



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO - 10

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

**CAMPANHA DE MEDIÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO DAS CAUSAS DE SOBRECARGA DOS FILTROS 3ª/5ª
HARMÔNICAS DA SE IBIUNA – RESULTADOS E METODOLOGIA UTILIZADA**

Nelson Kagan(*)	Silvio X. Duarte	Tiago P. Souza	José R. Medeiros
EPUSP	EPUSP	EPUSP	JRMED

RESUMO

Neste artigo são apresentados os principais resultados e constatações obtidas de campanhas de medição realizadas com o objetivo de obter as principais causas de sobrecarga dos filtros de 3ª e 5ª harmônicas. Foram realizadas duas campanhas no total, uma entre 12/03/2007 a 04/09/2007 e a outra de 08/01/2008 a 11/04/2008. Nestas campanhas foram utilizados onze medidores sincronizados por GPS. O sincronismo possibilitou relacionar os valores de tensão e corrente obtidos nos diversos pontos de medição. Além de gráficos de tendência e de fatores de correlação, também foram utilizados valores instantâneos fasoriais (magnitude e ângulo de fase) das grandezas medidas.

PALAVRAS-CHAVE

Medição, Harmônicos, Filtro.

1.0 - INTRODUÇÃO

O Sistema de Corrente Contínua de FURNAS foi projetado de tal forma que a presença de apenas um filtro de 3ª/5ª ordens harmônicas ($F_{3^a/5^a}$) na barra de 345 kV na SE de Ibiúna deveria ser capaz de garantir a qualidade de sua operação. A existência de um segundo banco de mesma sintonia teve como objetivo garantir a confiabilidade e a disponibilidade necessárias, possibilitando a retirada de operação de um dos filtros para manutenção sem que essa manobra causasse maiores consequências ou restrições para o sistema.

Nos anos anteriores a 2007 foram identificadas diversas ocorrências de sobrecarga harmônica nos filtros do Sistema de Corrente Contínua de FURNAS, localizados na SE Ibiúna, 345 kV. Estas sobrecargas ocorreram nos $F_{3^a/5^a}$ (denominados ZRC e ZRN), que mesmo operando com os dois filtros simultaneamente ligados, provocou a perda de elementos com a conseqüente saída de operação do filtro.

Esse problema obrigou a utilização contínua dos dois filtros nesta sintonia, em desacordo com o projeto original. Isto dificultou sobremaneira a realização de manutenções preventivas. Adicionalmente, a perda destes filtros deixava o elo de corrente contínua (Elo CC) vulnerável, causando grandes transtornos operativos para o Sistema Interligado Nacional (SIN).

Através da Resolução Nº 739, de dezembro de 2003, a ANEEL autorizou FURNAS a implantar reforços nas instalações de transmissão de energia elétrica da SE Ibiúna, ou seja, a instalação de dois novos filtros de 3ª/5ª harmônicas de 59 MVAR cada (ZRI e ZRJ) para eliminar os transtornos operativos descritos anteriormente.

Apesar da instalação dos filtros adicionais ter solucionado o problema de sobrecarga, o ONS decidiu investigar, através de campanhas de medição, suas possíveis causas, com o objetivo de apoiar a tomada de decisão quanto à aplicação de medidas corretivas e preventivas voltadas ao controle de eventuais sobrecargas futuras nestes

mesmos equipamentos.

Fundamentalmente, as medições realizadas tiveram por objetivo determinar tanto indícios de causas para a elevação dos valores de correntes harmônicas drenadas pelos F3^a/5^a, bem como confirmar ou não suspeitas de causas estabelecidas a priori. As campanhas de medição foram divididas em duas. A primeira campanha de medição ocorreu no período de 12/03/07 a 04/09/07, enquanto a segunda campanha no período de 08/01/08 a 11/04/08.

A medição de corrente harmônica de 5^a ordem teve maior ênfase, tendo em vista o objetivo de identificar relações entre tais correntes harmônicas que fluem pelo sistema com aquelas que fluem nos componentes do F3^a/5^a.

Este artigo técnico tem por objetivo divulgar os principais resultados obtidos ao longo das campanhas realizadas, bem como os aspectos pioneiros e inovadores que permitiram obter conclusões quanto as principais causas relacionadas com a sobrecarga no F3^a/5^a.

2.0 - ASPECTOS GERAIS DA PRIMEIRA CAMPANHA DE MEDIÇÃO

2.1 Etapas e localização dos medidores

A primeira campanha foi composta de 3 etapas. A Figura 1 apresenta, esquematicamente, a localização dos medidores em cada uma destas etapas. A 1^a etapa desta campanha procurou identificar se as correlações entre as correntes medidas nos elementos do filtro eram aderentes em relação à corrente medida no início e no final das linhas e qual elemento do filtro poderia ser utilizado para fazer as correlações. A 2^a e 3^a etapa desta campanha procurou identificar por qual corredor (linhas) as correntes de sobrecarga do filtro estariam chegando, procurando na 3^a etapa checar cargas industriais de grande porte que poderiam eventualmente estar contribuindo para a sobrecarga do filtro.

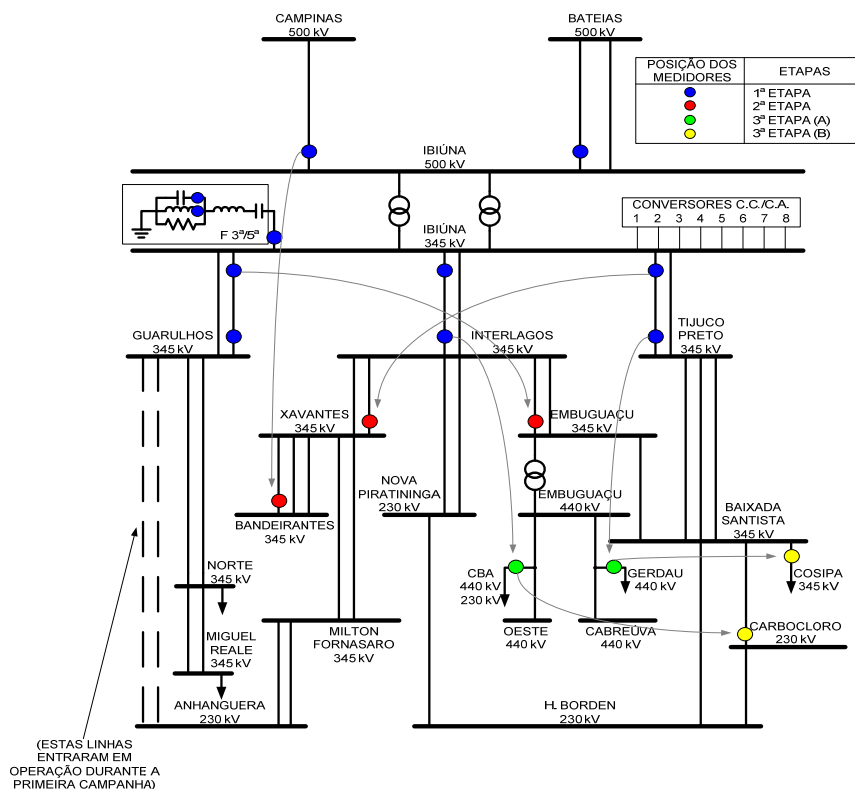


FIGURA 1 – Localização dos medidores ao longo da primeira campanha

2.2 Métodos de avaliação utilizados

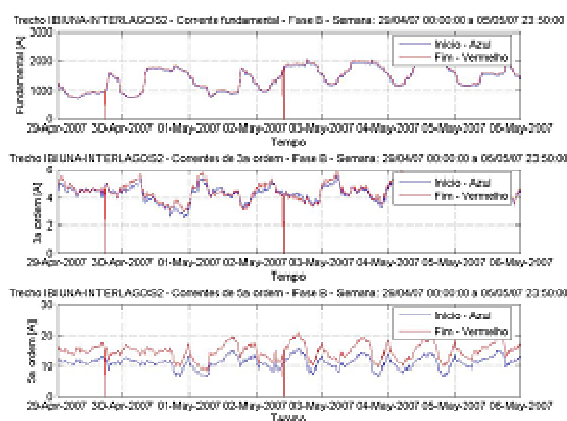
Basicamente, as avaliações realizadas na primeira campanha de medição utilizaram os seguintes recursos metodológicos:

- Correlações entre correntes harmônicas no F3^a/5^a e nas LTs monitoradas;

- Correlações entre correntes harmônicas no F3^a/5^a e injetadas por cargas industriais;
- Gráficos de tendência (valores eficazes registrados em intervalos de 10 minutos);
- Análise fasorial das correntes harmônicas incidentes na SE Ibiúna e no F3^a/5^a;
- Análise fasorial das correntes harmônicas presentes nas LTs.

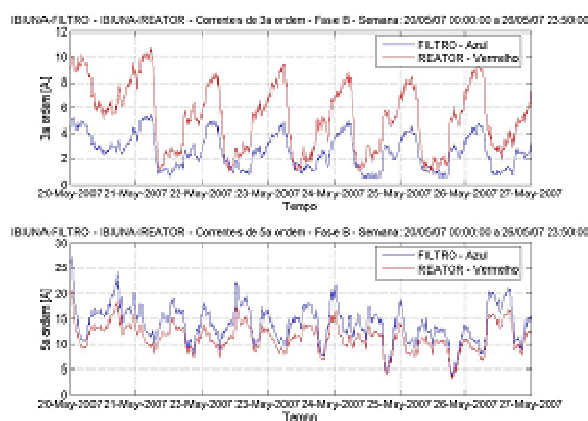
Tendo em vista a restrição quanto ao número de medidores utilizados na campanha de medição (onze medidores), foi necessário realizar uma análise preliminar em etapa preparatória quanto à eficácia dos resultados de medições tendo em consideração a impossibilidade de monitoração simultânea de todos os terminais das linhas de transmissão (início e final), bem como de todos os componentes do F3^a/5^a sob investigação. Abaixo seguem as constatações da etapa preparatória:

- Apesar das diferenças (pequenas) nos valores das correntes medidas nos inícios e finais das linhas, observadas através dos gráficos de tendência, as avaliações decorrentes das correlações mostram a compatibilidade entre as medições (Figura 2);
- Da análise dos resultados, constata-se que a utilização da corrente harmônica em qualquer dos elementos do filtro levará a resultados equivalentes (Figura 3);
- Quando comparada com a componente de 3^a ordem harmônica, a componente de 5^a ordem harmônica (5H) é o principal fator de carregamento dos elementos shunt dos F3^a/5^a.



Correntes nos extremos da LT Ibiúna-Interlagos		
Fatores de correlação e coeficientes angulares para a 5 ^a harmônica		
Fase A	Fase B	Fase C
0,98	0,99	0,99

FIGURA 2 – Comparação dos valores das correntes de 3^a e 5^a harmônica no início e fim da LT Ibiúna – Interlagos (345 kV)



Corrente de 5 ^a ordem do Capacitor do F3 ^a /5 ^a com o Reator do F3 ^a /5 ^a		
Fatores de correlação para a 5 ^a harmônica		
Fase A	Fase B	Fase C
0,99	0,99	0,97

FIGURA 3 – Correntes no reator do ramo paralelo e no capacitor do ramo série – 3^a e 5^a harmônicas

2.3 Constatações e conclusões da primeira campanha

Abaixo seguem as constatações da etapa preparatória e das três etapas de medição que se seguiram.

Etapas 1:

- As LT Ibiúna–Interlagos e Ibiúna–Guarulhos, de uma forma geral, apresentam, dentre as LT avaliadas, maior contribuição para a corrente do F3^a/5^a no período de segunda a sábado durante as cargas média e pesada, com preponderância desta última. Nos domingos e durante a carga leve a correlação é menor.

Etapas 2:

- Baixa contribuição de correntes harmônicas relativas às LT Xavantes–Bandeirantes e Interlagos–Embuguaçu para a corrente da LT Ibiúna–Interlagos;
- Significativa contribuição das correntes da LT Interlagos–Xavantes para as correntes da LT Ibiúna–Interlagos;
- Alta correlação da LT Xavantes–Bandeirantes para a LT Interlagos–Xavantes e da LT Interlagos–Xavantes para a LT Ibiúna–Interlagos.

Etapas 3:

- Embora haja alguma correlação das cargas industriais para as correntes drenadas pelo F3^a/5^a, os valores das contribuições de correntes em geral são muito baixos.

Conclusões:

- Não há indícios de que a sobrecarga no F3ª/5ª de Ibiúna foi provocada de forma determinante pelas cargas industriais avaliadas;
- Existe forte indício de que a maior contribuição para a sobrecarga do F3ª/5ª vem pelos corredores Ibiúna–Interlagos–Xavantes–Milton Fornasaro–Anhanguera e Ibiúna–Guarulhos–Anhanguera.

3.0 - ASPECTOS GERAIS DA SEGUNDA CAMPANHA DE MEDIÇÃO

3.1 Etapas e localização dos medidores

A 2ª campanha de medição foi realizada para permitir identificar os corredores pelos quais se originavam as correntes de 5ª ordem harmônica, já que na primeira campanha estes corredores e origens não ficaram claros.

A segunda campanha foi composta de 3 etapas. A Figura 4 apresenta, esquematicamente, a localização dos medidores em cada uma destas etapas.

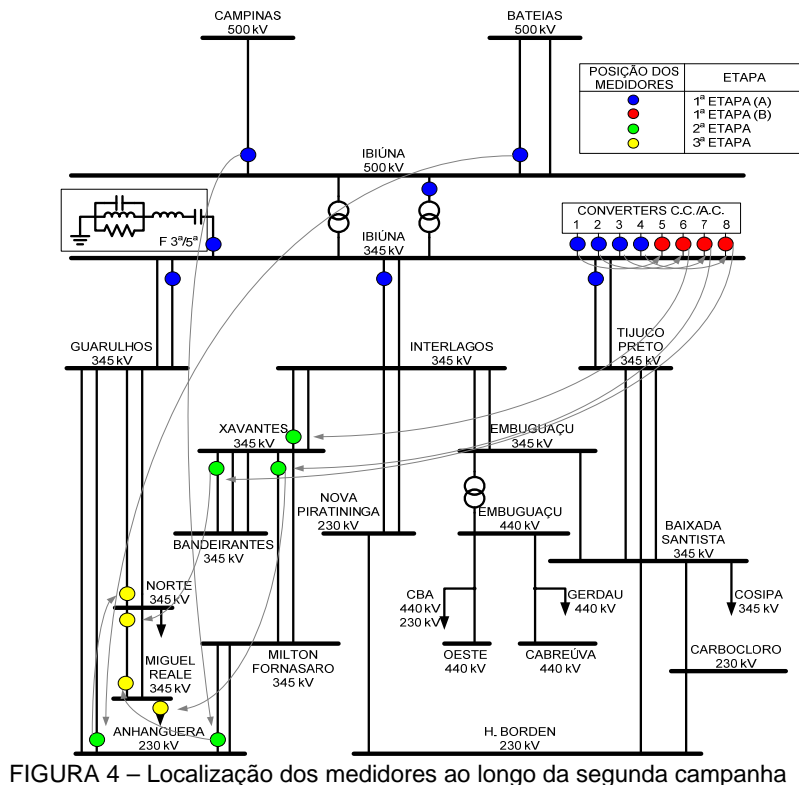


FIGURA 4 – Localização dos medidores ao longo da segunda campanha

3.2 Constatações e conclusões da segunda campanha

Ao longo da segunda campanha os seguintes aspectos foram avaliados:

- Análise das correntes de 5ª harmônica injetadas pelas LT em torno da SE Ibiúna no F3ª/5ª;
- Análise das correntes de 5ª harmônica injetadas pelas LT do corredor Ibiúna–Interlagos–Xavantes–Bandeirantes;
- Análise das correntes de 5ª harmônica injetadas pelas LT do corredor Ibiúna–Guarulhos–Norte–Miguel Reale;
- Análise do comportamento do fluxo da corrente de 5ª ordem harmônica em função da topologia da rede de 500kV ligada à SE Ibiúna.

Abaixo são listadas as principais constatações da segunda campanha.

- Quando comparadas, as correntes de 5ª ordem harmônica geradas pelos conversores são muito pequenas em relação às correntes das LTs Ibiúna–Interlagos, Ibiúna–Guarulhos e Ibiúna–Tijuco Preto. Ressalta-se que o F3ª/5ª foi projetado apenas para as correntes dos conversores mais 10% e, no entanto, os valores medidos mostram uma maior contribuição proveniente do sistema CA (Figura 5);
- As correntes das LTs Ibiúna–Interlagos, Ibiúna–Guarulhos e Ibiúna–Tijuco Preto estão praticamente em fase umas com as outras (Figura 6);

- As correntes de 5ª ordem harmônica das LTs Ibiúna–Interlagos e Ibiúna–Guarulhos apresentam, além da proximidade de fase, proximidade em intensidade. As LTs Ibiúna–Interlagos e Ibiúna–Guarulhos têm uma intensidade de corrente da ordem de 2 a 3 vezes maior que a da LT Ibiúna–Tijuco Preto (Figura 6);
- Existe forte correlação entre as correntes de 5ª ordem harmônica da LT Xavantes–Bandeirantes para com a LT Interlagos–Xavantes, e também com a LT Ibiúna–Interlagos, sendo que as ordens de grandeza destas correntes são comparáveis (Figuras 7 e 8);
- A maior contribuição da corrente de 5ª ordem harmônica para a LT Ibiúna–Interlagos vem da SE Xavantes através dos 3 cabos subterrâneos da LT Xavantes–Bandeirantes (Figuras 7 e 8);
- Ocorre um efeito de amplificação da corrente de 5ª ordem harmônica nos cabos subterrâneos da ordem de 3 a 4 vezes (Figura 9). Observa-se que as medições apresentadas na Figura 9 não são simultâneas, mas correspondem a valores típicos observados durante a campanha;
- Existe forte correlação entre as correntes de 5ª ordem harmônica das LTs Guarulhos–Norte e Norte–Miguel Reale para com a LT Ibiúna–Guarulhos (Figuras 10 e 11);
- As maiores contribuições para a corrente de 5ª ordem harmônica da LT Ibiúna–Guarulhos vem das SEs Norte e Miguel Reale. Ressalta-se, neste caso, o efeito de amplificação da componente de 5ª ordem harmônica da ordem de 2 vezes na LT subterrânea Norte–Miguel Reale (Figuras 10 e 11);
- As contribuições das cargas situadas na SE Norte são da mesma ordem de grandeza da contribuição vinda da SE Miguel Reale através dos cabos subterrâneos (Figura 12).
- Pela análise das Figuras 13 a 16, verifica-se que quando o sistema de 500 kV visto do barramento de 345 kV de Ibiúna apresenta um comportamento próximo da ressonância na 5ª harmônica, resulta numa absorção mais eficiente das correntes injetadas pelo sistema de 345 kV conectado a SE Ibiúna e, por consequência, numa redução no valor da corrente de 5ª harmônica no F3a/5a. Tal comportamento ressonante depende das alterações de configuração ocorridas no SIN necessárias à transmissão de potência na direção Sul–SE. Tais alterações combinadas com o estado (aberto ou fechado) de um dos circuitos da LT Ibiúna–Bateias afetam a referida condição de ressonância.

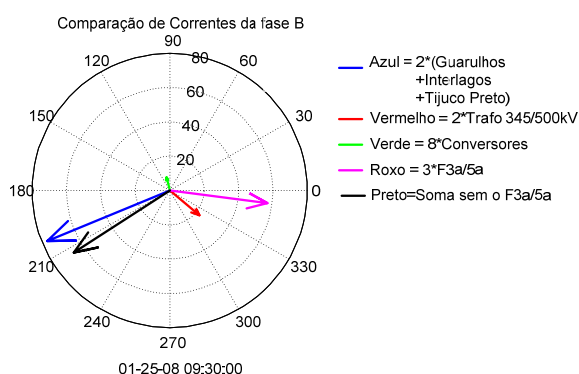


FIGURA 5 – Fasores da componente de 5ª ordem harmônica das correntes da fase B da SE Ibiúna

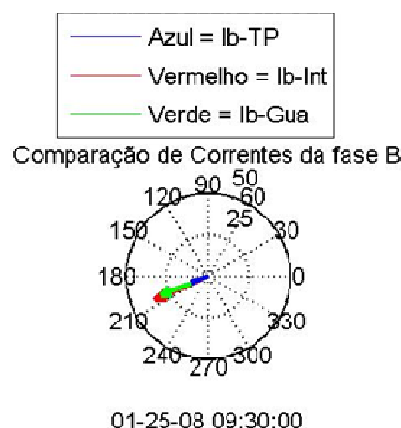
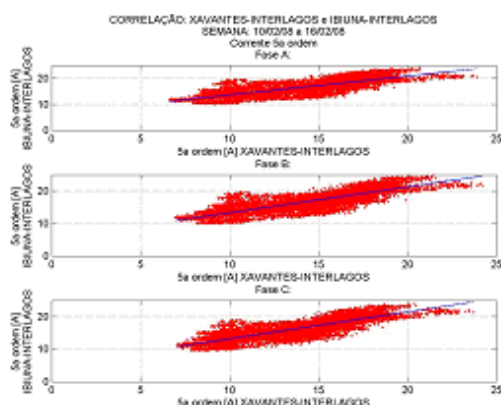
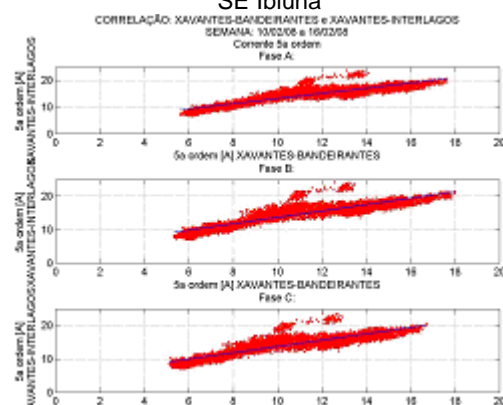


FIGURA 6 – Fasores da componente de 5ª ordem harmônica das correntes no barramento de 345 kV da SE Ibiúna



Xavantes-Interlagos e Ibiúna-Interlagos		
Fatores de correlação para a 5ª harmônica		
Fase A	Fase B	Fase C
0,80	0,84	0,84

FIGURA 7 – Correlação entre as correntes da LT Interlagos – Xavantes e as correntes na LT Ibiúna – Interlagos.



Xavantes-Bandeirantes e Xavantes-Interlagos		
Fatores de correlação para a 5ª harmônica		
Fase A	Fase B	Fase C
0,89	0,89	0,88

FIGURA 8 – Correlação entre as correntes da LT Xavantes – Bandeirantes e as correntes na LT Xavantes – Interlagos.

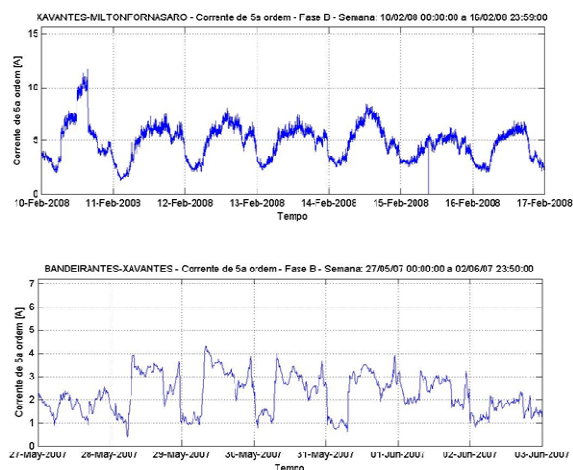
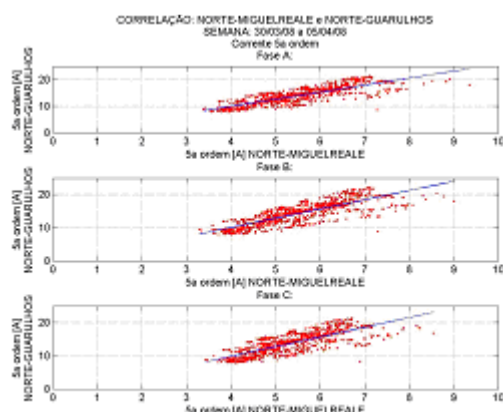


FIGURA 9 – Correntes à frequência fundamental e 5ª ordem harmônica da LT Bandeirantes – Xavantes, medidas nos terminais Xavantes e Bandeirantes



Norte-Miguel Reale e Norte-Guarulhos		
Fatores de correlação para a 5ª harmônica		
Fase A	Fase B	Fase C
0,84	0,82	0,79

FIGURA 11 – Correlação entre as correntes da linha Norte – Miguel Reale com relação às correspondentes correntes na linha Guarulhos – Norte.

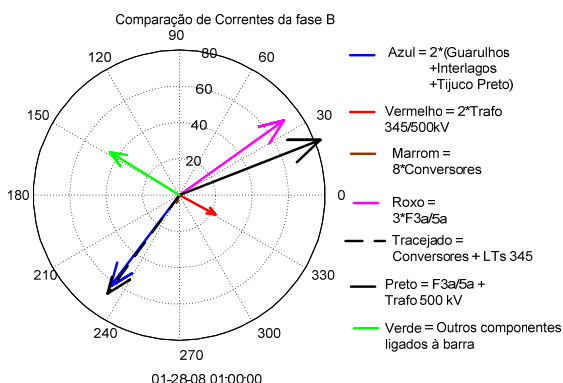
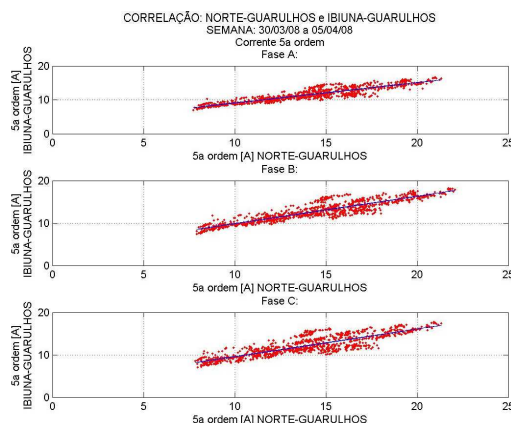


FIGURA 13 – Fasores de 5ª ordem harmônica das correntes da fase B medidas no barramento 345 kV da SE Ibiúna com os dois circuitos da LT Ibiúna – Bateias 500 kV fechados



Norte-Guarulhos e Ibiúna-Guarulhos		
Fatores de correlação para a 5ª harmônica		
Fase A	Fase B	Fase C
0,91	0,91	0,87

FIGURA 10 – Correlação entre as correntes da LT Guarulhos – Norte com relação às correspondentes correntes na LT Ibiúna – Guarulhos.

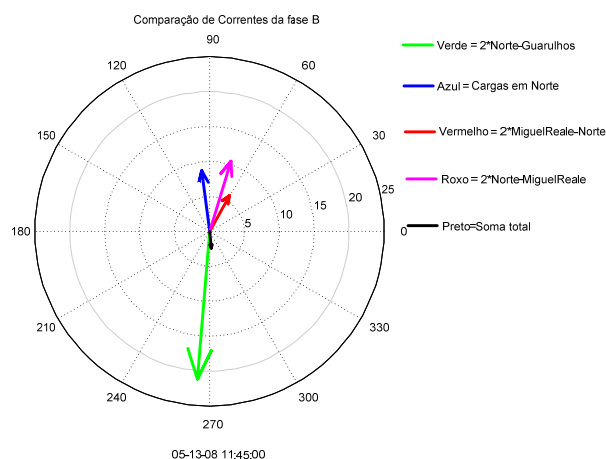


FIGURA 12 – Comparação dos fasores das componentes de correntes de 5H na SE Norte, e corrente na ponta do cabo na SE Miguel Reale

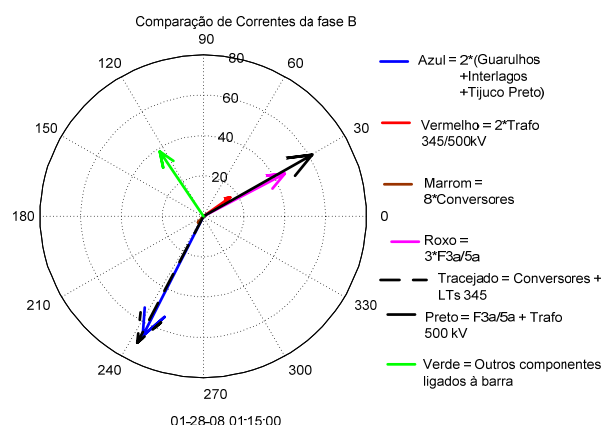


FIGURA 14 – Fasores de 5ª ordem harmônica das correntes da fase B medidas no barramento 345 kV da SE Ibiúna com um dos circuitos da LT Ibiúna – Bateias 500 kV aberto

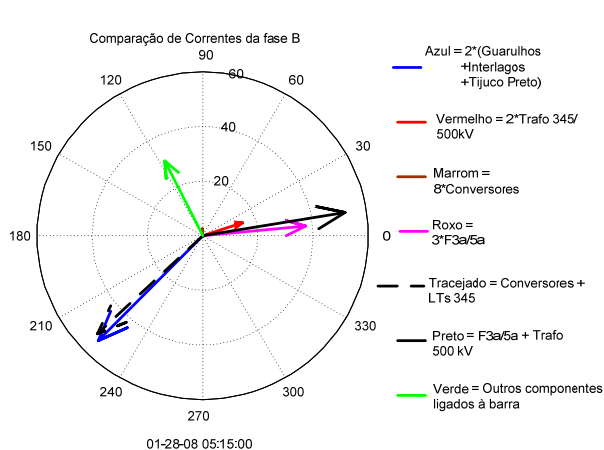


FIGURA 15 – Fasores da componente de 5ª ordem harmônica das correntes da fase B medidas no barramento 345 kV da SE Ibiúna com um dos circuitos da LT Ibiúna – Bateias 500 kV aberto

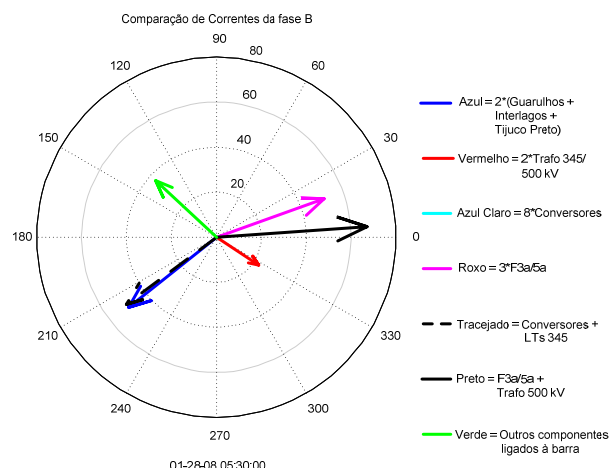


FIGURA 16 – Fasores da componente de 5ª ordem harmônica das correntes da fase B medidas no barramento 345 kV da SE Ibiúna com os dois circuitos da LT Ibiúna – Bateias 500 kV fechados

Abaixo são listadas as principais conclusões da segunda campanha de medição:

- As harmônicas produzidas pela rede elétrica externa à SE Ibiúna constituem-se na principal contribuição para a corrente de 5H que circula no F3ª/5ª;
- A principal contribuição para a sobrecarga harmônica no F3ª/5ª foi obtida da LT Ibiúna–Interlagos, sendo que a contribuição principal vem da SE Bandeirantes devido a um forte efeito de amplificação de corrente nos três cabos subterrâneos;
- Outra importante contribuição para a sobrecarga harmônica no F3ª/5ª foi obtida da LT Ibiúna–Guarulhos:
 - o Por um efeito de amplificação de corrente nos dois cabos subterrâneos da LT Norte–Miguel Reale;
 - o Das cargas de concessionárias distribuidoras de energia elétrica conectadas à SE Norte. A injeção de corrente de 5ª ordem, neste caso, teve valor de pico da ordem de 30 A.

4.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresentou as principais constatações obtidas após a realização das campanhas de medição realizadas com o objetivo de obter as principais causas de sobre carga dos filtros de 3ª e 5ª harmônicas. O processo de realização das campanhas foi descrito sumariamente. Foram apresentadas as principais características das campanhas realizadas.

A medição de corrente harmônica de 5ª ordem teve maior ênfase, tendo em vista o objetivo de identificar relações entre tais correntes harmônicas que fluem pelo sistema com aquelas que fluem nos componentes do F3ª/5ª.

As medições mostraram que a parcela da corrente de 5ª ordem harmônica proveniente da rede elétrica externa a SE Ibiúna constitui-se na principal contribuição para a corrente desta ordem harmônica que circula no F3ª/5ª.

As correntes de 5ª harmônica que apresentaram as maiores contribuições ao carregamento dos F3ª/5ª são provenientes das subestações Bandeirante e Norte. Adicionalmente, foi observada uma amplificação importante destas correntes decorrente da presença de cabos subterrâneos de alta tensão (345 kV) conectados a aquelas subestações.

Não obstante a instalação dos novos F3ª/5ª ter solucionado o problema de sobrecarga, o sistema de monitoração destes filtros tem mostrado uma tendência de crescimento da corrente de 5ª harmônica, provavelmente devido ao aumento de novas cargas e componentes não-lineares supridos pela rede elétrica de transmissão e distribuição. Tal tendência poderá implicar, no futuro, na implantação de medidas adicionais de controle destas correntes.

Os efeitos de redução ou aumento do valor da corrente de 5ª harmônica no F3ª/5ª em função de chaveamento da LT Ibiúna–Batéias estão, em princípio, relacionados com a ocorrência de ressonância entre os transformadores 500/345 kV de Ibiúna com os capacitores-série da LT Ibiúna–Batéias. Tais efeitos, contudo, são condicionados com a direção do fluxo de potência na região, ou seja, Sul → Su-deste ou vice-versa. A direção do fluxo em si representa uma maior ou menor geração na região Sul, o que significa a presença no sistema de um maior ou menor número de máquinas. Apesar destes indícios, avaliações adicionais por simulação deverão ser realizadas.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) KAGAN, N., BRASIL, D.O.C., DUARTE, S.X., SOUZA, T.P., MEDEIROS, J.R. Harmonics Measurement Campaign Results to Identify Causes of Component Overloads on 3rd and 5th Harmonic Filters in the Ibiuna Substation; Artigo C4-101, apresentado na Bienal CIGRÉ-Paris 2010.
- (2) ONS. Padrões de Desempenho da Rede Básica, Submódulo 2.2, Procedimentos de Rede, Revisão 2. Brasil.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Nelson Kagan

Nascido em São Paulo, em 1960. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (1982), Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (1988), Doutorado (Ph.D) em Engenharia Elétrica - University of London (1993) e Livre-docência pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (1999). Atualmente é Professor Titular da Universidade de São Paulo, onde leciona desde 1983. É revisor da Sociedade Brasileira de Automática, revisor e Senior Member do IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers, Diretor Administrativo da Sociedade Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica e Representante do CIRED no Brasil. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Transmissão e Distribuição da Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: Qualidade de energia elétrica, Análises de redes elétricas, Otimização de sistemas elétricos de potência e redes e sistemas inteligentes. Possui 160 artigos publicados em conferências nacionais e internacionais, 5 livros publicados e 26 artigos em periódicos.



Silvio Xavier Duarte

Nascido em São Paulo, em 1966. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Presbiteriana Mackenzie (1997), Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (2000) e Doutorado (Ph.D) em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (2006). Atualmente é engenheiro consultor da Universidade de São Paulo, Professor Assistente I da Fundação Educacional Inaciana Pe Sabóia de Medeiros e Professor e ex-Coordenador do curso de engenharia elétrica da Fundação Instituto Tecnológico de Osasco. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Eletrônicos de Medida e de Controle, atuando principalmente nos seguintes temas: Qualidade de energia elétrica, indicadores para controle da qualidade de energia, monitoração, estimador de vtcds, medição de tensão e proteção. Possui 34 artigos publicados em conferências nacionais e internacionais e 6 artigos em periódicos.



Tiago Poles de Souza

Nascido em São Caetano do Sul, em 1979. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (2007) e está cursando o Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (2011). Atualmente é engenheiro pesquisador da Universidade de São Paulo, onde trabalha com consultorias e projetos de

pesquisa e desenvolvimento desde 2007. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Transmissão e Distribuição da Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: Qualidade de energia elétrica, harmônicos, ensaios em laboratório, medições de fenômenos de qualidade de energia elétrica, alocação ótima de medidores e redes e sistemas inteligentes. Possui 4 artigos publicados em conferências nacionais e internacionais e 2 artigos em periódicos.

José Roberto de Medeiros

Nascido em Rio de Janeiro, em 1953. Possui graduação em Engenharia Elétrica pelo Instituto Militar de Engenharia (1976), Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1991). Atualmente é engenheiro consultor na área de qualidade de energia elétrica para o ONS.