

Avaliação de desempenho e análise econômica da utilização de filtros sintonizados e amortecidos para mitigação de supra-harmônicos em um complexo fotovoltaico

Lana Paula Pereira Gomes
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia – MG, Brasil
lanapaula@ufu.br

Paula Angélica de Araújo
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia – MG, Brasil
paula.araujo@ufu.br

Jéssica Amaral de Araújo
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia – MG, Brasil
jessica.araujo1@ufu.br

Ivan Nunes Santos
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia – MG, Brasil
ivan.ufu@gmail.com

Resumo — Uma vez que o uso de fontes renováveis está crescendo, surge também a preocupação dos seus efeitos no sistema elétrico relacionados à qualidade da energia elétrica (QEE). A geração fotovoltaica, por sua vez, pode contribuir com distorções harmônicas devido sua característica não linear de conversão de energia, bem como para harmônicos de alta frequência, chamados de supra-harmônicos. No Brasil, o Operador Nacional do Sistema Elétrico estabelece os indicadores e limites de QEE através do submódulo 2.9 dos Procedimentos de Rede. Nesse contexto, este artigo aborda um estudo realizado em um complexo fotovoltaico com potência de aproximadamente 100 MWp, com o objetivo de analisar, por meio de simulações computacionais, o impacto dos harmônicos gerados pelos inversores dessa instalação no barramento de 34,5 kV, além de propor, analisar e comparar o desempenho e aspectos econômicos de distintas estratégias de mitigação harmônica.

Palavras-chave— Complexo fotovoltaico, Filtros harmônicos, Qualidade da energia, Supra-harmônicos, Matlab.

I. INTRODUÇÃO

A participação das fontes renováveis de energia junto à matriz energética é fundamental para assegurar a diversificação e o fornecimento de energia de um país, de maneira sustentável e limpa [1]. No Brasil, a energia solar encontra-se entre as principais fontes de energia renovável, sendo que no ano de 2022 representou 3,9 % da capacidade instalada no país [2], em termos de geração centralizada.

No entanto, aliado à crescente geração de energia elétrica de forma renovável, têm-se a preocupação quanto aos aspectos relacionados à qualidade da energia elétrica devido à inserção dessas fontes no sistema elétrico, em destaque as fontes eólicas e fotovoltaicas. Particularmente, no que tange à energia fotovoltaica, dentre os principais pontos de preocupação em termo de QEE, podemos destacar os distúrbios de deformidades nas ondas de tensão e corrente, conhecidas como distorções harmônicas [3]. Este distúrbio pode causar diversos tipos de danos aos equipamentos conectados ao sistema, como por exemplo: aquecimento de condutores, perdas elétricas e queima de equipamentos [4].

Sabe-se que no sistema elétrico, em geral, é mais comum a presença de harmônicas de ordens mais baixas, no entanto, tem sido também crescente a preocupação com harmônicas de ordens altas, as denominadas supra-harmônicas. Estas referem-se a distorções harmônicas com frequências entre 2 kHz e 150 kHz, intensificando as preocupações [5].

No Brasil, cabem à ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e ao ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) estabelecerem, em comum acordo, os limites aceitáveis no que se refere à qualidade da energia elétrica na rede básica nacional, conforme descrito em [6]. Neste âmbito, os Procedimentos de Rede preconizam os limites aceitáveis de distorções harmônicas na rede básica [7].

Para a mitigação desses distúrbios para que estejam em níveis adequados, são utilizados de forma usual filtros passivos em derivação, sendo estes sintonizados ou amortecidos. Para um dimensionamento eficiente desses filtros, é necessário levar em consideração uma grande gama de parâmetros elétricos [8], além de fatores tais como o custo de instalação e operação.

A partir do contexto apresentado, o objetivo deste trabalho é analisar, por meio de simulações computacionais, o impacto dos harmônicos gerados pelos inversores de um complexo fotovoltaico no barramento de 34,5 kV (ponto de estudo) com a rede externa. Além de avaliar os efeitos negativos desses harmônicos na qualidade da energia elétrica, o estudo visa propor e analisar o desempenho e avaliar aspectos econômicos de distintas soluções para mitigação, sendo selecionados filtros harmônicos sintonizados e filtros harmônicos amortecidos. A análise incluirá a comparação de desempenho e custo-benefício das soluções propostas, buscando identificar a alternativa mais eficaz e economicamente viável para minimizar os impactos harmônicos e garantir a estabilidade e eficiência do sistema.

Ao escolher filtros harmônicos para sistemas fotovoltaicos, é fundamental realizar uma análise de custos,

dado que o preço dos filtros, sejam eles sintonizados ou amortecidos, pode variar significativamente. Embora os filtros sintonizados também apresentem perdas, principalmente devido à resistência interna dos componentes, essas são geralmente menores se comparadas às dos filtros amortecidos. Em particular, nos filtros harmônicos amortecidos, é crucial considerar os custos adicionais associados às perdas de energia causadas pela dissipação em componentes resistivos. Essas perdas podem elevar significativamente os gastos mensais com energia, tornando o amortecido uma escolha que demanda uma avaliação cuidadosa do seu impacto econômico a longo prazo.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO ESTUDO

A. Diretrizes propostas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico

Submódulo 2.9 – Procedimentos de Rede

Na esfera da rede básica, o submódulo 2.9 dos procedimentos de rede, dispõe sobre os requisitos a serem atendidos por acessantes, cujas características não lineares tenham o potencial de ocasionar problemas no âmbito da qualidade da energia elétrica. Neste contexto, o subitem 3.4.4 traz os limites a serem atendidos referentes ao fenômeno de distorção harmônica de tensão, sendo que o desempenho neste quesito é avaliado através de dois indicadores: Distorção de Tensão Harmônica Individual (DTHI) e Distorção de Tensão Harmônica Total (DTHT95%) [7].

Os limites estabelecidos aplicam-se ao PAC, sendo que os limites globais são referentes à valores obtidos em campanhas de medição. Os limites globais para tensão de conexão menor que 69 kV são apresentados na Tabela 1.

TABELA I. LIMITES GLOBAIS INFERIORES

V < 69 kV			
DTHI, h ímpar		DTHI, h par	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3, 5, 7	5%	2, 4, 6	2%
9, 11, 13	3%	≥8	1%
15 a 25	2%		
≥27	1%		
DTHTS95% = 6%			

Já os limites individuais referem-se a valores obtidos por meio de estudos prévios relativos às instalações acessantes à rede básica. Os limites individuais para tensão de conexão acima de 69 kV são apresentados na Tabela 2.

TABELA II. LIMITES INDIVIDUAIS

13,8 kV ≤ V < 69 kV			
DTHI, h ímpar		DTHI, h par	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3 a 25	1,5%		
		todos	0,6%
≥27	0,7%		
DTHTS95% = 3%			

Dessa forma, neste trabalho serão utilizados os limites individuais, por serem valores obtidos através de estudo.

Diretrizes para Instalação de Filtros Harmônicos

Caso a instalação esteja extrapolando os limites acima apresentados, alguns aspectos devem ser observados, para verificar a necessidade da instalação de filtros harmônicos, para a mitigação do problema. Neste âmbito, [6] traz as instruções para a realização de estudos relacionados à qualidade da energia elétrica, para o acesso de instalações fotovoltaicas e eólicas à rede básica.

Diante disso, o subitem 6.2 destaca que filtros para harmônicos de ordem par e ordens superiores à 13ª harmônica, dada a necessidade verificada nos estudos de desempenho harmônico, a priori, não devem ser instalados. Os filtros para essas ordens só deverão ser instalados caso haja violação nos valores encontrados durante as campanhas de medição (pré-tensão) e/ou monitoramento contínuo.

Outra situação para a dispensa da instalação de filtros é apresentada no subitem 6.3, que discorre sobre filtros de baixa potência. É estabelecido a dispensa para a instalação de filtros com valores de potência abaixo de 400 kvar. No entanto, o agente acessante deverá redistribuir a potência negligenciada entre os demais filtros do estabelecimento. Esta metodologia possibilita que a potência dispensada possa continuar suprindo o sistema elétrico através de outros filtros instalados pelo agente.

Filtros Harmônicos Amortecidos e Sintonizados

Os filtros harmônicos são utilizados para mitigar as distorções harmônicas de um sistema, e são classificados em ativos, passivos ou híbridos, de acordo com seus aspectos construtivos. Os filtros ativos possuem elementos eletrônicos em sua construção, enquanto os filtros passivos utilizam apenas elementos básicos como resistores, indutores e capacitores. Os filtros híbridos são caracterizados pela junção dos dois filtros citados anteriormente [9].

O presente estudo se concentrará nos filtros passivos. Estes são equipamentos robustos e de acordo com sua finalidade podem rejeitar ou deixar passar sinais de determinada frequência ou de uma faixa de frequências. Dentre os filtros passivos, a utilização de filtros em derivação é a mais difundida, sendo que estes podem ser agrupados em filtros sintonizados ou amortecidos. [8]

Os filtros sintonizados são circuitos ressonantes série compostos por uma combinação de elementos R, L e C e podem apresentar uma, duas ou três frequências de ressonância. A Fig. 1 apresenta um diagrama de um circuito RLC série:

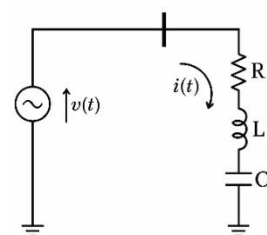


Fig. 1. Diagrama Equivalente do Sistema Modelado

A impedância complexa do circuito pode ser dada por [8]:

$$Z(\omega) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (1)$$

O módulo e o ângulo da impedância podem ser dados por:

$$Z(\omega) = \sqrt{R^2 + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (2)$$

$$\varphi(\omega) = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right) \quad (3)$$

A frequência angular de ressonância série do circuito pode ser dada por:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2\pi f_0 \quad (4)$$

Os filtros amortecidos diferenciam-se dos filtros sintonizados por oferecer uma baixa impedância em uma larga faixa de frequência. Os modelos de filtros amortecidos são basicamente de quatro tipos, conforme Fig. 2.

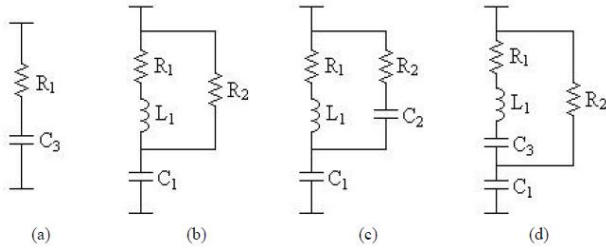


Fig. 2. Filtros amortecidos: (a) 1º ordem; (b) 2º ordem; (c) 3º ordem; (d) Tipo "C"

Este estudo se concentra no filtro amortecido de 2º ordem, sendo que a impedância complexa pode ser dada por [8]:

$$Z_f(\omega) = \frac{1}{j\omega C_1} + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{(R_1 + j\omega L_1)}\right)^{-1} \quad (5)$$

Frequência Característica:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (6)$$

Impedância natural:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = \omega_0 \times L_1 = \frac{1}{\omega_0 \times C_1} \quad (7)$$

O fator de qualidade é um parâmetro que deve ser analisado no dimensionamento de um filtro passivo, e consiste na relação entre a máxima energia armazenada e a máxima energia dissipada, conforme a equação abaixo [8]:

$$Q = \frac{Z_0}{R} = \frac{\sqrt{L}}{C} \times \frac{1}{R} \quad (8)$$

Considera-se o fator de qualidade como um parâmetro de seletividade dos filtros harmônicos, sendo que, quanto maior Q mais seletivo será o filtro harmônico, ou seja, impedirá a absorção de frequências diferentes daquela de sintonia.

III. SISTEMA SELECIONADO PARA O ESTUDO DE MITIGAÇÃO E AVALIAÇÃO ECONÔMICA

A. Dados do Sistema Elétrico

O sistema analisado, neste trabalho, consiste em um complexo fotovoltaico com potência, a ser instalada, de aproximadamente 100 MWp. O sistema foi computacionalmente representado, para fins deste trabalho, através da ferramenta de simulação Simulink, integrada ao software Matlab, com a finalidade de se realizar a análise harmônica. Foram utilizados 11340 módulos fotovoltaicos, sob condições de irradiância de $1000 (W/m^2)$ e temperatura de $45^\circ C$. Foi modelada a parte de controle do sistema fotovoltaico, o que inclui o conversor boost, o inversor de frequência, modulação PWM, o filtro LC e o transformador elevador de tensão de 100 MVA, que possui relação de transformação de 690 V para 34,5 kV.

Além disso, o sistema possui um transformador elevador de 34,5 kV/138 kV com potência nominal de 100 MVA, que se conecta, por sua vez, à uma curta linha de transmissão de 8 km. Já a rede externa, para fins de simulação, é representada através de uma fonte trifásica de 230 kV, com potência de curto-circuito trifásica de 2500 MVA, e um transformador 230 kV/138 kV, cuja potência nominal é de 200 MVA.

A Fig. 3 mostra o equivalente do sistema implementado no Simulink. O ponto de observação, para efeitos deste estudo de análise de desempenho e econômica, é o barramento de 34,5 kV que está sinalizado nesta figura.

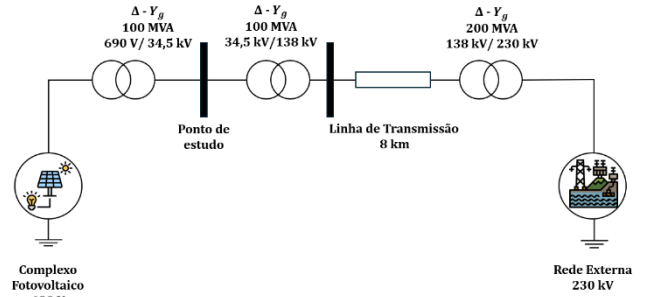


Fig. 3. Diagrama Equivalente do Sistema Modelado

A Fig. 4 apresenta a parte do complexo fotovoltaico desenvolvido no Simulink e utilizado para os estudos de análise das distorções harmônicas e checagem de análise econômica.

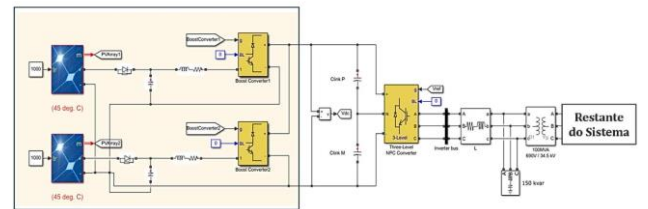


Fig. 4. Sistema Utilizado para Simulação

B. Análise das Distorções Harmônicas Prévias

Considerando o ponto de estudo de distorções harmônicas sendo o barramento de 34,5 kV, as Fig.5 e Fig. 6 mostram, respectivamente, o espectro harmônico a partir da ordem 2 e a comparação entre as distorções harmônicas simuladas e os limites definidos pelo Operador Nacional do

Sistema Elétrico (ONS) antes da inserção de quaisquer filtros.

O submódulo 2.9 disponibilizado pelo ONS [6] estabelece que, para pontos de estudo entre 13,8 kV e 69 kV, os limites individuais de distorção harmônica para todas as ordens pares são de 0,6%, para as ordens ímpares até a ordem 25 são de 1,5% e, a partir da 27ª ordem, são de 0,7%. Assim, é nítido que os limites foram violados para as ordens harmônicas 35, 37, 41, 43 e 47, ou seja, para as denominadas supra-harmônicas.

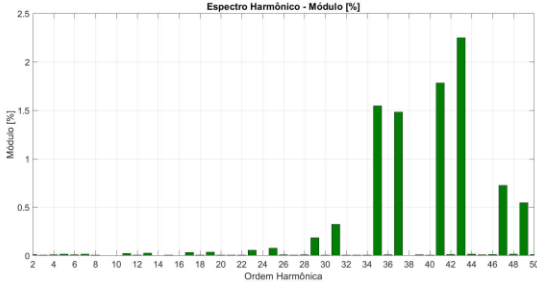


Fig. 5. Espectro Harmônico sem Filtragem

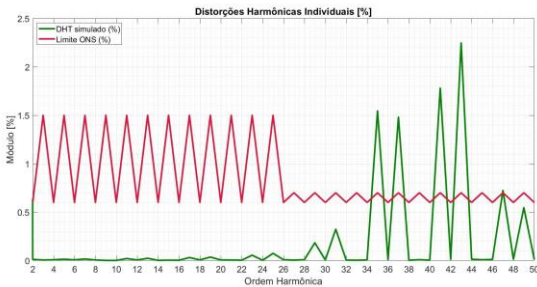


Fig. 6. Distorções Harmônicas Individuais e Limites Definidos pelo ONS

Dessa forma, surge a necessidade de filtros para diminuir tais componentes a fim de adequar o sistema aos limites estabelecidos e evitar problemas causados pela presença de supra-harmônicos na rede elétrica. A seção IV aborda quatro soluções utilizando filtros harmônicos sintonizados e amortecidos.

IV. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO SISTEMA DE FILTRAGEM HARMÔNICA

Foram realizadas, via Simulink, cinco soluções a fim de amenizar as distorções harmônicas mostradas nas Fig. 5 e Fig. 6. As Soluções 1 e 2 apresentam a utilização de filtros sintonizados nas ordens de interesse e as Soluções 3, 4 e 5 mostram o emprego de filtros amortecidos de segunda ordem, em que o valor de resistência é variado.

A. Soluções 1 e 2

A primeira solução consiste em filtros sintonizados em todas as ordens em que foram ultrapassados os limites de distorção individual, ou seja, 35ª, 37ª, 41ª, 43ª e 47ª ordens harmônicas, tal como mostrado na Fig. 7. A Tabela 3 mostra os dados elétricos dos filtros sintonizados.

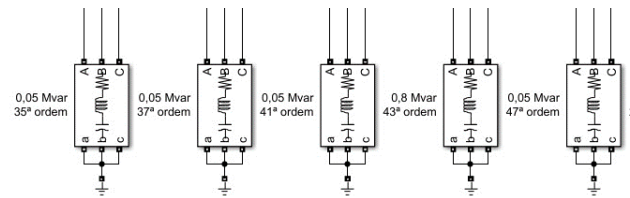


Fig. 7. Solução 1 – Filtros Sintonizados em Todas as Ordens Violadas

TABELA III. SOLUÇÃO 1: DADOS DE PROJETO DOS FILTROS SINTONIZADOS

Ordem Harmônica	Potência do Filtro (Mvar)	Capacitância (µF)	Indutância (mH)	Resistência própria do indutor (Ω)
35	0,05	0,111	51,589	8,509
37	0,05	0,111	46,158	8,048
41	0,05	0,111	37,586	7,262
43	0,8	1,782	2,136	0,433
47	0,05	0,223	14,299	3,167

A Fig. 8 mostra os resultados da simulação com todos os cinco filtros sintonizados nas ordens harmônicas violadas em comparação aos limites estabelecidos pelo ONS.

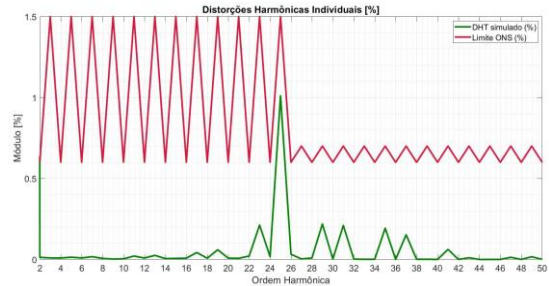


Fig. 8. Solução 1 - Filtros Sintonizados em Todas as Ordens Violadas

É perceptível que os filtros sintonizados possibilitaram o enquadramento das distorções harmônicas dentro dos limites para todas as ordens. No entanto, assim como recomendado em [6], os filtros com potência inferior a 0,4 Mvar podem ser dispensados desde que a totalidade da potência dispensada seja redistribuída entre os outros filtros da instalação. Além disso, todas as outras ordens harmônicas que não sejam as daqueles filtros dispensados, não devem ultrapassar os limites determinados em [7].

Dessa forma, foi realizada uma nova simulação – Solução 2 – em que apenas um filtro foi sintonizado na 43ª ordem, com a potência totalizando 1 Mvar, assim como mostrado na Fig. 9. A Tabela 4 apresenta os dados elétricos do projeto do filtro sintonizado e os resultados da simulação são vistos na Fig. 10.

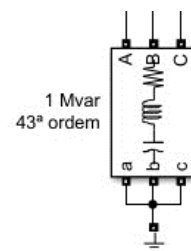


Fig. 9. Solução 2 – Filtro Sintonizado na 43ª Ordem

TABELA IV. SOLUÇÃO 2: DADOS DE PROJETO DO FILTRO SINTONIZADO EM 43ª ORDEM

Ordem Harmônica	Potência do Filtro (Mvar)	Capacitância (μF)	Indutância (mH)	Resistência própria do indutor (Ω)
43	1	2,227	1,708	0,346

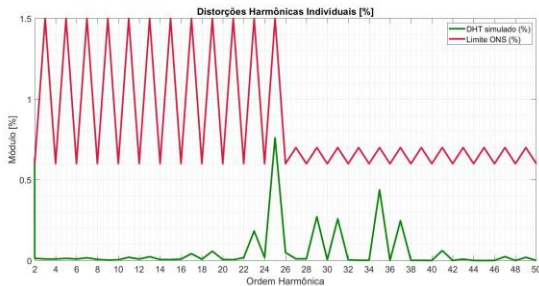


Fig. 10. Solução 2 – Filtro Sintonizado Apenas na 43ª Ordem

Fica claro, portanto, que apenas um filtro sintonizado na 43ª ordem é o suficiente para mitigar as distorções harmônicas e, além disso, percebe-se que a 25ª ordem harmônica não foi tão acentuada quanto na primeira simulação mostrada na Fig. 8.

B. Soluções 3, 4 e 5

As soluções 3, 4 e 5 correspondem ao uso de um filtro amortecido de segunda ordem, visando a filtragem da 35ª ordem harmônica, ou seja, a primeira que violou os limites. Os filtros possuem os mesmos parâmetros de potência [Mvar], capacitância (μF), indutância [mH] e resistência própria do indutor [Ω], alterando apenas os valores de resistência, assim como apresentado na Fig. 11 e na Tabela 5.

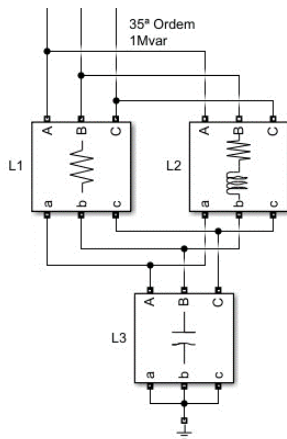


Fig. 11. Solução 3, 4 e 5 – Filtro Amortecido na 35ª Ordem

TABELA V. SOLUÇÕES 2, 3 E 4: DADOS DE PROJETO DOS FILTROS AMORTECIDOS DE 2ª ORDEM

Solução	Potência do Filtro (Mvar)	Capacitância (μF)	Indutância (mH)	Resistência própria do indutor (Ω)	Resistência (Ω)
3	1	2,227	2,579	0,425	270
4					150
5					100

A seguir, as Fig. 12, Fig. 13 e Fig. 14 mostram, respectivamente, os resultados das simulações das soluções 3, 4 e 5.

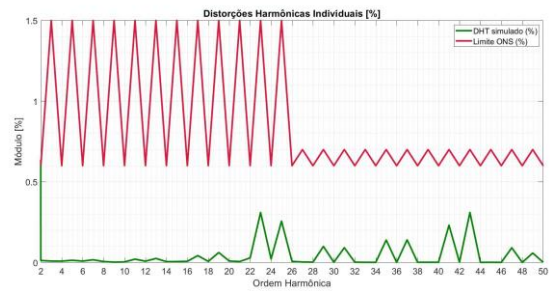


Fig. 12. Solução 3 – Filtro Amortecido com $R = 270 \Omega$

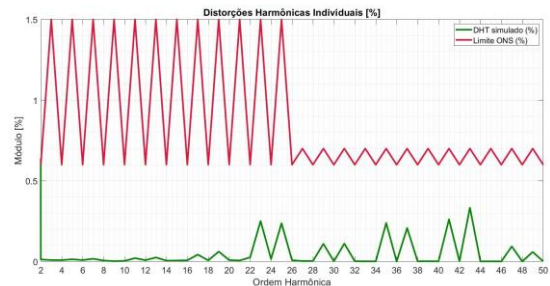


Fig. 13. Solução 4 – Filtro Amortecido com $R = 150 \Omega$

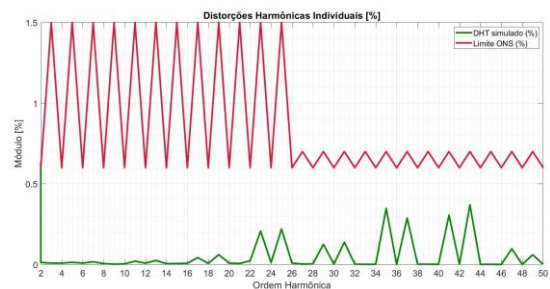


Fig. 14. Solução 5 – Filtro Amortecido com $R = 100 \Omega$

Nesse contexto, é nítido que quanto maior a resistência utilizada no filtro, melhor será o seu desempenho para atenuar a ordem harmônica para a qual ele foi projetado. Assim, a seção V deste trabalho busca trazer uma reflexão a respeito da melhor escolha de filtragem sob a perspectiva econômica.

V. ANÁLISE DOS RESULTADOS E AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Para avaliação econômica das diferentes soluções simuladas, foi realizada uma análise detalhada das perdas de potência para cada configuração. Esse estudo incluiu o cálculo das perdas mensais e o custo total dessas perdas ao longo de um período de 20 anos para os filtros amortecidos, conforme apresentado na Tabela 6.

Dado o nível de potência a ser instalada, o valor em reais do MW contratado está sob regime do mercado livre de energia. Assim, o cálculo do custo das perdas de potência foi realizado utilizando o PLD (Preço da Liquidação das Diferenças), disponibilizado diariamente pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) [10]. O valor do PLD foi consultado na data de 15 de julho de 2024 e foi considerada a projeção do mês de julho com o valor de R\$

94,00 por MW. Este valor pode ser ainda mais elevado, considerando-se as variações de preços no mercado energético brasileiro e a diversidade das fontes de energia.

Para calcular a perda de potência de um resistor, utiliza-se a seguinte equação:

$$P = R \cdot I^2 \tag{9}$$

Se a resistência do filtro diminuir, a corrente de 60 Hz que passa por ele aumentará. Como a corrente está ao quadrado na equação, a perda de potência também aumentará significativamente. Isso ocorre porque a relação entre a corrente e a potência dissipada é quadrática. Portanto, qualquer variação na corrente resulta em uma grande variação na potência dissipada.

TABELA VI. ESTIMATIVA DE PERDAS DE POTÊNCIA NOS FILTROS PARA AS 05 SOLUÇÕES ANALISADAS

Solução	Valor Mensal de Perdas (R\$)	Total de Perdas em 20 anos (R\$)
1	- ^a	- ^a
2	- ^a	- ^a
3	R\$ 236,42	R\$ 56.740,01
4	R\$ 424,47	R\$ 101.872,32
5	R\$ 634,87	R\$ 152.369,04

^a O Valor mensal das perdas não foi calculado, sendo desconsiderado.

Com base nos resultados apresentados, é necessário fornecer uma base sólida para a tomada de decisão sobre qual solução de filtro oferece o melhor equilíbrio entre eficiência e custo. A análise destacou a importância de projetar filtros amortecidos que não apenas atendam às necessidades técnicas, mas também sejam economicamente viáveis ao longo do tempo. Essa abordagem assegura que os custos relacionados às perdas de potência sejam minimizados, contribuindo significativamente para a sustentabilidade financeira dos projetos.

Após analisar o desempenho das cinco soluções propostas, foi possível observar que todas foram eficazes na mitigação das ordens harmônicas. No entanto, ao realizar a avaliação econômica entre as soluções de filtros harmônicos sintonizados em frequências específicas e soluções com filtros harmônicos amortecidos, a melhor escolha em termos de custo-benefício é a solução 2, que contém um filtro sintonizado na 43ª ordem harmônica. Isso ocorre porque não há necessidade de considerar os custos adicionais associados às perdas de energia causadas pela dissipação em componentes resistivos, e o valor da compra turnkey do filtro é inferior ao do filtro amortecido. Vale destacar que os filtros variam entre 3 e 10 milhões, dependendo dos parâmetros elétricos. Por outro lado, ao analisar os filtros amortecidos, a pior solução é a 5, que possui a menor resistência.

VI. CONCLUSÃO

Este estudo demonstra a importância da análise de impacto de harmônicos gerados por grandes usinas fotovoltaicas na qualidade da energia elétrica, conforme regulamentado pelo ONS. As simulações realizadas em um complexo de 100 MWp revelaram a eficácia de diferentes soluções de filtros harmônicos na mitigação de distorções, especialmente as de alta frequência (supra-harmônicos).

Embora todas as cinco soluções propostas tenham demonstrado eficácia na redução das distorções harmônicas, a análise custo-benefício apontou a solução 2 – filtro sintonizado na 43ª ordem harmônica – como a mais viável economicamente. Essa solução se destaca por apresentar um custo de aquisição significativamente menor que os filtros amortecidos, sem os custos adicionais associados às perdas por dissipação. A escolha da solução 2, portanto, representa um ótimo compromisso entre a mitigação eficaz de harmônicos e a avaliação econômica do projeto, contribuindo para a sustentabilidade financeira de empreendimentos de geração fotovoltaica em larga escala e assegurando o cumprimento das normas de qualidade da energia elétrica. Os resultados reforçam a necessidade de uma avaliação criteriosa, considerando tanto os aspectos técnicos quanto econômicos, na escolha de estratégias de mitigação de harmônicos em sistemas de geração renovável.

Por fim ressalta-se que esta análise econômica das soluções de filtragem deve ser complementada com estudos adicionais considerando os custos de cada arranjo de filtragem, o que pode possibilitar uma avaliação mais completa das soluções mitigatórias.

REFERÊNCIAS

[1] J.R.S. Júnior, “Potencialidade da Energia Solar Fotovoltaica na Paraíba e a Relação com o Desenvolvimento Sustentável.”, Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento Regional, PPGDR/UEP, Paraíba, 2022.

[2] Empresa de Pesquisa Energética – EPE, , “Balanço Energético Nacional – BEN 2022”, EPE, 2023.

[3] G.S.Troncha, I.N.Santos e AF.Bornelli. Interações Harmônicas em Sistemas com Elevada Penetração de Conversores Modernos: Estado da Arte e Novos Desafios. 2021.

[4] L.F.Souares, P.R. de Almeida e F.R.Garcia. Estudo de Caso: Análise Técnica e Aplicação de Filtro Ativo em um Sistema Industrial Brasileiro. 2023.

[5] G. M de Carvalho, A. R. Ribeiro, I. N. Santos. Análise crítica do emprego de filtros passivos para mitigação de supra-harmônicos na geração eólica de energia. 2023.

[6] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, “Instruções para realização de estudos e medições de QEE relacionados aos acessos à Rede Básica ou nos barramentos de fronteira com a rede básica para parques eólicos, solares, consumidores livres e distribuidoras”, NT 009/2016 Rev. 3, ONS, 2019.

[7] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, “Submódulo 2.9 Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica”, Revisão 2022.10, ONS, 2022.

[8] R.P. do Nascimento., J.R.S. Júnior, “Potencialidade da Energia Solar Fotovoltaica na Paraíba e a Relação com o Desenvolvimento Sustentável.”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica UFU, Uberlândia, 2007.

[9] E. V. O. Cunha, “Projeto e Análise de Filtro Harmônicos em Subestações da UFRN.”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFRN, Natal, 2019.

[10] InformaCCEE, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), 2024. <https://www.ccee.org.br/acervo-ccee?especie=39005&assunto=39789&keyword=infopld&periodo=365>. Acesso em: 15 de julho de 2024.