

A Solução de Problemas com Harmônicos em um Cliente Industrial: Uma Cooperação entre Concessionária e Consumidor

Flávio R. Garcia(), Tércio dos Santos e Alexandre C. Naves – SADEFEM S/A
Ernesto A. Mertens, Vinicius M. Benichio e Luis F. S. Dias – ELEKTRO S/A*

RESUMO

Este artigo tem por objetivo mostrar os resultados obtidos pelas medições e estudos de harmônicos realizados, tanto pela concessionária de energia e quanto pelo consumidor através de uma consultoria contratada, em uma planta industrial fabricante de embalagens de papel. Este consumidor teve sérios problemas de correção de fator de potência utilizando bancos de capacitores comuns em função das cargas eletrônicas (onduladeiras, máquinas de papel, picadores, etc.) instaladas e pelo aumento significativo da demanda contratada em um sistema elétrico radial e distante da subestação alimentadora. Este trabalho procurará abordar todos os aspectos técnicos analisados na busca de uma solução técnica conjunta para os problemas de correção do Fator de Potência em um ambiente contaminado pelas componentes harmônicas geradas pelas cargas.

PALAVRAS-CHAVE

Fator de Potência, Harmônicos, Cargas Eletrônicas, Nível de Curto-circuito, Medições e Simulações Computacionais.

I. INTRODUÇÃO:

O Sistema elétrico em discussão neste artigo é formado por uma linha de distribuição de 13,8 kV com 18 km de extensão desde a subestação até o PAC com o consumidor.

As cargas do consumidor são distribuídas em nove cabines com transformadores abaixadores para as tensões de 380/220V e 220/127V, descritas a seguir: Cabine 01 – Acabamento, Cabine 02 – Onduladeiras, Cabine 03 – Máquina de Papel I, Cabine 04 – Desagregação, Cabine 05 – Caldeira, Cabine 06 – Máquina de Papel II, Cabine 07 – Picador, Cabine 08 – TAR, Cabine 09 – Administração/Portaria.

Uma grande parte das cargas existentes na instalação tem características não-lineares e geram componentes harmônicos que estão causando problemas de queima dos bancos de capacitores instalados para a correção do fator de potência da instalação, bem como gerando níveis de distorção harmônica elevada na barra de 13,8 kV. Problemas na operação das cargas também foram relatados pelos técnicos da empresa em estudo.

II. DADOS TÉCNICOS E MEDIÇÕES REALIZADAS ANTES DA INSTALAÇÃO DA SOLUÇÃO DE CORREÇÃO DO FP:

As seguintes informações técnicas foram obtidas durante as medições e levantamento de dados em campo, pela concessionária de energia elétrica, para o sistema alimentador e para as cargas conectadas nesta planta industrial.

A – Medições no Sistema Alimentador da ELEKTRO:

- Tensão do Alimentador: 13,8 kV
- Potência de Curto-Circuito: 21 MVA – 85°

As medições preliminares realizadas pela concessionária de energia no PAC (figuras de 1 a 4 abaixo) demonstraram os seguintes resultados de tensão, corrente, distorção harmônica total de tensão e distorção harmônica total de corrente no alimentador da referida instalação:

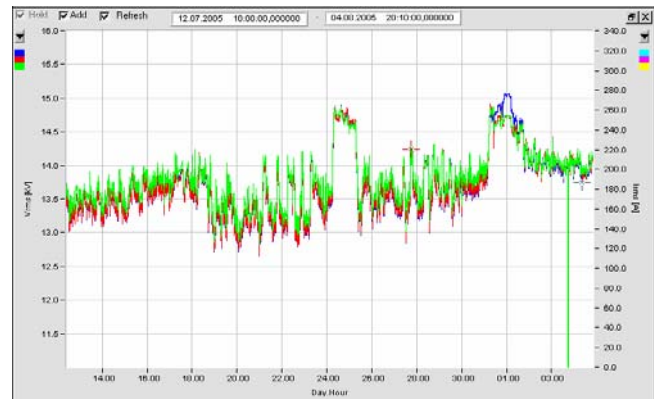


Figura 1 – Tensões RMS no 13,8 kV

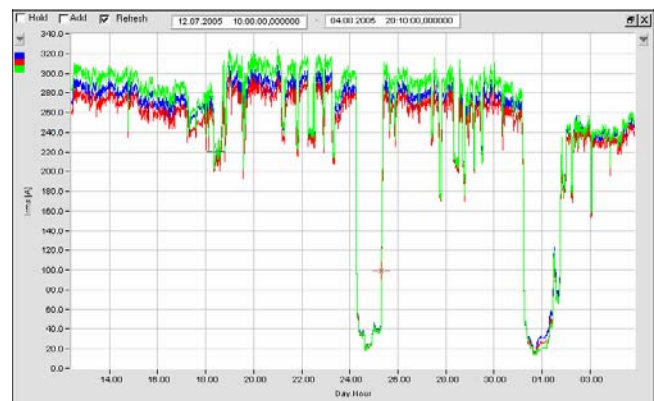


Figura 2 – Correntes RMS no 13,8 kV

As medições mostradas na figura 3 abaixo demonstram níveis elevados de distorção harmônica total de tensão, acima dos limites recomendados pela IEEE-519/1992 e pela ANEEL/ONS, apesar da injeção harmônica de corrente no 13,8 kV não apresentar valores elevados. Tal fato justificou a realização de estudos e medições de harmônicos visando detectar a causa destas distorções e busca pela redução de tais níveis de distorção.

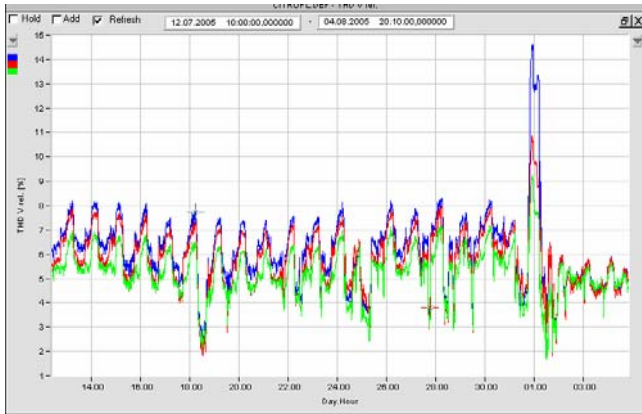


Figura 3 – DHV(%) no 13,8 kV

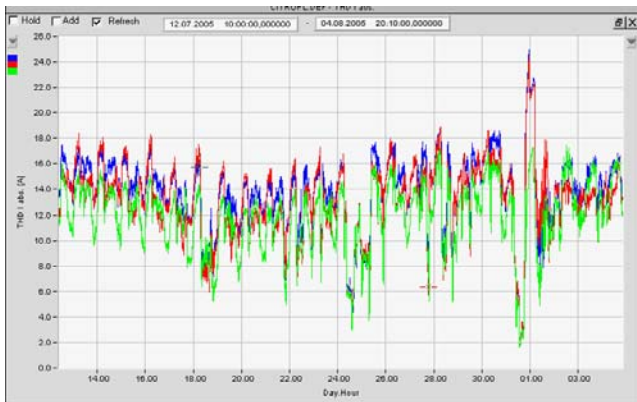


Figura 4 – DHI (A) no 13,8 kV.

B – Sistema Elétrico Industrial:

O sistema elétrico da planta industrial fabricante de embalagens de papel, com os resultados das medições de energia realizadas, está mostrado na tabela I a seguir:

Tabela I – Informações do Sistema Elétrico em Estudo:

CABINE	TRAFO	POT KVA	CARGA ATUAL		
			KW	KVA	FP %
1 – ACABAMENTO	1	112,50	64,30	64,95	99i
	2	500,00	182,95	182,95	100
2 - ONDULADEIRA	1	1.000,00	160,93	160,93	100
	2	225,00	24,55	27,28	90c
3 - MP I	2	1.000,00	287,53	309,17	93i
	3	1.500,00	506,26	532,91	95i
	4	500,00	166,09	171,23	97i
	5	500,00	288,34	313,41	92i
	6	1.000,00	466,26	548,54	85i
4 - DESAGREGAÇÃO	1	1.500,00	614,25	758,33	81i
	2	1.500,00	674,11	766,03	88i
	3	2.000,00	918,39	1.162,52	79i
5 - CALDEIRA	1	500,00	191,37	212,63	90i
	0	500,00	94,30	98,23	96i
6 - MP II	1 (3200A)	2.000,00	271,60	292,04	93i
	1 (2500A)		363,90	375,15	97i
	2 (3200A)	3.000,00	973,25	1.201,54	81i
	2 (630A)		20,00	22,22	90i
	3	750,00	250,00	316,46	79i
7 - PICADOR	1	1.000,00	15,00	28,85	52i
8 - TAR	1	225,00	47,84	58,34	82i
9 - PORTARIA	1	30,00			
TOTAL	20	19.342,50	6.581,22	7.603,72	86,55%

Apesar da instalação recente dos bancos de capacitores o fator de potência em vários pontos da instalação continuou abaixo dos 0,92 comprometendo a correção global no PAC e gerando pesadas “multas” por baixo FP.

As medições realizadas nos bancos de capacitores, mostradas na tabela II a seguir, demonstraram que grande parte da potência reativa instalada já estava comprometida, provavelmente pela presença de harmônicos e das ressonâncias geradas pela interação entre capacitor e o sistema elétrico.

Os capacitores encontrados na instalação utilizavam tecnologia PPM que possui valores baixos de suportabilidade aos harmônicos de tensão ($DHV \leq 3\%$) e de corrente ($DHI \leq 15\%$), com base na experiência de campo de fabricantes nacionais de capacitores com este tipo de tecnologia empregada.

Tabela II – Medições de Energia nos Capacitores:

CABINE	TRAFO	KVar Instalados	Correntes Medidas nos Capacitores Existentes			KVar Efetivo
			FASE A (A)	FASE B (A)	FASE C (A)	
1 – Acabamento	2	240	92	95	89	60,72
2 – Onduladeira	1	110	100	101	97	65,56
	2	185	0	0	0	0
3 – MPI	3	130	151	115	123	85,58
	4	180	52	56	63	37,62
	5	110	0	0	0	0
	6	125	49	32	51	29,04
4 – Desagregação	2	150	159	165	161	106,7
5 – Caldeira	1	120	137	143	135	91,3
TOTAL	20	1.350,00				476,52

III – ESTUDOS REALIZADOS:

A – Estudos de Fator de Potência:

A análise da memória de massa do medidor de energia da ELEKTRO, mostrada nas figuras 5, 6 e 7 abaixo demonstrou a necessidade de reativos globais visando à correção do FP para valores superiores a 0,92, além dos bancos de capacitores já instalados na instalação elétrica em estudo:

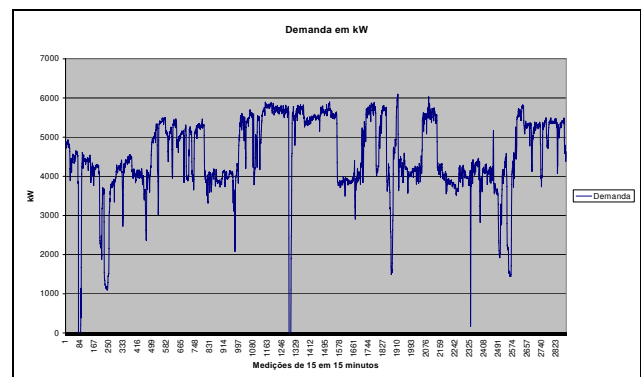


Figura 5 – Demanda em kW

A necessidade de 1800 kvar definida para a correção de FP, deve ser somada aos valores dos kvar referentes aos bancos de capacitores já existentes (715 kvar). A distribuição destes reativos por cabine de transformação está demonstrada na Tabela III.

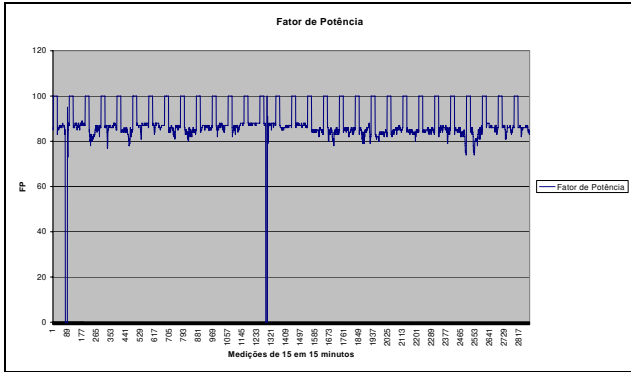


Figura 6 – Fator de Potência.

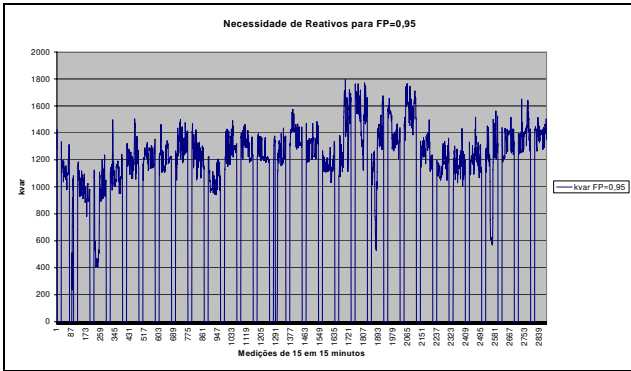


Figura 7 – Necessidade de Reativos para FP > 0,92.

Tabela III – Necessidade de Reativos para FP > 0,92:

ESTUDO DE ALOCAÇÃO DE REATIVOS			
CABINE	TRAFO	POT KVA	KVAR
1 - ACABAMENTO	1	112,5	0
	2	500	0
2 - ONDULADEIRA	1	1.000,00	50
	2	1.000,00	250
3 - MP I	1	225	0
	2	1.000,00	250
	3	1.500,00	120
	4	500	0
	5	500	75
	6	1.000,00	250
4 - DESAGREGAÇÃO	1	1.500,00	300
	2	1.500,00	250
	3	2.000,00	500
5 - CALDEIRA	1	500	50
	2	500	0
6 - MP II	1	3000	50
	2	2.000,00	500
	3	750	150
7 - PICADOR	1	1.000,00	0
8 - TAR	1	225	20
9 - PORTARIA	1	30	0
Obs: Todos os bancos de capacitores existentes deverão ser retirados de operação			

B – Estudos de Fluxo de Harmônico:

Em função dos problemas já ocorridos com bancos de capacitores “puros” instalados anteriormente, estudos de harmônicos foram realizados visando à busca de soluções que permitissem a correção do fator de potência e proteção de equipamentos e sistemas contra a ocorrência de ressonâncias harmônicas em frequências “perigosas”.

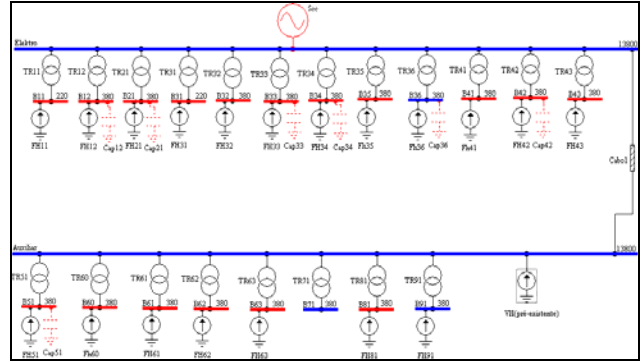


Figura 8 – Diagrama unifilar utilizado nas simulações computacionais de fluxo de carga e fluxo de harmônicos.

Foram realizadas simulações computacionais de fluxo harmônicos no sistema elétrico da fábrica de embalagens de papel, e os seguintes resultados de distorção harmônica total de tensão e curvas de impedância harmônica foram obtidos (figuras 8 a 13):

a) Com os bancos de capacitores existentes medidos:

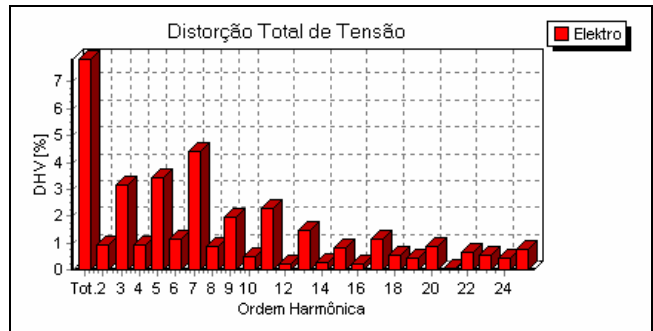


Figura 9 – Distorção harmônica total de tensão no 13,8 kV com os bancos de capacitores existentes.

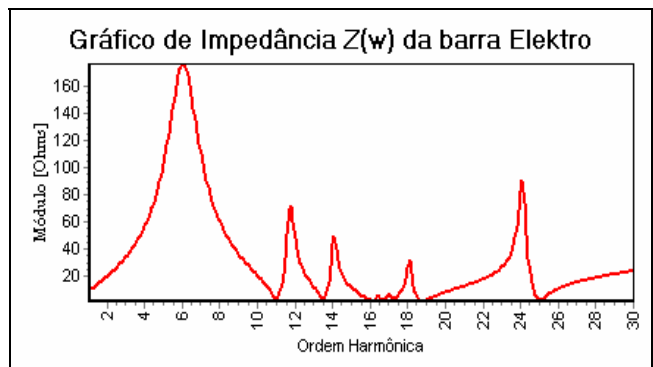


Figura 10 – Impedância versus a frequência no 13,8 kV. Nota: Valores muito próximos às distorções harmônicas de

tensão medidas pela concessionária no 13,8 kV (P95%), refletem que os modelos utilizados nos estudos estão próximos das condições reais em campo.

b) Com a instalação dos reativos para a correção do FP através de filtros de harmônicos de dessintonia:

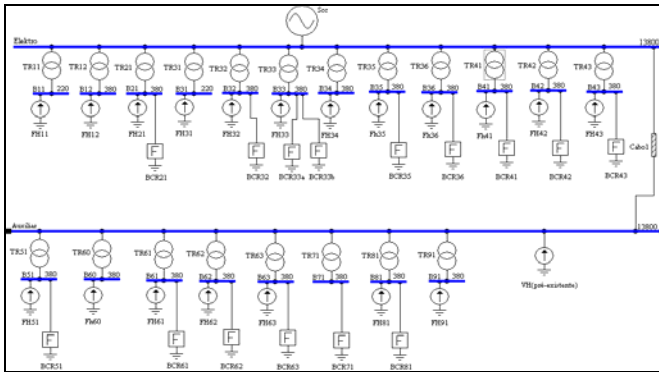


Figura 11 – Diagrama Unifilar com a Correção do Fator de Potência através de Filtros de Dessintonia (222 Hz).

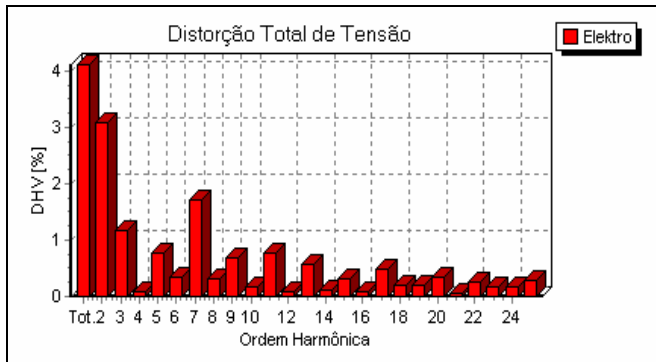


Figura 12 – Distorsão harmônica total de tensão no 13,8 kV com os filtros de dessintonia – 222 Hz.

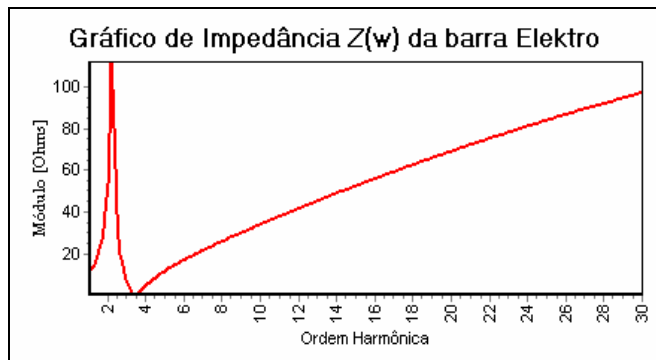


Figura 13 – Impedância harmônica versus a frequência na barra de 13,8 kV.

A análise dos resultados dos estudos acima mostrados (figuras 11, 12 e 13) indica que a substituição dos bancos de capacitores “puros” existentes por filtros de dessintonia, reduziu as várias ressonâncias harmônicas existentes a uma única, definida em uma faixa de frequência não perigosa para o sistema elétrico em estudo.

Esta transformação dos bancos de capacitores em filtros de dessintonia levou a uma significativa redução nas distorções harmônicas de tensão na barra de 13,8 kV e, por conseguinte, em todas as barras internas da fábrica de embalagens de papel, pois eliminou as ressonâncias geradas pelos bancos de capacitores inicialmente instalados.

IV – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES APÓS A INSTALAÇÃO DOS FILTROS DE DESSINTONIA PARA CORREÇÃO DO FP:

As medições mostradas nas figuras 14 a 18 a seguir foram realizadas na barra de 13,8 kV, pela concessionária de energia após a substituição dos bancos de capacitores por filtros de dessintonia (em 02/08/2005) visando à correção do FP da fábrica de embalagens de papel.

As medições foram realizadas no período de 12/07/2005 a 31/08/2005.

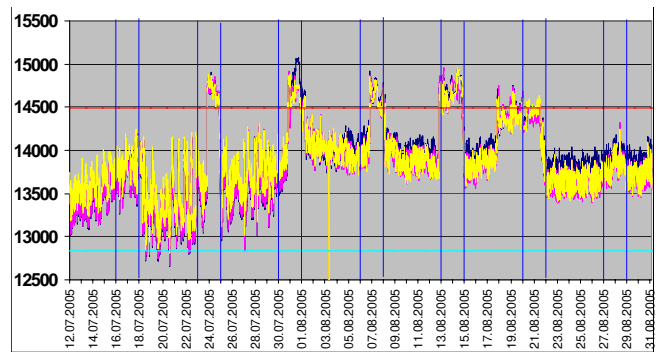


Figura 14 – Perfil de Tensão no 13,8 kV.

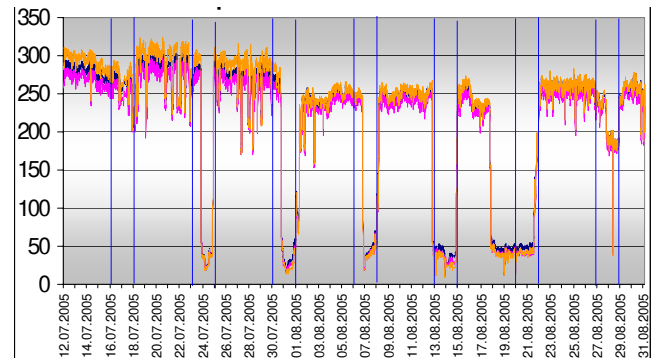


Figura 15 – Perfil de Corrente no 13,8 kV.

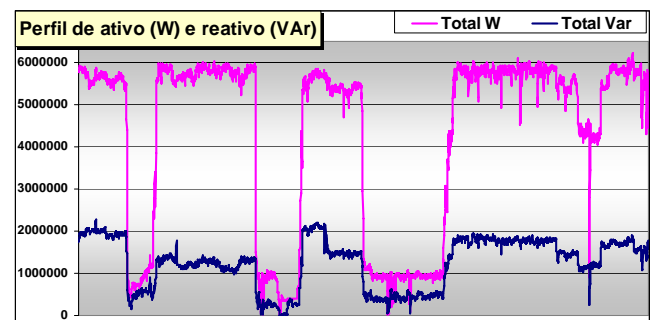


Figura 16 – Potência Ativa e Potência Reativa.

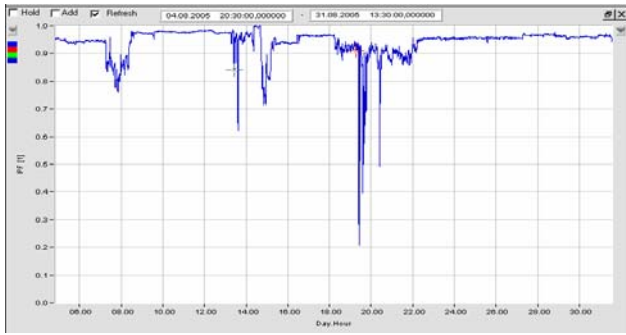


Figura 17 – Fator de Potência da Instalação.

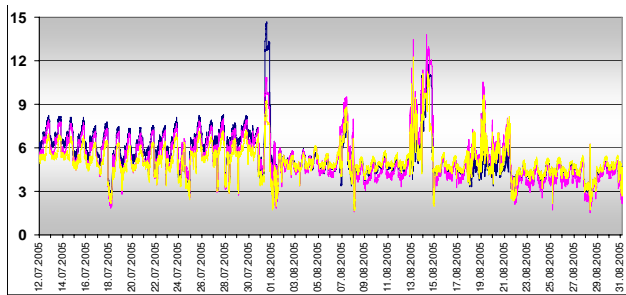


Figura 18 – Distorção harmônica total de tensão (%) na barra de 13,8 kV.

As figuras acima demonstram uma sensível melhora nos níveis de distorção harmônica de tensão na barra de 13,8 kV da concessionária, bem como a correção do FP da instalação para valores acima de 0,92 sem danificar os equipamentos de compensação reativa fornecidos (filtros de dessintonia).

V – EFEITOS DA INTERAÇÃO ENTRE OS FILTROS DE DESSINTONIA E O SISTEMA ELÉTRICO.

No início da operação dos filtros de dessintonia, alguns problemas de sobretensão na operação em condições de baixa carga ocorreram entre os estágios fixos e o sistema elétrico, como pode ser observado nos finais de semana nas medições acima, com aumento das tensões rms e das distorções harmônicas de tensões.

Tais problemas, causados pela existência de estágios fixos quando da ocorrência de interrupções de energia ou desligamento/energização dos transformadores, causavam sobretensões excessivas na baixa tensão. Tal fato levou a ocorrência de arcos voltaicos nas chaves seccionadoras com os fusíveis de proteção dos estágios fixos dos filtros de dessintonia.

Estes estágios foram fornecidos de forma fixa, conforme solicitação do cliente, visando à correção do fator de potência dos transformadores que operavam praticamente a vazios nos finais de semana.

O trabalho conjunto entre a concessionária, fabricante dos filtros de dessintonia e o cliente trouxe a solução do problema das sobretensões, com o automatismo dos estágios fixos, de forma a viabilizar o desligamento dos mesmos quando da ocorrência de interrupções no suprimento de energia. Este automatismo visa permitir a entrada em operação destes estágios 60 segundos após a volta da tensão na barra de BT.

Este tempo é suficiente para eliminação de quaisquer transitórios de tensão e, por consequência, evitando-se dessa forma, que eventuais sobretensões pudessem ocorrer nos equipamentos de compensação reativa no momento de retorno da energia.

VI. CONCLUSÕES

Com base em todos os resultados de medições em campo, estudos e simulações computacionais, as seguintes conclusões podem ser mencionadas:

- A correção de fator de potência em sistemas elétricos com baixo nível de curto-circuito deve ser feita com muito critério tendo em vista a ocorrência de ressonâncias em frequências consideradas críticas como 180, 300, 420 e 660 Hz.
- A utilização de filtros harmônicos dessintonizados em frequências definidas através de um estudo de fluxo harmônico criterioso, permite que a correção do fator de potência seja feita de forma segura, sem que ressonâncias sejam geradas e que o equipamento de compensação reativa perca vida útil prematuramente.
- A utilização de estágios fixos para correção do fator de potência deve contemplar dispositivo para evitar os efeitos da interrupção de energia com a re-energização dos transformadores estando os capacitores carregados e desta forma evitar sobretensões indesejáveis e danos aos equipamentos.

VII - REFERÊNCIAS:

Documentos:

- [1] Relatório SADEFEM - Estudos de Harmônicos de Correção do Fator de Potência para Fábrica de Embalagens de Papel – Maio de 2005;
- [2] Relatórios Elektro – Análise de Medição para o Cliente “Fábrica de Embalagens de Papel” – Setembro de 2005 e Maio de 2006.

Normas:

- [3] IEEE Std 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Systems” – April, 12th, 1992.
- [4] IEEE Std 1531-2003 - Guide for Application and Specification of Harmonic Filters, November, 24th, 2003.

VIII - BIOGRAFIA



Flávio Resende Garcia graduou-se em Engenharia Elétrica em Julho de 1988 e obteve o título de Mestre em Harmônicos e Cargas Elétricas Especiais em Maio de 1992. Sua experiência profissional inclui empresas como INEPAR (1992-2002), LACTEC (2002-2003), IESA (2003-2006) e SADEFEM (2006-atual) desenvolvendo estudos técnicos nas áreas de Qualidade de Energia Elétrica, Eficiência Energética e Compensação Reativa e participando projetos de P&Dem conjunto com Universidades e Institutos de Pesquisa e Desenvolvimento.



Ernesto A. Mertens é engenheiro eletricista formado em 1983 pela Faculdade de Engenharia São Paulo. De 1986 a 1998, trabalhou na CESP – Companhia Energética de São Paulo, na diretoria de Distribuição, tendo exercido atividades nas áreas de Planejamento, Operação, Projetos e Obras. Após a privatização da CESP, passou a exercer suas atividades na ELEKTRO Eletricidade e Serviços S.A. Atualmente exerce suas atividades na Engenharia, atuando especificamente na área de Qualidade de Energia; Está realizando curso de pós-graduação em Planejamento Energético na UNICAMP.



Luis Fernando Souza Dias - Formado na Escola Técnica Industrial João Batista de Lima Figueiredo, Mococa - SP, em 1977. De 1978 a 1993, trabalhou na CESP – Companhia Energética de São Paulo, Na diretoria de Geração e Transmissão, tendo exercido atividades nas áreas de manutenção de grupos geradores e subestações; Após a privatização da CESP, passou a exercer suas atividades na ELEKTRO Eletricidade e Serviços S.A. De 1993 até a presente data exerce suas atividades na Engenharia, atuando especificamente na Área de Qualidade de Energia.



Tércio dos Santos - Formado na Escola Técnica Colégio Flamingo em 1985, técnico em eletro-eletrônica, trabalhando em empresas como ITEL, INEPAR, IESA. Atualmente trabalha na SADEFEM como técnico de aplicação de capacitores realizando levantamentos de dados e medições de energia e harmônicos, bem como estudos técnicos para a definição e instalação de bancos de capacitores e filtros de harmônicos em baixa e média tensão no ramo industrial.



Alexandre Carvalho Naves, com graduação pela Universidade Federal de Uberlândia em 1999 e pós-graduação em Qualidade e Racionalização de Energia Elétrica em 2000. Trabalhou em empresas como INEPAR e IESA desde 2001 e atualmente trabalha na SADEFEM S/A na área de engenharia de aplicação em produtos de compensação reativa realizando estudos e medições nas áreas de qualidade de energia elétrica, harmônicos e compensação de reativos em série e em paralelo.



Vinícius Marques Benichio – Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia em 1991, e MBA em Gerência de Projetos de pela FGV em 2004, trabalhou nas empresas CEMIG, CESP e na ELEKTRO onde atualmente exerce suas atividades como Consultor de Engenharia nas áreas de Qualidade de Energia Elétrica, Proteção de Sistemas Elétricos e Equipamentos para a Distribuição de Energia Elétrica.