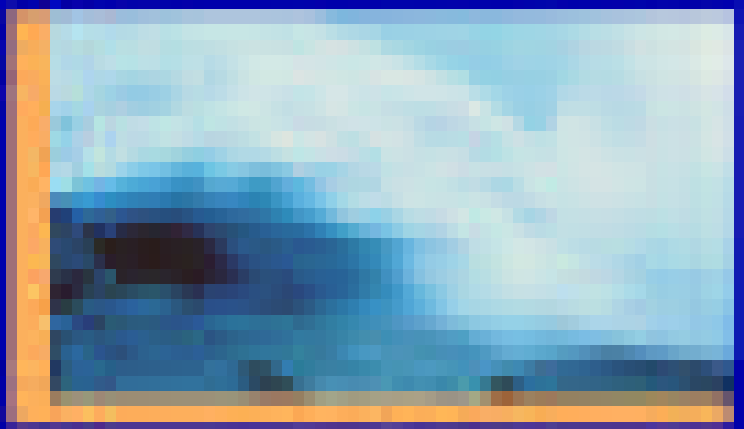
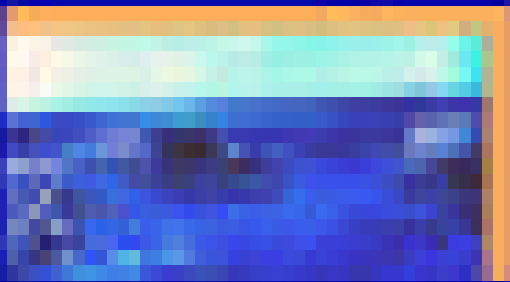




# HarmZs

---



O programa **HARMZS** é uma ferramenta baseada em duas novas tecnologias de modelagem de redes elétricas denominadas matriz  $\mathbf{Y}(s)$  e Sistemas Descritores, que permitem que análises de redes elétricas sejam realizadas sobre todo o plano complexo  $s$ , ao invés de apenas sobre o eixo imaginário  $j\omega$ , como acontece em programas convencionais de análise de harmônicos. A principal vantagem deste domínio expandido é permitir a análise modal de redes elétricas de grande porte, modelando adequadamente a dependência dos seus parâmetros com a frequência.

A análise modal propicia a obtenção de um conjunto de informações estruturais sobre o sistema que são difíceis de serem obtidas por outros métodos convencionais como a simulação no tempo ou resposta em frequência. Estas informações compreendem os modos de oscilação natural (ressonâncias do sistema), os equipamentos que mais participam desses modos, as sensibilidades destes modos em relação a parâmetros do sistema, etc.

Além da análise modal, o programa **HARMZS** permite a obtenção de todos os resultados da análise harmônica convencional.

## Análise Convencional

A análise harmônica convencional que pode ser realizada utilizando-se o programa **HARMZS** é descrita a seguir:

- determinação da distribuição de correntes e tensões harmônicas em sistemas CA, juntamente com o cálculo de índices de distorção;
- solução de rede em uma determinada frequência a partir de fontes especificadas de corrente e/ou de tensão;
- determinação de impedâncias harmônicas vistas a partir de barras pré-selecionadas do sistema (elementos da matriz  $Z_{barra}$ );
- cálculo de impedâncias máximas e mínimas para múltiplos cenários operativos, envolvendo alterações topológicas da rede resultantes do chaveamento de seus componentes.

Para situações onde se tenha mais de uma carga não linear, o programa pode levar em conta a influência destas na tensão harmônica individual de barras pré-especificadas através de 4 composições possíveis:

- Critério GCOI, Vetorial, Quadrática e Linear
- É possível conectar às barras do sistema CA, a ser estudado, fontes de corrente ou de tensão harmônicas representativas dos mais diferentes tipos de cargas não lineares, tais como sistemas CCAT, sistemas de compensação estática (reatores controlados a tiristores), retificadores industriais, fornos a arco, etc. Estas cargas são responsáveis pela injeção de correntes harmônicas na rede, as quais atuando conjunta ou individualmente podem levar ao aparecimento de tensões e correntes harmônicas inadmissíveis para determinados tipos de equipamentos, causando a deterioração ou queima dos mesmos.

Também é possível representar o sistema elétrico, ou parte dele, por um setor de impedância. Este consiste em um lugar geométrico no plano  $R-X$  que engloba todos os possíveis valores de impedância do sistema em várias configurações ou carregamentos. A utilização de setores de impedância é um procedimento comum em projetos de filtros CA.

É utilizada a representação monofásica da rede CA. As linhas

de transmissão do sistema podem ser modeladas incluindo-se a dependência com a frequência e a correção hiperbólica do seus parâmetros.

## Análise Modal

A análise modal permite o cálculo de:

- Pólos do sistema
- Resíduos associados aos pólos
- Zeros de funções de transferência
- Sensibilidades de pólos e zeros com relação a parâmetro do sistema.

A seguir é apresentado um exemplo de aplicação da análise modal em um sistema industrial (Figura 1), com objetivo de mostrar algumas das informações estruturais que podem ser obtidas. Na Figura 2 está apresentada a curva da impedância própria da barra 13 em função da frequência. Nesta figura, estão destacadas algumas ressonâncias paralelas (picos da curva da impedância própria da barra 13) do sistema. As frequências associadas a estes picos são denominadas de frequências de ressonância paralela do sistema. Deve-se observar que a cada frequência de ressonância paralela está associado um pólo do sistema. O valor desta frequência de ressonância em rad/s igual à parte imaginária do pólo associado. Analogamente, cada ressonância série (vales da curva da impedância própria da barra 13) está associado um zero da função de transferência impedância própria da barra 13.

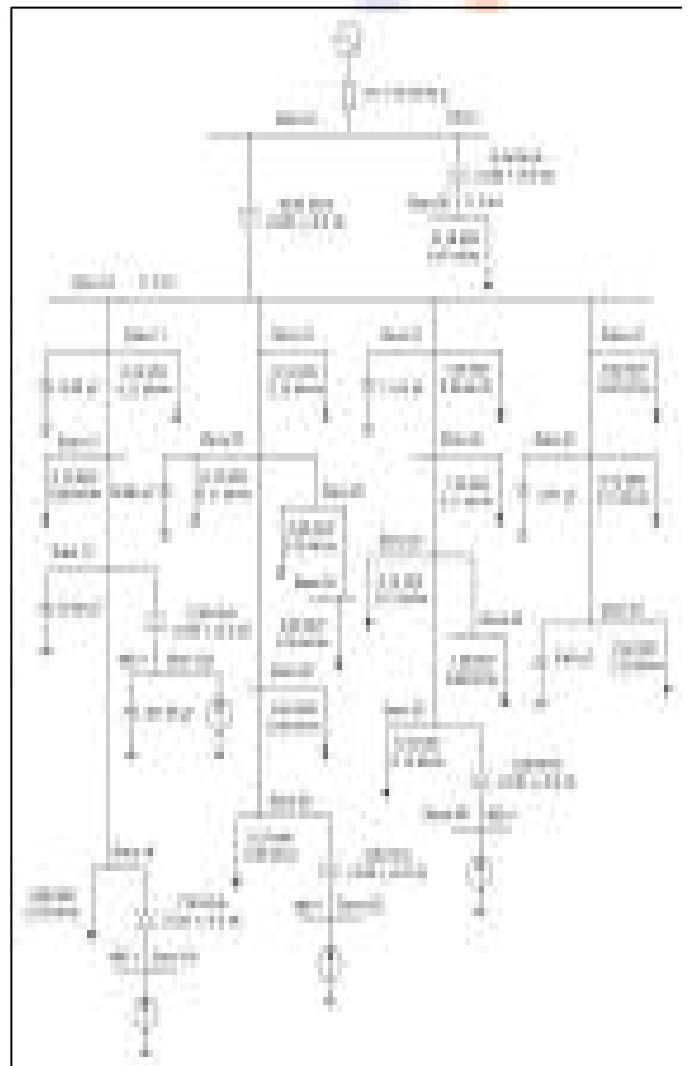


Figura 1: Sistema Industrial

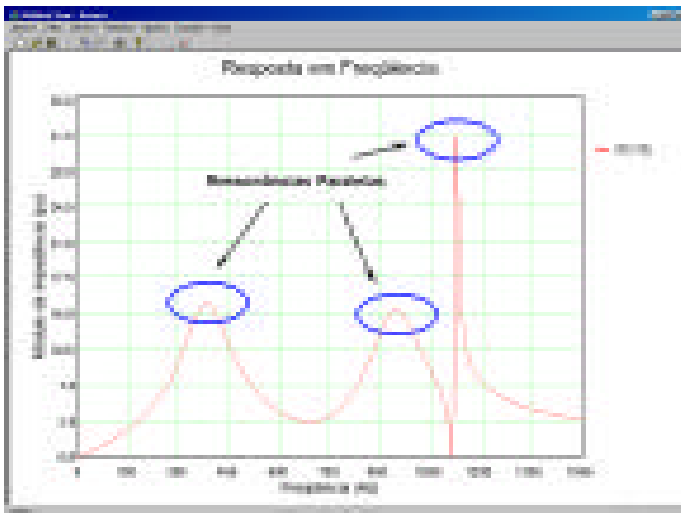


Figura 2: Impedância própria da barra 13

O programa **HARMZS** permite que o sistema seja modelado pela matriz  $Y(s)$  ou por Sistemas Descritores.

Os pólos do sistema e os zeros das funções de transferência podem ser calculados um por vez utilizando-se algoritmos baseados no método de Newton-Raphson, independente da modelagem do sistema ser do tipo  $Y(s)$  ou Sistemas Descritores. Adicionalmente, a modelagem por sistemas descritores permite o cálculo de todos os pólos (ou zeros) simultaneamente, utilizando-se o método de decomposição **OZ**.

A dependência com a frequência de algum conjunto de parâmetros do sistema pode ser facilmente considerada utilizando-se a modelagem  $Y(s)$ . Neste caso este conjunto deve ser, primeiramente, fixado em seus valores para a frequência fundamental e a modelagem da rede elétrica por sistemas descritores pode ser usada para calcular todos os pólos e zeros de uma só vez utilizando-se a decomposição **OZ**. Em uma segunda etapa estes valores de pólos e zeros podem então ser utilizados como estimativas iniciais nos métodos de cálculo iterativos de pólos (ou zeros), utilizando-se a modelagem  $Y(s)$  da rede elétrica de forma a se levar em conta a variação com a frequência do conjunto de parâmetros.

Outra forma fácil de se obter iniciativas iniciais para os métodos iterativos de cálculo de pólos é por inspeção direta do gráfico da função de transferência. Assim, para se fornecer as estimativas iniciais para o cálculo dos pólos associados às ressonâncias paralelas mostradas na Figura 2, basta posicionar o ponteiro do "mouse" sobre os picos da curva e apertar o botão esquerdo do "mouse" (Figura 3).

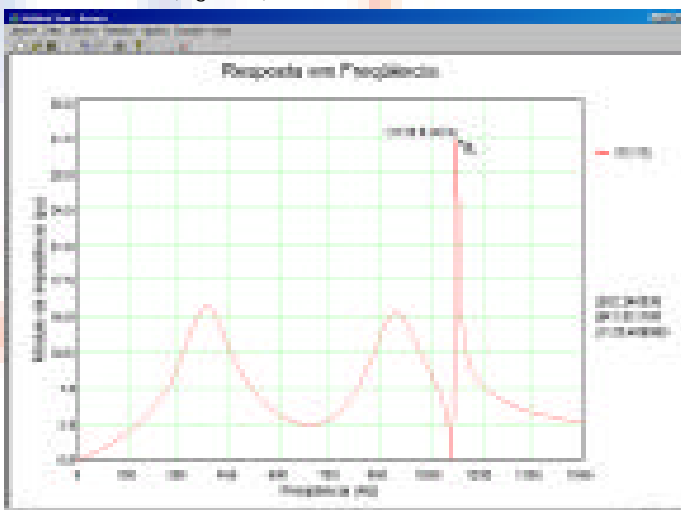


Figura 3: Obtenção de estimativas iniciais

Quando o processo de captura gráfica dos valores estiver terminado, os mesmos são apresentados na janela de estimativas e cálculos do diálogo "Estimativas e Cálculos", conforme mostrado na Figura 4. A partir destes valores iniciais, pode-se utilizar qualquer um dos métodos de cálculo de pólos disponíveis. A escolha do método é realizada colocando-se o ponteiro do "mouse" sobre o botão com o nome do método e apertando-se o seu botão esquerdo. Neste exemplo utilizou-se o método (Pólo Dominante, conforme indicado na Figura 4).

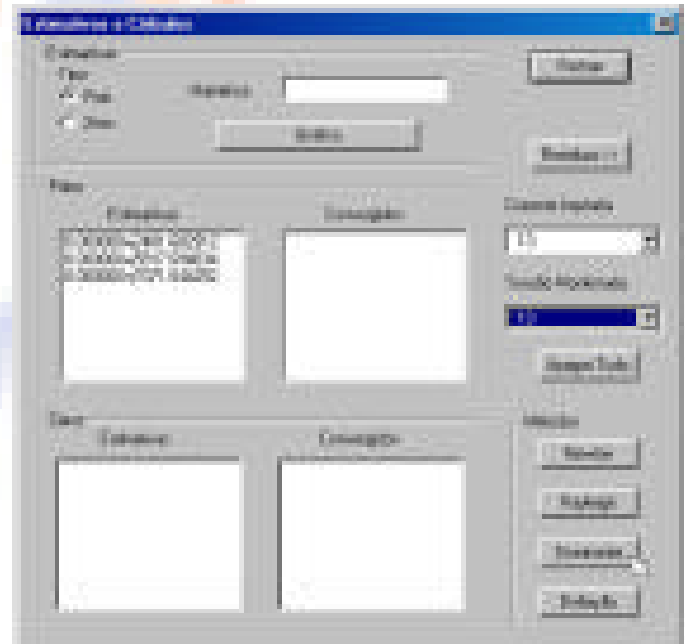


Figura 4: Janela Estimativas

Após o cálculo computacional, os valores convergidos dos pólos são apresentados na janela "Convergidos" da mesma tela de diálogo, conforme mostrado na Figura 5.

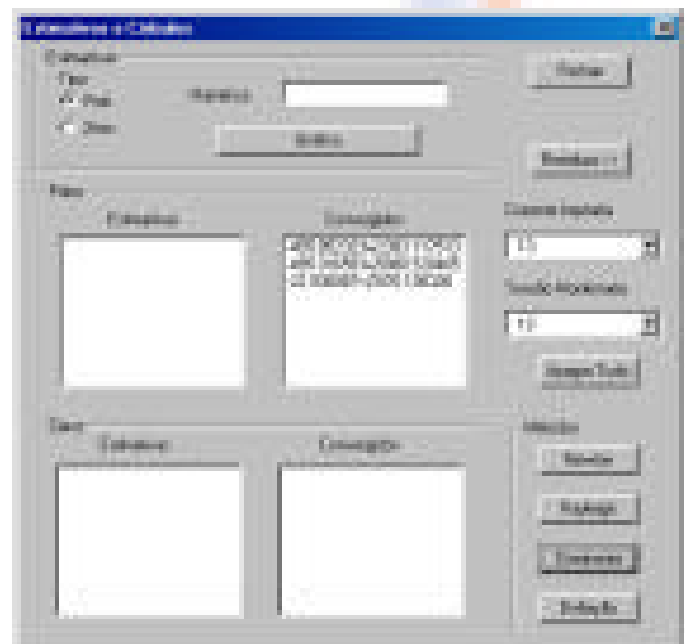


Figura 5: Janela Convergidos

Tomando a parte imaginária dos pólos, apresentados na janela Convergidos da Figura 5, e dividindo-os por  $2\pi$  obtêm-se os valores das três frequências de ressonância paralela do sistema em Hz, ou seja: 380.88 Hz, 935.91 Hz e 1125.20 Hz respectivamente.

Um tipo de informação que pode ser bastante útil é

sensibilidade das frequências de ressonância paralela em relação a parâmetros dos sistema. A Figura 6 apresenta a tela de diálogo para o cálculo de sensibilidades da parte imaginária do pólo 1 (380.88 Hz) em relação aos bancos de capacitores (capacitâncias) em derivação do sistema.

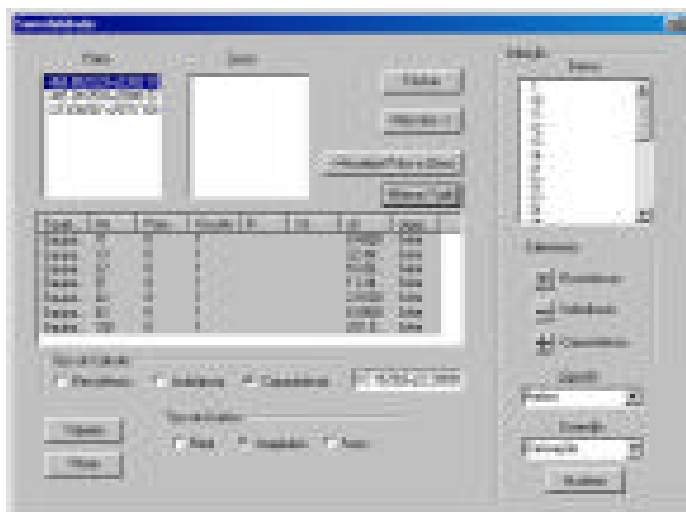


Figura 6: Cálculo de sensibilidades

Nas figuras a seguir estão apresentados gráficos (histogramas) das sensibilidades dos três pólos em relação aos bancos de capacitores do sistema.

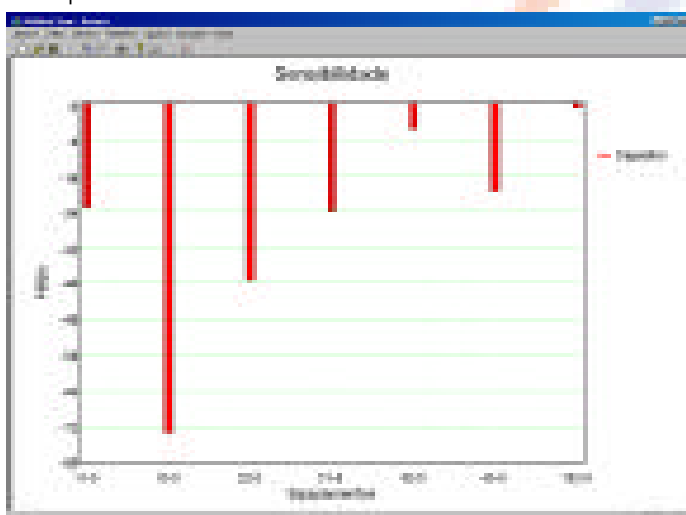


Figura 7: Sensibilidades do pólo 1 (380.88 Hz) em relação aos bancos de capacitores do sistema

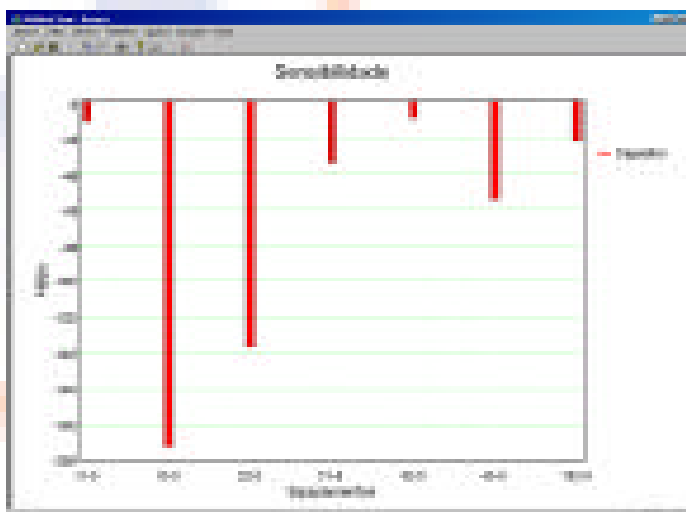


Figura 8: Sensibilidades do pólo 2 (935.91 Hz) em relação aos bancos de capacitores do sistema

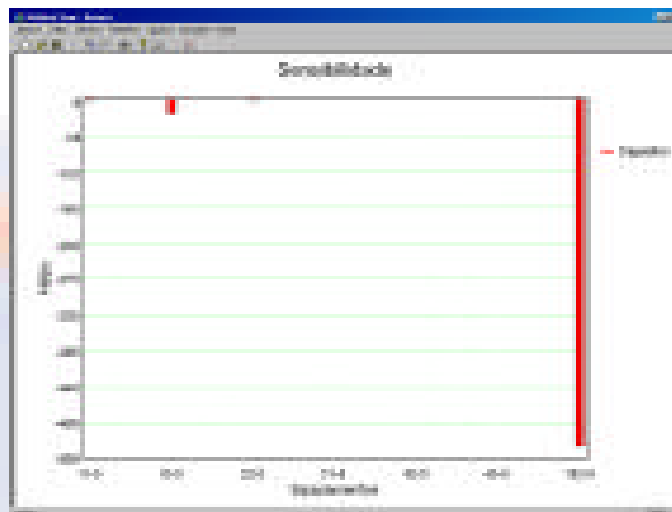


Figura 9: Sensibilidades do pólo 3 (1125.20 Hz) em relação aos bancos de capacitores do sistema

De acordo com estes resultados, se o valor do capacitor da barra 13 for aumentado e o capacitor da barra 102 for desconectado do sistema, é de se esperar que as frequências de ressonância paralela associadas aos pólos 1 e 2 diminuam que o pólo 3 desapareça. A Figura 10 apresenta os efeitos, na impedância própria da barra 13, da duplicação da capacidade do banco de capacitores desta barra e da desconexão do banco de capacitores da barra 102.

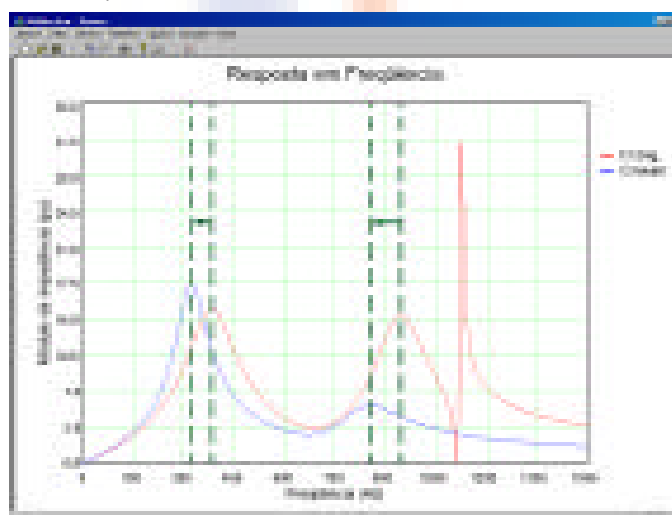


Figura 10: Variação nos valores das capacitâncias

Conforme pode-se observar, por meio de uma análise de sensibilidades, é possível prever o comportamento em frequência de determinada função de transferência quando ocorrem mudanças em um conjunto de parâmetros do sistema. Esta simples análise eleva o interesse pelo uso de coeficiente de sensibilidade, conforme descrito a seguir.

Existem três formas básicas de se melhorar o desempenho harmônico de um sistema elétrico:

1. Filtrar as correntes harmônicas
2. Reduzir a poluição harmônica das cargas
3. Promover modificações em parâmetros do sistema.

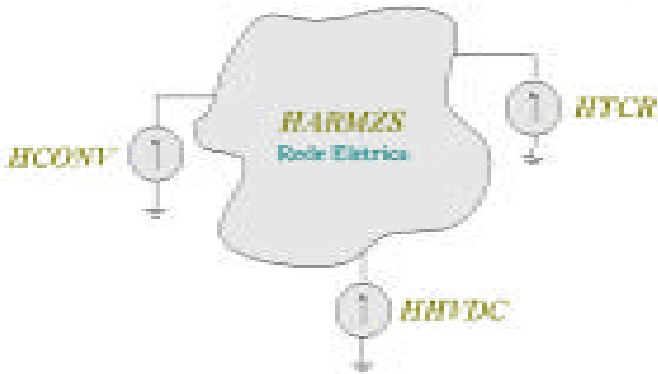
A terceira forma de melhorar o desempenho harmônico sistema é particularmente apropriada para sistemas contendo centenas de elementos e que possuem diversas cargas não lineares espalhadas por várias barras. Neste caso, a análise de sensibilidades é uma ferramenta de fundamental importância.

Outra vantagem da análise de sensibilidade para sistemas de médio ou grande porte é permitir se determinar quais partes



## Interação com outros Programas

Além do programa **HARMZS** que modela a rede elétrica, o CEPEL dispõe de três outros programas para cálculo das fontes harmônicas que serão conectadas à rede, conforme mostrado esquematicamente na figura a seguir



## Descrição do Programa

- **HCONV V\_2.1**
- Calcula os harmônicos de corrente CA gerados por conversores estáticos trifásicos de  $n$  pulsos
- **HHVDC V\_3.1**
- Calcula os harmônicos de tensão CC e de corrente CA de um sistema interligado CA/CC
- **HTCR V. 2.0**
- Calcula os harmônicos em sistemas de compensação estática com reatores controlados a tiristores

## Pesquisa e Desenvolvimento

O CEPEL mantém linha de pesquisa e desenvolvimento na área de harmônicos e suas mais recentes publicações encontram-se listadas a seguir.

*"A Newton-Raphson Method Based On Eigenvalue Sensitivities to Improve Harmonic Voltage Performance"*, submitted for publication in the IEEE Transactions on Power Delivery.

*"Two Powerful Network Modeling Approaches for the Modal Analysis of Harmonic Problems"*, VIII SEPOPE – Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, May 19-23, 2002, Brasília (DF), Brazil.

*"Modal Analysis of Industrial System Harmonics Using the S-Domain Approach"*, IEEE Proceedings of the Transmission and Distribution, March 18-22, 2002, São Paulo, SP, Brazil.

*"S-Domain Approach to Reduce Harmonic Voltage Distortions Using Sensitivity Analysis"*, IEEE Proceedings of the Winter Power Meeting, 28 January – 1 February, 2001, Columbus, Ohio, USA.

*"Filter Design Using a Newton-Raphson Method Based on Eigenvalue Sensitivity"*, IEEE Proceedings of the Summer Power Meeting, July 16-20, 2000, Seattle, Washington, USA.

*"Applying Sensitivity Analysis to Improve Harmonic Voltage Performance"*, VII SEPOPE – Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, May 21-26, 2000, Curitiba (PR), Brazil.

*"Studying Harmonic Problems Using a Descriptor System Approach"*, IPST'99 International Conference on Power System Transients, June 20-24, 1999, Budapest, Hungary.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CEPEL

AV. Um s/n - Cidade Universitaria

Ilha do Fundão - CEP: 21941-590

Rio de Janeiro

[www.cepel.br](http://www.cepel.br)

[cepel@cepel.br](mailto:cepel@cepel.br)

Contato e informações:

Diretoria de Programas de Pesquisa e Desenvolvimento

Programa de Planejamento e Operação Elétrica

Tel: (21) 2598-5236 - Fax: (21) 2598-6451

[pol@cepel.br](mailto:pol@cepel.br)