

AValiação COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE FILTRAGEM HARMÔNICA IMPLEMENTADAS NO SISTEMA DE 14 BARRAS DO IEEE

Isaias Rodrigo de Paula, Ivan Nunes Santos, Alex Reis
Universidade Federal de Uberlândia
CEP 38400-902, Av. João Naves de Ávila, 2160, Bloco 3N, Uberlândia - MG
e-mails: isaias_rodrigo@hotmail.com, ivan@eletrica.ufu.br, reialex@gmail.com

Resumo – Dentre os vários fenômenos relacionados à qualidade da energia elétrica, as distorções harmônicas têm ganhado uma crescente importância, devido, principalmente, ao significativo aumento das cargas não lineares presente no sistema elétrico de potência e dos consumidores residenciais. Neste contexto, surgem documentos e normas, em especial, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em particular o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), voltados, entre outros, ao estabelecimento de valores de referência para as distorções harmônicas presentes na rede elétrica de distribuição. Assim, uma vez constatado a violação dos valores limites estabelecidos, haverá certamente a necessidade da implantação de procedimentos mitigatórios, dentre os quais, destacam-se a implantação de filtros harmônicos passivos. Diante disto, o presente informe técnico está voltado para uma avaliação computacional de desempenho das diferentes estratégias de filtragem harmônica passiva. E, para tanto, será implementado no ATP um sistema teste baseado no arranjo elétrico de 14 barras do IEEE.

Palavras-Chave – Distorções Harmônicas, Filtros Harmônicos, Estratégias de Mitigação, Sistema de 14 Barras IEEE, Qualidade da Energia.

COMPUTER PERFORMANCE EVALUATION OF DIFFERENT STRATEGIES FOR HARMONIC FILTERING IMPLEMENTED IN IEEE 14 BUS SYSTEM

Abstract – Among the different phenomena related to power quality, harmonic distortions have been gaining a growing importance mainly due to the significant increase in non-linear loads in electrical power system and residential consumer. In this context there are documents and standards, in particular, the Distribution Procedures (PRODIST) from National Agency of Electrical Energy (ANEEL), which aim, among others objectives, the establishment of reference values for the harmonic distortion present in electrical network. In this

way, once found a violation on the limits established in regulatory documents, it will certainly necessary to implement mitigatory ways among which stand out the deployment of passive harmonic filters. In light of these facts the present paper is focused on a computational assessment of different strategies of passive harmonic filtering. For this, the IEEE 14-bus system is implemented on ATP platform.

Keywords – Harmonic Distortions, Harmonic Filters, Mitigation Strategies, IEEE 14 Bus System, Power Quality.

I. INTRODUÇÃO

Pesquisas na área de Qualidade da Energia Elétrica têm conquistado crescente importância no cenário energético brasileiro e internacional. De fato, sabe-se que os distintos fenômenos relacionados à área e que são designados por desvios ou perda de qualidade da energia elétrica podem acarretar grandes transtornos para os diversos grupos de consumidores conectados à rede, sejam eles industriais, comerciais ou residenciais [1].

Nesse contexto, dentre os vários indicadores associados à avaliação da qualidade da energia elétrica, as distorções harmônicas possuem uma posição de destaque. No que tange aos motivos relacionados à deformação das formas de onda de tensão e corrente, estes se centram, principalmente, na operação de dispositivos não lineares, os quais, sob o ponto de vista da qualidade da energia, se caracterizam por apresentarem uma correlação entre tensão e corrente que não obedece a formas de onda similares [2].

Por outro lado, um aspecto meritório de destaque se refere aos efeitos que as distorções harmônicas provocam sobre o funcionamento de equipamentos elétricos. Nesse sentido, encontram-se na literatura diversos estudos e relatos sobre os impactos de tal fenômeno sobre a operação de transformadores, máquinas rotativas, bancos de capacitores, entre outros, os quais, de uma forma geral, se caracterizam por uma redução em sua vida útil de operação [3]. Todavia, não se deve descartar que a presença de componentes harmônicas possibilita a ocorrência de ressonâncias em determinados pontos do sistema elétrico.

À luz destes fatos, verifica-se a existência de diversas recomendações e documentos normativos referentes ao tema em questão. No cenário nacional, ressaltam-se os Procedimentos de Distribuição (PRODIST) da ANEEL [4] e os Procedimentos de Rede do ONS [5]. No âmbito



X CEEL - ISSN 2178-8308
24 a 28 de setembro de 2012
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

internacional destacam-se as orientações clássicas propostas pela IEC (*International Electrotechnical Commission*) e pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) por meio das publicações IEC 61000-3-6 [6] e IEEE 519-1992 [7], respectivamente. Tais documentos abordam questões relacionadas a instrumentação, protocolos de medição e valores de referência recomendados para tal indicador da qualidade da energia.

Dessa maneira, conhecendo os impactos que as distorções harmônicas podem provocar sobre os equipamentos elétricos e reconhecida a necessidade de adequar a operação de cargas não lineares, nos respectivos pontos de acoplamento, aos valores recomendados pelos documentos normativos, surge a necessidade de análise e proposição de soluções mitigadoras para tal fenômeno. Nesse sentido, se destacam, dentre as diversas metodologias, a utilização de filtros harmônicos, os quais podem ser classificados, basicamente, como passivos ou ativos. Este trabalho, portanto, se direciona à análise computacional de desempenho de diferentes estratégias de filtragem harmônica por meio de filtros passivos existentes na literatura. Para tal análise, utilizou-se o simulador ATP, no qual foi implementada a rede elétrica de 14 barras proposta pelo IEEE, com as respectivas modificações de modo a integrar características não lineares às cargas elétricas presentes neste sistema.

II. PRINCIPAIS ESTRATÉGIAS DE FILTRAGEM HARMÔNICA

Os filtros harmônicos são arranjos elétricos destinados a oferecer meios para que as correntes harmônicas e, por conseguinte, as tensões, presentes nos sistemas elétricos, sejam atenuadas. O princípio que norteia tais soluções classicamente empregadas na engenharia elétrica se baseia na obtenção de uma característica propícia ao processo de compensação nos termos esclarecidos em [8,9] e abaixo discriminados. Estes dispositivos podem ser classificados, quanto à técnica empregada, em:

- Filtros Harmônicos Passivos: arranjos constituídos por composições de elementos ditos passivos, quais sejam: resistores, indutores e capacitores, e destinados a propiciar uma impedância harmônica compatível com o processo de filtragem desejado;
- Filtros Harmônicos Ativos: equipamentos constituídos por elementos ativos fundamentados nas modernas técnicas da eletrônica de potência e que visam um processo de compensação à base da geração e injeção de componentes harmônicas em contraposição àquelas existentes nas redes elétricas.

Muito embora a existências das duas distintas técnicas empregadas na filtragem harmônica, ressalta-se que, para o presente estudo, tão somente a filtragem harmônica passiva será considerada, uma vez que os filtros harmônicos ativos ainda se apresentam como dispositivos de elevado custo financeiro.

Os filtros harmônicos, de uma forma geral, podem ser

conectados ao sistema elétrico em série ou em paralelo (ou derivação), todavia, para fins deste trabalho, apenas os arranjos em derivação com a rede elétrica e conectados em estrela [1,3,8] serão aqui considerados.

Os tipos mais comuns de filtros passivos, quanto aos seus arranjos e filosofia de filtragem, podem ser agrupados como a seguir:

- Filtros Sintonizados: possuem uma ou mais frequências de ressonância série definidas, apresentando, nesta(s) frequência(s) de ressonância, baixa impedância resistiva [10];
- Filtros Amortecidos: estes não apresentam uma sintonia de ressonância definida em apenas uma frequência, mas sim, oferecem uma baixa impedância para uma larga faixa de frequência, podendo, por tais motivos, também ser denotados de filtros passa-alta, quando aplicados para elevadas ordens harmônicas.

Os principais arranjos para os filtros sintonizados, segundo o número de frequências selecionadas, são:

- Filtros sintonizados em uma frequência: apresenta uma baixa impedância em apenas uma frequência de ressonância, trata-se tão somente de um circuito RLC série. Devido à sua simplicidade e ao custo competitivo, esta é a principal arquitetura de filtro usada em aplicações práticas;
- Filtros sintonizados em duas frequências: este arranjo possui, como indicado na sua identificação, duas frequências de sintonia, fato este que proporciona a filtragem harmônica para duas ordens distintas. Seu arranjo construtivo pode ser verificado em [11,12];
- Filtros sintonizados em três frequências: esta última configuração para os filtros sintonizados se destina a oferecer três pontos de ressonância.

Complementarmente, os tipos mais comuns de filtros amortecidos são:

- Filtros amortecidos de primeira ordem: trata-se tão somente de um circuito RC série. Apesar da simplicidade de seu arranjo construtivo, esta configuração não é muito utilizada por requerer um grande capacitor. Somado a isto, há ainda de considerar que esta topologia possui perdas relativamente elevadas na frequência fundamental;
- Filtros amortecidos de segunda ordem: esta é a principal configuração de filtro com amortecimento usada em campo. Seu arranjo elétrico, assim como a arquitetura dos demais filtros, podem ser encontrados em [11,12];
- Filtros amortecidos de terceira ordem: trata-se de um dispositivo com uma curva de filtragem mais eficiente, todavia, na prática, não é muito empregado por ser de elevado custo;
- Filtros amortecidos tipo C: este possui uma topologia que diverge dos demais arranjos amortecidos pelo fato de acrescentar um ramo RLC série sintonizado à frequência fundamental ou outra predefinida pelas necessidades impostas [13].

Tendo em mente os diferentes filtros acima elencados, foi

feita uma pré-seleção das topologias de filtragem a serem consideradas, descartando-se aqueles arranjos que se apresentam com uma maior complexidade construtiva ou, ainda, com problemas para implementação em campo. Neste sentido, os filtros sintonizados de duas e três frequências não serão aqui analisados, por serem de custos mais elevados, pouco flexíveis a múltiplos ajustes, factíveis de geração de ressonâncias indesejáveis nas faixas entre frequências de filtragem, além, é claro, de poderem ser substituídos por filtros amortecidos. Em relação às topologias do tipo amortecido, para efeito do presente estudo, não serão considerados os filtros amortecidos de primeira ordem, porque apresentam-se com consideráveis níveis de perdas à frequência fundamental e possuem baixa eficácia para ordens harmônicas inferiores, além de necessitarem de um valor de capacitância de grande montante. Portanto, serão analisados os seguintes arranjos para filtragem harmônica: filtro sintonizado em uma frequência, filtros amortecidos de segunda e terceira ordem e do tipo C. Os mesmos encontram-se ilustrados na Fig. 1.

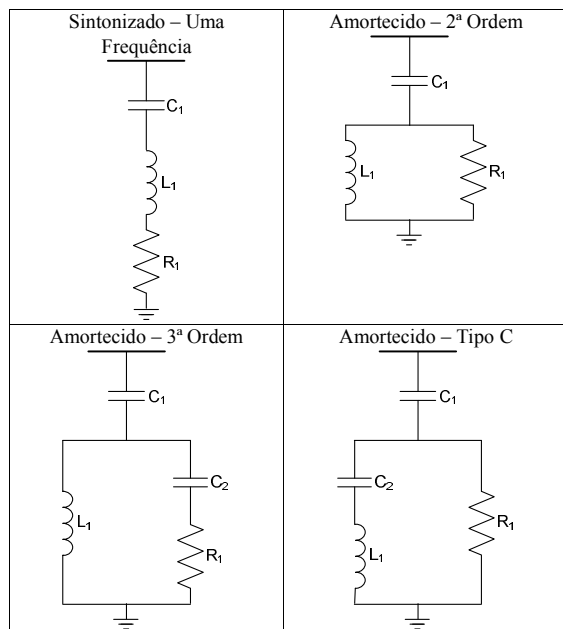


Fig. 1. Circuitos elétricos dos filtros harmônicos selecionados.

III. SISTEMA DE 14 BARRAS DO IEEE

A. O Sistema de 14 Barras – Padrão IEEE

Nesta subseção tem-se a descrição do arranjo elétrico de 14 barras padrão IEEE [14-17], o qual visa a uma avaliação de desempenho do processo para um complexo elétrico com maior identidade com a estrutura dos sistemas reais. Tal implementação, conforme já afirmado, tem por objetivo uma investigação das estratégias, aqui elencadas, quanto ao seu desempenho. Vale ainda ressaltar que o sistema de 14 barras do IEEE foi selecionado por se tratar de um arranjo elétrico amplamente difundido, validado e, também, representativo de situações práticas frequentemente encontradas em rede elétricas de distribuição.

A Fig. 2 apresenta o diagrama unifilar do arranjo elétrico em pautas, o qual, vale ressaltar, trata-se de um sistema elétrico trifásico.

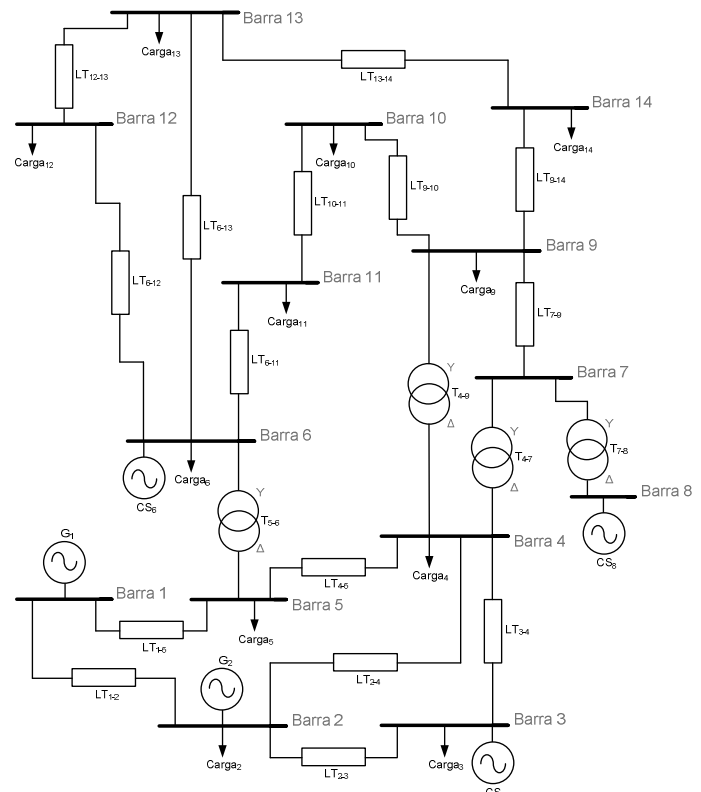


Fig. 2. Sistema padrão de 14 barras IEEE.

Sendo:

- G – geradores síncronos – 60 Hz;
- CS – compensadores síncronos de reativos;
- $Carga$ – cargas trifásicas tipo impedância constante e definidas pelos seus equivalentes de consumo $P+jQ$;
- LT – linhas de transmissão;
- T – transformadores.

A Tabela 1 fornece os principais dados atrelados com os componentes constituintes do arranjo elétrico selecionado para os estudos investigativos. No que tange às máquinas síncronas estas são representadas por fontes ideais de tensão com respectivas impedâncias equivalentes, os transformadores pelos clássicos modelos à 60 Hz, as linhas de transmissão pelos seus correspondentes circuitos π e, por fim, as cargas são inseridas através de suas impedâncias constantes.

TABELA I
Parâmetros dos elementos constituintes do sistema de 14 barras do IEEE

Elementos	Parâmetros dos Elementos do Sistema de 14 barras IEEE			
	Tensão Nominal (kV)	Potência Nominal (MVA)	Resistência (Ω)	Indutância (mH)
Máquinas Síncronas				
G_1	69	615	0	18,438
G_2	13,8	60	0,246	221,001
CS_3	69	60	0,246	221,001
CS_6	13,8	25	0,011	25,257
CS_8	18	25	0,011	25,257

Cargas P+jQ	Tensão Nominal (kV)	Potência Aparente (MVA)	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVAr)
<i>Carga₂</i>	69	25,14	21,7	12,7
<i>Carga₃</i>	69	96,10	94,2	19,0
<i>Carga₄</i>	69	48,97	47,8	3,9
<i>Carga₅</i>	69	7,77	7,6	1,8
<i>Carga₆</i>	13,8	13,48	11,2	7,5
<i>Carga₉</i>	13,8	33,85	29,5	16,6
<i>Carga₁₀</i>	13,8	10,71	9,0	5,8
<i>Carga₁₁</i>	13,8	3,94	3,5	1,8
<i>Carga₁₂</i>	13,8	6,31	6,1	1,6
<i>Carga₁₃</i>	13,8	14,69	13,5	5,8
<i>Carga₁₄</i>	13,8	15,72	14,9	5,0
Linhas de Transmissão	Tensão Nominal (kV)	Resistência (Ω)	Indutância (mH)	Capacitância (μF)
<i>LT₁₋₂</i>	69	0,923	7,473	2,942
<i>LT₁₋₅</i>	69	2,572	28,168	2,741
<i>LT₂₋₃</i>	69	2,237	25,002	2,440
<i>LT₂₋₄</i>	69	2,767	22,267	2,084
<i>LT₂₋₅</i>	69	2,711	21,959	1,894
<i>LT₃₋₄</i>	69	3,190	21,599	1,928
<i>LT₃₋₄</i>	69	0,636	5,318	0,713
<i>LT₆₋₁₁</i>	13,8	0,181	1,005	-
<i>LT₆₋₁₂</i>	13,8	0,234	1,292	-
<i>LT₆₋₁₃</i>	13,8	0,126	0,658	-
<i>LT₇₋₉</i>	13,8	0	0,556	-
<i>LT₉₋₁₀</i>	13,8	0,061	0,427	-
<i>LT₉₋₁₄</i>	13,8	0,242	1,366	-
<i>LT₁₀₋₁₁</i>	13,8	0,156	0,970	-
<i>LT₁₂₋₁₃</i>	13,8	0,421	1,010	-
<i>LT₁₃₋₁₄</i>	13,8	0,341	1,758	-
Transformadores de Força	Relações Nominais de Tensões (kV)	Potência Nominal (MVA)	Reatância Percentual	Razão de TAP
<i>T₄₋₇</i>	69/13,8	50	7%	0,978
<i>T₄₋₉</i>	69/13,8	20	7%	0,969
<i>T₅₋₆</i>	69/13,8	45	7%	0,932
<i>T₇₋₈</i>	18/13,8	40	5%	1

B. Adaptação do Sistema para Estudos Envolvendo Distorções Harmônicas

Em consonância com o foco desta pesquisa, foram adicionadas nos principais barramentos de carga do sistema elétrico em questão fontes de correntes harmônicas representativas da presença de cargas não lineares, as quais, como é sabido, constituem-se no cerne dos fenômenos aqui considerados, qual seja, as distorções harmônicas de tensões e a busca por estratégias eficazes de mitigá-las. Tais fontes foram adotadas como atreladas com as ordens harmônicas 5, 7, 11 e 13, as quais são representativas, por exemplo, da operação de unidades retificadoras de 6 e 12 pulsos. Quanto aos níveis das correntes injetadas, estas compreenderam valores percentuais em relação à potência nominal da carga em foco, variando de 5 a 20% da magnitude desta. Dentro desta hipótese, têm-se os valores de injeções harmônicas apresentados na Tabela II.

TABELA II
Fontes de distorções adicionadas ao sistema de 14 barras do IEEE

Barra	\hat{I}_{5h} (A)	\hat{I}_{7h} (A)	\hat{I}_{11h} (A)	\hat{I}_{13h} (A)
3	103,9∠222°	68,9∠171°	43,5∠167°	33,9∠122°
4	29,7∠167°	17,0∠50°	38,2∠256°	29,7∠-6°
6	83,8∠2°	57,3∠87°	50,9∠240°	38,2∠111°
9	216,4∠105°	154,9∠215°	108,2∠451°	93,3∠154°
13	33,9∠153°	27,6∠260°	55,2∠92°	35,0∠34°
14	78,5∠137°	70,0∠108°	62,4∠23°	38,6∠48°

Uma vez conhecida a topologia, os modelos, os parâmetros, os carregamentos e as injeções de correntes

harmônicas atreladas com a presença das cargas não lineares, nas proporções aleatoriamente escolhidas, foram então realizados estudos computacionais, através do simulador ATP, com vistas ao conhecimento das condições operativas impostas quanto aos níveis de distorções harmônicas presentes nos barramentos constituintes do sistema elétrico. A Tabela III apresenta as distorções harmônicas individuais e totais de tensão para as 14 barras do sistema avaliado.

TABELA III
Distorções individuais e totais de tensão no sistema de 14 barras do IEEE com a inserção das fontes harmônicas de corrente

Barra	DIT_{5h} (%)	DIT_{7h} (%)	DIT_{11h} (%)	DIT_{13h} (%)	DTT (%)
1	4,52	3,67	1,31	3,85	7,10
2	5,58	4,40	1,53	3,87	8,23
3	5,78	3,88	3,75	2,80	8,39
4	7,01	4,84	0,91	2,14	8,83
5	6,77	4,91	1,13	2,82	8,90
6	7,61	4,72	1,37	1,13	9,13
7	7,78	3,74	1,78	0,51	8,83
8	7,26	3,49	1,66	0,53	8,24
9	8,90	3,14	3,08	0,67	9,95
10	8,64	3,41	2,73	0,35	9,69
11	8,11	4,06	2,07	0,43	9,31
12	7,71	4,54	1,65	1,56	9,23
13	7,85	4,43	1,94	1,91	9,42
14	8,87	5,03	4,75	1,75	11,38

A tabela anterior evidencia que os barramentos de média tensão (13,8kV) que apresentaram maiores níveis de distorção harmônica total (DTT) foram as barras 6, 9, 10, 11, 12, 13, e 14. Diante destes fatos, tais barras foram selecionadas para o presente estudo de desempenho. Vale ainda ressaltar que, de uma forma geral, as distorções harmônicas de 5ª ordem e total ultrapassaram, nestes barramentos, os valores de referências estabelecidos no PRODIST [4] e, por outro lado, as distorções harmônicas de 13º ordem se mostraram com valores relativamente pequenos, por tal motivo, tendo por foco os objetivos deste trabalho, estas últimas não serão aqui contempladas para efeito dos estudos de desempenho.

IV. ANÁLISE COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO DAS ESTRATÉGIAS SELECIONADAS

Uma vez pré-selecionadas as estratégias de filtragem a terem seus desempenhos avaliados e estabelecidos os barramentos do sistema teste a serem utilizados, os trabalhos prosseguiram no sentido da aplicação dos processos de mitigação elencados.

Para o dimensionamento dos filtros adotou-se, como premissa, a necessidade de uma compensação reativa, na frequência fundamental, de tal maneira a ajustar o fator de potência da barra, sob consideração, para aproximadamente 0,95, valor comumente empregado. Os demais elementos foram ajustados em consonância com as propriedades almejadas e particularmente aplicadas a uma ou outra configuração de filtragem. Neste sentido, a Tabela IV esclarece acerca dos fatores de potências dos barramentos a serem corrigidos. Tais valores são advindos de simulação no ATP.

TABELA IV
Fatores de potência verificados nos barramentos selecionados

Barramento	Fator de Potência
6	0,83
9	0,84
10	0,84
11	0,89
12	0,97
13	0,92
14	0,95

Tendo em mente as afirmações anteriormente tecidas, não serão avaliados os barramentos 12, 13, 11 e 14, uma vez que os mesmos já possuem fatores de potência relativamente altos. Todavia, as barras 6, 9 e 10, se enquadram nas premissas estabelecidas.

Dando continuidade nos trabalhos, a Tabela V apresenta os parâmetros dos filtros definidos para os fins deste trabalho e seis casos avaliados para a barra 6.

TABELA V
Casos avaliados e respectivas parametrizações dos filtros empregados – Barra 6

Caso	Filtro Harmônico		Parâmetros do Filtro			Observações
	Tipo	Especificação	R	L	C	
1	sintonizado	1 frequência	$R_1 = 0,5\Omega$	$L_1 = 5,35\text{mH}$	$C_1 = 53\mu\text{F}$	para 300Hz
2	sintonizado	1 frequência	$R_1 = 0,5\Omega$	$L_1 = 2,75\text{mH}$	$C_1 = 53\mu\text{F}$	para 420Hz
3	sintonizado	1 frequência	$R_1 = 0,5\Omega$	$L_1 = 1,1\text{mH}$	$C_1 = 53\mu\text{F}$	para 660Hz
4	amortecido	2ª ordem	$R_1 = 30\Omega$	$L_1 = 5,4\text{mH}$	$C_1 = 53\mu\text{F}$	a partir de 300Hz
5	amortecido	3ª ordem	$R_1 = 30\Omega$	$L_1 = 5,3\text{mH}$	$C_1 = 53\mu\text{F}$ $C_2 = 50\mu\text{F}$	a partir de 300Hz
6	amortecido	tipo C	$R_1 = 30\Omega$	$L_1 = 5,6\text{mH}$	$C_1 = 53\mu\text{F}$ $C_2 = 1326\mu\text{F}$	a partir de 300Hz

A Tabela VI fornece as tensões harmônica na barra 6 para os seis casos avaliados e também quando da ausência de filtragem harmônica.

TABELA VI
Distorções harmônicas individuais de tensão verificadas com e sem conexão do filtro – Barra 6

Referência	Distorções Individuais de Tensões		
	DIT_{5h} (%)	DIT_{7h} (%)	DIT_{11h} (%)
Sem Filtro	7,76 %	4,80%	1,56%
Com Filtro – Caso 1	2,11%	3,39%	1,41%
Com Filtro – Caso 2	8,8%	1,24%	2,67%
Com Filtro – Caso 3	8,44%	5,67%	0,36%
Com Filtro – Caso 4	5,98%	3,87%	1,37%
Com Filtro – Caso 5	5,69%	3,96%	1,4%
Com Filtro – Caso 6	6,00%	3,90%	1,38%

Tem-se na Tabela VII os parâmetros dos filtros, em conjunto com os casos avaliados, para o barramento 9. Enquanto, os resultados das distorções harmônica individuais de tensão com e sem a conexão dos filtros na barra 9 estão disponíveis na Tabela VIII.

TABELA VII
Casos avaliados e respectivas parametrizações dos filtros empregados – Barra 9

Caso	Filtro Harmônico		Parâmetros do Filtro			Observações
	Tipo	Especificação	R	L	C	
1	sintonizado	1 frequência	$R_1 = 0,5\Omega$	$L_1 = 3,0\text{mH}$	$C_1 = 96\mu\text{F}$	para 300Hz
2	sintonizado	1 frequência	$R_1 = 0,5\Omega$	$L_1 = 1,5\text{mH}$	$C_1 = 96\mu\text{F}$	para 420Hz
3	sintonizado	1 frequência	$R_1 = 0,5\Omega$	$L_1 = 0,61\text{mH}$	$C_1 = 96\mu\text{F}$	para 660Hz
4	amortecido	2ª ordem	$R_1 = 30\Omega$	$L_1 = 3,1\text{mH}$	$C_1 = 96\mu\text{F}$	a partir de 300Hz
5	amortecido	3ª ordem	$R_1 = 30\Omega$	$L_1 = 3,1\text{mH}$	$C_1 = 96\mu\text{F}$ $C_2 = 50\mu\text{F}$	a partir de 300Hz
6	amortecido	tipo C	$R_1 = 30\Omega$	$L_1 = 3,1\text{mH}$	$C_1 = 96\mu\text{F}$ $C_2 = 2402\mu\text{F}$	a partir de 300Hz

TABELA VIII
Distorções harmônicas individuais de tensão verificadas com e sem conexão do filtro – Barra 9

Referência	Distorções Individuais de Tensões		
	DIT_{5h} (%)	DIT_{7h} (%)	DIT_{11h} (%)
Sem Filtro	8,87%	5,03%	4,75%
Com Filtro – Caso 1	2,67%	2,47%	2,67%
Com Filtro – Caso 2	10,1%	0,92%	2,20%
Com Filtro – Caso 3	9,90%	3,52%	0,78%
Com Filtro – Caso 4	4,46%	2,52%	2,69%
Com Filtro – Caso 5	4,40%	2,48%	2,63%
Com Filtro – Caso 6	4,34%	2,39%	2,50%

O último barramento avaliado foi o de número 10. Assim, a Tabela IX apresenta os parâmetros dos filtros e casos avaliados para esta barra. Já a Tabela X provê as tensões harmônicas na barra 10 para os casos avaliados.

TABELA IX
Casos avaliados e respectivas parametrizações dos filtros empregados – Barra 10

Caso	Filtro Harmônico		Parâmetros do Filtro			Observações
	Tipo	Especificação	R	L	C	
1	sintonizado	1 frequência	$R_1 = 0,5\Omega$	$L_1 = 7,11\text{mH}$	$C_1 = 40\mu\text{F}$	para 300Hz
2	sintonizado	1 frequência	$R_1 = 0,5\Omega$	$L_1 = 3,62\text{mH}$	$C_1 = 40\mu\text{F}$	para 420Hz
3	sintonizado	1 frequência	$R_1 = 0,5\Omega$	$L_1 = 1,47\text{mH}$	$C_1 = 40\mu\text{F}$	para 660Hz
4	amortecido	2ª ordem	$R_1 = 30\Omega$	$L_1 = 7,11\text{mH}$	$C_1 = 40\mu\text{F}$	a partir de 300Hz
5	amortecido	3ª ordem	$R_1 = 30\Omega$	$L_1 = 7,11\text{mH}$	$C_1 = 40\mu\text{F}$ $C_2 = 35\mu\text{F}$	a partir de 300Hz
6	amortecido	tipo C	$R_1 = 30\Omega$	$L_1 = 7,5\text{mH}$	$C_1 = 40\mu\text{F}$ $C_2 = 980\mu\text{F}$	a partir de 300Hz

TABELA X
Distorções harmônicas individuais de tensão verificadas com e sem conexão do filtro – Barra 10

Referência	Distorções Individuais de Tensões		
	DIT_{5h} (%)	DIT_{7h} (%)	DIT_{11h} (%)
Sem Filtro	8,60%	3,40%	2,75%
Com Filtro – Caso 1	2,21%	2,93%	2,47%
Com Filtro – Caso 2	10,20%	0,85%	2,24%
Com Filtro – Caso 3	9,55%	4,22%	0,56%
Com Filtro – Caso 4	7,65%	2,90%	2,41%
Com Filtro – Caso 5	7,16%	2,30%	2,47%
Com Filtro – Caso 6	7,63%	2,91%	2,42%

Os resultados abrangendo os três barramentos – barras 6, 9 e 10 – avaliados evidenciam que:

- de uma forma geral, os filtros sintonizados se mostraram mais eficientes para a frequência sob consideração, quando comparados aos amortecidos;
- não obstante à consideração anterior, os filtros sintonizados empregados nos casos 2 e 3, respectivamente sintonizados em 300Hz e 420Hz, provocaram ampliações nas distorções de ordens inferiores;
- por outro lado, os filtros amortecidos, apesar de se mostrarem, de uma forma geral, menos eficientes nas destacadas ordens harmônicas, os mesmos provocaram mitigações das tensões sem o efeito colateral da amplificação de uma ordem harmônica ou outra;
- apesar de não ter sido explicitado, por questões de limitações de espaço, os fatores de potência, após a inserção dos filtros, também foram verificados e se apresentaram em consonância com as expectativas.

V. CONCLUSÕES

O presente trabalho, num primeiro momento, abordou as principais estratégias que atualmente são empregadas na filtragem harmônica. Tais técnicas se restringiram à filtragem conhecida como passiva, a qual utiliza apenas elementos do tipo resistivo, indutivo e capacitivo em sua constituição. Neste ínterim, selecionou-se, entre filtros sintonizados e amortecidos, quatro arranjos que se mostraram mais afeitos com o emprego em campo, quais sejam: filtro sintonizado em uma frequência, filtro amortecido de segunda ordem, filtro amortecido de terceira ordem e filtro amortecido tipo C.

Os trabalhos continuaram e, num segundo momento, foi sintetizado o sistema teste de 14 barras do IEEE. O mesmo sofreu adaptações para ser empregado em avaliações com a presença de distorções harmônicas. Neste sentido, uma vez inseridas as fontes de distorções, foram realizadas simulações no programa ATP de modo a conhecer o espectro harmônico de cada barramento e, por sua vez, eleger as barras de média tensão em que se verificaram maiores magnitudes de distorções harmônicas totais.

Nesse sentido, selecionadas as estratégias de filtragem, estabelecido o sistema teste e escolhidos os pontos (barramentos) a serem realizadas as averiguações, foram perpetradas simulações computacionais que, por conseguinte, puderam ser avaliadas, propiciando uma boa análise de desempenho dos distintos arranjos de filtros harmônicos. Tais estudos concluíram que, de uma forma geral, os filtros sintonizados se mostraram mais eficientes para a frequência em consideração, quando comparados aos amortecidos, todavia, aqueles, quando empregados em frequências superiores provocaram ampliações nas distorções de ordens inferiores. Uma possibilidade que se mostra atraente é o uso conjunto destas duas realidades de filtragem, contudo estudos adicionais são necessários, considerando além de aspectos de ordem técnica, aspectos de ordem financeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R.C. Dugan, et al., *Electrical Power Systems Quality*, 2. Ed., New York: McGraw-Hill, 2003.
- [2] R.M. Kerchner, G.F. Corcoran, *Circuitos de Corrente Alternada*, 3. Ed, Porto Alegre: Globo, 1977.
- [3] J. Arrillaga, N.R. Watson, *Power System Harmonics*, 2 ed., England: John Wiley & Sons, 2003.
- [4] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*. Brasília, 2010.
- [5] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Procedimentos de Rede: Submódulo 2.8 – Gerenciamento dos Indicadores de Desempenho da Rede Básica e dos Barramentos dos Transformadores de Fronteira, e de seus Componentes*. Rio de Janeiro, 2010.
- [6] IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61000-3-6 – *Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3: Limits - Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems - Basic EMC*. Paris, 1996.
- [7] IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *Std. 519-1992 – IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. New York, 1992.
- [8] A. Budak, *Circuit theory fundamentals and applications*, USA: Prentice Hall, 1978.
- [9] A.C.B. Alves, *Análise de problemas e procedimentos na determinação de filtros harmônicos*. 1991. 416 f. Dissertação (Mestrado) - UFU, Uberlândia, 1991.
- [10] L. Cristaldi, A. Ferrero, “Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power quality”, *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, v. 44, n. 3, p. 683-685, 1995.
- [11] P.H. Swart, M.J. Case, J.D. Wyk, “On techniques for localization of sources producing distortion in three-phase networks”, *Eur. Trans. Elect. Power*, v. 6, n. 6, p. 391-396, 1996.
- [12] W.M. Lin, C.H. Lin, K.P. Tu, C.H. Wu, “Multiple harmonic source detection and equipment identification with cascade correlation network”, *IEEE Trans. Power Del.*, v. 20, n. 3, p. 2166-2173, 2005.
- [13] I.N. Santos, *Método da Superposição Modificado como uma Nova Proposta de Atribuição de Responsabilidades sobre Distorções Harmônicas*. 161 f. Tese (Doutorado) - UFU, Uberlândia, 2011.
- [14] C.A. Cañizares, S.K.M. Kotsi, “Modeling and simulation of IEEE 14 bus system with FACTS controllers”, *IEEE Technical Report*, 2003.
- [15] W.R. Mendes, *Influência das Conexões dos Transformadores de Potência na Propagação dos Afundamentos de Tensão pelo Sistema Elétrico*. 152 f. Dissertação (Mestrado) - UFU, Uberlândia, 2008.
- [16] A.J. Conejo, F.D. Galiana, I. Kockar, “Z-Bus loss allocation”, *IEEE Trans. Power Systems*, v. 16, n. 1, p. 105-110, 2001.
- [17] P.K. IYambo, R. Tzoneva, “Transient stability analysis of the IEEE 14-bus electric power system”, *In: AFRICON 2007*, Windhoek, 2007.