



**SELEÇÃO DE CASOS PARA ESTUDOS DE PENETRAÇÃO HARMÔNICA
UTILIZANDO A TÉCNICA DE VARREDURA EM FREQUÊNCIA**

RIBEIRO, N. S. S*

MENDES, A. M. P. *

LOPES, F. Rodrigues *

LIMA, J. P. Fernandes *

MATTOS, L. M. N. **

Anésio L.F. ***

***Eletrobras Eletronorte**

****Potência Engenharia**

*****Universidade de Brasília**

RESUMO

Estudos de penetração harmônica geralmente demandam muito tempo para serem realizados, pois além da criteriosa modelagem dos elementos da rede elétrica representada nos programas, as diversas topologias de operação deverão ser analisadas, tendo em vista que a impedância equivalente da rede pode ser significativamente alterada pela inserção ou retirada de elementos da rede, à exemplo de linhas de transmissão, banco de capacitores, filtros harmônicos, etc.

A presente contribuição técnica objetiva apresentar uma metodologia capaz de selecionar, de forma qualitativa, ágil e segura as configurações de rede mais severas para estudos de penetração harmônica, utilizando-se da técnica de varredura em frequência. Para cada configuração possível de operação é levantada a impedância harmônica vista da barra de interesse para o estudo. A partir das respostas em frequência para cada configuração possível de operação e a característica de injeção de correntes harmônicas de cargas não-lineares, determina-se quais configurações deverão ser analisadas com mais detalhes, de forma a determinar, quantitativamente, as respostas da interação entre as correntes harmônicas injetadas pela carga não-linear e a rede elétrica, via simulação no domínio do tempo, minimizando consideravelmente o tempo para a realização dos estudos.

O referido estudo foi integralmente realizado no ATP, que dispõe de ferramentas auxiliares que possibilitam a realização de estudos no domínio do tempo e da frequência.

A metodologia apresentada pelo trabalho foi utilizada em um estudo realizado para análise de um grande consumidor eletro-intensivo conectado nas instalações da Eletrobras-Eletronorte, sendo esta instalação parte integrante do Sistema Interligado Nacional – SIN.

PALAVRAS-CHAVE

Penetração harmônica, ATP, distorção harmônica, transitórios, modelagem, varredura em frequência.

1. INTRODUÇÃO

Os efeitos da injeção de correntes harmônicas em sistemas de potência são inúmeros e já bem conhecidos. Evidencia-se assim que, embora as motivações sejam distintas e variadas, a distorção harmônica é um assunto que se mantém em destaque no campo da Qualidade de Energia, pela infinidade de problemas a ela associados.

Os consumidores eletrointensivos (CEI), quando empregam de forma extensiva a eletrônica de potência e (ou) outras cargas não-lineares em seus processos industriais, podem tornar-se responsáveis pela injeção de grandes quantidades de correntes harmônicas na rede básica.

Saber quais barramentos serão mais afetados por tais injeções advindas de consumidores eletrointensivos na rede básica não é tarefa fácil, uma vez que, em geral, as simulações e modelagens da rede elétrica não levam em conta outras frequências além da industrial, 60Hz.

Basicamente, há dois tipos de possibilidades para se realizar a seleção de barramentos mais vulneráveis: as análises nos domínios do tempo ou da frequência. As análises no domínio do tempo demandam, em geral, elevado custo computacional e de capital humano, haja vista a necessidade de se fazer ajustes nas malhas a fim de se garantir um ponto operacional específico. Diante da complexidade exposta, requer-se do analista uma experiência prévia para a seleção dos casos mais severos. Quanto às análises no domínio da frequência, as quais são feitas em geral de maneira gráfica, a complicação se dá quando há uma grande gama de correntes harmônicas envolvidas.

Dentro do contexto ora apresentado, a vantagem de maior relevância proporcionada pela análise no domínio da frequência é a não necessidade de ajustes na rede de simulação. Em contrapartida, ela traz consigo desvantagens no que tange à avaliação de forma gráfica de grande gama de correntes harmônicas.

2. MODELAGEM DO SISTEMA

A rede elétrica modelada faz parte do Sistema Interligado Nacional, compreendendo partes da região Nordeste e Centro-Oeste. A abrangência do sistema modelado se deve ao fato de a investigação pretender verificar se existem pontos ressonantes em barras distantes do PAC onde o CEI está conectado. A figura 01 apresenta uma pequena parte do sistema modelado, uma vez que o sistema completo tomaria um espaço precioso deste informe técnico.

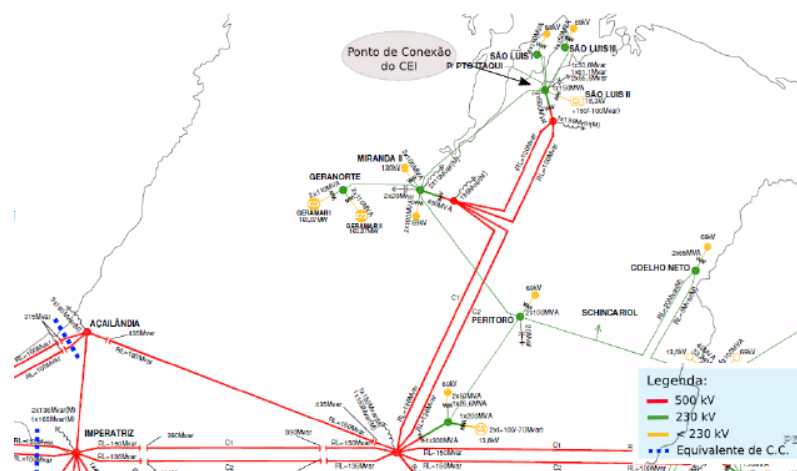


Figura 01 – Área modelada - Caso de Referência - Figura baseada no mapa eletrogeográfico do ONS.

Em sistemas de potência, dispositivos não-lineares podem ser separados em dois grandes grupos:

- Dispositivos que envolvem chaveamento;
- Dispositivos com características não-lineares entre tensão e corrente.

A fonte de harmônicas utilizada no estudo foi modelada como um Consumidor Eletrointensivo (CEI) fictício representando uma carga industrial, conectada diretamente ao SIN através do barramento de 230 kV da subestação que atende às cargas da capital do estado do Maranhão, São Luís II.

O consumidor em questão consiste de três blocos de carga. Cada um deles foi projetado da seguinte forma: um filtro sintonizado na 5ª harmônica, uma carga de modelo impedância constante e um bloco de fontes de correntes harmônicas. Os blocos de correntes harmônicas são constituídos por seis transformadores de 34.5/0.7 kV e seis pontes retificadoras.

Cada par de transformador e ponte, ligados em série, forma um conjunto aqui denominado de "transformador-retificador". São ao todo, 6 conjuntos, ligados em paralelo entre os barramentos de 34.5 kV e 0.7 kV do CEI.

Os transformadores rebaixadores responsáveis pela conexão do barramento de 34.5 kV às pontes retificadoras possuem enrolamentos especiais, os quais forçam defasamentos às correntes que por ali fluem, de tal forma que quando os seis transformadores estão em operação, há o cancelamento fasorial de correntes harmônicas de algumas ordens. Assim, os conjuntos de retificadores passam a injetar correntes características de um retificador de 36 pulsos, $h = 36k \pm 1$.

Entretanto, quando um ou mais conjuntos "transformador-retificador" saem de operação, o cancelamento fasorial supracitado não é mais completo, e o bloco de carga torna a injetar correntes harmônicas características de uma ponte de 6 pulsos. A figura 02 apresenta o diagrama unifilar do CEI, assim como o detalhamento dos blocos de fonte de corrente.

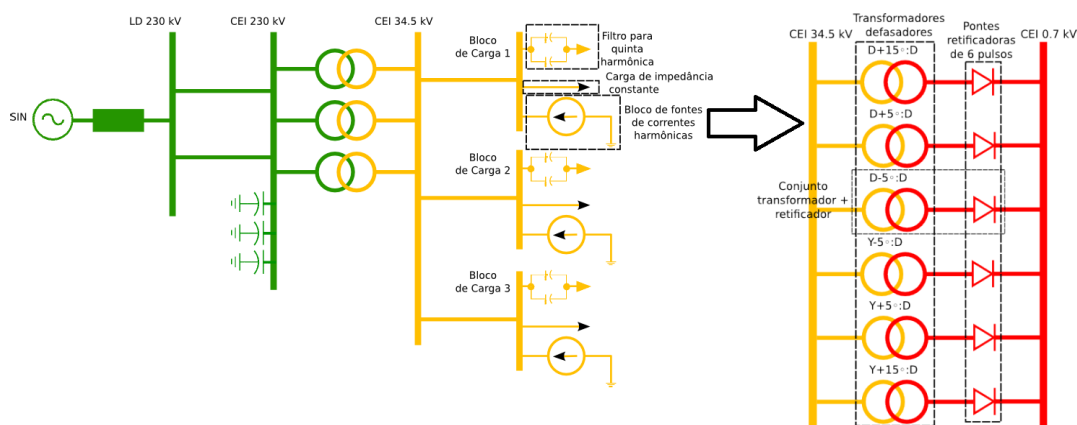


Figura 02 – Detalhe do Consumidor Eletrointensivo e dos blocos de fontes de correntes harmônicas.

3. VARREDURA EM FREQUÊNCIA

Varredura em frequência é o método mais simples e frequentemente utilizado para a análise do comportamento de uma determinada grandeza com a variação da frequência. Essa técnica foi utilizada neste trabalho para calcular a resposta em frequência de uma rede elétrica vista de uma determinada barra.

Os sistemas elétricos de potência, de maneira geral, não constituem em si fonte significativa de correntes harmônicas. Entretanto, a depender das cargas não lineares conectadas e da topologia da rede elétrica, pontos de instabilidade harmônica podem surgir, em função da alteração da configuração da rede elétrica, como a retirada ou inserção de bancos de capacitores e filtros harmônicos entre outros.

Obter analiticamente a resposta em frequência de uma rede do tamanho do Brasil é impraticável. Entretanto, há diversas ferramentas numéricas que realizam essa tarefa. Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizada a rotina *frequency scan*, disponível no software ATP.

3.1 Definição da Varredura em Frequência

Seja uma determinada malha qualquer, com suas fontes de correntes abertas e as fontes de tensão substituídas por curto-circuito. Caso injete-se uma corrente de 1.0 A, em um dado barramento A e lendo-se as tensões nos demais, será obtida uma relação de sensibilidade acerca da tensão em relação à corrente injetada. E mais, variando-se a frequência f da corrente injetada, obtém-se a sensibilidade do sistema vista de A, para cada frequência desejada, ou seja, obtém-se as respostas da tensão em função da frequência. Pela lei de Ohm:

$$V = Z \times I \quad (1)$$

Para o barramento A, onde a corrente foi injetada como $I = 1.0A$, a tensão lida será numericamente igual à impedância harmônica vista dos terminais deste nó. Com efeito, $Z = V$. Para os demais barramentos, não se pode fazer tal afirmativa, haja vista que não se sabe a priori qual a parcela de corrente que por lá circulará.

Entretanto, a leitura da tensão, mesmo não sendo numericamente igual à impedância harmônica, traz uma compreensão de como um outro barramento qualquer responderá a uma injeção de corrente, em uma dada frequência, no barramento A.

Cabe aqui ressaltar que os resultados apresentados são de ordem qualitativa, uma vez que no processo de cálculo da variação da tensão no barramento com a frequência (impedância harmônica do sistema), as não-linearidades dos elementos da rede são desconsideradas.

4. ANÁLISE DOS DADOS

De forma a verificar a resposta em frequência da rede elétrica modelada com as possíveis alterações de topologia, foram elencadas 7 configurações além da configuração base, a qual teve como referência o Caso Base - ONS - Diretrizes para Operação Elétrica - 3_ Quadrimestre de 2011 - Carga Média.

A tabela 01 a seguir apresenta as configurações analisadas.

Tabela 01: Descrição das variações das configurações da malha de simulação.

Configuração	Descrição
Referência	Caso de Referência - ONS - 3_ Quadrimestre de 2011 - Carga Média
Configuração 1	Abertura da Linha de Transmissão 500 kV Presidente Dutra - Miranda II - Circuito 1
Configuração 2	Abertura da Linha de Transmissão 500 kV Presidente Dutra - Miranda II - Circuito 2
Configuração 3	Abertura da Linha de Transmissão 500 kV Miranda II - São Luís II - Circuito 1
Configuração 4	Abertura da Linha de Transmissão 500 kV Miranda II - São Luís II - Circuito 2
Configuração 5	Todos os Bancos de Capacitores de São Luís II em Operação
Configuração 6	Todos os Bancos de Capacitores do Consumidor Eletrointensivo em Operação
Configuração 7	Nenhum dos Filtros do Consumidor Eletrointensivo em Operação

Além da influência da topologia da rede elétrica, foram analisadas as configurações possíveis de operação do CEI. Foram considerados, além da operação equilibrada do CEI (6 conjuntos transformador-retificador), a operação com cinco e quatro conjuntos transformador-retificador, desequilibrando a ponte, o que faz com que surjam correntes harmônicas de característica $h = 6k \pm 1$, típicas de retificadores de seis pulsos.

Em geral, correntes harmônicas têm seus efeitos minimizados para grandes distâncias em relação à fonte, dado que a impedância série predominante (indutiva) aumenta com a frequência. Portanto, foram selecionadas 11 barras do SIN, adjacentes ao CEI, para serem monitoradas durante as simulações apresentadas na Tabela 01.

De forma a verificar a influência das possíveis configurações da rede elétrica com as alterações de topologia apresentadas na tabela 01, a figura 03 apresenta a resposta em frequência da rede elétrica vista pelas barras de 230 kV das SEs São Luis, São Luis II, São Luis III e Miranda II, para a injeção de um sinal de 1A com a frequência variando de $h=1$ a 50 localizado na barra do CEI.

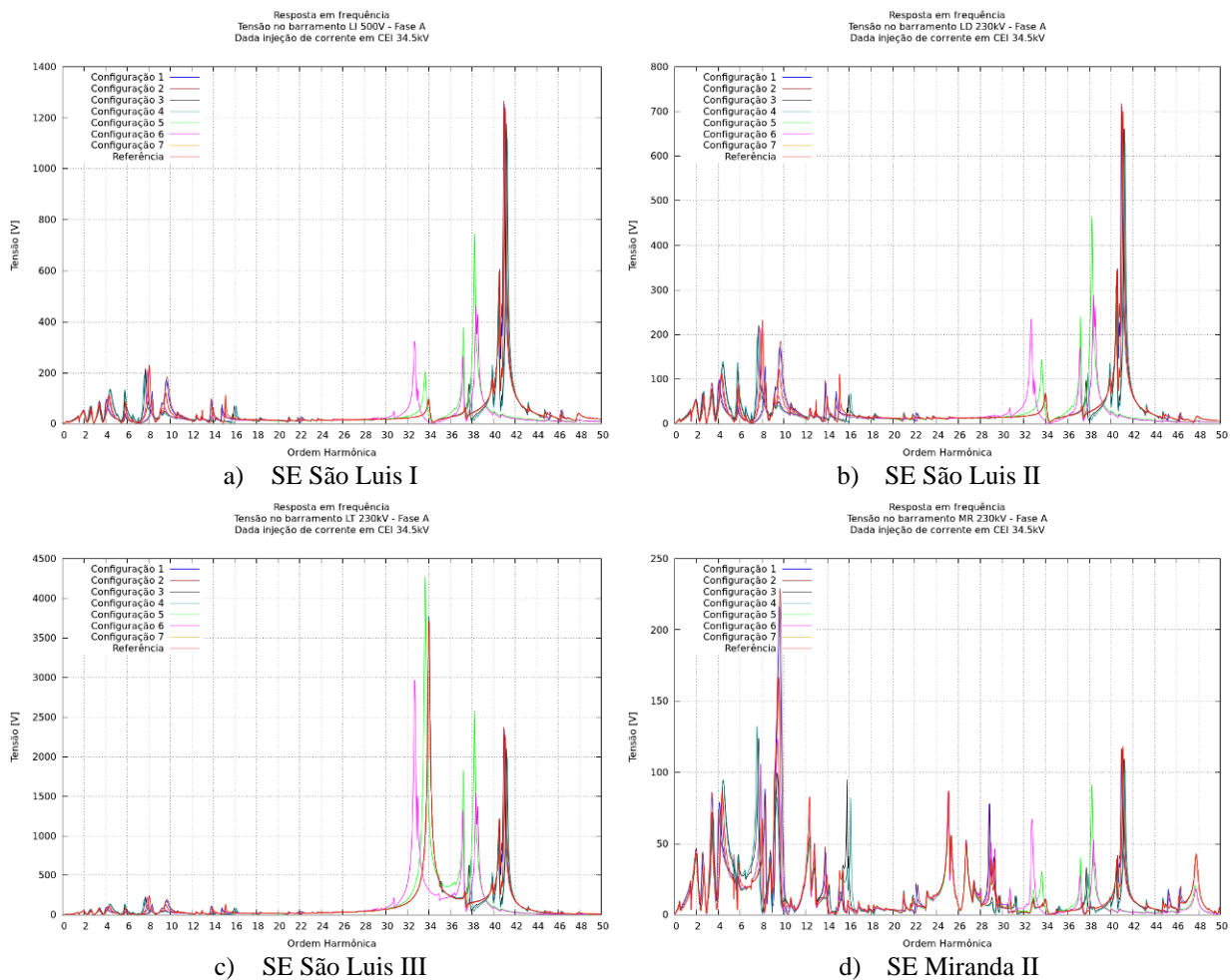


Figura 03 – Resposta em frequência nos barramentos das SEs São Luis I, São Luis II, São Luis III e Miranda II para injeção de corrente de 1A com frequência variando de $h=1$ a 50, no barramento do CEI.

Fica claro, pela análise gráfica da figura 03, que para todas as configurações analisadas, conforme Tabela 01, o barramento que apresentou maior valor de tensão em função da frequência (impedância) foi o barramento relacionado à SE São Luis III, para a configuração 5.

De forma a validar a análise gráfica, foram feitas análises da Distorção Harmônica Total – THD% e da Variação de Tensão $\Delta V\%$ nas barras sob interesse. A figura 04 apresenta a análise em questão. Os dados abaixo foram obtidos pela análise no domínio do tempo, com o CEI operando na configuração equilibrada, gerando correntes harmônicas de características 36k± (6 conjuntos transformador – retificador).

Configuração	Barramentos												
	PD 500kV	MR 500kV	LD 500kV	LD 230kV	MR 230kV	CEI 230kV	LI 230kV	LT 230kV	PR 230kV	CH 230kV	PD 230kV		
Ref	ΔV [%]	0,244	0,118	0,326	0,300	-0,014	0,234	0,457	5,769	0,068	-0,066	0,338	
	THD [%]	0,217	0,129	0,321	0,295	0,090	0,294	0,450	4,762	0,229	0,157	0,422	
1	ΔV [%]	0,127	0,092	0,401	0,312	0,039	-0,015	0,467	7,246	0,107	-0,295	0,048	
	THD [%]	0,177	0,105	0,222	0,322	0,082	0,292	0,491	5,503	0,203	0,205	0,334	
2	ΔV [%]	0,037	0,107	0,298	0,113	-0,031	0,089	0,401	7,319	0,042	-0,301	-0,137	
	THD [%]	0,148	0,101	0,215	0,324	0,079	0,290	0,495	5,551	0,176	0,202	0,272	
3	ΔV [%]	-0,094	0,040	0,505	0,453	0,010	0,123	0,692	6,930	0,109	-0,019	0,061	
	THD [%]	0,174	0,121	0,484	0,333	0,083	0,285	0,509	5,557	0,262	0,177	0,420	
4	ΔV [%]	0,037	0,107	0,298	0,113	-0,031	0,089	0,401	7,319	0,042	-0,301	-0,137	
	THD [%]	0,148	0,101	0,215	0,324	0,079	0,290	0,495	5,551	0,176	0,202	0,272	
5	ΔV [%]	0,284	0,193	0,547	0,532	-0,049	0,717	0,784	8,233	0,150	-0,005	0,478	
	THD [%]	0,258	0,179	0,451	0,500	0,113	0,675	0,773	6,239	0,263	0,183	0,498	
6	ΔV [%]	0,151	0,246	0,641	0,663	-0,046	0,451	1,193	8,017	0,074	0,082	0,326	
	THD [%]	0,239	0,290	0,974	0,923	0,163	0,633	1,439	7,746	0,201	0,401	0,565	
7	ΔV [%]	0,251	0,141	0,380	0,253	-0,039	0,234	0,501	6,007	0,106	-0,062	0,360	
	THD [%]	0,221	0,131	0,328	0,302	0,091	0,301	0,461	4,895	0,234	0,156	0,430	

Figura 04 – Resumo dos resultados no domínio do tempo.

É possível verificar que para toda gama de configurações analisadas, o barramento mais sensível foi o LT 230kV, relativo à SE São Luis III. A mesma análise foi desenvolvida considerando a operação do CEI com as pontes desequilibradas, operando com 5 e 4 conjuntos transformador-retificador, gerando, assim, correntes harmônicas de característica 6k±1. A figura 05 apresenta a resposta do sistema à operação do CEI de forma desequilibrada, considerando 5 e 4 conjuntos transformador-retificador, apenas para a SE São Luis III.

	LT 230kV	LT 230kV	LT 230kV	LT 230kV	LT 230kV	LT 230kV	LT 230kV	LT 230kV
ΔV [%]	7,742	9,946	9,308	8,273	7,700	10,299	9,966	8,086
THD [%]	5,368	6,517	6,337	5,966	5,478	6,332	7,830	5,525

Config Ref 1 2 3 4 5 6 7

a)

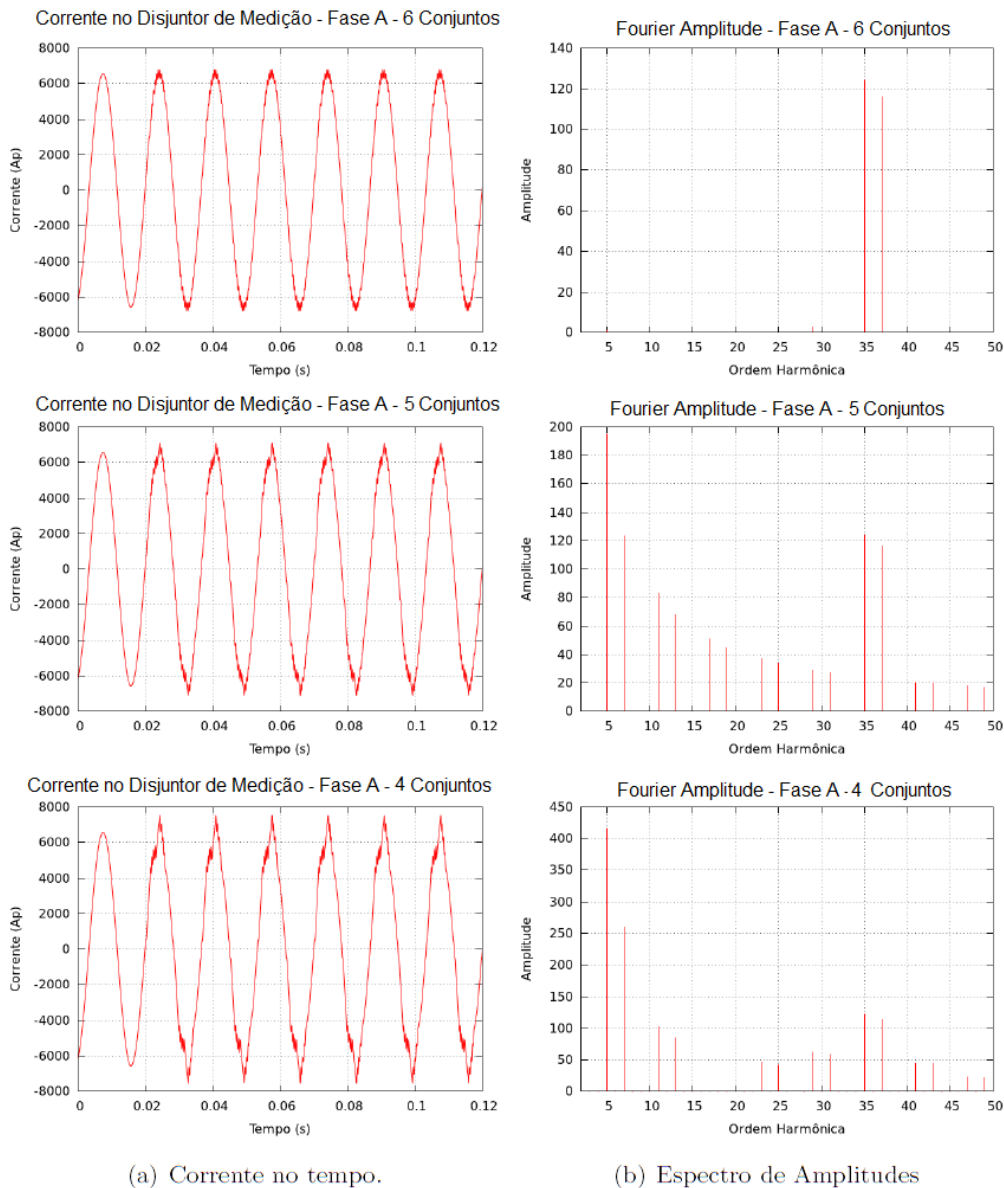
	LT 230kV	LT 230kV	LT 230kV	LT 230kV	LT 230kV	LT 230kV	LT 230kV	LT 230kV
ΔV [%]	8,124	10,140	9,162	6,505	5,778	10,074	9,678	8,806
THD [%]	7,079	8,851	8,596	7,141	6,553	6,590	8,068	7,290

Config Ref 1 2 3 4 5 6 7

b)

Figura 05 – Resumo dos resultados no domínio do tempo.

A figura 06 apresenta as correntes que fluem pelo disjuntor do conjunto transformador-retificador, no lado de 34,5 kV. Para evidenciar o efeito do fluxo de correntes harmônicas no sistema, o CEI foi acoplado em t=0,200s, para 6, 5 e 4 conjuntos transformadores-retificadores, nas piores configurações da rede, conforme figura 04.



(a) Corrente no tempo. (b) Espectro de Amplitudes

Figura 06 – Corrente no disjuntor de medição entre a barra de 34,5 kV do CEI e o bloco de carga 1 com seis, cinco e quatro conjuntos "transformadorretificador" operando. Componentes fundamentais suprimidas.

Na decomposição das formas de onda pela FFT, a corrente fundamental foi suprimida, apenas para evidenciar as correntes harmônicas geradas, tendo em vista que a corrente fundamental de cada um dos três blocos de carga é da ordem de 6 kA.

5. CONCLUSÃO

No presente trabalho, modelou-se uma parte do Sistema Interligado Nacional e conectou-se um Consumidor Eletrointensivo fictício na barra de 230 kV da subestação a qual atende às cargas da capital do estado do Maranhão, SE São Luís II. Tal consumidor foi projetado como



**Décimo Quinto Encontro Regional
Ibero-americano do CIGRÉ
Foz do Iguaçu-PR, Brasil
19 a 23 de maio de 2013**



sendo composto de três blocos de cargas, a saber, um filtro sintonizado na quinta harmônica, uma carga de impedância constante e um bloco de correntes harmônicas.

Para validar tal metodologia, foram feitas também simulações no domínio do tempo. Dados como variação da tensão, antes e depois da injeção de correntes harmônicas na rede, bem como a distorção harmônica total foram coletados. Durante a aquisição desses dados, tentou-se alterar o mínimo possível a rede elétrica. Entretanto, reajustes fizeram-se necessários para mantê-la operacional.

Portanto, com a metodologia foi possível selecionar o barramento mais crítico diante um conhecido perfil de injeção de correntes harmônicas por um Consumidor Eletrointensivo fictício, e também selecionar, para esse barramento, as configurações mais e menos severas.

Cabe ressaltar que as análises no domínio da frequência são de caráter qualitativa, relativas e não absolutas, uma vez que, para a obtenção dos dados, as não linearidades dos elementos da rede são desprezadas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] OWEN, E. L. A history of harmonics in power systems. v. 4, p. 6–12, 1998.
- [2] DUGAN, R. C. et al. Electrical Power Systems Quality. [S.l.]: McGraw-Hill, 2002.
- [3] RIBEIRO, N. S. S. Avaliação de Filtros Eletromagnéticos e Sintonizados LC para Minimização de Correntes de Seqüência Zero em Sistemas de Distribuição a Quatro Fios. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- [4] FRANÇA, F. A. X. Estratégias para Estudos de Recomposição de Sistemas Elétricos via Análise de Varredura em Frequência. Dissertação (Mestrado), 2009.
- [5] FERNANDES, A. B.; NETO, A. S. Análises no domínio da frequência visando quantificar o impacto de desligamento de circuitos para controle de tensão. XII CBQEE – Conferência Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica, 2007.