



Caracterização das Distorções Harmônicas nas Redes de Distribuição de Baixa-Tensão da AES SUL

Eng. Daniel Sperb Porto
AES Sul - Planejamento e Engenharia
daniel.porto@aes.com

Msc. Nelson Clodoaldo de Jesus
AES Sul - Planejamento e Engenharia
nelson.jesus@aes.com

Msc. Lorenzo Comassetto
AES Sul - Planejamento e Engenharia
lorenzo.comassetto@aes.com

Est. Eduardo Beck Difante
AES Sul - Planejamento e Engenharia
eduardo.difante@aes.com

RESUMO

Este trabalho descreve uma avaliação dos níveis harmônicos presentes nas redes de distribuição de baixa tensão da AES Sul. Apresentam-se os principais limites recomendados e os resultados de monitoramento, a partir do qual modelou-se a rede de baixa tensão para simulação e análise do impacto dos harmônicos no sistema.

PALAVRAS-CHAVE

Distorções harmônicas, Monitoramento, Redes de Distribuição, Simulações.

1. INTRODUÇÃO

Tendo em vista a constante evolução tecnológica e a aplicação de cargas não-lineares em circuitos de distribuição de baixa tensão, tais como lâmpadas de descarga e equipamentos portadores de fontes chaveadas, passa a interessar a análise do comportamento destas cargas uma vez que os estudos destes impactos são normalmente direcionados a consumidores atendidos em redes de distribuição de média tensão.

Diversos são os efeitos e problemas causados pelas distorções harmônicas, como aquecimento de máquinas rotativas, sobreaquecimento ou falhas em bancos de capacitores (ressonância), interferências em sistemas de controle e proteção, desvios no registro de consumo dos medidores de energia elétrica entre outros. O levantamento do perfil harmônico em sistema elétricos torna-se cada vez mais necessário em função dos aspectos citados anteriormente. Neste trabalho, analisa-se o comportamento dos harmônicos de acordo com o perfil dos clientes que contribuem com este fenômeno. Os resultados das medições são comparados aos valores de referência a título de verificação da conformidade da onda de tensão conjuntamente com os obtidos por meio de simulação.

2. DISTORÇÕES HARMÔNICAS

As distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes. Deste modo, o registro da distorção harmônica total indica o desvio da onda em relação ao padrão senoidal ideal, por meio da composição das distorções harmônicas individuais^{1,8}. Este valor normalmente é referenciado ao valor da componente fundamental. As expressões para o cálculo das grandezas de distorção harmônica total e individual da tensão são apresentadas como se segue. De maneira análoga, pode-se determinar as distorções de corrente usando as mesmas relações.

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

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

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

3. LIMITES RECOMENDADOS

Os padrões de distribuição (ProDist)¹ estão em fase final de elaboração para encaminhamento a audiência pública, tratando da qualidade de energia no que tange ao serviço e produto. Sob o aspecto de distorção harmônica, os valores globais de referência que estão sendo recomendados (minuta do procedimento) são mostrados a seguir.

Tabela 1 - Valores de Referência Globais das Distorções Harmônicas Totais (Em Porcentagem da Tensão Fundamental)

<i>Tensão nominal do Barramento</i>	<i>Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]</i>
$V_N \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	8
$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_N \leq 138 \text{ kV}$	3

Segundo o mesmo procedimento, devem ser obedecidos também os valores das distorções harmônicas individuais¹, conforme indicado na tabela 2.

Tabela 2 - Níveis de Referência para Distorções Harmônicas Individuais de Tensão (Em Porcentagem da Tensão Fundamental)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1$ kV	1 kV < $V_n \leq 13.8$ kV	13.8 kV < $V_n \leq 69$ kV	69 kV < $V_n \leq 230$ kV	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7.5	6	4.5	2.5
	7	6.5	5	4	2
	11	4.5	3.5	3	1.5
	13	4	3	2.5	1.5
	17	2.5	2	1.5	1
	19	2	1.5	1.5	1
	23	2	1.5	1.5	1
	25	2	1.5	1.5	1
	>25	1.5	1	1	0.5
Ímpares múltiplas de 3	3	6.5	5	4	2
	9	2	1.5	1.5	1
	15	1	0.5	0.5	0.5
	21	1	0.5	0.5	0.5
	>21	1	0.5	0.5	0.5
Pares	2	2.5	2	1.5	1
	4	1.5	1	1	0.5
	6	1	0.5	0.5	0.5
	8	1	0.5	0.5	0.5
	10	1	0.5	0.5	0.5
	12	1	0.5	0.5	0.5
	>12	1	0.5	0.5	0.5

Observa-se que em relação aos limites internacionais, os valores que estão sendo propostos são ligeiramente superiores. Como exemplo, no documento atual do Prodist, a distorção limite para a baixa-tensão é de 10%, superiores aos valores de 5% e 8%, respectivamente indicados nas normas do IEEE e IEC^{2,3,4}. Por outro lado, não se tem referência sobre limites de distorção de corrente, o que induz a considerar que para limitação das tensões harmônicas, as concessionárias devem verificar as características e influência dos harmônicos, acompanhando a injeção e penetração das correntes, bem como a evolução dos harmônicos em seu sistema, na solução de alternativas para a manutenção da compatibilidade da operação.

4. RESULTADOS DE MONITORAMENTO

Este item apresenta uma avaliação dos resultados obtidos durante monitoramentos em períodos semanais de circuitos de baixa tensão na região metropolitana do Estado do Rio Grande do Sul, sendo referenciada a classe de clientes residenciais, predominante nos circuitos onde foram realizadas as medições⁶. Deste modo, analisa-se a qualidade da tensão entregue pela concessionária aos clientes conectados ao sistema. As medições foram realizadas na cidade de Canoas/RS, área de concessão da AES Sul. Os circuitos possuem em comum, características construtivas similares com mesma potência de transformação e mesmo tipo de barramento secundário, sendo estes de 45kVA e condutores de 1/0 e 2 CA, respectivamente, para a fase e neutro.

A figura 1 mostra o comportamento das tensões eficazes nos terminais do transformador, onde pode-se verificar valores adequados em termos da conformidade da tensão. Os valores médios ficaram próximos a 130 V, ou seja, 1,02 pu da tensão base. A figura 2 mostra as distorções harmônicas observadas, com valores inferiores aos que estão sendo recomendados para a referida classe de tensão.

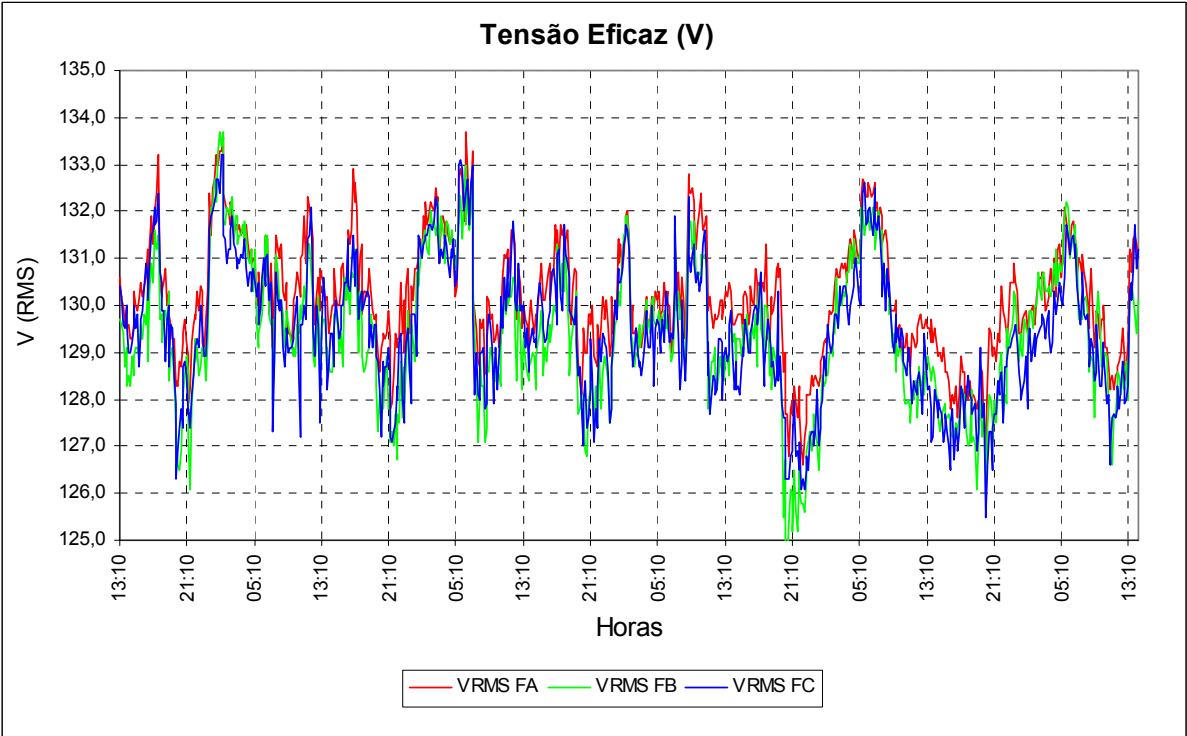


Figura 1 - Comportamento das tensões eficazes

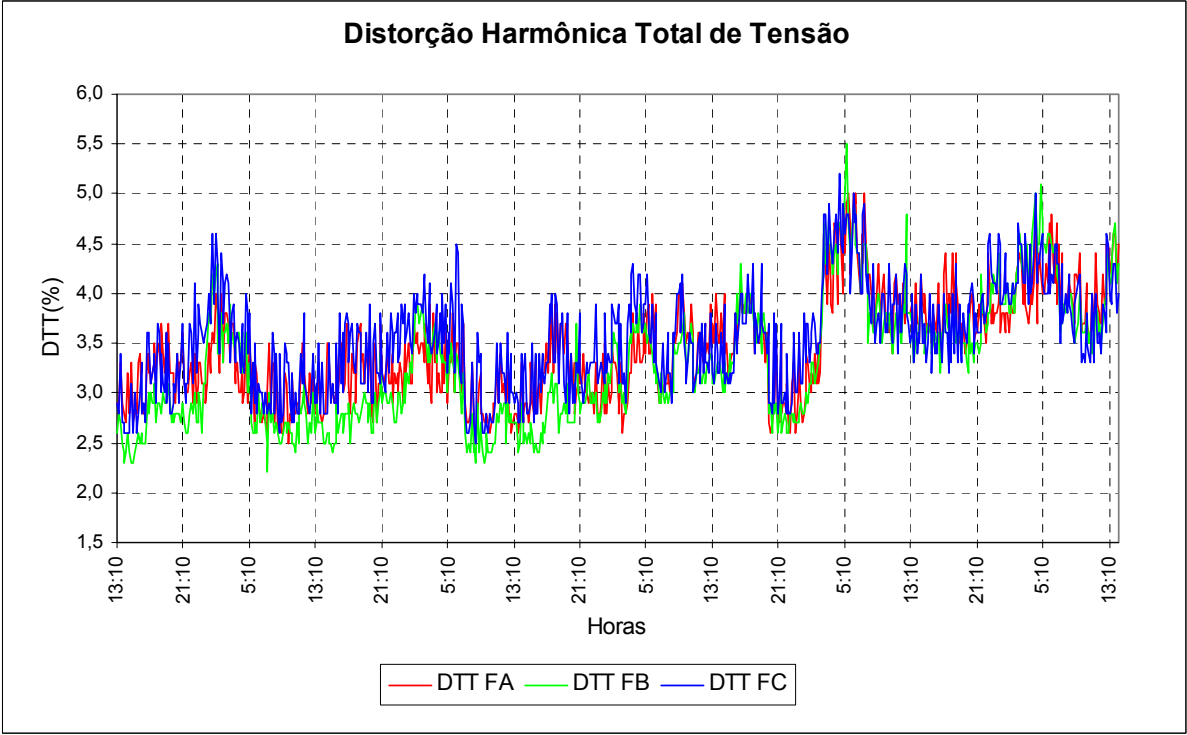


Figura 2 - Comportamento das distorções totais de tensão

Da mesma forma, tem-se o comportamento das correntes, como mostra a figura 3. Salienta-se que principalmente se tratando das distorções de corrente é fundamental associar as distorções aos valores absolutos, pois o impacto das distorções depende do valor real que circula nas impedâncias do sistema elétrico.

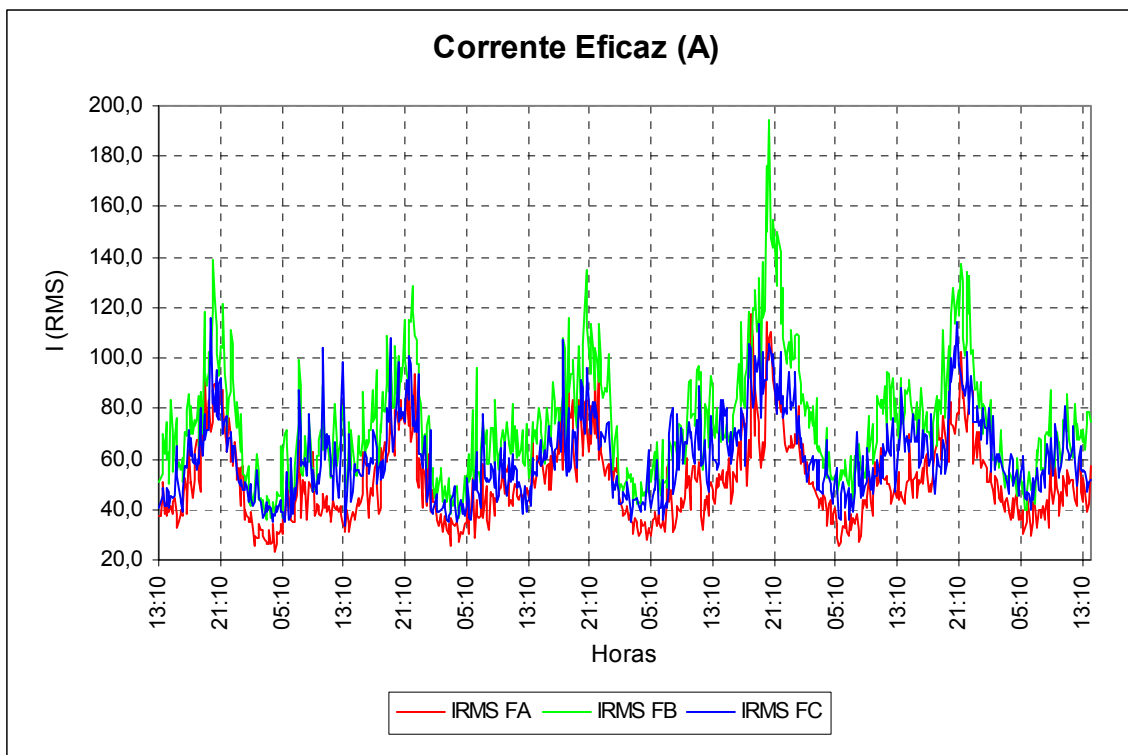


Figura 3 - Comportamento das correntes eficazes

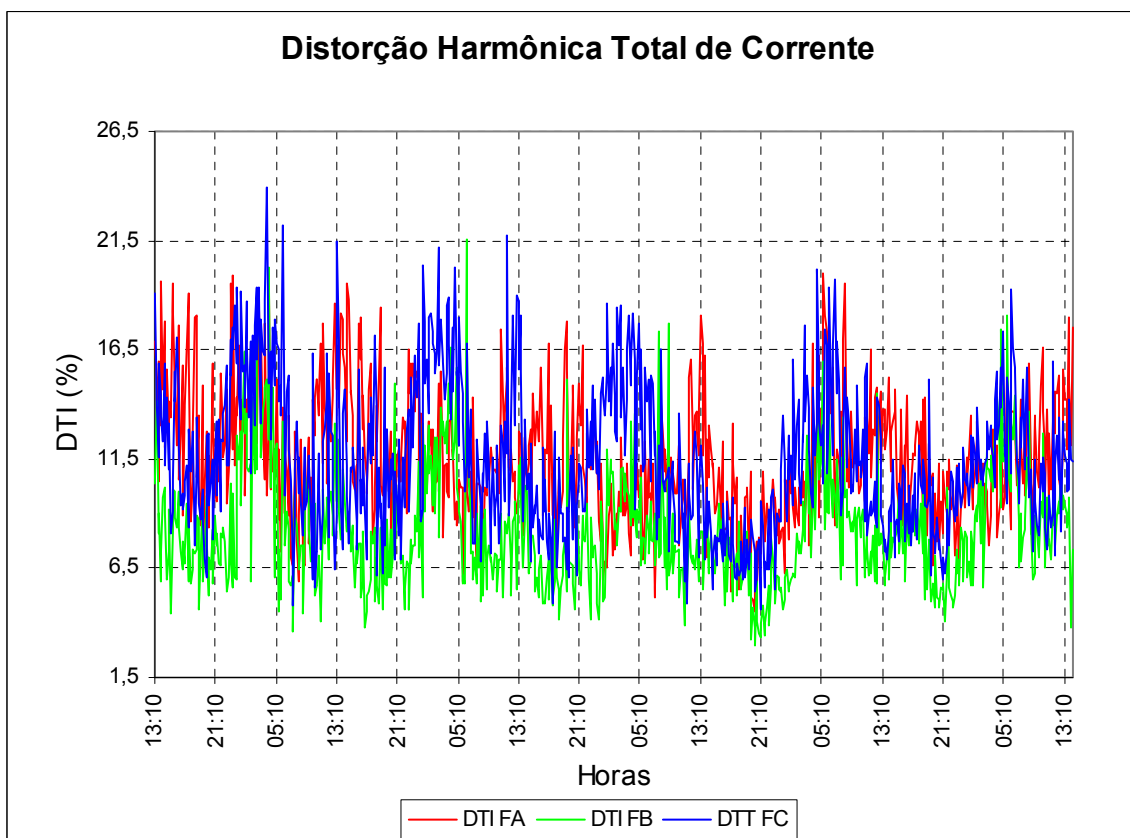


Figura 4 - Comportamento das distorções totais de corrente

As figuras a seguir mostram as contribuições dos principais harmônicos individuais, onde verifica-se que os componentes preponderantes são os de quinta ordem e terceira ordem, respectivamente, para as tensões e correntes harmônicas. Obviamente, este comportamento é variável em função das condições do sistema, tanto em termos das tensões impostas como das correntes equivalentes em função do carregamento do circuito. Os respectivos dados foram tomados como base para a modelagem e simulação do sistema, conforme se apresenta no item 5.

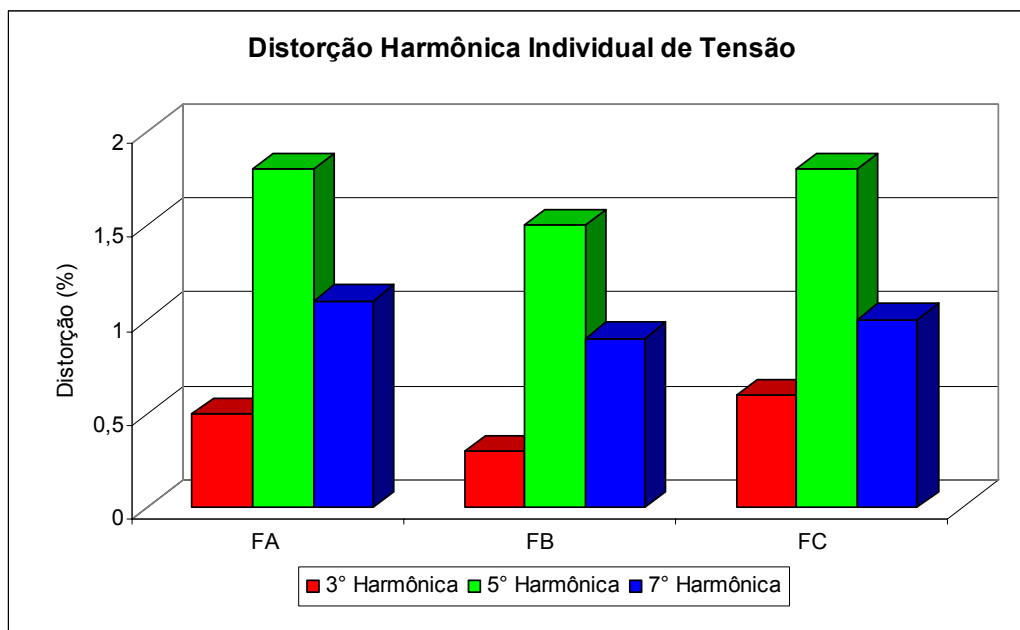


Figura 5 - Comportamento das distorções individuais de tensão

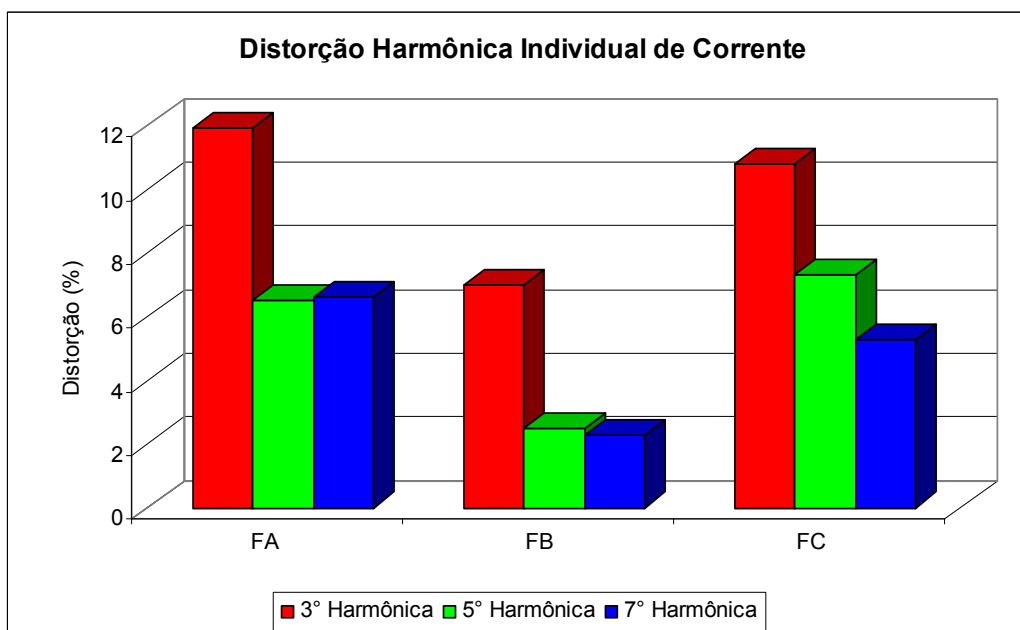


Figura 6 - Comportamento das distorções individuais de corrente

Para uma melhor caracterização dos desvios em relação ao padrão ideal, deve-se analisar os dados de modo estatístico. A figura 5 mostra o resultado geral da distorção harmônica total das tensões, agregando-se as três fases durante o período das medições. Neste período, os valores de tensão permaneceram dentro de padrões considerados como adequados. Em seguida, os mesmos resultados serão utilizados pra análise comparativa com outros circuitos semelhantes. Da análise das figuras 7 e 8 para este circuito específico, as distorções de corrente se apresentam mais uniformemente distribuídas, apesar da maior faixa de variação.

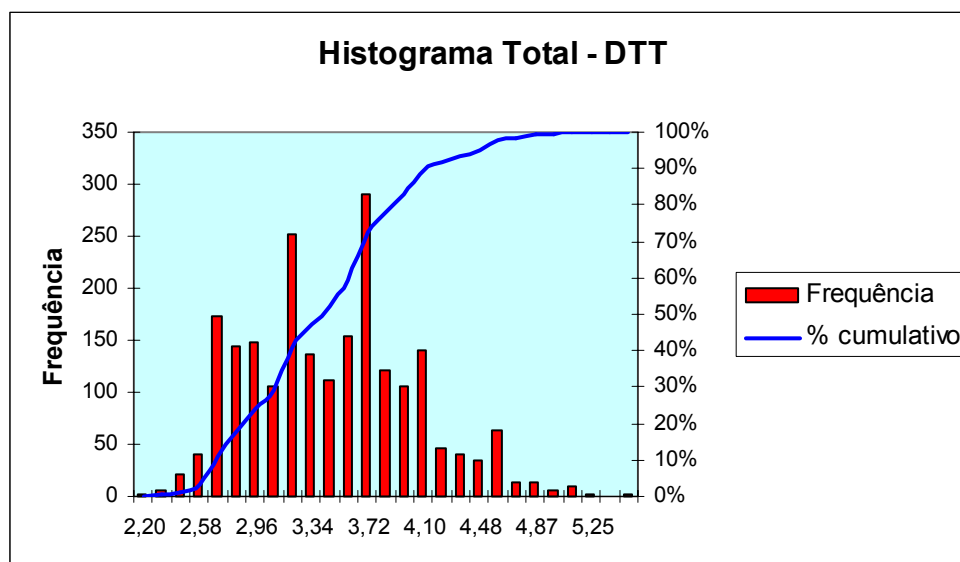


Figura 7 - Histograma das distorções totais de tensão

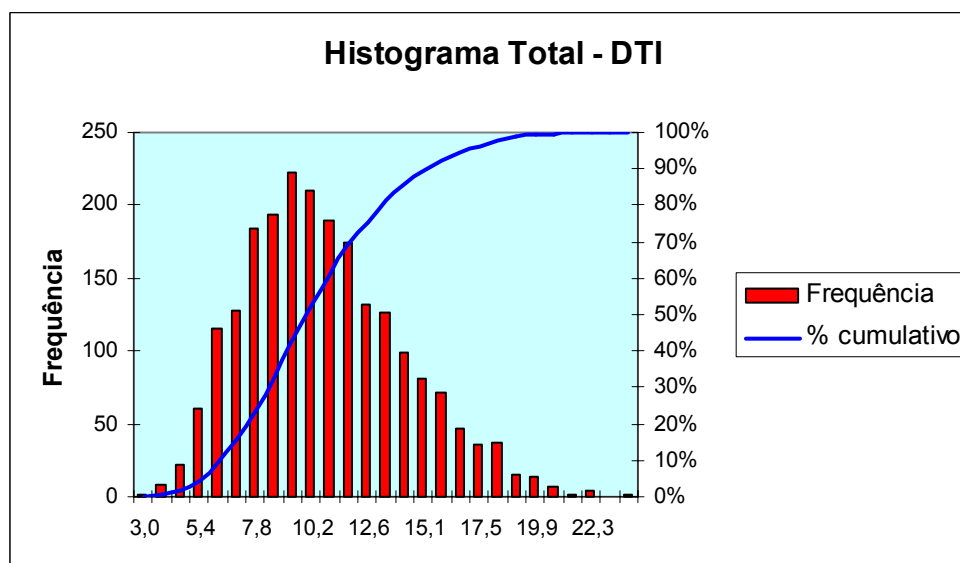


Figura 8 - Histograma das distorções totais de corrente

4.1 Análise Comparativa de Circuitos de BT

No sistema analisado, não foram verificadas excessivas distorções de tensão. Aliás, o circuito detalhado anteriormente, foi o que apresentou as maiores distorções. De modo, a comparar as distorções de tensão e corrente nos circuitos com características similares, adotou-se o valor de probabilidade de 95%, como mostra a tabela 3. Conclui-se que mesmo sob distorções elevadas de corrente, as tensões permaneceram dentro de valores considerados satisfatórios e sem efeitos significativos a operação dos equipamentos e cargas conectadas ao sistema.

Tabela 3 - Comparação das Distorções Harmônicas em Circuitos BT

Circuito BT	DTT ₉₅ %	DTI ₉₅ %
CAN 1751	4,48	16,7
CAN 371	4,21	38,3
CAN 739	4,12	13,5
CAN 1359	3,87	12,9
CAN 1037	3,86	26,9
CAN 1027	3,58	16,1
CAN 1036	3,20	13,22

5. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

No intuito de obter-se um modelo aproximado do comportamento das cargas e as distorções que estas promovem, serão apresentados os resultados de simulações do sistema de distribuição em baixa tensão utilizando-se o software EMTP/ATP (Alternative Transients Program) em sua versão atual, denominado ATPDRAW^{7,8}. A partir do levantamento de cargas típicas, através de vistorias em unidades consumidoras e principalmente dos resultados de monitoramento, avalia-se o desempenho do sistema em termos de harmônicos. Para tanto, tem-se na figura 9, o circuito básico utilizado na modelagem do sistema.

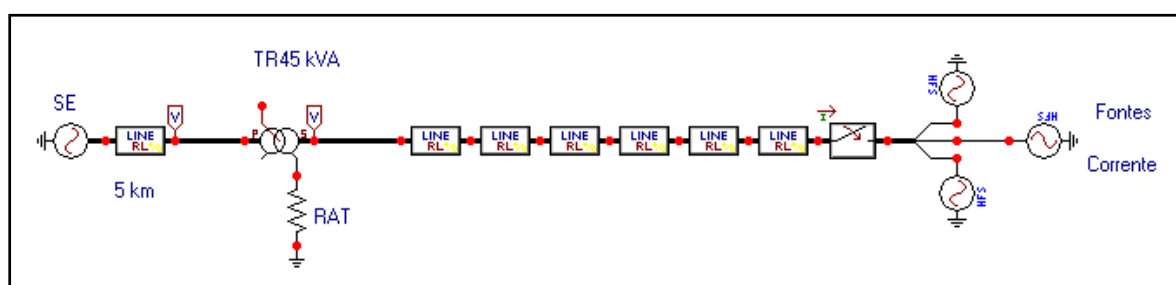


Figura 9 - Modelagem do sistema para análise de fluxo harmônico

A avaliação do sistema no que tange a influência de harmônicos é realizada tomando como base as correntes medidas, com o objetivo inicial de verificação do comportamento da distorção harmônica de tensão em termos de conformidade. A título de exemplo analisa o circuito CAN 1751 sob o mesmo carregamento e distorção das figuras anteriores, devido à penetração e propagação de harmônicos. Cabe ressaltar que somente em função das correntes injetadas no sistema de baixa tensão, os resultados foram distintos e inferiores em termos das distorções de tensão, pois os principais harmônicos individuais para as correntes referem-se principalmente aos componentes de 3º, 7º e 5º ordem, enquanto que o principal componente individual da tensão é o de 5º ordem. Para obtenção de resultados coerentes foi preciso um ajuste em função da existência do harmônico de tensão no lado de média tensão, considerado em ambos os casos para ajuste da simulação em consonância com os resultados obtidos em campo.

Isto foi necessário em função do comportamento real do circuito, já que além da propagação pelas impedâncias harmônicas do sistema em baixa tensão, ocorre a forte influência do quinto harmônico, tipicamente encontrado nos sistemas elétricos atuais em todos os níveis de tensão.

Este caso representa a simulação tomando como base um instante de carregamento próximo ao horário de ponta (24/12/04 às 18:10), considerando as respectivas correntes trifásicas obtidas na medição. Adotou-se um componente de quinto harmônico do sistema para este caso em torno de 2%.

A figura 10 ilustra as correntes injetadas, considerando a fundamental e os harmônicos de 3°, 5°, 7° e 11° ordem, junto ao respectivo desequilíbrio natural do circuito. A figura 11 mostra as tensões nos terminais do transformador, a qual serve como base e referência para comparação aos resultados das medições em campo.

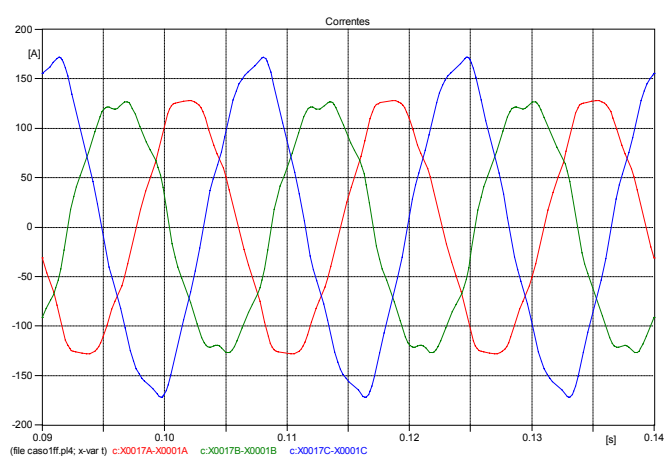


Figura 10 - Correntes injetadas no sistema de baixa-tensão

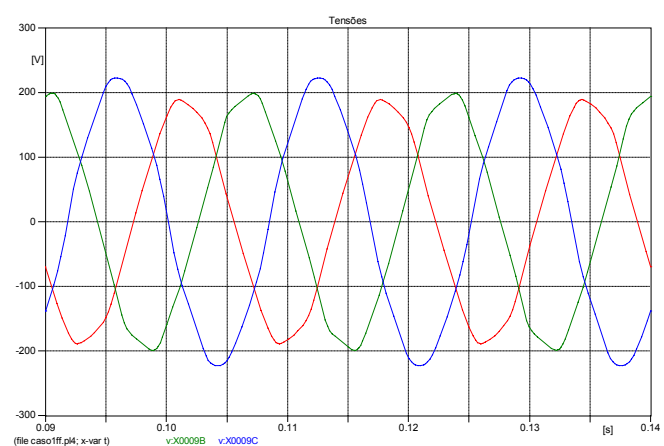


Figura 11 - Tensões resultantes nos terminais do transformador

A figura 12 ilustra o comportamento das tensões no ponto de fornecimento e no trecho final do sistema. A máxima distorção observada (DHT) foi de 3,2% em comparação a 3,4% relacionada às medições.

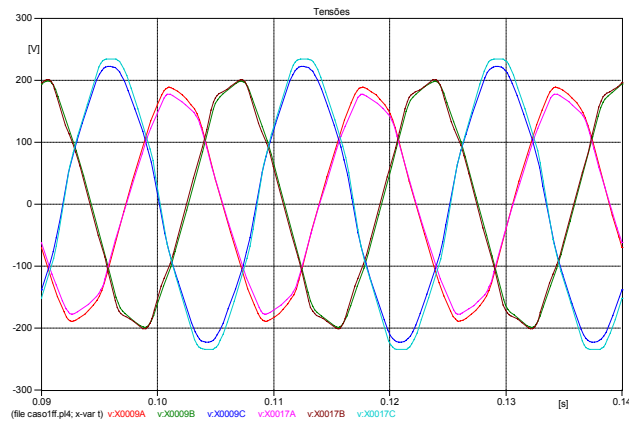


Figura 12 - Comparação das tensões no início e fim da rede de baixa-tensão

As figuras 13 e 14 mostram, respectivamente, os valores absolutos dos principais componentes harmônicos na rede de baixa tensão obtidos a partir da modelagem e simulação do sistema.

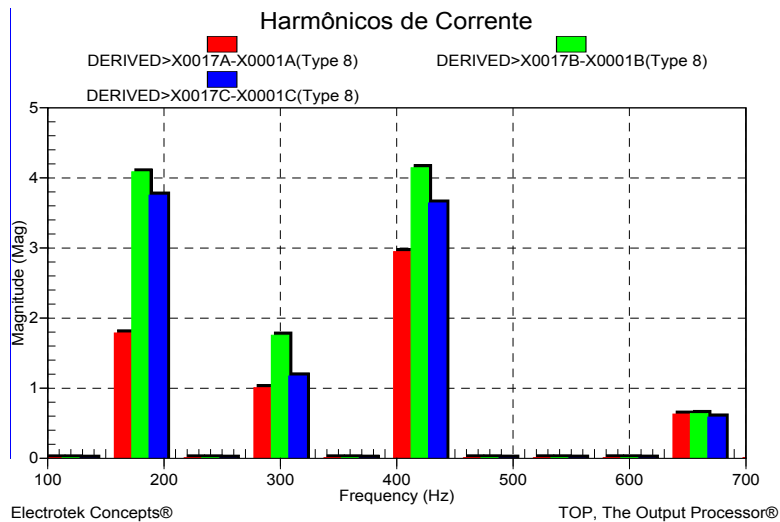


Figura 13 - Harmônicos individuais de tensão no transformador

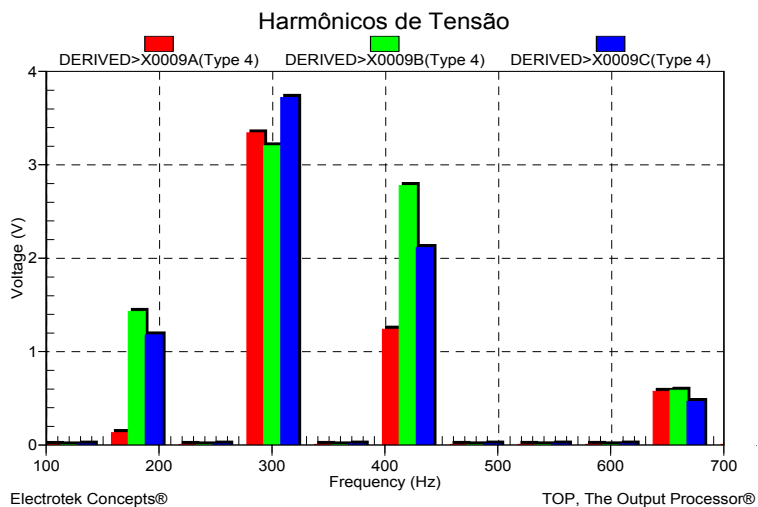


Figura 14 - Harmônicos individuais das correntes

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho mostra-se interessante do ponto de vista da concessionária de energia, uma vez que é permitida a avaliação do comportamento das cargas atendidas em baixa tensão, tratando-se de um estudo pouco explorado. Uma das principais vantagens desta abordagem é a possibilidade de estendê-la para diversos seguimentos de classes de consumidores, o que o torna extremamente atrativo pela capacidade de informações que podem ser geradas. As análises deste tipo vêm ao encontro dos requisitos que estai sendo propostos em nível nacional, já com dados referencias de distorções harmônicas aceitáveis para as redes de média e baixa tensão. Ao analisarmos as distorções apresentadas, podemos considerar que as harmônicas de tensão são relativamente aceitáveis do ponto de vista dos limites da IEEE 519³, estando na ordem de 2%. Já para o caso de adotar-se os padrões propostos em nível nacional, à diferença é ainda maior. Entretanto, estes resultados não significam despreocupação, pois em algumas medições se detectou valores significativos, mesmo refletindo as redes de média tensão da AES Sul. Em compensação, as distorções harmônicas de corrente mostraram níveis significativos nos casos analisados. A primeira validação realizada foi a da comparação dos dados obtidos pelas medições em relação às simulações, as quais responderam de forma clara e singular ao modelo imposto no estudo. Pode-se também através deste estudo, buscar soluções práticas para minimizar os impactos causados por estas distorções, como a aplicação de filtros na baixa tensão⁵ e análise do efeito dos harmônicos sobre o condutor neutro.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. Módulo 8 - Qualidade da Energia, março/2006.

2 DIAS, A.D. Guilherme. *Harmônicas em Sistemas Industriais*, EDIPUCRS, 2002.

3 IEEE Std 519. *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, New York, NY 10017, USA, abril/1993.

4 PROCOBRE - Instituto Brasileiro do Cobre. *Harmônicas nas Instalações – Causas, Efeitos e Soluções*. São Paulo, novembro/2001.

5 JÚNIOR, R.M.José. *Análise da Aplicação de Filtros Harmônicos Passivos em Circuitos Secundários de Distribuição*, II CITENEL, Salvador//BA, outubro/2003.

6 MANUAL IMS. Versão 2.07. Smart Analizador T - em CD e em Meio Impresso.

7 MANUAL EMTP/ATPDraw - Alternative Transients Program, versão 3.5, agosto/2002

8 JESUS, C. Nelson. Jesus, RELATÓRIO TÉCNICO RT VIPAL - *Monitoramento da Qualidade da Energia Elétrica - Análise de Harmônicos - SE VIPAL /NOVA PRATA*. LAQUEE-UNIJUÍ. Ijuí/RS, abril/2004.