



VI SBQEE
21 a 24 de agosto de 2005
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 01 7567
Tópico: Análise, Diagnóstico e Soluções

EFEITOS HARMÔNICOS DA APLICAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES EM INDÚSTRIAS ELETROINTENSIVAS SOBRE A REDE ELÉTRICA DE ALTA TENSÃO – CASOS REAIS

ENG. ALEXANDRE CARVALHO NAVES

ENG. FLÁVIO RESENDE GARCIA, MSC.

IESA PROJETOS EQUIPAMENTOS E MONTAGENS S/A.

RESUMO

A utilização de capacitores em instalações elétricas de plantas eletro-intensivas (siderúrgicas) tem aumentado significativamente nos últimos anos. Devido a exigências da legislação e da operação dos sistemas elétricos, a quantidade de KVAR instalado tem sido cada vez maior. Esse artigo tem por objetivo apresentar esta problemática quando do estabelecimento de ressonâncias e seus efeitos sobre os capacitores, transformadores e, principalmente, os efeitos causados nos sistemas de transmissão (concessionária de energia) que alimentam tais plantas siderúrgicas. Casos reais de aplicação serão apresentados de modo a subsidiar tais análises validando os conceitos discutidos nesse artigo.

PALAVRAS-CHAVE

Capacitores de Potência, Harmônicos, Siderurgia, Fornos Elétricos à Arco, Transmissão.

1.0 INTRODUÇÃO

A legislação atual sobre fator de potência em instalações industriais e a tendência dos futuros documentos normativos, tendo como principal alicerce a escassez de investimentos em infraestrutura no setor elétrico, tem exigido de tais consumidores a manutenção do fator de potência em limites altos. A exigência atual de 0,92 já

passa a ser substituída por valores ainda maiores, seja por contratos especiais (concessionária-cliente) ou mesmo por necessidades operativas do lado da concessionária ou do cliente e as particularidades do seu sistema elétrico interno.

Durante muitos anos a especificação das características de valores nominais dos bancos de capacitores para a aplicação em plantas siderúrgicas foi baseada em experiência prática. Essa atitude levava em muitos casos a especificações muito conservativas, onerando o custo da solução e também à escolha de tensões e potências inadequadas ao nível de esforços elétricos à que as unidades capacitivas estariam submetidas, levando não só o banco de capacitores mas toda a instalação a condições operativas inadequadas.

Ao se optar pela correção do fator de potência em ambiente siderúrgico, não só as características elétricas dos bancos de capacitores devem ser levadas em conta, como também uma investigação criteriosa sob quais esforços estarão submetidos todos os outros equipamentos e sistemas elétricos ali conectados.

Dentro desse contexto, este artigo apresentará como a circulação de correntes harmônicas e a conseqüente tensão harmônica aplicada, prejudicam o funcionamento e/ou afetam a vida útil de bancos de capacitores (e unidades capacitivas) aplicadas nesse tipo de ambiente

industrial. Também será apresentado o impacto da circulação de corrente harmônica sobre o transformador da instalação e o equivalente do sistema elétrico situado na alta tensão (PAC – 138/230kV).

2.0 CONSIDERAÇÕES ATUAIS SOBRE SISTEMA ELETOINTENSIVO (SIDERURGIA)

Se atentarmos apenas quanto ao aspecto da geração harmônica de fornos a arco, sejam eles arco-direto, submerso ou mesmo os fornos panela, percebemos que, apesar de seu caráter aleatório (em função da instabilidade do arco-voltaico), os valores percentuais são baixos.

A figura 1 apresenta o espectro harmônico típico de um forno EAF (Electric Arc Furnace) de 80MW, alimentado em 33kV. Essa característica de injeção harmônica é um comportamento médio. Em alguns momentos da operação do forno, os valores encontrados serão bastante diferentes, com variações abruptas sejam pelo início da corrida (fusão) ou pelos momentos de conexão/desconexão do transformador do forno, onde se sobressaem as correntes de “in-rush” desse transformador.

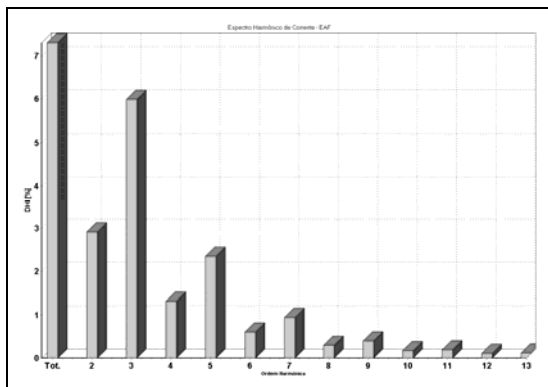


Figura 1 – Espectro Harmônico Típico Médio do EAF.

Ao analisar a curva de operação ao longo do tempo, percebe-se que os valores correspondentes aos momentos de fusão e chaveamento do transformador do forno representam uma pequena parcela do tempo total de funcionamento. Ainda sim, objetivando o dimensionamento correto de equipamentos para esse tipo de instalação, deverão ser utilizadas ferramentas estatísticas cujos resultados deverão ser confrontados com as características de suportabilidade, em função do atendimento das normas pelas quais os mesmos devem ser construídos.

Tomando o espectro harmônico apresentado na figura 1, como o comportamento médio da operação de um forno EAF (ao longo do tempo),

constata-se na prática que as componentes harmônicas na corrente de alimentação não são suficientemente altas para provocar distorções harmônicas significativas em instalações com bom nível de regulação de tensão, ou seja, barras com elevado nível de curto-circuito.

2.1 Nível de curto-circuito de instalações siderúrgicas

É muito comum encontrarmos plantas siderúrgicas com demanda em torno de 200MW. Sendo assim, uma carga de tal magnitude quase sempre é alimentada por sistemas de transmissão e sub-transmissão (138kV e 230kV). Isso se faz necessário dado o nível de confiabilidade e robustez desse patamar de fornecimento.

Outro fator que impõe a alimentação nesse nível de tensão é o fator econômico que, em se tratando de indústrias siderúrgicas dado o nível de consumo e demanda exigida, possibilitam obter um importante insumo do seu processo fabril a um preço mais vantajoso.

Na grande maioria dos casos, o nível de curto-circuito que a concessionária disponibiliza no PAC (Ponto de Acoplamento Comum) do cliente é elevado, da ordem de [GVA]. Esse valor é obtido porque, as impedâncias equivalentes nesse ponto são compostas basicamente pelas parcelas das linhas de transmissão, dos transformadores de força, pelos geradores e equivalentes nos pontos de fronteira/conexão com outras concessionárias. Sendo assim, os dispositivos de chaveamento e proteção envolvidos nesse nível de tensão, dado o nível de corrente de curto-circuito envolvido, geralmente tem um custo muito alto.

A escolha do transformador da instalação e de sua impedância se baseia no seguinte:

- Diminuição da potência de curto-circuito da entrada (haja vista os benefícios que a mesma proporciona, pela diminuição dos custos de aquisição/manutenção dos equipamentos de chaveamentos envolvidos).
- A impedância do transformador influencia diretamente no comprimento e estabilidade do arco-voltaico, dispensando em alguns casos, os reatores que geralmente são conectados em série com o alimentador do transformador do forno sendo, portanto, uma outra vantagem operacional.

Assim sendo, observa-se que normalmente as impedâncias percentuais dos transformadores das instalações são geralmente elevadas, da ordem de 10% a 18%. Se por um lado apresenta

uma economia em termos de equipamentos de manobra e outros equipamentos de controle do processo (reator série do forno), por outro lado “enfraquece” o barramento secundário do transformador da instalação, permitindo que ele seja mais susceptível às variações impostas pelas cargas elétricas e interações dessas com os outros dispositivos ali conectados.

2.2 Potência reativa demandada por instalações siderúrgicas

As quantidades de potência reativa associadas às instalações siderúrgicas geralmente são muito elevadas, chegando em alguns casos, em bancos de capacitores da ordem de dezenas de [MVAR]. Por exemplo, para se corrigir o forno apresentado na figura 1, com 80MW de demanda e um fator de potência médio ($FP=0.7$), é necessário a instalação de 58,28 MVAR para correção do fator de potência para 0,96. Notamos que é uma quantidade de potência reativa elevada, com alta corrente, e o banco de capacitores necessita ser construído/montado/configurado com uma quantidade razoável de unidades capacitivas. Esse valor é calculado por forno instalado, e pode se ainda maior, caso haja outros fornos conectados no mesmo barramento. É prática normal se corrigir o fator de potência dos fornos para um valor superior a 0,92 (nesse caso para 0,96) de modo a prover também, o consumo de reativos do transformador da instalação (AT/MT) que, na maioria dos casos, trabalha muito próximo da sua potência nominal, consumindo uma energia reativa proporcional à sua impedância e a sua potência nominal. Isso faz com que as quantidades de potência reativa ainda maiores sejam instaladas nos barramentos internos das plantas siderúrgicas. Concomitantemente a esse fato, no Brasil se discute atualmente, no ambiente dos órgãos regulamentadores, uma elevação dos limites mínimos do fator de potência, devido à falta de investimentos na infra-estrutura no setor elétrico. É sabido que o aumento do fator de potência (diminuição de circulação de corrente reativa) permite o adiamento de investimentos necessários ao aumento da capacidade de fornecimento, seja ela no ambiente da transmissão e/ou distribuição de energia elétrica. Percebe-se que os novos limites de fator de potência mínimo serão primeiramente aplicados e exigidos nos sistemas de rede básica (230kV) e sistemas de transmissão em 138kV, justamente no patamar, onde se encontram a maioria das plantas siderúrgicas.

Os procedimentos de rede básica (ONS/ANEEL) já estão exigindo para as novas cargas e, num futuro próximo, para as demais, a correção do fator de potência para 0,98 nas plantas industriais conectadas em 230kV ou superior, aumentando ainda o montante de KVAR instalado.

2.3 Aplicação de reativos em plantas siderúrgicas

Levando-se em conta o exposto nos itens 2.1 e 2.2, perceberemos que, ao se melhorar o fator de potência das plantas siderúrgicas, apesar dos vários benefícios, dentre eles o não pagamento de multas junto à concessionária e o “alívio” de diversos equipamentos envolvidos (transformadores / cabos / barramentos / equipamentos de manobra), também fará com que a ressonância paralela estabelecida entre os bancos de capacitores conectados e o equivalente indutivo do sistema elétrico se constitua em frequências baixas, situadas muito próximas às ordens harmônicas existentes e facilmente encontradas na corrente de alimentação dos fornos elétricos a arco, excitando tais frequências.

Apesar da potência de curto-circuito fornecida pela concessionária na maioria das vezes ser elevada, a potência de curto-circuito no secundário dos transformadores da instalação é da ordem de algumas centenas de [MVA]. As quantidades de potências reativas demandadas nessas instalações são, na maioria das vezes, elevadas dada a potência total envolvida e a necessidade da correção do fator de potência. É fácil perceber que, que a ordem n da ressonância se dará em frequências baixas. Como evidenciado na figura 1, o forno FEA (principal carga da planta siderúrgica), possui na sua corrente, componentes harmônicas nas frequências mais baixas, sejam 120 hz a 420 hz.

Apesar de serem de baixa amplitude percentual, essas componentes harmônicas geradas pelo comportamento dos fornos e encontradas na corrente de alimentação dos mesmos têm magnitude suficiente para excitarem a impedância amplificada pela ressonância gerada no barramento. As distorções harmônicas de tensão provocadas pela corrente do forno, mesmo sem a conexão dos dispositivos de correção do fator de potência, já são elevadas em função do baixo nível de curto-circuito do secundário e ainda mais, agravado pelo estabelecimento de ressonâncias.

Como o forno FEA é, na maioria dos casos, a única carga alimentada por essa tensão “poluída”, devido a sua característica de

operação, o mesmo não é influenciado suficientemente por essas distorções de modo a comprometer o seu funcionamento.

Com a conexão das capacitâncias dos dispositivos de correção, e a consequente amplificação da impedância vista pela fonte de corrente (FEA) em uma determinada faixa de valores (não é amplificada uma única frequência e sim várias de uma mesma banda) as distorções de tensão que se estabelecem são bastante elevadas, devendo ser mitigadas (pela instalação de filtros harmônicos) ou mesmo utilizadas como dado de entrada na especificação e dimensionamento de qualquer dispositivo, seja estático ou rotativo que estará conectado ou alimentado adjacientemente desse barramento, inclusive e especialmente, os bancos de capacitores que estarão ali instalados e operando permanentemente. A amplificação na impedância (ressonância paralela configurada) pode fazer com que o valor da reatância de uma determinada frequência seja majorado em várias vezes o seu valor original (sem capacitores), refletindo também a mesma amplificação na componente harmônica da tensão nessa frequência.

Dado o estabelecimento de ressonâncias e a configuração de distorções harmônicas de tensão elevadas nos barramentos, compreende-se que essa tensão distorcida aplicada a todos os componentes do sistema elétrico, provocará a circulação de corrente harmônica nos vários dispositivos ali conectados cada qual, em função da sua susceptibilidade maior ou menor a componentes harmônicas.

3.0 CIRCULAÇÃO DE COMPONENTES HARMÔNICAS

Os efeitos da circulação de corrente harmônica podem ser evidenciados sobre três principais aspectos:

- Solicitação do Isolamento
- Solicitação Térmica
- Operações indevidas

3.1 Efeitos sobre capacitores de potência

Segundo [1], os valores nominais de tensão e a potência desejada de operação são utilizados para o dimensionamento dos capacitores, em sua utilização mais genérica, tensão senoidal pura. Com a ressonância no sistema a suportabilidade ficará prejudicada em função do acréscimo de corrente, tensão e potência. Os principais efeitos prejudiciais causados são: - Tensão (Pelo aumento da tensão RMS e Valor de Pico): ocasionando aumento das descargas parciais e

deterioração do isolamento; - Corrente (Pelo aumento da corrente RMS): sobre-aquecimentos localizados e instabilidades no comportamento do dielétrico; - Efeito Combinado Tensão x Corrente: O comportamento não senoidal da corrente e tensão com variações súbitas (gradientes elevados) as quais provocam variações semelhantes no campo elétrico interno entre placas provocando a deterioração das características dielétricas do mesmo.

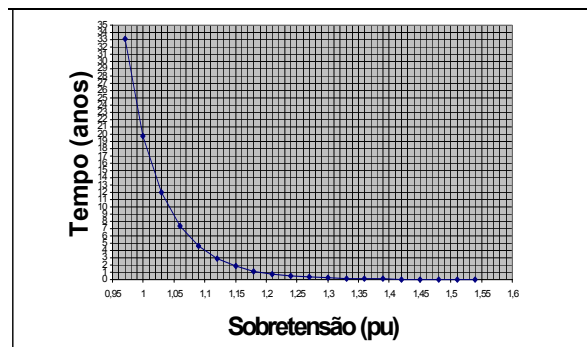


Figura 2 - Gráfico da Estimativa da Perda de Vida Útil em função da sobretensão total aplicada.

No gráfico da figura 2 é possível estimar a perda de vida útil para um banco de capacitores em função da sobretensão total em regime permanente existente (Eq. 1), calculada de maneira parametrizada em função da ordem harmônica encontrada na tensão aplicada ou estabelecida em função da ressonância.

$$Vct = (V_1^a + V_2^a + \dots + V_n^a)^{1/a} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde:

a = 1	=> para h ≤ 7
a = 1,4	=> 8 ≤ h ≤ 13
a = 2	=> para h ≥ 14

O valor das componentes harmônicas que circulam sobre a unidade capacitiva poderá ser obtido via medição, ou através de simulação quando em fase de projeto/estudo da correção.

3.2 Efeitos sobre a vida útil de transformadores de potência

O gráfico da figura 3 apresenta a estimativa de redução de vida útil para transformadores submetidos à distorção harmônica de corrente. O aquecimento gerado pelo acréscimo de perdas no ferro e no cobre, influencia diretamente nas características dos isolantes envolvidos na construção do transformador.

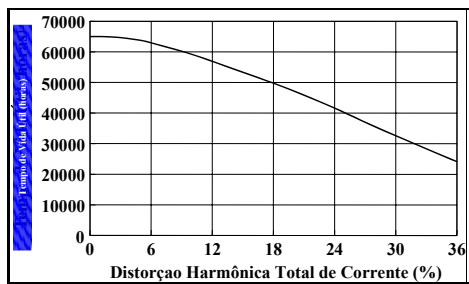


Figura 3 – Estimativa de Perda de Vida Útil de Transformadores de Potência

3.3 Efeitos da injeção da corrente harmônica em at (pac – 138/230kv)

Além de provocar perda de vida útil nos capacitores e transformadores (entre outros equipamentos não destacados nesse trabalho) a tensão resultante pela configuração da ressonância é aplicada também a todos os circuitos que dali derivam. Essa fonte de tensão harmônica também é aplicada ao transformador e, por conseguinte, ao sistema elétrico de AT (primário do transformador) provocando a circulação de correntes harmônicas. Dependendo das componentes harmônicas que estejam presentes no espectro da corrente e do ângulo de fase de cada uma delas, cancelamentos naturais podem ocorrer, por conta do tipo de ligação das bobinas do transformador. Ainda sim, uma parcela significativa da corrente harmônica de que circula no secundário do transformador é aplicada ao circuito AT, provocando distorções na forma de onda de tensão em função da característica da impedância do circuito AT. Em linhas gerais, essa característica é influenciada mais diretamente pela potência de Curto-Circuito do PAC (Módulo e Ângulo).

Na maioria dos casos, as normas e recomendações existentes (com exceção do IEEE) se limitam quase que exclusivamente a colocar limites de distorção de tensão. Como exemplo, a tabela 1 apresenta os limites de distorção harmônica de tensão recomendados para tensões AT, segundo o GCOI/GCPS.

Tabela 1 – Limites de tensões harmônicas por consumidor (expressos em porcentagem da tensão fundamental).

V ≥ 69 kV			
Ímpares		Pares	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3 a 25	0,6	Todas	0,6
≥ 27	0,4		
D = 1,5 %			

Apesar de que quase sempre o nível de curto-circuito disponibilizado pelas concessionárias de

energia ser elevado - caracterizando uma barra "forte" – os limites exigidos são muito rígidos, sendo facilmente transpostos quando do funcionamento do forno elétrico e a interação das componentes harmônicas da sua corrente com a impedância ressonante criada pela correção do fator de potência. Outro fator que merece análise é sobre a responsabilidade na distorção de tensão, pois a tensão fornecida pela concessionária já pode vir dotada de harmônicos, que poderão ser amplificados pelos fenômenos discutidos nesse trabalho, dificultando a identificação do real causador da distorção no sinal de tensão do PAC. Metodologias estão sendo criadas de modo a identificar através de medições da corrente e tensão no PAC (com seus respectivos módulos e ângulos) qual a direcionalidade e origem das distorções harmônicas observadas.

4.0 ESTUDO DE CASOS

Nos casos a seguir, estudos preliminares foram conduzidos de forma a se arbitrar a melhor maneira de se promover a correção do fator de potência. Em ambos casos, a melhor alternativa técnica seria instalação da correção através de filtros harmônicos sintonizados. Por uma questão de custo da solução, optou-se apenas pela instalação de bancos de capacitores puros, sem qualquer dispositivo para filtragem ou dessintonização (reatores em série). A única medida tomada foi o sobre-tensionamento das unidades capacitivas, para que as mesmas suportassem os esforços provocados pelas ressonâncias evidenciadas na solução.

4.1 Caso 1

A siderúrgica em questão é alimentada em 138kV com potência de Curto-circuito no PAC de 3300 MVA, valor significativamente alto para esse nível de tensão. A partir da energização do banco de capacitores foram tomadas medições no alimentador do Banco de Capacitores e no secundário do transformador, a fim de se observar sobre quais esforços os mesmos estariam submetidos.

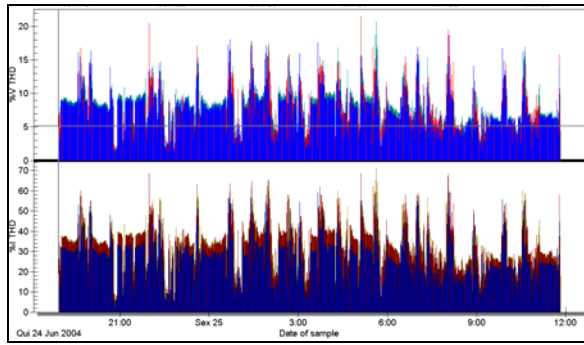


Figura 4 – DHV e DHI no Banco de Capacitor

A figura 4 apresenta a Distorção Total de Tensão e Corrente na alimentação do banco e a figura 5, as mesmas características na tensão e corrente do secundário do transformador.

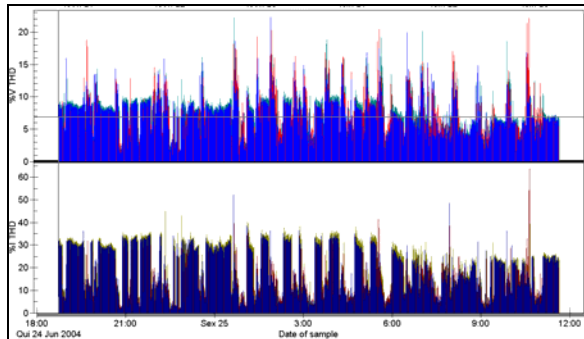


Figura 5 – DHV e DHI na corrente secundária do transformador

Não foi possível o monitoramento das correntes e tensões no primário (PAC), devido a inexistências de dispositivos adequados (lineares com a frequência – tipo DPC) para a realização dessas medições. Através de simulação digital, utilizando para tanto, o software *PQF – Power Quality Filtrors*, procurou-se observar o impacto que a circulação dessas correntes harmônicas – com origem na ressonância - teriam no sistema de AT da concessionária. A distorção total de tensão passou de **0,34%** (valor em conformidade) para **2,92%**, valor esse que ultrapassa em muito os limites recomendados. Vale lembrar que a tensão em 138kV é também aplicada a outros consumidores e na indústria em questão, a mesma SE alimenta cargas residenciais nas suas imediações.

4.2 Caso 2

A siderúrgica em questão é alimentada em 138kV com potência de Curto-circuito no PAC de 2250 MVA. A indústria em questão é de pequeno porte, com transformador da instalação de 10MVA. Foram monitoradas as condições estabelecidas na barra logo após a entrada do banco de capacitores em operação. A figura 6 apresenta o DHV e DHI no banco de capacitor e a figura 7, a

forma de onda de corrente e tensão que estabeleceu no secundário do transformador após a energização do banco de capacitores nos momentos em que forno entrava em processo de maior solicitação elétrica.

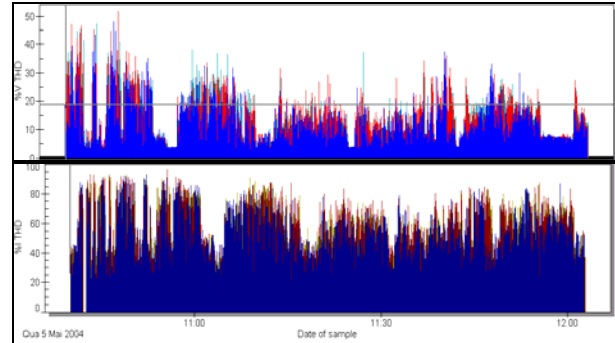


Figura 6 – DHV e DHI no Banco de Capacitor

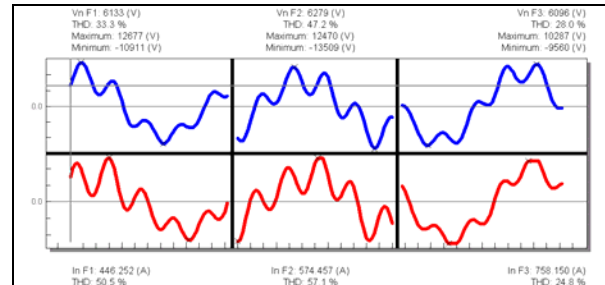


Figura 7 – Forma de Onda de Corrente e tensão no secundário do transformador 138/11,9kV de alimentação do Forno.

Apesar de todo o sobre-dimensionamento previsto em função das solicitações que o mesmo estaria submetido, as condições que se estabeleceram quando da energização foram extremamente elevadas.

Distorções Totais - DHV's da ordem de **20%** e DHI's de **60%** - foram observadas em grande parte do período de medição. Nas simulações, a distorção total de tensão no PAC (138kV) passou de **0,63%** (valor em conformidade) para **2,20%** (com a energização do banco), valor esse que ultrapassa os limites recomendados. Em função disso, para esse caso, o fabricante e o cliente estão desenvolvendo estudos e acompanhamento da vida útil do banco de capacitores visando uma solução para os problemas observados.

5.0 CONCLUSÃO

As cargas eletro-intensivas de indústrias siderúrgicas em si só, não são suficientemente perturbadoras para provocar distúrbios nos sinais elétricos de Alta Tensão no PAC onde estão conectadas na grande maioria dos casos, haja vista a qualidade do ponto onde geralmente são derivadas. Essas cargas estão sempre associadas a grandes quantidades de potência

reativa sendo portanto susceptíveis as ressonâncias paralela destes capacitores com o sistema elétrico.

O sobre-tensionamento de unidades capacitivas com o objetivo de suportar os esforços dielétricos, térmicos e dinâmicos provocados pela ressonância pode ser uma alternativa econômica viável, mas contribuem de forma desfavorável à manutenção da qualidade de suprimento por parte da concessionária de energia. Além do banco de capacitores, outros equipamentos poderão sofrer danos com a permanência desses níveis de distorção de tensão.

Num futuro próximo, com a normalização e posterior exigência de determinados índices de conformidade, entre eles harmônicos, muitas indústrias deverão passar por uma readequação

revedo a maneira de se prover a correção do fator de potência.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Naves, A.C., Garcia, F.R - *“Calculo da Perda de Vida Útil de capacitores em função da distorção harmônica existente nas Redes de Distribuição de Energia Elétrica”* Anais do IV SBQEE – Porto Alegre – Agosto de 2001 - Pg. 65.

[2] GCOI/GCPS - *“Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais”*. Fevereiro de 1993.

[3] A.E. Emanuel, X. Wang, “ Estimation of Loss of Life of Power transformers supplying nonlinear loads”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no.3 – March/1995.

