

Levantamento do Perfil Harmônico em Redes Secundárias de Distribuição

D.S. Porto, N.C. de Jesus
AES Sul - Distribuidora Gaúcha de Energia S/A

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, Simulações, Redes de Distribuição.

I. INTRODUÇÃO

EM função da constante evolução tecnológica e 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.

II. 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], [2].

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.

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

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

Sendo:

DIT_h% - Distorção harmônica individual de tensão de ordem h

V_h - Tensão harmônica de ordem h

V₁ - Tensão fundamental

DTT - Distorção harmônica total de tensão

h - Ordem harmônica

III. LIMITES RECOMENDADOS

Os procedimentos 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 I
VALORES DE REFERÊNCIA GLOBAIS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS TOTAIS
(EM PORCENTAGEM DA TENSÃO FUNDAMENTAL)

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
VN ≤ 1 kV	10
1 kV < VN ≤ 13,8 kV	8
13,8 kV < VN ≤ 69 kV	6
69 kV < VN ≤ 138 kV	3

D. S. Porto, Superintendência de Planejamento e Engenharia, AES Sul - Distribuidora Gaúcha de Energia S/A, Rua Presidente Roosevelt, 68, São Leopoldo/RS, CEP: 93010-060, Brasil (e-mail: daniel.porto@aes.com).

N.C. de Jesus, Superintendência de Planejamento e Engenharia, AES Sul - Distribuidora Gaúcha de Energia S/A, Rua Presidente Roosevelt, 68, São Leopoldo/RS, CEP: 93010-060, Brasil (e-mail: nelson.jesus@aes.com).

Segundo o mesmo procedimento, devem ser obedecidos também os valores das distorções harmônicas individuais [1], conforme indicado na tabela II.

TABELA II
NÍVEIS DE REFERÊNCIA PARA DISTORÇÕES HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE TENSÃO (EM PORCENTAGEM DA TENSÃO FUNDAMENTAL)

Ordem Harmonica	Distorção Harmônica de Tensão(%)				
	$V_N \leq kV$	$1kV < V_N \leq 13,8kV$	$13,8kV < V_N \leq 69kV$	$69kV < V_N \leq 230kV$	
Ímpares não múltiplos 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
Ímpares múltiplos de 3	>25	1,5	1	1	0,5
	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
Pares	>21	1	0,5	0,5	0,5
	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%, superior ao valor de 5% e 8%, indicados respectivamente nas normas do IEEE e IEC [3], [4], [5]. 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.

IV. 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 medições [6]. 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, com potência nominal de 45kVA e condutores do tipo 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.

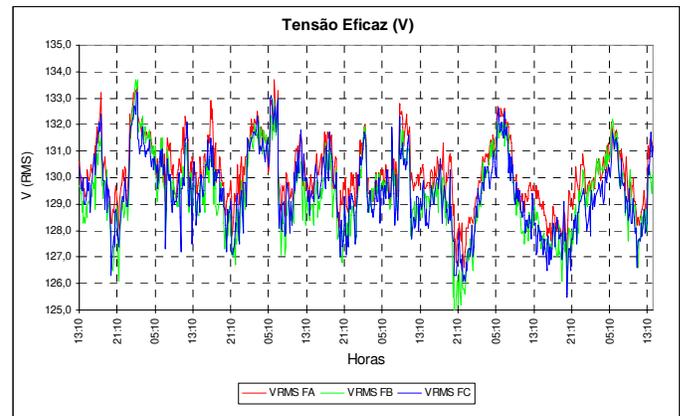


Fig. 1. Comportamento das tensões eficazes

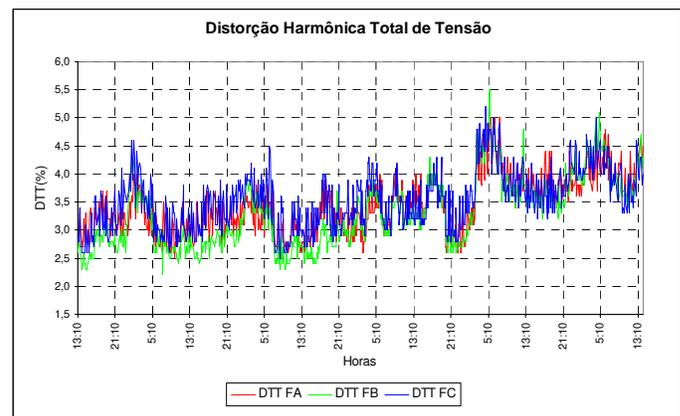


Fig. 2. Comportamento da distorção harmônica total de tensão

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.

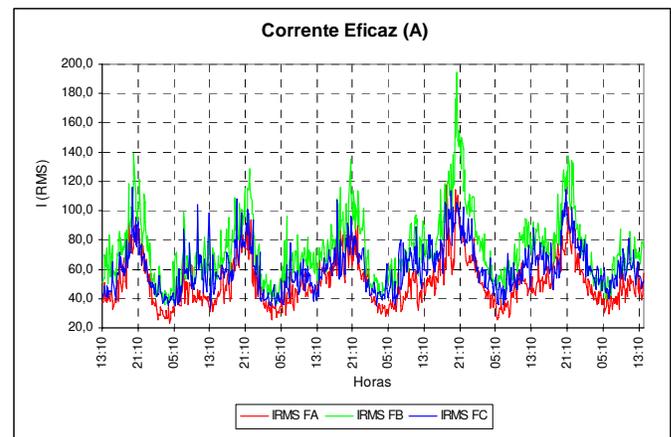


Fig. 3. Comportamento das correntes eficazes

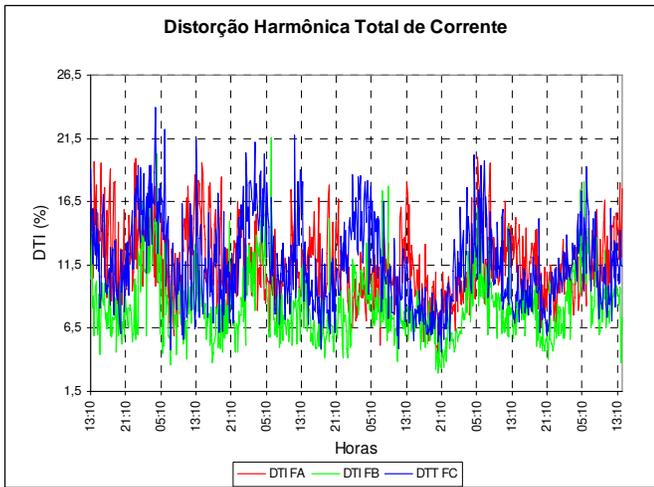


Fig. 4. Comportamento da distorção harmônica total de corrente

As figuras a seguir mostram as contribuições dos principais harmônicos individuais, onde verifica-se que os componentes preponderantes são os de quinta 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 V. 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.

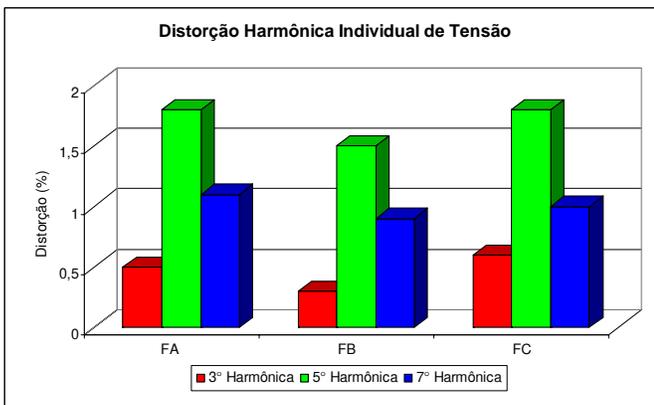


Fig. 5. Comportamento da distorção individual de tensão

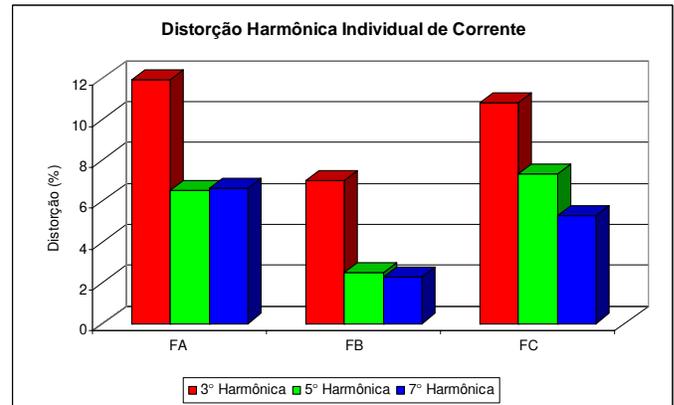


Fig. 6. Comportamento da distorção individual de corrente

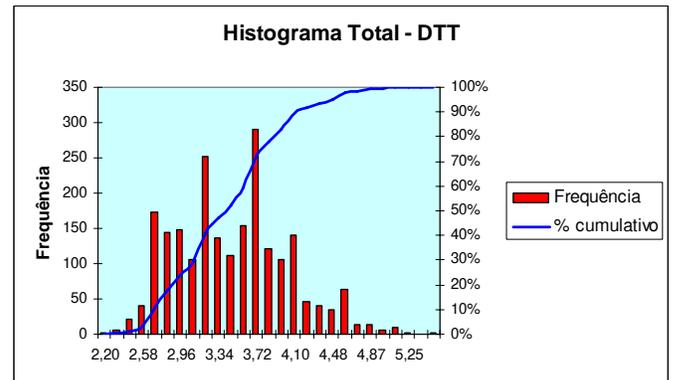


Fig. 7. Histograma da distorção total de tensão

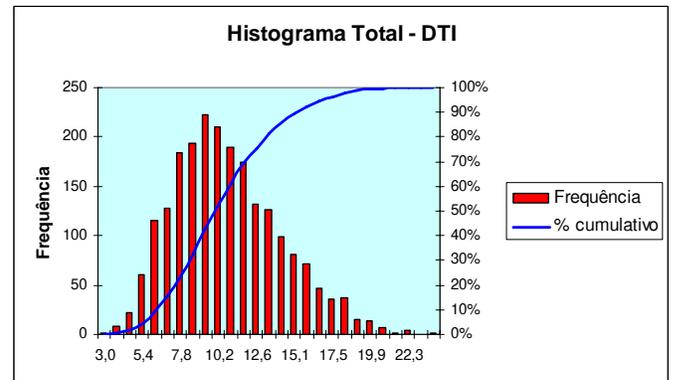


Fig. 8. Histograma da distorção total de corrente

A 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 III. 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 III
COMPARAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM CIRCUITOS BT

Circuito BT	DTT95%	DTI95%
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

V. 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], [2]. 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.

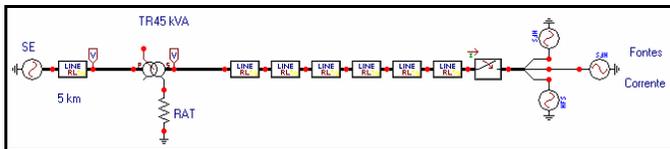


Fig. 9. Modelagem do sistema para análise de fluxo harmônico

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 3°, 7° e 5° ordem, enquanto que o principal componente individual da tensão é o de 5° 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.

A. CASO 1 - Máximo Carregamento

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.

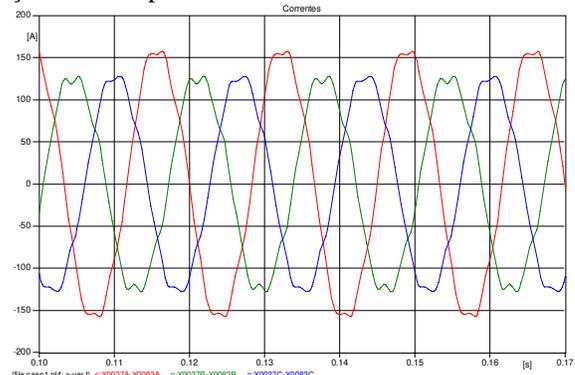


Fig. 10. Correntes injetadas no sistema de baixa-tensão

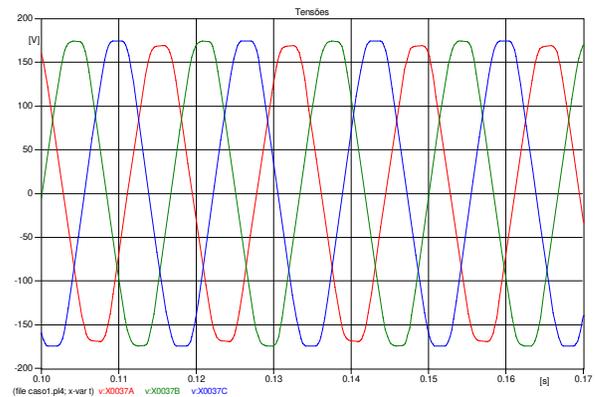


Fig. 11. Tensões resultantes nos terminais do transformador

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.

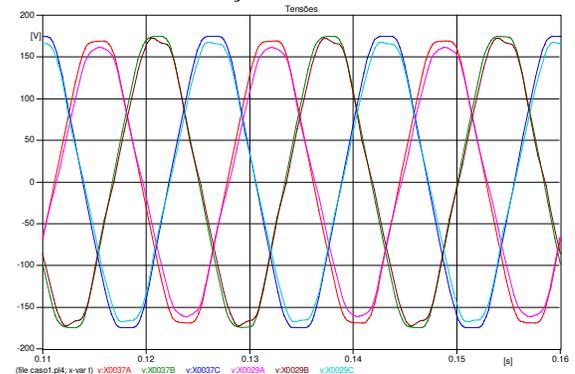


Fig. 12. Comparação das tensões no início e fim da rede de baixa-tensão

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.

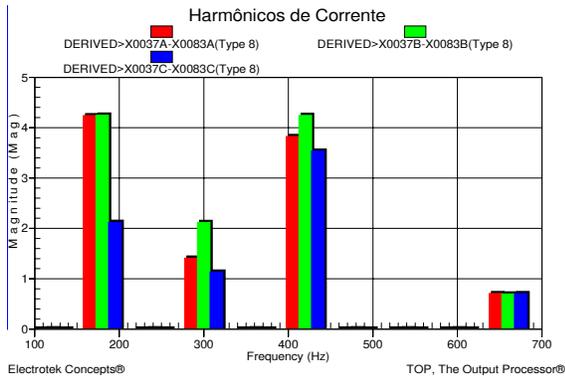


Fig. 13. Harmônicos individuais das correntes

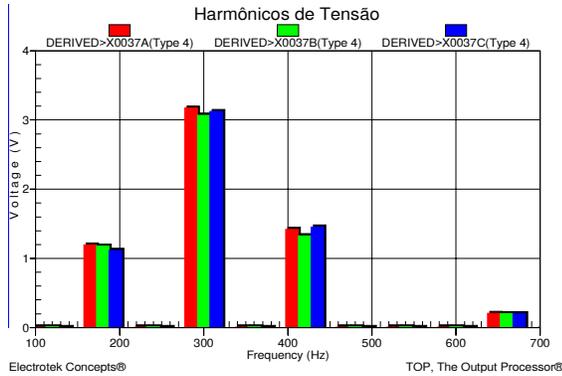


Fig. 14. Harmônicos individuais de tensão no transformador

A figura 15 mostra o comportamento da corrente de neutro, enquanto a figura 16 ilustra o espectro harmônico, incluindo também o valor da componente fundamental. Como esperado, há predominância dos harmônicos de seqüência zero, especialmente o terceiro harmônico, resultante dos efeitos conjuntos entre o desequilíbrio e os respectivos harmônicos equivalentes.

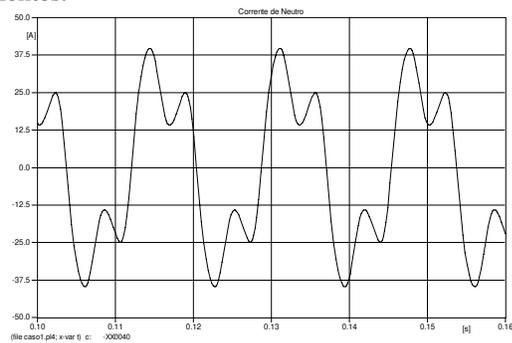


Fig. 15. Corrente de neutro

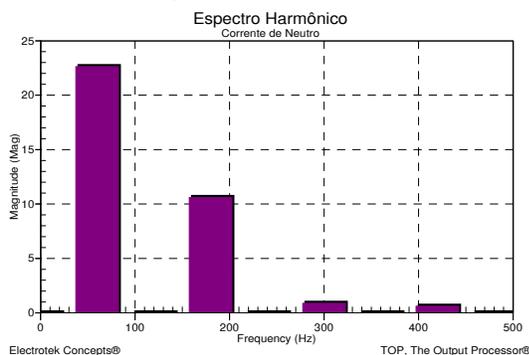


Fig. 16. Espectro harmônico da corrente de neutro

B. CASO 2 - Máxima Distorção Harmônica de Tensão

Utilizando a mesma metodologia foi realizada a simulação adicional para o instante de máxima distorção da tensão, com valor de 5,5% registrado na fase B, durante o horário de carga leve (25/12 às 05:20 hs). As correntes injetadas neste caso são mostradas na figura 17. Apesar da maior distorção relativa, os valores absolutos são menores, em comparação ao caso anterior. Neste caso, foram considerados alguns harmônicos pares não característicos, em função dos resultados relativos as medições. A figura 18 mostra as tensões resultantes nos bornes do transformador em comparação relativa com o final do circuito BT.

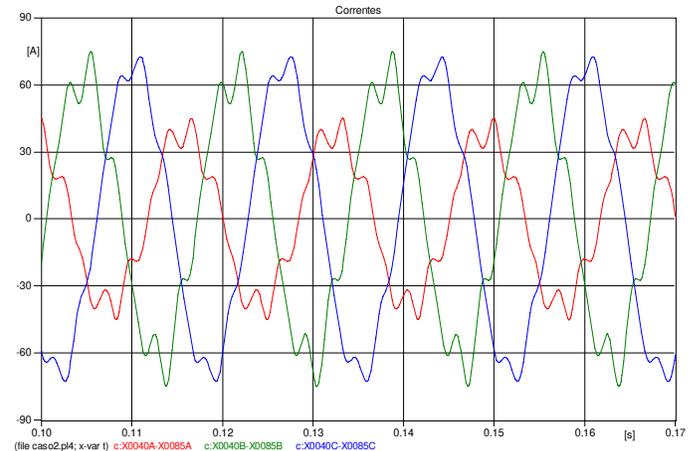


Fig. 17. Correntes injetadas no sistema de baixa-tensão

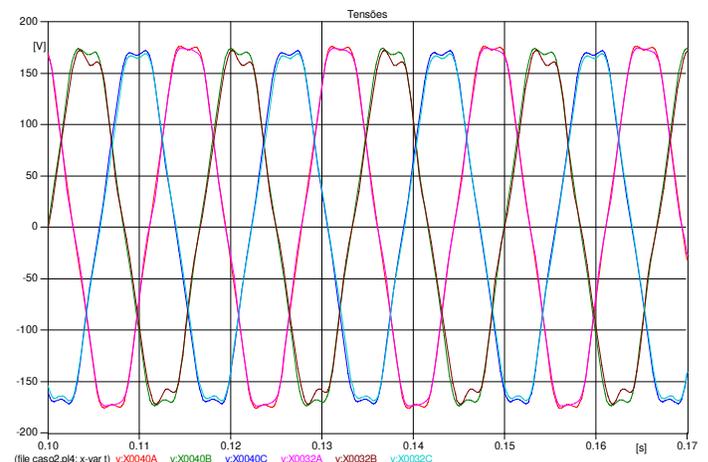


Fig. 18. Comparação das tensões no início e fim da rede de baixa-tensão

A figura 19 mostra o resultado dos principais harmônicos individuais das correntes trifásicas, sendo a fase B a mais significativa. Salienta-se que neste caso específico foi adotado um valor de 4,5% de distorção considerando o lado de média tensão quanto ao harmônico típico de quinta ordem. As tensões harmônicas individuais podem ser verificadas na figura 20, sendo que diferentemente do caso anterior, onde os harmônicos de 3º e 7º ordem eram superiores ao de 5º ordem, neste caso, o componente preponderante tanto para a corrente como para as tensões, refere-se ao harmônico de 5º ordem, assim como indicado também pelos resultados das medições equivalentes.

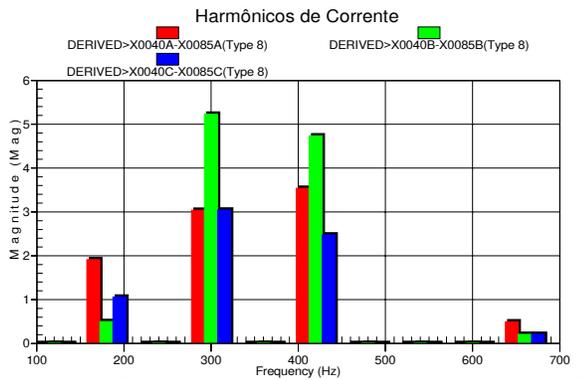


Fig. 19. Harmônicos individuais das correntes

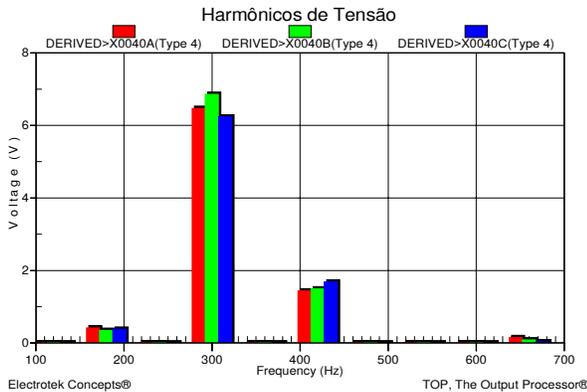


Fig. 20. Harmônicos individuais de tensão no transformador

A figura 21 mostra o comportamento da corrente no neutro nesta condição de carregamento.

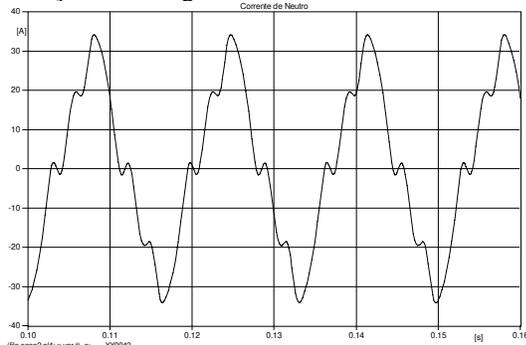


Fig. 21. Corrente de neutro

A figura 22 ilustra o espectro da corrente de neutro, onde observa-se que o componente de terceira ordem representa aproximadamente 20% da fundamental, enquanto no caso anterior, o valor percentual ficava em torno de 50%.

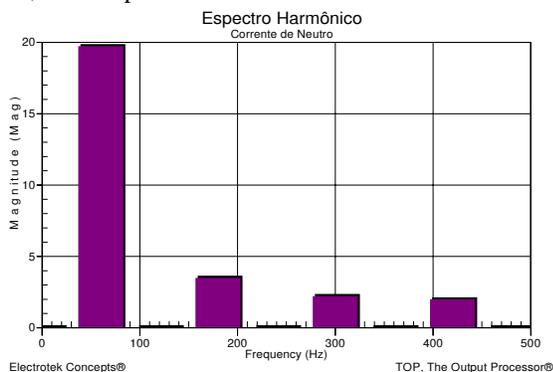


Fig. 22. Espectro harmônico da corrente de neutro

VI. 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 estão sendo propostos em nível nacional, já com dados referencias de distorções harmônicas aceitáveis para as redes de média e baixa tensão. Da análise dos resultados obtidos em relação às distorções apresentadas, podemos considerar que os harmônicos de tensão são satisfatórios e inferiores aos limites estabelecidos na norma IEEE 519 [4]. Considerando uma avaliação em termos de compatibilidade e adotando-se os padrões propostos em nível nacional, a 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 relação às simulações foram apresentados dois casos, um tratando do máximo carregamento e outro na condição de máxima distorção de tensão, sendo necessária a inclusão de harmônicos próprios da média tensão em conjunto a injeção dos harmônicos das correntes no lado de baixa tensão, para que os resultados de medição e simulação se aproximassem. 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 tensão [8], bem como a análise do efeito dos harmônicos sobre o condutor neutro.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. Módulo 8 - Qualidade da Energia, março de 2006.
- [2] N.C. de Jesus, Relatório Técnico - RT VIPAL - Monitoramento da Qualidade da Energia Elétrica - Análise de Harmônicos - SE Vipal, Nova Prata, LAQUEE-UNIJUÍ. Ijuí/RS, abril de 2004.
- [3] G.A.D. Dias, Harmônicas em Sistemas Industriais, EDIPUCRS, 2002.
- [4] IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practice for Harmonic Control in Electrical System.
- [5] PROCOBRE - Instituto Brasileiro do Cobre. Harmônicas nas Instalações - Causas, Efeitos e Soluções. São Paulo, novembro de 2001.
- [6] MANUAL IMS. Versão 2.07. Smart Analizador T.
- [7] MANUAL EMTP/ATPDraw - Alternative Transients Program, versão 3.5, agosto de 2002.
- [8] J. R.M. Júnior, "Análise da Aplicação de Filtros Harmônicos Passivos em Circuitos Secundários de Distribuição", II CITENEL, Salvador//BA, outubro/2003.