



GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

IDENTIFICAÇÃO DE PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA E PROPOSTA DE SOLUÇÃO DEVIDO À INTERAÇÃO COM SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO A LED E OCORRÊNCIAS DE MÚLTIPLAS PASSAGENS PELO ZERO DAS TENSÕES

NELSON CLODOALDO DE JESUS(1); GUSTAVO RODRIGUES DOS SANTOS(1); LUIZ MARLUS DUARTE(1); THIAGO PEREIRA FRANCO(1); WILLIAN SOUZA DE JESUS(1); JOÃO LUCAS GONÇALVES NASCIMENTO(1)
GSI ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA(1)

RESUMO

Este informe técnico tem como objetivo apresentar a análise de um caso envolvendo problemas de qualidade da energia e falhas de equipamentos em uma instalação portuária. O sistema de iluminação estudado era composto por lâmpadas a vapor metálico que foram substituídas por luminárias com LED. Após esta alteração foram relatadas falhas em equipamentos, sendo a causa raiz relacionada à interação desta carga com o sistema, resultando em elevadas distorções das tensões. Serão apresentados os resultados obtidos durante a aplicação do filtro proposto, que se mostrou plenamente adequado ao objetivo de eliminar as múltiplas passagens pelo zero das tensões (zero crossings).

PALAVRAS-CHAVE

Qualidade da Energia Elétrica, Iluminação LED, Medições, Zero Crossings, Filtros Passa-baixa.

1.0 - INTRODUÇÃO

A difusão de sistemas de iluminação utilizando tecnologia LED tem se tornado cada vez mais abrangente e atrativa sob o ponto de vista de eficiência energética (1), (3), (4), (8). Conforme informações disponibilizadas no início deste trabalho, o sistema de iluminação em análise era composto basicamente por lâmpadas do tipo vapor metálico, sendo substituídas por luminárias com funcionamento por LED (*Light-Emitting Diode*). Segundo relatos dos operadores, a partir da alteração do sistema de iluminação convencional, foram verificados problemas e ocorrências de falhas em equipamentos eletrônicos, como os sistemas de alimentação ininterrupta (*nobreaks*) e suas respectivas cargas, constituídas por câmeras de monitoramento e antenas de comunicação, empregadas nos sistemas prioritários de supervisão (1), (2), (4). Com o objetivo de caracterizar tais perturbações, foram realizados testes e medições nos sistemas de iluminação a LED e *nobreaks*, resultando no registro e identificação de múltiplas passagens pelo zero nas formas de onda das tensões, caracterizando o fenômeno de *zero-crossings*.

Complementando esta avaliação, não foram identificadas elevadas distorções da carga referente à iluminação LED em outros sistemas, demonstrando que apenas o sistema elétrico estudado apresentou variações que poderiam afetar o modo de operação dos sistemas eletrônicos de controle dos LEDs. A partir desta avaliação, foram propostas alternativas para mitigação dos problemas, e diante das características do sistema, comprovadas na operação dos LEDs com a instabilidade das cargas sensíveis alimentadas pelos *nobreaks* (1), foi proposta uma análise para definição de filtros na entrada da alimentação dos *nobreaks*, de forma a mitigar os problemas de qualidade da energia elétrica (QEE) descritos neste trabalho (2).

2.0 - ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SISTEMA ELÉTRICO

A análise da qualidade de energia realizada indicou uma interação entre o sistema elétrico e as respostas dos dispositivos de alimentação dos sistemas de iluminação LED (*Drivers*), resultando em amplificações das correntes do sistema de iluminação e forte degradação das tensões de alimentação das cargas, inclusive com valores superiores aos máximos limites normalmente recomendados nas referências (4), (5), (6), (7). As medições foram realizadas inicialmente durante a alimentação do sistema de iluminação por LED e o *nobreak*, instalados a partir do mesmo ponto de conexão.

A Figura 1 apresenta o comportamento dos valores das distorções antes e após a energização de todas as 16 luminárias a LED, com potências unitárias de 350 W cada, em conjunto com o referido *nobreak*. Observando o comportamento do sistema, notam-se distorções das tensões com valores máximos próximos a 15%. Foram caracterizadas variações intermitentes, elevadas distorções das tensões e a presença de inter-harmônicos, próximos aos componentes de 36ª e 32ª ordens (1).

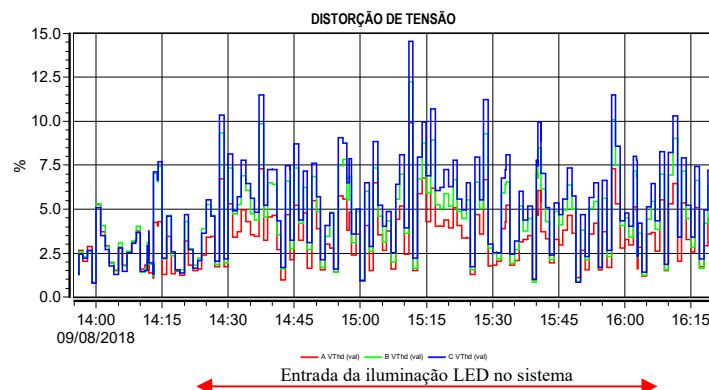
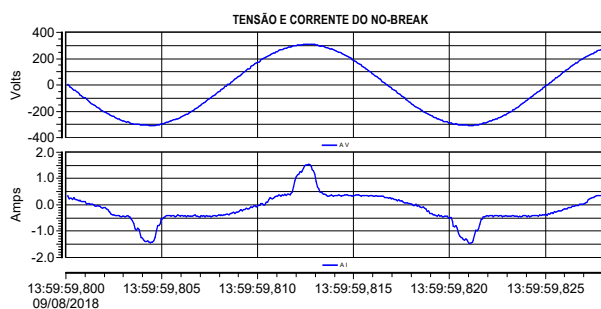
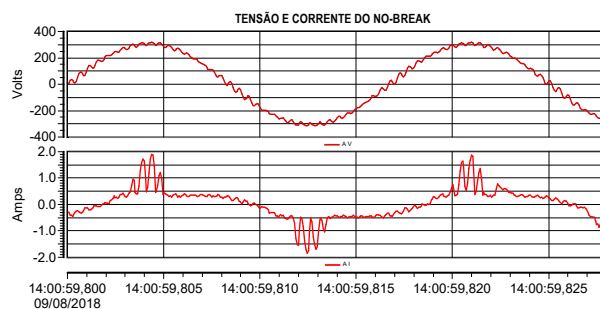


FIGURA 1 - Comportamento das distorções das tensões.

De acordo com o modo da instalação do sistema, sem considerar inicialmente os sistemas de iluminação, a corrente da fase A é a responsável pela alimentação do *nobreak* e das respectivas cargas críticas. Para este instante específico, mostrado inicialmente na Figura 2(a), as distorções das tensões apresentaram valores inferiores a 0,9%, sendo os principais componentes os de 7ª e 36ª ordens. Por outro lado, na Figura 2(b), estão apresentados os resultados em outro instante de operação, mas com a mesma condição de carga, onde é notável uma diferença nas formas de onda das tensões e correntes, em relação ao resultado anterior, verificando elevadas distorções mesmo sem a conexão dos sistemas de iluminação por LEDs, o que caracteriza uma forte influência dos harmônicos já presentes (background distortion).



(a)

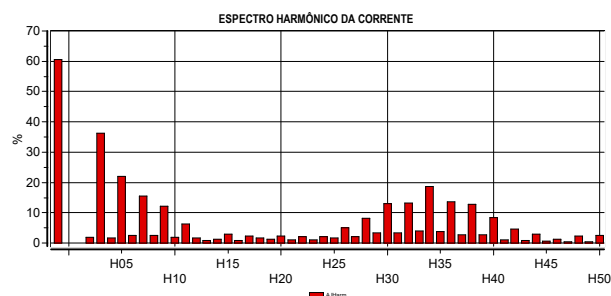
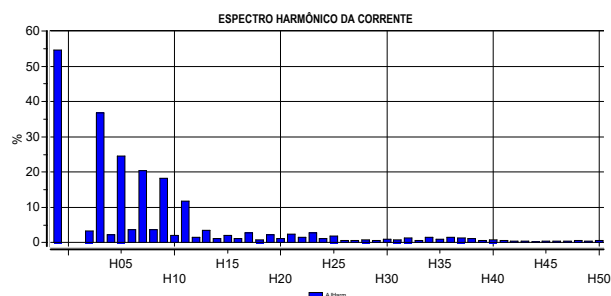


(b)

FIGURA 2 - Comportamento das tensões e correntes de alimentação do *nobreak* sem a presença da iluminação por LED: (a) instante 1; (b) instante 2.

A principal diferença pode ser verificada no comportamento das correntes de alimentação do *nobreak*, cuja forma de onda é a resposta frente às oscilações verificadas nas formas de onda das tensões do sistema.

A Figura 3 mostra os comportamentos distintos entre os espectros harmônicos das correntes para as formas de onda mostradas na Figura 2, evidenciando as variações de componentes de altas frequências, mesmo sem quaisquer dispositivos de iluminação conectados ao sistema.



(a) (b)
FIGURA 3 - Espectros harmônicos das correntes de alimentação do *nobreak* sem a iluminação por LED: (a) instante 1; (b) instante 2.

Como pode ser verificado na Figura 1, com a entrada do novo sistema de iluminação a LEDs, nestas condições de operação, ocorreram chaveamentos intermitentes do *nobreak*, sendo esta a origem e a causa raiz das falhas dos equipamentos sensíveis, conectados junto ao mesmo ponto de alimentação dos LEDs. A característica principal do distúrbio se dá pelas múltiplas passagens pelo zero (*zero-crossings*), durante os registros de aumentos nas distorções das tensões, conforme esclarece a Figura 4.

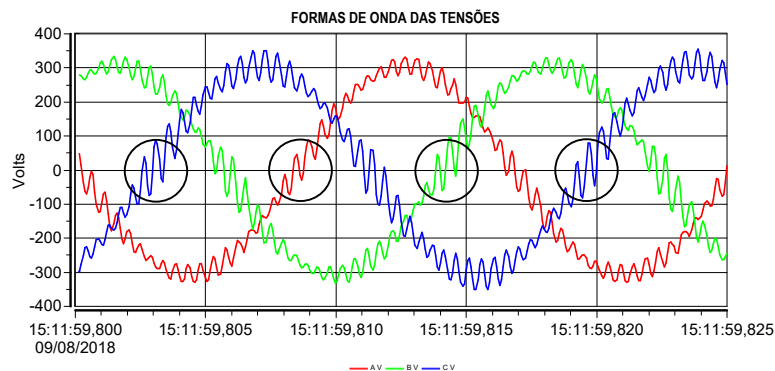


FIGURA 4 - Medições das tensões com *Zero-Crossings*.

3.0 - PROPOSTA DE APLICAÇÃO DE FILTROS PASSA-BAIXA

Foram analisadas algumas configurações de filtros do tipo passa-baixa para esta aplicação, de forma a evitar as reincidências dos problemas na operação das cargas críticas alimentadas pelos *nobreaks*, quando da utilização em conjunto com sistemas de iluminação do tipo LED, mesmo possuindo certificação quanto à emissão de harmônicos (1). Destaca-se que devido aos problemas operacionais do sistema, verificados em função de flutuações das distorções das tensões e ocorrências de *zero-crossings*, o projeto de substituição em massa dos sistemas de iluminação foi parcialmente paralisado, sendo que a sua finalização dependia fundamentalmente dos resultados da aplicação dos filtros para os *nobreaks* e alimentação das respectivas cargas.

Inicialmente, foi realizada a modelagem do sistema e simulações de desempenho para análise dos filtros LC por meio do software de transitórios eletromagnéticos ATPDraw (2). Com base nos resultados das simulações, foram ainda realizados testes de desempenho de um protótipo no Laboratório de qualidade de energia da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), para que finalmente fossem realizados os testes na instalação, junto às cargas de iluminação.

3.1 - Modelagem e Resultados de Simulações

O sistema foi representado de modo equivalente por tensões distorcidas com base nas medições reais, alimentando o circuito equivalente do *nobreak* e respectivas cargas representadas no programa ATPDraw (2). Na Figura 5 estão apresentados os resultados simulados das tensões na entrada e saída do filtro e das correntes no capacitor do filtro, utilizados como referência na especificação e definição da solução proposta para os problemas relatados. Neste caso, foi adotada uma entrada com distorção máxima individual de 20% para o componente de 36ª ordem e de 10% para o de 32ª ordem.

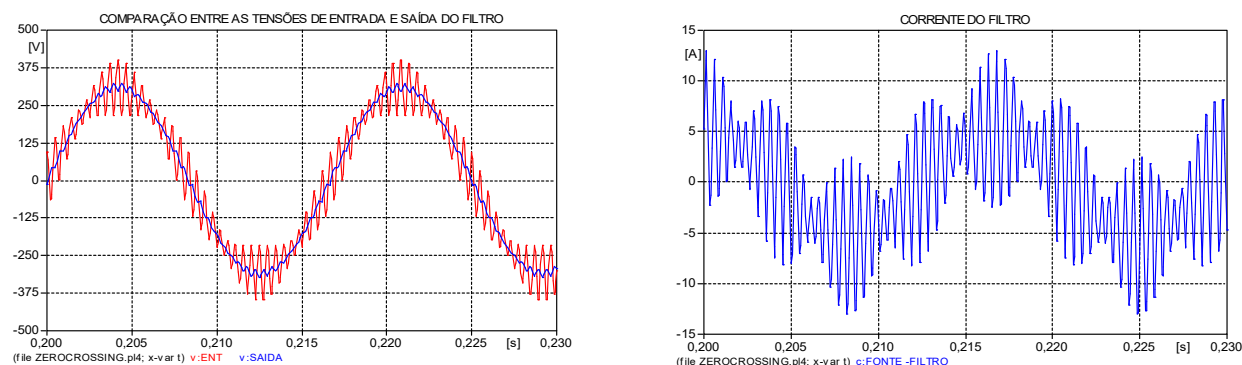


FIGURA 5 - Simulação das tensões na entrada e saída e das correntes de operação do filtro LC.

3.2 - Análise Comparativa com Testes em Laboratório

Antes do teste final de validação em campo foram realizados testes complementares no Laboratório de QEE da UNIFEI utilizando-se uma fonte arbitrária para a geração das tensões de referência, com 20% e 10% para as distorções individuais dos componentes de 36ª e 32ª ordens, respectivamente.

A Figura 6 mostra as formas de onda das tensões de entrada com as distorções citadas e a tensão de saída, observando que as oscilações e cruzamentos pelos zeros adicionais foram eliminados. Ainda na mesma Figura, é realizada a comparação entre os componentes harmônicos das tensões de entrada e saída do filtro.

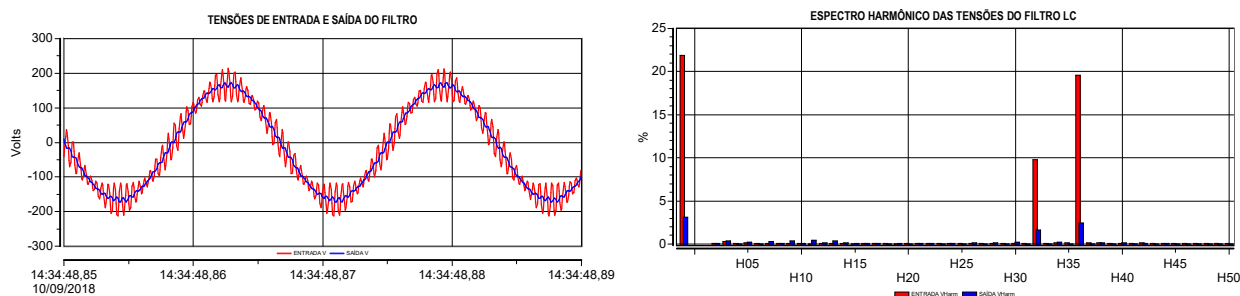


FIGURA 6 - Medições das tensões e espectros harmônicos na entrada e saída do filtro LC.

3.3 - Resultados Obtidos em Campo

A Figura 7 mostra o diagrama unifilar simplificado do sistema em análise, tomando-se como base as medições realizadas na investigação dos problemas correlacionados aos eventos de *zero-crossings*, durante a operação das cargas sensíveis em conjunto com os sistemas de iluminação LED e do filtro proposto para mitigação dos problemas operacionais (1), (2).

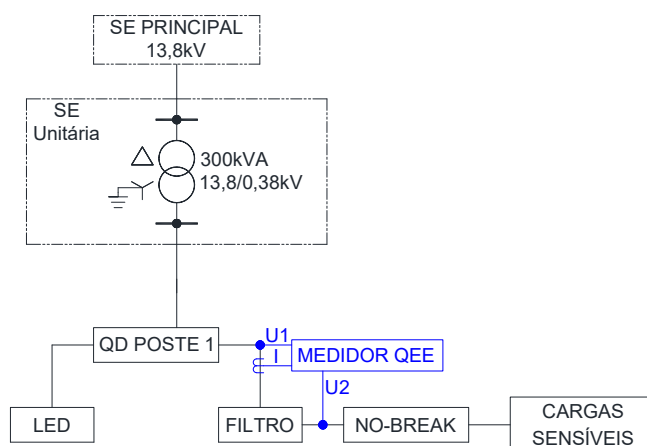


FIGURA 7 - Diagrama unifilar utilizado no teste de desempenho do filtro LC.

A seguir, apresentam-se os principais resultados obtidos durante o teste final em campo, com a instalação do filtro LC na entrada do *nobreak*, a partir do mesmo quadro de distribuição (QD), com 21 luminárias de 350 W, instaladas para verificação do comportamento e desempenho do filtro LC com a presença dos sistemas de iluminação por LEDs.

A Figura 8 mostra os resultados obtidos nas medições dos valores eficazes das tensões de entrada e saída do filtro LC proposto. A comparação entre as tensões do filtro indica uma elevação de aproximadamente 2 V, ou seja, a tensão de saída permaneceu aproximadamente superior a 1% em relação à tensão de entrada e, portanto, com valores adequados (7). Ainda observando a Figura 8, tem-se o comportamento das correntes eficazes obtidas na entrada do filtro durante o referido teste com o filtro passa-baixa, sendo que o máximo valor de operação registrado foi inferior a 4 A durante a operação a vazio.

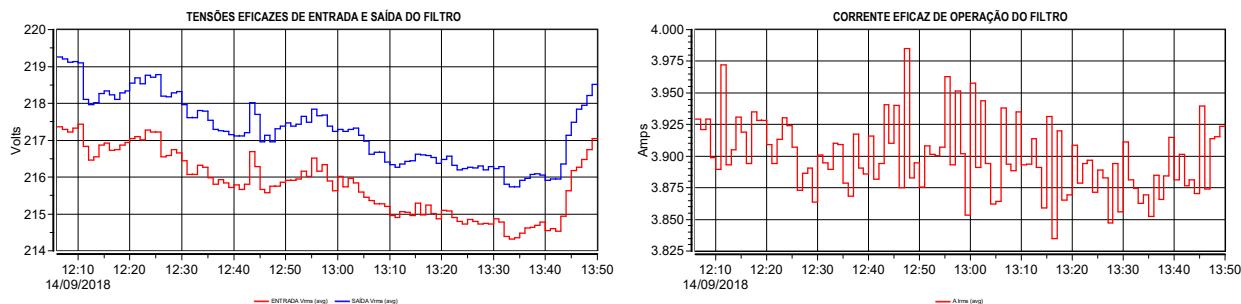


FIGURA 8 - Comportamento dos valores eficazes das tensões e correntes de operação do filtro LC. As distorções das tensões integralizadas a cada minuto estão apresentadas na Figura 9, sendo notável a redução média das distorções na saída do filtro LC. As distorções referenciadas a integralização das tensões de entrada variaram entre 1 a 8%, enquanto as distorções de saída após o filtro LC proposto, permaneceram plenamente adequadas, inferiores a 2%, bem como dos limites normalmente recomendados (5), (7), (8).

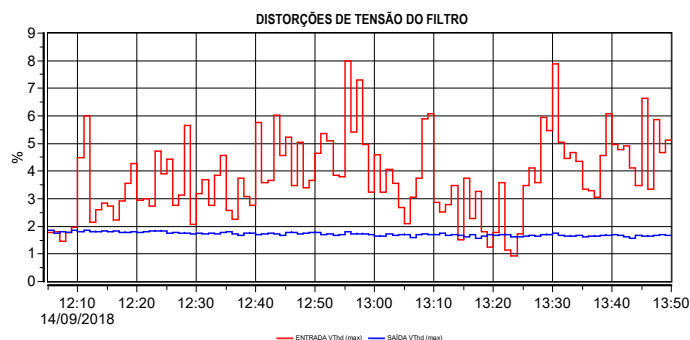


FIGURA 9 - Distorções das tensões de entrada e saída do filtro LC.

3.4 - Manobras de Chaveamentos do Filtro

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos durante a primeira etapa do monitoramento, ou seja, registros dos eventos de manobras de energização, desenergização e operação do filtro a vazio, inicialmente sem qualquer influência dos sistemas de iluminação. As formas de onda das tensões e correntes na Figura 10 foram registradas durante uma manobra de energização do filtro LC nos testes de desempenho realizados em campo (2).

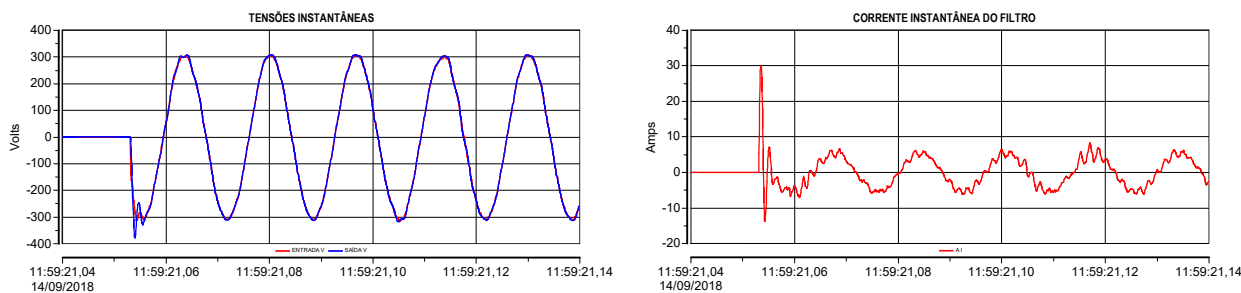


FIGURA 10 - Tensões e correntes do filtro LC durante manobra de energização.

As formas de onda das tensões e correntes medidas durante o desligamento do filtro LC estão apresentadas na Figura 11.

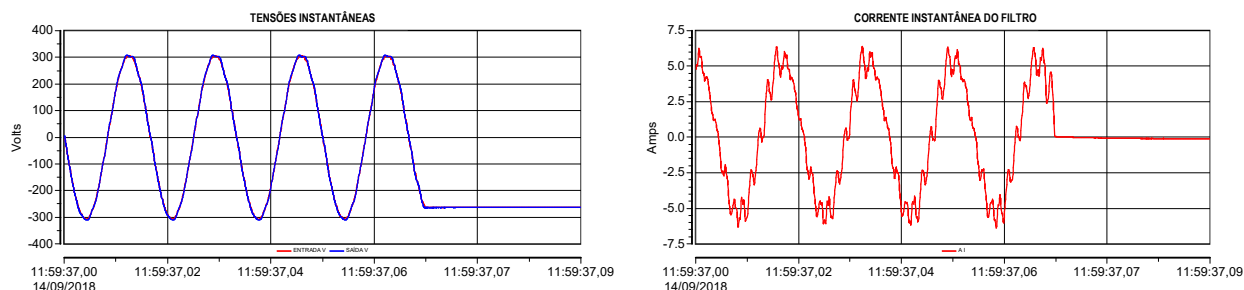


FIGURA 11 - Tensões e correntes do filtro LC durante manobra de desenergização.

3.5 - Operação com os Sistemas de Iluminação LED

Após a entrada de carga com a conexão do *nobreak* na saída do filtro LC, e como proposto na etapa final dos testes de desempenho do protótipo (2), foram ligadas as 21 luminárias de LED com potências unitárias de 350 W, no mesmo circuito e quadro de distribuição do filtro. Desta forma, as distorções na entrada sofreram um aumento significativo.

A Figura 12 mostra as formas de onda das tensões de entrada e saída do filtro para esta condição de operação do sistema, bem como os componentes harmônicos resultantes, ficando evidentemente comprovado que na saída do filtro LC as oscilações de altas frequências foram reduzidas substancialmente, sendo que neste caso ocorreu uma redução das distorções, com valores próximos a 8% nas tensões de entrada e inferiores a 2% na saída do filtro.

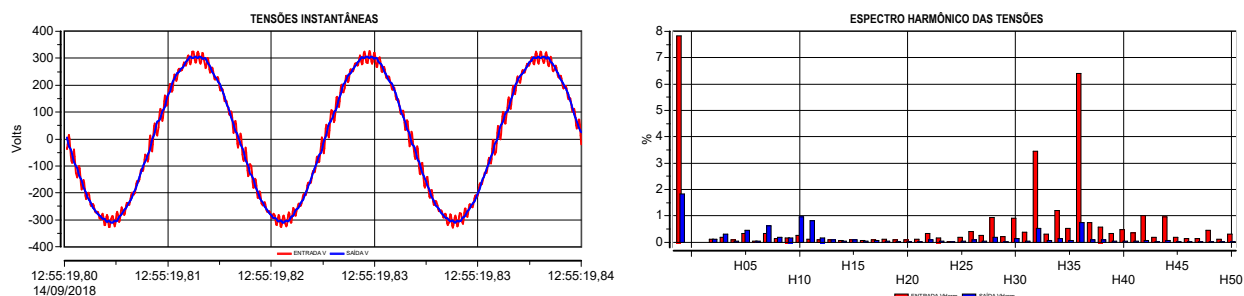


FIGURA 12 - Formas de onda das tensões na entrada e saída do filtro LC e seus respectivos espectros harmônicos.

As correntes de operação do filtro obtidas nas medições para a mesma condição de carga plena no sistema durante os testes em campo podem ser verificadas na Figura 13, cujos componentes preponderantes são os de 36ª e 32ª ordens, ou seja, exatamente os componentes principais impostos pelo sistema e que causavam as perturbações e distúrbios nas tensões de entrada do *nobreak*. Para este caso, a corrente eficaz fundamental registrada pelo medidor foi de 3,78 A e a corrente eficaz total obtida, considerando os harmônicos, foi de 4,05 A, com distorção percentual total (DTHC), ligeiramente inferior a 40%.

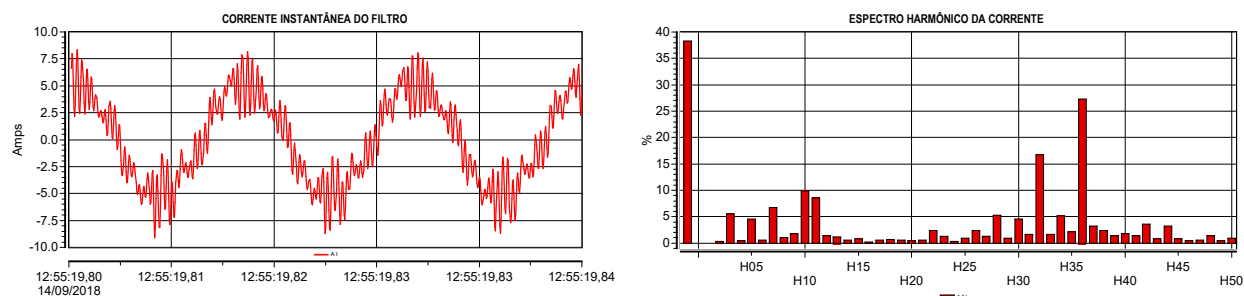


FIGURA 13 - Correntes e espectros harmônicos do filtro LC com a iluminação LED em operação.

4.0 - ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

Este item apresenta uma análise comparativa entre os principais resultados obtidos nas medições, conforme monitoramento do desempenho do protótipo do filtro LC junto ao cliente final.

A Tabela 1 mostra um resumo dos valores das medições das correntes e tensões de entrada (E) e saída (S) do filtro LC, destacando-se uma redução das distorções máximas das tensões (DTHT), integralizadas a cada minuto, de aproximadamente 8% para 1,8% (2).

TABELA 1 - Análise Geral das Medições do Filtro LC.

Indicador	Local	Mínimo	Médio	Máximo
U_{RMS} (V)	E	0,977	0,984	0,991
	S	0,983	0,990	1,000
I_{RMS} (A)	E	3,80	3,90	4,00
DTHT (%)	E	0,932	4,014	7,979
	S	1,578	1,680	1,838
DTHC (%)	E	17,56	25,05	38,50

Portanto, ficou caracterizada a eficácia do desempenho do filtro LC proposto, com reduções significativas das distorções das tensões. A seguir, serão apresentadas as comparações entre as distorções individuais de altas frequências, que estavam relacionadas diretamente aos problemas encontrados na análise do sistema (1), (2).

De forma a demonstrar claramente a real atenuação do filtro proposto, além dos resultados apresentados anteriormente referenciados a valores integralizados a cada minuto, apresentam-se na Figura 14 os valores instantâneos obtidos nas medições das distorções associadas às tensões de entrada e saída do filtro LC, utilizado para eliminação dos eventos de múltiplas passagens pelo zero das tensões.

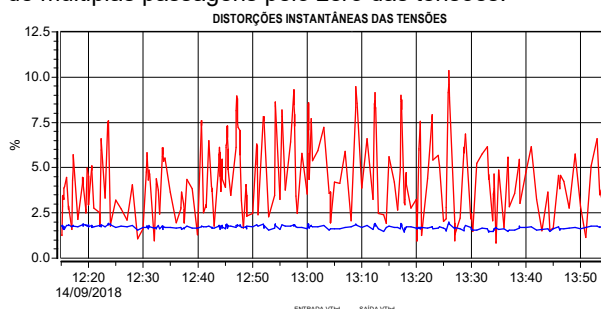


FIGURA 14 - Distorções instantâneas das tensões na entrada e saída do filtro LC.

De modo complementar a validação da proposta, a Figura 15 mostra a comparação entre os componentes de 32ª e 36ª ordens, presentes na entrada e saída do filtro LC, indicando reduções individuais de 3,5% na entrada, para valores inferiores a 0,5% na saída do filtro para o primeiro componente. Da mesma forma descrita anteriormente, porém, considerando o componente principal do sistema, ou seja, o preponderante harmônico de 36ª ordem, as reduções foram ainda mais significativas, pois os valores de entrada do filtro apresentam distorções individuais de até 7%, reduzindo-se para valores inferiores a 0,8%.

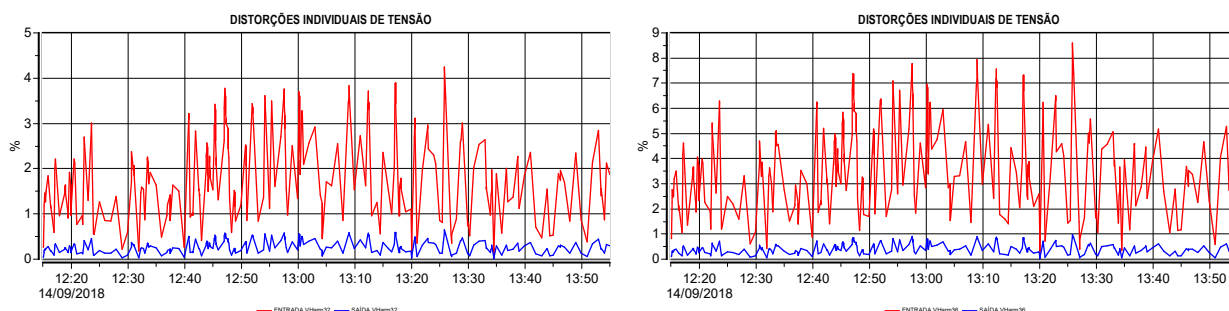


FIGURA 15 - Distorções individuais dos componentes harmônicos de 32ª e 36ª ordens das tensões de entrada e saída do filtro LC.

A Figura 16 ilustra a comparação efetiva entre as formas de onda das tensões de entrada e saída do filtro, comprovando-se os resultados desta análise durante as maiores distorções registradas nos testes em campo, destacando-se que o principal efeito das distorções do sistema elétrico estava relacionado aos múltiplos cruzamentos

adicionais pelo zero e com a instalação do filtro LC tais perturbações foram eliminadas, já que em sua saída são observadas somente passagens pelo zero natural das formas de onda das tensões.

Ainda verificando a Figura 16, tem-se a efetiva comparação do filtro LC, sendo que a redução foi de aproximadamente 5 vezes, pois a distorção total de entrada de 10% foi reduzida para 2% na saída do filtro, ou seja, as tensões de alimentação para o sistema do *nobreak* apresentam distorções reduzidas e comportamento adequado para a operação das cargas sensíveis, mesmo com a forte influência da interação do sistema elétrico e das amplificações das correntes dos *drivers* de controle utilizados nos sistemas de iluminação por LEDs.

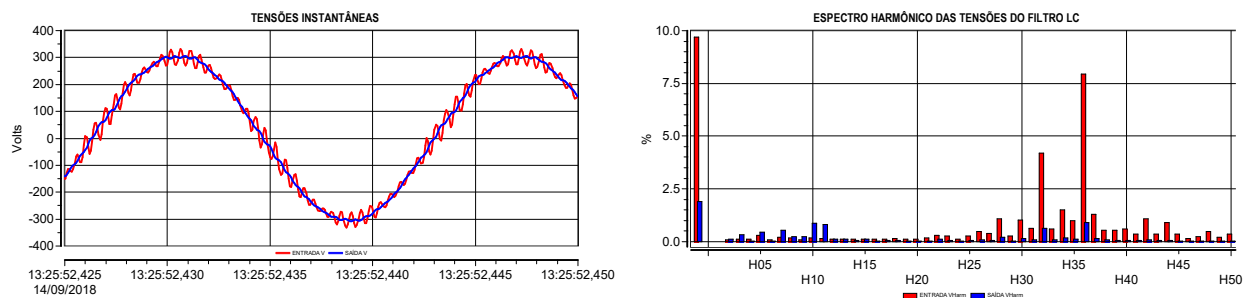


FIGURA 16 - Formas de onda das tensões e espectros harmônicos de entrada e saída do filtro LC com os sistemas de iluminação LED em operação.

5.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a descrição de um caso envolvendo problemas de qualidade da energia elétrica decorrentes da manifestação de eventos de *zero-crossings* registrados por medições em função de uma interação entre inter-harmônicos do sistema e os *drivers* utilizados nos conjuntos de iluminação por LEDs, instalados em uma área de um sistema portuário. Como consequência, ocorreram transtornos operacionais, implicando até mesmo na decisão pelo retorno das lâmpadas convencionais a vapor metálico, que não apresentavam esse tipo de problema no sistema.

Após a identificação da causa raiz dos problemas, foram propostos filtros do tipo passa-baixa (LC), utilizando-se da modelagem, simulações, medições e testes com fontes programáveis junto ao laboratório de QEE, para a confirmação prévia do desempenho. Diante dos resultados finais obtidos nas medições em campo e análise comparativa realizada na entrada e saída do filtro, concluiu-se que a configuração do filtro LC se mostrou plenamente adequada ao objetivo, mesmo com o impacto da operação dos sistemas de iluminação por LEDs, validando a solução proposta (2).

Cabe destacar que as distorções das tensões no sistema devido à interação com os *drivers* dos LEDs continuarão ocorrendo com as mesmas características, sendo a instalação dos filtros LC uma alternativa paliativa para a operação dos *nobreaks* e de suas cargas críticas. Neste sentido, foi recomendada uma avaliação através de medições e estudo detalhado de fluxo harmônico para análise global do sistema. Constata-se, então, que os resultados obtidos foram categóricos e comprovaram as reduções significativas nas distorções das tensões e eliminação de eventos de *zero-crossings* na alimentação dos *nobreaks*.

Após a comprovação efetiva dos resultados com o protótipo desenvolvido, foram instalados dez filtros do tipo passa-baixa (LC) para aplicação prática, que culminou na finalização do projeto de eficiência energética, com a reinstalação dos sistemas de iluminação por LED.

6.0 - REFERÊNCIAS

- (1) JESUS, N.C., DUARTE, L.M., LIMA, L.A., et al. Análise de problemas da qualidade de energia: identificação de falhas em equipamentos sensíveis devido à interação entre inter-harmônicos e sistemas de iluminação do tipo LED. XIII CBQEE (Conferência Brasileira Sobre Qualidade da Energia Elétrica), São Caetano do Sul, 2019.
- (2) JESUS, N.C., DUARTE, L.M., OLIVEIRA, T.C., et al. Aplicação de filtros passa-baixa para redução das distorções das tensões e eliminação de ocorrências de zero-crossings - o caso do porto de Santos. XIII CBQEE (Conferência Brasileira Sobre Qualidade da Energia Elétrica), São Caetano do Sul, 2019.

- (3) FARIA, A.C. Iluminação sustentável: os benefícios do uso da tecnologia LED nos projetos de iluminação. Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2014.
- (4) POURARAB, M. H., NAKHODCHI, N., MONFARED, M. Harmonic analysis of LED street lighting according to IEC61000-3-2; A case study. 23rd International Conference on Electricity Distribution, Lyon, 2015.
- (5) IEC: Harmonics standards overview, 61000-3-2.
- (6) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Instalações elétricas de baixa tensão - NBR 5410. Brasil.
- (7) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - PRODIST: Módulo 8: Qualidade da Energia. Brasil.
- (8) DUGAN, R.C., MCGRANAGHAN, F.M., SANTOSO, S., BEATY, H. W. Electrical power systems quality. McGraw-Hill, 2003.

DADOS BIOGRÁFICOS



Nasceu em Pindamonhangaba (SP) em 1970. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade de Taubaté (UNITAU) em 1992 e mestrado pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 1995. Trabalhou na Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI) e na AES Sul. Desde 2009 é consultor na GSI - Engenharia e Consultoria. É sócio fundador e atual Secretário Executivo da SBQEE. Possui mais de 180 artigos técnicos, publicados em revistas, conferências e congressos nacionais e internacionais. As áreas de interesse referem-se à Qualidade da Energia Elétrica, Sistemas Elétricos Industriais, Geração de Energias Renováveis e Transitórios Eletromagnéticos.

(2) GUSTAVO RODRIGUES DOS SANTOS

Nasceu em Taubaté (SP) em 1999. Atualmente cursa graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), campus de Guaratinguetá, e trabalha na área de estudos elétricos na empresa GSI - Engenharia e Consultoria Ltda. As principais áreas de interesse referem-se a estudos de sistemas elétricos industriais, transitórios eletromagnéticos, qualidade de energia e energias renováveis.

(3) LUIZ MARLUS DUARTE

Nasceu em Taubaté (SP) em 1983. Possui graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica pela Universidade de Taubaté (UNITAU) em 2009. Atualmente trabalha como sócio consultor na empresa GSI - Engenharia e Consultoria Ltda. Áreas de interesse: Análise e Simulações de Sistemas Elétricos para Avaliação de Transitórios Eletromagnéticos, Curto-Circuito, Fluxo de Potência, Proteção e Seletividade.

(4) THIAGO PEREIRA FRANCO

Nasceu em Mogi das Cruzes (SP) em 1998. Possui graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 2020, onde participou como aluno bolsista do Programa de Educação Tutorial de Engenharia Elétrica - PET. Atualmente trabalha na área de estudos elétricos na empresa GSI - Engenharia e Consultoria Ltda. Áreas de interesse: Análise e Simulações de Sistemas Elétricos para Avaliação de Curto-Circuito, Fluxo de Potência, Estabilidade Eletromecânica e Transitórios Eletromagnéticos.

(5) WILLIAN SOUZA DE JESUS

Nasceu em Pindamonhangaba (SP) em 1998. Atualmente, cursa a graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica pela Universidade de Taubaté (UNITAU) e trabalha na área de estudos elétricos na empresa GSI - Engenharia e Consultoria Ltda. É sócio da Sociedade Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica (SBQEE). As principais áreas de interesse referem-se a Estudos de Transitórios Eletromagnéticos, Qualidade de Energia e Energias Renováveis.

(6) JOÃO LUCAS GONÇALVES NASCIMENTO

Nascido em Taubaté (SP) em 1998. Está graduando o curso de engenharia elétrica e eletrônica na Universidade de Taubaté - (UNITAU). Atualmente trabalha na empresa GSI - Consultoria e Engenharia Elétrica – Ltda. Trabalha com sistema elétrico de potência, Qualidade de energia elétrica e assistência a relatórios. Áreas de Interesse: Automação, eletrônica (dispositivos), sistema elétrico de potência e telecomunicação.