

Análise do Caso de Amplificação de Componentes Harmônicos Não Característicos em Sistema Elétrico Industrial

Nelson C. Jesus, Joao R.Cogo
GSI - Engenharia e Consultoria LTDA
nelson@gsiconsultoria.com.br

Luiz M. Duarte, Luis F. R. Ferreira
GSI - Engenharia e Consultoria LTDA
gsi@gsiconsultoria.com.br

Resumo — Este artigo tem como objetivo apresentar a análise da operação de um sistema elétrico industrial, onde foi verificada a amplificação de componentes harmônicos pares. Foram realizadas simulações no domínio da frequência, bem como medições nos transformadores principais, alimentadores dos retificadores e filtros de harmônicos, comprovando-se a forte presença de correntes com conteúdos harmônicos de ordem par, portanto, não característicos. Serão também apresentadas as causas, impactos em relação às condições de sobrecargas nos reatores dos filtros e possíveis ressonâncias, bem como as recomendações técnicas após a avaliação do desempenho do sistema elétrico industrial.

Palavras-chaves — Harmônicos, Retificadores, Filtros, Medição, Qualidade da Energia, Ressonância, Componentes Pares.

I. INTRODUÇÃO

Conforme análise de sistemas de conversão estática de energia através da retificação sabe-se que para sistemas perfeitamente equilibrados e senoidais, os harmônicos característicos dependem do número de pulsos do retificador, sendo inerentemente os componentes típicos de ordem ímpar, conforme mostrado a seguir:

$$h = kP \pm 1 \quad (1)$$

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (2)$$

Sendo:

h - Ordem do componente harmônico;

I₁ - Magnitude da componente fundamental;

I_h - Magnitude do componente harmônico de ordem h;

k - Numero inteiro;

P - Numero de pulsos do retificador.

Na prática, a reatância de comutação e o atraso no ângulo de disparo dos tiristores tendem a reduzir os valores das máximas amplitudes teóricas calculadas pela relação da fórmula clássica [1]. Portanto, para sistemas com retificadores de seis pulsos, têm-se os harmônicos de 5^a e 7^a ordens como os principais para sistemas de 12 pulsos, os harmônicos de 11^a e 13^a ordens e, para retificadores de 24 pulsos, os componentes de 23^a e 25^a ordens [1-2]. Componentes harmônicos com frequências diferentes das

relacionadas diretamente ao número de pulsos dos retificadores são então denominados de harmônicos não característicos e, neste caso específico, se referem aos componentes pares e múltiplos de três. Em sistemas reais, os harmônicos pares sempre existem, mesmo com amplitudes desprezíveis, devido aos intrínsecos harmônicos residuais, além dos desequilíbrios e componentes ímpares presentes no lado da própria fonte de alimentação. Um sistema de três pulsos com topologia unidirecional não gera uma corrente simétrica em relação ao eixo zero, e assim, produzem componentes harmônicos de ordem par, tais como, 2°, 4°, 6°, 8°, etc. Por outro lado, para uma configuração constituída por duas pontes de três pulsos conectadas em paralelo e defasadas de 180° entre si, tem-se a princípio um sistema simétrico de seis pulsos, conforme mostra a Fig. 1.

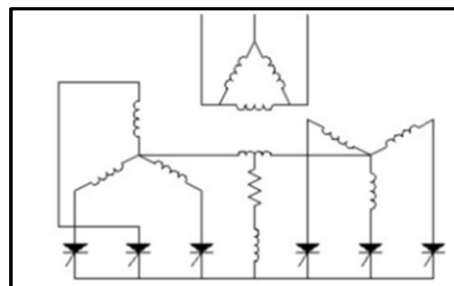


Fig. 1. Configuração de seis pulsos com dupla estrela e reator de inter-phase.

Esta topologia de retificadores foi utilizada em sistemas elétricos para aplicações de eletrólise e ainda continuam em operação em algumas instalações.

II. HARMÔNICOS NÃO CARACTERÍSTICOS

Componentes harmônicos não característicos são normalmente causados por imperfeições no sistema de alimentação em corrente atermada, incluindo tolerâncias nos ângulos de fase de transformadores, reatâncias de comutação e presença de harmônicos não esperados nas tensões de alimentação, afetando os intervalos de disparo dos tiristores utilizados em retificadores controlados [3-5].

Conforme [2], as irregularidades relacionadas à geração de harmônicos não característicos podem ser divididas em três tipos, os quais estão relacionados como se segue.

Tipo I - Desvio de Pulsos: Um dos seis pulsos não ocorre no tempo ou modo correto. Isto resulta em aumento dos harmônicos de corrente devido ao pobre cancelamento dos harmônicos pares, em função das assimetrias em relação ao eixo zero;

Tipo II - Desbalanço de Fase: Diferenças entre os ângulos de fase normalmente não produzem harmônicos pares em sistemas retificadores trifásicos. Como consequência de uma atuação como retificadores monofásicos, geram os espectros completos com harmônicos ímpares e modulação por componentes de ± 2 vezes as frequências dos harmônicos;

Tipo III - Desequilíbrio de Grupo: Os pulsos de disparo dos semicondutores conectados ao pólo positivo (P), (T1,T3,T5), são deslocados em determinado intervalo de tempo, com relação aos disparos dos semicondutores conectados ao pólo negativo (N), (T2,T4,T6). Isto resulta na geração de componentes harmônicos pares, sendo múltiplos de 3 ± 1 .

A ocorrência de desvios e geração de harmônicos não característicos pode ser função da utilização de retificadores e controles antigos frente às atuais variações na qualidade de energia. Esta geração de harmônicos pares, mesmo que em amplitudes aparentemente desprezíveis pode impactar em sobrecargas de filtros de harmônicos, conforme será relatado posteriormente. Este tipo de fenômeno não usual pode implicar em redução da vida útil ou falhas de reatores utilizados em filtros de harmônicos, conforme também foi apresentado em [2], uma das poucas referências técnicas sobre ressonância com componentes harmônicos pares.

III. SISTEMA ELÉTRICO EM ANÁLISE

A Fig. 2 a seguir apresenta o sistema elétrico da planta industrial, constituída por dois transformadores principais que normalmente operam de forma isolada, quatro retificadores de altas correntes secundárias e dois conjuntos de filtros de harmônicos.

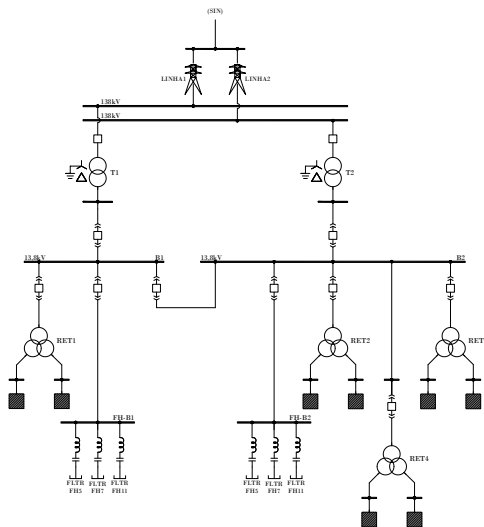


Fig. 2. Diagrama unifilar simplificado do sistema industrial.

IV. RESPOSTA EM FREQUÊNCIA (“FREQUENCY SCAN”)

Este item mostra os resultados das respostas em frequência nas barras em 13,8 kV do sistema, considerando ambos os transformadores em separado e sob operação em paralelo. A Fig. 3 apresenta o resultado da impedância equivalente do transformador T1 para o caso da operação individual de cada transformador.

Já a Fig. 4 para a mesma condição, ilustra a impedância em função da frequência na barra secundária do transformador T2. Portanto verifica-se o efeito do conjunto de três filtros por barra, praticamente com as mesmas frequências de sintonia, ou seja, 5^a, 7^a e 11^a ordens.

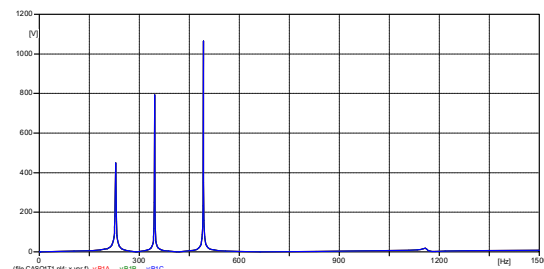


Fig. 3. Impedância por frequência da barra B1 em 13,8 [kV]

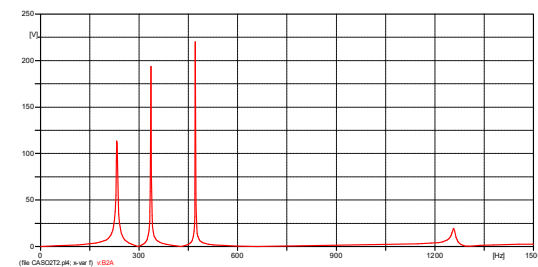


Fig. 4. Impedância por frequência da barra B2 em 13,8 [kV]

A Fig. 5 mostra o resultado da resposta em frequência para a operação em paralelo de ambos os transformadores, variando a amplitude, mas mantendo-se os pontos notáveis de frequência na presença dos filtros de harmônicos.

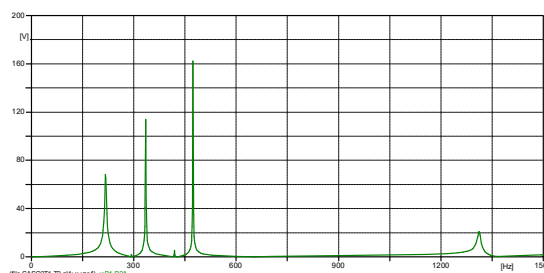


Fig. 5. Impedância por frequência em 13,8 kV com operação em paralelo

A Fig. 6 mostra a comparação dos resultados anteriores, destacando-se ainda os pontos de ressonâncias paralelas, com frequências anteriores aos valores das sintonias dos filtros de harmônicos.

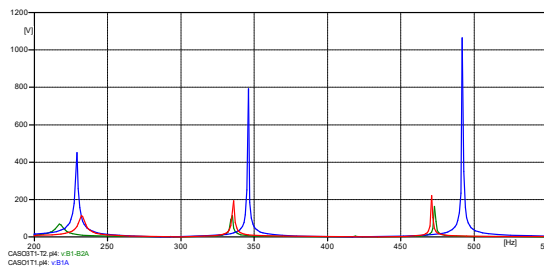


Fig. 6. Comparação entre as impedâncias por frequência em 13,8 kV.

V. RESULTADOS OBTIDOS NAS MEDIÇÕES

A. Medição 1 - Primário dos Transformadores

Neste item apresentam-se os resultados obtidos no lado de alta tensão em 138 kV, sendo que no referido período o

sistema estava sob condições normais de operação, ou seja, com todos filtros de harmônicos em operação. Esta medição foi realizada após uma recomposição do sistema elétrico e assim, na Fig. 7, apresentam-se inicialmente as tensões e correntes no primário do transformador T1, sem a presença dos filtros de harmônicos. Os espectros das tensões e correntes indicaram nesta condição, harmônicos ímpares como os principais, tanto para as tensões quanto para as correntes, conforme verificado a seguir.

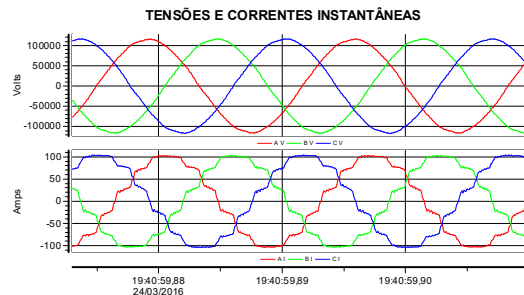


Fig. 7. Tensões e Correntes do Primário de T1 sem Filtros de Harmônicos.

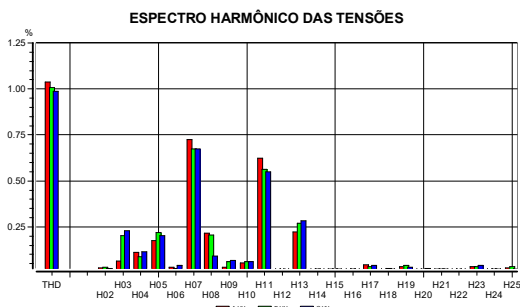


Fig. 8. Espectro Harmônico das Tensões no Primário de T1 sem Filtros.

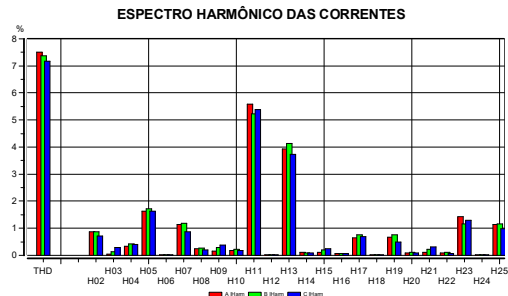


Fig. 9. Espectro Harmônico das Correntes no Primário de T1 sem Filtros.

A Fig. 10 mostra as formas de onda no mesmo ponto de medição, após a entrada dos filtros de harmônicos em operação.

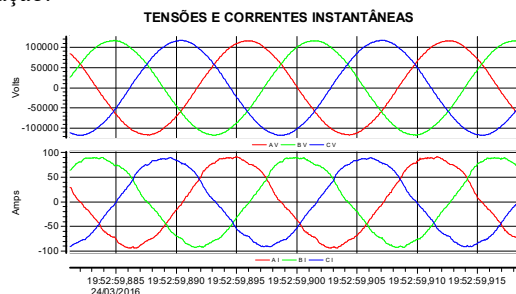


Fig. 10. Tensões e Correntes do Primário de T1 com Filtros de Harmônicos.

Comparando-se os resultados nota-se que as distorções e os espectros harmônicos das tensões não sofreram reduções, permanecendo o componente de 7ª ordem como o mais significativo. Após a conexão dos filtros verificou-se também uma redução das distorções das correntes, exceto para os

componentes pares, especialmente para o harmônico de 4ª ordem, comparando-se os resultados e comportamentos das correntes do sistema, sem e com os filtros conectados.

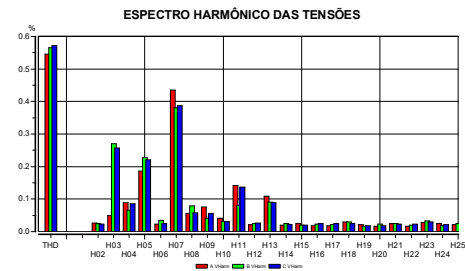


Fig. 11. Espectro Harmônico das Tensões no Primário de T1 com Filtros.

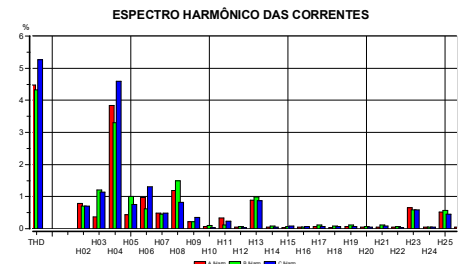


Fig. 12. Espectro Harmônico das Correntes no Primário de T1 com Filtros.

A Fig. 13 mostra as formas de onda das tensões e correntes no lado primário do transformador T2 sob condição normal de operação, com os respectivos filtros conectados. Também neste caso, destacam-se correntes com forte presença de componentes pares, especialmente o harmônico de 4ª ordem.

De qualquer forma, os valores dos componentes pares obtidos nas medições das tensões foram inferiores aos limites recomendados pelo ONS [6]. Destaca-se por outro lado, a presença de componentes pares nas respectivas correntes, conforme se verifica na Fig. 12 e 15.

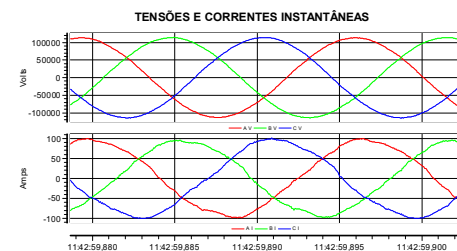


Fig. 13. Tensões e Correntes do Primário de T2 com Filtros de Harmônicos.

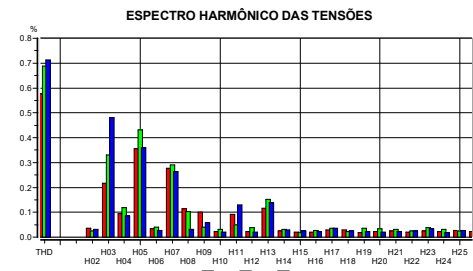


Fig. 14. Espectros Harmônicos das Tensões no Primário de T2 com Filtros.

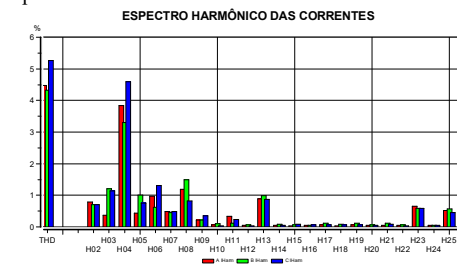


Fig. 15. Espectro Harmônico das Correntes no Primário de T2 com Filtros.

B. Medição 2 - Alimentação dos Retificadores

Este item descreve as medições realizadas nos cubículos de alimentação dos retificadores em operação no sistema, verificando-se os componentes harmônicos principais das correntes no lado de 13,8 kV. A Fig. 16 ilustra as correntes medidas na alimentação do retificador 1, de seis pulsos, conforme espectro harmônico apresentado na Fig.17.

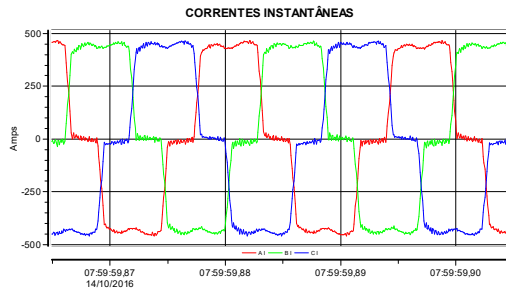


Fig. 16. Correntes de Alimentação do Retificador 1.

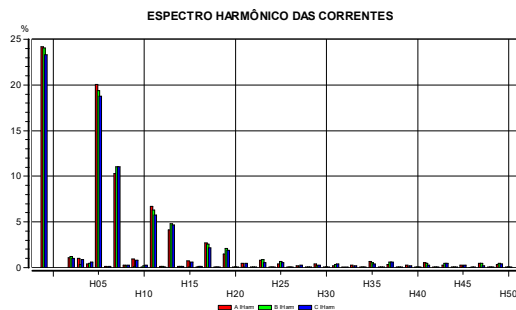


Fig. 17. Espectro Harmônico das Correntes do Retificador 1.

A Fig. 18 apresenta as formas de onda das correntes do retificador 2, também de seis pulsos, conforme espectro harmônico mostrado na Fig.19.

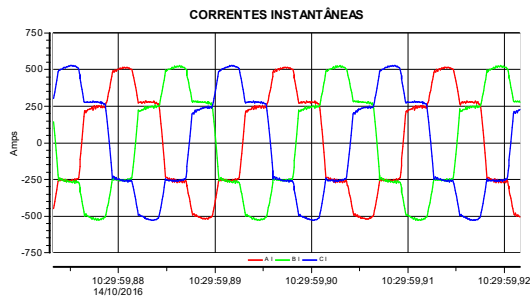


Fig. 18. Correntes de Alimentação do Retificador 2.

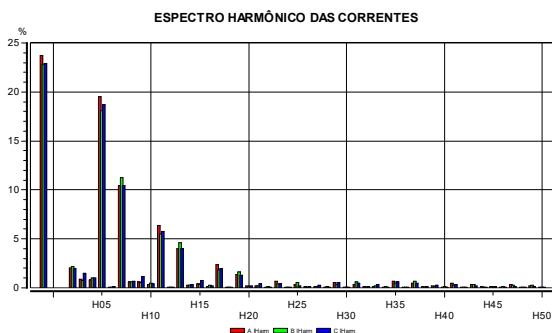


Fig. 19. Espectro Harmônico das Correntes do Retificador 2.

A Fig. 20 mostra as formas de onda de entrada do retificador 3, também de seis pulsos. Neste caso, verificou-se um aumento do componente de 5ª ordem, redução do de 7ª

ordem, além do aumento de 11ª ordem em relação aos espectros harmônicos anteriores, conforme Fig. 21.

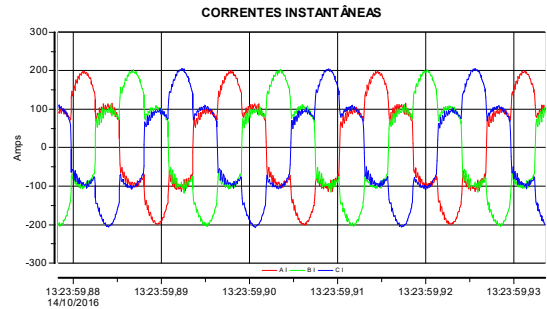


Fig. 20. Correntes de Alimentação do Retificador 3.

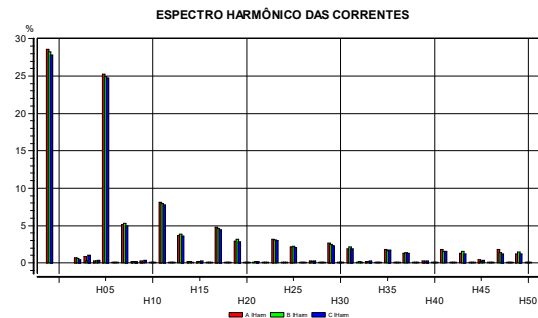


Fig. 21. Espectro Harmônico das Correntes do Retificador 3.

A Fig. 22 ilustra as correntes medidas no cubículo de alimentação do retificador 4, com topologia de 12 pulsos, conforme espectro harmônico apresentado na Fig. 23.

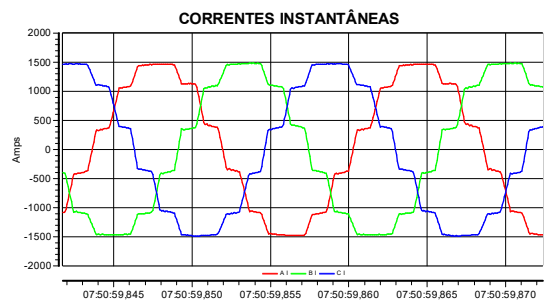


Fig. 22. Correntes de Alimentação do Retificador 4.

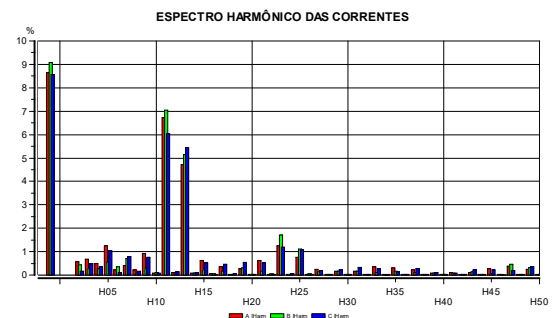


Fig. 23. Espectro Harmônico das Correntes do Retificador 4.

Conforme resultados apresentados anteriormente pode-se considerar que os principais componentes harmônicos das correntes dos retificadores são os típicos de 5ª e 7ª ordens para os retificadores de seis pulsos e os de 11ª e 13ª ordens para o retificador de doze pulsos. Os harmônicos pares representam em relação ao fundamental, valores na faixa entre 0,5 a 2%. Entretanto, como descrito na medição no lado

primário, estas correntes não características estão presentes com valores percentuais mais significativos, como será descrito a seguir, tendo como origem a sua amplificação, verificada a partir das medições com a operação dos filtros de harmônicos.

C. Medição 3 - Filtros de Harmônicos

Os resultados das medições realizadas nos filtros de harmônicos (FH-1) conectados à barra B1 do sistema elétrico em análise serão apresentados a seguir, pois nesta medição os filtros de harmônicos da barra B2 estavam fora de operação, devido à falha do reator do filtro de 5ª ordem, ocorrida durante uma manobra de religamento. A Fig. 24 apresenta as correntes transitórias durante a manobra de energização do conjunto dos filtros de 5ª, 7ª e 11ª ordens. A Fig. 25 mostra o comportamento das correntes dos filtros em regime normal.

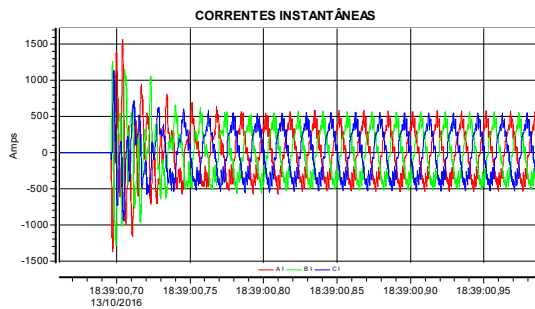


Fig. 24. Correntes Transitórias de Energização dos Filtros de Harmônicos

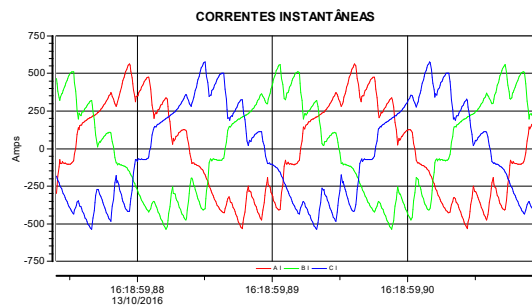


Fig. 25. Correntes de Operação dos Filtros de Harmônicos

Na Fig. 26 têm-se os espectros harmônicos das correntes que alimentam os três conjuntos de filtros, cujos componentes principais são os de 11ª, 13ª ordens, seguidos do componente não característico de 4ª ordem.

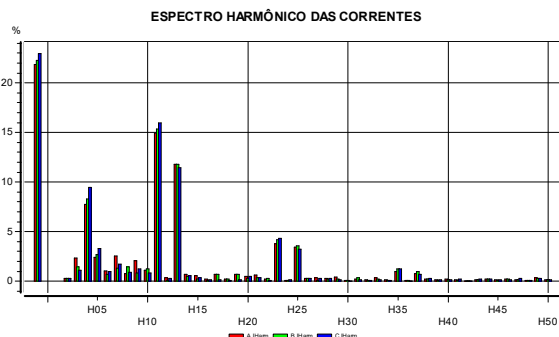


Fig. 26. Espectro Harmônico das Correntes dos Filtros de Harmônicos

Foi também realizada a medição individual dos filtros, sendo possível obter apenas uma fase de cada filtro devido ao número de TCs instalados no sistema. A Fig. 27 mostra simultaneamente as correntes da fase A dos filtros harmônicos de 5ª, 7ª e 11ª ordens em operação na barra B1.

A Fig. 28 ilustra a forma de onda da corrente do filtro de harmônicos de 5ª ordem e a Fig. 29 o respectivo espectro harmônico. Destacam-se neste caso, correntes de 4ª e 5ª ordens, com praticamente as mesmas magnitudes.

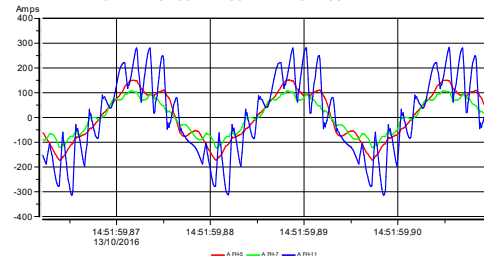


Fig. 27. Correntes Individuais dos Filtros de Harmônicos (FH-1)

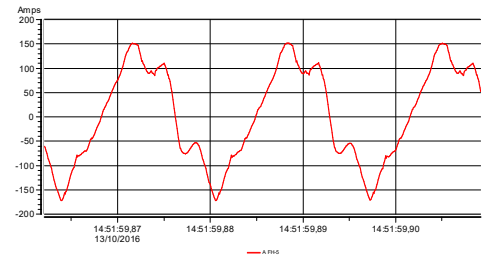


Fig. 28. Correntes de Operação do Filtro de Harmônicos de 5ª Ordem

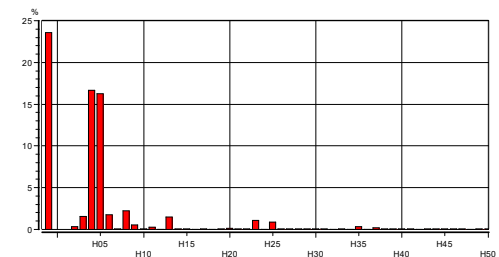


Fig. 29. Espectro Harmônico das Correntes do Filtro de 5ª Ordem

A Fig. 30 mostra a forma de onda da corrente do filtro de harmônicos de 7ª ordem e a Fig. 31 o espectro harmônico, destacando-se componentes de 8ª, 4ª, e 7ª ordens.

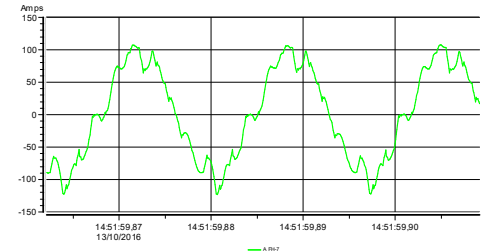


Fig. 30. Correntes de Operação do Filtro de Harmônicos de 7ª Ordem

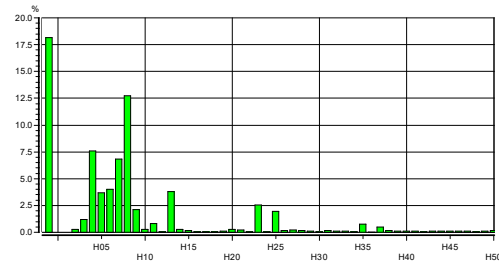


Fig. 31. Espectro Harmônico das Correntes do Filtro de 7ª Ordem

A Fig. 32 ilustra as formas de onda das correntes medidas no filtro de harmônicos de 11ª ordem e a Fig. 33 o seu respectivo espectro harmônico, com predominância dos componentes típicos de 11ª e 13ª ordens, além da importante presença do componente não característico de 8ª ordem.

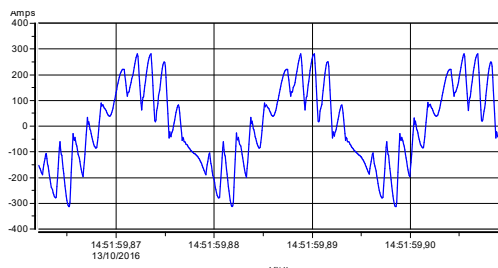


Fig. 32. Correntes de Operação do Filtro de Harmônicos de 11ª Ordem

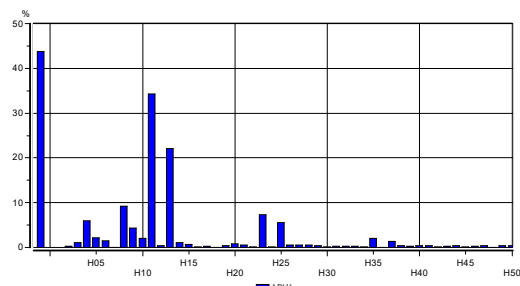


Fig. 33. Espectro Harmônico das Correntes do Filtro de 11ª Ordem

VI. IMPACTO DE HARMÔNICOS NÃO CARACTERÍSTICOS NA OPERAÇÃO DO SISTEMA E DOS FILTROS DE HARMÔNICOS

Com base nas medições realizadas foram inicialmente identificados componentes harmônicos não característicos significativos, de ordem par, comprovados tanto pelas medições no lado secundário em 13,8 kV, quanto no lado primário em 138 kV. Este comportamento é considerado anormal e foi verificado com a operação dos retificadores e filtros de harmônicos conectados ao sistema. Diante destas constatações pode-se inferir que devido às assimetrias dos sistemas de controle de disparo dos retificadores, harmônicos pares estão presentes na operação destes equipamentos. Essas correntes são então amplificadas pelos filtros de harmônicos, visto que os mesmos apresentam sintonias próximas aos componentes típicos de 5ª, 7ª e 11ª ordens e deste modo, para frequências pares anteriores as de sintonias, as impedâncias equivalentes são relativamente altas devido aos pontos de ressonâncias paralelas. Estas características dos filtros contribuem para a absorção de correntes que levam ao seu aquecimento adicional em função destas frequências pares. Esta mesma condição de amplificação de harmônicos pares na operação de filtros foi diagnosticada e analisada em [2], cujo sistema elétrico apresenta forte semelhança com o estudado neste artigo. Naquele caso, os equipamentos que sofreram maiores impactos foram os reatores dos filtros devido ao acréscimo das correntes de operação. Outro aspecto a ser verificado refere-se à operação dos transformadores “inter-phase” utilizados em sistemas retificadores, pois os mesmos são normalmente projetados para absorverem uma pequena corrente de desequilíbrio, mas em condições de assimetrias os mesmos podem ser levados a saturação, assim como o próprio transformador do retificador, cujas partes metálicas podem sobreaquecer, gerando pontos quentes e redução de sua vida útil, assim como nos reatores dos filtros de harmônicos.

VII. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise de um caso de amplificação de harmônicos não característicos, os quais nem sempre são considerados em análises de fluxo harmônico e

nas respectivas especificações dos componentes que constituem os filtros passivos, amplamente utilizados em sistemas elétricos industriais com importantes cargas não lineares [3-5]. Foram verificadas durante as medições correntes com componentes pares com relativas magnitudes, para ambos os transformadores, refletindo tanto no lado secundário quanto no lado primário do sistema. Assim, como para a distorção total de tensão, os valores registrados para o componente individual de 4ª ordem permaneceram próximos a faixa de 0,5% no lado de 138 [kV], portanto, inferior ao limite de 1% estabelecido pelo ONS [6]. Da avaliação realizada, foi comprovado que o aumento das correntes não características estava diretamente relacionado à operação dos retificadores e filtros de harmônicos. Os valores registrados indicaram que para o filtro de harmônicos de quinta ordem, os componentes de 4ª ordem possuem os mesmos patamares do componente principal de 5ª ordem. Nas medições do filtro de 7ª ordem, foram observados componentes de 8ª e 4ª ordens, até mesmo superiores ao componente principal. Para o filtro de 11ª ordem as principais correntes são as características de 11ª e 13ª ordens, mas com presença dos componentes harmônicos pares de 8ª e 4ª ordens. Na medição do conjunto formado pelos filtros, verificou-se também que os principais componentes foram os de 11ª e 13ª ordens, mas o componente harmônico par de 4ª ordem apresenta forte amplificação. Diante do exposto e em função da queima de um dos filtros de 5ª ordem durante uma manobra de energização do sistema, foi também verificada uma sobrecarga no filtro de 7ª ordem. Após esta condição, os filtros da barra B2 saíram de operação, causando uma limitação das condições de operação devido a necessidade de se manter o fator de potência para os valores mínimos recomendados. Com base nas medições e análise realizada ficou esclarecido que a influência das impedâncias dos filtros de harmônicos amplificava as correntes não características de ordem par durante a operação do sistema elétrico em análise. Com base nesta comprovação, foram considerados valores adicionais para a especificação do reator do filtro de 5ª ordem que estava sendo reprojetoado, de forma a retomar a operação plena do sistema. Foi também recomendada uma análise da viabilidade de modernizar os sistemas de controle, reduzindo as assimetrias presentes durante a operação dos retificadores. Este é um importante exemplo da necessidade de se conhecer adequadamente o perfil harmônico da carga e o tipo de operação dos retificadores para análise e estudos de fluxo harmônico, bem como na especificação dos filtros.

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] J. Arrilaga; Watson, N.R.; “Power Systems Harmonics, Ed. Wiley, 2nd Edition, 2003.
- [2] P. C. Buddingh, “Even Harmonic Resonance – An Unusual Problem”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 29, no. 4, pp. 1181-1186, July/August, 2003.
- [3] - IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems - IEEE STD 519-2014, IEEE Power and Energy Society - March 27, 2014;
- [4] IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants - IEEE STD 141-1993 (Red Book), IEEE Industry Applications Society - June 1993;
- [5] - Dugan, C. Roger; McGrabaghan, F. Mark; Santoso, Surya; Beaty, Wayne, H.; “Electrical Power Systems Quality”, McGraw-Hill; Second edition; 2003.
- [6] - ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, Submódulo 2.8, Gerenciamento dos Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica da Rede Básica, Rev. 2016-12, 01/01/2017.