

Análise do Impacto de Dessintonias em Filtros Harmônicos Passivos

Arthur Fernando Bonelli

Furnas Centrais Elétricas
abonelli@furnas.com.br

Marco Leandro Bonelli

GE
marco.bonelli@ge.com

Pedro Augustho Biasuz Block

Institutos Lactec
pedro.block@lactec.org.br

Evandro Marcos Vaciloto Filho

GE
evandro.vaciloto@ge.com

Resumo — As fontes de energia renováveis, como eólica e solar fotovoltaica, vem ganhando espaço na matriz energética nacional. Estas possuem conversores de frequência para compatibilizar e sincronizar a energia gerada com a rede elétrica. No entanto, estes conversores também geram distorções harmônicas de tensão e corrente. Desta forma, o Operador Nacional do Sistema Elétrico solicita a realização de estudos do impacto destas distorções harmônicas e, quando necessário, a instalação de equipamentos mitigadores. Dentre as possíveis soluções, os filtros passivos são os mais utilizados, porém uma variável importante no dimensionamento, a dessintonia, muitas vezes não é considerada. Assim, este artigo demonstra em quais tipos de filtros harmônicos passivos a dessintonia causa mais impacto, bem como um estudo de caso com dados reais.

Palavras-chaves — Dessintonia, Distorção harmônica, Energia eólica e solar fotovoltaica, Filtro harmônico passivo, Projeto de filtro harmônico.

I. INTRODUÇÃO

As fontes de energia renováveis estão a cada dia ganhando mais espaço na matriz energética mundial. Em particular no Brasil, a energia eólica tem grande destaque com 7,1% da matriz energética [1]. Já a energia solar fotovoltaica encontra-se em pleno desenvolvimento com empreendimentos de grande porte entrando em operação.

Devido a características intrínsecas à fonte primária destas energias, no caso o vento e a radiação solar, há necessidade de trabalhar com tecnologias que possam compatibilizar a energia gerada através destas fontes com os requisitos de conexão do sistema elétrico. Via de regra, estas conexões são realizadas por conversores de frequência, os quais sincronizam a energia gerada com a tensão e frequência da rede elétrica.

Todavia, estes conversores possuem, dentre outros efeitos colaterais, a geração de distorções harmônicas de tensão e corrente. Assim, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) solicita que os novos agentes acessantes ao Sistema Interligado Nacional (SIN) realizem estudos para analisar o impacto do empreendimento no sistema elétrico brasileiro.

A Norma Técnica 009/2016 – Rev.01 do ONS [2] define as regras para realizações dos estudos em parques eólicos e

usinas solares. Por sua vez, o Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede do ONS [3] apresenta os valores de distorções harmônicas de tensão admissíveis.

No caso dos resultados dos estudos apresentarem valores de distorções harmônicas geradas pelo complexo eólico ou solar acima dos limites regulatórios, é necessário implementar sistemas mitigadores, os quais podem ser compostos por filtros de harmônicos passivos e/ou ativos.

Mesmo com o avanço da eletrônica de potência, os filtros passivos ainda são em sua maioria os escolhidos, principalmente pelas seguintes vantagens:

- Solução consagrada em diversas aplicações há décadas;
- Maior gama de fornecedores no mercado;
- Equipamento mais robusto e de fácil manutenção;
- Na maioria das aplicações possui preço mais competitivo.

Dentre os diversos parâmetros necessários para o correto dimensionamento de um filtro de harmônicos, a dessintonia vem ganhando destaque. Esta variável, mesmo sendo de suma importância para o bom dimensionamento dos filtros de harmônicos, vinha sendo desconsiderada nos estudos supraditos. No entanto, com a exigência do ONS de considerar a mesma através do documento [2], fez com que a discussão de sua influência nos projetos ganhasse força.

A dessintonia é o distanciamento da ordem de ressonância de um filtro com a frequência harmônica que se deseja filtrar. Esta dessintonia pode ser causada propositalmente ou não. No caso dela não ser proposital, as variáveis que mais a influenciam são: tolerância de fabricação dos componentes passivos (capacitores, reatores e resistores), alteração da frequência da rede elétrica, temperatura, queima de elementos capacitivos, entre outros.

Dentro deste contexto, o artigo vem apresentar uma análise da influência da dessintonia no projeto do filtro de harmônicos passivos. Foram avaliados diferentes valores de dessintonia para filtros sintonizados e amortecidos com diferentes potências e sintonias harmônicas [4]. É também apresentado um estudo de caso do impacto da dessintonia de filtros passivos nas distorções harmônicas de tensão de um complexo eólico real.

II. FILTROS DE HARMÔNICOS PASSIVOS

Os filtros harmônicos passivos, como o próprio nome diz, são equipamentos constituídos por elementos passivos (resistores, capacitores e reatores). A Fig. 1 apresenta três possíveis configurações de filtros de harmônicos passivos [5]. Estas são as mais utilizadas no sistema elétrico.

Assim, os projetos dos filtros passivos devem ser realizados de forma a garantir a filtragem dos harmônicos indesejados do sistema, sempre buscando o melhor custo benefício.

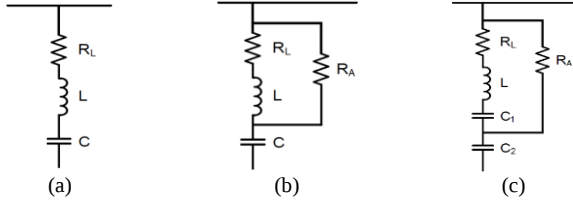


Fig. 1. Configurações de filtros de harmônicos passivos: (a) sintonizado; (b) amortecido; (c) tipo C.

Desta forma, todo projeto de filtro deve considerar:

- Potência reativa;
- Frequência de sintonia;
- Grau de efetividade.

A potência reativa é atrelada à necessidade de compensação do sistema em foco. Já a frequência de sintonia volta-se para a(s) ordem(s) harmônica(s) que se desejam mitigar. Por fim, o grau de efetividade do filtro depende da relação entre a impedância do filtro e a impedância do sistema.

Portanto, o projeto de um filtro de harmônicos se inicia com o levantamento da potência reativa necessária, das distorções harmônicas existentes e dos limites exigidos por norma.

A quantidade de frequências a serem filtradas e a quantidade de filtros a serem instalados depende de diversos fatores, sendo que um de suma importância é o econômico, visto que estes equipamentos podem chegar à casa de milhões de reais.

Em suma, pode-se apresentar que os filtros sintonizados possuem alta efetividade, no entanto são projetados para apenas uma ordem harmônica. Já os filtros amortecidos possuem eficácia menor se comparado aos sintonizados, mas são capazes de filtrar diversas ordens harmônicas. Por sua vez, o filtro tipo C possui desempenho muito próximo dos filtros amortecidos, no entanto, estes apresentam menores perdas. Como exemplo, tem-se a Fig. 2, a qual apresenta a impedância de dois filtros passivos de quinta ordem, sendo o primeiro sintonizado e o segundo amortecido.

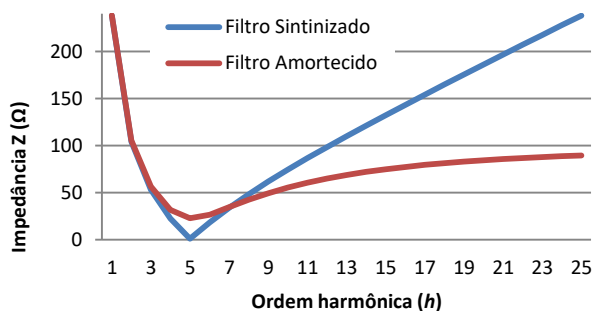


Fig. 2. Comparação das impedâncias de filtro sintonizado com amortecido.

Desta forma, normalmente os projetistas seguem as seguintes regras:

- As frequências de baixa ordem geralmente apresentam amplitudes mais elevadas, assim é comum a utilização de filtros sintonizados;
- As frequências de alta ordem comumente apresentam amplitudes mais baixas, portanto torna-se viável a utilização de filtros amortecidos englobando diversas ordens harmônicas.

Voltando-se à formulação dos filtros de harmônicos passivos, as reatâncias indutiva (X_L) e capacitiva (X_C) na frequência nominal (f_N) do filtro podem ser obtidas a partir de sua potência efetiva (S_N), tensão de operação (U_N) e sua respectiva ordem de sintonia (h), conforme a seguir [6]:

$$S_N = \frac{U_N^2}{X_{EF}} = \frac{U_N^2}{X_C - X_L} \quad (1)$$

$$X_C = X_{EF} \times \frac{h^2}{h^2 - 1} \quad (2)$$

$$X_L = X_C - X_{EF} = \frac{X_C}{h^2} \quad (3)$$

Onde: X_{EF} – reatância capacitiva efetiva do filtro harmônico na frequência nominal.

A frequência de sintonia (f_s) do filtro harmônico é encontrada por:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \times C}} = f_N \times \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (4)$$

Outra variável importante no dimensionamento dos filtros é o Fator de Qualidade (FQ). Os filtros sintonizados comumente possuem fator de qualidade relacionado à resistência dos reatores (R_L). Os valores típicos variam entre 30 e 180 [4,7]. Este pode ser obtido por:

$$FQ = \frac{\sqrt{L/C}}{R_L} \quad (5)$$

Para os filtros amortecidos, normalmente utiliza-se o Fator de Amortecimento (FA). O mesmo está descrito em [4] e pode ser obtido por:

$$FA = \frac{R_A}{\sqrt{L/C}} \quad (6)$$

Neste caso para um fator de amortecimento mais elevado, por exemplo próximo de 4, a filtragem harmônica é mais efetiva na frequência de sintonia, sendo que nas frequências de ordens maiores ocorrerá uma filtragem de menor monta. Se considerar fator de qualidade baixo, na ordem de 0,5 por exemplo, haverá filtragem harmônica na frequência de sintonia da mesma monta que as frequências maiores, pois a impedância harmônica do filtro permanecerá praticamente constante [8].

Voltando-se para a dessintonia (δ), a mesma representa o desvio da frequência de ressonância real de um filtro em relação à frequência de ressonância desejada. Esta é a variável foco do presente trabalho e pode ser definida por [4]:

$$\delta = \frac{\omega - \omega_p}{\omega_p} \quad (7)$$

Sendo que:

$$\omega_p = 2\pi \times h_p \times f_N = \frac{1}{\sqrt{L_p \times C_p}} \quad (8)$$

$$\omega = 2\pi \times h_R \times f_R = \frac{1}{\sqrt{L_R \times C_R}} \quad (9)$$

Onde:

ω_p – frequência de ressonância projetada [rad/s];
 ω – frequência de ressonância real do filtro [rad/s];
 h_p – ordem harmônica de projeto;
 h_R – ordem harmônica real do filtro;
 f_R – frequência real do sistema elétrico;
 L_p – indutância de projeto [H];
 L_R – indutância real do filtro [H];
 C_p – capacitância de projeto [F];
 C_R – capacitância real do filtro [F].

A dessintonia também pode ser expressa pela equação:

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_N} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L_p} + \frac{\Delta C}{C_p} \right) \quad (10)$$

Onde:

$\Delta f = |f_R - f_N|$
 $\Delta L = |L_R - L_p|$
 $\Delta C = |C_R - C_p|$

Através de (10) fica evidente as três variáveis que influenciam na dessintonia de um filtro harmônico passivo: frequência da rede elétrica, indutância e capacitância. Como o sistema elétrico brasileiro possui uma rede em malha muito extensa, salvo em momentos transitórios, pode-se considerar as variações de frequência praticamente nulas. Desta forma, a dessintonia dos filtros é afetada principalmente pela variação da indutância e da capacitância.

III. IMPACTO DA DESSINTONIA NA IMPEDÂNCIA DE FILTROS PASSIVOS

A fim de verificar os impactos da dessintonia na efetividade de filtros harmônicos passivos, são apresentadas análises com diferentes parâmetros de projeto. Portanto, o presente capítulo é dividido em duas etapas. A primeira é voltada para avaliação de filtros harmônicos sintonizados e a segunda para filtros harmônicos amortecidos.

A. Filtros harmônicos sintonizados

Os filtros harmônicos sintonizados são os mais encontrados no sistema elétrico. As principais vantagens são baixíssimas perdas e alta performance na filtragem da ordem harmônica escolhida. Por sua vez, sua principal desvantagem é que ele é capaz de filtrar apenas uma ordem harmônica.

Os filtros sintonizados utilizados nesta análise são:

- Filtros harmônicos sintonizados na 2ª, 5ª e 11ª ordem;
- Potência de 0,5, 5,0 e 20,0 MVar;
- Tensão nominal do barramento de 34,5 kV.

A tensão de 34,5 kV para os filtros analisados foi escolhida pelo fato da maioria dos parques eólicos no Brasil possuírem subestações coletoras com este nível de tensão, local onde comumente são instalados os filtros harmônicos.

A Tabela I apresenta os dados dos filtros harmônicos sintonizados simulados.

TABELA I. DADOS DOS FILTROS HARMÔNICOS SINTONIZADOS.

Ordem harm.	Tensão [kV]	Potência [MVar]	C [μF]	L [mH]	R _L [Ω]
2	34,5	0,5	0,836	2104,82	1,0
2	34,5	5,0	8,357	210,48	1,0
2	34,5	20,0	33,429	52,62	1,0
5	34,5	0,5	1,070	263,10	1,0
5	34,5	5,0	10,697	26,31	1,0
5	34,5	20,0	42,789	6,58	1,0
11	34,5	0,5	1,105	52,62	1,0
11	34,5	5,0	11,051	5,26	1,0
11	34,5	20,0	44,203	1,32	1,0

Pode-se verificar pela Tabela I que a resistência dos reatores (R_L) de todos os filtros está em 1,0 Ω. Este valor foi escolhido para todos os filtros sem dessintonia possuam uma unidade de impedância na respectiva frequência de ressonância, simplificando as análises comparativas dos resultados entre os filtros.

Voltando-se para os valores de dessintonia simulados, estes serão de 1,0%, 2,0% e 3,0%. Valores comuns de dessintonia segundo [9].

Desta forma, têm-se os gráficos das Fig. 3 a 5 os quais apresentam as variações de impedância (ΔZ) dos filtros harmônicos sintonizados devido à influência da dessintonia. Estas variações são calculadas de acordo com (11).

$$\Delta Z = \frac{|\dot{Z}_{f_{des.}}| - |\dot{Z}_{f_0}|}{|\dot{Z}_{f_0}|} \times 100\% \quad (11)$$

Onde:

$\dot{Z}_{f_{des.}}$ – impedância do filtro dessintonizado calculada para ordem harmônica original;
 $\dot{Z}_{f_0}$ – impedância do filtro sem dessintonia calculada para ordem harmônica original.

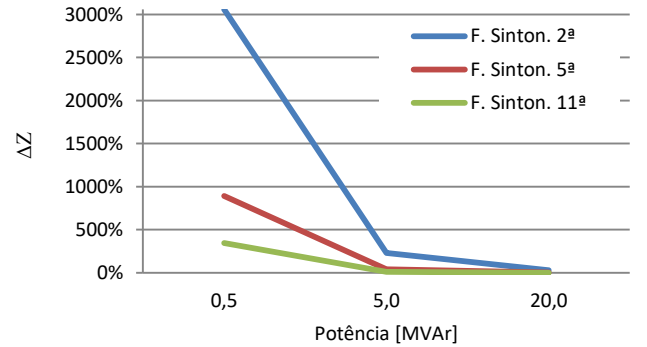


Fig. 3. Variação de impedância dos filtros sintonizados devido à dessintonia de 1,0%.

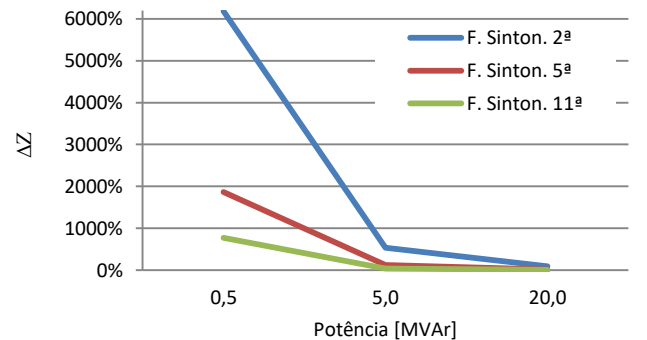


Fig. 4. Variação de impedância dos filtros sintonizados devido à dessintonia de 2,0%.

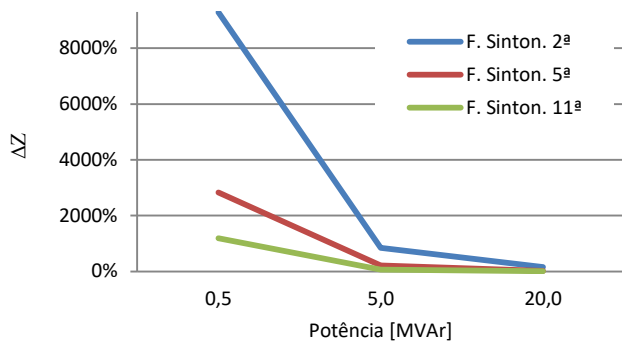


Fig. 5. Variação de impedância dos filtros sintonizados devido à dessintonia de 3,0%.

Os resultados das figuras acima estão sintetizados na Tabela II.

Pode-se verificar pelas Fig. 3 a 5 que o quanto menor a potência dos filtros, mais eles sofrem influência da dessintonia. Constata-se também que o quanto menor a ordem harmônica, mais a dessintonia afeta o desempenho do filtro.

TABELA II. VARIAÇÃO DE IMPEDÂNCIA DOS FILTROS SINTONIZADOS.

Dessintonia 1%			
Filtro	0,5 MVar	5,0 MVar	20,0 MVar
2ª ordem	3059%	231%	27%
5ª ordem	892%	40%	3%
11ª ordem	346%	9%	1%
Dessintonia 2%			
Filtro	0,5 MVar	5,0 MVar	20,0 MVar
2ª ordem	6185%	536%	86%
5ª ordem	1866%	120%	11%
11ª ordem	770%	32%	2%
Dessintonia 3%			
Filtro	0,5 MVar	5,0 MVar	20,0 MVar
2ª ordem	9282%	843%	155%
5ª ordem	2833%	210%	24%
11ª ordem	1194%	63%	5%

B. Filtros harmônicos amortecidos

Os filtros harmônicos amortecidos, mesmo sendo menos comuns que os sintonizados, são facilmente encontrados nos sistemas elétricos. A principal vantagem deste é que o mesmo é capaz de filtrar diversas ordens harmônicas, mesmo não sendo tão efetivo quanto os filtros passivos sintonizados.

Os filtros amortecidos utilizados nas análises são:

- Filtros harmônicos amortecidos na 2ª, 5ª e 11ª ordem;
- Potência de 0,5, 5,0 e 20,0 MVar;
- Fator de amortecimento de 1,0, 3,0, 5,0 e 10,0;
- Tensão nominal do barramento de 34,5 kV.

A manutenção das mesmas potências, tensão e ordens harmônicas foi motivada para facilitar a comparação entre os filtros amortecidos e sintonizados.

Quanto à dessintonia, as simulações consideraram valores de 3,0%.

Desta forma, a Tabela III apresenta os dados dos filtros harmônicos amortecidos simulados neste trabalho.

Assim, as Fig. 6 a 8 apresentam as variações de impedância (ΔZ) dos filtros harmônicos amortecidos devido à influência da dessintonia. Por sua vez, os resultados das figuras estão descritos na Tabela IV.

TABELA III. DADOS DOS FILTROS HARMÔNICOS AMORTECIDOS.

Ordem harm.	Tensão [kV]	Pot. [MVar]	FA	C [μF]	L [mH]	R _L [Ω]	R _A [Ω]
2	34,5	0,5	0,5	0,836	2105	1,0	794
2	34,5	0,5	3,0	0,836	2105	1,0	4761
2	34,5	0,5	10,0	0,836	2105	1,0	15870
2	34,5	5,0	0,5	8,357	210,5	1,0	79,4
2	34,5	5,0	3,0	8,357	210,5	1,0	476
2	34,5	5,0	10,0	8,357	210,5	1,0	1587
2	34,5	20,0	0,5	33,429	52,62	1,0	19,8
2	34,5	20,0	3,0	33,429	52,62	1,0	119
2	34,5	20,0	10,0	33,429	52,62	1,0	397
5	34,5	0,5	0,5	1,070	263,1	1,0	248
5	34,5	0,5	3,0	1,070	263,1	1,0	1488
5	34,5	0,5	10,0	1,070	263,1	1,0	4959
5	34,5	5,0	0,5	10,697	26,31	1,0	24,8
5	34,5	5,0	3,0	10,697	26,31	1,0	149
5	34,5	5,0	10,0	10,697	26,31	1,0	496
5	34,5	20,0	0,5	42,789	6,578	1,0	6,20
5	34,5	20,0	3,0	42,789	6,578	1,0	37,2
5	34,5	20,0	10,0	42,789	6,578	1,0	124
11	34,5	0,5	0,5	1,105	52,62	1,0	109
11	34,5	0,5	3,0	1,105	52,62	1,0	655
11	34,5	0,5	10,0	1,105	52,62	1,0	2182
11	34,5	5,0	0,5	11,051	5,262	1,0	10,9
11	34,5	5,0	3,0	11,051	5,262	1,0	65,5
11	34,5	5,0	10,0	11,051	5,262	1,0	218
11	34,5	20,0	0,5	44,203	1,316	1,0	2,73
11	34,5	20,0	3,0	44,203	1,316	1,0	16,4
11	34,5	20,0	10,0	44,203	1,316	1,0	54,6

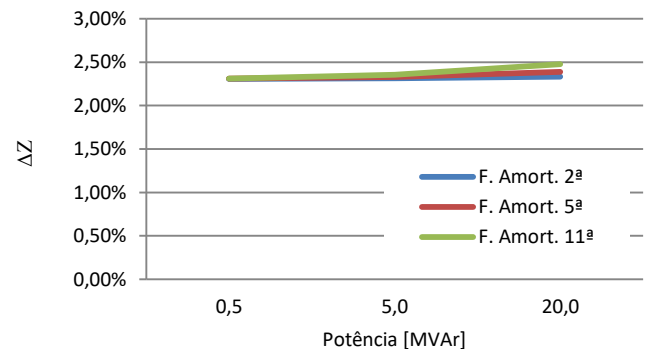


Fig. 6. Variação de impedância dos filtros amortecidos com FA 0,5 devido à dessintonia de 3,0%.

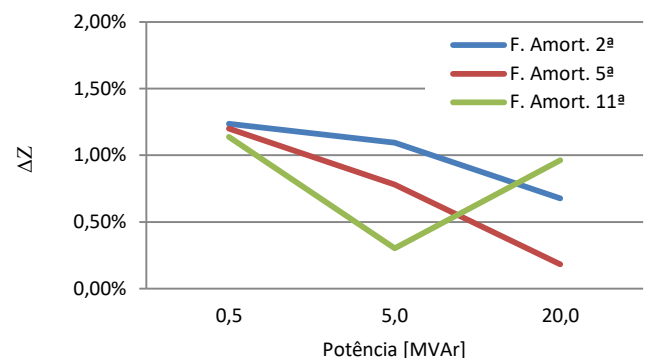


Fig. 7. Variação de impedância dos filtros amortecidos com FA 3,0 devido à dessintonia de 3,0%.

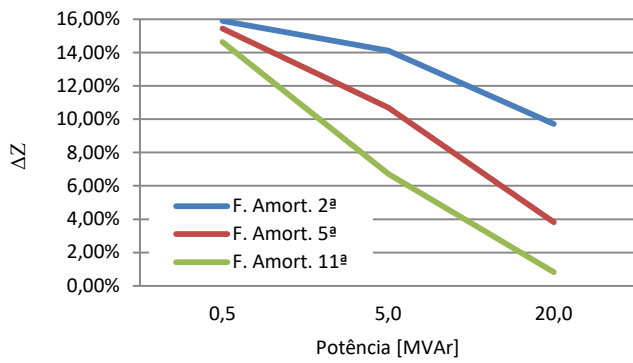


Fig. 8. Variação de impedância dos filtros amortecidos com FA 10,0 devido à dessintonia de 3,0%.

TABELA IV. VARIAÇÃO DE IMPEDÂNCIA DOS FILTROS AMORTECIDOS.

Fator de Amortecimento de 0,5			
Filtro	0,5 MVar	5,0 MVar	20,0 MVar
2ª ordem	2,31%	2,31%	2,33%
5ª ordem	2,31%	2,33%	2,39%
11ª ordem	2,31%	2,35%	2,48%
Fator de Amortecimento de 3,0			
Filtro	0,5 MVar	5,0 MVar	20,0 MVar
2ª ordem	1,24%	1,09%	0,68%
5ª ordem	1,20%	0,78%	0,18%
11ª ordem	1,14%	0,30%	0,96%
Fator de Amortecimento de 10,0			
Filtro	0,5 MVar	5,0 MVar	20,0 MVar
2ª ordem	15,92%	14,11%	9,71%
5ª ordem	15,45%	10,69%	3,82%
11ª ordem	14,63%	6,72%	0,82%

Para os filtros amortecidos fica evidente que para baixos valores do Fator de Amortecimento (abaixo de 3,0) a dessintonia praticamente não afeta no desempenho do filtro harmônico. No entanto, para filtros com maiores fatores de amortecimento a dessintonia causa influência na efetividade dos filtros.

IV. ESTUDO DE CASO REAL

Uma vez verificado o impacto da dessintonia no valor de impedância dos diferentes filtros passivos considerados, esta seção apresenta um estudo de caso do impacto da dessintonia nas distorções harmônicas de tensão de um complexo eólico real. Para tanto é utilizada a metodologia apresentada na NT 009/2016 da ONS [2], a qual possibilita, a partir de medições de correntes harmônicas dos aerogeradores e da modelagem computacional da rede externa e interna ao parque, determinar as distorções harmônicas de tensão no PAC (Ponto de Acoplamento Comum) da referida instalação.

Os dados utilizados no presente estudo de caso são provenientes de um estudo de impacto harmônico de um complexo eólico real (correntes harmônicas medidas nos aerogeradores e dados de impedâncias da rede interna e do SIN). O complexo eólico avaliado é constituído por 30 aerogeradores totalizando 60 MW e conectado em um PAC com tensão de 69 kV.

Iniciando-se as análises, tem-se a Fig. 9 a qual apresenta o resultado do estudo de impacto harmônico no complexo eólico supracitado sem nenhuma solução mitigadora. Os resultados de distorções simulados são comparados com os limites normativos do Submódulo 2.8 do ONS [3]. Ressalta-se que os estudos de impacto harmônico são realizados até a

50º ordem harmônica, no entanto, para facilitar a visualização, serão apresentados resultados até a 25º ordem.

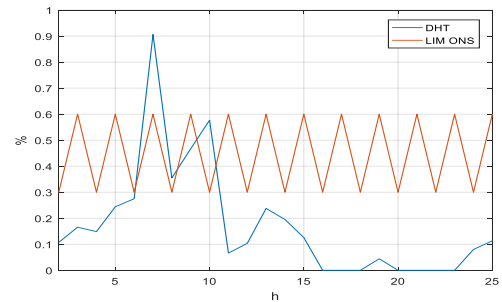


Fig. 9. Distorções harmônicas simuladas no PAC do complexo eólico avaliado – sem filtros.

Através da análise dos resultados da Fig. 9 verifica-se a transgressão de algumas ordens harmônicas (7ª, 8ª e 10ª), demonstrando assim a necessidade da utilização de filtros harmônicos para mitigação. A fim de avaliar o impacto da dessintonia em diferentes tipos de filtros sintonizados, são propostas duas soluções. A primeira considera somente a utilização de filtros passivos sintonizados, e a segunda de somente filtros passivos amortecidos. A Tabela V apresenta os dados dos filtros especificados.

TABELA V. DADOS DOS FILTROS ESPECIFICADOS.

SOLUÇÃO 1 – Filtros harmônicos sintonizados							
Ordem harm.	Tensão [kV]	Potência [MVar]	FA	C [µF]	L [mH]	R _L [Ω]	R _A [Ω]
5	34,5	0,5	--	1,070	263,1	6,2	--
6	34,5	0,5	--	1,083	180,4	5,1	--
7	34,5	0,5	--	1,092	131,5	4,3	--
SOLUÇÃO 2 – Filtro harmônico amortecido							
Ordem harm.	Tensão [kV]	Potência [MVar]	FA	C [µF]	L [mH]	R _L [Ω]	R _A [Ω]
3	34,5	3,0	1,34	5,943	131,5	1,86	200

As Fig. 10 e 11 apresentam as distorções harmônicas de tensão resultantes do estudo de impacto harmônico considerando, respectivamente, a Solução de filtragem 1 e 2.

Uma vez definidas e demonstradas a efetividade de ambas as soluções mitigadoras, a próxima etapa consiste na avaliação da dessintonia na efetividade destas soluções. Para tanto, foram aplicados nos filtros três valores de dessintonia (1%, 2% e 3%), os quais foram abordados no Capítulo III. As Fig. 12 e 13 apresentam um comparativo do impacto das dessintonias nas Soluções 1 e 2, respectivamente.

Os resultados apresentados corroboram com a avaliação previamente realizada com as impedâncias dos filtros passivos no Capítulo III. O impacto das dessintonias foi mais relevante nos filtros sintonizados de baixa potência do que no filtro amortecido. A Solução de filtragem 1 faz uso justamente de filtros sintonizados de baixa potência, de forma que o impacto da dessintonia nas distorções harmônicas de tensão foram consideravelmente relevantes. A maior variação verificada para este caso foi de 810% na 5ª ordem harmônica. Já a Solução de filtragem 2 é composta por um filtro amortecido com FA em torno de 1,5. Esta configuração, segundo a Fig. 6, não deve sofrer influências consideráveis da dessintonia. Assim, os resultados apresentados na Figura 12 apresentam exatamente o comportamento esperado, onde é imperceptível as diferenças advindas das dessintonias.

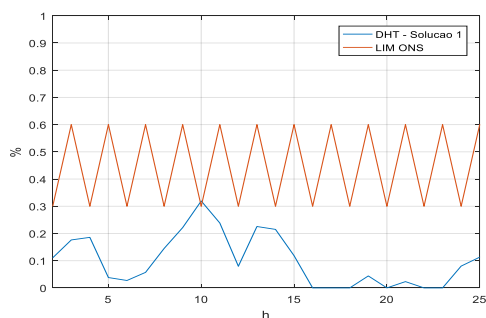


Fig. 10. Distorções harmônicas simuladas no PAC do complexo eólico avaliado – filtros da Solução 1.

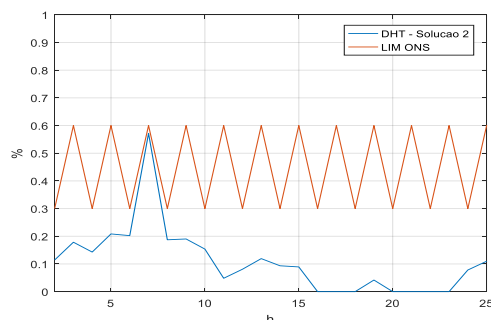


Fig. 11. Distorções harmônicas simuladas no PAC do complexo eólico avaliado – filtros da Solução 2.

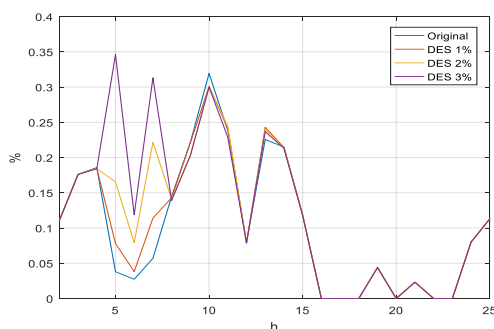


Fig. 12. Impacto da dessintonia na efetividade da Solução 1.

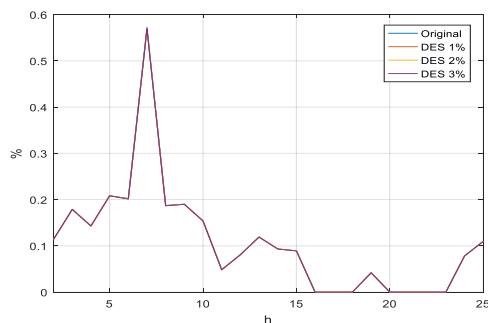


Fig. 13. Impacto da dessintonia na efetividade da Solução 2.

V. CONCLUSÕES

Filtros de harmônicos passivos são comumente utilizados no sistema elétrico, principalmente com o aumento do montante de geração das fontes renováveis (eólica e solar fotovoltaica). O desempenho esperado destes depende de um projeto factível, que considere os impactos de diferentes parâmetros na efetividade da filtragem. No presente trabalho foram verificados os impactos da dessintonia, considerando diferentes tipos de filtros harmônicos.

Os filtros sintonizados apresentaram uma grande sensibilidade à dessintonia, quando se refere ao desvio de

impedância. Principalmente para baixa frequência de sintonia e baixa potência reativa. A dessintonia acarretou desvios de até 9000% na impedância da ordem harmônica de sintonia do filtro.

No caso dos filtros amortecidos, para baixos fatores de amortecimento, na ordem de 0,5 a 3, a variação de impedância observada não é significativa. Diferentemente, para o caso com fator de amortecimento de 10, quando a variação de impedância chegou a 16%.

Foi também apresentado um estudo de caso considerando dados reais de um complexo eólico. Neste estudo de caso dimensionaram-se duas soluções para mitigação das distorções harmônicas, sendo a primeira composta por filtros sintonizados de baixa potência e a segunda por um filtro amortecido com baixo FA. O impacto das dessintonias foi mais relevante nos filtros sintonizados de baixa potência do que no filtro amortecido. Na Solução 1, houve variação de até 810% na distorção harmônica de tensão. Por sua vez, na Solução 2 foram imperceptíveis as diferenças advindas das dessintonias.

Com base nos resultados obtidos, destaca-se a significativa importância da correta avaliação dos parâmetros dos filtros na etapa de projetos, visto que estes podem impactar no real funcionamento destes equipamentos. Portanto, como foi demonstrado, a dessintonia causa grande impacto no desempenho de filtros harmônicos sintonizados de baixa potência e baixa frequência de sintonia, de forma que a avaliação desta variável para estes casos se torna primordial.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam agradecimento à Neoenergia, Força Eólica do Brasil, e Universidade Federal de Uberlândia pelo suporte financeiro dado via Projeto de P&D ANEEL PD-7284-0001/2016 Método Modificado da Superposição para o Compartilhamento de Responsabilidades Harmônicas.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] Associação Brasileira de Energia Eólica. Dados Mensais: Março de 2017. Disponível em: <<http://www.abeeolica.org.br/dados-abeeolica/>>. Acesso em: 20 mar. 2017.
- [2] Operador Nacional do Sistema Elétrico – Norma Técnica 009/2016 – REV.01 – “Instruções para Realização de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Novos Acessos à Rede Básica para Parques Eólicos, Solares e Consumidores Livres”.
- [3] 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”.
- [4] Alves, Antônio César Baleeiro. Mestre. 1997. 393 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1991.
- [5] J. Arrilaga and N. R. Watson, “Power System Harmonics”, Second Edition, University of Canterbury Christchurch, New Zealand, John Wiley & Sons, pp. 228-237, 2003
- [6] B. Badrzadeh, K. S. Smith and R. C. Wilson, “Designing Passive Harmonic Filters for an Aluminum Smelting Plant,” in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, no. 2, pp. 973-983, March-April 2011.
- [7] G. J. Wakileh, Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design. New York: Springer-Verlag, 2001
- [8] J. Arrilaga, D. A. Bradley, and P. S. Bodge, Power System Harmonics. New York: Wiley, 1985
- [9] Uhlmann, Erich. Elements of Alternating Current Network. Power Transmission by Direct Current. Translated by Robert Clark. Ludvika: Springer-Verlag, 1975, 389 pp. 354-380.