



## XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

### **Monitoramento e Simulação da Qualidade da Energia: Procedimentos de Avaliação do Impacto de Harmônicos**

<b>Nelson Clodoaldo de Jesus</b>	<b>Edson Luis Batista</b>
<b>AES Sul</b>	<b>AES Sul</b>
nelson.jesus@aes.com	edson.batista@aes.com

#### **Palavras-chave**

Qualidade da Energia

Monitoramento

Harmônicos

Simulações

#### **Resumo**

Este trabalho apresenta os procedimentos utilizados para análise da qualidade de energia em atendimento a um sistema industrial. Foram realizados diversos monitoramentos com o objetivo de registrar o comportamento do sistema sob operação normal e durante a realização de manobras no sistema. A conformidade da tensão de fornecimento é verificada por meio dos principais indicadores de qualidade de energia, com especial atenção ao estabelecimento de procedimento, forma de apuração e análise do impacto de harmônicos. Resultados de simulação obtidos por meio da modelagem do sistema com o programa de transitórios eletromagnéticos ATPDRAW são comparados aos dados reais obtidos por medições.

#### **1. Introdução**

Um dos principais parâmetros e indicadores da qualidade da energia elétrica refere-se aos níveis das distorções das tensões e correntes encontradas nas instalações elétricas. De modo a evitar as conseqüências prejudiciais dos componentes harmônicos, principalmente durante a operação ou expansão de grandes consumidores, torna-se importante registrar as distorções e identificar as componentes características do sistema por meio de medições. O objetivo desta avaliação foi verificar o comportamento dos níveis de distorções das tensões e correntes do sistema, além das respectivas formas de onda e espectro harmônico, por meio de diversas medições realizadas no sistema secundário em 23 kV. Foram também realizadas manobras nos transformadores de 10/12,5 MVA e banco de capacitores de 3 MVAr. As cargas elétricas consideradas especiais foram os acionamentos controlados de motores de grande porte em duas linhas de produção. Nestas condições, realizou-se o monitoramento e análise dos resultados mais significativos quanto à distorção harmônica total, além das componentes características e formas de onda das tensões e correntes, obtendo-se parâmetros de comparação com os valores recomendados. Adicionalmente, apresentam-se resultados obtidos com as manobras dos transformadores e banco de capacitores.

Neste caso, considerando a pior condição operativa, realiza-se a comparação com limites normalizados a título de restrição dos equipamentos devido à presença de harmônicos. Realiza-se também a análise por meio de simulações da penetração de harmônicos e comparação com os respectivos resultados do monitoramento. A figura 1 mostra o diagrama unifilar simplificado da instalação sob análise.

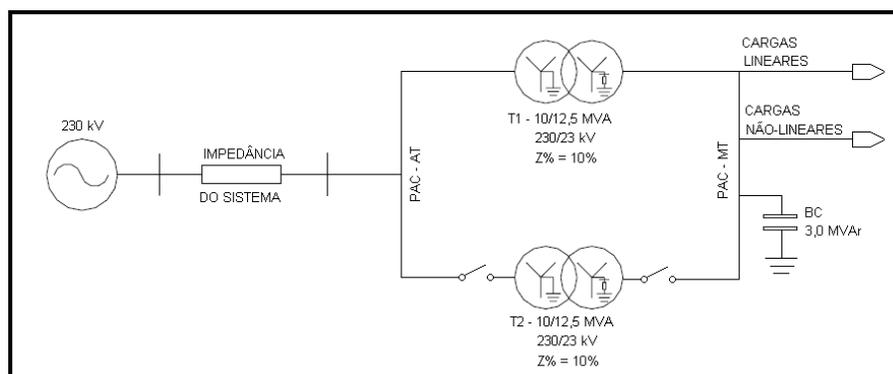


Figura 1 - Diagrama unifilar simplificado

## 2. Harmônicos

Harmônicos são componentes de frequências adicionais presentes nas tensões ou correntes, sendo múltiplos da frequência fundamental. Componentes cujas frequências não são múltiplas inteiras da fundamental são denominados de inter-harmônicos. A distorção de corrente é resultado da característica não-linear da carga. Já a distorção harmônica de tensão é um resultado da interação de correntes distorcidas com a impedância equivalente do sistema. As expressões para o cálculo das grandezas de distorção harmônica total (DTT) e individual da tensão (DIT) são apresentadas como se segue. De maneira análoga, pode-se determinar as distorções de corrente usando as mesmas relações.

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (1)$$

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{m\acute{a}x}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

Sendo:

$DIT_h\%$  - Distorção harmônica individual de tensão de ordem h

$V_h$  - Tensão harmônica de ordem h

$V_1$  - Tensão fundamental

DTT - Distorção harmônica total de tensão

h - Ordem harmônica

## 2. Limites Recomendados

Os limites são estabelecidos no sentido de manter a compatibilidade entre o fornecimento da energia e a operação da carga. No Brasil, os procedimentos de distribuição propostos pela ANEEL (PRODIST) estão em fase final de encaminhamento para consulta em audiência pública, tratando da qualidade de energia no que tange ao serviço e produto para sistemas de distribuição [1]. Salienta-se que serão apontados valores referenciais neste momento, com posterior definição de limites e indicadores somente ao término da realização e análise da campanha de medições prevista.

Sob o aspecto de distorção harmônica, os valores globais de referência que estão sendo recomendados são de 6% e 10%, respectivamente para níveis de média e baixa tensão. Segundo o mesmo procedimento, devem ser obedecidos também os valores das distorções harmônicas individuais. Por comparação, os valores atuais constante na minuta do Módulo 8 do PRODIST sobre qualidade da energia são superiores aos estabelecidos na norma IEEE 519 [2], cujos valores são utilizados para efeito de avaliação neste trabalho. A tabela 1 mostra os valores de referência segundo a norma americana. Portanto, a adoção desta referência impõe valores mais rígidos do que aqueles que estão sendo propostos em âmbito nacional.

Tabela 1 - Limites de Distorção Harmônica de Tensão (IEEE 519/1992)

TENSÃO	MÁXIMO COMPONENTE HARMÔNICO INDIVIDUAL (%)	MÁXIMA DTT (%)
69 kV E ABAIXO	3,0%	5,0%
115 kV A 161 kV	1,5%	2,5%
ACIMA DE 161 kV	1,0%	1,5%

Para análise das distorções das correntes, também adotou-se o procedimento conforme a norma IEEE519. Neste sentido, para análise dos limites de distorções harmônicas de corrente, deve-se considerar a relação entre o carregamento e o nível de curto-circuito no ponto de acoplamento comum (PAC). Assim, determinam-se os seguintes valores como referência.

$I_{SC}$  - Corrente de curto-circuito no PAC

$I_L$  - Corrente de carga na frequência fundamental

Para efeito de aplicação dos critérios conforme a norma IEEE 519, a distorção total de corrente ( $T_{DD\%}$ ) é usada como base e, portanto, é obtida pela seguinte expressão:

$$T_{DD} \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100 \quad (3)$$

A tabela 2 mostra os limites dos componentes harmônicos individuais e o valor da distorção total de corrente.

Tabela 2 - Limites de Distorção Harmônica de Corrente (IEEE 519/1992)

<b>V ≤ 69 kV</b>						
$I_{SC}/I_L$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 - 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 - 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 - 1000	12	5,5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2,5	1,4	20
<b>69 kV &lt; V ≤ 161 kV</b>						
< 20	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20 - 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50 - 100	5	2,25	2	1,25	0,35	6
100 - 1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
> 1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10
<b>V &gt; 161kV</b>						
< 50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4

### 3. Resultados de Monitoramento

A seguir serão apresentados os resultados das medições, com especial atenção aos níveis e conteúdo harmônico das tensões e correntes na alimentação do sistema elétrico industrial. Foram contempladas as configurações sob condições normais de operação, bem como manobras de conexão e desconexão dos transformadores e banco de capacitores, além da saída natural de cargas elétricas especiais (não-lineares), constituídas por acionamentos controlados de motores de grande porte (ASD). A título de compatibilidade, o principal parâmetro refere-se às distorções das tensões do sistema em regime permanente. Sendo assim, o sistema estará em conformidade quanto ao aspecto de distorção harmônica quando apresentar valores máximos de distorção harmônica total e componentes individuais de tensões inferiores aos valores estabelecidos de acordo com as respectivas classes de tensão.

#### 3.1 Condição Normal de Operação

Nesta configuração a planta opera sob as condições normais de funcionamento, ou seja, com os transformadores operando em paralelo e banco de capacitores inserido. Os valores obtidos referem-se a um dos transformadores nas mesmas condições de operação. As figuras 2 e 3 mostram o comportamento das tensões e correntes eficazes. Portanto, os níveis de tensão em regime permanente são controlados, permanecendo dentro da faixa considerada adequada. As figuras 4 e 5 ilustram as respectivas distorções harmônicas de tensão e corrente. O valor máximo da distorção de tensão foi de 2,53%, estando o sistema em conformidade quanto ao aspecto de harmônicos. A máxima distorção de corrente foi de 8,89%. Para uma análise geral, tem-se um resumo dos resultados obtidos para as distorções harmônicas sob condição normal de operação, conforme mostra a tabela 3.

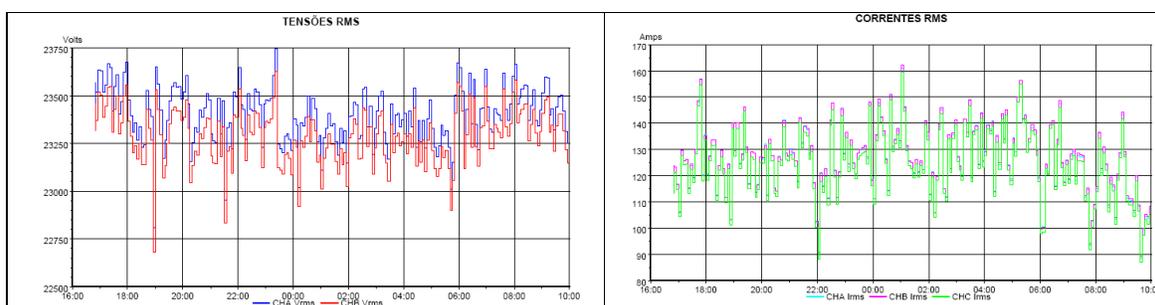


Figura 2 - Tensões RMS

Figura 3 - Correntes RMS

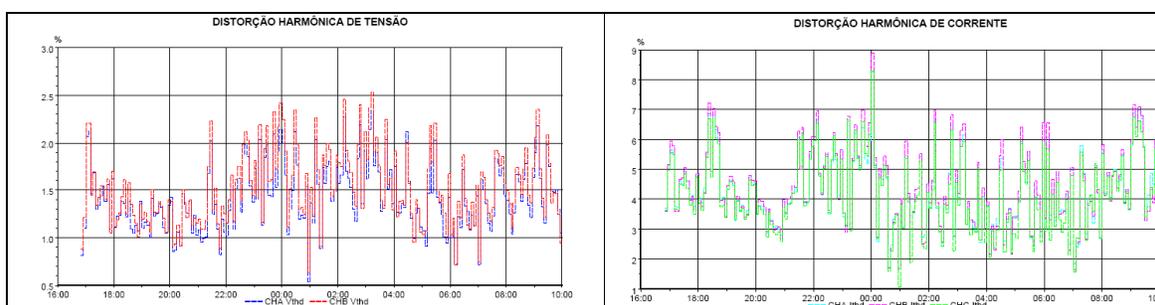


Figura 4 - Distorção harmônica de tensão

Figura 5 - Distorção harmônica de corrente

Tabela 3 - Resumo das Distorções Harmônicas de Tensão e Corrente

Distorção Harmônica (%)	Mínima	Máxima	Média	P <sub>5%</sub>	P <sub>95%</sub>
DTT <sub>(A)</sub>	0,54	2,34	1,37	0,95	2,07
DTT <sub>(B)</sub>	0,64	2,53	1,44	0,95	2,24
DTC <sub>(A)</sub>	1,70	8,25	4,11	2,51	6,41
DTC <sub>(B)</sub>	1,63	8,89	4,18	2,48	6,78
DTC <sub>(C)</sub>	1,08	8,26	4,00	2,27	6,30

A título de exemplo, têm-se os resultados das tensões e correntes típicas com as respectivas formas de onda e os espectros harmônicos para uma determinada condição de operação, com valores considerados adequados e, portanto, inferiores aos de referência.

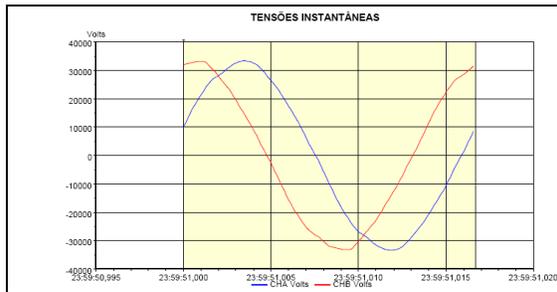


Figura 6 - Tensões instantâneas

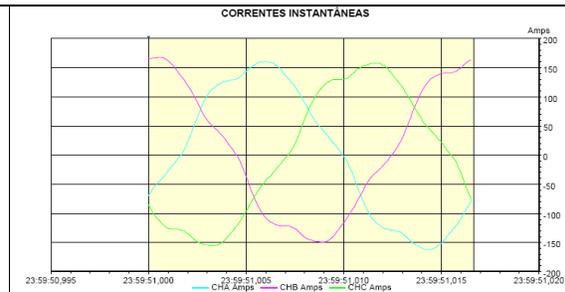


Figura 7 - Correntes instantâneas

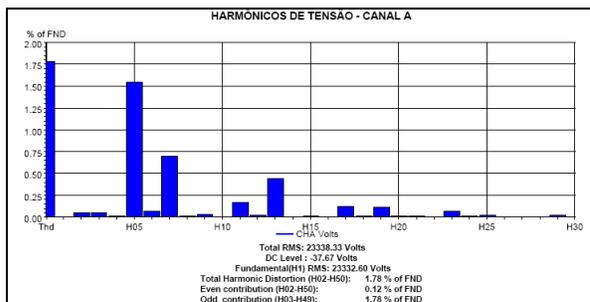


Figura 8 - Espectro harmônico de tensão

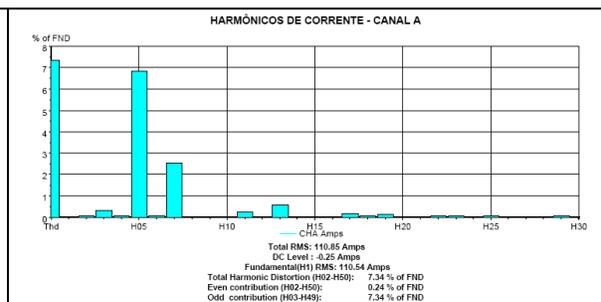


Figura 9 - Espectro harmônico de corrente

A tabela 4 mostra os parâmetros utilizados para análise da distorção de corrente segundo a norma IEEE 519, onde inicialmente são estabelecidos os dados de entrada. A partir disso, pode-se fazer a análise comparativa com os dados de referência apresentados na tabela 2. A aplicação deste procedimento, considerando as formas de onda da tensão do canal A, mostrada na figura 6 e o respectivo conteúdo harmônico, mostrado na figura 8, resulta na tabela 5, sem violações dos limites adotados.

Tabela 4 - Dados de Entrada para Análise de Limites de Harmônicos

<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Dados de Entrada</li> <li>▶ Dados de Cálculo</li> <li>▶ Limites (Tabela Norma IEEE 519)</li> </ul>	
TENSÃO SECUNDÁRIA	23000 [ V ]
TENSÃO PRIMÁRIA	230000 [ V ]
NÍVEL DE CURTO-CIRCUITO - MT	177,1 [ MVA ] ⇒⇒⇒⇒ 4446 [ A ]
NÍVEL DE CURTO-CIRCUITO - AT	1640,0 [ MVA ] ⇒⇒⇒⇒ 4117 [ A ]
Potência Equivalente :	4400 [ KVA ] ⇒⇒⇒⇒ 110 [ A ]
Relação Isc/IL (MT):	40
Relação Isc/IL (AT):	373

Tabela 5 - Limites de Distorção de Tensão (IEEE 519/1992)

PAC: Lado de Média Tensão - CANAL A

Número Harmônico	Frequência (Hz)	Tensão (V)	IEEE Limite %	Tensão (% Fund)	Limite OK
1	60	N/A	N/A	N/A	N/A
5	300	360,0	3,0	1,54	OK
7	420	164,1	3,0	0,70	OK
11	660	39,6	3,0	0,17	OK
13	780	104,6	3,0	0,45	OK
17	1020	29,2	3,0	0,13	OK
19	1140	27,0	3,0	0,12	OK
THD:			5,0	1,78	OK

Considerando as formas de onda da corrente da fase A, ilustrada na figura 7 e o respectivo conteúdo harmônico, mostrado na figura 9, tem-se a avaliação comparativa quanto às distorções de corrente, conforme apresentado na tabela 6, onde também neste caso não ocorrem violações dos limites.

Tabela 6 - Limites de Distorção de Corrente (IEEE 519/1992)

PAC: LADO DE MÉDIA TENSÃO - CANAL A

Número Harmônico	Frequência (Hz)	Corrente de Carga (A)	IEEE Limite %	Corrente (% Demanda)	Limite OK
1	60	N/A	N/A	N/A	N/A
5	300	7,60	7,00	6,88	OK
7	420	2,80	7,00	2,54	OK
11	660	0,30	3,50	0,27	OK
13	780	0,63	3,50	0,57	OK
17	1020	0,18	2,50	0,16	OK
19	1140	0,15	2,50	0,14	OK
TDD:			8,00	7,34	OK

Relação Isc/IL (Barra Secundária - 23 kV): 40

### 3.2 Manobras no Sistema

Durante parte do monitoramento, realizaram-se manobras para obtenção da operação de alimentação somente com um transformador, com e sem a presença do banco de capacitores. Desta forma, verificaram-se as seguintes condições de operação durante esta fase da medição.

- Condição 1: T<sub>1</sub>//T<sub>2</sub> com BC (10:57 - 11:12 h)
- Condição 2: T<sub>1</sub>//T<sub>2</sub> sem BC (11:12 - 11:54 h)
- Condição 3: T<sub>2</sub> sem BC (11:54 - 12:37 h)
- Condição 4: T<sub>2</sub> com BC (12:37 - 13:51 h)
- Condição 5: T<sub>1</sub>//T<sub>2</sub> com BC (após 13:51 h)

A figura 10 mostra as tensões eficazes e a figura 11 às respectivas correntes, verificando-se o exato instante da desconexão de um dos transformadores na alimentação do sistema.

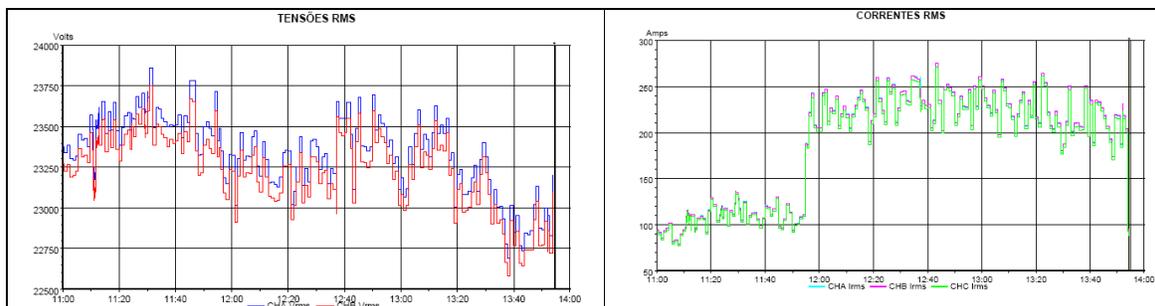


Figura 10 - Tensões RMS

Figura 11 - Correntes RMS

Da mesma forma, quanto aos instantes de operação apresentados anteriormente, ou seja, as manobras do transformador e do banco de capacitores podem ser comprovadas pelo comportamento das potências apresentadas na figura 12. Adicionalmente, tem-se o resultado do fator de desequilíbrio das tensões na figura 13, com valores considerados plenamente adequados e inferiores ao limite de 2%, valor normalmente adotado como referência para esta classe de tensão.

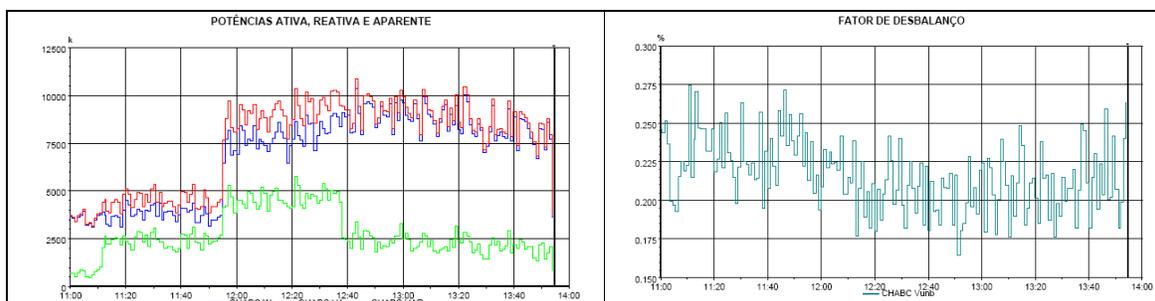


Figura 12 - Potência ativa, reativa e aparente

Figura 13 - Fator de desequilíbrio das tensões

A figura 14 mostra o comportamento das distorções das tensões enquanto a figura 15 apresenta os valores das distorções das correntes. Observa-se que após a manobra de desconexão do transformador junto a operação do BC, as distorções de tensão se elevam. Entretanto, mesmo nesta condição, o limite de 5%, conforme a norma IEEE 519/1992, não é violado. Naturalmente, as distorções das correntes apresentam comportamento similar. Observa-se que os valores máximos superam o valor de referência de 8% em alguns instantes, sem, entretanto, observar qualquer problema de compatibilidade na operação do sistema.

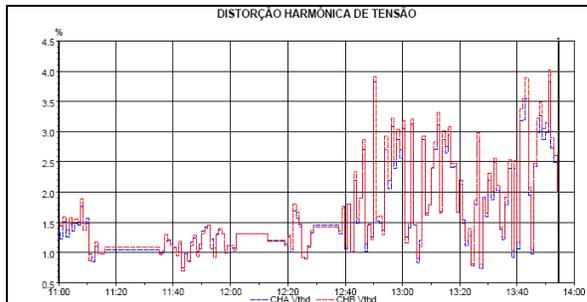


Figura 14 - Distorção harmônica de tensão

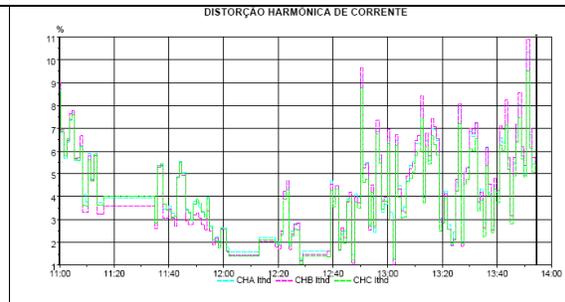
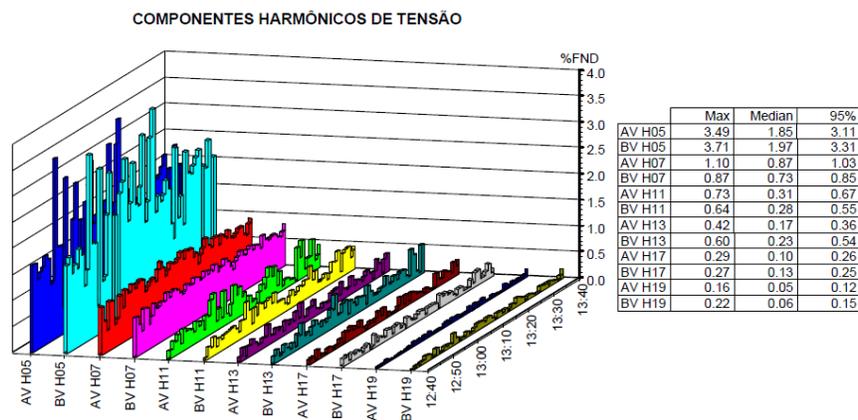
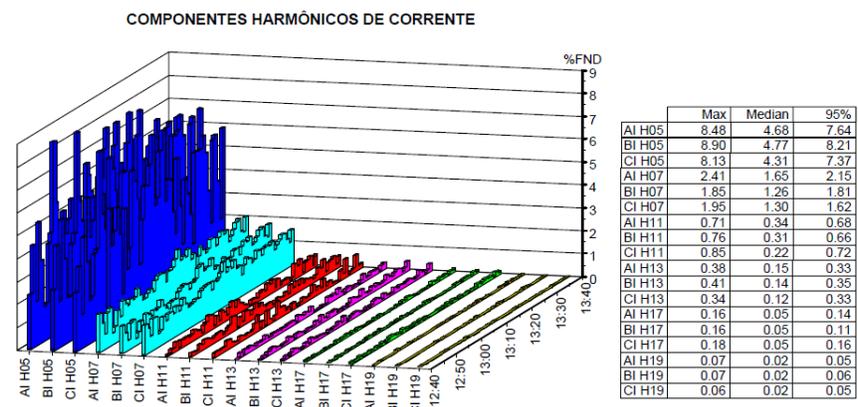


Figura 15 - Distorção harmônica de corrente

Para uma visualização do comportamento individual dos harmônicos, apresenta-se o perfil obtido no período em que o transformador T2 e o BC eram responsáveis por todo o suprimento do sistema, considerando, portanto, em termos de penetração de harmônicos, as piores condições, em função obviamente do nível de curto-circuito resultante nesta configuração. As figuras 16 e 17 ilustram, respectivamente, os harmônicos característicos das tensões e correntes, sendo que o componente preponderante para ambas as grandezas refere-se ao harmônico de quinta ordem.



Figuras 16 - Componentes harmônicos individuais das tensões



Figuras 17 - Componentes harmônicos individuais das correntes

A seguir, têm-se as formas de onda em determinado instante para a mesma condição de operação citada anteriormente. As figuras 18 e 19 mostram as tensões e correntes instantâneas, enquanto as figuras 20 e 21 mostram o conteúdo harmônico do canal B.

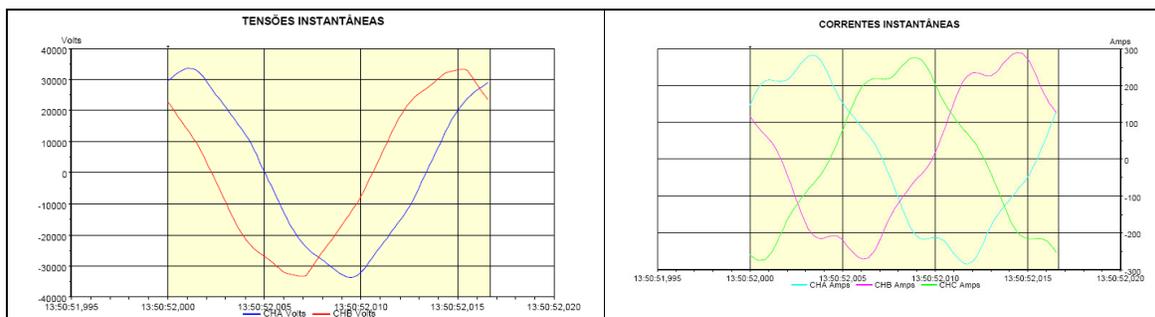


Figura 18 - Tensões instantâneas

Figura 19 - Correntes instantâneas

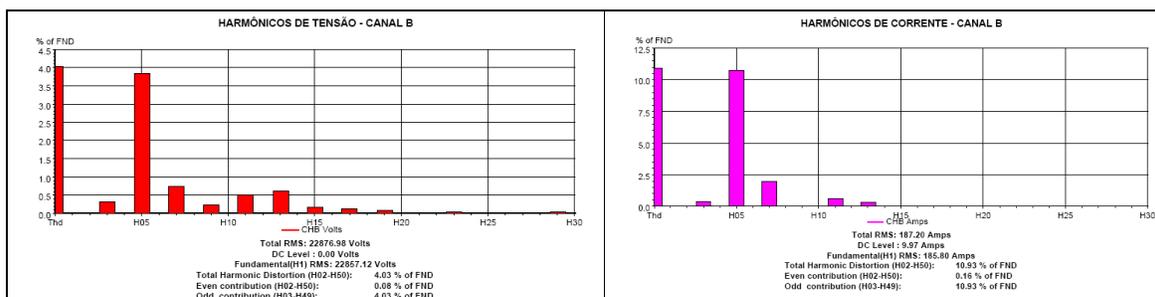


Figura 20 - Espectro harmônico de tensão

Figura 21 - Espectro harmônico de corrente

De posse dos resultados obtidos no monitoramento, realizou-se a avaliação em termos dos possíveis efeitos nos transformadores. Considerando somente os valores percentuais para o pior caso, ou seja, uma distorção harmônica de corrente de 10,93%, avalia-se o possível impacto no carregamento do transformador. Conforme apresentado, mesmo com este nível máximo de distorção, não se tem maior implicação ou qualquer necessidade de diminuição efetiva do carregamento. Na prática, o valor eficaz nesta condição foi bem inferior a corrente nominal do transformador. O fator de perdas por correntes parasitas ( $P_{EC-R}$ ) foi adotado em 10%, valor típico para a respectiva faixa de potência e tipo de transformador avaliado. A tabela a seguir ilustra o cálculo da máxima corrente recomendável ( $I_{m\acute{a}x} = 0,986$ ) sem comprometimento da vida útil (De rating), considerando os harmônicos mostrados na figura 9 e a influência do respectivo fator k [3].

Tabela 7 - Análise do Impacto de Harmônicos em Transformadores (ANSI/IEEE C57.110/1986)

Distribuição de Harmônicos		Fator K da Carga	
Correntes de Carga		1,30	
h	Corrente (%)	Fator de Perdas Parasitas Adotado ( $P_{EC-R}$ ) 10%	
1	100,000	<p><b>Dados de Entrada</b></p> $K = \frac{\sum (I_h^2 \times h^2)}{\sum I_h^2}$ <p><b>Dados de Cálculo</b></p> <p><b>Limites de Carregamento</b></p> $I_{m\acute{a}x} = \sqrt{\sum I_h^2} = \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R}}{1 + K \cdot P_{EC-R}}} (pu)$	
3	0,380		
5	10,720		
7	1,970		
9	0,000		
11	0,600		
13	0,340		
15	0,000		
17	0,038		
19	0,020		
21	0,018	Fator de Desclassificação $I_{m\acute{a}x} = 0,99 pu$	
23	0,010		
25	0,038		
<b>THD (%): 10,93</b>			

### 3.3. Medição do Banco de Capacitores

Neste item são apresentados os resultados do monitoramento junto ao banco de capacitores (BC) com potência nominal de 3 MVar, observando-se especialmente o comportamento das tensões e correntes harmônicas. As figuras 22 e 23 mostram os valores eficazes das tensões e correntes do banco de capacitores, onde se verifica facilmente o intervalo relativo à manobra executada.

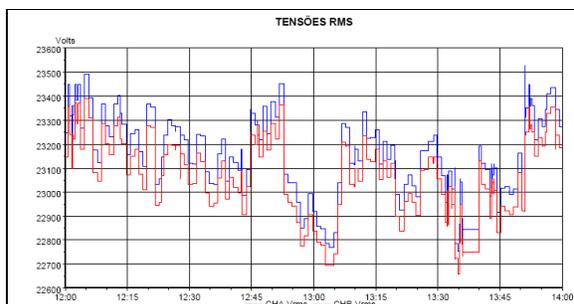


Figura 22 - Tensões RMS

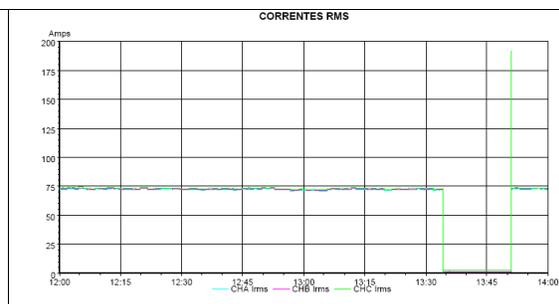


Figura 23 - Correntes RMS

As distorções harmônicas das tensões são apresentadas na figura 24, onde se percebe que após a desconexão do BC, os valores sofrem redução, como esperado. As distorções das correntes no banco de capacitores podem ser analisadas por meio da figura 25, com valores máximos próximos a 15%.

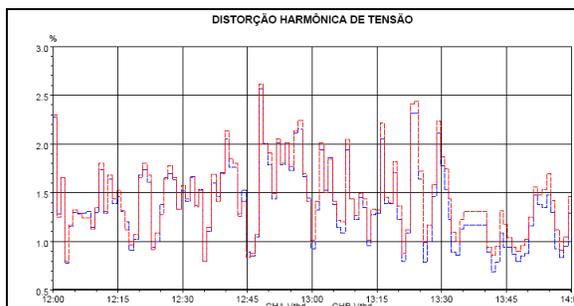


Figura 24 - Distorção harmônica de tensão

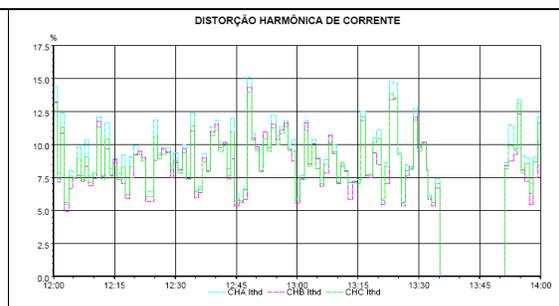


Figura 25 - Distorção harmônica de corrente

As correntes instantâneas após a energização do BC são apresentadas a seguir. O espectro harmônico da corrente do canal A é mostrado na figura 27, onde tem-se como harmônico preponderante o componente de 13º ordem. Observa-se que o valor da distorção total é de aproximadamente 12%, valor este superior a média encontrada durante todo o período do monitoramento.

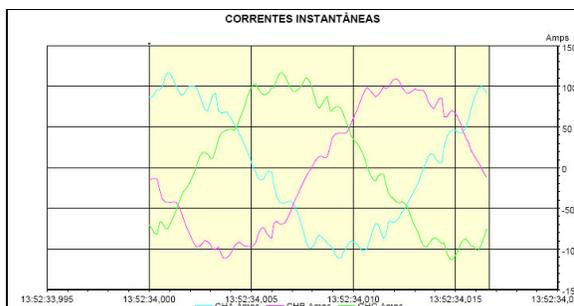


Figura 26 - Correntes instantâneas

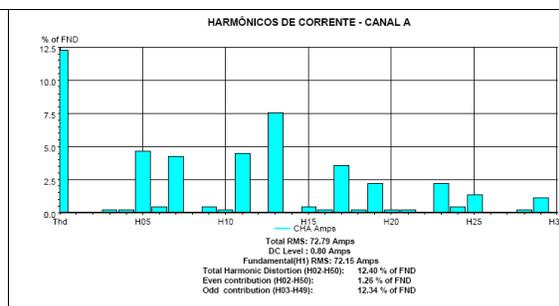


Figura 27 - Espectro harmônico de corrente

Tomando-se como base a condição do evento anterior, apresenta-se uma análise do possível impacto de harmônicos na operação do BC, conforme mostrado em seguida na tabela 8. Como resultado geral, tem-se que o banco de capacitores opera com desempenho adequado e próximo às condições nominais de especificação, sem maiores problemas ou solicitações inconvenientes devido à presença de harmônicos.

Salienta-se que não foram registradas quaisquer sobretensões ou características de ressonâncias durante todo o período de monitoramento. Na tabela 8 verificam-se as tensões, correntes e potência reativa de acordo com limites recomendados [4].

Tabela 8 - Análise do Impacto de Harmônicos em Bancos de Capacitores (IEEE Std.18/1980)

Dados do Banco de Capacitores	
Potência Nominal:	3000 kVAR
Tensão Nominal:	24000 V (L-L)
Tensão de Operação:	23370 V (L-L)
Potência de Operação:	2845 kVAR
Corrente Nominal Fundamental:	70 A
Frequência Fundamental:	60 Hz
Reatância Capacitiva:	192,000 $\Omega$

Distribuição da Tensões e Correntes Harmônicas no BC				
Ordem Harmônico	Frequência (Hz)	Tensão - Vh (% da Fund.)	Tensão - Vh (V)	Corrente - Ih (% da Fund.)
1	60	100,00	23364,0	100,00
3	180	0,12	28,0	0,22
5	300	0,94	219,7	4,70
7	420	0,56	130,9	4,30
11	660	0,44	102,8	4,50
13	780	0,56	130,9	7,60
17	1020	0,20	46,7	3,57
19	1140	0,12	28,0	2,22
21	1260	0,04	9,3	0,22
23	1380	0,06	14,0	2,22
25	1500	0,04	8,6	1,32

Distorção de Tensão (THD):	1,38 %
Tensão RMS do BC:	23364,64 V
Distorção de Corrente:	12,40 %
Corrente RMS do BC:	72,79 A

Limites do Banco de Capacitores			
	CALCULO	LIMITE	LIMITE OK
Tensão de Pico:	100,3%	120%	OK
Tensão RMS:	100,0%	110%	OK
Corrente RMS:	100,7%	180%	OK
kVAR:	100,7%	135%	OK

#### 4. Resultados de Simulações

O sistema foi modelado no programa de transitórios eletromagnéticos ATPDRAW para avaliação comparativa do sistema a partir dos dados de medições [5],[6]. Apresenta-se a seguir os principais resultados obtidos por simulação, incluindo tanto a análise no domínio do tempo como da frequência.

##### 4.1 Simulação no Domínio da Frequência

Realizou-se inicialmente a avaliação no domínio da frequência. A figura 28 mostra sob condições a vazio a impedância harmônica e respectivas frequências de ressonância do sistema, com um e dois transformadores. Os valores obtidos nas simulações (frequency scan) são compatíveis com os resultados da fórmula teórica. A figura 29 mostra a impedância harmônica considerando a condição de plena carga. Os resultados mostram frequências de ressonância características ao sistema. Neste caso em particular, os valores são próximos aos harmônicos de ordem par (6° e 8°), portanto, não-característicos, o que diminui a probabilidade de ressonâncias no referido sistema.

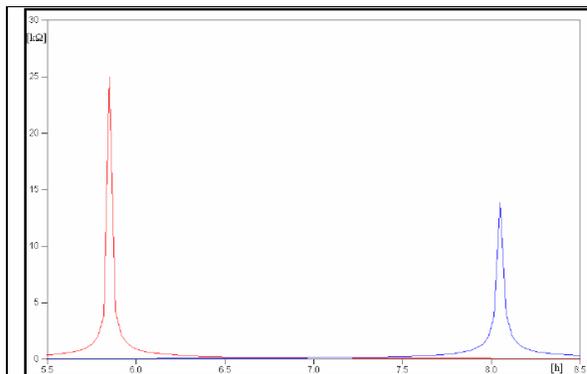


Figura 28 - Impedância harmônica a vazio

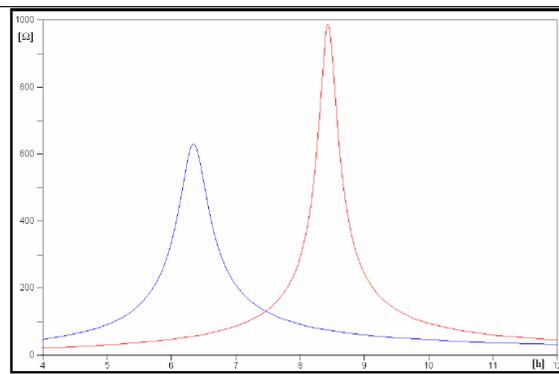


Figura 29 - Impedância harmônica sob plena carga

## 4.2 Transitórios de Chaveamento

Simulou-se a condição de chaveamento do banco de capacitores. Desconsiderando parcialmente o período de oscilação transitória e os respectivos valores máximos, em função da modelagem simplificada, tem-se um comportamento semelhante em termos comparativos entre os resultados das medições e simulações. Observa-se que durante o período em regime estável, antes e após a entrada do BC, as correntes possuem praticamente o mesmo comportamento, como mostram as figuras 30 e 31.

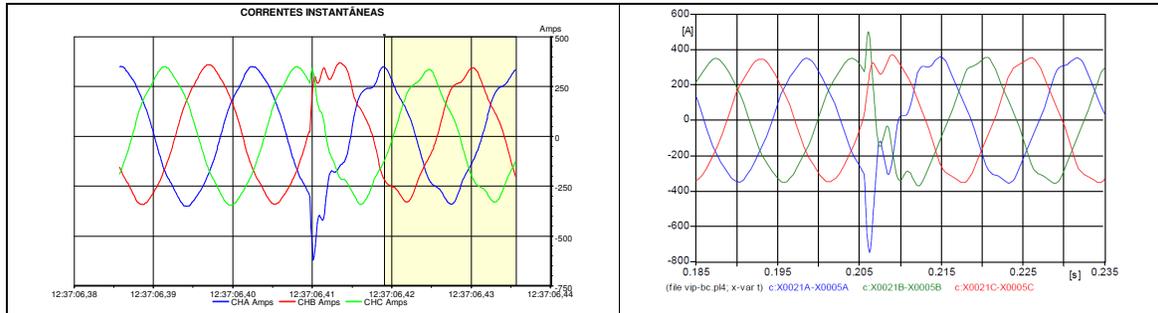


Figura 30 - Conexão do BC (medição)

Figura 31 - Conexão do BC (simulação)

## 4.3 Fluxo Harmônico

Para esta análise o sistema foi modelado considerando a injeção de fontes harmônicas de acordo com as componentes de corrente registradas nas medições sem a inserção do BC, observando-se resultados satisfatórios quanto ao fluxo harmônico, como pode ser verificado nas figuras comparativas das tensões e correntes. As figuras 32 e 33 mostram as correntes obtidas por medições e as resultantes da modelagem do sistema como fontes de correntes harmônicas. Da mesma forma, a figura 34 ilustra as formas de onda das tensões durante as medições e a figura 35, mostra o resultado da resposta da simulação do sistema, validando-se o estudo realizado com as simulações.

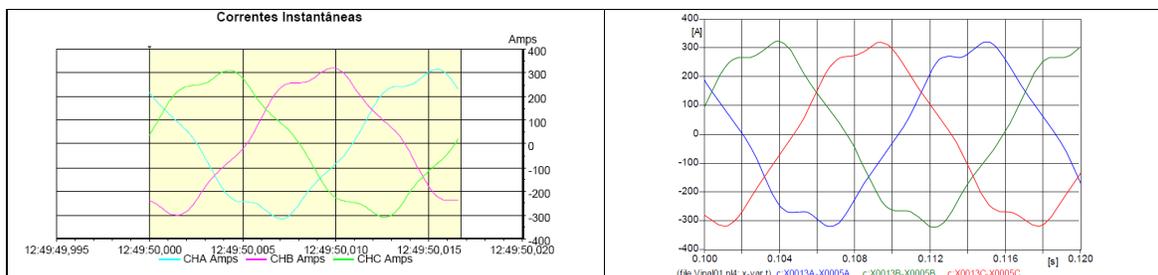


Figura 32 - Correntes instantâneas (medição)

Figura 33 - Correntes instantâneas (simulação)

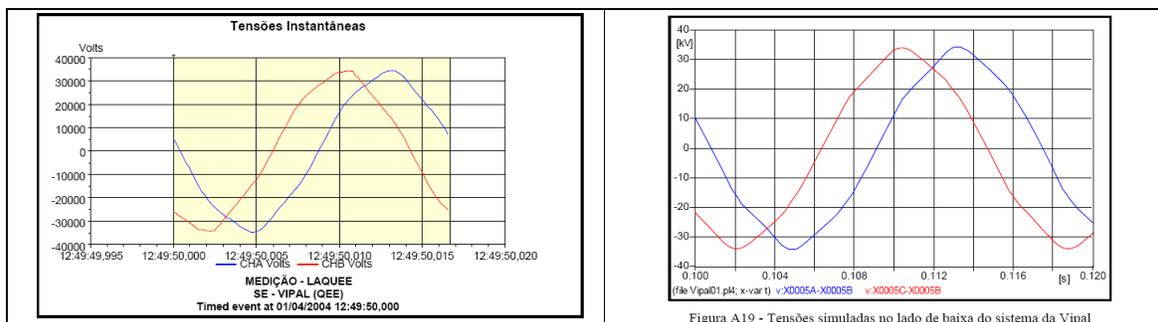


Figura 34 - Tensões instantâneas (medição)

Figura 35 - Tensões instantâneas (simulação)

## 4.4 Análise Comparativa das Distorções Harmônicas

De forma a ilustrar as respostas das simulações em comparação as medições, descreve-se a seguir a avaliação dos componentes harmônicos de tensão. A distorção harmônica total registrada nas medições foi de 3,64%, enquanto na simulação do referido caso, o valor obtido foi de 3,79%. Sendo assim, os resultados podem ser considerados satisfatórios, conforme mostra a figura 34.

Para esta condição foi também realizada a análise com a inclusão do segundo transformador. Como esperado, os harmônicos de baixa ordem tiveram seus valores reduzidos, porém, ocorreu um aumento dos componentes de ordens maiores. A distorção harmônica total do sistema com dois transformadores apresentou uma redução significativa em comparação à simulação do sistema sob a condição anterior com apenas um transformador, resultando em um valor final de distorção total de tensão de 1,48%.

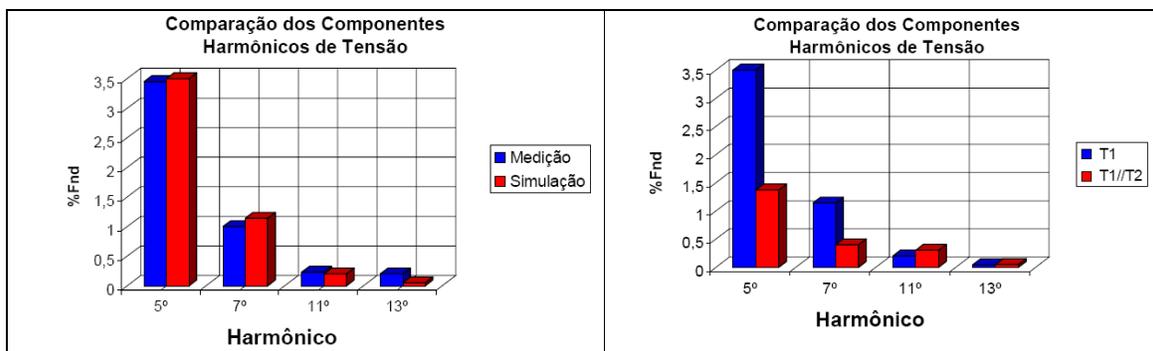


Figura 34 - Harmônicos de tensão sob condição normal de operação

Figura 35 - Harmônicos de tensão com e sem o paralelismo dos transformadores

## 5. Conclusões

Este trabalho apresentou uma avaliação da qualidade de energia durante monitoramento em um sistema industrial. Inicialmente, apresentou-se os resultados das medições sob condições normais de operação, estando o sistema em conformidade quanto ao aspecto de harmônicos, com valores de distorções de tensão e corrente inferiores aos adotados como referência. Foram também apresentados os resultados do monitoramento durante a realização de manobras no sistema, com a abertura e chaveamentos dos transformadores e banco de capacitores, descrevendo o perfil harmônico do sistema industrial. Nestas condições, as distorções aumentam quando da inserção do banco de capacitores em função da redução do nível de curto-circuito sem o paralelismo. Além da comparação detalhada com os valores prescritos na norma IEEE 519/1992, apresentou-se também a avaliação do impacto de harmônicos em transformadores e capacitores, com base em normas específicas para operação sob condições não-lineares. Apresentou-se também os resultados de simulações através da modelagem do sistema no programa de transitórios eletromagnéticos ATPDRAW, obtendo-se respostas com comportamentos semelhantes na comparação com as medições. Diante desta análise, pode-se concluir que o sistema se encontra em plena conformidade quanto à qualidade da energia sob o aspecto de harmônicos, especialmente na configuração normal de operação. Finalmente, ressalta-se que neste trabalho, objetivou-se adicionalmente, estabelecer procedimentos e diretrizes de análise, bem como considerações gerais sobre o estudo e impacto de harmônicos em sistemas elétricos.

## 6. Referências Bibliográficas

- [1] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Prodist Módulo 8: Qualidade da Energia, 2006.
- [2] IEEE Std. 519, *IEEE Recommended Practices and Requirements for Control in Electrical Power Systems*, 1992.
- [3] ANSI/IEEE C57.110, *IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*, 1986.
- [4] IEEE Std. 18, *IEEE Recommended Practice for Establishing Capacitor Capabilities When Supplied by Nonsinusoidal Voltages*, 1980.
- [5] EMTP/ATPDraw - Alternative Transients Program, versão 3.5, 2002.
- [6] N.C. de Jesus, "Relatório Técnico RT VIPAL - Monitoramento da Qualidade da Energia Elétrica - Análise de Harmônicos, SE VIPAL/Nova Prata, LAQUEE/UNIJUÍ, 2004.