

Estudo da Conexão de um Filtro Híbrido Série em uma Microrrede Ilhada com Filtro Ativo em Série com a Rede

Hélio M. A. Antunes* Ramon R. D. Pierro** Sidelmo M. Silva***

* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, (e-mail: helio.antunes@ufes.br).

** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, (e-mail: ramon.pierro@edu.ufes.br).

*** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, MG (e-mail: sidelmo@ufmg.br)

Abstract:

The electric power sector due to the great expansion of distributed generation has been undergoing many transformations. Within this context a new concept is being widely discussed: the microgrid. A microgrid is formed by a set of electrical loads, generation sources and energy storage elements, and can operate in grid-connected and islanded mode. However, in islanded mode a microgrid has a low short-circuit power, due to the presence of distributed generators formed by electronic converters, which can make the network susceptible to Power Quality (PQ) problems. In this paper is evaluated by means of simulations the operation of a series hybrid filter in AC microgrid that operate in islanded mode. The main results show that the proposed filter is effective for improving the PQ, with an active filter nominal power equal to 6.64% of the microgrid load.

Resumo: O setor de energia elétrica, devido à grande expansão da geração distribuída, vem sofrendo muitas transformações. Dentro desse contexto um novo conceito está sendo amplamente abordado: a microrrede. Uma microrrede de energia elétrica é formada por um conjunto de cargas elétricas, fontes de geração e elementos armazenadores de energia, podendo operar conectada à rede de distribuição ou no modo ilhado. Porém, no modo ilhado uma microrrede possui uma baixa potência de curto-circuito, devido à presença de geradores distribuídos formados por conversores eletrônicos, o que pode tornar a rede susceptível a problemas de Qualidade de Energia Elétrica (QEE). Neste trabalho será analisado, por meio de simulação, o funcionamento de um filtro híbrido série em uma microrrede CA que opera no modo ilhado. Os resultados obtidos comprovam que o filtro proposto é eficaz para a melhoria da QEE, com um filtro ativo de potência nominal igual a 6,64% de potência da carga da microrrede.

Keywords: Microgrids, passive filter, active filter, series hybrid filter, harmonic compensation.

Palavras-chaves: Microrredes, filtro passivo, filtro ativo, filtro híbrido série, compensação harmônica.

1. INTRODUÇÃO

A demanda energética mundial, em conjunto com as preocupações ambientais, vem aumentando com o passar dos anos. Tendo em vista que a matriz elétrica mundial é baseada em combustíveis fósseis, que são limitados e poluem o meio ambiente, o sistema elétrico tem se direcionado à geração distribuída. Isso também se deve ao alto custo e a baixa eficiência das grandes plantas centralizadas de geração, sendo que apenas 35%, em média, da energia primária utilizada nas centrais geradoras chega aos consumidores na forma de energia elétrica e a extensa estrutura radial de transmissão torna as áreas consumidoras vulneráveis (Tahim, 2015; Gambarotta et al., 2017).

Com o crescimento da geração distribuída no sistema de Baixa Tensão (BT), o conceito de microrrede tem ganhado

força, sendo uma abordagem que permite controle local da geração distribuída, eliminando a necessidade de uma central de distribuição. Durante a ocorrência de distúrbios, a geração e cargas locais podem se separar do sistema de distribuição, ilhando a microrrede sem prejudicar a integridade da rede de distribuição, tornando possível alimentar a rede elétrica com geradores internos (Patrao et al., 2015; Zubieta, 2016).

As correntes harmônicas das cargas não-lineares podem ser eliminadas por meio de filtros harmônicos visando uma melhoria na QEE, e eles também podem ser utilizados para regular o fator de potência da instalação. Existem três tipos de filtros que podem reduzir a distorção harmônica, sendo eles os passivos, ativos e híbridos. Os passivos são compostos por elementos como resistores, indutores e capacitores. Já os ativos são compostos por componentes de

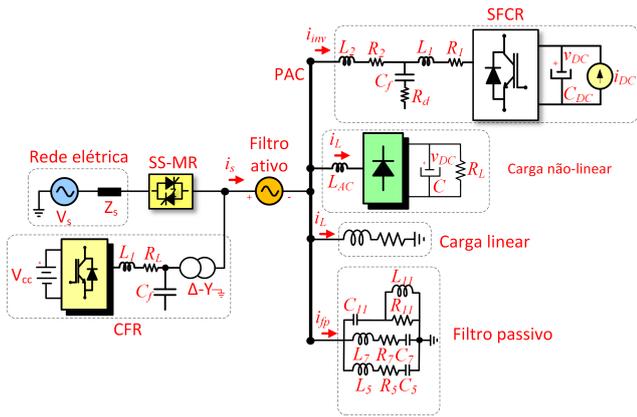


Figura 1. Configuração da microrrede em estudo.

eletrônica de potência, que eliminam diferentes frequências harmônicas (Alemam et al., 2018; Baliyan et al., 2022). E, por último, os híbridos, que são formados pela associação entre filtros ativos e passivos (Antunes, 2018; Khan et al., 2021).

Neste trabalho é apresentada uma microrrede CA no modo ilhado com controle centralizado, formada por um sistema de filtragem híbrida série, buscando reduzir os efeitos das correntes harmônicas provenientes da carga não-linear e do gerador distribuído no sistema da rede de distribuição, de modo a obter uma melhoria na QEE da microrrede. São realizadas simulações computacionais no *software* Matlab/Simulink por meio da modelagem desenvolvida para o sistema em estudo.

2. MICRORREDE ILHADA COM FILTRO HÍBRIDO SÉRIE

Na Figura 1 é apresentado um diagrama esquemático da microrrede de energia elétrica na qual será aplicado o sistema de filtragem híbrida série. Os dados base das grandezas utilizadas nesse projeto são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros da microrrede em estudo.

Sistema	Parâmetros
Rede elétrica	220V, 60 Hz, $S_{cc}=750$ kVA, $X/R=0,5$ Transformador $\Delta-Y_g$: 220/220V, 75kVA $Z_t=6,3\%$, $R_L=10m\Omega$, $L_1=20\mu H$
CFR	$C_f=550\mu F$, $f_{sw}=15,36kHz$, $V_{cc}=500V$ 20kVA, 220V, $f_{sw}=7,68kHz$, $R_1=10m\Omega$
GFEC	$L_1=1,5mH$, $R_f=0,3\Omega$, $C_f=55\mu F$ $R_2=10m\Omega$, $L_2=35\mu H$, $C_{dc}=9,4mF$
Carga linear	220V, 35kVA, $fp=0,73$ atrasado
Carga não-linear	220V, 30kW, $L_{CA}=0,5mH$, $C=18,8mF$ $R_L=2,5\Omega$ 220V, 6 kvar
Filtro passivo	5h: $Q=42$, $L=2,7mH$, $C=105\mu F$ 7h: $Q=42$, $L=1,3mH$, $C=107\mu F$ 11h: $Q=2,2$, $L=0,5mH$, $C=109\mu F$

A microrrede ilustrada na Figura 1 é composta por uma rede elétrica trifásica, um conversor formador de rede (CFR), um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

(SFCR), uma carga linear e não-linear, um filtro passivo e um filtro ativo. A chave SS-MR permite fazer a transição do modo conectado para ilhado e vice-versa.

Quando microrrede opera conectada à rede, a tensão e a frequência são definidas pela rede principal. Já quando atua no modo ilhado, o CFR opera como fonte de tensão no modo V-f suprindo a carga, sendo formado por um *VSI* (*Voltage Source Inverter*) trifásico com um filtro LC e um transformador, com uma ligação delta-estrela (Lopes et al., 2006; Rocabert et al., 2012).

O SFCR é modelado por uma fonte de corrente em paralelo com o barramento CC do inversor, representando assim uma simplificação do sistema fotovoltaico. É utilizado um inversor trifásico do tipo *VSI* com modulação PWM senoidal (SPWM) e um filtro LCL.

A carga linear é caracterizada por uma impedância constante, do tipo RL. Já a carga não linear é formada por um retificador a diodos trifásico em ponte completa, com um filtro indutivo no lado CA e um capacitor e resistor do lado CC (Antunes et al., 2018).

3. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DO FILTRO HÍBRIDO SÉRIE

Para a microrrede em estudo é utilizado um filtro passivo, formado por três estágios de filtragem, sendo eles dois filtros passa-faixa e um passa-alta. Esta configuração é escolhida por ser comumente utilizada em sistemas elétricos industriais com carga formada por retificadores trifásicos.

O filtro ativo na topologia de filtragem híbrida série é formado por um inversor trifásico do tipo *VSI*, conectado em série com a rede elétrica por meio de um filtro LC. A tensão de saída do filtro ativo é calculada usando (1) (Akagi, 2005):

$$v_c(t) = -K_v i_{sh}(t) \quad (1)$$

Onde:

- $v_c(t)$: componente harmônica de corrente da fonte;
- K_v : ganho do filtro híbrido série;
- $i_{sh}(t)$: tensão de compensação do filtro ativo.

Para cada parcela de corrente harmônica o filtro ativo sintetiza uma tensão em fase simulando um resistor. Este resistor é equivalente ao ganho do filtro híbrido série e desempenha importante papel na isolação harmônica, reduzindo as distorções harmônicas de corrente.

Na Figura 2 é ilustrada a representação simplificada por fase da microrrede em estudo, podendo ser observada a rede elétrica, a chave estática, o CFR, a carga, o SFCR e o filtro híbrido série. Considerando a microrrede no modo ilhado, a chave estática SS-MR opera aberta e o CFR fornecendo tensão. Desta forma, é possível modelar dois sistemas representados pelas Figuras 3 e 4 onde será feita a análise do circuito considerando, respectivamente, a carga, e o SFCR como fonte poluidora de harmônicos.

Utilizando o Teorema da Superposição e a Lei de Kirchhoff das Correntes, é possível encontrar as relações (2) a (6) que relacionam as correntes do circuito e a corrente poluidora, e são esboçadas nas Figuras 5(a) a 5(e).

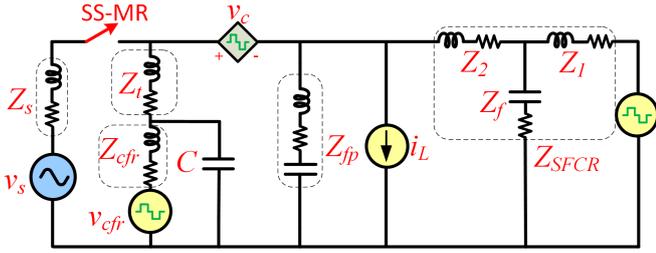


Figura 2. Modelo do circuito da microrrede.

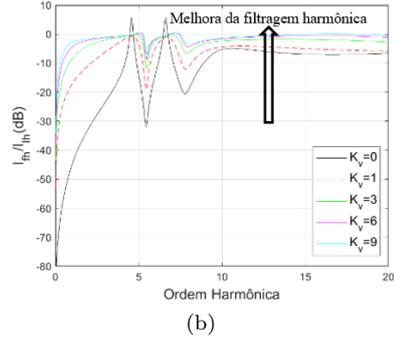
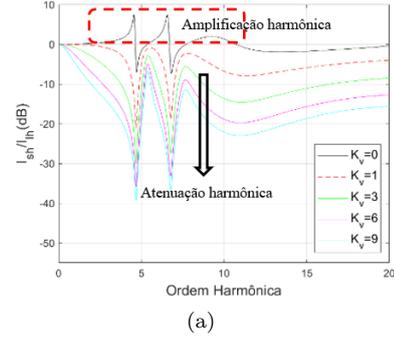


Figura 3. Modelo do circuito da microrrede em modo ilhado com a carga como fonte poluidora.

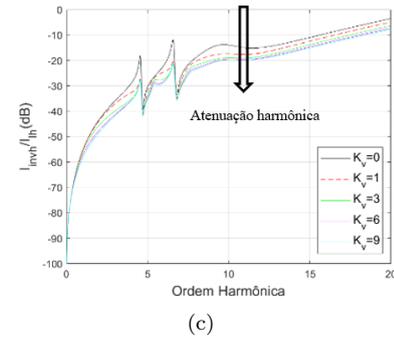
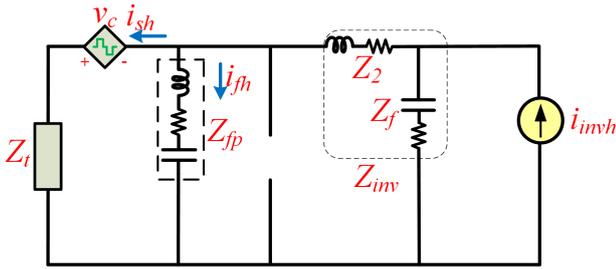


Figura 4. Modelo do circuito da microrrede em modo ilhado com o SFCR como fonte poluidora.

$$\frac{i_{sh}}{i_{lh}} = \frac{Z_{fp} Z_{inv}}{Z_{fp} Z_{inv} + (Z_t + K_V) Z_{inv} + (Z_t + K_V) Z_{fp}} \quad (2)$$

$$\frac{i_{fh}}{i_{lh}} = \frac{(Z_t + K_V) Z_{inv}}{Z_{fp} Z_{inv} + (Z_t + K_V) Z_{inv} + (Z_t + K_V) Z_{fp}} \quad (3)$$

$$\frac{i_{invh}}{i_{lh}} = \left(\frac{Z_{inv} Z_{fp}}{Z_{fp} Z_{inv} + Z_t Z_{inv} + Z_{fp} Z_t} \right) \times \left(1 + \frac{Z_{fp} Z_{inv}}{Z_{fp} Z_{inv} (Z_t + K_V) + Z_{fp} (Z_t + K_V)} \right) \quad (4)$$

$$\frac{i_{sh}}{i_{invh}} = \frac{Z_{fp} Z_f}{Z_{fp} (K_V + Z_t + Z_2 + Z_f) + Z_f (Z_t - K_V) + Z_2 (Z_t + K_V)} \quad (5)$$

$$\frac{i_{fh}}{i_{invh}} = \frac{Z_f (Z_t + K_V)}{Z_{fp} (K_V + Z_t + Z_2 + Z_f) + Z_f (Z_t - K_V) + Z_2 (Z_t + K_V)} \quad (6)$$

Onde:

- i_{sh} , i_{lh} , i_{fh} , i_{invh} : corrente harmônica da rede elétrica, da carga, do filtro híbrido e do inversor;
- Z_t , Z_{fp} : impedância do secundário do transformador do CFR e do filtro passivo;
- Z_2 , Z_f , Z_{inv} : impedância do filtro de saída do SFCR;
- Z_{inv} : impedância do inversor quando a carga é a fonte poluidora.

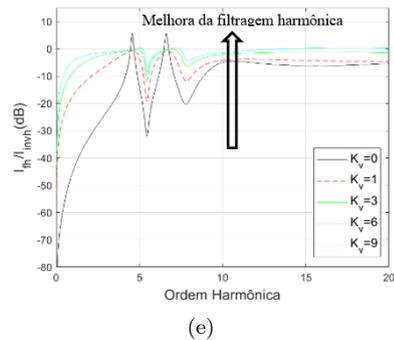
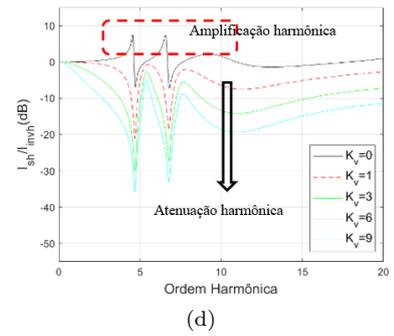


Figura 5. Características de filtragem com filtro híbrido série: (a) I_{sh}/I_{lh} ; (b) I_{fh}/I_{lh} ; (c) I_{inv}/I_{lh} ; (d) I_{sh}/I_{inv} ; (e) I_{fh}/I_{inv} .

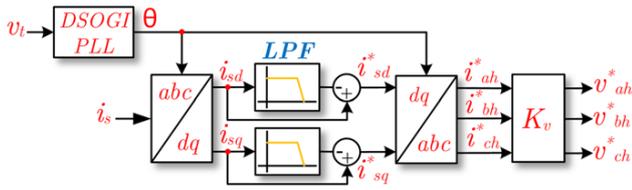


Figura 6. Topologia do SRF.

Analisando as Figuras 5(a) e 5(b) pode-se observar que a MR possui amplificação harmônica e baixo desempenho do sistema de filtragem passiva para $K_V=0$. A mesma condição pode ser observada por meio das Figuras 5(d) e 5(e) quando a fonte poluidora é o inversor do SFCR.

Nas Figuras 5(a) a 5(e) fica evidenciado que com o aumento do ganho K_V ocorre uma amortecimento da amplificação harmônica na rede e melhoria no desempenho do filtro passivo, pois o mesmo passa a absorver mais componentes harmônicas de corrente. O mesmo fato pode ser observado no filtro do SFCR.

Para a definição do ganho K_V utiliza-se o método apresentado por Antunes et al. (2019). O método consiste em aumentar o ganho até que a curva de I_{sh}/I_{lh} esteja abaixo de 0 dB. Desta forma, evita-se a circulação de corrente harmônica pela rede e cancela-se o efeito da amplificação harmônica. Observa-se que todos os valores de K_V escolhidos nas Figuras 5(a) a 5(e) atendem o método escolhido. Portanto será escolhido $K_V=1$, pois pode-se observar uma notável redução na amplificação harmônica no PAC, com a corrente da rede com ganho menor do que 0 dB. Este ganho também propicia uma menor influência na distorção harmônica de tensão no PAC, como será explicado posteriormente nos resultados de simulação.

4. MÉTODO DE DETECÇÃO HARMÔNICA

Para o funcionamento adequado do filtro híbrido série é necessário definir uma estratégia para detecção harmônica do filtro ativo. O método de detecção utilizado neste trabalho é o SRF (*Synchronous Reference Frame*) representado na Figura 6. Usando um filtro passa-baixas é retirada a componente CC, obtendo assim a corrente harmônica de referência. Essa corrente é transformada para coordena abc, utilizando a Transformada inversa de Park. A tensão de referência que deve sintetizada pelo filtro ativo e obtida multiplicando o resultado pelo ganho K_v (Antunes, 2018).

A frequência angular do CFR é determinada pelo DSOGI-PLL (*Dual Second Order Generalized Integrator Phase Locked Loop*) visto na Figura 7. O DSOGI-PLL possui a vantagem de ser imune a distorções de tensão na rede, permitindo assim gerar correntes de referência com maior fidelidade ao conteúdo que se deseja compensar (Asiminoael et al., 2007). A corrente do CFR é amostrada e transformada para coordenadas dq0, por meio da Transformada de Park.

5. MODELO E RESULTADOS DE SIMULAÇÃO COM FILTRO HÍBRIDO SÉRIE

Para se avaliar o desempenho do filtro híbrido série, este é implementado por meio de uma simulação digital

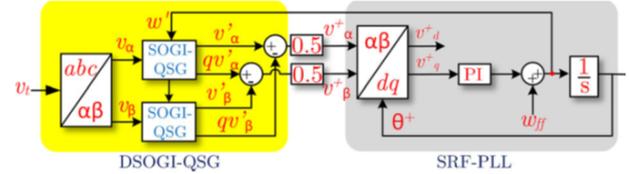


Figura 7. Diagrama de blocos do método de detecção harmônica.

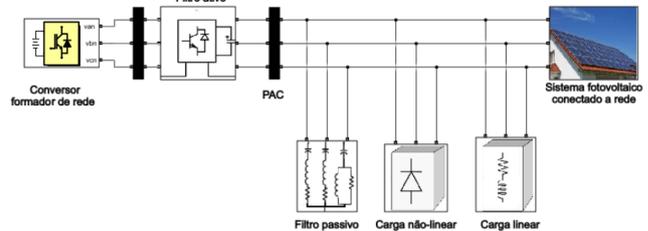


Figura 8. Modelo da MR no modo ilhado.

no *software* Simulink. A Figura 8 representa o modelo computacional da microrrede utilizada.

O filtro híbrido série aplicado a microrrede é formado por uma fonte de tensão ideal conectado em série com a microrrede. Para o estudo da microrrede e sua respectiva análise das distorções harmônicas no PAC, será adotado um período de simulação igual 1 s. A seguir é enumerada a sequência de conexão das cargas, fontes e demais elementos da microrrede que produziram o fluxo de potência ativa e reativa no PAC, apresentado na Figura 9.

- $t=0$ s – início da simulação com energização do PAC pelo CFR, conexão do SFCR e das cargas elétricas;
- $t=0,4$ s – conexão do filtro passivo a microrrede;
- $t=0,7$ s – conexão do filtro ativo em série com o filtro passivo.

Avaliando a operação da microrrede quanto à QEE, pode ser esboçada a relação da distorção harmônica de tensão (DHT_v) e distorção harmônica de corrente (DHT_i) no PAC e nos terminais do CFR conforme ilustrado, respectivamente, nas Figuras 10 e 11.

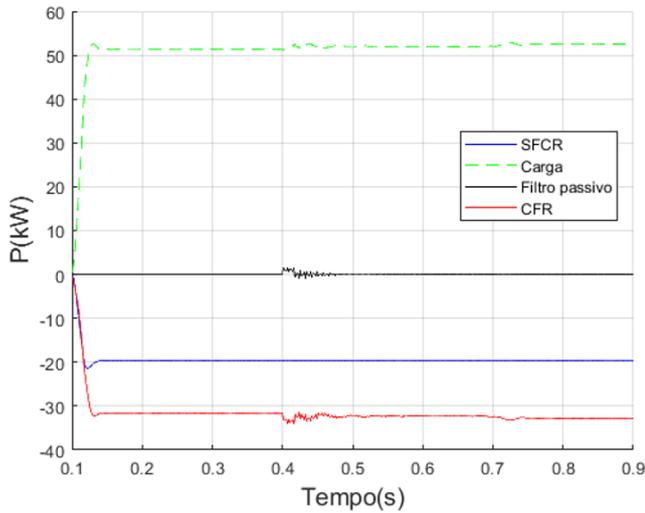
A Tabela 2 apresenta a taxa de distorção de tensão e corrente nas três condições de operação da microrrede, obtidas a partir das Figuras 10 e 11.

Tabela 2. Distorção harmônica na MR.

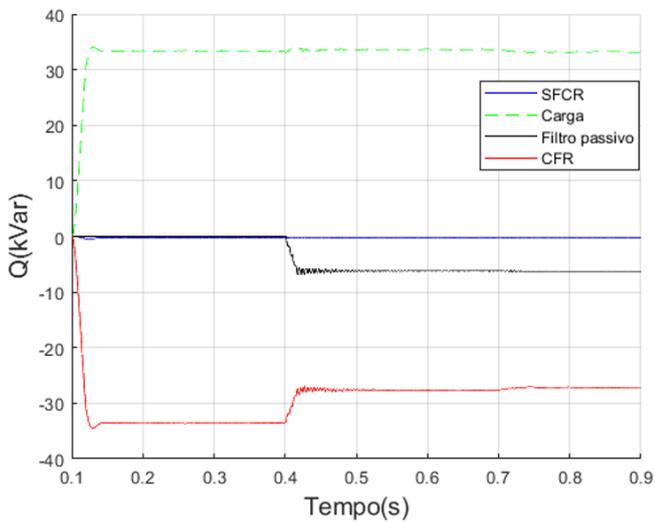
Grandezas	Sem filtro	F. Passivo	F. Híbrido Série
DHT_v (%) - PAC	4,51	3,23	4,73
DHT_i (%) - PAC	13,46	11,32	6,58
DHT_v (%) - CFR	4,51	3,24	2,21

Observa-se que com a utilização do filtro híbrido série houve um aumento na DHT_v no PAC de 0,23% e uma redução de 6,9% na DHT_i . Essa condição se deve ao fato que o filtro ativo sintetiza um tensão harmônica em série com rede, que propicia um isolamento harmônico das parcelas de corrente na rede, mas eleva a DHT_v no PAC. Já o DHT_v nos terminais do CFR, quando adicionado o filtro ativo, é reduzida em 2,3%, não sofrendo o efeito dos harmônicos injetados pelo filtro ativo.

Na Figura 12 é visualizado que não houve uma melhoria na forma de onda da tensão do PAC, já que isso ocorre pelo



(a)



(b)

Figura 9. Fluxo de potência na MR: (a) ativa; (b) reativa.

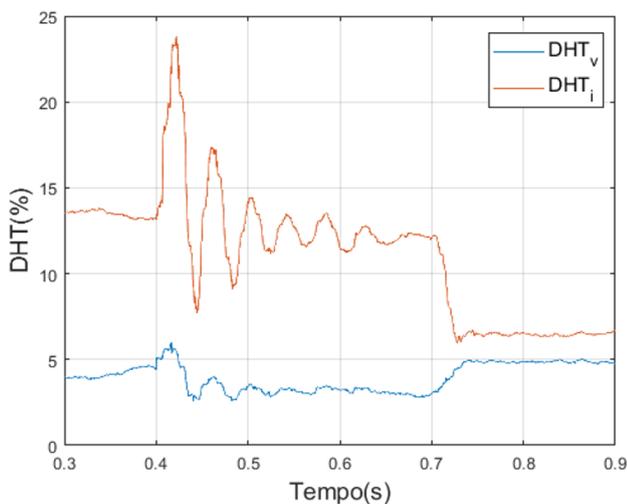


Figura 10. Distorsão harmônica de tensão e corrente no PAC.

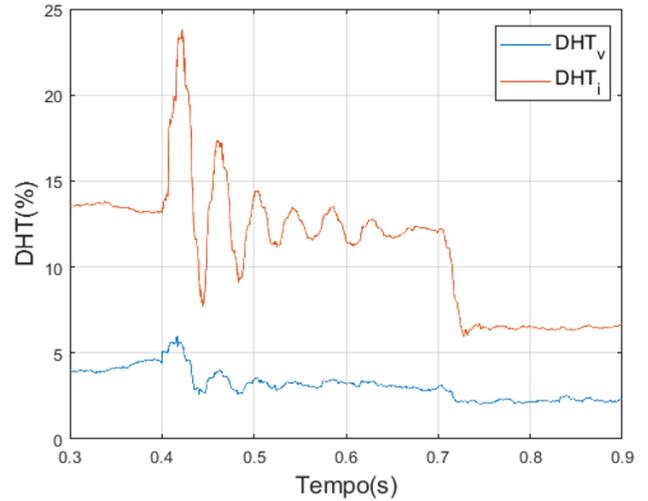


Figura 11. Distorsão harmônica de tensão e corrente nos terminais do CFR.

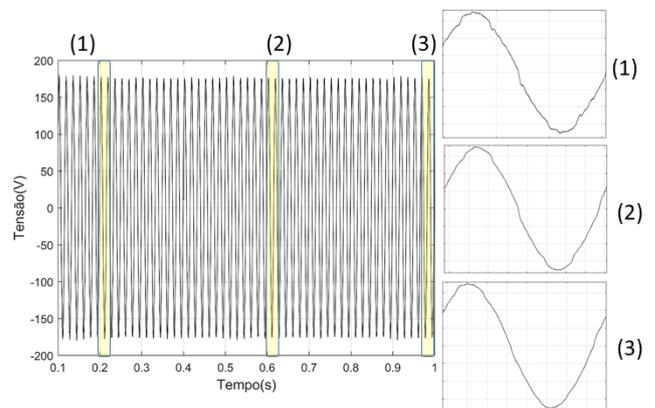


Figura 12. Tensão de fase no PAC: (1) Sem filtro, (2) Filtro passivo e (3) Filtro híbrido.

fato do filtro ativo série injetar uma tensão harmônica em série com a rede. Porém, a tensão nos terminais do CFR apresentada na Figura 13 é visível a melhora da sua forma de onda quando o filtro híbrido está operando, por não ser afetada pela injeção de harmônicos no PAC. Na Figura 14 é possível notar que com a conexão do filtro híbrido a corrente no PAC fica mais senoidal, devido a redução do DHT_i .

Por último são apresentadas nas Figuras 15 e 16, a tensão no filtro ativo e a corrente no filtro ativo.

O cálculo da potência necessária para o projeto do filtro ativo é determinado em (7) (Akagi, 2005).

$$|S_{FA}| = \sqrt{3} \frac{V_{CC}}{\sqrt{2}} \frac{I_{FA}}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

Aonde:

- V_{CC} - Valor de tensão do link CC;
- I_{FA} - Valor máximo de corrente instantânea nos terminais do filtro ativo;
- S_{FA} - Valor de potência aparente do filtro.

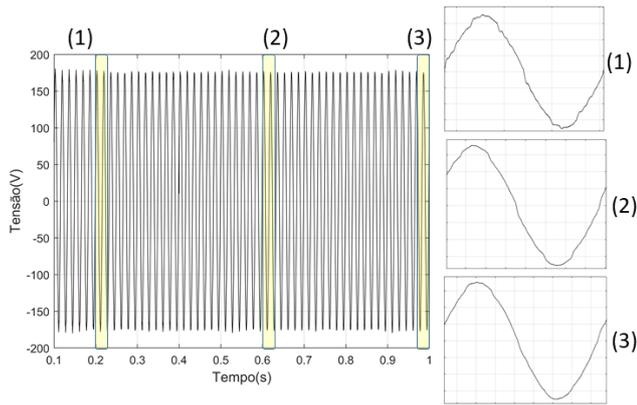


Figura 13. Tensão de fase no CFR: (1) Sem filtro, (2) Filtro passivo e (3) Filtro híbrido.

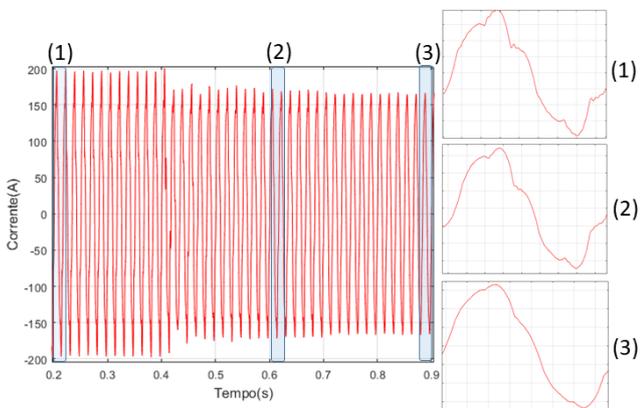


Figura 14. Corrente de fase no PAC: (1) Sem filtro, (2) Filtro passivo e (3) Filtro híbrido.

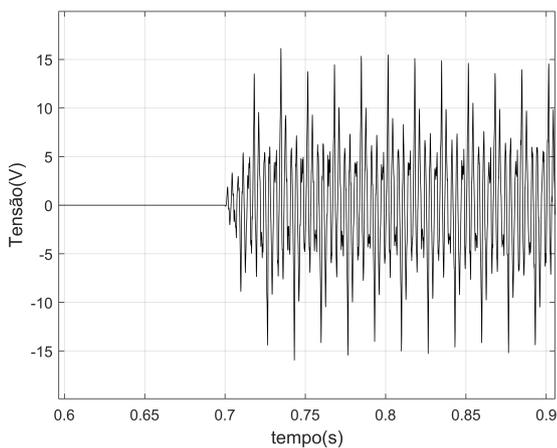


Figura 15. Tensão no filtro ativo.

Adotando um inversor trifásico *VSI* com modulação PWM a dois níveis, a tensão do *link* CC é igual a duas vezes o valor da tensão instantânea de pico nos terminais do filtro ativo. Substituindo os valores encontrados na simulação tem-se:

$$|S_{FA}| = \sqrt{3} \frac{2 \times 15,6}{\sqrt{2}} \frac{167,00}{\sqrt{2}} = 4,39 \text{ kVA} \quad (8)$$

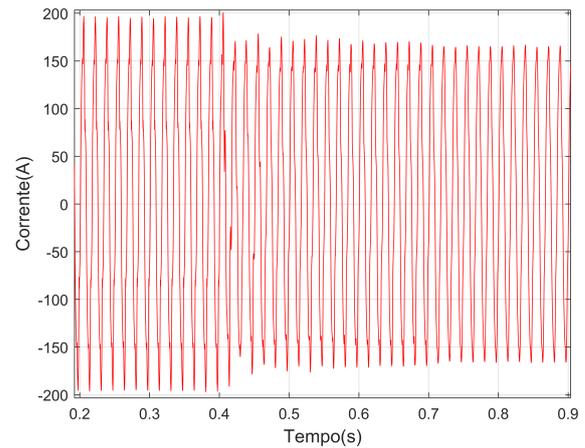


Figura 16. Corrente no filtro ativo.

Com um filtro ativo de potência nominal igual a 4,39KVA é possível eliminar com a ressonância harmônica e melhorar as características de filtragem do sistema passivo. Considerando que a carga linear possui potência de 25,55 + j23,92 kVA e a carga não-linear 30+11,70 kVA, obtém-se uma potência total de 66 kVA. Portanto, a potência do filtro ativo representa apenas 6,64% da carga da microrrede.

6. CONCLUSÃO

Neste artigo é apresentado um estudo da conexão de um filtro híbrido série para a compensação harmônica em uma microrrede ilhada. O modelo utilizado permitiu analisar o fluxo de potência na rede, além de contemplar uma análise das taxas de distorção harmônica de tensão e corrente no PAC.

Foi verificado que com um filtro híbrido série com o filtro ativo em série com a rede é possível eliminar com a ressonância harmônica na rede e melhorar as características de filtragem do filtro passivo. Por simulação foi demonstrado que o filtro híbrido série permite reduzir as taxas de distorção harmônica de corrente no PAC da microrrede, com redução da taxa de distorção harmônica de tensão e corrente no CFR, com um filtro ativo que representa 6,64% da carga da microrrede.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da FAPES e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo.

REFERÊNCIAS

- Akagi, H. (2005). Active harmonic filters. *Proceedings of the IEEE*, 93(12), 2128–2141.
- Alemam, A.M.A., Adam, A.A.M.A., Hassan, E.K.A.E., Ibrahim, M.I.M., et al. (2018). *Power System Harmonics Sources, Effects and Elimination*. Ph.D. thesis, Sudan University of Science and Technology.
- Antunes, H.M.A., Silva, S.M., Brandao, D.I., Machado, A.A.P., and de Jesus Cardoso Filho, B. (2018). Harmonic compensation using a series hybrid filter in a centralized ac microgrid. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 29(2), 219–229.

- Antunes, H.M.A., Pires, I.A., and Silva, S.M. (2019). Evaluation of series and parallel hybrid filters applied to hot strip mills with cycloconverters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(6), 6643–6651. doi:10.1109/TIA.2019.2932966.
- Antunes, H.M.A.A. (2018). *Conversor multifuncional recongurável e tolerantes a falhas para microrredes de energia elétrica*. Ph.D. thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFMG.
- Asiminoael, L., Blaabjerg, F., and Hansen, S. (2007). Detection is key-harmonic detection methods for active power filter applications. *IEEE Industry Applications Magazine*, 13(4), 22–33.
- Baliyan, A., Jamil, M., and Rizwan, M. (2022). Power quality improvement using harmonic passive filter in distribution system. In *Advances in Energy Technology*, 435–445. Springer.
- Gambarotta, A., Morini, M., Rossi, M., and Stonfer, M. (2017). A library for the simulation of smart energy systems: the case of the campus of the university of parma. *Energy Procedia*, 105, 1776–1781.
- Khan, I., Vijay, A., and Doolla, S. (2021). Nonlinear load harmonic mitigation strategies in microgrids: State of the art. *IEEE Systems Journal*.
- Lopes, B.M., Silva, S.M., Cardoso Filho, B.J., Brito, J., and Travassos, G. (2006). Análise crítica de dispositivos estáticos de compensação série de baixa tensão com transformadores shunt: Custos versus funcionalidade. *Eletrônica de Potência*, 11, 53–60.
- Patrao, I., Figueres, E., Garcerá, G., and González-Medina, R. (2015). Microgrid architectures for low voltage distributed generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 415–424.
- Rocabert, J., Luna, A., Blaabjerg, F., and Rodriguez, P. (2012). Control of power converters in ac microgrids. *IEEE transactions on power electronics*, 27(11), 4734–4749.
- Tahim, A.P.N. (2015). *Controle de Microrredes de Distribuição de Energia Elétrica em Corrente Contínua*. Ph.D. thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina.
- Zubieta, L.E. (2016). Are microgrids the future of energy?: Dc microgrids from concept to demonstration to deployment. *IEEE Electrification Magazine*, 4(2), 37–44.