

Harmônicos em sistemas industriais: uma cooperação entre concessionária e consumidor

Este artigo objetiva mostrar os resultados obtidos com as medições e os estudos de harmônicos realizados na planta industrial de uma fábrica de embalagens de papel. As análises foram feitas pela concessionária de energia Elektro e pelo consumidor, por meio de uma consultoria especializada.

O consumidor teve sérios problemas de correção de fator de potência empregando bancos de capacitores comuns em função das cargas eletrônicas instaladas (onduladeiras, máquinas de papel, picadores, etc.) e do aumento significativo da demanda contratada em um sistema elétrico radial e distante da subestação alimentadora.

Procuraremos 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.

O sistema

O sistema elétrico em discussão neste artigo é constituído por uma linha de distribuição de 13,8 kV com 18 km de extensão, desde a subestação até o ponto de acoplamento comum (PAC) do consumidor. As cargas do consumidor são distribuídas em nove cabines com transformadores abaixadores para as tensões de 380 V/220 V e 220 V/127 V, descritas a seguir: cabine 1 – acabamento; cabine 2 – onduladeiras; cabine 3 – máquina de papel I; cabine 4 – desagregação; cabine 5 – caldeira, cabine 6 – máquina de papel II; cabine 7 – picador; cabine 8 – TAR; cabine 9 – 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.

Dados técnicos e medições realizadas

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

Medições no sistema alimentador da concessionária

- 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) demonstraram os seguintes resultados de tensão, corrente, distorção harmônica total de tensão e distorção harmônica total de corrente no alimentador da referida instalação:

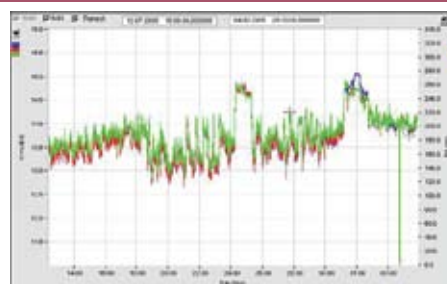


Figura 1 – Tensões RMS no 13,8 kV

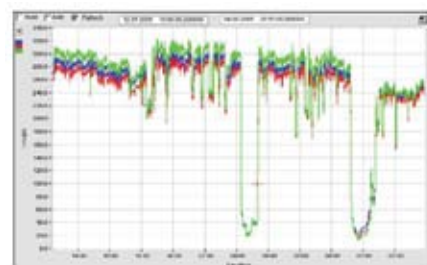


Figura 2 – Correntes RMS no 13,8 kV

QUALIDADE DE ENERGIA

As medições mostradas na Figura 3, apesar de a injeção harmônica de corrente no 13,8 kV não apresentar valores elevados, demonstram níveis altos de distorção harmônica total de tensão, acima dos limites recomendados pela IEEE 519/1992 e pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel)/Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Tal fato justificou a realização de estudos e medições de harmônicos visando a detectar a causa das distorções e a buscar soluções para a redução desses níveis de distorção.

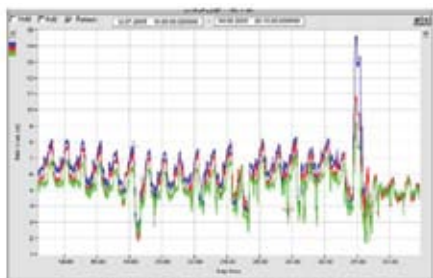


Figura 3 – DHTV (%) no 13,8 kV

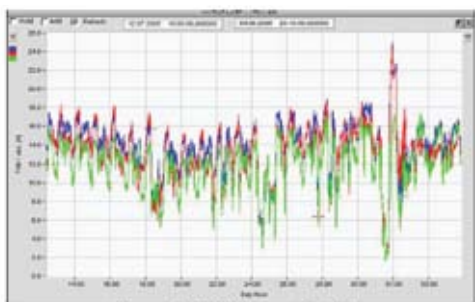


Figura 4 – DHA (%) no 13,8 kV

Sistema elétrico industrial

Os resultados das medições de energia realizadas no sistema elétrico da planta industrial estão na Tabela I:

Tabela I – Informações do sistema elétrico em estudo

Cabine	Trafo	Pot. kVA	Carga atual		
			kW	kVA	FP %
Acabamento	1	112,50	64,30	64,95	99i
	2	500,00	182,95	182,95	100
Onduladeira	1	1.000,00	160,93	160,93	100
	1	225,00	24,55	27,28	90c
	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
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
Caldeira	1	500,00	191,37	212,63	90i
	0	500,00	94,30	98,23	96i
MP II	1 (3.200 A)	2.000,00	271,60	292,04	93i
	1 (2.500 A)		363,90	375,15	97i
	2 (3.200 A)	3.000,00	973,25	1.201,54	81i
	2 (630 A)		20,00	22,22	90i
Picador	3	750,00	250,00	316,46	79i
TAR	1	1.000,00	15,00	28,85	52i
Portaria	1	225,00	47,84	58,34	82i
Portaria	1	30,00			
Total	20	19.342,50	6.581,22	7.603,72	86,55%

Apesar de a instalação dos bancos de capacitores ser recente, o fator de potência em vários pontos da instalação continuou abaixo dos 0,92, fato que comprometeu a correção global no PAC e culminou em pesadas multas ao consumidor.

As medições realizadas nos bancos de capacitores, evidenciadas na Tabela II, demonstraram que grande parte da potência reativa instalada já estava comprometida, provavelmente pela presença de harmônicos e pelas 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 ($DHI \leq 15\%$), comparada à experiência de fabricantes nacionais que empregaram capacitores com esse tipo de tecnologia.

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)	
Acabamento	2	240	92	95	89	60,72
	1	110	100	101	97	65,56
MPI	2	185	0	0	0	0
	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
	2	150	159	165	161	106,7
Desagregação	1	120	137	143	135	91,3
	Total	20	1.350			476,52

Estudos realizados

Fator de potência

A análise da memória de massa do medidor de energia da ELEKTRO – Figuras 5, 6 e 7 – demonstrou a necessidade de reativos globais visando à correção do fator de potência para valores superiores a 0,92, além dos bancos de capacitores já instalados na instalação elétrica em estudo.

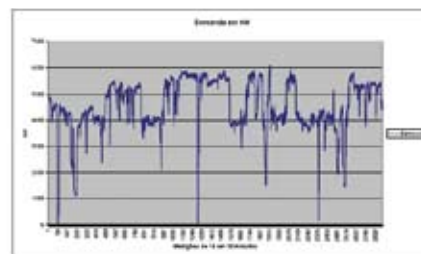


Figura 5 – Demanda em kW

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.

QUALIDADE DE ENERGIA

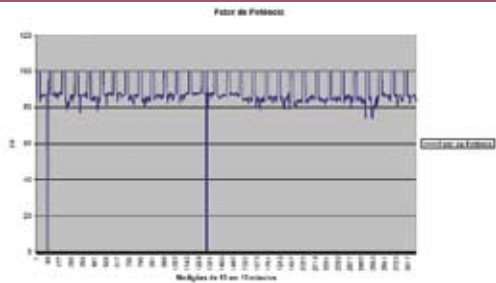


Figura 6 – Fator de potência



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
Acabamento	1	112,5	0
	2	500	0
Onduladeira	1	1.000,00	50
	1	225	0
MP I	2	1.000,00	250
	3	1.500,00	120
	4	500	0
	5	500	75
	6	1.000,00	250
	1	1.500,00	300
Desagregação	2	1.500,00	250
	3	2.000,00	500
	1	500	50
Caldeira	0	500	0
	1	3000	50
MP II	2	2.000,00	500
	3	750	150
	1	1.000,00	0
Picador	1	225	20
TAR	1	30	0
Portaria	1	30	0

Estudos de fluxo de harmônico

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



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

Foram realizadas simulações computacionais de fluxo harmônico 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 frequência na tensão de 13,8 kV

Nota: Valores muito próximos às distorções harmônicas de tensão medidas pela concessionária no 13,8 kV (P 95%) refletem que os modelos utilizados nos estudos estão próximos às condições reais em campo.

b) Com a instalação dos reativos para a correção do fator de potência por meio de filtros harmônicos de dessintonia:

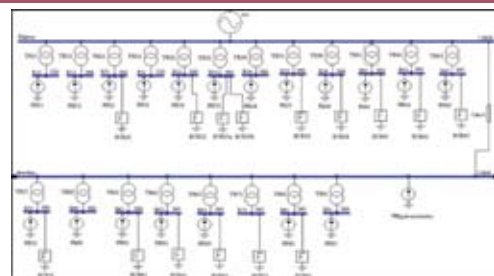


Figura 11 – Esquema unifilar com a correção do fator de potência por meio de filtros de dessintonia (222 Hz)



Figura 12 – Distorção harmônica total de tensão no 13,8 kV com filtros de dessintonia (222 Hz)

QUALIDADE DE ENERGIA



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

A análise dos resultados dos estudos anteriormente mostrados (Figuras 11, 12 e 13) indica que a substituição dos bancos de capacitores “puros” existentes por filtros de dessintonia reduziu as diversas 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, conseqüentemente, em todas as barras internas da fábrica de embalagens de papel, pois eliminou as ressonâncias geradas pelos bancos de capacitores inicialmente instalados.

Resultados das medições após a instalação dos filtros de dessintonia

As medições apresentadas nas Figuras 14 a 18 foram efetuadas na barra de 13,8 kV pela concessionária de energia, após a substituição dos bancos de capacitores por filtros de dessintonia e visando à correção do fator de potência da unidade industrial.

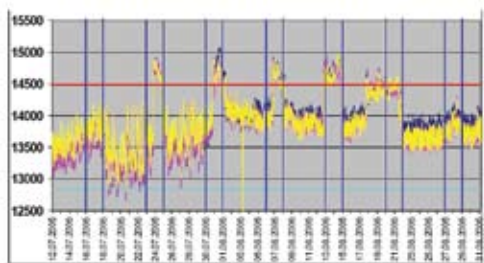


Figura 14 – Perfil de tensão na barra de 13,8 kV

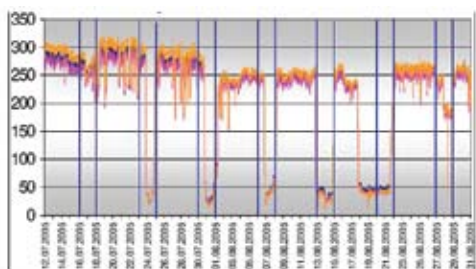


Figura 15 – Perfil de corrente na barra de 13,8 kV

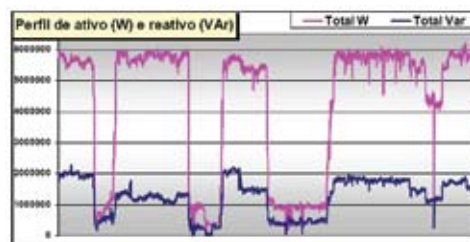


Figura 16 – Potência ativa e potência reativa

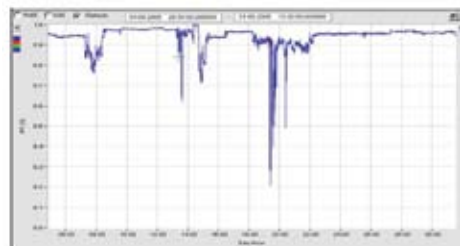


Figura 17 – Fator de potência da instalação

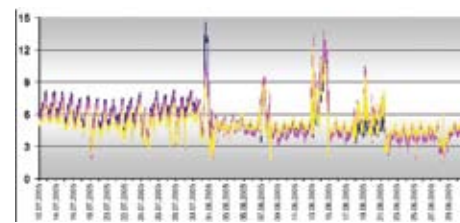


Figura 18 – Distorção harmônica total de tensão (%) na barra de 13,8 kV

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

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 das medições anteriores, com aumento das tensões RMS e das distorções harmônicas de tensões.

Tais problemas, causados pela existência de estágios fixos com a ocorrência de interrupções de energia ou desligamento/energização dos transformadores, provocavam sobretensões excessivas na rede de 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 vazio nos finais de semana.

QUALIDADE DE ENERGIA

O trabalho conjunto entre a concessionária, a fabricante dos filtros de dessintonia e o cliente trouxe a solução para o problema das sobretensões com o automatismo dos estágios fixos. Dessa forma, viabilizou-se o desligamento dos equipamentos com a ocorrência de interrupções no suprimento de energia. Este automatismo permite a entrada em operação destes estágios 60 segundos após a volta da tensão na barra de baixa tensão. Este tempo é suficiente para eliminação de qualquer transitório de tensão, evitando que eventuais sobretensões ocorram nos equipamentos de compensação reativa no momento de retorno da energia.

Conclusões

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

- 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 Hz, 300 Hz, 420 Hz e 660 Hz.
- A utilização de filtros harmônicos dessintonizados em frequências definidas em 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 um dispositivo para evitar os efeitos da interrupção de energia com a reenergização dos transformadores, com os capacitores carregados e, dessa forma, evitando sobretensões indesejáveis e danos aos equipamentos.

Referências bibliográficas

Relatório SADEFEM – estudos de harmônicos de correção do fator de potência para fábrica de embalagens de papel, maio 2005.

Relatórios Elektro – análise de medição para o cliente “fábrica de embalagens de papel”, set. 2005 e maio 2006.

Norma IEEE Std 519-1992 – IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Systems, April, 12th, 1992.

Norma IEEE Std 1531-2003 – Guide for Application and Specification of Harmonic Filters, November, 24th, 2003.

Flávio Resende Garcia é engenheiro eletricista, mestre em Harmônicos e Cargas Elétricas Especiais e atua na Sadefem na área de qualidade de energia, eficiência energética e compensação reativa.

Colaboraram:

Ernesto A. Mertens, engenheiro eletricista da Elektro.

Luis Fernando Souza Dias, engenheiro da Elektro.

Tércio dos Santos, técnico em eletroeletrônica e funcionário da Sadefem.

Alexandre Carvalho Nunes, engenheiro de aplicação da Sadefem.

Vinicius Marques Benichio, engenheiro eletricista e consultor de engenharia nas áreas de qualidade de energia elétrica, proteção de sistemas elétricos e equipamentos para a distribuição de energia