

Controle Proporcional-Ressonante e Amortecimento Ativo Aplicado a um Filtro Ativo de Potência Série-Paralelo

Cristiano Martins Nunes*, Lucas Gonçalves Pintos*, Victor Matheus Pereira Santos*,
Rodrigo Varella Tambara*

*Universidade Federal de Santa Maria - Santa Maria, Brasil

Abstract—Este artigo apresenta o desenvolvimento de controladores aplicados a um filtro ativo de potência série-paralelo conectado a uma rede trifásica para fins de atenuação de tensões harmônicas na carga e correntes harmônicas na rede elétrica. Para compensação das harmônicas, um sistema baseado em controlador Proporcional-Ressonante é utilizado para rastreamento das correntes e tensões harmônicas que serão injetadas na rede com fase oposta. Problemas de conexão/interação entre o filtro série e paralelo são verificados quando os dois inversores operam simultaneamente, provocando oscilações e uma elevada distorção harmônica total. Com o intuito de amortecer essas oscilações de alta frequência, um sistema de amortecimento ativo é utilizado. Simulações computacionais são apresentadas com o intuito de validar a proposta.

Index Terms—Qualidade de energia elétrica, Filtro ativo série-paralelo, Controlador proporcional-ressonante

I. INTRODUÇÃO

Na atualidade, o aumento da presença de dispositivos eletrônicos tanto no cotidiano das pessoas quanto na indústria é evidente. Entretanto, tais equipamentos funcionam, geralmente, de forma não-linear distorcendo as formas de ondas de correntes e/ou tensões da rede elétrica [1], assim é necessária uma maior atenção e preocupação com a qualidade da energia elétrica (QEE). Com isso, técnicas passivas, híbridas e ativas são estudadas para mitigar problemas de QEE [2]- [6]. Quando se refere a técnicas híbridas ou ativas, torna-se necessário, normalmente, o uso de sistemas para o chaveamento dos semicondutores de potência, uma vez que essas topologias incluem conversor CC/CA e, em conjunto a esses sistemas de chaveamento, habitualmente adota-se o uso de controladores [5] e [6]. Sistemas ativos para atenuação de harmônicos na rede elétrica são denominados: Filtros Ativos de Potência (FAPs).

A classificação dos FAPs pode ser realizada considerando: número de fases, topologia e a grandeza elétrica injetada na rede. No que tange ao número de fases, os filtros são categorizados em três classes principais: monofásico, trifásico sem neutro e trifásico com neutro. Quanto às topologias, existem três configurações fundamentais: filtro ativo série, filtro ativo paralelo e filtro ativo série-paralelo. Referente a grandeza elétrica injetada na rede, o filtro pode se distinguir de uma fonte de corrente ou uma fonte de tensão [7]. Para a adequada atenuação dessas correntes ou tensões harmônicas da rede, um sistema de controle é necessário.

Um controlador de estrutura simples largamente utilizado em inversores conectados à rede é o controlador Proporcional-Ressonante (PR). O controlador PR é fundamentado no princípio do modelo interno, esse princípio demonstra que, em um sistema de controle em malha fechada e assintoticamente estável, a inclusão do modelo matemático da referência e/ou do sinal de perturbação no controlador garante que o estado controlado siga a referência sem erro em regime permanente e/ou rejeite a perturbação [8].

Problemas de interação e conexão do FAP série-paralelo com a rede elétrica, normalmente, ocorrem gerando oscilações nas correntes e tensões na rede. Amortecimento passivo ou ativo podem mitigar essas oscilações indesejadas, no entanto o amortecimento passivo diminui a eficiência energética do FAP. Já o amortecimento ativo consiste em uma técnica de sensoriamento de alguma variável do sistema alimentando-a em outro ponto do circuito, de modo a simular uma resistência inserida fisicamente [9].

Este artigo propõe um sistema de controle PR com amortecimento ativo aplicado a um FAP série-paralelo em uma rede trifásica para atenuação das tensões harmônicas na carga e correntes harmônicas na rede elétrica. Para a compensação dessas harmônicas, é utilizado um sistema baseado em um controlador PR, que rastreia as correntes e tensões harmônicas e injeta na rede suas componentes em fase oposta. Além disso, esse artigo aborda os problemas de conexão e interação entre os filtros ativos série e paralelo, que podem causar oscilações e uma elevada distorção harmônica total (DHT) quando operam simultaneamente. Para mitigar essas oscilações de alta frequência, é proposto um sistema de amortecimento ativo. A eficácia da proposta é validada através de simulações computacionais, demonstrando a capacidade do sistema em melhorar a QEE ao reduzir as componentes harmônicas.

II. ESTRUTURA DO FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA SÉRIE-PARALELO

A estrutura de um FAP série-paralelo é ilustrada na Figura 1, por meio de um diagrama unifilar, em que este sistema é composto por um FAP série e um FAP paralelo. O FAP série inclui um inversor trifásico a quatro fios (*full-bridge* a quatro fios ou seja 2 chaves por braço somando 8 chaves no total) conectado em série com a rede elétrica, o qual é responsável por injetar sinais de tensão harmônica (V_{oc}) com

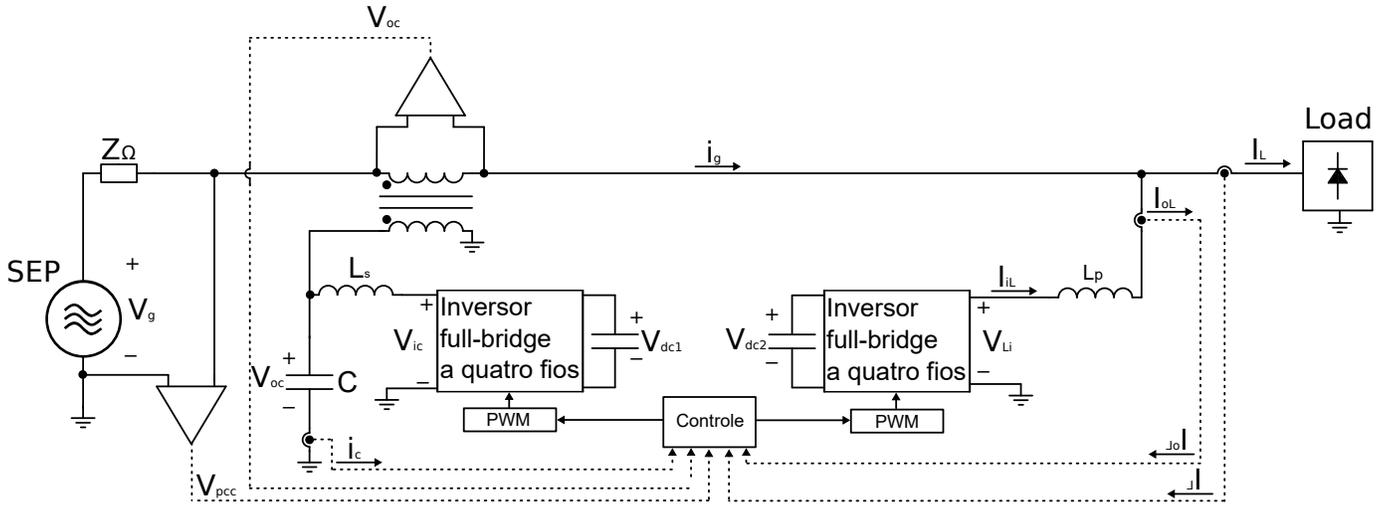


Fig. 1. Diagrama unifilar de um FAP série-paralelo com amortecimento ativo.

fase oposta às tensões harmônicas (V_g) contida na rede elétrica de distribuição, assim mitigando as harmônicas de tensão na carga provinda da rede elétrica. O acoplamento do FAP série com a rede elétrica é efetuado a partir de um transformador, que auxilia para isolar eletricamente o circuito de controle da carga e possibilita o ajuste dos níveis de tensão [4]. Como inversores tendem a gerar sinais de alta frequência na sua saída, providas do chaveamento PWM dos semicondutores, torna-se necessário o uso de filtros passivos nas suas saídas. Devido ao fato do filtro série se comportar como uma fonte de tensão, torna-se necessário o uso de um filtro passivo LC, na qual sua função transferência, é apresentada na Equação (1). Em que R_{eq1} é uma aproximação da impedância de saída do filtro LC, V_{oc} é o sinal de tensão da saída do filtro LC no qual é o mesmo sinal que entra no primário do transformador, V_{ic} é o sinal de entrada do filtro LC, ou seja, o sinal de saída do inversor, L_s é a indutância e C é a capacitância do filtro. A função de transferência do filtro LC, junto a uma resistência equivalente R_{eq1} , que relaciona as tensões V_{oc} e V_{ic} é dada por.

$$\frac{V_{oc}}{V_{ic}} = \frac{\frac{1}{L_s C}}{s^2 + s \frac{1}{R_{eq1}} + \frac{1}{L_s C}} \quad (1)$$

O diagrama de Bode da Equação (1) é apresentado na Figura 2, em que o valor de L_s é $2mH$, o valor de C é de $12.77\mu F$ e o valor de R_{eq} foi variado entre 1Ω a 100Ω .

O FAP paralelo também é composto por um inversor a 4 fios (*full-bridge* a quatro fios ou seja 2 chaves por braço somando 8 chaves no total), porém, conectado em paralelo com a rede elétrica, esse se torna responsável por injetar sinais de corrente harmônica (I_{oL}) com fase oposta às harmônicas providas da carga (I_L), assim tendendo a anular as harmônicas de corrente na rede de distribuição (I_g) [5]. O filtro passivo utilizado na saída do inversor do FAP paralelo é um filtro L, o qual além de atenuar as harmônicas providas do chaveamento PWM, também desempenha a função de uma fonte de

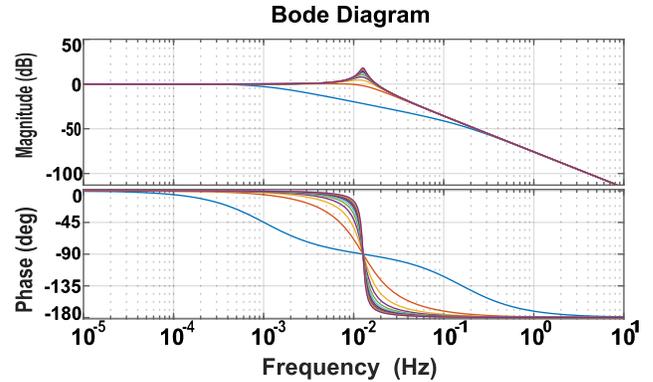


Fig. 2. Diagrama de Bode do filtro LC.

corrente, o que é importante, pois o FAP paralelo injeta sinais de corrente. A função de transferência de um filtro L conectado a uma rede de impedância equivalente R_{eq2} é apresentada na Equação (2), em que I_{oL} é o sinal de corrente da saída do filtro L, o qual é o mesmo sinal que é injetado na rede elétrica, V_{Li} é o sinal de entrada do filtro L, ou seja, o sinal de saída do inversor do FAP paralelo e L_p é a indutância do filtro. A função de transferência do filtro L, considerando uma R_{eq2} , que relaciona I_{oL} por V_{Li} é dada por.

$$\frac{I_{oL}}{V_{Li}} = \frac{1}{sL_p + R_{eq2}} \quad (2)$$

O diagrama de Bode da Equação (2) é apresentado na Figura 3, em que o valor de L_p é $2mH$, e o valor de R_{eq} foi variado entre 1Ω a 100Ω . As principais variáveis de interesse para esse projeto são:

- Harmônicas de corrente (I_{LH}): As harmônicas de corrente que são extraídas da carga a partir de um sensor de corrente e um filtro rejeita faixa, no qual rejeita a frequência de 60 Hz. Essa variável é importante, pois serve de referência para o controlador PR do FAP paralelo.

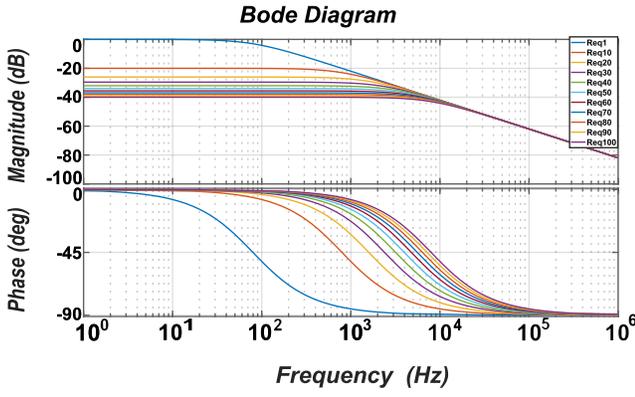


Fig. 3. Diagrama de Bode do filtro L.

- Harmônicas de tensão (V_{gh}): As harmônicas de tensão que são extraídas da rede de distribuição a partir de um sensor de tensão e um filtro rejeita faixa, no qual rejeita a frequência de 60 Hz. Essa variável é importante, pois serve de referência para o controlador PR do FAP série.
- Corrente de saída do FAP paralelo (I_{oL}): A corrente de saída do FAP paralelo é extraída a partir de um sensor de corrente na saída do filtro paralelo, ou seja, a corrente após o filtro L. Essa variável é utilizada para fechar a malha do sistema de controle do FAP paralelo.
- Tensão de saída do FAP série (V_{oc}): A tensão de saída do FAP série é extraída a partir de um sensor de tensão na saída do filtro paralelo, ou seja, no secundário do transformador de acoplamento. Essa variável utilizada para fechar a malha do sistema de controle do FAP série.
- Corrente no capacitor do filtro LC (i_c): A corrente do capacitor do filtro LC é obtida a partir de um sensor de corrente em série com o capacitor do filtro. Essa variável é importante, pois é utilizada para fazer o amortecimento ativo.

III. SISTEMA DE CONTROLE DO FAP SÉRIE-PARALELO

Ao se conectar conversores à rede elétrica há a necessidade de converter o nível de tensão contínuo do barramento CC (V_{dc1} e V_{dc2}) para uma forma de onda alternada, além disso, os sinais de referência para conversores conectados na rede são sinais alternados. Com isso o controlador PR, se torna uma boa escolha, pois além de ser um controlador de fácil implementação ele opera com sinais de referência alternados sem a necessidade de empregar transformações matemáticas, como a transformação de Park [8].

A função de transferência do controlador PR ideal é dada por:

$$G_{CPR}(s) = K_p + K_r \frac{s}{s^2 + \omega_0^2} + \dots + K_{rn} \frac{s}{s^2 + \omega_n^2} \quad (3)$$

Dado que K_p é o ganho relacionado à parcela proporcional, o qual gera uma resposta proporcional ao erro reduzindo o tempo de acomodação do sistema, K_r é o ganho da parcela ressonante, e ω_0 é a frequência de ressonância.

O diagrama de Bode de um controlador PR ideal com 3 frequências de ressonância é apresentado na Figura 4. Os ganhos utilizados neste diagrama de Bode são unitários (tanto de K_p quanto de K_r) e as frequências de ressonância são de 60Hz, 300Hz e 420Hz.

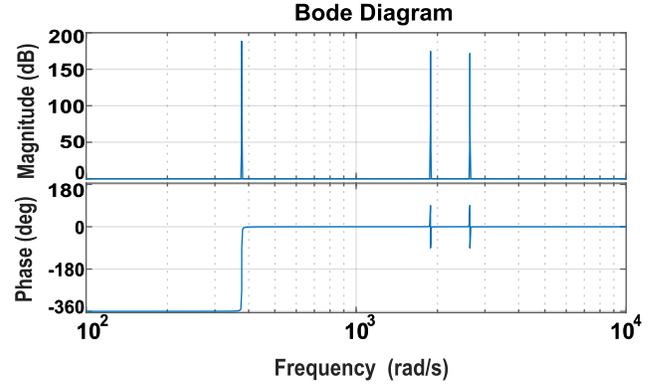


Fig. 4. Diagrama de Bode do controlador PR ideal.

A Figura 4 apresenta o diagrama de Bode da função transferência do PR ideal, em que é possível observar que o controlador ideal exibe um ganho infinito e uma banda mínima na frequência de ressonância, o que inviabiliza a sua implementação prática. Para contornar essa limitação, é necessário introduzir um termo adicional que representa o amortecimento do controlador PR na frequência de ressonância, o que não apenas aumenta a largura de banda do controlador, mas também reduz o ganho a níveis viáveis para a implementação prática. Esse controlador é denominado Quasi-PR [9]. A função de transferência do controlador Quasi-PR é dada pela Equação (4), podendo ser aplicada para "n" frequências de ressonância como na Equação (3).

$$G_{CQ-PR}(s) = K_p + K_r \frac{2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (4)$$

Em que ω_c é o parâmetro que define o nível de amortecimento desejado para o controlador PR, e é dado por:

$$\omega_c = \zeta \omega_0 \quad (5)$$

Em que ζ é o amortecimento desejado. O parâmetro ω_c também tem relação com a banda passante do controlador PR, dessa forma pode ser escolhida de maneira a ajustar a faixa de variação permitida para a frequência de ressonância, permitindo o controle da banda passante do controlador [8].

A Figura 5 apresenta o diagrama de Bode de um controlador Quasi-PR com 3 frequências de ressonância, sendo elas: 60Hz, 300Hz e 420Hz. Já os ganhos de k_p e k_r são unitários e o valor de ζ foi de 0,05.

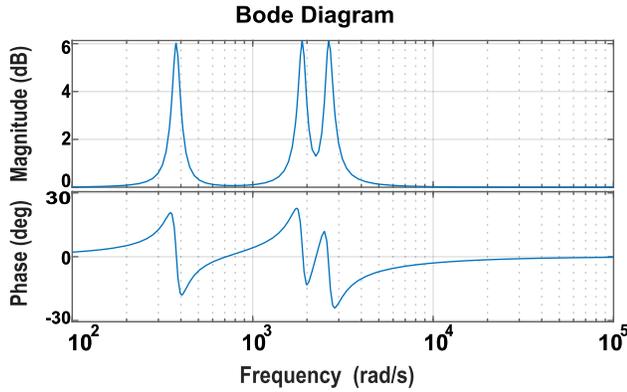


Fig. 5. Diagrama de Bode de um controlador Quasi-PR.

A Figura 6 ilustra o diagrama de blocos de um controlador PR genérico com "n" frequências de ressonância. Quando o PR é ideal utiliza-se a parcela ressonante da Equação (3) para G_r e quando o controlador é Quasi-PR utiliza-se a parcela ressonante da Equação (4) para G_r .

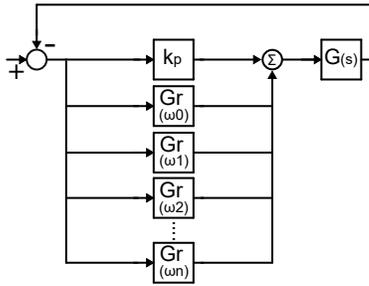


Fig. 6. Diagrama de blocos de um controlador PR genérico.

A. Amortecimento Ativo

O amortecimento ativo é uma técnica utilizada para melhorar a estabilidade e o desempenho de sistemas de controle sujeitos a elevados picos de ganho na frequência de ressonância. É comum em sistemas de potência, especialmente os que envolvem inversores e filtros ativos, se enfrentar problemas de ressonância e instabilidade devido à interação entre os componentes do sistema e a rede elétrica. Tendo isso em vista, o amortecimento ativo é empregado para mitigar as ressonâncias que podem ocorrer devido à presença de componentes indutivos e capacitivos no sistema, pois podem causar oscilações indesejadas e deteriorar a QEE.

Ao aplicar técnicas de amortecimento ativo, o sistema se torna mais estável, evitando oscilações que poderiam levar a falhas ou operação inadequada. Isso é especialmente importante em aplicações de filtros ativos de potência onde a resposta rápida e estável é crucial. O uso de amortecimento ativo permite um controle mais preciso sobre o comportamento do inversor e do filtro ativo.

Neste contexto, o amortecimento ativo pode ser implementado de várias maneiras. Como utilizando sensores para monitorar as condições da rede e ajustar o comportamento do inversor em tempo real, ou empregando algoritmos digitais

para filtrar e amortecer as oscilações de corrente e tensão. E até mesmo ajustando dinamicamente os parâmetros do controlador do inversor para fornecer o amortecimento necessário conforme as condições variam [10].

Alguns benefícios são a diminuição da amplitude das harmônicas na rede elétrica, melhorando a QEE, o aumento da estabilidade do sistema prevenindo oscilações e falhas operacionais, além de proporcionar um desempenho mais eficiente e confiável do FAP, resultando em uma melhor compensação de distorções de tensão e corrente.

Neste trabalho, o amortecimento ativo é obtido a partir da realimentação da corrente do capacitor do filtro LC, presente no FAP série.

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Os resultados que serão apresentados nessa seção foram obtidos por meio do *software* de simulação PSIM. As harmônicas de tensão tem amplitude de 30 Vp e as harmônicas de corrente tem amplitude de 5 A. A frequência de chaveamento (F_s) dos semicondutores é de 100kHz. Os outros valores utilizados nas simulações são apresentados na Tabela I. $Kp_{série}$, $Kr_{série}$, $K_{damping}$ são os ganhos do controlador do FAP série, $Kp_{paralelo}$, $Kr_{paralelo}$ os ganhos do controlador FAP paralelo. ζ o amortecimento do controlador Quasi-PR e ω_1 , ω_2 e ω_3 são as frequências de ressonâncias escolhidas para atenuar as 5ª e 7ª harmônicas de um sistema no qual sua fundamental é de 60 Hz.

TABLE I
TABELA DE DADOS DO SISTEMA SIMULADO

Dados	Valores
L_s	2mH
C	12.77uF
$Kp_{série}$	1
$Kr_{série}$	80
$K_{damping}$	7
L_p	2mH
$Kp_{paralelo}$	200
$Kr_{paralelo}$	20
ζ	50
ω_1	60Hz
ω_2	300Hz
ω_3	420Hz

Na Figura 7 são apresentadas as três fases da rede elétrica, onde existem a 5ª e 7ª harmônicas de corrente e de tensão.

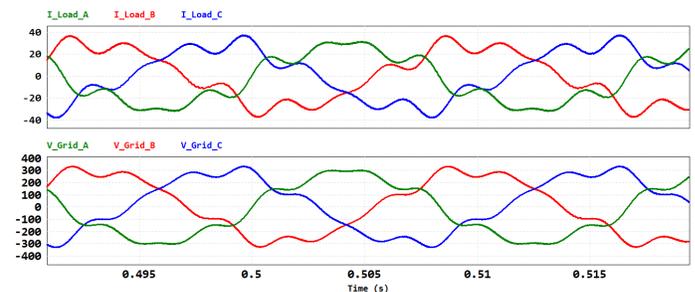


Fig. 7. Gráficos das correntes do lado da rede (gráfico superior) e tensões de carga (gráfico inferior).

A. Resultados sem amortecimento ativo

A Figura 8 apresenta o início de atuação dos filtros, em que 0,5 segundo é visto a ativação do FAP paralelo e em 1 segundo a do FAP série. Ficam bem evidentes as etapas de operação neste gráfico, onde o filtro paralelo é ativado e inicia a atenuação das harmônicas de corrente, enquanto as harmônicas de tensão se mantém. E logo em seguida, quando o filtro série é ativado, é visto com clareza um *ripple* de alta frequência, tanto na corrente quanto na tensão.

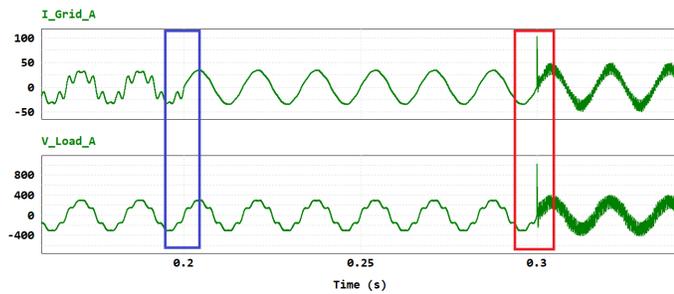


Fig. 8. Gráficos das correntes do lado da rede (gráfico superior) e tensões de carga (gráfico inferior) na fase A, em que o FAP série-paralelo está sem amortecimento ativo.

Já na Figura 9 é apresentada as tensões e correntes das três fases do FAP série-paralelo sem amortecimento ativo em regime permanente, salientando o *ripple* de alta frequência.

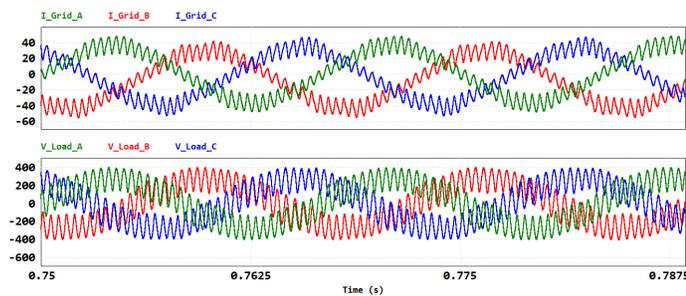


Fig. 9. Gráficos das correntes do lado da rede (gráfico superior) e tensões de carga (gráfico inferior) em regime permanente, sem amortecimento ativo.

Já na Figura 10, é demonstrada a FFT da corrente e tensão na fase A do sistema, onde fica visível que o *ripple* de alta frequência esta entre 1 kHz e 10 kHz. Vale salientar que o comportamento das 3 fases no domínio da frequência são muito semelhantes.

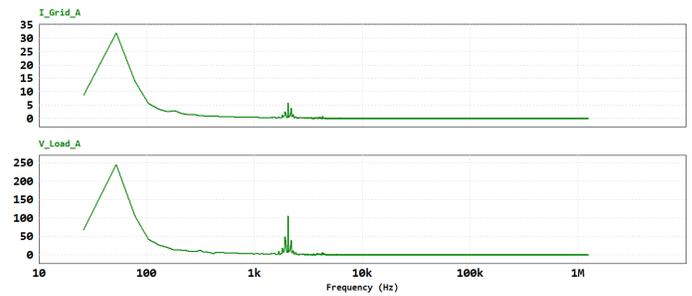


Fig. 10. FFT das correntes do lado da rede (gráfico superior) e das tensões de carga (gráfico inferior) em regime permanente, sem amortecimento ativo.

B. Resultados com amortecimento ativo

A etapa anterior, sem amortecimento ativo, se mostrou ineficaz para a aplicação no FAP série-paralelo, pois os filtros interferiam no funcionamento um do outro causando as distorções vistas nos gráficos. Dessa forma, foi utilizado um amortecimento ativo para sanar este problema, onde, os resultados positivos ficam evidentes na Figura 11. No retângulo azul ocorre a ativação do FAP paralelo e no retângulo vermelho a ativação do FAP série.

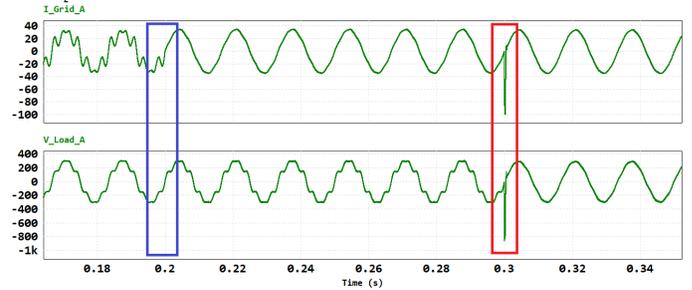


Fig. 11. Gráficos da ativação dos filtros com amortecimento ativo. Correntes do lado da rede (gráfico superior) e tensões de carga (gráfico inferior) em regime permanente, com amortecimento ativo

Após a ativação dos filtros, o sistema passa a operar de forma a compensar as harmônicas de corrente existentes na rede (filtro paralelo) e na tensão de carga (filtro série). O resultado obtido com a utilização do FAP série-paralelo, e sua eficácia, ficam evidentes nos gráficos apresentados na Figura 12.

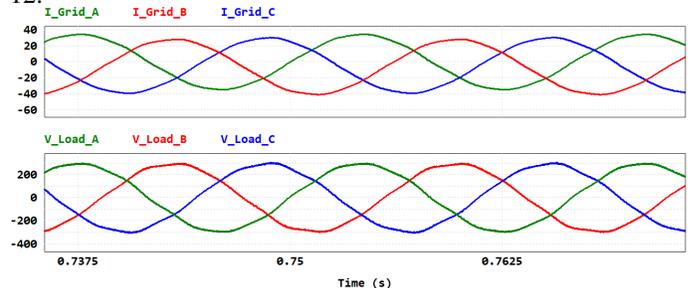


Fig. 12. Correntes do lado da rede (gráfico superior) e tensões de carga (gráfico inferior) em regime permanente, com amortecimento ativo, em regime permanente.

Para validar o funcionamento do sistema com o amortecimento ativo, na Figura 13, é vista a FFT da corrente e tensão

na fase A do sistema, onde o *ripple* de alta frequência é minimizado. Vale salientar que o comportamento das 3 fases no domínio da frequência são muito semelhantes.

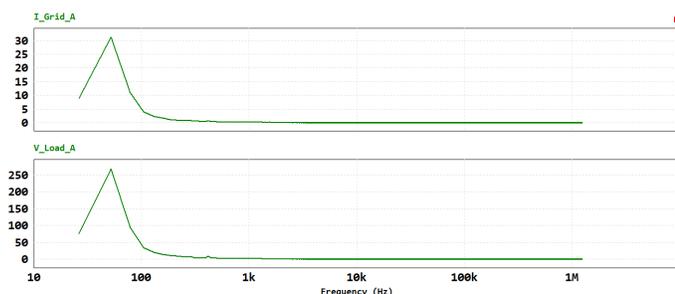


Fig. 13. FFT das correntes do lado da rede (gráfico superior) e das tensões de carga (gráfico inferior) em regime permanente, com amortecimento ativo.

A Tabela 2 apresenta os resultados de DHT das simulações efetuadas do FAP série-paralelo sem amortecimento ativo, com amortecimento ativo e com o FAP série-paralelo desligado. Sendo I_{gA} , I_{gB} e I_{gC} as DHT de corrente na rede elétrica de distribuição nas três fases. V_{LA} , V_{LB} e V_{LC} as DHT de tensão na carga.

TABLE II
TABELA DAS DHT

	DHT%		
	Sem amortecimento ativo	Com amortecimento ativo	FAPs desligado
I_{gA}	26.96%	0.42%	36.34%
I_{gB}	26.36%	0.56%	36.64%
I_{gC}	25.93%	0.42%	36.34%
V_{LA}	67.26%	2.61%	12.53%
V_{LB}	67.57%	2.95%	12.53%
V_{LC}	65.50%	2.61%	12.53%

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi abordado conceitos sobre o FAPs série-paralelo, como suas possíveis topologias sobre a perspectiva de eletrônica de potência, comparação entre duas técnicas de controle aplicadas aos FAPs, filtros passivos aplicados a saída de inversores conectados na rede, amortecimento ativo, funcionamento dos FAPs e desempenhos de FAPs em ambiente de simulação.

Em relação a resultados, a configuração que se demonstrou ter o melhor desempenho, ou seja, a que mais aproximou o sinais de corrente da rede e tensão da carga a uma onda senoidal pura de 60Hz, foi a configuração FAPs série-paralelo com amortecimento ativo. Seu maior nível de THD de corrente na rede, foi na fase B onde ficou com 0.56% e sua THD mais elevada de tensão na carga foi na fase B também com 2.95%. O nível mais elevados de THD de corrente do sistema sem amortecimento ativo foi na fase A, onde teve valor de 26.96% já o nível mais elevado de THD de tensão foi na fase B com 67.57%. Já os níveis de THD de corrente do sistema desligado, são iguais nas três fases, com 36.64% os de tensão também são iguais nas três fases com 12.53%

Fazendo uma análise do sistema com amortecimento ativo, é perceptível que o mesmo cumpre com seu papel que além de atenuar as harmônicas de tensão na carga provinda da rede e as harmônicas de corrente na rede provinda da carga também ameniza problemas de interações entre os filtros e a rede. Em compensação o sistema sem amortecimento ativo, se demonstrou não tão eficaz por mais que os níveis de corrente tenham diminuído comparado com o mesmo desligado.

Os resultados obtidos foram adquiridos em simulações no *software* PSIM, o qual o sistema com amortecimento ativo se mostrou eficaz para mitigação de distorções harmônicas tanto de corrente quanto de tensão em cenários de simulação. Como perspectivas futuras, pretende-se simular o sistema em uma plataforma HIL (*Hardware-In-the-Loop*), a fim de se testar diferentes abordagens de controle digital em tempo real.

VI. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento e Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001.

REFERENCES

- [1] Universidade Estadual de Campinas, "Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica" www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/it012.html (accessed July, 28, 2024).
- [2] A. Baitha and N. Gupta, "A comparative analysis of passive filters for power quality improvement," 2015 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy), Kollam, India, 2015, pp. 327-332, doi: 10.1109/TAPENERGY.2015.7229640.
- [3] C. Hermann de Oliveira Lima, "Controle de Harmônicos e Potência Reativa em Cargas Desbalanceadas Utilizando um Filtro Híbrido Trifásico Dual Baseado no Inversor Nove-Chaves," M.S. Thesis, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017. [Online]. Available: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/26344/1/DISSERTA>
- [4] J. L. Torre Manso, "Desenvolvimento de um Filtro Ativo de Potência Série Monofásico sem Fontes Externas," M.S. Thesis, MIEEIC, Universidade do Minho, Braga, 2019. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/304593477.pdf>
- [5] C. P. Fraga Oliveira, "Desenvolvimento de um Filtro Ativo de Potência Paralelo Monofásico Baseado num Conversor Fonte de Corrente com Barramento CC Reduzido," M.S. Thesis, MIEEIC, Universidade do Minho, Braga, 2018. [Online]. Available: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/59998/1/Catia>
- [6] L. A. Oliveira dos Santos, "FILTROS ATIVOS: COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE," Thesis, Sch. of electrical engineering., Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2019.
- [7] B. Singh, K. Al-Haddad and A. Chandra, "A review of active filters for power quality improvement," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 46, no. 5, pp. 960-971, Oct. 1999, doi: 10.1109/41.793345.
- [8] H. F. Batista Plotzki, "Controle de Corrente em Conversores Conectados à Rede Elétrica por meio de Filtro-LCL Utilizando o Controle Adaptativo Simples com Dinâmicas Suplementares Discretas.," M.S. Thesis, PPGEE, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2018. [Online]. Available: <https://dspace.unipampa.edu.br/handle/rii/3960>
- [9] R. Chattopadhyay, A. De and S. Bhattacharya, "Comparison of PR controller and damped PR controller for grid current control of LCL filter based grid-tied inverter under frequency variation and grid distortion," 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, PA, USA, 2014, pp. 3634-3641, doi: 10.1109/ECCE.2014.6953895. keywords: Frequency control;Inverters;Power harmonic filters;Harmonic analysis;Impedance;Passive filters;Voltage control,
- [10] P. H. Maciel Sotolani, "Uso de Técnica de Amortecimento Ativo no Sistema de Eixos Síncronos em Inversores Trifásicos Conectados à RDEE," Thesis, Sch. of electrical engineering., Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, MS, 2019.