



**XXI SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
23 a 26 Outubro de 2011  
Florianópolis - SC

**GRUPO IV**

**GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISES E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT**

**AValiação DO COMPORTAMENTO HARMÔNICO DO SIN  
FRENTE À INSERÇÃO DE MÚLTIPLOS ELOS CCAT**

**Fabricao Lucas Lirio \***

**Sergio Luis Varricchio**

**CEPEL**

**RESUMO**

O Sistema Interligado Nacional (SIN) no horizonte de 2019 pode, dependendo da definição de alternativa da CHE Belo Monte, conter seis bipolos conectadas ao subsistema Sudeste. A rede CA com múltiplas alimentações CC assim formada esta sujeito a interações harmônicas decorrentes da proximidade elétrica das diversas injeções harmônicas existentes. Neste artigo será apresentada uma avaliação do comportamento harmônico da rede CA do subsistema Sudeste considerando as injeções harmônicas dos elos de corrente contínua associados à UHE Itaipu, AHE Madeira e CHE Belo Monte.

**PALAVRAS-CHAVE**

Comportamento Harmônico, Elos de Corrente Contínua, Interação Harmônica.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A configuração atual do Sistema Interligado Nacional (SIN) possui o sistema de transmissão de corrente contínua associado à Usina Hidrelétrica de Itaipu composto por dois bipolos de 3150 MW na tensão em  $\pm 600$  kV conectados à subestação Ibiúna 345 kV. No entanto os estudos de planejamento definiram que as usinas do Aproveitamento Hidrelétricos do Rio Madeira serão conectadas ao subsistema Sudeste através de dois bipolos de 3150 MW na tensão de  $\pm 600$  kV conectados na SE Araraquara 500 kV.

Adicionalmente a este sistema, o grupo estudos das alternativas de transmissão do Complexo Hidrelétrico de Belo Monte avalia a possibilidade de escoar a potência gerada para o subsistema Sudeste utilizando dois bipolos de corrente contínua. Diversas subestações foram avaliadas para conexão destes bipolos ao subsistema Sudeste, tais como, Estreito 500 kV, Nova Iguaçu 500 kV, Fernão Dias 500 kV, Bauru 440 kV e Oeste 440 kV.

Portanto, o subsistema Sistema Interligado Nacional no horizonte de 2019 pode, dependendo da alternativa selecionada para o CHE Belo Monte, conter seis bipolos (12 estações conversoras de 12 pulsos) conectadas ao subsistema Sudeste. A rede CA com múltiplas alimentações CC assim formada esta sujeito a interações harmônicas decorrentes da proximidade elétrica das diversas injeções harmônicas existentes.

Neste artigo será apresentada uma avaliação do comportamento harmônico da rede CA do subsistema Sudeste no horizonte 2019 considerando as injeções harmônicas dos elos de corrente contínua associados à UHE Itaipu, AHE Madeira e CHE Belo Monte. A alternativa para escoamento do CHE Belo Monte que será avaliada neste trabalho é aquela com o reforço do sistema CA de 500 kV para o aumento da interligação Norte-Nordeste e dois bipolos de 4000 MW em 800 kV para aumento da interligação Norte – Sudeste. Sendo que a subestação de Estreito 500 kV será considerada para conexão dos dois bipolos desta alternativa.

No presente artigo a rede CA do SIN no horizonte 2019 será representa no Programa HarmZs [1] desenvolvido pelo CEPEL. Este programa permite a leitura de arquivos históricos do programa de fluxo de potência ANAREDE do CEPEL e dos arquivos de dados dinâmicos do programa de estabilidade eletromecânica ANATEM também do CEPEL. Esta leitura objetiva o aproveitamento de dados de componentes de rede como elementos "shunts", linhas

(\*) Avenida Horácio Macedo, 354 – sala 232 – CEP 21941-911 Cidade Universitária,  
RJ – Brasil

Tel: (+55 21) 2598-6230 – Fax: (+55 21) 2598-6451 – Email: aricardo@cepel.br

de transmissão, transformadores, cargas e máquinas do sistema (resistências de armadura e reatâncias subtransitórias). Apesar deste aproveitamento, ainda existe a necessidade da leitura de dados complementares, necessários para análise do comportamento harmônico da rede elétrica, como por exemplo, dados de filtros harmônicos e de fontes de correntes harmônicas.

Neste artigo os filtros harmônicos das estações conversoras associadas ao CHE Belo Monte serão considerados iguais aos filtros harmônicos considerados nos estudos de planejamento do AHE Madeira, enquanto os filtros harmônicos associados a transmissão de Itaipu serão representados conforme dados disponíveis da subestação de Ibiúna 345 kV.

As fontes de correntes harmônicas serão obtidas com a utilização do Programa HHVDC [2], desenvolvido pelo CEPEL. Neste programa os elos CCAT serão modelados individualmente com o objetivo de calcular as correntes harmônicas características resultantes da operação equilibrada dos elos de corrente contínua. As correntes harmônicas não características resultantes da operação desequilibrada do elo (tensões de sequência negativa, desequilíbrio nas impedâncias do transformador e assimetria de disparo) também serão calculadas. Os resultados obtidos com o Programa HHVDC serão validados com o programa de transientes eletromagnéticos PSCAD/EMTDC. As injeções harmônicas calculadas serão injetadas na rede CA do Programa HarmZs para cálculo das distorções harmônicas resultantes.

Os resultados obtidos servirão de base para uma avaliação da distorção harmônica do sistema com múltiplas alimentações CC e do nível de acoplamento harmônico entre as barras CA onde estão localizadas as estações conversoras das transmissões CCAT.

## **2.0 - DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO**

### **2.1 Rede Elétrica**

A alternativa de reforços das interligações para escoamento do CHE Belo Monte que será avaliada neste trabalho é aquela com o reforço do sistema CA de 500 kV para o aumento da interligação Norte-Nordeste e dois bipolos de 4000 MW em 800 kV para aumento da interligação Norte – Sudeste. Sendo que a subestação de Estreito 500 kV será considerada para conexão dos bipolos nesta alternativa.

O cenário avaliado neste informe corresponde ao Sistema Norte exportador em carga pesada no horizonte 2019, no qual as injeções no Sistema Sul – Sudeste dos elos CCAT são máximas.

### **2.2 Elos de Corrente Contínua**

Na alternativa avaliada os conversores localizados em Ibiúna 345 kV, Araraquara2 500 kV e Estreito 500 kV no Sistema Sul – Sudeste possuem maior potencial de interação harmônica por estarem eletricamente próximos. A seguir são descritas as principais características destes conversores:

- Ibiúna 345 kV:
  - Potência nominal: 6264 MW – 2 bipolos de 3132 MW (8 pontes de 6 pulsos)
  - Transformador retificador:
    - potência nominal: 471 MVA
    - relação de transformação: 345/127.4 kV
    - reatância de comutação: 17.8%
  - Linha CC:
    - tensão: 600 kV
    - resistência: 10.47  $\Omega$
  - Transformador inversor:
    - potência nominal: 450 MVA
    - relação de transformação: 345/122 kV
    - reatância de comutação: 17.2%

- Araraquara2 500 kV:
  - Potência nominal: 6300 MW – 2 bipolos de 3150 MW (4 pontes de 6 pulsos)
  - Transformador retificador:
    - potência nominal: 945 MVA
    - relação de transformação: 500/254.6 kV
    - reatância de comutação: 17.5%
  - Linha CC:
    - tensão: 600 kV
    - resistência: 16.44  $\Omega$
  - Transformador inversor:
    - potência nominal: 876.3 MVA
    - relação de transformação: 500/236 kV
    - reatância de comutação: 17.5%
- Estreito 500 kV:
  - Potência nominal: 8000 MW – 2 bipolos de 4000 MW (4 pontes de 6 pulsos)
  - Transformador retificador:
    - potência nominal: 1286 MVA
    - relação de transformação: 500/335.1 kV
    - reatância de comutação: 15%
  - Linha CC:
    - tensão: 800 kV
    - resistência: 19.6  $\Omega$
  - Transformador inversor:
    - potência nominal: 1286 MVA
    - relação de transformação: 500/335.1 kV
    - reatância de comutação: 15%

### 2.3 Filtros Harmônicos

Os filtros harmônicos utilizados neste estudo estão localizados nas subestações (SEs) de Ibiúna 345 kV (barra no 3691), Araraquara2 500 kV (barra no 5202) e Estreito 500 kV (barra no 4302). Na Figura 1 – está mostrado o conjunto de filtros harmônicos instalado na SE Ibiúna 345 kV. Nesta figura, estão mostrados quatro tipos de filtros: “High pass” (HP),  $3^{\text{a}}$  /  $5^{\text{a}}$  harmônicos (3/5),  $11^{\text{a}}$  /  $13^{\text{a}}$  harmônicos (11/13) e banco de capacitores. As legendas nas partes superiores dos retângulos indicam a quantidade e tipo de filtro. O total de potência reativa fornecido por este conjunto é de 3070 MVar. Os valores dos parâmetros dos filtros estão apresentados na Tabela 1.

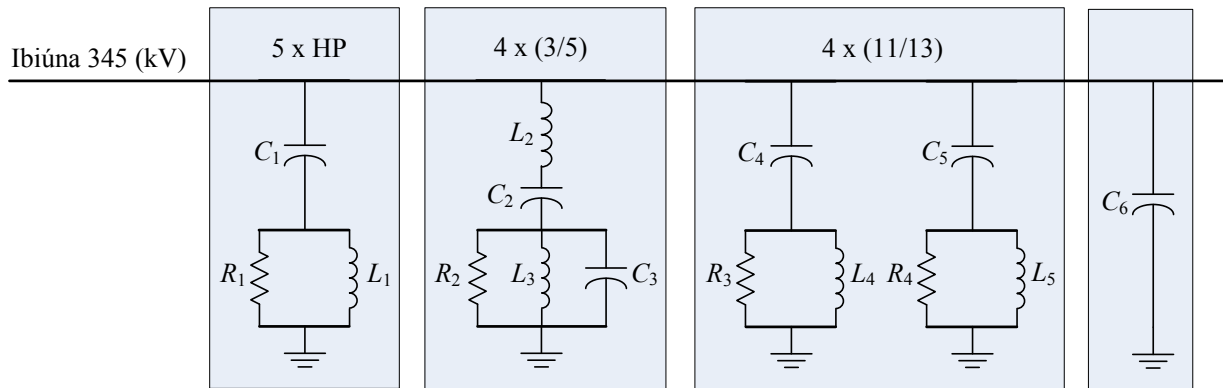


Figura 1 – Conjunto de filtros instalado na SE Ibiúna 345 kV

Tabela 1: Valores dos parâmetros dos filtros de Ibiúna 345 kV

Capacitância ( $\mu\text{F}$ )		Indutância (mH)		Resistência ( $\Omega$ )	
$C_1$	5.2729	$L_1$	2.3184	$R_1$	46.765
$C_2$	1.1602	$L_2$	405.07	$R_2$	2499.5
$C_3$	4.2811	$L_3$	108.96	$R_3$	3989.7
$C_4$	2.4180	$L_4$	24.058	$R_4$	3300.6
$C_5$	2.4671	$L_5$	16.869		
$C_6$	17.249				

Nas SEs de Araraquara2 500 kV e Estreito 500 kV estão instalados conjuntos compostos por oito filtros do tipo mostrado na Figura 2 –. O total de potência reativa fornecida por cada conjunto é igual a 3656 MVar. Os valores dos parâmetros deste filtro estão apresentados na Tabela 2.

Araraquara 500 kV / Estreito 500 kV

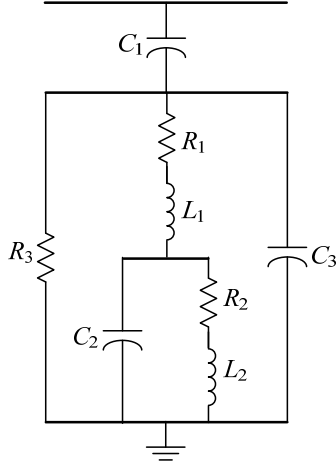


Tabela 2: Valores dos parâmetros do filtro de Araraquara2 e Estreito (500 kV)

Capacitância ( $\mu\text{F}$ )		Resistência ( $\Omega$ )		Indutância (mH)	
$C_1$	1.9470	$R_1$	0.8280	$L_1$	2.9200
$C_2$	3.5777	$R_2$	0.4500	$L_2$	7.0248
$C_3$	2.8970	$R_3$	580.0		

Figura 2 – Filtro instalado nas SEs Araraquara2 e Estreito (500 kV)

Na Figura 3 estão mostradas as curvas de resposta em frequência do módulo das impedâncias dos conjuntos de filtros harmônicos instalados em Ibiúna 345 kV (curvas vermelhas) e Araraquara2 500 kV / Estreito 500 kV (curvas azuis). Estas curvas foram traçadas em escala linear e logarítmica.

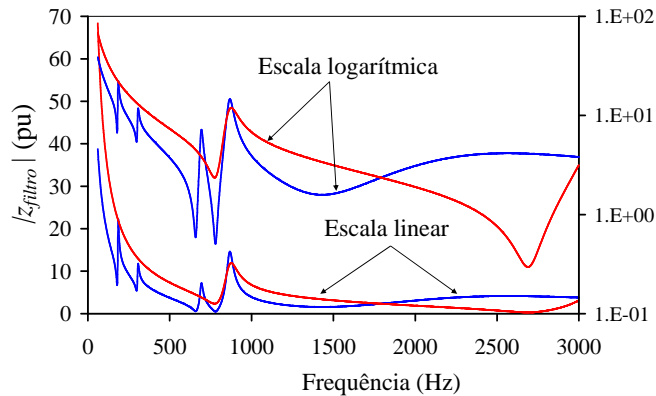


Figura 3 – Módulo das impedâncias dos conjuntos de filtros instalados em Ibiúna 345 kV e Araraquara2 500 kV / Estreito 500 kV

### 3.0 - RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DA REDE

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** estão mostradas as curvas de resposta em frequência, em escala logarítmica, do módulo das impedâncias próprias das barras dos conversores (Ibiúna 345 kV, Araraquara2 500 kV e Estreito 500 kV) e de transferência entre elas, considerando o sistema com (curva vermelha) e sem (curva azul) os conjuntos de filtros harmônicos. As linhas pretas verticais, mostradas nos gráficos das figuras, estão situadas nas frequências do 11<sup>º</sup>, 13<sup>º</sup>, 23<sup>º</sup>, 25<sup>º</sup>, 35<sup>º</sup>, 37<sup>º</sup>, 47<sup>º</sup> e 49<sup>º</sup> harmônicos. As cargas lineares do sistema foram modeladas por circuitos abertos, por representar o caso de menor amortecimento. Como se pode observar, as curvas vermelhas apresentam valores de módulos bem menores do que os respectivos valores das curvas azuis, o que representará menores distorções quando os elos injetarem correntes harmônicas no sistema, mostrando a eficácia dos filtros instalados.

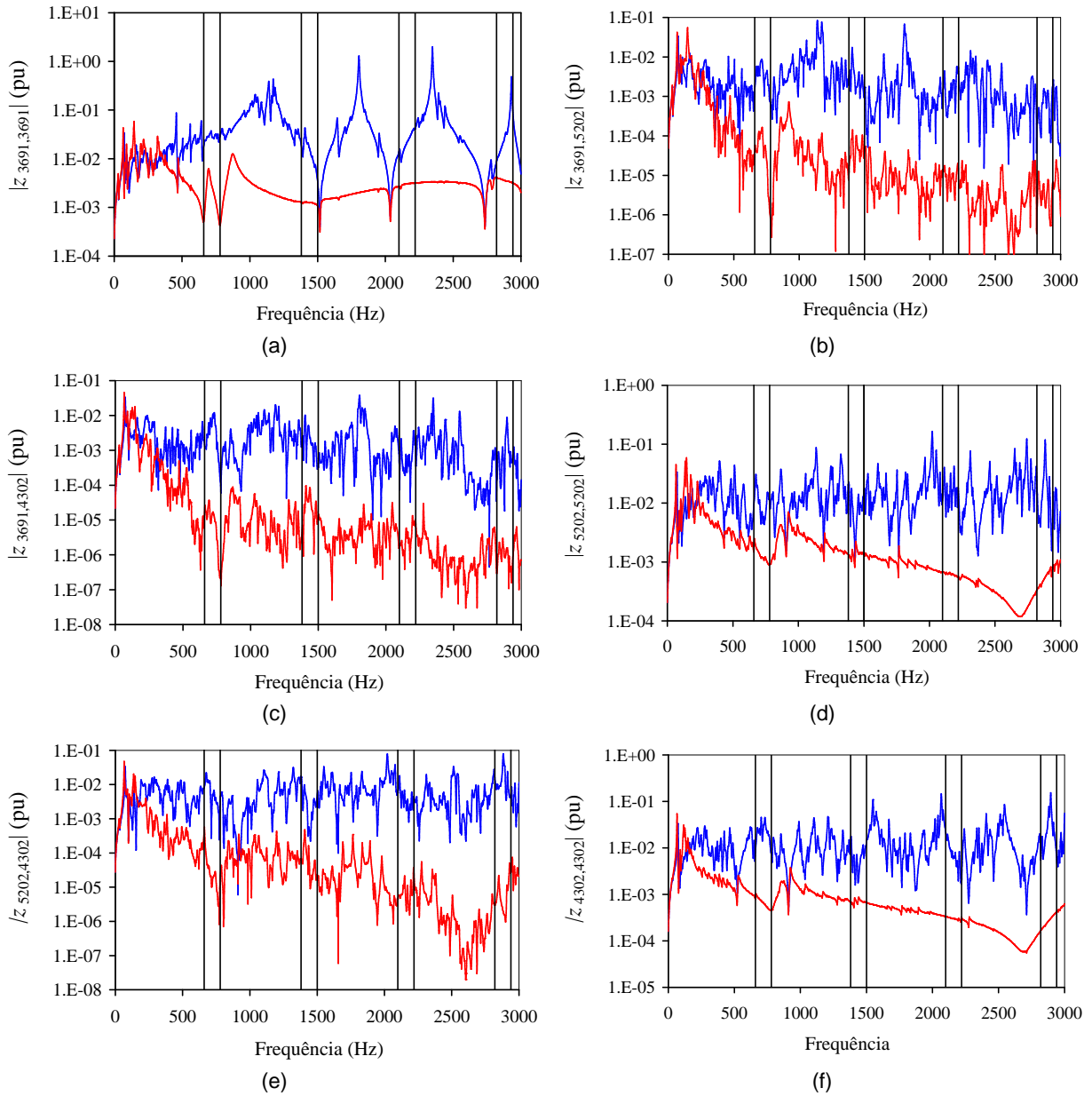


Figura 4 – Módulo das impedâncias próprias das barras dos conversores e de transferência entre elas: (a)  $|Z_{3691,3691}|$ , (b)  $|Z_{3691,5202}|$ , (c)  $|Z_{3691,4302}|$ , (d)  $|Z_{5202,5202}|$ , (e)  $|Z_{5202,4302}|$ , (f)  $|Z_{4302,4302}|$

### 3.1 CÁLCULO DAS INJEÇÕES HARMÔNICAS

#### 3.2 Representação no Programa HHVDC

O Programa HHVDC calcula os harmônicos de tensão CC e de correntes CA de um sistema CCAT onde existam desequilíbrios ou não no lado retificador ou no inversor, ou em ambos terminais. Os desequilíbrios podem ser provenientes de perturbações nas tensões dos sistemas CA ou por tolerâncias de projeto e de fabricação dos equipamentos a serem utilizados nas estações conversoras.

As possibilidades de representação de assimetrias/desequilíbrios existentes são: desequilíbrios nas reatâncias entre transformadores e entre as fases de um mesmo transformador; assimetrias nos instantes de disparo das válvulas; representação de desequilíbrios no sistema CA através de variações nas magnitudes e/ou fases das tensões; e possibilidade de representação de desequilíbrio através da variação do valor nominal da relação dos transformadores conversores.

Na formulação do Programa HHVDC, tem-se as seguintes simplificações para análise da operação dos conversores: corrente na linha CC sem ondulação ("ripple"); tensões CA puramente senoidais (sem distorções)

equilibradas ou não; as reatâncias de comutação dos transformadores dos conversores não são afetadas por este desequilíbrio de tensão; as resistências dos enrolamentos dos transformadores, as quedas de tensão nas válvulas e nos reatores CC somente são levadas em consideração no cálculo dos valores médios das tensões CC do retificador e do inversor sob a forma de quedas de tensão constantes.

A entrada de dados do HHVDC envolve o conhecimento de alguns parâmetros do sistema CA, transformadores dos conversores, conversores ou pontes conversoras e controle do sistema CCAT.

### 3.3 Verificação dos Resultados

A comprovação dos resultados obtidos no Programa HHVDC foi feita utilizando a comparação com o programa de transitórios eletromagnéticos PSCAD-EMTDC. No exemplo de verificação de resultados todo o sistema CCAT formado pelo bipolo Xingu - Estreito foi modelado no PSCAD-EMTDC e no Programa HHVDC utilizando os dados apresentados na subseção 2.2. O sistema CCAT foi conectado a barras infinitas nos terminais CA do retificador (Xingu 500 kV) e do inversor (Estreito 500 kV), sendo que as tensões CA deste exemplo são:

- Xingu 500 kV – magnitude: 1.038 pu; ângulo: 48.2°; tap: 1.052;
- Estreito 500 kV – magnitude: 1.096 pu; ângulo: -12.7°; tap: 1.166.

A seguir são apresentados os resultados comparativos para o sistema sem desequilíbrios:

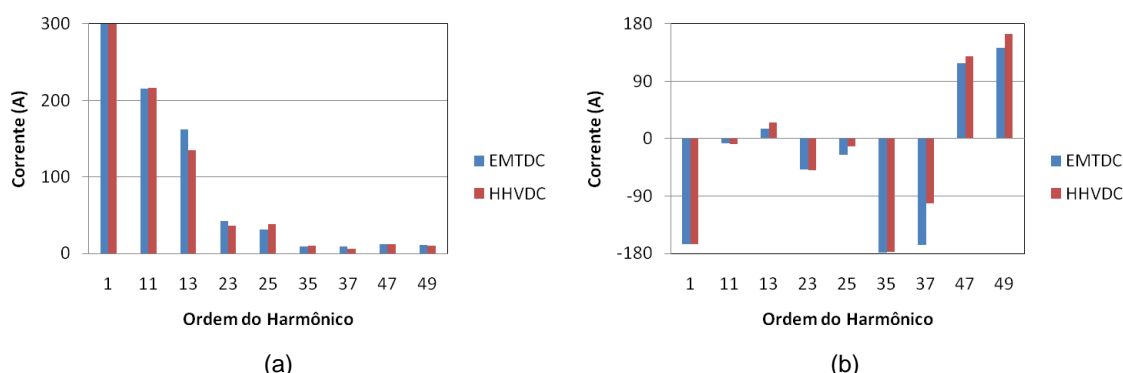


Figura 5 – Comparação entre EMTDC e HHVDC para a corrente injetada pelo bipolo de Estreito 500 kV: (a) módulo e (b) ângulo.

Os resultados apresentados na Figura 2 demonstram que os valores obtidos no HHVDC são muito próximos aos do PSCAD-EMTDC. As diferenças observadas devem-se as simplificações adotadas na modelagem utilizada pelo Programa HHVDC que foram descritas na subseção anterior.

### 4.0 - CÁLCULO DAS DISTORÇÕES DE TENSÃO

Na Figura 6 são apresentados os valores de distorção de tensão para as subestações conversoras com e sem a presença dos filtros CA. Verifica-se que sem os filtros CA as maiores distorções de tensão ocorrem em Ibiúna, podendo atingir, por exemplo, valores superiores a 9% para o 13º harmônico. A inserção dos filtros CA reduz de maneira efetiva as distorções harmônicas. Nestas condições as distorções de tensão são inferiores a 0.4%, sendo que o maior valor observado é pouco superior a 0.3% em Estreito.

Sem a presença dos filtros CA a distorção harmônica total (DHT) é de 12.37% em Ibiúna 345 kV, 3.65% em Araraquara2 500 kV e de 2.49% em Estreito 500 kV. Após a inserção dos filtros os valores de DHT são de 0.33% em Ibiúna 345 kV, 0.27% em Araraquara2 500 kV e 0.33% em Estreito 500 kV ilustrando a eficácia dos filtros CA na redução da distorção harmônica total.

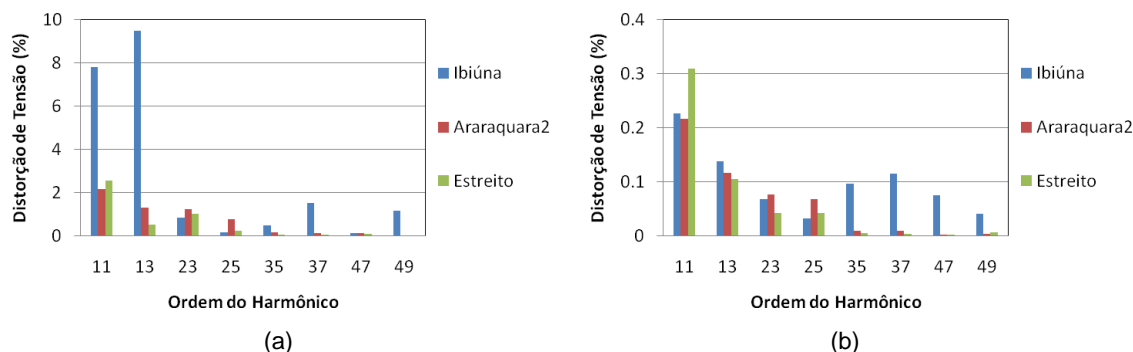


Figura 6 – Distorções de tensão nas barras CA das conversoras considerando as injeções harmônicas de Ibiúna 345 kV, Araraquara2 500 kV e Estreito 500 kV: (a) sem filtros CA e (b) com filtros CA

Na Figura 7 são apresentados os valores de distorção de tensão para as SEs conversoras considerando-se apenas a injeção harmônica em Ibiúna 345 kV. Sem os filtros CA, a DHT em Ibiúna é de 12.45%, mostrando que a maior parte da distorção harmônica em Ibiúna deve-se a própria injeção harmônica desta barra. A influência da injeção harmônica de Ibiúna nas demais SEs converoras resulta em um DHT de 0.71% em Araraquara2 e 0.65% em Estreito. Inserindo os filtros CA a DHT é reduzida para 0.32% em Ibiúna, 0.02% em Araraquara2 e 0.01% em Estreito 500 kV.

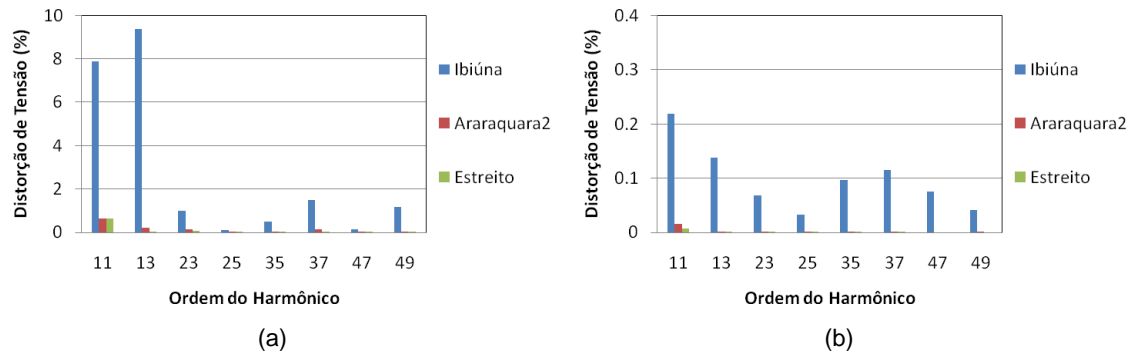


Figura 7 – Distorções de tensão nas barras CA das conversoras considerando apenas a injeção harmônica de Ibiúna 345 kV: (a) sem filtro CA e (b) com filtro CA.

As distorções de tensão para as SEs conversoras considerando-se apenas a injeção harmônica em Araraquara2 500 kV é apresentada na Figura 8. As maiores distorções de tensão, sem a presença dos filtros CA, são da ordem de 2% e são observadas em Araraquara2 e Estreito. Com a inserção dos filtros CA as maiores distorções de tensão verificadas são inferiores a 0.4% em Araraquara. Considerando-se apenas a injeção harmônica de Araraquara2 e a ausência dos filtros CA, os valores de DHT são de 0.42% em Ibiúna, 3.00% em Araraquara2 e 2.31% em Estreito. Quando os filtros CA estão presentes os valores de DHT são mitigados para 0.01% em Ibiúna, 0.16% em Araraquara2 e 0.32% em Estreito.

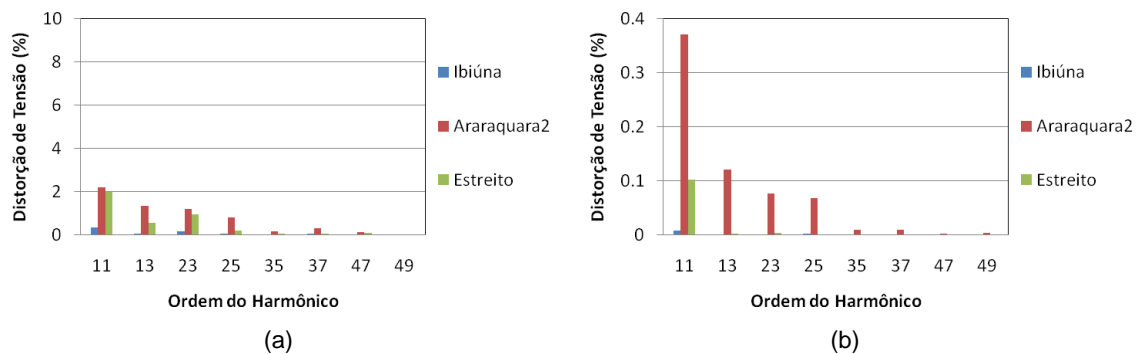


Figura 8 – Distorções de tensão nas barras CA das conversoras considerando apenas a injeção harmônica de Araraquara2 500 kV: (a) sem filtro CA e (b) com filtro CA.

Considerando-se apenas a injeção harmônica em Araraquara2 500 kV, As distorções de tensão para as SEs conversoras são apresentadas na Figura 9. Verifica-se que a exemplo da condição anterior, as maiores distorções de tensão, sem a presença dos filtros CA, ocorrem em Araraquara2 e Estreito e são da ordem de 3%. Com a inserção dos filtros CA as maiores distorções de tensão verificadas são inferiores a 0.3% em Estreito. Considerando-se apenas a injeção harmônica de Estreito e a ausência dos filtros CA, os valores de DHT são de 0.57% em Ibiúna, 3.43% em Araraquara2 e 3.91% em Estreito. Quando os filtros CA estão presentes os valores de DHT são mitigados para 0.01% em Ibiúna, 0.40% em Araraquara2 e 0.01% em Estreito.

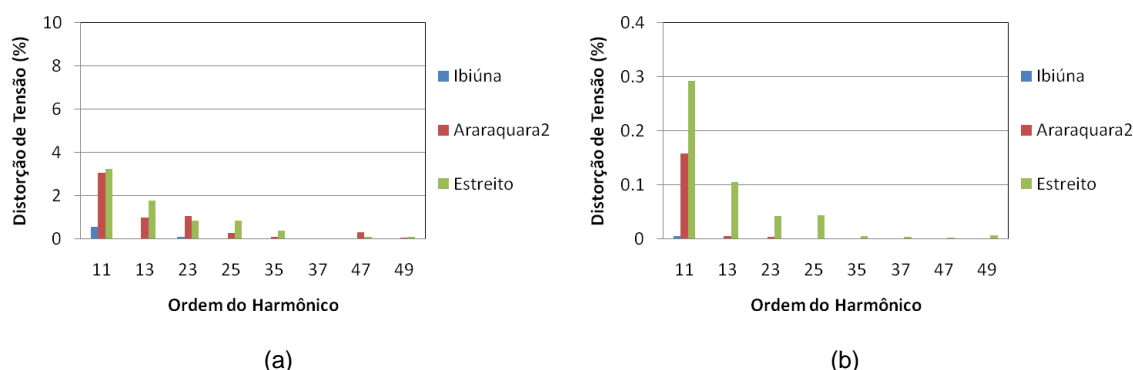


Figura 9 – Distorções de tensão nas barras CA das conversoras considerando apenas a injeção harmônica de Estreito 500 kV: (a) sem filtro CA e (b) com filtro CA.

## 5.0 - CONCLUSÕES

Este informe técnico descreveu uma sequência de procedimentos para avaliação do comportamento harmônico de redes elétricas alimentadas por múltiplos elos CCAT.

A resposta em frequência da rede elétrica foi avaliada, com particular interesse nas impedâncias próprias e de transferência das barras das SEs conversoras. Em seguida foi verificada a eficácia dos filtros CA instalados nestas SEs. Os dados dos filtros CA e da rede elétrica foram utilizados para construir o modelo da rede elétrica no HarmZs.

As injeções de corrente harmônica dos elos CCAT foi calculada utilizando o HHVDC e a validade destes resultados foi confirmada através de comparação com o programa de transitórios eletromagnéticos PSCAD-EMTDC.

As correntes harmônicas foram adicionadas ao modelo da rede e as distorções de tensão foram calculadas. A análise destes resultados permitiu comprovar a eficiência dos filtros CA e verificar em quais das SEs conversoras ocorrem valores significativos de distorção de tensão. Através da adição das correntes harmônicas dos elos CCAT ao modelo da rede de maneira individual verificou-se a evolução da distorção harmônica total e o nível de acoplamento (interação harmônica) entre as SEs conversoras.

Neste informe técnico, verificou-se que os estudos de análise do comportamento harmônico de redes elétricas com múltiplos elos CCAT podem ser realizados de maneira adequada utilizando-se os programas de análise de redes elétricas. Para esta finalidade os dados elétricos (tais como: parâmetros da rede elétrica, filtros CA e injeções harmônicas) devem ser incluídos de maneira criteriosa na representação da rede elétrica.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cristiano de Oliveira Costa, Sergio Luis Varricchio e Franklin Clement Véliz, “Manual do Usuário do Programa HarmZs Versão 1.7 para Estudo do Comportamento Harmônico e Análise Modal de Redes Elétricas”, Relatório Técnico CEPEL, No. DSE 51747 / 2007.
- [2] Antônio de Pádua Guarini, Flávio Vanderson e José Luiz Resende Pereira, “Programa para Cálculo de Harmônico em Sistemas de Transmissão CCAT - Manual do Usuário – Versão 4.0”, Relatório Técnico CEPEL, No. DPP/POL 537 / 2000.



## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Fabricio Lucas Lirio** nascido no Rio de Janeiro, RJ em 02 de agosto de 1973. Graduiu-se em Engenharia Elétrica em 1998 na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) em 2000. Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) em 2007.

Desde 2000 trabalha no CEPEL, onde atua no grupo de estudos elétricos do Departamento de Redes Elétricas (DRE). Participou dos estudos da alternativa CCAT para o Aproveitamento das usinas do rio Madeira e Belo Monte e auxilia no desenvolvimento dos Programas HarmZs e PacDyn.

Seus campos de interesse são: Transmissão CCAT, Equipamentos FACTS, Controle aplicado a Sistemas de Potência, bem como Estudos de Transitórios Eletromagnéticos, Eletromecânicos e Harmônicos.



**Sergio Luis Varricchio:** nascido em Petrópolis, RJ em 13 de agosto de 1963. Formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Católica de Petrópolis (UCP) em 1987. Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 1994. Trabalha no CEPEL desde 1989, nas áreas de análise de sistemas de potência, qualidade de energia e transitórios eletromagnéticos. De 2008 a 2009 foi Presidente do Capítulo de Potência & Energia do IEEE Seção Rio de Janeiro. É "senior member" do IEEE desde 2006.