

HARMÔNICOS EM PRÉDIOS COMERCIAIS: UM CASO REAL

RESUMO

Este artigo pretende relatar os problemas causados pelos harmônicos em sistemas elétricos de prédios comerciais. Algumas cargas em prédios comerciais são fontes de harmônicos, tais como: lâmpadas fluorescentes, cpd (no-break, computadores, etc.), sistema de elevadores possuindo semicondutores (conversores ou inversores), entre outros. Um caso real será apresentado e analisadas as conseqüências dos harmônicos em tal sistema.

ABSTRACT

This article intends to tell the problems caused by the harmonic in electric systems of commercial buildings. Some loads in commercial buildings are sources of harmonic, such as: fluorescent lamps, cpd (no-break, computers, etc.), system of elevators possessing semiconductors (converters or investors), among others. A real case will be presented, and analyzed the consequences of the harmonic in such system.

**José Batista Siqueira
Filho**

*Professor Assistente da
Universidade de Fortaleza
- Mestre (EFEI)*

*Diretor-Técnico da SEI&P
ENGENHARIA*

Eudes Pontes da Silva

*Professor Adjunto da
Universidade de Fortaleza
- Mestre (COPPE)*

1. INTRODUÇÃO

A proliferação das cargas que distorcem as formas de onda de tensão e corrente (cargas não-lineares) nos sistemas elétricos, fez com que, tanto as concessionárias como os consumidores passassem a conviver com o problema da distorção da forma de onda e suas conseqüências. O uso de equipamentos não-lineares (*conversores, inversores de*

freqüência, fornos a arco, lâmpadas não-incandescentes, retificadores de potência (no-break), etc.) estão presentes nos sistemas elétricos, principalmente devido ao avanço da eletrônica de potência nos últimos anos, proporcionando o uso cada vez mais crescente de dispositivos à base de semicondutores.

A instalação de equipamentos com característica não-

linear (cargas elétricas especiais - CEE), provocam distorções nas formas de onda da tensão e corrente do sistema alimentador, surgindo assim, o que chamamos de harmônicos (frequências múltiplas da fundamental - 60 Hz no Brasil).

Os componentes harmônicos provocados pelas cargas não-lineares, propagam-se através da rede elétrica, causando efeitos maléficos a equipamentos e a operação dos sistemas elétricos; dentre estes danos, tem-se:

- * Operação incorreta de equipamentos de controle, proteção e medidores;

- * Aumento de perdas em equipamentos como transformadores, motores, cabos, etc. Em bancos de capacitores, que são equipamentos muito sensíveis aos harmônicos, estes podem ser danificados rapidamente, dependendo somente da configuração do sistema e do nível dos harmônicos;

- * Interferência em sistema de comunicação;

- * Problemas de ressonância. Sobretensões ou sobrecargas.

Nos países como Alemanha, Canadá, Finlândia, Inglaterra entre outros, as normas sobre os harmônicos são diversificadas, demonstrando o grau de dificuldade do problema. Em algumas concessionárias do Brasil, os harmônicos já são uma preocupação e problema, sendo tema de debates tanto nas concessionárias, como em congressos e revistas especializadas na área. Algumas concessionárias têm demonstrado uma tendência de utilizar os limites elaborados na publicação [1]. Ver tabelas 1 e 2.

No Brasil, a nova portaria do DNAEE N° 1569 de 23/12/93, estabeleceu que o fator de potência é de no mínimo 0,92 a partir de março de 1994. O banco de capacitores é o equipamento natural a corrigir o fator de potência. A instalação de bancos de capacitores em sistemas que possuam harmônicos, poderá propiciar o surgimento de ressonâncias, conseqüentemente podendo aparecer situações referentes à sobretensão ou sobrecargas.

Um sistema que aparentemente não apresentaria problemas referentes à correção do fator de potência, em relação aos harmônicos, seria o sistema de prédios comerciais. Este sistema no entanto, poderá vir

a apresentar índices de distorção dos harmônicos acima das normas ou recomendações vigentes, devido à presença de cargas que distorcem as formas de onda da corrente e tensão, tais como: lâmpadas fluorescentes, cpd (no-break, computadores, etc.) e elevadores possuindo semicondutores (conversores ou inversores). Um exemplo de distorção acima dos limites recomendados, em sistemas de prédios comerciais, será então apresentado, bem como os problemas de queima de bancos de capacitores, e má operação de equipamentos eletrônicos, especificamente controladores de fator de potência.

U < 69 [kv]				U < 69 [kv]			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
Ordem	Fdu _n (%)	Ordem	Fdu _n (%)	Ordem	Fdu _n (%)	Ordem	Fdu _n (%)
3,5,7	5	2,4,6	2		2	2,4,6	1
9,11,13	3			9,11,13	1,5		
15 A 25	2	>=8	1	15A	1	>=8	0,5
				25			
>=27	1			>=27	0,5		
FDU = 6 (%)				FDU = 3 (%)			

Tabela 1- limites globais de tensão expressos em porcentagem da tensão fundamental [1]

U < 69 [kv]				U < 69 [kv]			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
Ordem	FDu _n (%)	Ordem	FDu _n (%)	Ordem	FDu _n (%)	Ordem	Fdu _n (%)
3 A 25	1,5			3 A 26	0,6		
>= 27	0,7	Todos	0,6	>= 27	0,4	Todos	0,3%
FDU = 3 (%)				FDU = 1,5 (%)			

Tabela 2- limites de tensão por consumidor expressos em porcentagem da tensão fundamental [1]

2 - HARMÔNICOS

Para fins práticos, a ordem do harmônico que poderá provocar uma ressonância em um sistema, pode ser dado pela equação 1.

$$n_s = \sqrt{\frac{S_{CC}}{Q_{BC}}} \quad (1)$$

onde:

S_{CC} - Potência de curto-circuito na barra no qual está conectado o banco de capacitores em [MVA];

Q_{BC} - Potência do banco de capacitores, em [MVar];

n_s - Harmônico que provocará ressonância no sistema.

Na falta de maiores dados sobre o sistema a equação 1, pode ser reescrita como a equação 2:

$$n_s = \sqrt{\frac{S_{TN}}{X_{TH1} Q_{BC}}} \quad (2)$$

Onde:

X_{TH1} - impedância do transformador;

S_{TN} - Potência nominal do transformador onde o banco de capacitores encontra-se instalado.

A Figura 1 mostra a variação da ordem do harmônico, a qual poderá provocar o fenômeno da ressonância, para uma determinada potência do banco de capacitores com relação a potência do transformador (equação 1).

onde:

curva 1	$X_{TH1} = 3,5\%$
curva 2	$X_{TH1} = 4,0\%$
curva 3	$X_{TH1} = 4,5\%$
curva 4	$X_{TH1} = 5,0\%$
curva 5	$X_{TH1} = 6,0\%$
curva 6	$X_{TH1} = 7,0\%$
curva 7	$X_{TH1} = 8,0\%$
curva 8	$X_{TH1} = 9,0\%$
curva 9	$X_{TH1} = 10,0\%$

Vale ressaltar, que para uma maior precisão, deve-se utilizar a equação 1 ao invés da equação 2.

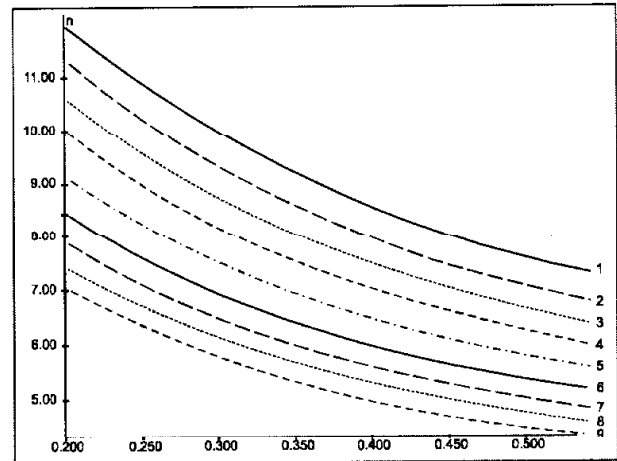


Figura 1 - ordem do harmônico em função da potência de um banco de capacitores em relação à do transformador

3. CARGAS ELÉTRICAS ESPECIAIS DO SISTEMA ELÉTRICO ESTUDADO

Foi observado no sistema predial analisado, a presença de cargas elétricas especiais com intensidades de harmônicos de correntes, suficientes para provocar distorções significativas na forma de onda da tensão. As principais cargas elétricas especiais encontradas no sistema foram: lâmpadas fluorescentes, cpd e sistema de elevadores de corrente alternada (inversores).

O avanço da eletrônica de potência vem proporcionando algumas vantagens e desvantagens na área de eletrotécnica, uma destas desvantagens é o caso do surgimento de harmônicos, onde conversores e inversores fazem parte dos equipamentos que ocasionam este problema. De uma forma genérica, as correntes harmônicas teóricas para conversores de "p" pulsos podem ser dadas pela equação 3. Os harmônicos teóricos e práticos em conversores estão presentes na tabela 3.

$$n = pk \pm 1 \quad (3)$$

onde:

n - ordem do harmônico;

p - número de pulsos;

k - números inteiros (1,2,3...)

Harmônicos	5º	7º	11º	13º	17º	19º
teóricos	0.200	0.140	0.090	0.077	0.069	0.053
práticos	0.175	0.110	0.045	0.024	0.015	0.010

Tabela 3 - harmônicos de correntes teóricos e práticos em pu da fundamental de um conversor.

As Figuras 2 e 3 mostram respectivamente, as formas de onda da corrente dos elevadores do sistema em análise e seu respectivo espectro de harmônicos.

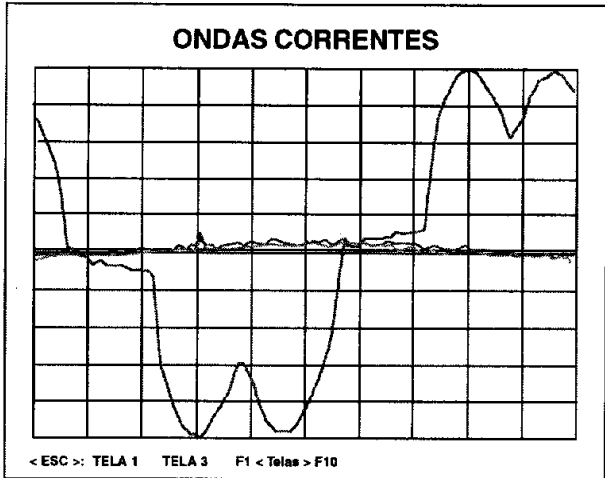


Figura 2 - forma de onda da corrente dos elevadores do prédio em análise.

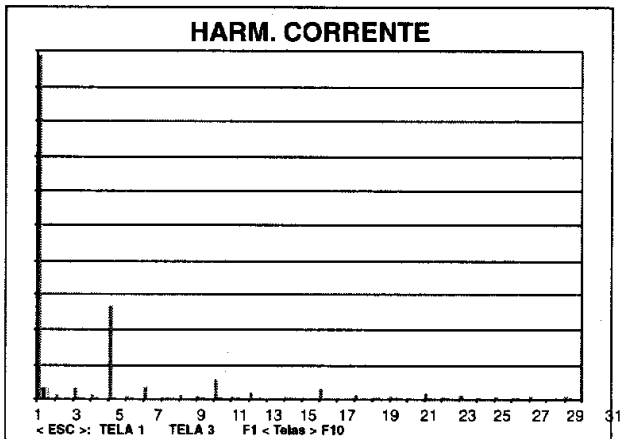


Figura 3 - Espectro da forma de onda da corrente dos elevadores do prédio em análise.

Uma outra carga que deve ser levada em consideração são os harmônicos provocados pelos CPDs, compostos de

computadores, impressoras, estabilizadores e sistemas de tensão ininterruptas (os "no-breaks"). Observe nas figuras 4 e 5 as formas de onda e o espectro de harmônicos de um computador típico. Equipamentos de um CPD como os "no-breaks", que são equipamentos desenvolvidos para fornecer energia elétrica à rede de computadores por alguns instantes, quando na falta da mesma nos sistemas da concessionária, são de elevada importância, devido à sua potência de retificação. Estes equipamentos que podem ser trifásicos ou monofásicos, são compostos de retificadores, os quais são cargas-não-lineares, portanto, distorcem as formas de onda da tensão e corrente.

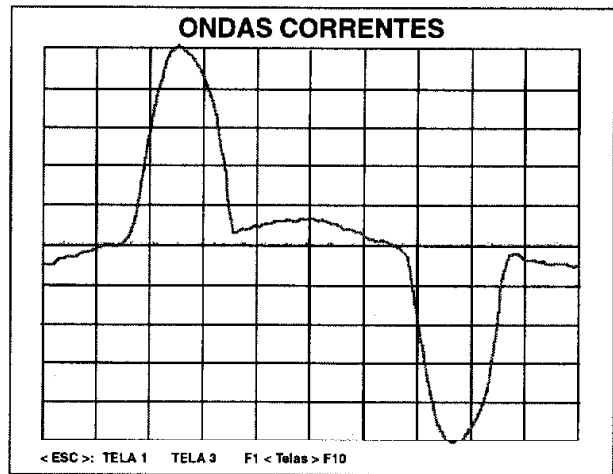


Figura 4 - Forma de onda da corrente de um computador.

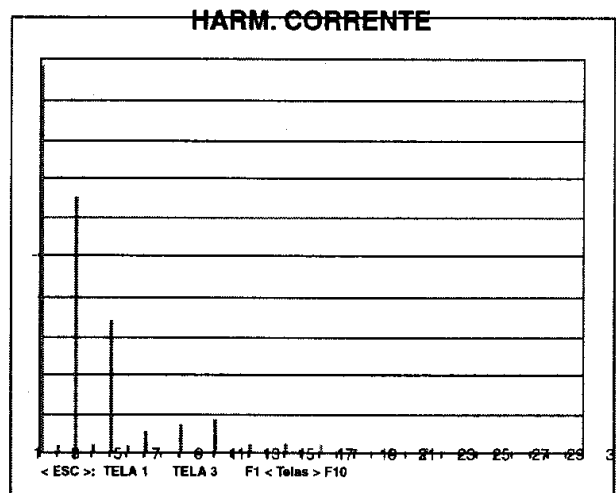


Figura 5 - Espectro de harmônicos relativos à figura 4.

A corrente distorcida, degrada não só o sistema de instalação, como também afeta o

desempenho dos “no-breaks” e dos próprios computadores. Nos computadores quando a tensão de alimentação por vezes fica bastante distorcida, eles se tornam expostos a falhas, como: erros em programas, interferências em monitores de vídeo, inibição de programas e erros nos discos rígidos etc.

As figuras 6 e 7 mostram as formas de onda de corrente do cpd do prédio em análise.

Uma outra carga não-linear em sistemas de prédios comerciais, que merece atenção, são os sistemas de iluminação não incandescentes, tais como: lâmpadas de descargas, fluorescentes ou vapor metálico, operando em conjunto com reatores. Algumas medições em reatores eletromagnéticos e eletrônicos, apresentaram índices elevados de DTH (distorção total) sendo que, foi obtido um valor médio de DHT em torno de 23%, sendo que 20% dos reatores ultrapassaram o valor de 42%.

A tabela 4 apresenta uma pesquisa de medição de harmônicos, para os vários tipos de lâmpadas não incandescentes em uso atual. Estes resultados, demonstram o impacto oriundo destes equipamentos modernos, tais como: fluorescente compacta, incandescente “halógena” alimentada por conversor eletrônico, entre outras lâmpadas de descargas.

As figuras 8 e 9 demonstram as formas de onda da corrente e seu respectivo espectro, de uma parte do sistema de iluminação do prédio em análise.

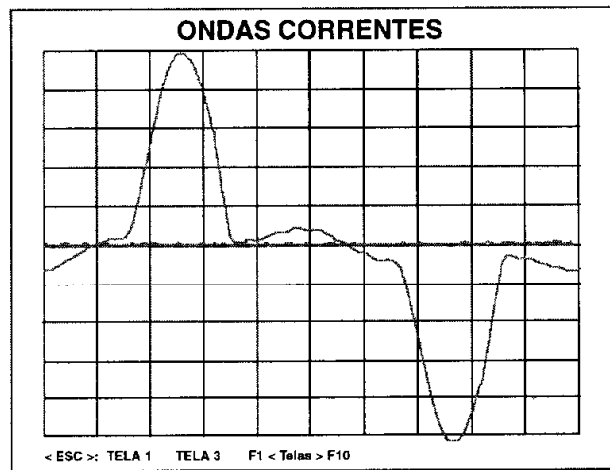


Figura 6 - forma de onda da corrente do CPD do prédio em análise.

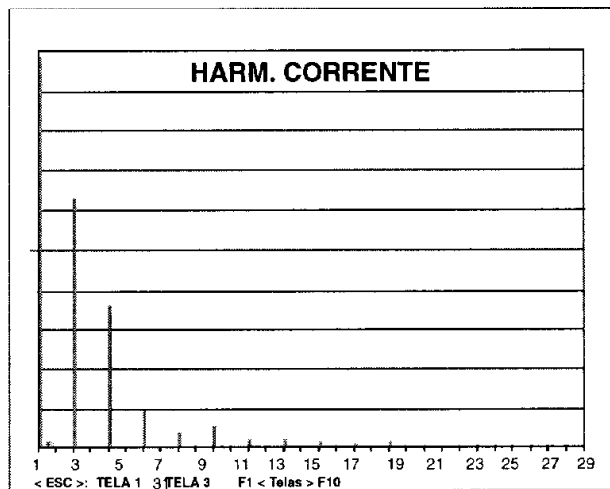


Figura 7 - Espectro da forma de onda da corrente do CPD do prédio em análise.

Tabela 4 - Harmônicos presentes em vários tipos de lâmpadas [5]

IDENTIFICAÇÃO	DHR %	2º %	3º %	4º %	5º %	7º %	11º %	13º %
RLFBU 9 W (A)	12	1.8	12	0.6	2,0	1,5	0,6	0,5
INCANDESCENTE DE 50 W (dimmer)	75	1.7	65	1,9	22	18	11	9,5
INCANDESCENTE DE 50 W (C.E.T.)	12	0,3	5,5	0,2	7,5	5,5	3,2	2,1
LLB 250 W	20	0,4	17	0,3	9,5	2,7	1,2	0,9
RLVMAP 125 W	9,5	1,2	9,0	0,5	2,1	1,1	0,3	0,2
RLSAP 70 W	7,0	0,1	6,5	0,1	2,9	1,0	0,4	2,5

RLFBU - Reator e uma lâmpada fluorescente de base única;

LLM - Lâmpada de luz mista;

RLVMAP - Reator e uma lâmpada a vapor de mercúrio a alta pressão (sem capacitor);

RLSAP - Reator e uma lâmpada a vapor de sódio a alta pressão.-

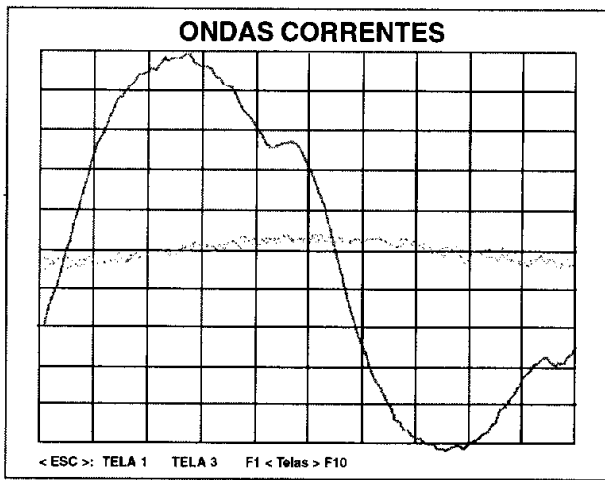


Figura 8 - forma de onda da corrente de um pavimento do prédio em análise contendo somente lâmpadas fluorescentes.

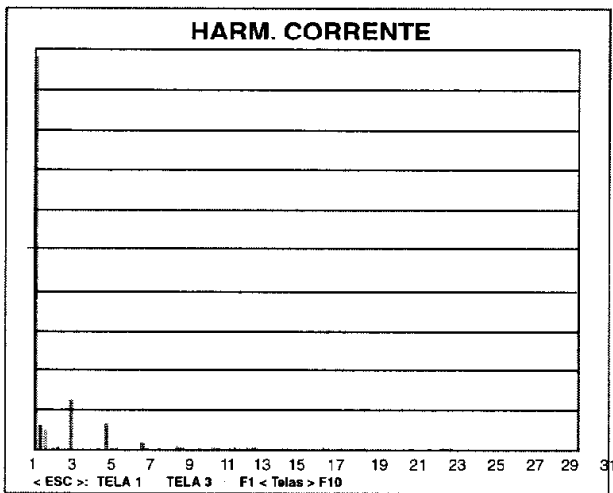


Figura 9 - Espectro da onda da corrente de um pavimento do prédio em análise contendo somente lâmpadas fluorescentes.

4- ANÁLISE DOS HARMÔNICOS NO SISTEMA ESTUDADO

O sistema em estudo mostrado na figura 10, apresentou fatores de distorção total da tensão em média na barra de baixa tensão do transformador de 225 kVA e 500 kVA, respectivamente de 5,7% e 3,6%, sendo o pior caso do sistema, uma distorção de 13% no transformador de 225 kVA, sendo a distorção da corrente dos equipamentos e quadros gerais de cada carga, mostrados na tabela 5, ambos os fatores de distorções estão acima dos valores recomendados por normas ou recomendações.

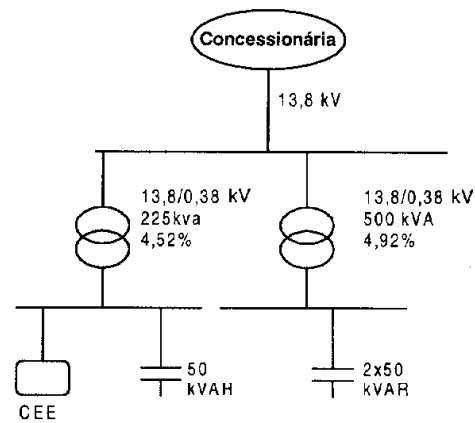


Figura 10- Esquema do caso estudado

O fator de distorção da tensão de valor elevado, na barra do transformador de 500 kVA do sistema, o qual possuía dois bancos de capacitores de 50 kVA, proporcionou a queima dos mesmos, devido ao aumento de perdas, provocado pela distorção da corrente. O banco estava operando com apenas 44 [A] de corrente fundamental, devido a perdas de células capacitivas, constituintes do banco de capacitores de 50 kVAR e 26,4 [A] somente de harmônicos, sendo portanto, uma percentagem de 60%. Nesta previsão, o banco de capacitores operando em condições normais ou seja com 76 [A] de corrente nominal, teria 45,6 [A] de harmônicos de corrente. Neste caso, o banco de capacitores estaria operando com uma corrente de valor eficaz de 88 [A], acarretando portanto uma sobrecorrente de 13%. Vale salientar que, os bancos analisados, foram os substitutos de outros bancos que se danificaram devido à queima dos mesmos. A figura 11 mostra as correntes distorcidas, em um banco de capacitores já danificado do sistema analisado.

Outro fenômeno que indica a presença excessiva de harmônicos no sistema é a operação inadequada de um controlador de fator de potência, o mesmo operava de modo aleatório.

O valor eficaz da corrente do transformador de 225 kVA é de 192 [A] e do transformador de 500 kVA é de 383 [A]. Assim, temos que o transformador de 225 kVA possui 17 [A] de corrente eficaz acima da corrente fundamental, devido aos harmônicos, tendo o transformador de 500 kVA o valor de 32 [A]. Como os transformadores estavam operando

Tabela 5 - Harmônicos correntes de vários quadros de distribuição

MEDIÇÃO DE HARMÔNICOS DE CORRENTES DE CARGAS ELÉTRICAS ESPECIAIS EM UM PRÉDIO COMERCIAL													
HARMÔNICOS	1 [A]	2° [%]	3° [%]	4° [%]	5° [%]	6° [%]	7° [%]	8° [%]	9° [%]	10° [%]	11° [%]	12° [%]	13° [%]
Garagem	3,2	0,8	30,8	0,6	9,0	0,6	1,4	0,5	1,0	0,3	0,6	0,6	0,5
Pavimento 1	29,7	0,2	8,1	0,0	5,6	0,0	2,5	0,0	1,0	0,0	0,8	0,0	0,5
Pavimento 2	12,7	0,4	12,2	0,0	6,3	0,0	2,7	0,0	1,0	0,0	0,8	0,0	0,6
Pavimento 3	7,4	0,7	9,2	0,2	4,7	0,1	1,2	0,2	1,0	0,1	0,7	0,2	0,2
Pavimento 4	9,5	3,6	14,4	0,3	7,1	0,5	2,0	0,3	3,1	0,1	1,7	0,2	0,5
Pavimento 5	2,8	2,0	16,7	1,6	7,0	0,5	2,2	0,6	1,1	0,4	0,8	0,7	0,6
Sub-solo	1,6	3,1	94,0	3,5	82,1	4,0	65,8	4,3	48,6	4,0	32,7	3,7	20,7
Térreo	7,5	3,5	30,4	0,5	9,0	0,2	1,5	0,2	0,9	0,1	0,6	0,2	0,3
Elevador	30,0	1,6	11,8	0,9	18,4	0,8	7,8	0,5	1,9	0,4	4,1	0,4	3,1
CPD	43,6	0,4	61,7	0,4	35,2	0,4	9,2	0,3	5,3	0,2	5,2	0,1	2,0
HARMÔNICOS	14° [%]	15° [%]	16° [%]	17° [%]	18° [%]	19° [%]	20° [%]	21° [%]	22° [%]	23° [%]	24° [%]	25° [%]	DHI [%]
Garagem	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	1,6	0,5	32,3
Pavimento 1	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,3
Pavimento 2	0,0	0,5	0,0	0,4	0,0	0,3	0,0	0,1	0,0	0,2	0,4	0,1	14,1
Pavimento 3	0,1	0,6	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2	0,7	0,2	10,7
Pavimento 4	0,1	0,5	0,1	0,6	0,1	0,7	0,1	0,6	0,1	0,4	0,6	0,3	17,1
Pavimento 5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	1,9	0,5	18,9
Sub-solo	3,8	13,3	3,9	10,8	4,0	11,3	3,9	11,3	3,8	10,5	4,8	9,1	159,6
Térreo	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,7	0,2	32,0
Elevador	0,3	1,1	0,2	1,2	0,3	1,6	0,2	0,7	0,2	0,9	0,2	0,8	24,2
CPD	0,2	2,3	0,2	1,5	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2	0,9	0,3	0,8	72,3

com 50% de carregamento, este índice tornou-se desprezível (ver nas tabelas 3 e 6). Mas caso venha-se a aumentar o carregamento dos mesmos, deve-se levar em consideração os harmônicos existentes no sistema, de modo a não acarretar a queima dos transformadores.

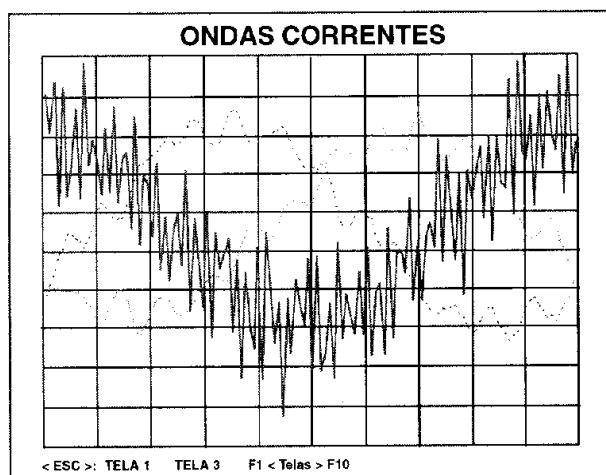


Figura 11 - harmônicos de corrente do banco de capacitores danificado.

Foi observada uma corrente de 6,5 [A] de terceiro harmônico no neutro do transformador de 225 kVA. Isto pode acarretar problemas de interferência nos circuitos de comunicação.

Utilizando-se as recomendações da tabela 2, os fatores de distorções individuais e totais estão acima dos recomendados, tanto para o transformador de 225 kVA, como para o de 500 kVA. Na tabela 7 a distorção total do harmônico de tensão alcançou níveis de 6%, sendo que esta medição não traduz o pior caso no sistema. A situação mais crítica está na partida dos sistemas de elevadores, onde harmônicos temporários de altas amplitudes se fazem presentes. Em uma das partidas do sistema de elevadores, a corrente fundamental solicitada foi de 45 [A], esta situação momentânea proporcionou distorções de tensão na barra do sistema de elevadores em torno de 13%, considerando apenas um elevador partindo. O sistema do prédio então analisado, poderá apresentar níveis de distorções momentâneas da forma de onda da tensão, bem acima dos limites impostos por recomendações ou normas, já que o prédio possui três elevadores, sendo que estes poderão trabalhar em um mesmo instante.

5- Conclusão

Os sistemas de prédios comerciais, aparentemente não possuem cargas elétricas

Tabela 6 - Harmônicos de tensão do transformador de 500 kVA

HARMÔNICOS DO TRANSFORMADOR DE 500 kVA										
FASES	HARMÔNICOS DE TENSÃO									
	U1	U2%	U3%	U4%	U5%	U6%	U7%	U8%	U9%	U10%
A	222,21	0,003	0,451	0	1,769	0,001	0,427	0	0,016	0,086
B	224,08	0,001	0,112	0	1,712	0,005	0,560	0,011	0,072	0,222
C	222,36	0	0	0	1,598	0	0,398	0	0	0,005
FASES	U11%	U12%	U13%	U14%	U15%	U16%	U17%	U18%	U19%	DHT%
A	0,270	0,777	0,662	0,113	0	0,245	0,340	0,032	0,013	3,186
B	0,253	1,180	1,125	0,349	0,157	0,340	0,269	0,035	0	4,341
C	0,346	0,923	0,809	0,263	0,158	0,351	0,067	0	0	3,363

Tabela 7 - Harmônicos de tensão do transformador de 225 kVA

HARMÔNICOS DO TRANSFORMADOR DE 225 kVA										
FASES	HARMÔNICOS DE TENSÃO									
	U1	U2%	U3%	U4%	U5%	U6%	U7%	U8%	U9%	U10%
A	220,60	0,006	0,828	0	2,578	0,008	1,033	0	0,332	0,012
B	222,32	0,003	1,087	0	3,105	0,003	1,322	0,001	0,803	0,009
C	221,39	0,001	0,444	0	2,533	0,009	1,164	0	0,214	0,004
FASES	U11%	U12%	U13%	U14%	U15%	U16%	U17%	U18%	U19%	DHT%
A	0,897	0,008	0,209	0	0,203	0	0,008	0	0,001	6,163
B	1,171	0,004	0,268	0	0,056	0	0	0	0	5,524
C	0,920	0,003	0,306	0,001	0,130	0	0,005	0	0,003	5,399

especiais que sejam prejudiciais ao perfeito andamento do sistema, mas foi demonstrado um caso real de harmônicos em sistemas prediais. Com isso, deve-se ter um certo cuidado quando da instalação de bancos de capacitores nestes sistemas.

A correção do fator de potência por métodos convencionais, em sistemas que possuam harmônicos, poderão não proporcionar resultados satisfatórios. Nestes casos, a instalação de filtros de harmônicos de corrente, objetivando a correção do fator de potência se faz necessária.

Foram observadas correntes de neutro em transformadores do sistema em análise, isto pode acarretar problemas em sistemas de telecomunicações.

Harmônicos de correntes no neutro de transformadores já alcançam níveis significativos, sendo que devemos sobredimensionar componentes do neutro, tais como: fios, cabos, terminais, fusíveis, disjuntores etc.

Os transformadores devem ser sobredimensionados, para evitarem problemas

de perda de vida, devido ao aumento de perdas em consequência de harmônicos nos sistemas.

O sistema então analisado, possui distorções acima de limites recomendados, por normas ou recomendações, havendo então, uma necessidade da instalação de filtros de harmônicos, com o objetivo de atenuar os níveis de harmônicos e corrigir o fator de potência da instalação.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GCOI/SCEL/GTEE, "Critérios e Metodologia para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais", Eletrobrás, Relatório SCEL-GTEE-03/84, Julho, 1984.
- [2] COGO, J. R., "Critérios para dimensionamento de filtros de harmônicos", Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI, Itajubá, Minas Gerais, Brasil.
- [3] STEEPER, D.E., Stratford, R.P., "Reactive compensation and harmonic suppression for industrial power system using thyristor converters", IEEE transactions on industry applications, vol IA-12, no.3, may/june, 1976.

- [4] BOLLINGER Francis, "Harmônicos em instalações de computadores: casos reais e recomendações", *Revista Eletricidade Moderna*, maio de 1991.
- [5] CALIXTO, Elov B. J., Kaiser, W., "Distorção e variação de tensão causadas por sistemas de iluminação", *Revista Eletricidade Moderna*, maio, 1995.
- [6] BATISTA, J.Siqueira Filho, "*Bancos de Capacitores na Presença de Harmônicos*", *Dissertação (Mestrado)*, Escola Federal de Engenharia de Itajubá- EFEI, 1995.
- [7] COGO, J.Roberto, "*Correção do Fator de Potência*", apostila do Curso da Qualidade da Tensão em Sistemas Elétricos, pós-graduação, Itajubá. EFEI. 1995.