
			0.00000000	0.00000	0.00000	0.002098710	150.0000	9999.99999		

\*\*\* Resultado nas Linhas \*\*\*

De	Para	Condiç.	Comp. (MVA)	C O R R E N T E S				T E N S Õ E S				Reatância
				Módulo (A)	Ang. (°)	SE (V)		Módulo (V)	Ang. (°)	SE (V)		
1	2	1	0.061	0.23427706	-120.1470	0.26471	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
				80.24099207	-10.2643	526.12295	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
				80.22182818	-60.2218	491.47121	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
				0.07437532	14.8226	8999.99999	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
				0.23427706	14.8227	491.47121	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
				80.24099207	179.7107	526.12295	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
				80.22182818	119.8684	491.47121	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
				0.07437532	-120.1702	8999.99999	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Total (lsp. + Td2 + Td3): 0.000000 0.000000

Figura 5.2 - Tela do relatório de saída dos aplicativos

## 7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Arrillaga, J., Smith, B. C. – Power System Harmonic Analysis – J. Wiley & Sons – 1997.
- [2] Wakileh, G. J., - Power Systems Harmonics – Fundamentals, Analysis and Filter Design, Springer 2001.
- [3] Kagan, N.; Matsuo, N. M.; Ferrari E. L.; Duarte, S. X.; Rocco, A.; Rosa, P.; Arango, T. P. L.; Santos, W. B.; Marinho S.; Cavaretti, J. L.; Tenório, A.; Souza, L. R. - Estimadores de variações de tensão de curta duração para redes de distribuição e subtransmissão - SENDI 2002

