

Aplicação de Filtro Harmônico Ativo em Plataforma Laboratorial Destinada a Estudos de Qualidade da Energia Elétrica

Bárbara M. Giancesini*. Ivan N. Santos*

*Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil
USA (Tel: +55 34 323908366; e-mail: barbara.giancesini@ufu.br; ivan@ufu.br).

Abstract: The concern regarding power quality has attracted the attention of several segments of the electricity sector, with special emphasis on harmonic distortions due to the exponential increase of non-linear devices at all levels of electric systems. However, since the presence of harmonics is a potential cause of problems to the equipment of the electrical system, its mitigation is essential for the proper functioning of its installations. Therefore, among the existing mitigation strategies, the use of passive filters is the most widespread, although some factors have led to the development of harmonic compensation technologies via active filters practically and commercially. Therefore, due to the relevance of harmonic mitigation in industrial environments, this work aims at demonstrating harmonic distortion mitigations, didactically, by connecting a prototype of an active filter to a laboratory structure representative of an industrial electric system developed to carry out studies and research in power quality.

Resumo: A preocupação com a qualidade da energia tem atraído a atenção dos diversos segmentos do setor elétrico, com especial ênfase às distorções harmônicas, dado o exponencial crescimento de dispositivos não lineares nos diversos níveis dos sistemas elétricos. Porém, como a presença de harmônicos é um potencial causador de problemas aos equipamentos do sistema elétrico, sua mitigação é essencial para o adequado funcionamento de suas instalações. Para tanto, entre as estratégias de mitigação existentes, a utilização de filtros passivos é a mais largamente difundida, embora alguns fatores têm levado ao desenvolvimento das tecnologias de compensação harmônica via filtros ativos, de forma prática e comercial. Assim sendo, devido à relevância da mitigação harmônica em ambientes industriais, este trabalho objetiva demonstrar a mitigação de distorções harmônicas, de forma didática, pela conexão de um protótipo de filtro ativo a uma estrutura laboratorial representativa de um sistema elétrico industrial desenvolvida para realização de estudos e pesquisas em qualidade da energia.

Keywords: Power quality; laboratory setup; harmonic mitigation; active harmonic filter.

Palavras-chaves: Qualidade da energia; plataforma laboratorial; mitigação harmônica; filtro harmônico ativo.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo da última década, a temática da qualidade da energia elétrica (QEE) tem ganhado proporções e atraído a atenção não somente das agências reguladoras, mas também das concessionárias e dos consumidores. Dentre os fenômenos da QEE observados no sistema elétrico brasileiro, as distorções harmônicas se destacam devido ao aumento exponencial da conexão de dispositivos com características não lineares em todos os níveis do setor elétrico. Os conversores eletrônicos constituem a classe mais importante dos dispositivos não lineares nos sistemas elétricos de potência (Leão et al 2013), o que se justifica pelas políticas de eficiência energética, automação de sistemas industriais e geração renovável não convencional. Entretanto, a presença de harmônicos é uma potencial causa de efeitos prejudiciais à rede elétrica e também aos demais equipamentos do sistema, principalmente em bancos de capacitores, motores e transformadores, pois podem ocasionar perdas adicionais, sobreaquecimento e sobrecarga (Dugan et al 2004). Assim

sendo, do ponto de vista do consumidor, de uma forma geral, seja este industrial ou comercial, a mitigação das distorções harmônicas é essencial para um adequado funcionamento de suas plantas e redes de conexão.

Para tanto, entre as estratégias de mitigação de distorções harmônicas existentes, a utilização de filtros passivos é a mais difundida devido ao baixo custo quando comparados com as demais formas de mitigação (Dugan et al 2004). Entretanto alguns fatores como a complexidade do projeto dos filtros passivos, seu potencial de interagir adversamente com o sistema de energia, e suas restritas capacidades de eliminar harmônicos de baixa ordem e harmônicas não-características, tem levado ao desenvolvimento das tecnologias de compensação harmônica que utilizam componentes de eletrônica de potência, os chamados filtros ativos (Arrillaga et al 2003, Dugan et al 2004). Ainda, com o acelerado desenvolvimento das tecnologias de eletrônica e de processamento digital de sinais, tornou-se possível a implementação prática dos filtros ativos em larga escala

(Salmerón et al 2003), de forma que, atualmente, já existe diversas soluções comercialmente disponíveis. Outra vantagem da utilização desses dispositivos, é que os mesmos podem compensar, além dos harmônicos, potência reativa e desequilíbrios, dependendo da estratégia de controle utilizada, por isso, estes são também chamados de *Active Power-line Conditioners* (Salmerón et al 2003). Ademais, estes dispositivos podem se adequar à diferentes condições de poluição harmônica, ou seja, atuam, de forma programável, em diversas ordens harmônicas conforme demanda.

Portanto, devido à relevância da temática de mitigação de distorções harmônicas em ambientes industriais, este trabalho tem como objetivo demonstrar, de forma didática, a mitigação de distorções harmônica a partir da conexão de um filtro ativo, ainda não comercial, a uma estrutura laboratorial. Tal estrutura representa um sistema elétrico industrial e foi desenvolvida para realização de estudos e pesquisas em qualidade da energia. Assim sendo, o trabalho é organizado da seguinte maneira: a seção 2 engloba a apresentação da estrutura laboratorial elaborada, enquanto a seção 3 apresenta uma breve descrição do princípio de funcionamento de filtros ativos. A seção 4 apresenta a avaliação da operação da plataforma laboratorial em conjunto com o filtro ativo, incluindo o detalhamento do arranjo final ensaiado, resultados e discussões. Por fim, a seção 5 contempla as conclusões gerais do trabalho em questão.

2. ESTRUTURA LABORATORIAL PREPARADA PARA ESTUDOS DE QEE

Tem-se aqui uma breve apresentação da estrutura laboratorial concebida para a realização de estudos, análises e testes relacionados a fenômenos de QEE. O principal objetivo na elaboração desta estrutura é estabelecer um sistema de referência para realização de pesquisas em QEE, bem como para exposição didática dos fenômenos correlatos. Assim, tal estrutura possibilita realizar estudos relacionados a uma ampla gama de fenômenos de QEE, quais sejam: transitórios, variações de tensão de curta e longa duração, desequilíbrios, distorções harmônicas, flutuações de tensão, entre outros.

Nesse sentido, a estrutura objetiva reproduzir, em escala reduzida, um sistema elétrico industrial, portanto, a mesma é composta por um sistema supridor e um complexo industrial formado por três unidades consumidoras. A Fig. 1 exibe o diagrama de blocos dos principais componentes da plataforma. A sigla PAC representa o ponto de acoplamento comum entre o sistema supridor e o complexo industrial.

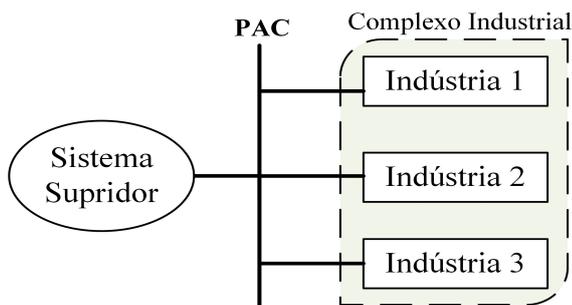


Fig. 1 Diagrama de blocos dos principais componentes da estrutura laboratorial.

2.1 Sistema Supridor (Concessionária)

O sistema supridor representa a concessionária de energia elétrica, portanto, o mesmo deve ser capaz de fornecer potência suficiente para o correto funcionamento das três indústrias. Existe duas possibilidades para o sistema supridor: a utilização da rede trifásica da concessionária local de energia, ou a utilização de fonte controlada de tensão.

No segundo caso, utiliza-se duas fontes trifásicas de tensão controladas modelo *California Instruments AC Power Source CSW5550* do fabricante AMETEK *Programmable Power* trabalhando como um módulo (*master e slave*) de suprimento de 11 kVA de potência total. Esse sistema é utilizado quando se objetiva um suprimento sem a influência de distúrbios previamente existentes na rede local (*background pollution*), ou seja, garantindo o suprimento de tensões conforme a necessidade do experimento, independentemente da condição da concessionária. Este equipamento também é, portanto, capaz de reproduzir os diversos fenômenos de qualidade da energia.

Ainda, no caso da utilização da fonte controlada, a mesma é conectada em série com uma impedância para definição do nível de curto circuito do PAC. Neste caso, emprega-se reatores a núcleo de ar. Neste contexto, a Fig. 2 exibe o arranjo elétrico do sistema supridor, para alimentação via rede da concessionária (a), ou via fonte controlada (b). No caso da alimentação via fonte controlada, a resistência representada na figura corresponde às resistências intrínsecas dos reatores. A montagem laboratorial do sistema supridor, representado pela Fig. 2(b) é mostrado na Fig. 3. Ambos sistemas possuem tensão de suprimento igual a 220V, 60 Hz. Por fim, a Tabela 1 apresenta as parametrizações sugeridas para o sistema supridor via fonte controlada.

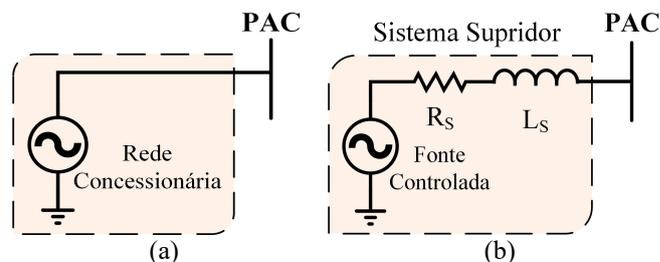


Fig. 2 Arranjo elétrico unifilar do sistema supridor. (a) Via rede da concessionária, (b) Via fonte controlada.

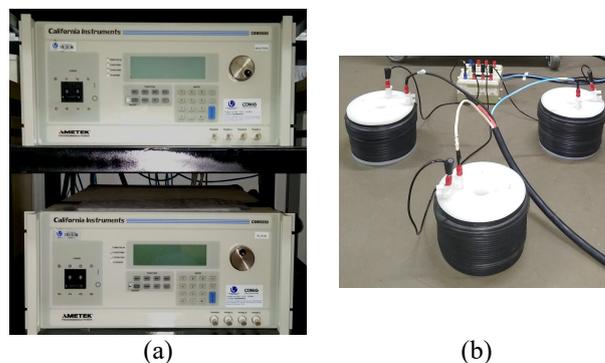


Fig. 3 Estrutura Laboratorial – Sistema supridor via fonte controlada. (a) Fontes de tensão trifásicas controladas, (b) Reatores a núcleo de ar.

Tabela 1. Parametrização do sistema supridor via fonte controlada

Potência de curto-circuito (kVA)	47,86L 82,61°
R _s - Resistência do sistema supridor (Ω)	0,13
L _s - Indutância do sistema supridor (mH)	2,66

2.2 Complexo Industrial (Consumidores)

Conforme mostrado na Fig. 1, o complexo industrial é composto por três consumidores, os quais foram modelados com o intuito de representar instalações industriais que possuem cargas lineares e não lineares. Para tanto, foram utilizados resistores, indutores e bancos de capacitores (cargas lineares) e resistores alimentados via pontes retificadoras de 6 pulsos (cargas não lineares). Os conversores de energia de 6 pulsos possuem a característica de produzir correntes harmônicas nas ordens $6k \pm 1$, com $k = 1, 2, 3 \dots$ (Bollen et al 2011), sendo as mais significativas a 5^a, 7^a, 11^a, 13^a ordens; tais componentes são conhecidas por harmônicas características.

Além das cargas supracitadas, as indústrias possuem transformadores de entrada, trazendo similaridade com instalações reais. Nesse tocante, é importante observar que os equipamentos compostos por núcleos magnéticos, nesse caso indutores e transformadores, operam na região linear de suas respectivas curvas de magnetização, o que significa que os mesmos não são geradores de distorções harmônicas.

As três indústrias apresentam a mesma configuração de arranjo elétrico apresentado na Fig. 4, tendo como diferença apenas a parametrização de seus componentes. As cargas lineares são conectadas em estrela aterrada, enquanto os retificadores são trifásicos.

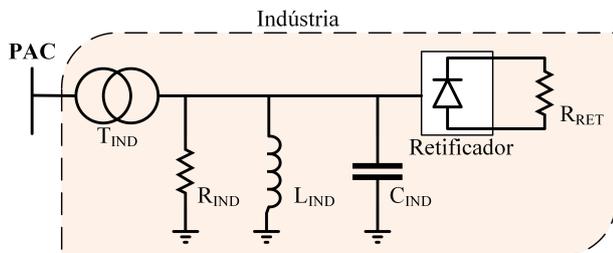


Fig. 4 Arranjo elétrico equivalente dos consumidores industriais.

A Tabela 2 apresenta as especificações dos transformadores de entrada de cada uma das indústrias, enquanto a Tabela 3 exibe a parametrização dos demais elementos das indústrias.

Apesar dos parâmetros das cargas serem fixados neste primeiro momento e de ser utilizada a mesma configuração para as três indústrias, é importante destacar que a plataforma é flexível, isso significa que existe a possibilidade de variação das cargas das indústrias, e até mesmo a retirada de componentes, mediante a necessidade dos estudos. Um exemplo de modificação da configuração seria a retirada da ponte retificadora de uma das indústrias, de forma a torná-la totalmente linear. Além disso, a estrutura possibilita a conexão de outros equipamentos para testes e avaliações,

como equipamentos de mitigação ou dispositivos para definição de compartilhamento de responsabilidades.

Tabela 2. Especificação dos transformadores das indústrias

Parâmetro	Indústrias 1, 2 e 3
Potência Nominal (kVA)	3
Resistência (%)	3,3
Reatância (%)	0,6
Tipo de ligação	Δ - Δ
Tensão primária / Tensão secundária (V)	220 / 220

Tabela 3. Parametrização das indústrias

Parâmetro	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3
R _{ind} (Ω)	266	70	181
L _{ind} (mH)	328	247	334
C _{ind} (uF)	8	12	4
R _{ret} (Ω)	150	260	155

As Fig. 5, 6 e 7 apresentam a montagem laboratorial de cada uma das indústrias que compõem a plataforma. As indústrias são conectadas ao sistema supridor por meio de cabos de 6 mm² (3 fases + neutro).

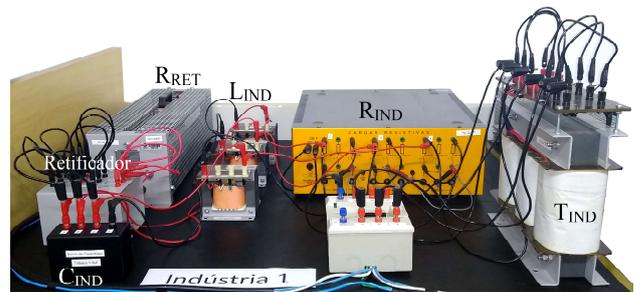


Fig. 5 Estrutura Laboratorial – Indústria 1.

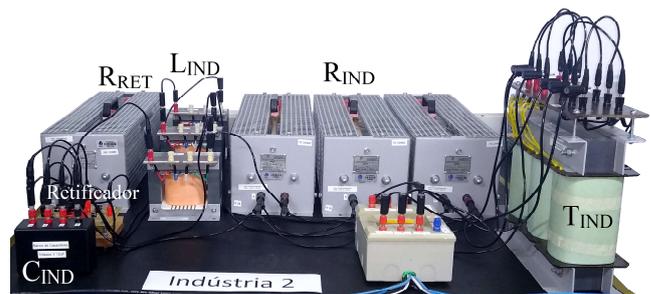


Fig. 6 Estrutura Laboratorial – Indústria 2.



Fig. 7 Estrutura Laboratorial – Indústria 3.

Utilizando analisadores de qualidade de energia trifásicos modelo 435-II, Classe A conforme a IEC 61000-4-30, da marca Fluke, foram, por fim, medidas as potências consumidas por cada indústria (aparente, ativa e reativa), e os respectivos fatores de potência (fp), os quais são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4. Potências consumidas pelas indústrias

	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3
P. Ativa (W)	730	1024	805
P. Reativa (Var)	248	371	315
P. Aparente (VA)	800	1106	884
fp	0,91	0,93	0,91

3. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DE FILTRO ATIVO PARA MITIGAÇÃO HARMÔNICA

De forma geral, o princípio de funcionamento dos filtros ativos baseia-se na produção e injeção de componentes harmônicas capazes de cancelar as componentes harmônicas da corrente da carga (Salmerón et al 2003). Existe duas configurações básicas para estes equipamentos, a conexão em série com a carga, ou em paralelo (*shunt*). Como o equipamento utilizado neste estudo é um filtro ativo *shunt*, que é o mais utilizado em aplicações práticas, uma breve explicação do funcionamento desta configuração é apresentada a seguir. Na seção seguinte, as características e especificações técnicas do equipamento empregado são expostas.

3.1 Filtro ativo shunt

De modo a facilitar o entendimento, é mostrado na Fig. 8 um diagrama de conexão de um filtro ativo em paralelo com uma carga não linear, um retificador alimentando uma carga indutiva.

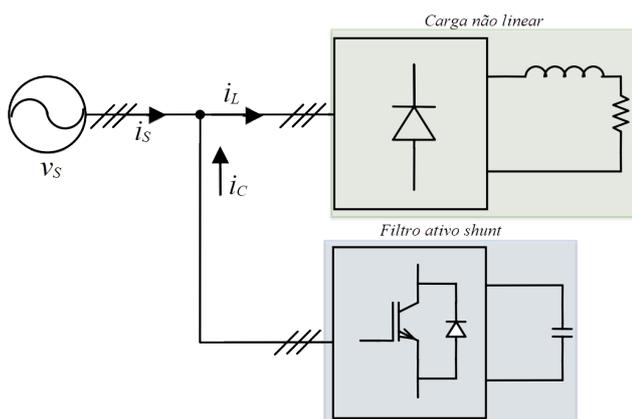


Fig. 8 Conexão de um filtro ativo *shunt*. Adaptado de (Salmerón et al 2003).

De forma mais detalhada, o principal objetivo do filtro ativo é injetar uma corrente de compensação (i_C) de maneira a cancelar as componentes harmônicas da corrente da carga (i_L), e conseqüentemente, tornar a corrente da fonte (i_s) senoidal (Salmerón et al 2003). A Fig. 9 demonstra a operação do filtro ativo *shunt* por meio das correntes mencionadas.

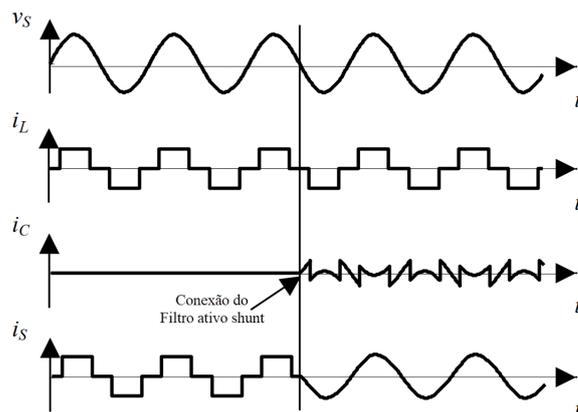


Fig. 9 Princípio de operação de um filtro ativo *shunt*. Adaptado de (Salmerón et al 2003).

Os filtros ativos *shunt* podem ser classificados como sistemas de malha fechada (*closed-loop*) ou malha aberta (*open loop*). Em sistemas *closed-loop*, a corrente (i_s) é medida e utilizada para cálculo da corrente de compensação (i_C), portanto, qualquer imprecisão é automaticamente cancelada (ABB 2011). Em sistemas *open loop*, por outro lado, a corrente da carga (i_L) é medida e utilizada para cálculo de i_C , nesse caso, não existe *feedback*. Deste modo, esta segunda opção pode acarretar na existência de componentes errôneos na corrente da fonte (i_s) compensada, o que não é detectado pelo sistema de controle do equipamento (ABB 2011).

3.2 Filtro ativo PQactiF - ABB

No experimento laboratorial abordado neste estudo, utilizou-se um módulo do filtro ativo PQactiF da fabricante ABB. Este equipamento ainda se trata de uma plataforma em desenvolvimento, portanto não está disponível comercialmente. A Fig. 10 exhibe o equipamento empregado.



Fig. 10 Protótipo PQactiF - ABB.

As principais características do módulo PQactiF utilizado são descritas a seguir.

- Filtragem harmônica: o equipamento é capaz de filtrar até 20 ordens harmônicas simultaneamente entre a 2ª e 50ª ordem. As ordens são individualmente selecionadas pelo usuário.

- Compensação de potência reativa: permite a compensação de cargas indutivas e capacitivas com fator de potência desejado entre 0.6 (indutivo) e 0.6 (capacitivo).
- Balanceamento de carga: efetua o balanceamento das correntes das cargas conectadas entre fases e entre fase e neutro.

Para utilização do equipamento, é necessária a conexão de transformadores de corrente (TCs), um em cada fase. São requeridos TCs Classe 1.0 ou superior, de 15 VA.

4. TESTE E AVALIAÇÃO PRELIMINAR DE DESEMPENHO LABORATORIAL DO FILTRO ATIVO

A operação do filtro ativo PQactiF, detalhado na seção anterior, será analisada através de sua conexão na plataforma laboratorial apresentada, para avaliação do processo de mitigação das distorções harmônicas oriundas das cargas não lineares existentes nas indústrias.

Para a realização dos experimentos, preferiu-se utilizar o sistema com a rede da concessionária local. Assim, o arranjo final ensaiado é mostrado na Fig. 11, onde o PAC do complexo industrial foi conectado diretamente na rede, sendo o nível de curto-circuito do sistema imposto pela própria rede da concessionária. Ainda, conectou-se o filtro ativo no PAC, com os TCs medindo a corrente proveniente da fonte (sistema *closed-loop*), como indicado no manual. Por se tratar de um teste laboratorial, foram utilizados TCs 50A/5A, classe 3.0 C, modelo RH-78, do fabricante RENZ. Por fim, utilizou-se, neste experimento, o medidor Nexus 1500, classe A conforme a IEC 61000-4-30, para medição das correntes da fonte, agora chamadas de correntes harmônicas do PAC (I_{PAC}), e das tensões também no PAC (V_{PAC}).

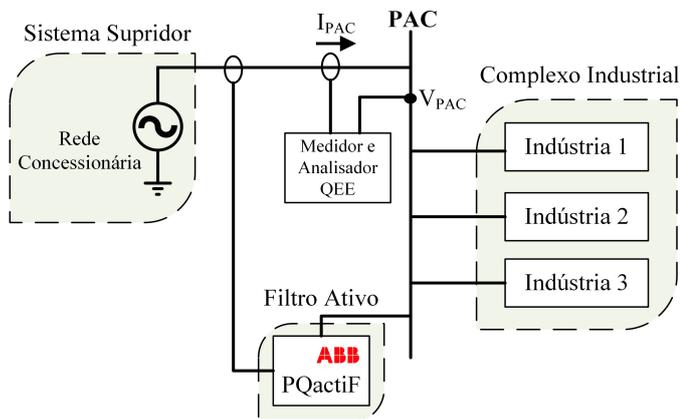


Fig. 11 Diagrama de blocos do arranjo ensaiado.

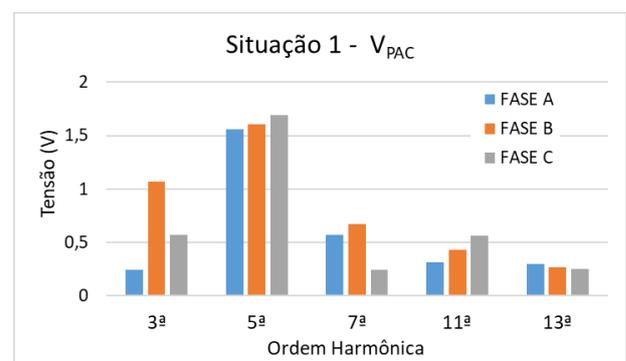
Para efeito de comparação dos resultados da filtragem harmônica, verificou-se primeiramente a operação do sistema sem a conexão do filtro ativo (situação 1). Em seguida, o filtro foi conectado ao sistema, e configurado para realizar a filtragem harmônica (situação 2). Os resultados de ambas as operações do sistema são descritos e analisados a seguir.

4.1 Situação 1: Operação do arranjo com as 3 indústrias e sem filtragem harmônica

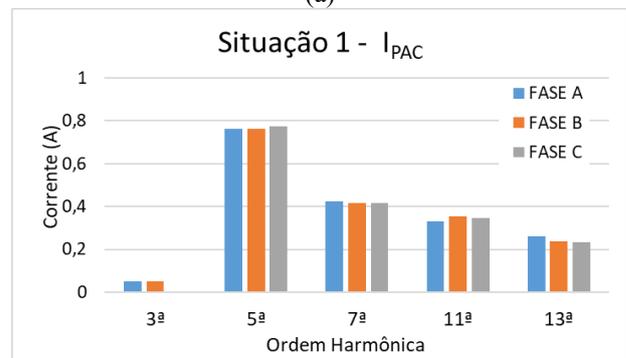
A primeira situação de operação contempla o funcionamento do complexo industrial alimentado pela rede da concessionária, com o filtro ativo desconectado. Os valores medidos para as tensões e correntes RMS no PAC, assim como as distorções harmônicas totais de tensão (DHTv) e corrente (DHTi) são mostrados na Tabela 5, enquanto que as principais tensões e correntes harmônicas medidas no PAC são mostradas na Fig. 12.

Tabela 5. Situação 1: Tensões, correntes e DHTs medidos no PAC

	Fase A	Fase B	Fase C
V_{PAC} RMS (V)	127,68	126,84	126,76
I_{PAC} RMS (A)	7,60	7,66	7,70
DHTv	1,46 %	1,76 %	1,60 %
DHTi	14,16 %	14,16 %	14,06 %



(a)



(b)

Fig. 12 Situação 1: Tensões (a) e correntes (b) harmônicas medidas no PAC.

A partir da Tabela 5, pode-se observar, pelos valores de distorção harmônica de tensão e corrente, a existência de componentes harmônicas diversas. A ordem de grandeza dessas distorções é vista na Fig. 12. Destaca-se que as magnitudes das componentes harmônicas da tensão e corrente foram apresentadas em volts e amperes, respectivamente, para facilitar a comparação entre as duas situações analisadas. Em termos percentuais, tem-se a magnitude da tensão de 5ª ordem como aproximadamente 1,3% da tensão fundamental, enquanto que para a corrente de 5ª ordem, tem-se aproximadamente 10,1% da corrente fundamental. Além disso, o espectro harmônico de corrente mostrado na Fig. 12(b) confirma a característica dos conversores de 6 pulso de

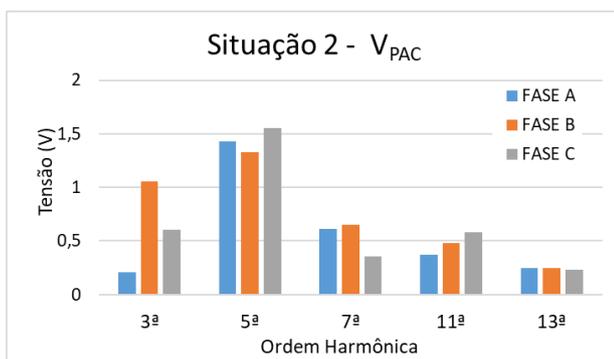
injeção de correntes harmônicas. O DHTi médio é de 14,13%, enquanto o DHTv é de 1,61%.

4.2 Situação 2 – Operação do arranjo com as 3 indústrias e com filtragem harmônica

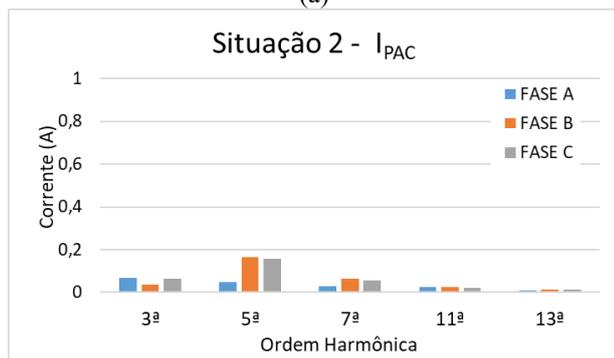
Nesta segunda situação avalia-se o funcionamento do arranjo industrial em escala reduzida com a inserção do filtro ativo, visando, assim, a mitigação das distorções harmônicas de corrente oriundas do complexo industrial. Deste modo, tomando o espectro harmônico de corrente observado na situação 1, o filtro ativo foi configurado para realizar a mitigação total das correntes harmônicas mais relevantes, quais sejam: 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem harmônicas.

Tabela 6. Situação 2: Tensões, correntes e DHTs medidos no PAC

	Fase A	Fase B	Fase C
V_{PAC} RMS (V)	127,27	126,56	126,77
I_{PAC} RMS (A)	7,52	7,50	7,61
DHTv	1,37 %	1,61 %	1,52 %
DHTi	5,52 %	6,74 %	6,73 %



(a)



(b)

Fig. 13 Situação 2: Tensões (a) e correntes (b) harmônicas medidas no PAC.

Observa-se, a partir da Tabela 6 e da Fig.13(b), uma redução considerável no indicador de distorção total de corrente. Destaca-se que caso sejam incluídas as demais ordens harmônicas características dos conversores de 6 pulsos para serem filtradas, o DHTi seria ainda menor. Pela Fig. 13, percebe-se a eficácia na filtragem harmônica, uma vez que o filtro ativo reduziu as correntes harmônicas para valores abaixo de 0,2 A. Apesar do filtro ter sido configurado para

zerar as correntes harmônicas, deve-se lembrar que os TCs utilizados não possuíam a classe exigida, portanto, o valor residual de corrente pode ser atribuído à imprecisão dos TCs utilizados. Todavia, o DHTi médio foi reduzido para 6,33%.

Por fim, destaca-se que praticamente não houve variação nas distorções harmônicas de tensão, a qual se manteve com cerca de 1,5% de DHTv médio. Assim, pode-se inferir que, neste estudo de caso, tal distorção de tensão corresponde ao *background distortion* da rede da concessionária local.

5. CONCLUSÕES

Dada a importância da filtragem harmônica nos complexos industriais, o presente artigo teve como objetivo apresentar a aplicação de um dispositivo de filtragem ativa, o qual se encontra em fase de desenvolvimento, em uma estrutura laboratorial de testes e estudos de fenômenos da qualidade da energia. Neste ínterim, ressalta-se que foi possível mostrar através das medições de correntes e tensões a eficácia do filtro ativo na filtragem das componentes harmônicas de corrente. O trabalho feito também procurou apresentar, de forma didática, a estrutura laboratorial concebida para testes e análises correlatas à esta área de pesquisa, focando, em sua essência, no processo ativo de mitigação de harmônicos do sistema.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores também expressam seus agradecimentos ao grupo Neoenergia pelo Projeto de P&D PD-7284-0001/2016 e à ABB Brasil (Power Quality Center) pela disponibilização do equipamento de filtragem ativa para realização dos testes laboratoriais.

REFERÊNCIAS

- ABB – Asea Brown Boveri (2011). Power Quality Filters – Actively improving quality, available at: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=2GC S636011A0070&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (accessed 19 January 2020).
- Arrillaga, J. and Watson, N. R. (2004). *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons, Ltd, USA.
- Bollen, M. H. J. and Hassan, F. (2011). *Integration of Distributed Generation in the Power System*, John Wiley & Sons Inc, Hoboken.
- Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S. and Beaty H. W. (2004). *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, New York.
- Leão, R. P. S., Sampaio, R. F. and Antunes, F. L. M. (2013) *Harmônicos em Sistemas Elétricos*, Elsevier, Brasil.
- Salmerón P., Vázquez J.R. (2007) Active Power-line Conditioners. In: Moreno-Muñoz A. (eds) *Power Quality. Power Systems*. Springer, London.