



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GCQ 27  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

**GRUPO XIII  
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DA  
ENERGIA ELÉTRICA**

**EFEITOS DE HARMÔNICAS NOS SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS:  
CASOS DOCUMENTADOS**

**Marcelo A. Barbosa  
B&A Engenharia e Serviços Ltda**

**RESUMO**

Este trabalho tem por objetivo apresentar alguns estudos de casos realizados em consumidores industriais, cujas cargas não-lineares instaladas vieram a causar problemas nas respectivas plantas, em consequência da disseminação de harmônicas no sistema elétrico.

Para cada um dos cinco casos apresentados são discutidas as particularidades de cada um; os efeitos das harmônicas sobre os equipamentos e o processo e, ainda, as medidas mitigadoras adotadas. Estas soluções foram sempre subsidiadas por medições de tensões e correntes harmônicas no sistema e a comparação com simulações em computador para estudos de penetração harmônica.

**PALAVRAS-CHAVE**

Interferências, Harmônicas, Casos

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Os tipos de fontes geradoras de harmônicas presentes nos sistemas elétricos são bastante variados incluindo: transformadores, máquinas síncronas, motores de indução, iluminação de descarga gasosa, fornos a arco elétrico e conversores estáticos de potência que são, na atualidade, as principais fontes de correntes harmônicas e as que causam grande preocupação para o futuro.

Os principais efeitos das correntes e tensões harmônicas geradas por estes equipamentos dentro do sistema elétrico dizem respeito a:

- amplificação dos níveis de harmônicas devido à ressonância série ou paralela;
- redução da eficiência com o aumento de perdas no sistema;
- envelhecimento da isolamento dos componentes elétricos da planta e consequente redução de sua vida útil; e
- má operação de equipamentos de uma forma geral.

Este trabalho apresenta alguns estudos de casos realizados em grandes consumidores industriais, cujas cargas não lineares instaladas vieram a causar problemas na planta em consequência da disseminação de harmônicas nos sistemas elétricos.

Os casos que serão apresentados com os respectivos problemas e aspectos envolvidos são os seguintes:

- **Fábrica de alumínio na Bahia:** perdas anormais no sistema elétrico particularmente em redes e transformadores. Influências no sistema de medição de energia e na correção do fator de potência. Deterioração da vida útil de capacitores e sobretensões de origem harmônica aumentando a severidade de transitórios. Consequências de alto potencial de danos e riscos de segurança culminando com a explosão de unidades capacitivas e disjuntores de manobra;
- **Fábrica de galvanização no Rio de Janeiro:** configurações alternativas do sistema elétrico criando situações de ressonância paralela. Explosões de unidades capacitivas mesmo com filtros de harmônicas instalados. Consequências adicionais de filtros extremamente sintonizados.
- **Fábrica de ferro Ligas no Mato Grosso:** uma fábrica com fornos a arco elétrico que vinha operando normalmente ao longo dos anos, passa a experimentar problemas de ressonância paralela. A influência da evolução da potência de curto-circuito e da compensação reativa.
- **Fábrica de tecidos em Minas Gerais:** má operação dos teares pelo fenômeno da instabilidade harmônica

quando operando pelo sistema de geração própria e a total dependência da operação atual aos filtros passivos instalados;

- **Fábrica de cabos condutores em Minas Gerais:** após instalação de um novo equipamento para laminação toda a planta entrou em colapso, comprometendo a produção e as soluções emergenciais adotadas.

Para subsidiar cada um dos estudos e a adoção de medidas mitigadoras foram feitas medições de tensões e correntes harmônicas em todos os pontos de interesse em várias configurações do sistema elétrico em situações de carga leve e pesada e, ainda, foi necessário o modelamento do sistema elétrico para estudos de penetração harmônica.

## 2.0 - ESTUDOS DE CASOS

### 2.1 Fábrica de alumínio na Bahia

A FIGURA 1 mostra o diagrama unifilar simplificado da planta da ALCAN em Candeias, Bahia.

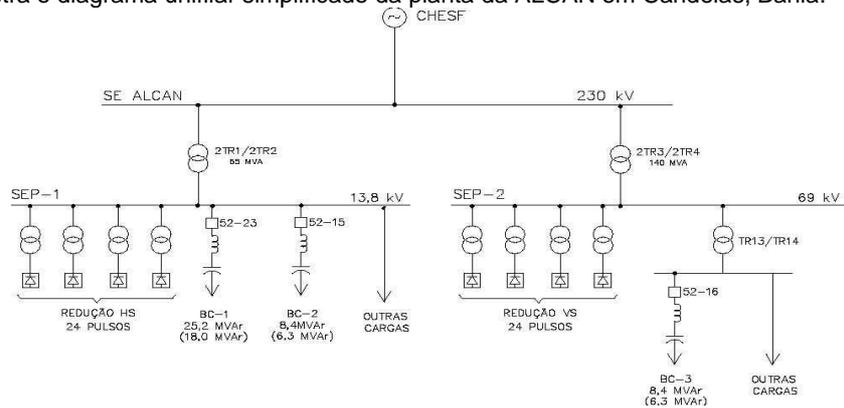


FIGURA 1- Diagrama unifilar simplificado ALCAN, BA

A alimentação em 230kV é originada na subestação de Jacaracanga da CHESF, que apresenta uma característica atípica, pois possui um nível de curto circuito muito elevado (da ordem de 6500 MVA) e está interligada à subestação ALCAN por uma linha muito curta de aproximadamente 1,5Km. Existem dois transformadores abaixadores de 65 e 140 MVA que alimentam duas linhas de produção de alumínio (HS e VS).

As subestações retificadoras de alta potência podem fornecer até 65kA e 125kA em corrente contínua nas linhas HS e VS, respectivamente. Ambas as subestações possuem quatro transformadores retificadores devidamente defasados de 15º de modo a aumentar para 24 o número de pulsos da instalação retificadora.

A compensação de reativos atualmente é feita através de três bancos de capacitores BC-1, BC-2 e BC -3 com potências nominais de 25,2 e 8,4 MVar e potências efetivas de 18,0 e 6,3 MVar. As fábricas de alumínio utilizam conversores de alta potência e por isso, em geral, possuem uma forte geração harmônica mesmo considerando a configuração do sistema para 24 pulsos. Duas investigações foram realizadas neste consumidor para averiguar a influência de harmônicas em duas situações reais que foram vivenciadas, a saber.

#### 2.1.1 Explosões de disjuntores

A primeira, relacionada a explosão, por duas vezes, do disjuntor de manobra do banco de capacitores BC-1 ( 52-23). Este banco, instalado em 1994, foi repotenciado em 1996, passando de 14,4 MVar para 25,2 MVar. Na ligação houve a primeira ocorrência com a explosão de unidades capacitivas do banco.

Logo em seguida o reator de 50  $\mu$ H foi substituído por outro de 1,26 mH, sintonizando o banco de capacitores em 282Hz (4,7ª ordem ) presumindo- se que as ocorrências se deviam a uma forte ressonância harmônica. Segundo observações do pessoal parecia que a situação havia melhorado. Posteriormente, no entanto, ocorreram duas explosões do disjuntor ( 1997 e 2003), e por isto, preocupados com o alto potencial de danos e riscos envolvidos estudos de transitórios e interferências harmônicas foram realizados. Os seguintes aspectos foram avaliados:

- Energização dos bancos de capacitores em contraposição ( back- to back)
- Solicitações térmicas e dinâmicas na ocorrência de um curto- circuito em um barramento onde estão conectados banco de capacitores.
- Reacendimento na interrupção de uma corrente capacitiva (TRT ).

A análise confirmou a forte sobretensão de origem harmônica que, aliando- se a uma sobretensão operacional de rejeição de carga da HS, chegou a níveis superiores a 80%, quase levando o banco de capacitores à destruição. No entanto as explosões dos disjuntores foram devidas às correntes de inrush e outrush que superavam os valores máximos admissíveis.

Pode- se dizer que as sobretensões harmônicas foram responsáveis pela deterioração e explosão dos capacitores e as correntes de energização foram responsáveis pela explosão dos disjuntores, logicamente as sobretensões harmônicas contribuíram para tornar os transitórios de energização mais severos. Para o trabalho completo sobre este subitem ver referência 4.4.

### 2.1.2 Perdas no sistema elétrico

A segunda, relacionada às perdas no sistema elétrico, uma vez que esta planta apresenta perdas acima do esperado (cerca de 1,5 a 2%), considerando processos similares. Alguns pontos de perdas foram identificados e reportados.

Com relação à influência das distorções harmônicas as medições revelaram para a entrada 230kV um nível de distorção harmônica total de tensão variando de 6,14 a 6,95%, valor elevadíssimo considerando um valor máximo aceitável de DHT por consumidor de 1.5%.

Pode-se resumir as medições realizadas na barra de 230kV no espectro mostrado na TABELA 1.

TABELA 1- Harmônicas individuais de tensão e corrente na entrada 230 kV do consumidor

Tensão		Corrente	
DHT= 6,95%		DHT= 4,30%	
h	%	h	%
2	0.49	2	1.07
3	6.76	3	2.52
4	0.22	4	0.37
5	0.71	5	0.71
6	0.17	6	0.40
7	0.52	7	0.85
8	0.24	8	0.55
9	0.26	9	1.25
10	0.45	10	0.28
11	0.37	11	0.57
12	0.06	12	0.48
13	0.09	13	1.13
14	0.18	14	0.47
15	0.06	15	1.35

Nas medições realizadas neste consumidor observa-se um fato interessante. As amplitudes das harmônicas individuais, quase sempre, estão dentro dos limites estabelecidos por consumidor, com exceção da 3ª harmônica que apresenta um valor elevadíssimo praticamente sendo responsável por todo o valor elevado da DHT.

Observando o diagrama de ligação dos transformadores do consumidor e os da concessionária, verifica-se a ligação estrela aterrada, o que demonstra que neste caso é permitido a circulação da corrente de 3ª harmônica e seus múltiplos pelo secundário do transformador do consumidor.

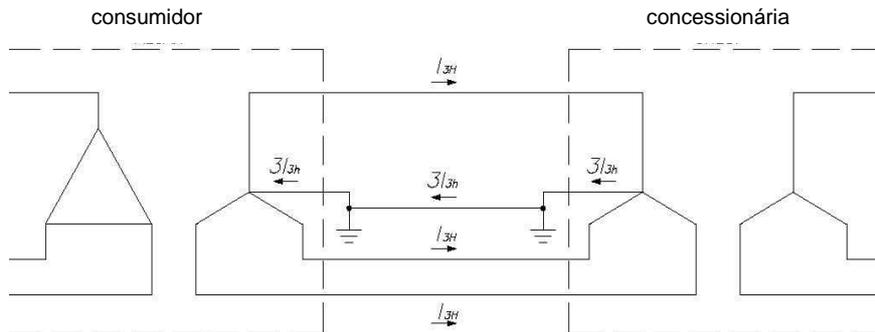


FIGURA 2- Circulação da corrente de 3ª harmônica e seus múltiplos

Esta circulação de corrente de 3ª harmônica pode acarretar três efeitos indesejáveis, que são:

#### - Perdas nos transformadores abaixadores

A presença de correntes harmônicas, aumenta o nível de perdas e o risco de saturação em transformadores. As perdas no cobre ( $P_j$ ) são acrescidas na ordem quadrática das harmônicas.

$$P_j = r (I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2)$$

As perdas no núcleo compreendem as perdas por histerese e correntes de Foucault, que sofrem influências diretas da frequência e da indução (corrente) conforme equação abaixo:

$$P_H = K_s \cdot B^{1,6} \cdot f$$

$$P_F = 2,2 f^2 B^2 d^2 \cdot 10^{-3}$$

Cada harmônica contribui com sua parcela de perda de acordo com sua frequência e a amplitude de sua corrente. Numa avaliação estimativa para as perdas somente nos transformadores de entrada de 230kV (os cálculos reais são complexos) pois tem um grande efeito de harmônicas não características, podem-se estimar:

Perda no cobre	+ 5%
Perda no núcleo	+ 30%

#### - Erro na medição de energia

A consequência de uma distorção acentuada na entrada seria erro na medição de faturamento provocado não pelo medidor digital (que geralmente possuem grande imunidade a distorções harmônicas) mas pelo erro de relação do TP de medição.

Transformadores de potencial indutivos não tem uma resposta em frequência plana apresentando um comportamento distorcido da relação de transformação para operação em 60 hz devido às frequências de ressonância. Isto se deve às indutâncias e capacitâncias parasitas que tem efeitos importantes em frequências elevadas.

#### - Fator de potência

Outra consequência é a redução do fator de potência, pois no caso de forma de onda distorcida, o fator de potência passa a ser:

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1 + DHT^2}} \cdot \cos \varnothing$$

Assim o fator de potência é  $\cos \varnothing$  somente numa senoide pura. Num sistema com forma de onda distorcida pode-se descrever dois tipos de fator de potência: o fator de potência real e o fator de potência de deslocamento.

#### 2.2 Fábrica de galvanização no Rio de Janeiro

Na fábrica da Galvasud em Porto Real- RJ, após a instalação de bancos de capacitores para correção do fator de potência houve a queima de capacitores, cujo laudo efetuado no laboratório do fabricante indicou “danificação entre placas ou entre placas e carcaça de natureza térmica ou dielétrica. Neste caso através de sobretensão de grande amplitude e possivelmente rápida”.

Desde quando foram instalados, os capacitores começaram a entrar em colapso, à medida que a fábrica partia e começavam a entrar cargas não-lineares (conversores). Isto colocava em risco a confiabilidade operacional do sistema e gerava prejuízos, não só na reposição de unidades capacitivas danificadas mas, sobretudo, na penalização sofrida na conta de energia pelo baixo fator de potência (cerca de R\$ 10.000,00 por mês).

O mais interessante neste caso é que os bancos de capacitores instalados, foram concebidos compondo com reatores de núcleo de ar filtros de harmônicas sintonizados na 5ª ordem (300Hz).

O diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico em estudo está mostrado na FIGURA 3.

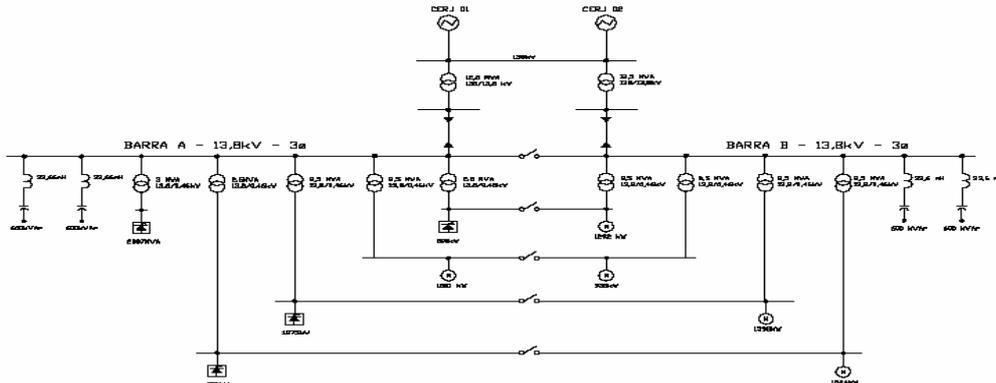


FIGURA 3- Diagrama unifilar simplificado Galvasud, RJ

Existem duas linhas de alimentação em 138 kV, sendo que as potências de curto-circuito variam de 1140 a 1426 MVA, dependendo se são utilizadas apenas uma ou duas em paralelo.

Observe que foram instalados 4 bancos de capacitores com potência efetiva de 600 kVAr cada um, sendo 2 conjuntos em cada lado da barra de 13,8kV.

O sistema elétrico possui uma demanda apreciável de cargas não-lineares, cerca de 6000 kVA, basicamente de conversores estáticos.

Estas cargas distúrbio injetam correntes harmônicas no sistema elétrico cujas amplitudes são inversamente proporcional à ordem harmônica, podendo-se assim resumir as principais características destes conversores de 6 pulsos.

- Presença de harmônicas de ordem  $6K \pm 1$  para valores inteiros de K ( 5ª, 7ª, 11ª, 13ª, 17ª, 19ª, etc). Estas ordens são ditas harmônicas características.
- O valor de corrente harmônica teórica de ordem h é :  $I_h = I_1 / h$  sendo  $I_1$  a corrente na frequência fundamental.

Um outro aspecto que afeta diretamente o estudo de harmônicas é a configuração do sistema.

No caso da Galvasud o projeto prevê diversas possibilidades de alimentação de cargas através de disjuntores de interligações (ties). Para manter a mesma flexibilidade operacional com que o projeto foi concebido, deve-se analisar todas as situações possíveis com relação a injeção de correntes harmônicas e sua influência no dimensionamento dos bancos de capacitores.

Na análise harmônica deste consumidor o sistema foi modelado para fluxo harmônico e foram estudadas as situações operacionais mais relevantes para os bancos de capacitores em carga pesada e carga leve. A situação

se revelou crítica para os capacitores desde a primeira simulação: apenas um transformador em operação e o “tie” das barras A e B do 13,8 kV fechado.

O espectro de correntes harmônicas obtido nas medições pode-se assim ser resumido ( $I_{RMS} = 332$  A):

[ 15h ]	[ 17h ]	[ 111h ]	[ 113h ]	[ 117h ]
21,0 A	25,7 A	7,1 A	2,5 A	11,3 A

Sendo a impedância equivalente do sistema na barra:

$$Z_{eq} = 0,9168 \angle 80,1^\circ$$

Define-se o fator de amplificação da corrente harmônica na barra como:

$$\mu = \tan 80,1^\circ = 5,73$$

A corrente harmônica amplificada ( em pu da corrente do banco) na frequência ressonante é:

$$[ I'_{5h} ] = 1,20 \text{ pu}$$

A corrente RMS do capacitor incluindo a fundamental e maiores harmônicas é:

$$I_{RMS} = \sqrt{1^2 + \sum I_h^2} = 1,59 \text{ pu}$$

Superior a 131% suportável pelos capacitores.

A tensão harmônica ressonante neste caso é:

$$V_{5h} = Z_{5h} \cdot [ I'_{5h} ] = 0,80 \text{ pu}$$

Onde  $[ I'_{5h} ]$  é a corrente harmônica amplificada na base de 100MVA.

A tensão RMS resultante sobre o capacitor incluindo a fundamental e maiores harmônicas é:

$$V_{RMS} = \sqrt{1^2 + \sum V_h^2} = 1,28 \text{ pu}$$

Ou seja, 28% de sobretensão devido a harmônicas.

Deve ser observado que no primeiro caso analisado, de uma situação inclusive mais favorável, os níveis de corrente e tensão sobre os capacitores extrapolam os valores admissíveis confirmando o laudo do fabricante de sobrecarga térmica (corrente) e sobretensão de grande amplitude.

A especificação de filtros de harmônicas deve ser feita com reserva. Filtros extremamente sintonizados ( $Q = 100$ ) como os da Galvasud, de baixa potência, em ambiente de alta geração harmônica, geralmente levam, eles próprios, a ressonâncias perigosas nas frequências sintonizadas, conforme mostrado na FIGURA 4.

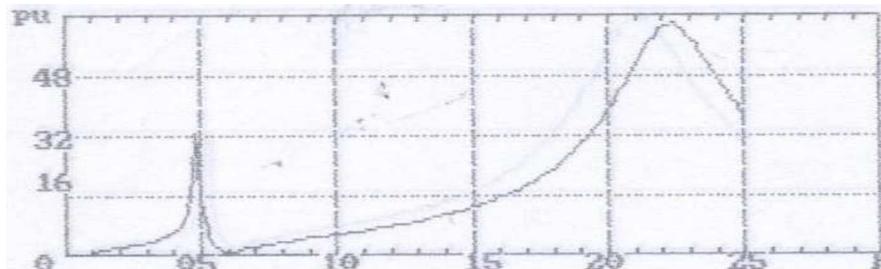


FIGURA 4 – Representação gráfica [Zh x h]

As simulações subseqüentes com mudanças na configuração do sistema através do fechamento dos disjuntores “tie” revelaram outras situações ainda mais danosas para os capacitores.

A solução encontrada para este caso foi a instalação de um filtro anti-ressonante de forma a levar a frequência de ressonância para próxima de uma frequência harmônica não perigosa, sendo o filtro sintonizado em 246Hz (4,1ª ordem). Além disso, os seguintes cuidados foram necessários:

- Não operação isolada dos bancos de capacitores, pois os cálculos mostraram o aumento da corrente absorvida com harmônicas inclusas superando o valor de 131% admissível. Este problema foi resolvido com uma forma de controle simples considerando os período indutivo e capacitivo somente, em detrimento de um sistema de controle contínuo.
- Para os novos filtros foram feitas simulações em todas as configurações possíveis do sistema elétrico em carga leve e pesada. As situações mais desfavoráveis revelaram a necessidade adicional de sobretensionamento de capacitores para 10207 V.
- Finalmente, os reatores de núcleo de ar para os novos filtros foram especificados com um fator de qualidade menor ( $Q=50$ ) para evitar os riscos citados anteriormente, além de possuir uma banda um pouco mais larga podendo filtrar harmônicas de frequências próximas inclusive a 5ª harmônica.

### 2.3- Fábrica de ferro ligas no Mato Grosso

O sistema elétrico da RDM em Corumbá, MS pode ser representado pelo diagrama unifilar simplificado a seguir.

A corrente de curto - circuito trifásico na barra de 138kV da subestação RDM é de 804 A, caracterizando, portanto, um sistema fraco, com potência de curto – circuito de 192 MVA e que leva as frequências de ressonância do sistema RDM para frequências próximas às ordens harmônicas geradas pelos fornos. Em 1996, quando o sistema de compensação de reativos da subestação foi implementado, existiam bancos de capacitores junto aos fornos, contribuindo para a correção global.

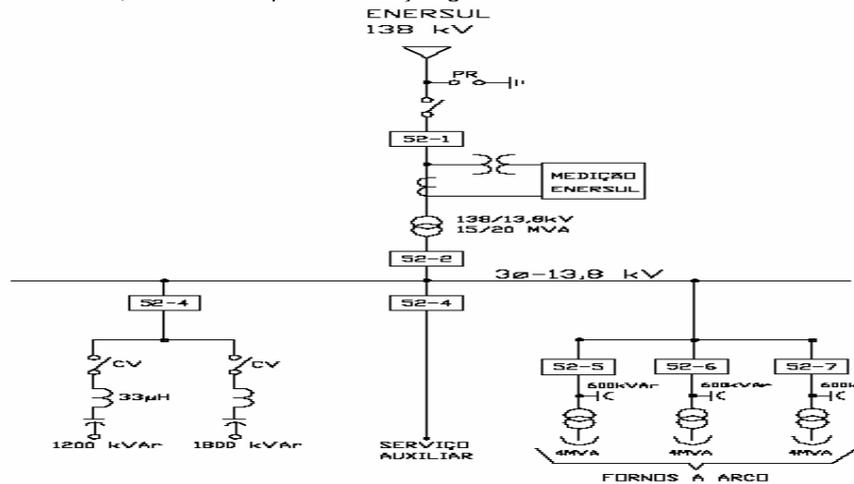


FIGURA 5- Diagrama unifilar simplificado RDM, MS

Os fornos a arcos elétrico são fontes geradoras de correntes harmônicas cujo espectro típico de frequências e amplitudes estão mostrado na TABELA 2 a seguir.

Observa-se que a maior presença de conteúdo harmônico está no período inicial de fusão reduzindo sensivelmente no período de refino.

Na maioria dos casos, os níveis de harmônicas acima relacionados não apresentam maiores problemas, por si só. O problema, porém, pode – se agravar existindo a possibilidade de uma amplificação, pela ressonância, entre os capacitores de potencia e a indutância do sistema.

TABELA 2- Correntes harmônicas geradas pelos fornos a arco elétrico, RDM,MS

Ordem harmônica	Corrente Harmônica (% da fundamental)					
	2	3	4	5	6	7
Fusão inicial (arco ativo)	3 (15A)	6 (30A)	2 (10A)	2 (10A)	1,5 (7,5A)	3 (15A)
Refino (arco estável)	2 (10A)	2 (10A)	2 (10A)	2,1 (10,5A)	1,1 (5,5A)	2,2 (11A)

Selecionou - se as seguintes situações para comparação:

#### CONFIGURAÇÃO A

Sistema completo mostrando a situação em 1996 quando existiam bancos de capacitores junto aos fornos.

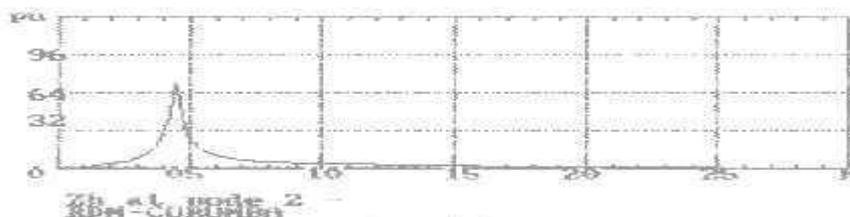


FIGURA 6- Situação em 1996

#### CONFIGURAÇÃO B

Sistema completo atual onde foram retirados os bancos de capacitores junto aos fornos.

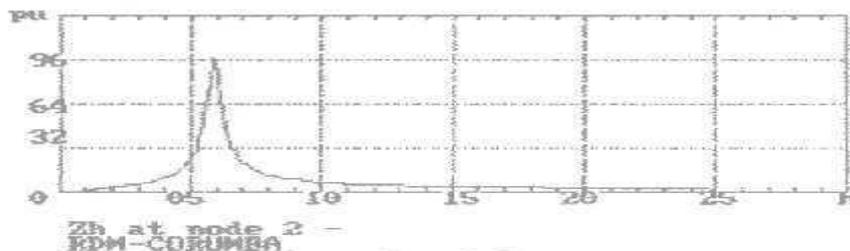


FIGURA 7- Situação atual

## CONFIGURAÇÃO C

Sistema completo atual, porém desligando o banco de capacitores de 1,2 MVAR.

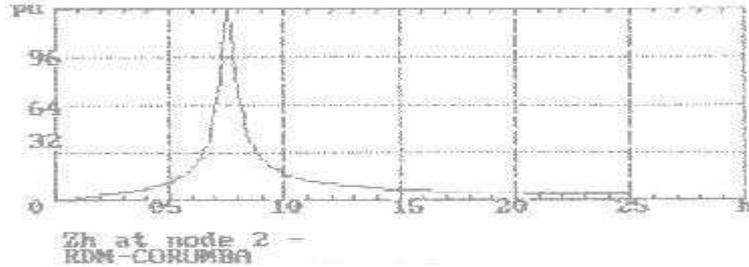


FIGURA 8- Situação atual com desligamento do banco 1,2 MVAR

Na configuração A, que mostrou a situação de 1996, observa-se uma atenuação na amplificação harmônica e deslocamento da frequência de ressonância para próximo à harmônica de 4ª ordem em decorrência da presença dos bancos de capacitores junto aos fornos, tornando uma situação bem favorável, onde os capacitores especificados para 9410V operavam com folga, pois as sobretensões harmônicas e as variações operacionais do sistema elétrico colocavam não mais de 9035 V sobre os capacitores.

Posteriormente, na configuração B, observa-se a influência da retirada dos bancos de capacitores junto aos fornos, aliando-se a um pequeno aumento na potência de curto-circuito do sistema levando a frequência de ressonância para próxima a 6ª ordem (360 Hz), porém com um pico maior da impedância paralela. Nesta situação, os capacitores já estavam subdimensionados, operando com tensões de até 9800 V.

A situação passou a se tornar ainda mais crítica devido à configuração C, com a operação isolada dos bancos, por alguma necessidade operacional ou controle onde a frequência de ressonância leva o banco que permaneceu ligado a uma situação de sobrecorrente e sobretensão a níveis proibitivos, levando-os a destruição.

Como solução emergencial adotou-se a operação dos bancos de capacitores em módulo único e a substituição das latas para uma tensão nominal de 9800V até que um estudo definitivo seja elaborado com um rearranjo dos bancos de capacitores e a composição com filtros de harmônicas sintonizados em uma frequência não perigosa, além de incluir a potência reativa capacitiva adicional necessária para atender o fator de potência horário.

#### 2.4 – Fábrica de tecidos em Minas Gerais

A fábrica de Tecidos Santanense em Pará de Minas, MG tem o diagrama unifilar simplificado mostrado na FIGURA 9.

O sistema elétrico possui duas alternativas de alimentação: a primeira pelo sistema CEMIG 13,8 kV e a outra pelo sistema de geração própria de energia através das usinas de Carioca e Pitangui. Após a instalação de novos teares (máquinas OPEN- END) e a expansão do sistema de geração própria para atender toda a demanda da planta, pretendia-se que todas as cargas fossem alimentadas pela geração própria ficando a concessionária apenas como uma alimentação emergencial. Ao se efetuar a transferência, as máquinas OPEN – END entraram em colapso, causando má operação e perda de qualidade na tecelagem e conseqüente perda de produção. O interessante neste caso é que os próprios conversores geram as harmônicas e, eles próprios, são afetados no seu funcionamento. Este fenômeno é conhecido como “instabilidade harmônica”.

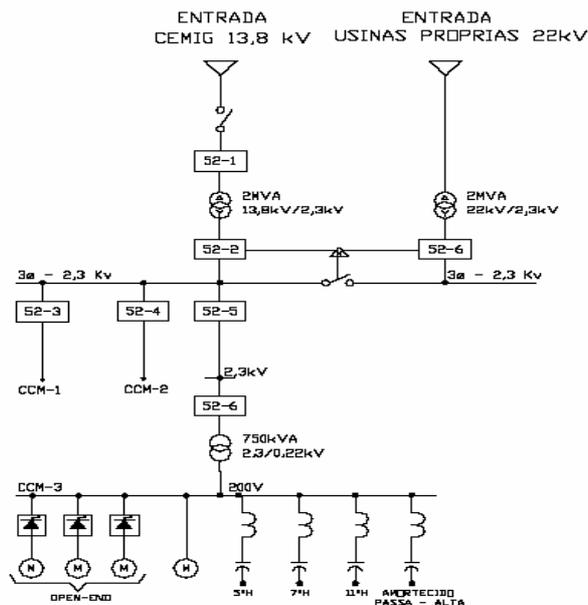


FIGURA 9- Diagrama unifilar simplificado Santanense, MG

As falhas em conversores estáticos, para controle de velocidade, são provocadas por corte de tensão causando má operação por falha de tiristores; ou acionamento dos circuitos de disparo em instantes diferentes dos requeridos, ou ainda, efeitos de ressonâncias, podendo resultar em sobretensões.

A solução adotada foi à instalação de filtros sintonizados simples na 5ª, 7ª e 11ª ordens harmônicas e ainda um filtro amortecido tipo passa-alta para filtragem das harmônicas superiores.

Atualmente existe uma total dependência de operação deste teares com o funcionamento dos filtros instalados

### 2.5 – Fábrica de cabos condutores em Minas Gerais

O diagrama unifilar simplificado da unidade de cabos condutores da FICAP em Ouro Preto, MG está mostrado na FIGURA 10 a seguir:

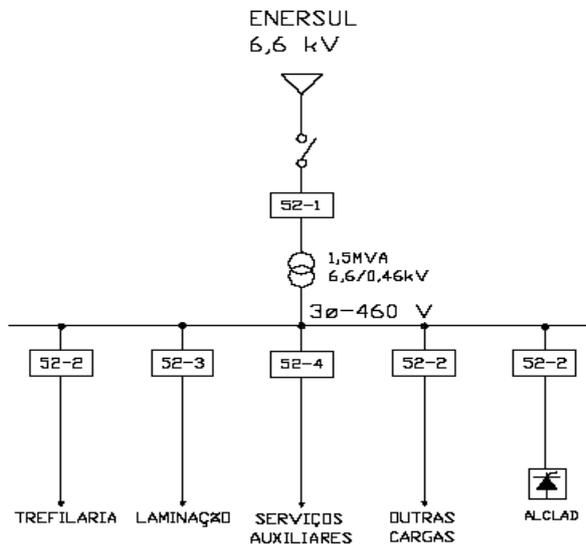


FIGURA 10- Diagrama unifilar simplificado Ficap, MG

Após instalação de um novo equipamento para laminação baseado em conversor estático de potência, toda a planta entrou em colapso, comprometendo a produção.

A solução emergencial adotada, pois não havia tempo hábil para aguardar o projeto de filtros, foi a instalação provisória de um segundo transformador e a separação da alimentação para o novo conversor.

### 3.0 CONCLUSÃO

O crescimento acelerado de cargas especiais nos sistemas elétricos têm causado sérios problemas nos processos industriais chegando à provocar o colapso operacional e a destruição de equipamentos, afetando a confiabilidade e sua continuidade; conforme mostrado nos casos documentados neste trabalho.

É necessário que, os consumidores industriais, façam estudos de simulações de interferências harmônicas, antes de que modificações sejam implantadas em suas fábricas, de forma a se prevenir contra os efeitos indesejáveis das cargas não lineares, evitando surpresas desagradáveis como as relatadas, que resultaram em perdas de produção e equipamentos com custos elevados, e ainda, sérios riscos de segurança para o pessoal envolvido na operação e manutenção.

### 4.0 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 4.1 BARBOSA, M.A.- Estudo técnico para compensação de reativos e avaliação de interferências – ALCAN/Unidade de Aratu – BA, 30p.
- 4.2 LEMIEUX, G.- "Power System Harmonic Resonance – a Documented Case, IEEE Transactions on Industry Applications, vol 26, n°3, May/June, 1990
- 4.3 SZABADOS, B.- "On the interaction between power system configuration and industrial rectifier harmonic interference: a practical case study", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS- 101, n° 8, August, 1982
- 4.4 BARBOSA, MA- Explosões de disjuntores em um grande consumidor industrial: investigações das causas e influências do acoplamento com a concessionária, XVIII SNPTEE, anais, GSC.87, 2005