

## **O “milagre” da multiplicação dos ampères. Aspectos de ressonância harmônica.**

Por Eng. Jose Starosta; MSc.

Diretor da Ação Engenharia e Instalações e Presidente da ABESCO

O comportamento das correntes elétricas em instalações elétricas de baixa tensão segue algumas regras clássicas que são consequência da interação entre as diversas fontes e cargas presentes, além das impedâncias do sistema (das próprias fontes, dos transformadores e das linhas elétricas de interligação).

De uma forma geral este comportamento segue o equacionamento que relaciona as tensões (módulo e fase) e frequências nos diversos barramentos, número de fases, características das cargas como a potência de alimentação, demanda, fator de potência, regime de operação das diversas cargas, fator de diversidade, fator de demanda e assim por diante. A corrente elétrica se medida e avaliada corretamente exprime o comportamento da carga de forma precisa.

As verificações e medições em campo apresentam normalmente resultados próximos aos esperados, possibilitando que as instalações elétricas sejam mantidas sob controle e em condições confiáveis pela equipes de manutenção e operação.

Contudo, existem algumas situações em que os fatos, e ocorrências nas instalações e as correntes registradas não coincidem com as expectativas iniciais, e silenciosamente (ou não) um problema pode estar ocorrendo, com efeito de bomba relógio.

Quando a instalação de capacitores em sistemas elétricos que alimentam cargas não lineares não é precedida de um estudo ou avaliação prévia, a ocorrência de ressonância harmônica é provável, trazendo os efeitos indesejáveis comentados no parágrafo anterior.

Esta avaliação deve considerar a identificação do tipo e comportamento das cargas com medições adequadas que indicarão o comportamento das correntes, sobretudo das componentes harmônicas de corrente (correntes nas diversas frequências), além do comportamento do ciclo de operação da própria carga (carga constante, variável, ou extremamente variável). Notar que a escolha

e parametrização do instrumento de medição podem comprometer o resultado e a interpretação dos dados.

Por outro lado, as redes de alimentação ou fontes elétricas possuem características tipicamente indutivas. Quando são instalados capacitores, a frequência de ressonância é definida em função da potência de alimentação/potência de curto circuito (impedância da fonte) e da potência reativa a ser injetada, função da característica e impedância dos capacitores.

Caso uma das correntes harmônicas presentes nesta instalação, oriundas de alguma carga, estiver próxima e esta frequência de ressonância (do conjunto rede e capacitor) ocorrerá o fenômeno chamado de ressonância. Sob o aspecto prático, a operação de uma carga não linear de 6 pulsos, por exemplo e que contenha portanto em seu espectro, correntes harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª,... ordens, alimentada por uma rede cuja frequência de ressonância esteja próxima ou coincidente com umas destas frequências acima, será estabelecido uma situação de ressonância. Como ilustração, se tomarmos uma instalação com transformador de 1000 kVA e impedância do transformador de 5% e junto a este transformador forem instalados capacitores com potência reativa nominal na tensão estabelecida pelo transformador de 200 kVAr, a frequência de ressonância nesta rede industrial de 60 Hz, será de aproximadamente 600 Hz; ou simplesmente expresso pela harmônica de ressonância de ordem 10 ou "hr=10", frequência próxima da 11ª harmônica presente no espectro da carga, onde ocorrerá a ressonância. Neste caso de ressonância, o que se espera são medições das correntes harmônicas na frequência onde ocorre a ressonância tanto na rede quanto nos capacitores com valores bem superiores àquelas antes da instalação dos capacitores.

Esta avaliação simplificada é obtida através do uso da expressão 1.

$$hr = \sqrt{P_{cc} / kVAr}$$

$$fr = 1/2\pi\sqrt{LC}$$

Expressão 1: avaliação da frequência de ressonância

onde:

- $fr$  é a frequência de ressonância
- $L$  é a indutância típica da rede
- $C$  é a capacitância total dos capacitores
- $hr$  é a ordem harmônica da frequência de ressonância

- Pcc é a potencia de curto circuito trifásico na barra em que os capacitores são instalados
- KVA<sub>r</sub> é a potencia reativa dos capacitores em operação

Deve-se lembrar que conversores de 6 pulsos possuem em seus espectros de correntes em regime de 60Hz, a presença de correntes em 300Hz (5<sup>a</sup> harmônica), 420 Hz (7<sup>a</sup> harmônica), 660 Hz (11<sup>a</sup> harmônica), 780 Hz (13<sup>a</sup> harmônica) de acordo com a regra conhecida, exposta na expressão 2

$$h = kp \pm 1;$$

expressão 2: regra de definição da presença de harmônicas em conversores

onde:

- h são as diversas harmônicas que compõe o espectro de corrente dos conversores
- k é um numero inteiro de 1 a n
- p é o numero de pulsos do conversor

A situação pode ser modelada pelos circuitos das figuras 1 (unifilar) e figura 2 (diagrama equivalente), onde as correntes harmônicas são representadas como fontes de correntes; cada corrente de freqüência diferente da fundamental se comporta como uma fonte de corrente harmônica específica; isto é, as cargas não lineares (fonte das harmônicas) são modeladas como fontes de correntes cujo espectro harmônico dependerá se sua própria característica de operação. Um acionamento ou conversor pode possuir, por exemplo, um espectro de corrente em função da freqüência, conforme o exemplo da tabela 1, podendo cada uma destas correntes ser amplificada após a instalação dos capacitores. Esta amplificação dependerá da freqüência de ressonância.

Freqüência Hz	Ordem harmônica (hr)	Corrente (A)
60	1	100
300	5	40
420	7	25
660	11	10

Tabela 1 - Correntes harmônicas de conversor de 6 pulsos utilizado na ilustração

Ressonância série e ressonância paralela

Sob o ponto de vista de aplicação em instalações industriais, a ressonância paralela é aquela em que os capacitores e as cargas não lineares são alimentados por um mesmo transformador, ou fonte. Já a ressonância série ocorre quando correntes harmônicas circulam entre os transformadores e capacitores, sem que nesta rede existam cargas não lineares. Ou seja, normalmente as correntes harmônicas são originadas de outros pontos da instalação, ou mesmo de outras instalações vizinhas e os modelamentos simplificados ora propostos não são aplicáveis. Neste caso devem ser desenvolvidos estudos que considerem as simulações de comportamento do sistema elétrico como um todo com suas fontes e cargas e suas características.

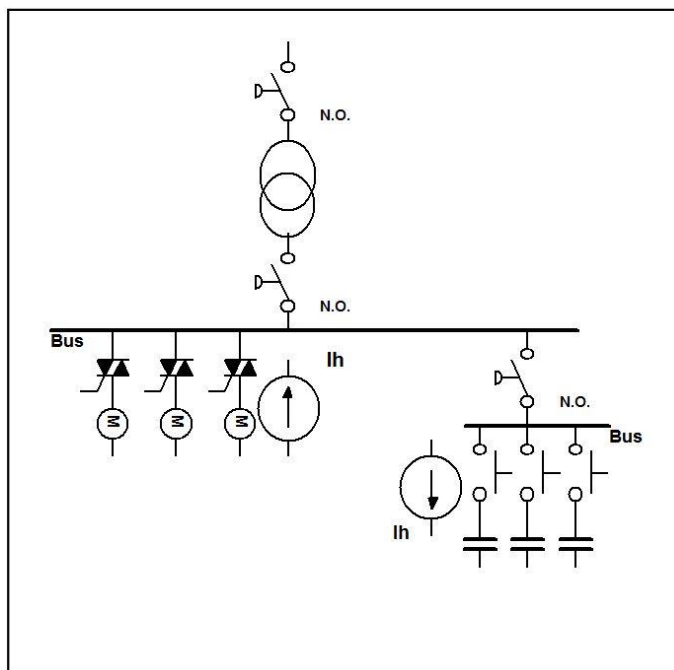


Figura 1 – diagrama unifilar de cargas não lineares na presença de capacitores – Situação típica para ressonância paralela.

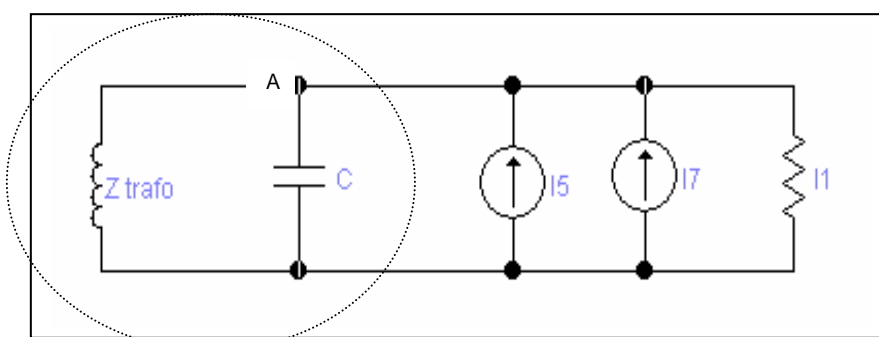


Figura 2 – Modelo elétrico de fontes e cargas não lineares. Ressonância paralela

A interpretação da ressonância (neste caso, ressonância paralela) deve considerar que a avaliação teórica da fórmula apresentada é uma boa ferramenta e algumas variações dos valores assumidos e resultados constatados ocorrerão. Outra avaliação interessante é o conceito de divisor de corrente, que é bastante útil na análise de circulação de corrente nos capacitores, na rede e a estimativa das sobre tensões decorrentes. No esquema da figura 2, existirá no ponto "A" uma divisão das correntes harmônicas que considerará as impedâncias do capacitor e da rede em cada uma destas frequências relativas.

Como exposto, a ressonância série, diferente da paralela ocorre quando a circulação de correntes harmônicas nos capacitores se origina de cargas distorcidas ligadas em outras fontes, ou seja, ligada em outros transformadores e circuitos. A figura 3 ilustra o diagrama unifilar típico de ressonância série.

A condição de ressonância pode ser tratada como a circulação (ou penetração) de correntes harmônicas nos capacitores, causando em última análise a má operação e a queima dos mesmos além de fenômenos indesejados como sobre tensão e aumento da distorção harmônica de tensão na rede, entre outros.

Apesar de a componente resistiva ser desprezada em avaliações simplificadas, na prática ela desempenha importante papel na limitação de correntes oriundas de ressonância.

As correntes harmônicas circularão no circuito formado entre a fonte, os capacitores e a própria carga, sendo dividida nos componentes conforme o modelo de divisor de corrente, sendo as impedâncias consideradas na própria frequência da corrente harmônica. Portanto é muito importante a relação entre as impedâncias da rede e capacitor e o resultado da associação determinará a distorção de tensão a que o circuito será submetido, além da definição da circulação das correntes harmônicas..

A ressonância paralela entre a rede e os capacitores é uma situação crítica para todo o sistema elétrico; é onde as impedâncias da rede e capacitores coincidem em módulo, fazendo com que a impedância resultante tenda a infinito levando a distorção de tensão a valores extremamente elevados.

A situação pode causar significativos danos à infra-estrutura elétrica da instalação. Normalmente a parte mais sensível que são os capacitores serão os primeiros a serem danificados. Em geral os capacitores não suportam as correntes de ressonância que circulam entre os próprios e o transformador.

Note-se que mesmo com pequenas fontes de correntes harmônicas ligadas a este sistema é possível se desenvolver significativas tensões que venham a comprometer sua operacionalidade e segurança. Os bancos de capacitores de múltiplos estágios acabam também por impor ao sistema elétrico, diversas frequências de ressonância em função dos grupos conectados, e os efeitos de cada situação típica devem ser verificados isoladamente.

A redução de corrente esperada pela instalação de capacitores se transforma na verdade em uma situação em que as correntes harmônicas são multiplicadas.

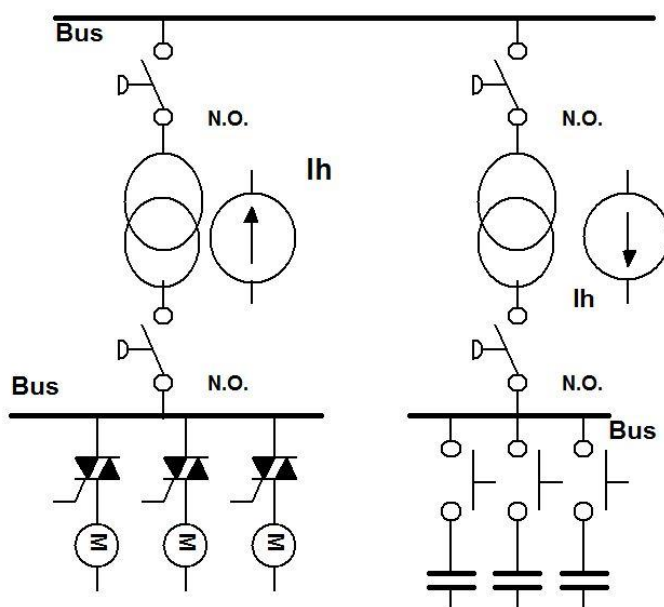


FIGURA 3 - ESQUEMATICO DE RESSONANCIA SERIE

Análise da ressonância do sistema - Estudo do comportamento da frequência de ressonância do sistema em situações típicas:

O caso que se apresenta considera a situação em que um banco automático de capacitores de 1200 kvar está instalado junto a um transformador de 4MVA em 480V.

Avaliando-se o comportamento do banco de capacitores com diversos estágios, a frequência de ressonância varia desde o limite superior de 1100 Hz para injeção de reativos da ordem de 200 kvar, até valores da ordem de 400 Hz para injeção de 1200 kvar. O comportamento da impedância do conjunto esta representada na figura 4.

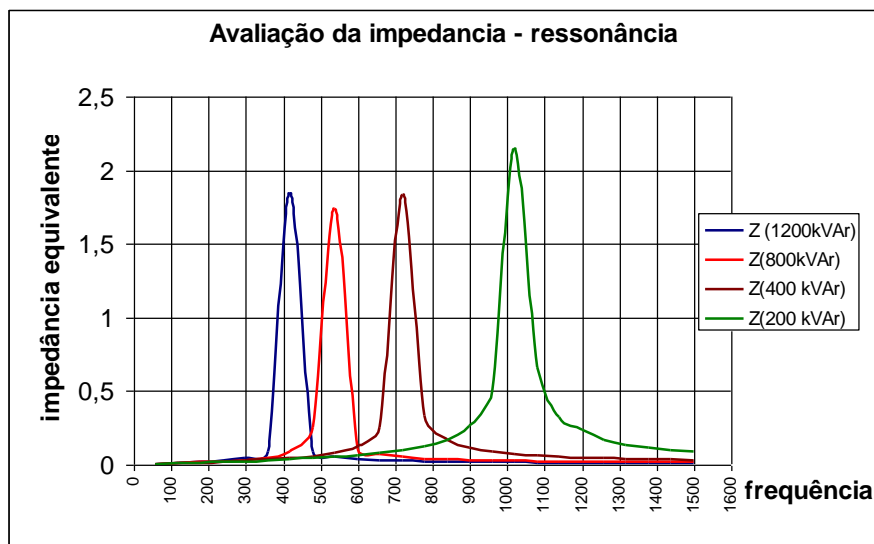
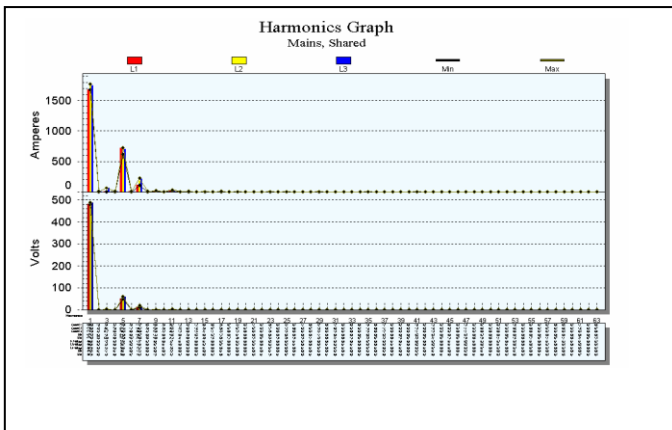


Figura 4 - Avaliação da impedância do sistema em função da frequência para as diversas condições de injeção de energia reativa.

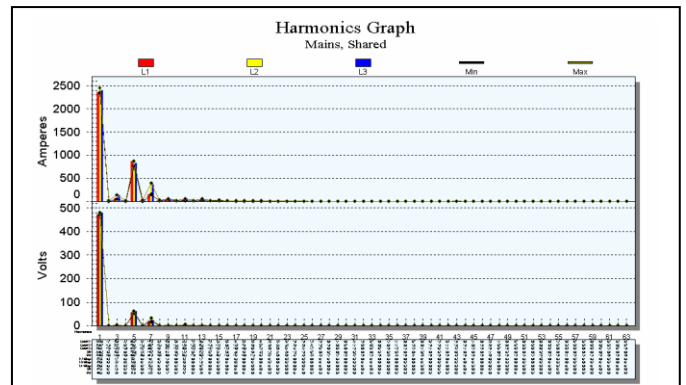
Portanto, é de se esperar que ocorra ressonância harmônica caso alguma carga ligada ao sistema possua espectro de correntes harmônicas neste intervalo. A informação da existência de UPS com conversores de 6 pulsos no rol das cargas alimentadas pelo sistema (transformador e banco de capacitores) indica a condição favorável a ressonância; já que os este tipo de carga (conversores de 6 pulsos) possuem correntes típicas a partir da 5ª ordem (300 Hz) até a 19ª ordem, 1140 Hz.

Como o campo da faixa de variação da frequência de ressonância do sistema é praticamente o mesmo das correntes injetadas pelas cargas, a condição para ocorrência de ressonância harmônica paralela é plena. Nesta situação as

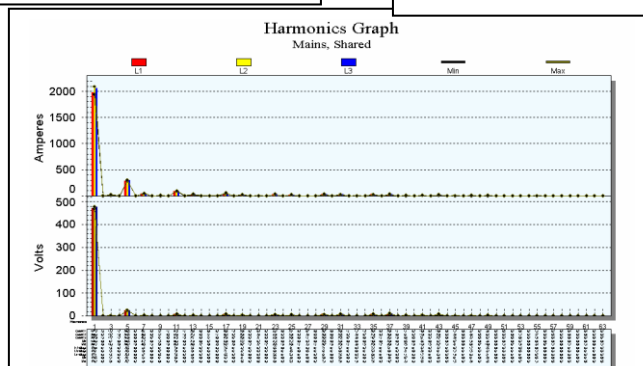
correntes harmônicas são amplificadas, fazendo com que surjam no sistema elétrico correntes e tensões harmônicas (diferentes da frequência fundamental). Como consequência as formas de onda de corrente e tensão são ainda mais deformadas em relação as senóides originais. A rigor a corrente já apresenta forma de onda distorcida pela própria característica da carga, e a distorção de tensão dependerá da relação da carga distorcida com a potencia de curto circuito da fonte. Os espectros de correntes harmônicas ilustradas nas figuras 5 a 7, apresenta a medição de correntes no transformador com manobra de alguns grupos de capacitores, note-se neste conjunto de figuras que sem capacitores a corrente de 5ª harmônica no transformador era menor que 500 A praticamente dobrando na presença dos capacitores (capacitores a plena carga).



Espectro de correntes e tensões harmônicas com carga plena de capacitores



Espectro de correntes e tensões harmônicas com desligamento de alguns capacitores



Espectro de correntes e tensões harmônicas sem capacitores

FIGURAS 5 A 7 – Comportamento das correntes harmônicas na rede em função da manobra de capacitores

A redução da corrente fundamental no transformador seria a única variação esperada caso a compensação da energia reativa fosse adequada, neste caso com reatores anti-ressonantes.



As figuras 8 a 11 apresentam o comportamento das correntes medidas no banco de capacitores com estágios intermediários. O banco de capacitores apresenta circulação de harmônicas nas diversas freqüências harmônicas em função da condição de ressonância. No caso da injeção de 360 kvar verifica-se circulação nas harmônicas (5<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup>, 13<sup>a</sup>, 17<sup>a</sup> entre outras). A medida que maior quantidade de reativo é injetado maior a circulação de correntes de 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens.

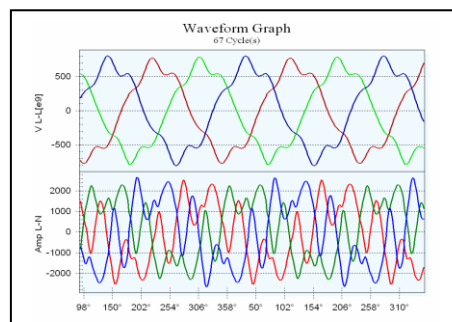
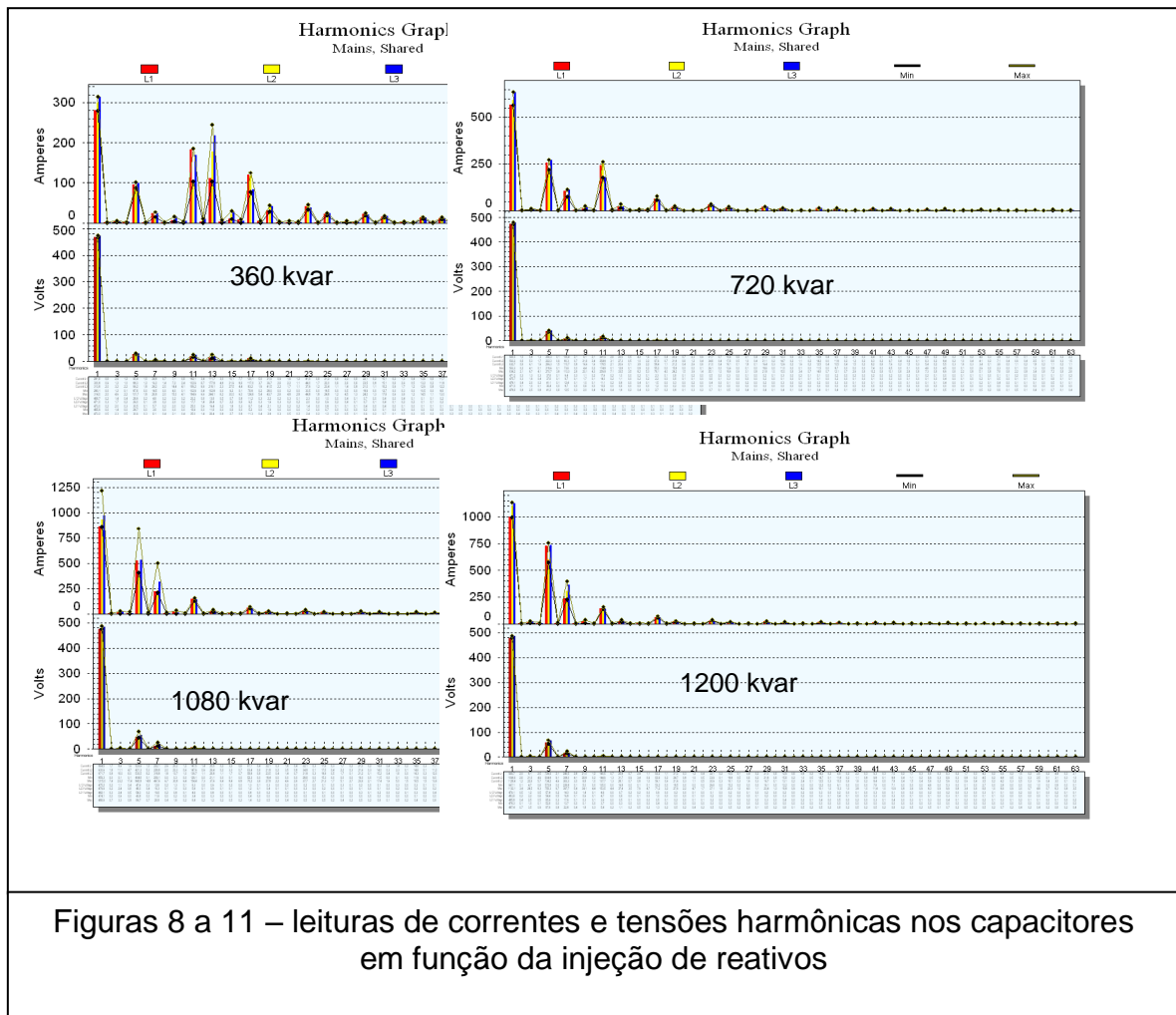


Figura 12 – Forma de onda de corrente e tensão nos capacitores

As figuras 13 e 14 complementam a análise, com as informações das demais variáveis elétricas e leituras no banco de capacitores. O que se observa é a redução da distorção de tensão quando o reativo deixa de ser injetado. No início do período de leitura a tensão está acima da nominal (493 V entre fases; 480V nominal) e a distorção de tensão (THDV) é também alta, da ordem de 12%.

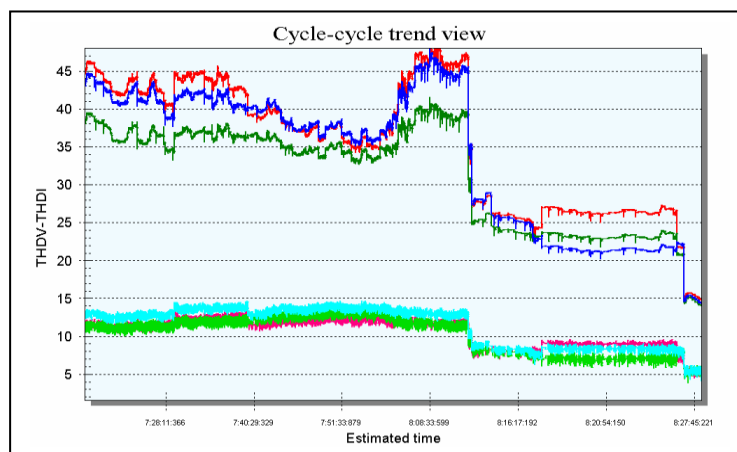


Figura 13 – Comportamento das distorções harmônicas totais de corrente e tensão com e sem capacitores.

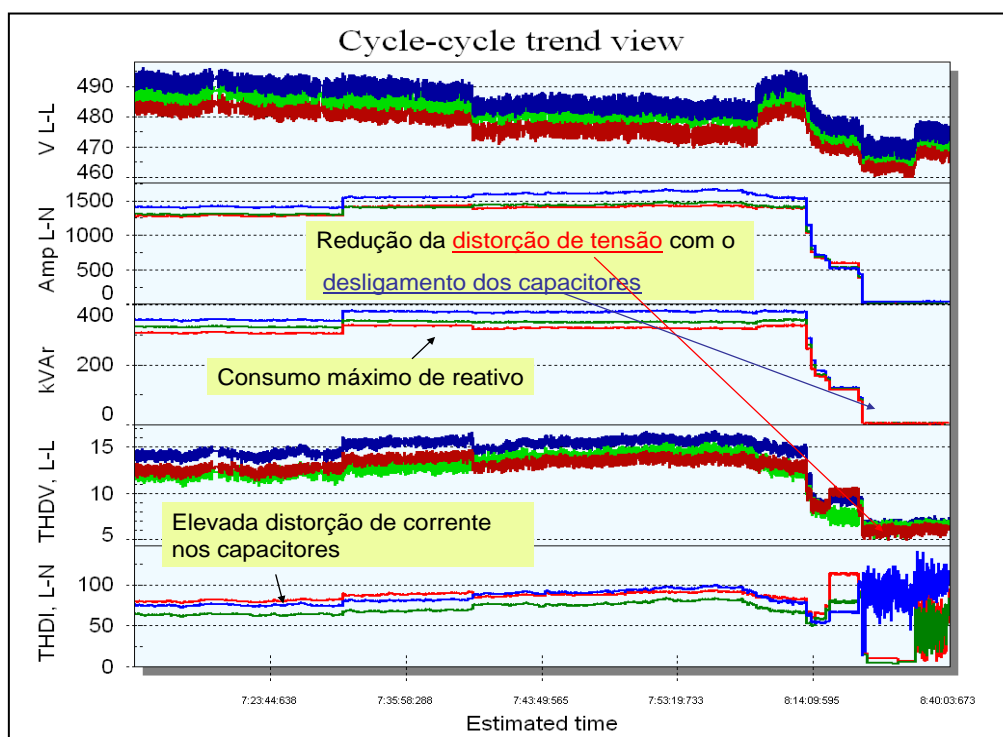


Figura 14 – Comportamento das variáveis elétricas no banco de capacitores, incluindo distorções de tensão e correntes. Como consequência da situação exposta, pode-se listar as ocorrências e conclusões:

- Defeito de operação do UPS com Bloqueio da operação normal da chave estática, que utiliza como referência a tensão da rede, devido a distorção causada pela ressonância harmônica..
- Valores de distorção de tensão superiores aos níveis recomendados por normas, via de regra o limite suportável de distorção de tensão em instalações industriais é aquele recomendado pela IEEE 519 de 5% em aplicações gerais(\*).
- A concepção do sistema de compensação reativa implantado não considerou a existência de cargas não lineares como os UPS, e um novo sistema deve ser concebido com solução que considere as mesmas (por exemplo, sistema dotados de reatores anti-ressonantes) .
- Considera-se importante manter o fator de potência de acordo as premissas da resolução ANEEL 414, a fim de evitar cobrança de energia reativa onerando a conta de energia e sobrecarregando o sistema elétrico.
- Aumento de perdas elétricas devido a circulação de correntes harmônicas. A compensação reativa, quando bem implementada é uma ótima ferramenta para redução de perdas elétricas e substancial melhora da regulação de tensão, contudo quando da ocorrência de ressonância as vantagens esperadas se tornam problemas operacionais
- São verificados outros problemas de operação e automação devido aos elevados níveis de distorção harmônica de tensão.
- Na medida em que a energia reativa vai deixando de ser compensada, a tendência da tensão e distorção de tensão é de apresentar melhores indicadores.
- Os espectros de correntes e tensões harmônicas apontam para o aumento de corrente em função da redução da injeção de energia reativa. Nota-se a presença significativa da 5ª harmônica e outras (7ª, 11ª, etc. ) com menor intensidade.

Aspectos e comentários gerais:

- O incremento de tensão esperado pela compensação reativa em condições normais é da ordem de 1 a 2%, na maioria dos casos. (depende da potência, impedância do trafo e injeção de energia reativa)

- Bancos automáticos de capacitores apresentam influencia no sistema elétrico em função da composição e grupos ligados, podem ainda interferir (e serem interferidos) por outros sistemas elétricos próximos com ressonância serie.
- Em casos mais complexos, se fazem necessárias simulações de comportamento do sistema com as diversas combinações fontes/cargas/capacitores com desenvolvimento de “fluxo de potência harmônico”, com a avaliação prévia das distorções e outras variáveis elétricas esperadas, em função das variações de carga e reativo injetado.
- Reatores anti-ressonantes são uma das soluções adequadas para situações clássicas de ressonância harmônica.
- A definição de sistema de compensação reativa deve compensar não somente a presença de harmônicas, mas outras características de fontes e cargas como isenção de transientes de manobra, velocidade da carga, compatibilidade a geradores e outras particularidades e peculiaridades.
- Compensação reativa adequada é uma excepcional ferramenta de redução de perdas, incremento da qualidade de energia e redução da conta de energia, contudo pode apresentar resultados opostos caso os cuidados apresentados não sejam considerados.