

## **EXPERIÊNCIA OPERATIVA COM MÁQUINAS ROTATIVAS DIAGNÓSTICO NO ENFOQUE DE GERAÇÃO DE HARMÔNICAS**

Marcus Lellis P. Peçanha  
Adérito Marques Ferreira  
Light Serv. Eletricidade S.A

Arnoldo de Moraes R. Fairbairn  
Paulo Cesar R. Cabral  
O Globo - Empr. Jornalística Brasileira Ltda.

Resumo : O presente artigo focaliza a experiência adquirida pela Light através de ensaios realizados em uma planta gráfica, que tiveram como objetivo diagnosticar a operação de máquinas rotativas no que se refere ao aspecto de geração de harmônicas. Tais máquinas, responsáveis pelo processo de impressão de jornais, são conjuntos de motores de corrente contínua, comandados por controladores de velocidade ajustáveis.

Palavras-chave : medição de harmônicas; conversores estáticos; máquinas rotativas.

Abstract : This paper is about the experience of Light, Rio de Janeiro's electric utility, conducted through tests in industrial graphic plant for evaluation of harmonics produced by rotating machines conditions. Such machines are newspaper printers, consisting of direct current motor sets, controlled by adjustable speed drivers.

Keywords : harmonics measurement; static converters; rotating machines.

### **1. INTRODUÇÃO**

O crescimento vertiginoso da utilização de eletrônica de potência em plantas industriais, deve-se, principalmente, à introdução de novas tecnologias que propiciaram uma melhoria da confiabilidade e do desempenho de seus processos produtivos.

Nesse sentido, os controladores de velocidade de motores (ASD), encontram uma vasta gama de aplicações nos diversos segmentos industriais. No entanto, dada a característica elétrica de não linearidade de tais equipamentos podemos considerá-los, por excelência, fontes geradoras de correntes harmônicas.

Assim sendo, não obstante às melhorias proporcionadas com o emprego de controladores de velocidade ajustáveis nos processos industriais, compete ao especialista em Qualidade da Energia estar atento às possíveis implicações decorrentes desses equipamentos sobre os sistemas elétricos associados, ou seja, concessionária e cliente.

Adicionalmente, tem-se observado a nível internacional tendências no sentido de mudança no tratamento dispensado pela concessionária de energia elétrica aos seus clientes. No passado, a concessionária, numa atitude "reativa", apenas atendia a seus clientes quando questionada por estes e mantendo-se numa postura de retaguarda. Na atualidade, as concessionárias vem adotando programas, dentro de uma filosofia "pró-ativa", voltados tanto para a educação do cliente quanto para a prestação de serviços visando ajudá-los na busca de soluções para os problemas relacionados à qualidade da energia. A análise e mitigação destes problemas envolve, em geral, recursos nem sempre disponíveis na maioria dos

clientes. Concomitantemente, a Light, após sua privatização, tem dado maior ênfase a constante melhoria no atendimento de seus clientes, como no caso ora apresentado.

Neste trabalho, de acordo com esta nova filosofia, é apresentada a experiência da Light obtida através dos ensaios realizados na planta gráfica do cliente "O Globo - Empresa Jornalística Brasileira Ltda." que objetivaram diagnosticar a operação de suas máquinas rotativas no que tange ao aspecto de geração de harmônicas.

Estas máquinas rotativas são conjuntos de motores de corrente contínua, controlados por pontes conversoras estáticas, com filosofias de controle diferenciadas, sendo responsáveis pelo processo de impressão de jornais do referido cliente.

Por se tratar de uma carga com característica peculiar, tendo horários específicos para início e término de produção, face a necessidade premente da divulgação do noticiário, que não pode ser adiada, o aspecto de continuidade no fornecimento de energia elétrica, também é de suma importância no contexto do processo do cliente.

### **2. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO**

O cliente em questão, localiza-se no Município do Rio de Janeiro, sendo suprido, pela Light, em 13,8 kV através de cabos subterrâneos a partir da subestação transformadora de distribuição Frei Caneca, a qual está interligada ao sistema de 138 kV.

A capacidade instalada do referido cliente é de 10.500 kVA, com demanda contratual

de 3.300 kW no horário fora de ponta e de 2.600 kW no horário de ponta.

Sob o ponto de vista de qualidade da energia, a principal carga do complexo jornalístico do cliente, é composta por 4 (quatro) máquinas rotativas responsáveis pelo processo de impressão de jornais.

Estas máquinas são conjuntos de motores de corrente contínua controlados por pontes conversoras estáticas, caracterizando-se como potenciais fontes geradoras de correntes harmônicas.

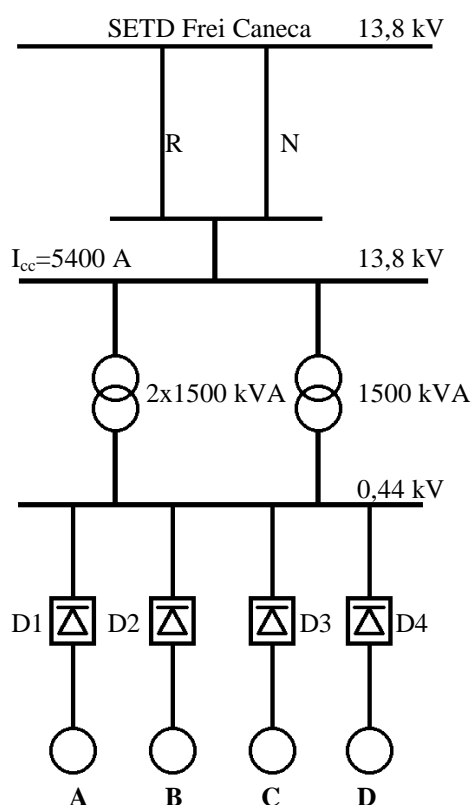


Figura 1 - Diagrama unifilar simplificado

### Principais Características das Cargas

As máquinas A, B e C são formadas, cada uma delas, por um conjunto de 7 (sete) motores de corrente contínua de 75 cv, comandados por pontes trifásicas semicontroladas de 6 (seis) pulsos.

A máquina D é formada por um conjunto de 9 (nove) motores de corrente contínua de 150 cv comandados por pontes trifásicas com controle pleno, também, de 6 (seis) pulsos.

O fator de demanda da instalação do cliente está em torno de 33%, enquanto é de 65% para as pontes conversoras.

Considerando-se que as pontes conversoras das máquinas A, B e C operam com ângulo de disparo dos tiristores diferente de zero, é de se esperar o surgimento de harmônicas de corrente de ordem par, as quais podem ser consideradas como características desses conversores.

A figura 1 ilustra de forma simplificada o diagrama elétrico unifilar do suprimento às cargas especiais do referido cliente.

### 3. ENSAIOS REALIZADOS NO CLIENTE

Considerando-se a característica elétrica da carga e sua periodicidade operacional, julgou-se consistente a realização de medições durante um período mínimo de duas semanas, visando contemplar possíveis variações na configuração do sistema elétrico do cliente, bem como da rede elétrica da Light.

Os sinais de tensão e de corrente foram obtidos por meio de ligações nos secundários dos transformadores de potencial e de corrente disponíveis no quadro de medição de faturamento, existente no ponto de entrega de energia do cliente.

Para execução dos ensaios foi utilizado o medidor de energia e de harmônicas, modelo Power Profiler 3030A, de fabricação da Basic Measuring Instruments.

Monitorou-se sinais de tensão e de corrente nas três fases, obtendo-se um levantamento do perfil diário para as seguintes grandezas selecionadas:

- Distorção harmônica de tensão e de corrente
- Tensão e corrente para 2<sup>o</sup> e 5<sup>o</sup> harmônicas
- Tensão e corrente, valores rms verdadeiro
- Frequência da rede
- Desequilíbrio de tensão e de corrente, valores máximo e mínimo

Além do perfil diário, foram obtidos valores instantâneos para uma fase, que se prestaram para acompanhamento e verificação das informações prestadas pelo cliente durante a permanência da equipe técnica da concessionária no local de medição.

Adicionalmente aos ensaios realizados no 13,8 kV, promoveram-se medições no nível de 440 V, visando avaliar a contribuição das pontes conversoras, separadamente, por cada máquina..

As figuras a seguir ilustram alguns dos principais resultados obtidos das medições supracitadas.

A figura 2, representa as formas de onda dos sinais de tensão e de corrente observadas no

13,8 kV, para cada configuração operativa com as máquinas A, B, C e D.

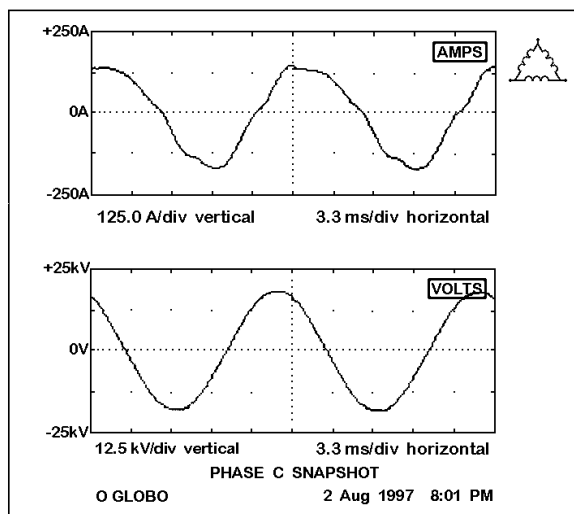


Figura 2 - Formato da onda de tensão e de corrente

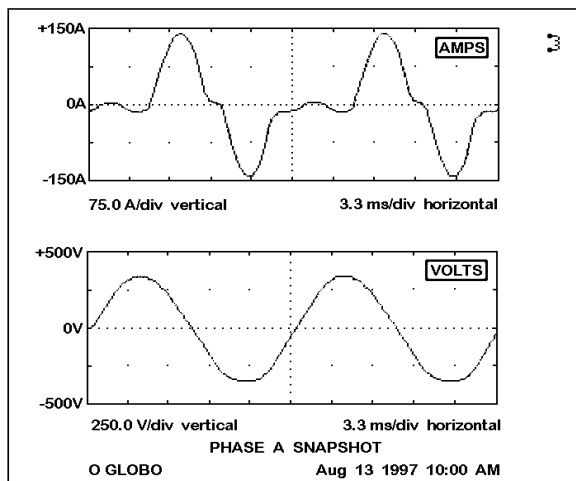


Figura 3 - Formato da onda de tensão e de corrente

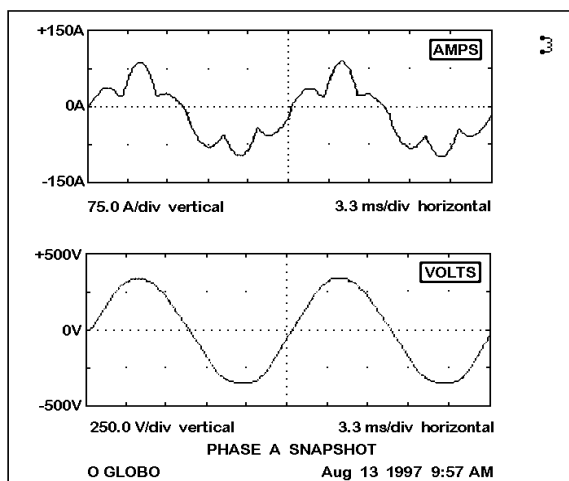


Figura 4 - Formato da onda de tensão e de corrente

Nas figuras 3 e 4, temos as formas de onda dos sinais de tensão e de corrente observadas no 440 V, relativas aos conversores das máquinas C

e D, respectivamente. As principais componentes harmônicas presentes no sinal de corrente da figura 3 são a 2ª e 4ª harmônicas. Na figura 4, as principais componentes harmônicas presentes no sinal de corrente são a 5ª e 2ª harmônicas.

#### 4. TRATAMENTO DOS DADOS DE MEDIÇÃO

A partir dos resultados obtidos das medições e dos dados fornecidos pelo cliente retratando a configuração de sua carga durante o período de ensaios, foram selecionados os instantes mais significativos das grandezas monitoradas, visando a obtenção de subsídios necessários à análise pretendida.

Foram considerados instantes significativos àqueles correspondentes aos valores máximos de distorção harmônica de corrente, para cada perfil diário registrado, função da configuração operativa das máquinas rotativas, visando avaliar o comportamento das mesmas perante a questão de geração de correntes harmônicas.

Alguns dos principais resultados obtidos destas medições são apresentados na tabela 1, sendo os valores expressos em percentuais dos respectivos valores fundamentais da tensão e da corrente medidos no 13,8 kV, no ponto de entrega do cliente.

Máquina operando	Distorção		Harmônica			
	THDV	THDi	V5 <sup>a</sup>	I5 <sup>a</sup>	V2 <sup>a</sup>	I2 <sup>a</sup>
abcd	1.2	21.4	1.0	8.7	0.4	19.4
abc	1.0	14.5	1.0	4.8	0.3	13.8
abd	1.6	22.8	1.5	12.7	0.3	18.2
acd	1.0	20.9	1.0	9.0	0.1	18.8
bcd	3.3	13.0	3.2	7.6	0.1	11.3
ac	1.3	9.0	1.3	2.5	0.2	7.5
ad	3.3	10.8	3.3	5.2	0.3	9.4
bd	1.1	12.7	1.0	7.2	0.2	8.4
a	2.2	10.2	2.2	5.4	0.1	7.8
b	2.1	6.9	2.1	2.9	0.1	5.1
c	1.3	5.4	1.2	2.0	0.2	4.6
d	1.0	8.0	1.0	6.0	0.1	4.7
nenhuma	1.8	4.3	1.8	3.6	0.1	0.7

Tabela 1

A título de ilustração temos na figura 5 o perfil diário da distorção harmônica da corrente no 13,8 kV, sendo que o valor máximo foi de 18,2 %.

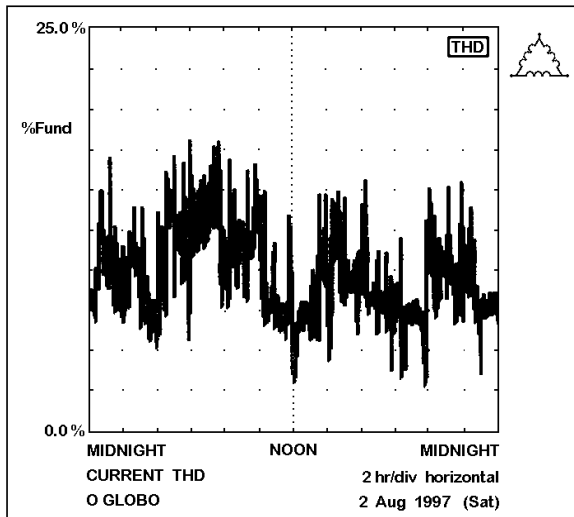


Figura 5 - Perfil diário da distorção de corrente

A figura 6 representa o perfil diário da variação da 2ª harmônica de corrente, correspondente à distorção harmônica de corrente relativa à figura 5. O valor máximo registrado foi de 15,8 %. Quando as máquinas estão inoperantes a 2ª harmônica é praticamente nula.

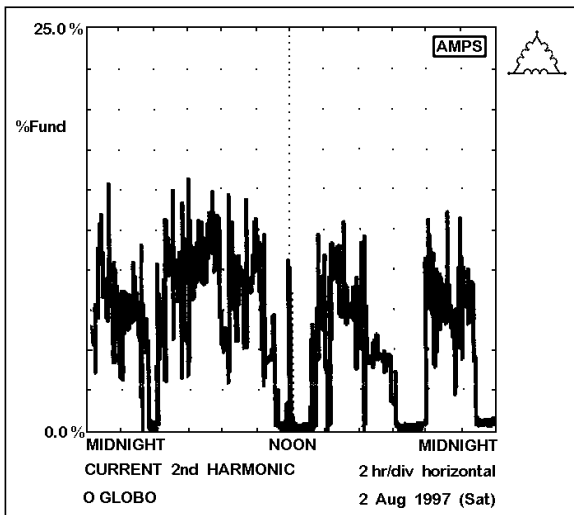


Figura 6 - Perfil diário da 2ª h de corrente

## 5. ANÁLISE DAS GRANDEZAS MONITORADAS

Para desenvolvimento da análise das grandezas harmônicas monitoradas adotou-se os critérios e recomendações estabelecidos nos seguintes documentos:

- Relatório "Critérios e Procedimentos Para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais", GCOI/GCPS de fevereiro de 1993.
- "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", IEEE Std 519-1992.

### Limites Adotados no GCOI/GCPS

Distorção Harmônica de Tensão (D)

Global: 6%

Por consumidor: 3%

Harmônicas de Tensão (Vh)

Global: 5% (3ª, 5ª, 7ª)

3% (9ª, 11ª, 13ª)

2% (15ª a 25ª)

2% (2ª, 4ª, 6ª)

Por consumidor: 1,5% (3ª a 25ª)

0,6% (pares)

Harmônicos de corrente (Ih)

O relatório do GCOI/GCPS não fixa limites para as correntes harmônicas. Recomenda o mesmo que esses limites sejam definidos a partir de estudos de fluxo harmônico, visando garantir os limites de distorção de tensão, por consumidor, em todos os pontos do sistema elétrico em análise. No caso ora apresentado, estes limites não foram considerados.

### Limites Adotados na IEEE Std 519

Distorção Harmônica de Tensão (THD) : 5%

Harmônicas de Tensão (Vh) : 3%

Distorção Total de Demanda (TDD)

Considerando a relação  $I_{SC}/I_L=36$ , tem-se:

TDD = 8%

Harmônicas de Corrente (Ih)

7% ( $I_h < 11^a$ )

3,5% ( $11^a \leq I_h < 17^a$ )

2,5% ( $17^a \leq I_h < 23^a$ )

Tendo em vista que a recomendação IEEE Std 519 não faz menção a limites para as correntes harmônicas de ordem par, geradas por pontes conversoras semicontroladas, adotou-se para estas o valor de 50 % dos limites definidos para as harmônicas de ordem ímpar. Assim sendo, temos:

3,5% ( $I_h < 10^a$ )

1,8% ( $10^a \leq I_h < 16^a$ )

1,3% ( $16^a \leq I_h < 22^a$ )

### Análise das Grandezas Harmônicas

Durante o período de medição, a distorção harmônica de tensão no 13.8 kV se manteve com valores inferiores, tanto com relação ao limite estabelecido pela IEEE Std 519, assim como ao limite global estabelecido pelo relatório do GCOI/GCPS, ultrapassando apenas o limite por consumidor definido por este documento.

O valor máximo da distorção de tensão registrado foi de 4%, tendo ocorrido quando da operação das máquinas A, C e D.

A principal componente harmônica presente no sinal de tensão no 13.8 kV é a 5ª harmônica, a qual em vários instantes do período de medição supera o limite adotado pela recomendação IEEE Std 519, bem com o limite por consumidor estabelecido no documento do GCOI/GCPS.

O valor máximo registrado durante a medição ficou em torno de 4%, correspondente à configuração operativa com as máquinas A, C e D, sendo esta harmônica responsável pela definição do perfil da distorção de tensão no 13.8 kV.

O limite definido pela recomendação IEEE Std 519, para a distorção total de demanda é superado para a configuração operativa com 3 (três) e 4 (quatro) máquinas.

As principais componentes harmônicas presentes no sinal de corrente são a 2ª e 5ª harmônicas. Durante o período de medição apenas o limite definido para 2ª harmônica é superado na condição operativa com 2 (duas) ou mais máquinas. A 2ª harmônica de corrente é responsável pela superação do limite da distorção total de demanda, na condição operativa com 3 (três) e 4 (quatro) máquinas.

## 6. CONCLUSÕES

O nível da distorção harmônica de tensão, no ponto de entrega do cliente, encontra-se dentro de padrões aceitáveis.

Muito embora a 2ª harmônica de corrente apresente níveis elevados, a mesma não repercute sobre a distorção no ponto de entrega.

No entanto, recomenda-se avaliar possíveis repercussões sobre o sistema elétrico concessionário, tendo em vista à superação do limite de distorção total de demanda.

O elevado nível da 2ª harmônica presente no sinal de corrente no 13,8 kV deve-se, principalmente, à perda de simetria de meia-onda provocada pelas pontes conversoras das máquinas A, B e C. Estas pontes operam com um fator de demanda de cerca de 65%, implicando num ângulo de disparo elevado. Nesta condição as referidas pontes comportam-se como conversores de 3 pulsos, cujas harmônicas características seguem a lei de formação dada por  $h = 3k \pm 1$ . Tais pontes caracterizam-se por apresentarem um baixo fator de potência.

No caso da ponte conversora da máquina D a principal componente harmônica de corrente é a 5ª harmônica, que apresenta níveis compatíveis à potência desses conversores. O aparecimento de harmônicas não características (2ª e 4ª) deve-se, provavelmente, a problemas de desequilíbrio no disparo da referida ponte. Estas pontes, ao contrário

das pontes das máquinas A, B e C, caracterizam-se por apresentarem um alto fator de potência.

Constatou-se, através de medições realizadas no 440 V, o aparecimento de um nível DC nas correntes circulantes do lado AC das pontes conversoras das máquinas A, B e C. No caso da máquina A, o valor do nível DC, durante as medições realizadas atingiu a 10% do valor rms da corrente.

À luz das conclusões supracitadas, recomenda-se avaliar a questão do desequilíbrio no disparo das pontes conversoras das máquinas rotativas.

## 7. REFERÊNCIAS

- 1 Kimbark, E. W., "Direct Current Transmission" Willey Interscience, N. Y., 1971.
- 2 Hibbard, J. F. and Lowenstein, M. Z. , "Meeting IEEE 519-1992 Harmonics Limits", TCI - Power Quality Solutions.
- 3 Arrilaga, J. , "Power Systems Harmonics", J. Willey, N. Y., 1985.
- 4 Yacamini, R. and Oliveira, J. C. "Harmonics Produced by Direct Current in Converter Transformers", Proceedings IEE, Vol.125, nº 9, september 1978.
- 5 IEEE Standard 519, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", Piscataway, N. J., 1992.
- 6 Relatório "Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais", GCOI/GCPS , fevereiro/1993.
- 7 Relatório de Medição de Componentes Harmônicas na Planta Gráfica do Cliente "O Globo", março/1997.
- 8 Delaiba, A.C., Oliveira, J.C., Vilaça, A.L.A., Cardoso, J.R., "A Frequency Domain Model for Transformer Loss of Life Estimation Under Non-Sinusoidal Operation", 1º SBQEE, Uberlândia , 1996.
- 9 Electricity Council, "Limits for Harmonics in United Kingdom Electricity Supply System", Engineering Recommendation G5/3, London, 1976.