



V SBQEE

Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica

17 a 20 de Agosto de 2003

Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 02 124

Tópico: Fontes de Distúrbios

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE CARGAS NÃO-LINEARES: AVALIAÇÃO DOS EFEITOS E LIMITES DE CORTES DE TENSÃO (*VOLTAGE NOTCHING*)

Nelson C. de Jesus*
Fabiano T. Castoldi
UNIJUÍ

Cássio F. B. Nonenmacher
Thiago F. dos Santos
UNIJUÍ

Hermes R.P.M. de Oliveira
Guilherme Papaléo
AES Sul

RESUMO

Este artigo relata os efeitos da operação de cargas não-lineares na qualidade de energia, tratando especificamente dos eventos relacionados aos cortes de tensão. Apresentam-se considerações gerais sobre a influência do fenômeno da comutação e seu impacto na degradação da forma de onda. Definições e limites recomendados são apresentados conjuntamente com possíveis alternativas de mitigação. Foram modelados dois sistemas com cargas não-lineares utilizando o programa de transitórios eletromagnéticos Microtran para análise de casos de simulação. Apresenta-se também o diagnóstico de um caso real com problemas na qualidade de energia devido aos cortes de tensão em uma rede de baixa tensão.

PALAVRAS-CHAVE

Conversores Estáticos. Harmônicos. Comutação. Cortes de Tensão (*Notch*). Qualidade de Energia.

1.0 - INTRODUÇÃO

Problemas na qualidade de energia em função da operação de cargas não-lineares não são novos no contexto do sistema elétrico. Como exemplo, pode-se citar os fornos a arco ou até mesmo os próprios transformadores do sistema. Entretanto, devido à proliferação de cargas não-lineares, motivada pela flexibilidade dos sistemas controlados por conversores de potência, ocorreu o aumento significativo dos níveis de distorções. Por este motivo, existe preocupação permanente quanto ao impacto dos harmônicos, os quais afetam a operação dos componentes e equipamentos, podendo causar sobreaquecimentos e redução da vida útil de transformadores e máquinas elétricas, ressonâncias com capacitores, erros em medidores, atuação intempestiva de sistemas de proteção, etc.

Sendo assim, limites são recomendados quanto aos valores das distorções das tensões e correntes, visando manter a conformidade da onda de tensão e a qualidade do fornecimento de energia. Além da análise das distorções e dos harmônicos gerados por cargas não-lineares, vários estudos têm sido reportados também quanto à avaliação de inter-harmônicos e cortes de tensão (*notching*), indicando as possíveis conseqüências na operação do sistema, bem como medidas alternativas de mitigação. Este trabalho analisa especificamente os cortes de tensão decorrentes do fenômeno da comutação, os quais constituem uma classe especial dos incluídos quanto a distorção na forma de onda, sendo importantes fontes de distúrbios na operação de cargas sensíveis.

2.0 - COMUTAÇÃO

Comutação é o processo de transferência das correntes entre os dispositivos semicondutores que formam os conversores estáticos de potência. Obviamente, em instalações práticas, a comutação não ocorre instantaneamente devido à existência de indutâncias no sistema. Um caso clássico para análise do fenômeno de comutação refere-se aos retificadores trifásicos tiristorizados com comutação pela rede, utilizados entre outras aplicações, nos acionamentos controlados de máquinas de corrente contínua. A figura 1 ilustra a configuração de seis pulsos em ponte.

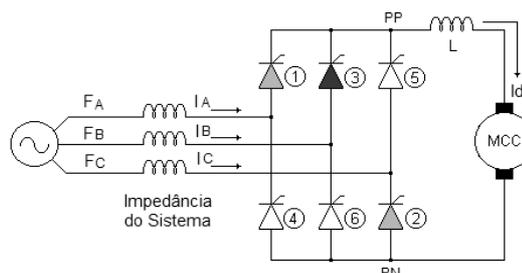


Figura 1 - Conversor com comutação pela rede

Neste caso, os tiristores operam em pares seqüenciais para obter-se a retificação de seis pulsos, com defasagens de 60° entre os pulsos de disparo. Isto resulta em seis comutações durante um ciclo da onda de tensão. Neste sentido, a transferência da corrente entre as fases (por exemplo, do tiristor 1 para o tiristor 3) gera momentaneamente um curto-circuito entre fases. O respectivo intervalo de comutação (ângulo μ) depende da reatância total do sistema e da corrente de saída (DC). Como resultado, tem-se os cortes de tensão em função do próprio princípio de funcionamento, sendo considerados eventos normais a operação dos conversores com controle de fase. A figura 2 mostra as formas de onda resultantes das tensões (fase-neutro e linha) e das correntes, considerando o ângulo de disparo (α) de 30° e o de comutação (μ) de 3° .

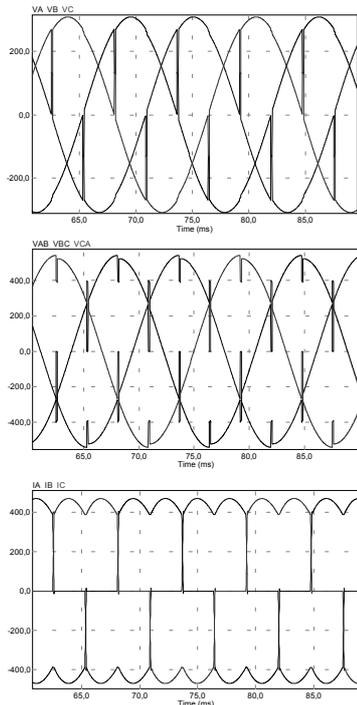


Figura 2 - Formas de ondas típicas de retificadores trifásicos

A relação entre a corrente retificada, os ângulos de disparo e comutação, além da própria reatância responsável pelo fenômeno da comutação é obtida a partir da equação (1).

$$I_d = \frac{\sqrt{6}E_2}{2X} [\cos\alpha - \cos(\alpha + \mu)] \quad (1)$$

Onde:

- Id - Valor médio da corrente de saída [A];
- E_2 - Tensão fase-neutro [V_{RMS}];
- X - Reatância total do sistema [Ω];
- α - Ângulo de disparo [$^\circ$];
- μ - Ângulo de comutação [$^\circ$].

No lado DC, o efeito da comutação em conversores operando no modo de retificação ($\alpha < 90^\circ$) é uma redução do valor médio da tensão de saída. Já no lado AC, tem-se os eventos transitórios repetitivos, ou seja, os cortes de tensão (*Voltage Notching*), cujos principais parâmetros de análise são descritos em seguida.

3.0 - CARACTERIZAÇÃO DE CORTES DE TENSÃO (*NOTCHING* - IEEE 519/1992)

As principais características dos cortes de tensão decorrentes do fenômeno de comutação em conversores trifásicos com comutação pela rede são definidas, conforme proposição da norma IEEE 519-1992. Para análise dos índices dos cortes de tensão utiliza-se a forma de onda básica como ilustrado na figura 3. Em relação aos parâmetros dos cortes de tensão (*notching*) relativos às tensões de linha no ponto de acoplamento comum, a seção de definições da norma estabelece [1]:

- Altura relativa do corte (*Notch Depth* $kn\% = d/v$): Valor médio da altura (profundidade) do corte em relação à onda senoidal;
- Área do Corte (A_N - *Notch Area*): Área do corte calculada a partir do produto da altura média e do intervalo de comutação (μ).

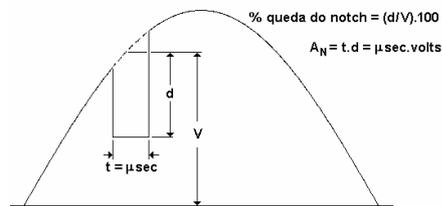


Figura 3 - Definição dos parâmetros de cortes de tensão

Portanto, em termos de compatibilidade, além das distorções harmônicas e magnitude dos componentes harmônicos individuais, a área do corte de tensão é um indicador dos efeitos que os conversores estáticos tem na degradação da qualidade de energia. A figura 4 mostra um circuito equivalente que representa a influência da operação de cargas não-lineares para os demais consumidores conectados ao sistema, no que se refere aos eventos de cortes de tensão. A inserção da reatância em série ao sistema de alimentação do conversor diminui a severidade e impacto dos cortes de tensão [2]. Este fator pode ser compreendido utilizando o simples conceito de divisor de tensão.

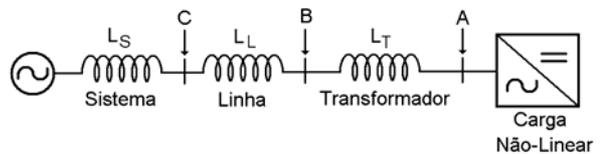


Figura 4 - Indutâncias do sistema

Deste modo, os parâmetros apresentados anteriormente são dependentes do ponto de medição. Por exemplo, para uma altura relativa (% queda - *Notch Depth*) no ponto A de 100%, tem-se uma redução deste valor no ponto de observação B, cujo valor pode ser determinado pela seguinte expressão:

$$kn_B(\%) = \frac{L_S + L_L}{L_S + L_L + L_T} \cdot 100 \quad (2)$$

4.0 - PROBLEMAS NA QUALIDADE DE ENERGIA CAUSADOS POR CORTES DE TENSÃO

Uma das características típicas dos eventos de cortes de tensão que causam problemas na qualidade de energia são as passagens adicionais pelo zero da onda de tensão (*zero crossing*), em função do número de comutações por ciclo (número de pulsos). Além desta deformação na forma de onda, perturbações podem ocorrer devido ao modo de variação da tensão (dv/dt), tanto no início como no fim do corte de comutação. Isto implica em tendência de inúmeros problemas na qualidade de energia, principalmente quando da presença de equipamentos eletro-eletrônicos sensíveis. Possíveis ampliações devido a ressonâncias com a frequência natural do sistema, principalmente para baixos níveis de curto-circuito podem contribuir a degradação e perda da qualidade de fornecimento. Neste caso específico, o espectro harmônico de uma onda com corte apresenta rico conteúdo em harmônicos de alta frequência, os quais se propagam pelo sistema afetando a tensão com elevadas distorções, principalmente nos pontos onde se empregam bancos de capacitores para correção do fator de potência. Cortes de tensão causados por acionamentos de grande porte (inversores do tipo fonte de corrente ou acionamentos DC) podem resultar em excessiva distorção da tensão do sistema [3]. De um modo geral, os cortes de tensão podem afetar significativamente a qualidade de energia, devendo ser evitados pelos seguintes motivos:

- Sobrecarga em capacitores (circuito *snubber*);
- Falhas e disfunção de relógios digitais, máquinas ferramentas, lâmpadas de descargas, PC e outros;
- Falhas de semicondutores;
- Interferências em sistemas de comunicação;
- Distorção e ressonâncias no sistema elétrico, etc.

5.0 - LIMITES NORMALIZADOS

Os limites quanto aos valores máximos dos cortes de tensão são ilustrados na tabela 1. Salienta-se que os limites das áreas do corte foram convertidos para uma tensão de 380 V, conforme correção estabelecida pela norma ($U_N/480$). Os valores apresentados devem ser tomados como referência em relação aos valores nominais das tensões e correntes dos conversores.

Tabela 1 - Limites de cortes de tensão

CLASSE	Notch Depth (%)	Notch Area (V.μseg)	THD (%)
Sistemas Especiais*	10	12983	3
Sistemas Gerais	20	18050	5
Sistemas Dedicados**	50	28896	10

Onde:

* - Incluem hospitais e aeroportos;

** - Exclusivo a alimentação do conversor.

Ressalta-se que os limites apresentados referem-se às tensões de linha, as quais são correlacionadas com a operação de conversores trifásicos. A seguir, comenta-se sobre alguns tópicos que constam nos processos atuais de revisão da referida norma quanto aos cortes.

6.0 - FATORES EM REVISÃO QUANTO A AVALIAÇÃO E LIMITES DOS CORTES DE TENSÃO

Conforme inúmeros trabalhos técnicos, a utilização dos limites dos cortes de tensão tem apresentado problemas e inconsistências, em função da própria definição e conceituação. Por estes motivos, estão sendo revisados os conceitos e limites propostos pela norma IEEE 519-1992. O primeiro item refere-se a classificação da altura relativa, sendo que qualquer corte que caia a zero é tomado como máximo. Entretanto, dependendo do ângulo de disparo, tem-se para diferentes intensidades, resultados idênticos com o mesmo valor máximo (100%). Segundo estudos propostos, uma maneira mais correta de determinar este índice seria em relação ao valor de pico da tensão de fase ou de linha. Esta alternativa esclarece as diferenças dos cortes por conversores a diodos (retificadores não-controlados) e por conversores tiristorizados (retificadores controlados) [4]. Quanto ao aspecto da tensão base, salienta-se que se torna necessário estabelecer indicadores quanto a cargas monofásicas. Neste mesmo sentido, será apresentado um caso com problemas de cortes na tensão fase-neutro devido à operação dos novos chuveiros controlados eletronicamente com ajuste fino de temperatura. A revisão dos limites, inclusão de novas classes (acionamentos regenerativos) e categorias como chaveamentos em alta frequência (IGBT's) estão em processo de análise. Um outro aspecto refere-se à relação entre os harmônicos e os cortes de tensão com passagens adicionais pelo zero. Pesquisas indicam que em geral a regra "1/n" é aplicável nesta situação, sendo (n) a ordem do harmônico e (1/n) a tensão em pu requerida para criar múltiplas passagens por zero na onda de tensão. A figura 5 ilustra a respectiva relação considerando esta regra geral [5].

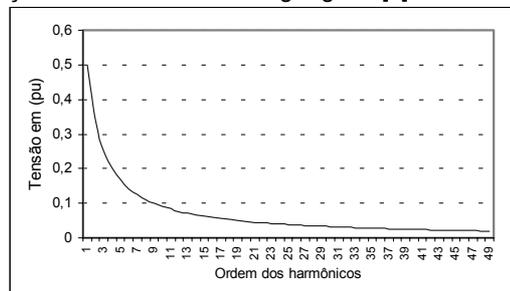


Figura 5 - Valores dos harmônicos de tensão em pu necessários para produzir múltiplas passagens por zero

7.0 - ANÁLISE DE CASOS

7.1 Conversores Trifásicos

Para avaliação dos efeitos dos cortes de tensão, modelou-se um sistema com características tipicamente industriais, como ilustra a figura 6. Os resultados de simulações para diversos casos são apresentados como se segue.

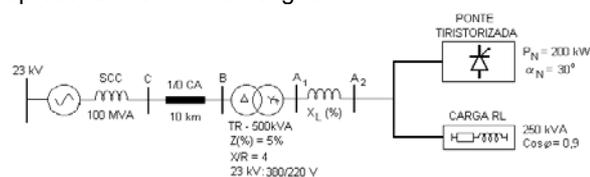


Figura 6 - Sistema utilizado na simulação

7.1.1 Caso Base

Foram simulados vários casos considerando o sistema equivalente da figura 6. As figuras 7 e 8 ilustram, respectivamente, a tensão de linha e as correntes sob condições nominais de operação (caso base), onde adotou-se um ângulo nominal α de 30° .

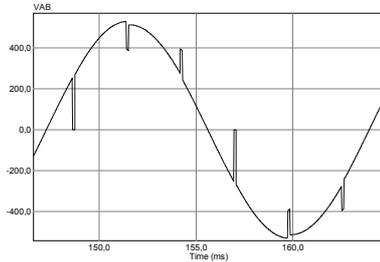


Figura 7 - Tensão de linha ($\alpha=30^\circ$)

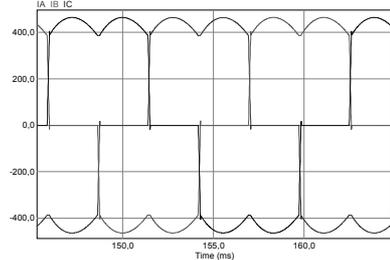


Figura 8 - Correntes de entrada ($\alpha=30^\circ$)

Na análise dos casos, variou-se o ângulo de disparo para valores de 0, 30 e 60° . Como consequência, a potência de saída foi alterada. Os resultados com e sem a influência da carga paralela são apresentados a seguir.

Tabela 2 - Parâmetros de cortes de tensão

VARIACÃO DA POTÊNCIA DE SAÍDA (SEM CARGA RL)				
α ($^\circ$)	μ ($^\circ$)	K_n (% U_{FF})	A_N	(%) Limite A_N
0	13,91	17,32	59904,88	207,31
30	2,83	51,51	36237,22	125,41
60	0,97	85,55	20672,10	71,54
VARIACÃO DA POTÊNCIA DE SAÍDA (COM CARGA RL)				
α ($^\circ$)	μ ($^\circ$)	K_n (% U_{FF})	A_N	(%) Limite A_N
0	13,39	16,60	55273,00	191,28
30	2,70	48,37	32467,50	112,36
60	0,82	82,63	16862,50	58,36

Para a mesma variação dos ângulos de disparo, porém, sob outras condições de carga, de tal forma que a potência de saída, independente do ângulo de disparo, permanecesse em torno do valor nominal de 200 kW, obteve-se os resultados indicados na tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de cortes de tensão

POTÊNCIA DE SAÍDA CONSTANTE (SEM CARGA RL)				
α ($^\circ$)	μ ($^\circ$)	K_n (% U_{FF})	A_N	(%) Limite A_N
0	12,10	16,27	48927,20	169,32
30	2,83	51,51	36237,22	125,41
60	2,81	86,68	60508,50	209,40
POTÊNCIA DE SAÍDA CONSTANTE (COM CARGA RL)				
α ($^\circ$)	μ ($^\circ$)	K_n (% U_{FF})	A_N	(%) Limite A_N
0	11,66	13,86	40186,80	139,07
30	2,70	48,37	32467,50	112,36
60	2,59	83,63	53890,80	186,50

Portanto, para os casos apresentados no ponto de análise, as áreas equivalentes para quase todas as condições simuladas foram superiores ao limite da tabela 1, adotando-se o valor base de 28896 V. μ s.

7.1.2 Inclusão de Indutor

Para ilustrar o comportamento do método mais usual em termos de melhoria da forma de onda da tensão e redução dos cortes, principalmente quando os problemas são de passagens por zero, analisa-se a influência da inclusão de indutores no lado CA nos parâmetros dos cortes, tomando como referência o caso base. Um resumo dos resultados é apresentado na tabela 4. O valor de $k_n\%$ foi tomado em relação ao pico da tensão de linha, como nos casos anteriores.

Tabela 4 - Parâmetros de cortes de tensão

ÂNGULO DE DISPARO NOMINAL 30° (SEM CARGA RL)				
XL (%)	μ ($^\circ$)	K_n (% U_{FF})	A_N	(%) Limite A_N
0	2,83	51,51	36237,22	125,41
1	3,56	36,67	32490,15	112,44
3	5,72	23,59	33572,85	116,19
5	7,78	17,64	34106,40	118,03
ÂNGULO DE DISPARO NOMINAL 30° (COM CARGA RL)				
XL (%)	μ ($^\circ$)	K_n (% U_{FF})	A_N	(%) Limite A_N
0	2,70	48,37	32467,50	112,36
1	3,56	34,21	30313,80	104,91
3	5,83	21,76	31549,50	109,18
5	7,99	16,24	32275,10	111,69

As figuras 9 e 10 mostram os resultados obtidos com a inclusão de indutores de 1, 3 e 5 %, calculados em relação a potência base do acionamento.

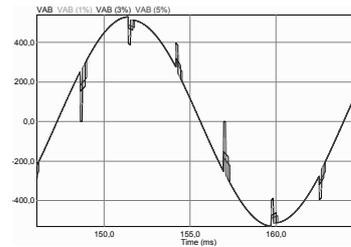


Figura 9 - Tensões de linha ($\alpha=30^\circ$)

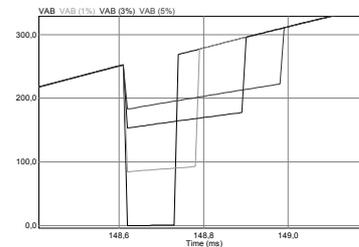


Figura 10 - Detalhe do efeito de indutores nos cortes de tensão

7.2. Carga Monofásica: Caso Real

Após inúmeras reclamações de um determinado consumidor do sistema de baixa tensão da AES Sul, localizado na cidade de São Sebastião do Caí/RS, iniciou-se o processo de investigação e diagnóstico deste caso, com o levantamento das características dos problemas citados. As interferências que ocorriam no sistema do consumidor não apresentavam intervalos regulares, entretanto, eram mais frequentes e com ruídos de maior magnitude nos períodos finais das tardes. Neste caso, o consumidor trabalha com reproduções de áudio utilizadas em propagandas comerciais através de um sistema próprio de gravação, as quais eram afetadas por ruídos de grande intensidade que prejudicavam a qualidade final do produto.

7.2.1 Resultados das Medições

Para avaliar-se as características dos distúrbios, conectou-se o medidor no ponto de acoplamento comum do sistema de baixa tensão do consumidor, observando as formas de onda das tensões. Como os problemas ocorriam com determinada frequência, logo nas primeiras medições registrou-se os eventos que estavam relacionados aos ruídos que prejudicavam o sistema de gravação do consumidor. Apresenta-se, portanto, os dados obtidos durante o monitoramento com a plataforma de potência PP 4300 da marca Dranetz/BMI. Pela análise dos resultados, conclui-se que eventos do tipo *Notching* eram os prováveis responsáveis pelas perturbações. A figura 11 mostra as tensões em um determinado instante quando ocorreram os problemas, conforme descrito pelo consumidor. Observa-se que somente a fase B foi afetada significativamente, com características típicas de comutação de tiristores, deteriorando a forma de onda da tensão em cada semi-ciclo. Deste modo, verificou-se que o formato típico (cortes de tensão), estava relacionado com a operação de cargas monofásicas tiristorizadas, sendo as responsáveis pelos problemas citados.

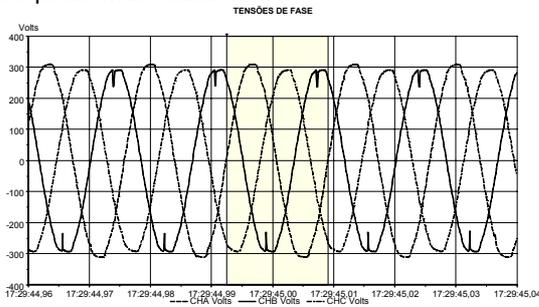


Figura 11 - Distúrbios na fase B

A figura 12 mostra o conteúdo harmônico da fase B relativo ao ciclo ilustrado na figura 11. O harmônico preponderante refere-se ao de 3º ordem (seqüência zero), porém, existe contribuição de componentes harmônicos em todo o espectro, com uma distorção harmônica total (THD) de 4,67%.

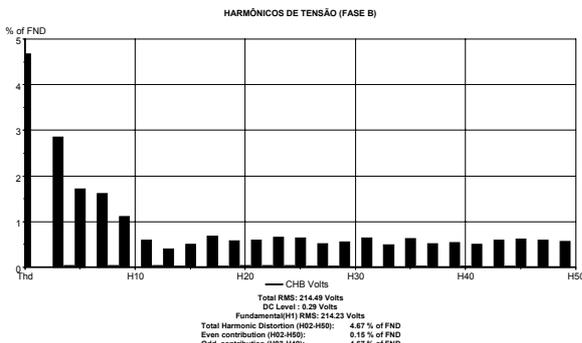


Figura 12 - Espectro harmônico da fase B

Teoricamente, os distúrbios tendem a ser mais intensos quanto mais próximo da origem estiver sendo realizado o monitoramento. Tomando como base os primeiros distúrbios, realizou-se uma medição simultânea nos terminais do transformador de alimentação, comparando-se os resultados. As figuras 13 e 14 ilustram, respectivamente, as tensões no

transformador e no consumidor durante os problemas de interferências, sendo mais severas no próprio local das reclamações do que no transformador. Este fato colabora no sentido de que a provável perturbação estivesse relacionada com chaveamentos de cargas da rede de baixa tensão, caracterizando como um caso de origem interna as instalações do consumidor. A não correspondência entre as fases decorre da diferença de seqüências durante a conexão ao medidor nos pontos de análise.

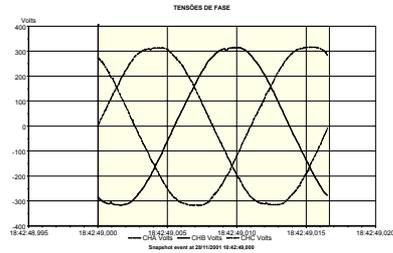


Figura 13 - Tensão no transformador

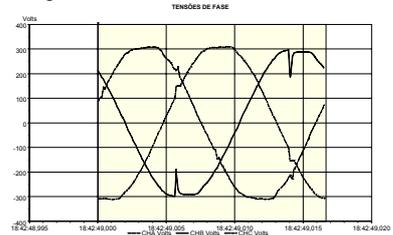


Figura 14 - Tensão na carga

Num levantamento detalhado das principais cargas do sistema, verificou-se que nas instalações do consumidor reclamante, bem como em outro consumidor alimentado pelo mesmo circuito de baixa-tensão e, localizado eletricamente próximo ao primeiro, existiam chuveiros elétricos com regulação eletrônica de temperatura, ou seja, controlados por tiristores. Neste caso, concluiu-se que a operação destas cargas, as quais normalmente apresentam potência nominal de 6 a 8 kW, afetavam a onda de tensão e tinham correspondência direta com os problemas relatados. Desta forma, monitorou-se a corrente do circuito de alimentação do chuveiro do próprio consumidor, onde concluiu-se que as correntes demandadas causavam os cortes na onda de tensão, gerando os ruídos no sistema do consumidor, o que tecnicamente impossibilitava a gravação e reprodução do produto final. A figura 15 mostra o registro das tensões e correntes responsáveis pelas perturbações (polaridades opostas), ocorrendo a saturação do transformador do instrumento de medição de corrente (TC). Durante a operação da carga não-linear do próprio consumidor reclamante os ruídos eram mais intensos, com interferências no seu sistema de áudio. Para este caso, a área do corte em relação à tensão fase-neutro é aproximadamente 19596 μ seg.

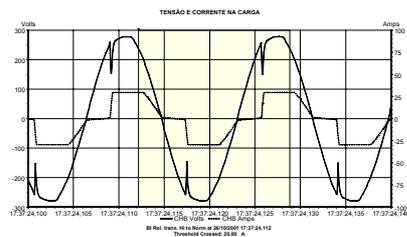


Figura 15 - Tensão e corrente da carga durante perturbações

7.2.2 Resultados das Simulações

Para avaliar o efeito das comutações de tiristores no referido sistema de baixa-tensão, modelou-se o sistema elétrico de suprimento visto da barra de média-tensão da subestação no Programa de Transitórios Eletromagnéticos Microtran[®], como mostrado na Figura 16, a seguir. O chuveiro controlado foi representado por tiristores em anti-paralelo, operando com um ângulo de disparo de 60°. Na Figura 17 pode-se observar a tensão resultante da conexão da carga não-linear próxima às instalações do consumidor reclamante. Os resultados de simulação foram bastante similares aos obtidos durante algumas medições. Portanto, este novo tipo de carga além do problema específico gerado, afeta consideravelmente as tensões da rede, o que causa preocupação em função de sua proliferação no mercado brasileiro, dificultando a obtenção da qualidade de energia e conformidade da onda de tensão.

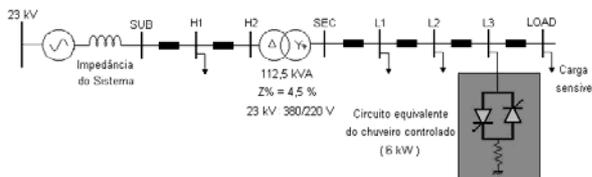


Figura 16 - Diagrama unifilar do sistema

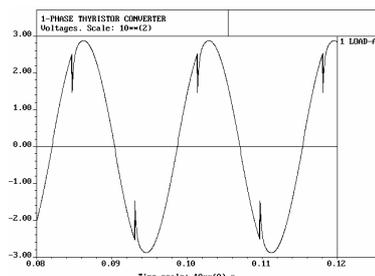


Figura 17 - Simulação da tensão na carga

7.2.3 Alternativas de Mitigação

Para testes de mitigação dos problemas de interferências devido aos ruídos, a concessionária providenciou a aquisição de um transformador de isolamento com blindagem eletrostática, o qual alimentaria o sistema de gravação sensível ao *notching*. Os resultados não foram satisfatórios e os ruídos permaneceram perturbando o consumidor. Neste caso, como alternativa recomendou-se a utilização de um sistema de alimentação ininterrupto (No-break) ou condicionadores de energia para alimentação da carga sensível do consumidor. O princípio de funcionamento e potência equivalente induzem a uma deterioração da onda de tensão, em função da operação destas cargas. Neste aspecto, apesar da melhoria em termos de operação do chuveiro elétrico (conforto e racionalização), o mesmo pode ocasionar sérios problemas e prejudicar consideravelmente as tensões de sistemas de baixa tensão. Em contatos com fabricantes para esclarecimentos, foram informados outros casos semelhantes. Neste aspecto, existe uma responsabilidade dos fabricantes na qualidade da energia elétrica, pois foi recomendado remeter o equipamento à fábrica para a inclusão de filtros.

8.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise quanto à influência e impacto do fenômeno da comutação na qualidade de energia. Observa-se que os cortes de tensão podem causar sérios problemas, sendo, portanto, um parâmetro importante no que tange a indicadores da conformidade da onda de tensão. As definições foram ilustradas conforme documento normativo (IEEE 519/1992), bem como os respectivos limites estabelecidos para sistemas em baixa tensão. Alguns aspectos referentes aos conceitos, definições e modos de avaliação dos cortes também foram abordados, uma vez que revisões estão sendo propostas para melhor caracterização e avaliação dos limites relacionados aos cortes de tensão. Inúmeros problemas na qualidade de energia são decorrentes das características próprias da comutação de semicondutores e operação dos conversores, principalmente aqueles com comutação pela rede. Deste modo, os cortes derivados do fenômeno de comutação afetam principalmente equipamentos sensíveis, sendo uma importante fonte de distúrbios e perturbações no contexto da qualidade de energia. Preocupações com a interação de inversores de grande porte do tipo fonte de corrente e sistemas de distribuição também tem sido apresentadas na literatura técnica. Apresentou-se diversos casos de simulação para avaliação dos parâmetros dos cortes, inclusive com a inclusão de indutores, os quais diminuem a severidade da queda relativa no ponto a montante, mas não reduzem significativamente a área equivalente. Finalmente, apresentou-se um caso real com problemas em sistemas de áudio devido aos cortes provocados pela operação dos novos chuveiros com ajuste fino de temperatura através de tiristores e controle de fase. Neste caso específico, fica evidente a importância da participação e envolvimento dos fabricantes, os quais tem papel fundamental em aspectos de compatibilidade e qualidade da energia elétrica.

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE Std. 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
- [2] D. D. Shipp, W. S. Vilcheck, "Power Quality and Line Considerations for Variable speed AC Drives", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 32, No.2, pp.403-410, March/April 1996.
- [3] L. Tang, M. McGranaghan, R. Ferraro, S. Morganson, B. Hunt, "Voltage Notching Interaction Caused by Large Adjustable Speed Drives on Distribution Systems with Low Short Circuit Capacities", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 11, No.3, pp.1444-1453, July 1996.
- [4] A. Ludbrook, "Proposed Revisions to IEEE 519 Commutation Notch Limits", *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Vol. 2, pp. 958-962, 2002.
- [5] S. M. Halpin, "Overview of Revisions to IEEE Standard 519-1992", *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Vol. 2, pp. 947-949, 2002.