

## GRUPO DE ESTUDO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO - GDI

### APLICAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE IMPEDÂNCIA ATIVA EM MICRORREDES PARA MELHORIA DO FATOR DE POTÊNCIA POR MEIO DE ROTEAMENTO HARMÔNICO

CAIO CÉSAR SOUZA MARIANO FRAGA\*(1);HÉLIO MARCOS ANDRÉ ANTUNES(2);SIDELMO  
MAGALHÃES SILVA(1)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS(1);UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO(2)

#### RESUMO

A ideia de se utilizar impedâncias ativas em um sistema não é nova. Inicialmente, foi proposta para o controle do fluxo de potência em linhas de transmissão de alta tensão [1]. Outras aplicações para esta tecnologia têm sido propostas, entre elas, uma solução para qualidade de energia em redes elétricas de baixa tensão, mitigando distorções harmônicas [2-3]. Este trabalho pretende contribuir para o preenchimento desta lacuna, fazendo um estudo sobre esta tecnologia, onde o principal objetivo é discutir os benefícios da aplicação destas impedâncias ativas em microrredes, as quais podem resultar na melhoria do Fator de Potência por meio do Roteamento Harmônico usando um conversor.

**PALAVRAS-CHAVE:** microrredes; geração distribuída; qualidade da energia elétrica; impedância ativa; roteamento harmônico.

#### XXV 1.0 INTRODUÇÃO

A demanda por energia em todo o mundo está crescendo. Além disso, os equipamentos eletrônicos têm sido cada vez mais utilizados em residências. Estes dispositivos geralmente usam Eletrônica de Potência para fazer interface com a rede elétrica. Desta forma, cada vez mais distorções harmônicas são inseridas no sistema, mais ressonâncias são vistas no sistema elétrico de baixa tensão e a qualidade da energia elétrica vem diminuindo, o que implica em:

- Maior necessidade de manutenção;
- Vida útil reduzida do equipamento;
- Imprecisões nas medições de energia para faturas futuras;
- Desempenho inadequado dos dispositivos de proteção.

Aliado a isso, a necessidade de uma fonte de alimentação ininterrupta tornou-se um grande foco em estudos recentes. Assim, sistemas de microrrede e geração distribuída têm sido estudados e implantados em todo o mundo como solução, além da possibilidade de levar energia a locais sem fornecimento algum por meio da rede elétrica.

Neste cenário, é muito interessante o uso de soluções de fácil inserção no sistema para mitigar essas distorções harmônicas, por exemplo, por meio de um roteamento inteligente destes harmônicos propiciando melhoria no fator de potência. Elas são atraentes, pois oferecem confiabilidade e versatilidade quando comparadas às soluções clássicas. Portanto, uma das chaves para o sucesso das microrredes vem das soluções distribuídas. No entanto, ainda há um longo caminho a ser percorrido para sua consolidação e isso depende do desenvolvimento de tecnologias com potências nominais adequadas à alocação em instalações elétricas comerciais e industriais de baixa tensão e cujo custo seja competitivo face às soluções existentes no mercado.

#### 1.1 Microrredes e geração distribuída

Atualmente, vivencia-se um novo marco com os temas *microrrede* e *geração distribuída*, que são amplamente estudados devido à sua comprovada importância e complexidade na obtenção de um sistema confiável, robusto e eficiente. Microrredes são consideradas uma característica básica das futuras redes de distribuição ativa [4]. Entre os fatores que possibilitaram este aumento, estão a viabilidade econômica de pequenas fontes de energia, avanços na comunicação de dados, avanços nos instrumentos de medição, sensoriamento e controle [5].

Vários são os pontos a serem citados como motivação para esse tema. Em um primeiro exemplo, com a utilização desse novo sistema, há um aumento na continuidade do fornecimento de energia. Isso se deve ao fato de o consumidor poder utilizar, além da energia da concessionária, a energia produzida por ele mesmo, seja ela solar,

eólica ou outra. Outro exemplo é o aspecto ambiental. As usinas hidrelétricas, termelétricas ou nucleares enfrentam dificuldades crescentes em sua construção devido ao quanto afetam o local onde serão instaladas, tanto do ponto de vista da população, quanto da fauna e flora locais.

## 1.2 Cenário nacional

O *Laboratório Tesla Engenharia de Potência*, da UFMG, desenvolve uma série de projetos nesta área, como, por exemplo, a implantação de uma microrrede na Escola de Engenharia da UFMG (EEUFMG). Este projeto é desenvolvido em parceria com a Petrobras e a Fundep. Em síntese, trata-se de um estudo prático referente ao uso de diferentes tecnologias de armazenamento de energia, além de diferentes estratégias de controle de diferentes cargas presentes no corredor de laboratórios de Engenharia Elétrica e incluindo integração com a Usina Solar - instalada na cobertura do Bloco I da EEUFMG – como exemplo de geração distribuída.

No Brasil, a grande maioria dos projetos desenvolvidos em microrredes tem como foco localidades isoladas. Afinal, estima-se que cerca de dois milhões de brasileiros ainda não estão vinculados ao *Sistema Interligado Nacional* (SIN) [6]. Isso torna a pesquisa nessa área ainda mais atrativa e importante para o desenvolvimento do país.

Entre outros projetos desenvolvidos, uma microrrede bastante conhecida e comentada é a de Fernando de Noronha, localizada no Estado de Pernambuco. Esta microrrede atende aproximadamente 2.500 pessoas. Este sistema tinha uma capacidade de geração de 2MW, pelo menos até 2013. Deste total, 225 kW são gerados por turbinas eólicas. Com capacidade instalada de 400 kWp, a Usina Solar Noronha I foi inaugurada em 2014. A Celpe (Companhia Energética de Pernambuco) pretende implantar as primeiras redes inteligentes do Estado na ilha, com um investimento de aproximadamente 17,6 milhões de reais nas áreas como medição, telecomunicações e automação [7]. Em 2019, foi instalado no arquipélago o primeiro complexo de baterias conectado a um sistema de geração no Brasil. Estas baterias são conectadas à Usina Solar Tubarão. A ideia é que essas baterias tenham um papel importante, pois durante o dia vão acumular energia excedente, dando suporte ao sistema em caso de instabilidade, além dos benefícios noturnos no horário de maior consumo. Em [8], é possível visualizar em detalhes os dados energéticos dos sistemas de geração e distribuição da chamada *Ilha da Inovação*.

## 1.3 Qualidade da energia elétrica

Todos os agentes envolvidos na geração, transmissão, distribuição ou consumo de energia têm interesse neste assunto. Isto ocorre, porque a sensibilidade do equipamento elétrico é cada vez mais pronunciada a partir de distúrbios na tensão da rede [9]. Além disso, estes mesmos equipamentos podem causar distúrbios na rede elétrica por meio de harmônicos e interferências eletromagnéticas, por exemplo. Tais distúrbios contribuem para a má Qualidade da Energia Elétrica, pois afetam a tensão fornecida aos consumidores e, conseqüentemente, o funcionamento dos equipamentos na instalação.

Qualidade da Energia é um assunto que vem sendo cada vez mais estudado. Porém, ao menos no Brasil, não existe uma regulamentação específica para harmônicos como a encontrada para o *Fator de Potência* [10]. A consolidação das normas é extremamente importante. Apenas assim será possível definir as responsabilidades de todos os envolvidos com o setor elétrico, desde consumidores, concessionárias até fabricantes de equipamentos elétricos e eletrônicos, além de aplicar penalidades aos que descumprirem tais normas. Atualmente, tem-se algumas definições: por um lado, por exemplo, a IEC definiu no padrão IEC 61000-4-30 em [11]. Por outro lado, o IEEE definiu no padrão IEEE 100 como visto em [12]. Isto é melhor expresso recentemente como “desvios de tensão, corrente ou frequência e, subseqüentemente, em falha, operação incorreta ou envelhecimento prematuro do equipamento do cliente” [13].

A compensação harmônica de cargas não lineares é extremamente importante. De fato, a distorção causada pela carga é melhor visualizada na corrente. Porém, como tensão e corrente são grandezas elétricas acopladas, essa distorção também pode ser vista indiretamente na tensão. Um sistema elétrico com alta capacidade de curto-circuito significa um sistema rígido, uma rede forte. Isto significa que a impedância em série vista pela fonte de energia é muito pequena, então as quedas de tensão nas impedâncias da linha são pequenas. Em suma, a corrente terá pouco impacto na tensão. Na Figura 1, a seguir, está um exemplo que ilustra esta ideia.

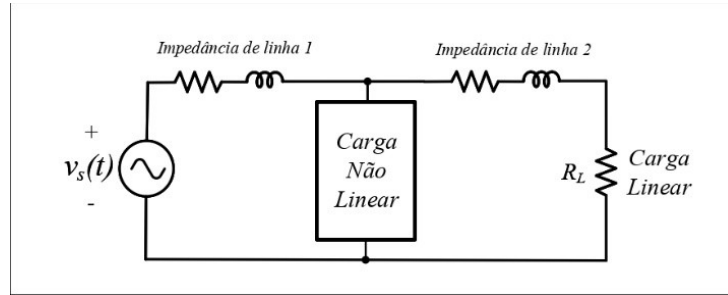


Figura 1 - Propagação de perturbação causada por cargas não lineares.

A carga não linear drena uma corrente, que é uma forma de onda distorcida. Por mais que a tensão da rede seja extremamente senoidal, mesmo uma onda senoidal pura, esta corrente ao passar pela impedância da linha causa uma distorção na tensão no nó em questão. Assim, mesmo que uma segunda carga em outro ramo seja puramente resistiva, sua corrente também será distorcida. Esta distorção será maior ou menor dependendo da magnitude da corrente drenada pela carga não linear e dependendo do valor absoluto da impedância da linha. Se essa impedância for alta, a queda de tensão nela será maior e, portanto, maior a distorção. Resumidamente, o impacto de uma carga não linear na degradação da qualidade da energia elétrica ocorre diretamente na corrente e indiretamente na tensão. A propagação de tais distúrbios ocorre por meio da tensão, uma vez que as correntes harmônicas podem fluir para qualquer parte de um sistema c.a. ao qual estejam conectadas, conforme determinado pelas impedâncias dos vários ramos do sistema na frequência harmônica.

#### 1.4 Impedância ativa

A impedância ativa se trata de uma mitigação distribuída de distorções harmônicas, a qual tem sido reportada em diversos trabalhos. Em [14], propuseram a aplicação de filtros ativos paralelos distribuídos controlados como condutâncias harmônicas. Já em [15], usaram desta mesma técnica com a finalidade de suprimir ressonâncias em sistemas industriais com capacitores de correção do fator de potência.

A tecnologia das impedâncias ativas consiste na síntese de componentes harmônicas de tensão controladas, por exemplo, em quadratura com as componentes harmônicas de correntes presentes na instalação, inserindo, neste caso, reatâncias nas frequências de interesse. Para isso, utiliza-se um compensador baseado em conversor estático de potência, cujo acoplamento com o sistema elétrico é feito magneticamente. Desta forma, tem-se o grande benefício da praticidade em inserir este compensador onde julgar que seja necessário no sistema para que este tenha o desempenho desejado, pois este se torna modular. É interessante ressaltar que esta técnica possui bastante versatilidade podendo, portanto, emular seja uma resistência, ou uma reatância indutiva ou capacitiva. Dependerá, basicamente, da defasagem entre tensão e corrente no enrolamento do conversor.

Esta tecnologia pode proporcionar uma infinidade de aplicações. No presente estudo, o benefício verificado foi o de melhoria do fator de potência e THD da rede por meio do roteamento harmônico. Inicialmente, teve-se como objetivo a análise de Fourier por FFT de um sistema de microrrede genérico, a fim de saber quais seriam seus harmônicos. A partir daí, emulam-se indutâncias nestas frequências específicas com o intuito de reduzir a corrente desses harmônicos na rede. A formulação matemática e algoritmo para tal são explicitados a seguir para uma das fases:

- Primeiramente, mede-se a corrente da rede elétrica;
- Faz-se a análise harmônica por meio de FFT para verificar quais harmônicos precisam ser compensados;
- Obtém-se a forma de onda destes harmônicos de interesse, assim como suas amplitudes ( $I_h(t)$ ).
- Depois, gera-se o sinal de derivada para cada um destes harmônicos;
- O próximo passo é fazer uma média ponderada a partir da máxima indutância ( $L_{máx}$ ) que o conversor em questão é capaz de emular. Assim, tendo este valor máximo, realiza-se a média ponderada entre a magnitude dos harmônicos a serem compensados, sendo que quanto maior sua amplitude, maior será a indutância correspondente. Supondo o interesse de compensar os harmônicos 3, 5 e 7, ter-se-ia:

$$L_h = \frac{I_h(t)}{I_3(t) + I_5(t) + I_7(t)} \cdot L_{máx} \quad (1)$$

- Por fim, determina-se a tensão correspondente a cada uma delas por meio da equação:

$$v_h = L_h \cdot \frac{di_h(t)}{dt} \quad (2)$$

## XXVI 2.0 ESTUDO DE CASO

Como estudo de caso, tem-se como base um circuito que foi desenvolvido em [16]. Este circuito se trata de um exemplo de microrrede trifásica centralizada, a qual possui as definições da Tabela 1 e pode ser vista na Figura 2.

Tabela 1 - Parâmetros elétricos da microrrede a ser estudada

Sistema	Características
Rede Elétrica	220V; 60Hz, $S_{cc} = 750\text{kVA}$ , $X/R = 0,5$
Carga Linear	220V; 35kVA; f.p. 0,73 atrasado
Carga Não Linear	220V; 30kW; $L_{ac} = 0,5\text{mH}$ ; $C_{NL} = 18,8\text{mF}$ ; $R_{NL} = 2,5\Omega$
Filtro Ativo	$f_c = 3840\text{Hz}$ ; $C = 45,5\mu\text{F}$ ; $L = 0,37\text{mH}$ ; $R = 49\text{m}\Omega$
Filtro Passivo	220V, 6kVAr 5h: $Q = 42$ ; $L = 2,7\text{mH}$ ; $C = 105\mu\text{F}$ 7h: $Q = 42$ ; $L = 1,3\text{mH}$ ; $C = 107\mu\text{F}$ 11h: $Q = 2,2$ ; $L = 0,5\text{mH}$ ; $C = 109\mu\text{F}$

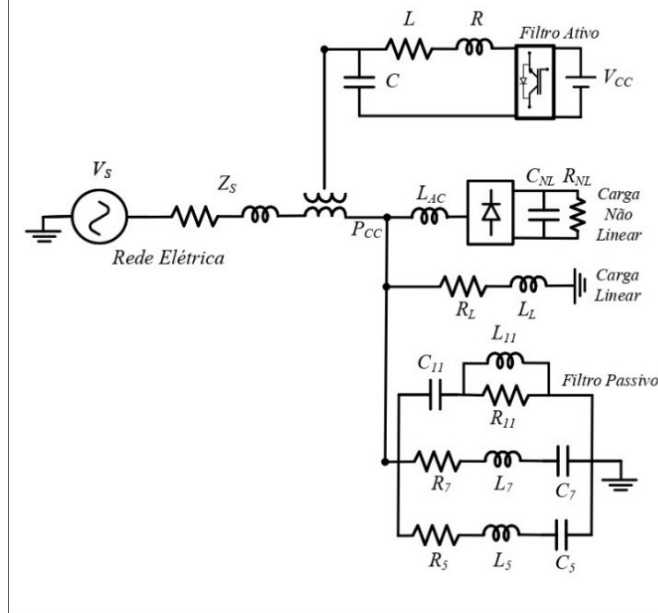


Figura 2 - Estrutura de microrrede centralizada trifásica equilibrada e a quatro fios. Adaptado de [16].

## XXVII 3.0 CONVERSOR

A potência nominal necessária para o funcionamento do filtro ativo é definida por [17] como:

$$|S_{AF}| = \sqrt{3} \cdot \frac{V_{DC}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{PF}}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

Onde:

- $V_{DC} = 400\text{V}$  – Tensão c.c. do filtro ativo;
- $I_{PF} = 8\text{A}$  – Corrente de pico do filtro ativo;
- $S_{AF} = 2,77\text{kVA}$  – Potência aparente do filtro ativo.

Para determinar a indutância máxima que o conversor é capaz de emular, utiliza-se da potência nominal anterior e se estima uma indutância emulada na frequência fundamental. Como parte da potência do conversor é destinada a suprir perdas do mesmo tanto em seus componentes quanto em seu chaveamento, arbitra-se que 80% de sua potência estaria disponível para a finalidade de interesse, assim:

$$L_{m\acute{a}x} = 0,8 \cdot \frac{V_f^2}{S_{AF}} \quad (4)$$

### 3.1 Projeto do filtro LC

Para que a tensão de saída do conversor seja senoidal é necessário utilizar no mínimo um filtro LC, de modo a eliminar o *ripple* do chaveamento. O filtro LC é de segunda ordem, com uma atenuação igual a 40dB/década, de modo que uma separação de uma década entre a frequência de corte e a frequência de chaveamento garanta uma saída livre do *ripple* de chaveamento [18]. A relação entre frequência de corte do filtro e os seus parâmetros é dada pela seguinte equação:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

Definida a frequência de corte do filtro LC, existe uma infinita variedade de valores de indutâncias e capacitâncias que podem satisfazer a equação anterior. Deve ser destacado que quanto maior o capacitor, melhor será a capacidade de filtragem da estrutura no modo fonte de tensão, mas haverá aumento na potência demandada do conversor eletrônico. Um critério de projeto geralmente adotado é limitar a corrente do ramo capacitivo do filtro LC entre 10 a 15% da corrente nominal do conversor [19]. A equação a seguir define o cálculo do capacitor do filtro.

$$C = \frac{kS_n}{6\pi f V_f^2} \quad (6)$$

Onde:

- $S_n = 2,77kVA$  – Potência trifásica do conversor (kVA);
- $V_f = 127V$  – Tensão de fase do conversor (V);
- $f = 60Hz$  – Frequência elétrica fundamental (Hz);
- $k = 0,1$  – Percentual de reativos do filtro LC.

Assim, definida a frequência de corte do filtro LC e com o valor calculado do capacitor, é possível calcular o valor do indutor e estes valores são encontrados anteriormente na Tabela 1.

### 3.2 Controle do conversor

Considerando o sistema em questão, a Figura 3 ilustra um típico diagrama de controle que pode ser aplicado em inversores que operam como filtro ativo. O diagrama pode ser aplicado em topologias monofásicas e trifásicas. O conversor opera em malha fechada, sendo que a malha de tensão possui, em paralelo, o controlador PI e o controle repetitivo (CR) e gera uma referência para a malha de corrente mais interna e mais rápida, a qual utiliza apenas um controlador proporcional. O diagrama convencional teria limitações devido às realimentações internas de  $I_o$  e  $V_o$  no inversor/filtro. Estas realimentações são negativas e, por essa razão, atuam em contraposição ao comando  $V_i$ , ou seja, no sentido de zerar a tensão de saída  $V_o$ . Além disso, variações bruscas na corrente de carga  $I_o$  são corrigidas pela malha de controle de corrente apenas a partir do momento em que causam variações na tensão de saída  $V_o$ , de forma que a dinâmica do sistema fica restrita à operação da malha de tensão. Nesse sentido, uma melhoria significativa do desempenho dessa malha de controle pode ser obtida a partir do aproveitamento das medições de  $I_o$  e  $V_o$  para compensação das realimentações internas [18]. A operação do inversor com frequência de chaveamento suficientemente alta (muito maior do que a frequência de  $I_o$  e  $V_o$ ) permite que se considere  $K_{inv} = 1$ .

Para garantir uma operação estável do CR é utilizado um filtro passa-baixa (FPB), de modo a adequar a faixa de passagem que o conversor pode operar [20]. O FPB escolhido é de segunda ordem e com uma frequência de corte igual à da malha de tensão, uma vez que é necessário, que o filtro possua frequência de corte inferior à frequência de corte da malha de corrente. Além disso, é necessário definir o ganho  $K_r$ , a fim de proporcionar junto da ação proporcional do controlador PI da malha de tensão rapidez em regime transitório. Contudo, altos valores deste ganho podem tornar a malha de controle instável. Assim, o seu valor deve ser o maior possível contanto que não cause instabilidade na malha de controle e nem a saturação do inversor PWM. Outro ponto que deve ser destacado é que o filtro deve possuir característica de fase nula, para não deslocar os polos do CR [21].

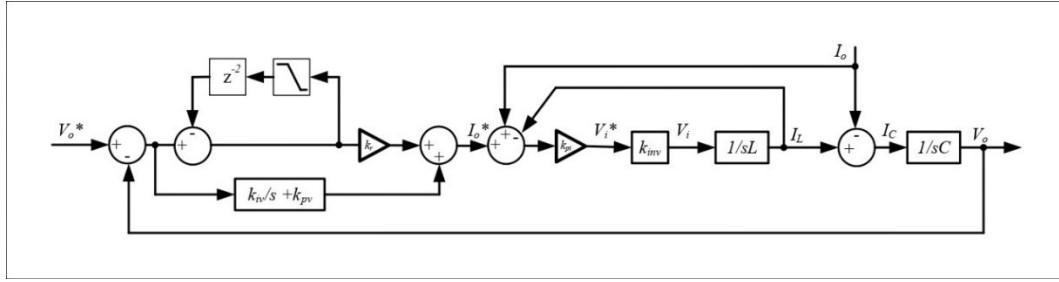


Figura 3 - Representação do sistema com compensação das realimentações internas.

Muitas técnicas de controle visam unicamente que a variável controlada siga um valor de referência. No entanto, é de extrema importância que se analise a capacidade do sistema rejeitar perturbações externas. Esta característica pode ser avaliada a partir da sua rigidez dinâmica, dada pela relação entre a corrente de carga  $I_o$  e a tensão de saída  $V_o$  quando a tensão na entrada é nula ( $V_o^* = 0$ ). Neste cálculo, considerou-se apenas os efeitos da resistência parasita do indutor. A função de transferência está a seguir:

$$\left. \frac{I_o}{V_o} \right|_{V_o^*} = - \frac{s^3 CL + s^2 CK_{pi} + sK_{pv}K_{pi} + K_{iv}K_{pi}}{s^2 L} \quad (7)$$

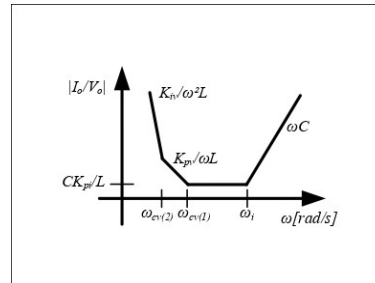


Figura 4 - Assíntotas na rigidez dinâmica. Adaptado de [18]

Tem-se, portanto, que  $\omega_i$ ,  $\omega_{v(1)}$  e  $\omega_{v(2)}$  (com  $\omega_i > \omega_{v(1)} > \omega_{v(2)}$ ) constituem as frequências dos zeros da função da rigidez dinâmica  $|I_o/V_o|$ . Para que não haja degradação da dinâmica dos controladores projetados para frequências de chaveamento menores, a frequência do polo  $\omega_i$  é atribuída a um valor 5 vezes menor do que a frequência de chaveamento  $\omega_{ch}$ . A razão entre os polos adjacentes é também arbitrada em 5, para que a rigidez dinâmica em frequências da ordem de 60Hz fosse mais elevada [22]. Este critério de alocação é sumarizado na Tabela 2.

Tabela 2 - Alocação de polos e frequências de interesse

Grandeza	Valor
Frequência de chaveamento ( $f_{ch}$ )	24kHz
Frequência de chaveamento ( $\omega_i$ )	4,8kHz
Frequência do 2º polo da malha de tensão ( $\omega_{v(1)}$ )	960Hz
Frequência do 1º polo da malha de tensão ( $\omega_{v(2)}$ )	192Hz
Frequência de corte do filtro LC ( $f_c$ )	3,84kHz

Para o cálculo dos ganhos vistos na Figura 4, foram utilizadas as seguintes equações vistas em [23]. Um resumo com os ganhos dos controladores pode ser visto na Tabela 3.

$$K_{pi} = \omega_{ci} L \quad (8)$$

$$K_{pv} = (\omega_{cv(1)} + \omega_{cv(2)}) C \quad (9)$$

$$K_{iv} = \omega_{cv(1)} \omega_{cv(2)} C \quad (10)$$

Tabela 3 - Ganhos dos controladores

Ganho	Valor
$K_{pi}$	11
$K_{pv}$	0,3

$K_{iv}$	331
$K_r$	3,5

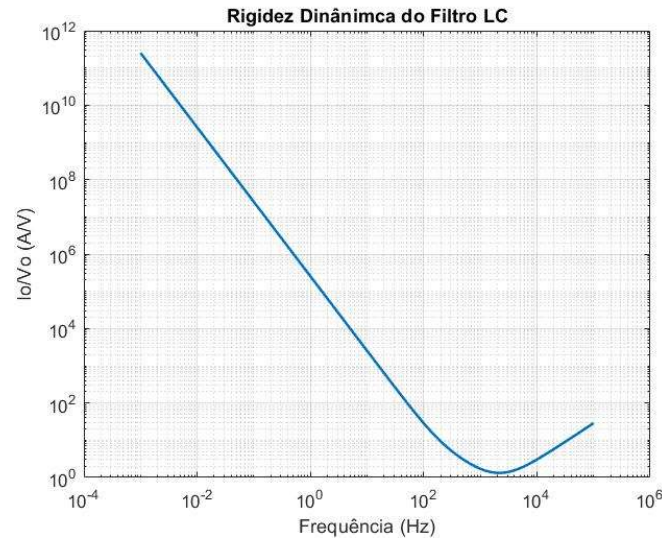


Figura 5- Rigidez dinâmica da tensão de saída  $V_o$  frente as perturbações na corrente de carga  $I_o$

#### XXVIII 4.0 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

As impedâncias ativas explicadas anteriormente foram inseridas no circuito da Figura 2 sendo um conversor monofásico por fase. Os harmônicos escolhidos para serem emulados foram o 3, 5, 7, 9, 11 e 13. Para que fosse possível verificar o THD das tensões e correntes antes do roteamento harmônico e após, foi estipulado um *delay* de 0,15s para que os conversores começassem então a atuar. Antes deste tempo, os conversores não influenciam no funcionamento do circuito. As Figuras 6 – (a) e (b) trazem a FFT da corrente na fase A no filtro passivo. Já a Figura 7 traz as formas de onda para o THD de corrente e tensão entre o transformador de acoplamento e o PCC. A Tabela 4 traz um comparativo entre a FFT antes e após a compensação, enquanto a Tabela 5 traz um comparativo entre os THDs. Toda a simulação e resultados aqui em evidenciados foram obtidos nos softwares *Matlab®* e *Simulink®*.

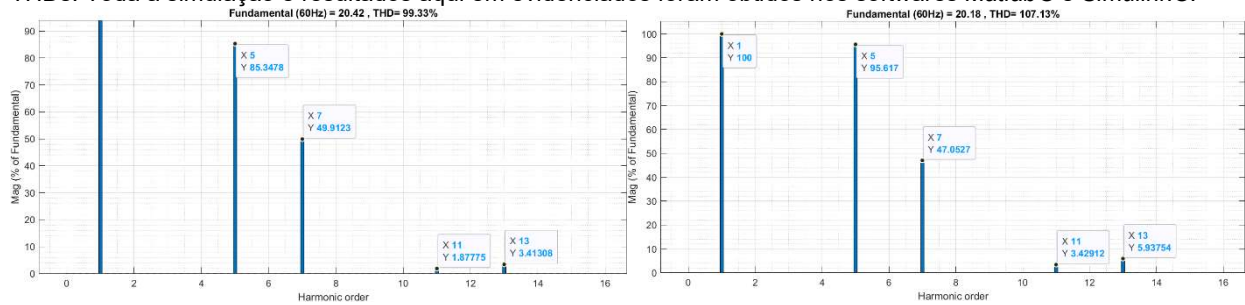


Figura 6 - (a) FFT filtro passivo antes do roteamento harmônico      Figura 6 - (b) FFT filtro passivo após roteamento harmônico

Tabela 4 - Magnitude dos harmônicos 5, 7, 11 e 13 no filtro passivo antes e após inserção das impedâncias ativas no PCC

	Mag. antes	Mag. depois
5°	85,3478	95,617
7°	49,9123	47,0527
11°	1,87775	3,42912
13°	3,41308	5,93754



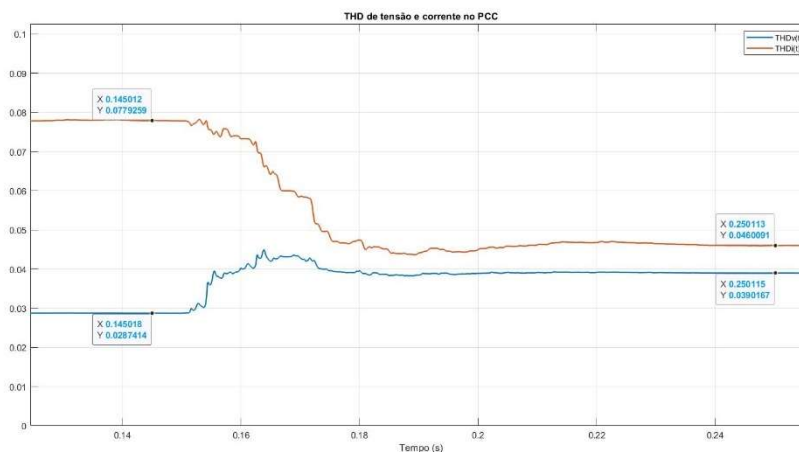


Figura 7 - THDv e THDi no PCC antes e após inserção das impedâncias ativas

Tabela 5 - THDv e THDi no PCC antes e após inserção das impedâncias ativas

	Antes	Depois
THDv	2,87%	3,90%
THDi	7,79%	4,60%

As Figuras 6 (a) e (b), além da Tabela 4, trazem um resultado muito importante, o qual se trata do aumento da magnitude destes harmônicos no filtro passivo do sistema presente na Figura 2. Desta forma, a utilização desta espécie de filtro híbrido contemplado pelo filtro passivo e pelas impedâncias ativas funcionam de maneira bastante satisfatória com o intuito de deixar a rede elétrica mais resistente quanto às distorções na corrente. Enquanto as impedâncias ativas bloqueiam que os harmônicos das cargas alcancem a rede elétrica, o filtro passivo atua como um sorvedouro, um caminho preferencial, para tais harmônicos. Outro resultado interessante decorrente do uso desta tecnologia é verificado na Figura 7 e Tabela 5 ao se observar o THD no PCC. Nota-se que este ramo teve sua THDi reduzida a quase que metade de seu valor inicial, enquanto que seu THDv teve um ligeiro aumento. Para este último, a explicação se deve justamente devido às tensões inseridas no sentido de emular impedâncias ativas deformarem levemente as tensões no circuito. Portanto, tem-se uma relação de *tradeoff* em seu projeto.

## XXIX 5.0 CONCLUSÕES

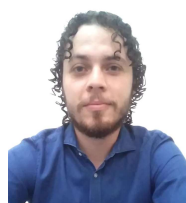
O conceito e a aplicação de impedâncias ativas em um sistema não são novos, mas sempre é válido dar um novo olhar para outras possibilidades, uma vez que podem fornecer soluções diferentes e interessantes em outros cenários. Tal aplicação estudada aqui se mostrou atraente do ponto de vista de possibilitar a melhora no fator de potência, uma vez que se faz o roteamento harmônico inteligente e resulta em melhora nos níveis de distorção harmônica da corrente na rede elétrica decorrentes da variedade de cargas que estejam sendo alimentadas por ela.

## XXX 6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ROGERS, K. M.; OVERBYE, T. J. Power flow control with Distributed Flexible AC Transmission System (D-FACTS) devices. *41st North American Power Symposium, NAPS 2009*, IEEE, v. 61801, 2009.
- (2) JARDIM FRANÇA, G.; DE JESUS CARDOSO FILHO, B. Series-shunt compensation for harmonic mitigation and dynamic power factor correction. *Eletrônica de Potência*, v. 17, n. 3, p. 641–650, 2012. ISSN 14148862.
- (3) PIRES, I. A.; FRANYA, G. J.; CARDOSO, B. J. for Harmonic Mitigation in Commercial Facilities, 2014.
- (4) N. HATZIARGYRIOUA, H. ASANOB, R. I.; MARNAY, C. Smart metering and infrastructure. *Microgrids: an overview of ongoing research, development, and demonstration projects*, n. July 2007, p. 399–420, 2007.
- (5) FALCÃO, D. M. Smart Grids E Microredes : O Futuro Já É Presente. *VIII Simpase*, p. 1–11, 2009.
- (6) DE SOUZA RIBEIRO, L. A. ET AL. Isolated micro-grids with renewable hybrid generation: The case of Lençóis island. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v. 2, n. 1, p. 1–11, 2011. ISSN 19493029.
- (7) ISRAEL RESENDE ALVES RODRIGUES. Estudo de proteção elétrica de uma microrrede baseada na rede de 34 barras do IEEE, 2017. Disponível em: <<https://www.pggee.ufmg.br/defesas/1366M.PDF>>.



- (8) CELPE. [www.celpe.com.br](http://www.celpe.com.br) 1. 2019. Disponível em: <[https://www.cinase.com.br/wp-content/uploads/2019/10/Caso-Fernando-de-Noronha\\_CELPE\\_compressed-2.pdf](https://www.cinase.com.br/wp-content/uploads/2019/10/Caso-Fernando-de-Noronha_CELPE_compressed-2.pdf)>.
- (9) ANDREI, H. ET AL. Electrical power systems. *Power Systems*, p. 3–47, 2017. ISSN 18604676.
- (10) ANEEL. Nota técnica 0083/2012. p. 19, 2012. Disponível em: <<https://silo.tips/download/nota-tecnica-n-0083-2012-srd-aneel-em-12-de-junho-de-processo>>.
- (11) FAU; UFU. Relatório Técnico 3/8 Definição de procedimentos de medição, distorções harmônicas, desequilíbrios de tensão, flutuações de tensão e variações de tensão de curta duração, 2014.
- (12) IEEE. 100-1996 - The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms Sixth Edition. *Standard Dictionary*, v. 6th edition, 1996.
- (13) BANTRAS, T. ET AL. Estimation and classification of power losses DUE to reduced Power Quality. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, IEEE, n. 1, p. 1–6, 2012. ISSN 19449925.
- (14) CHENG, P., AND LEE, T., “Distributed Active Filter Systems (DSFSs): A New Approach to Power System Harmonics”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 42, no. 5, Sept./Oct., 2006.
- (15) KUO, S., LEE, T., CHEN, C., CHENG, P., AND PAN, C., “Distributed Active Filters for Harmonic Resonance Suppression in Industrial Facilities”, *Proceedings of Power Conversion Conference*, April 2007.
- (16) ANTUNES, HÉLIO MARCOS ANDRÉ ET AL. Harmonic compensation using a series hybrid filter in a centralized AC microgrid. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, v. 29, n. 2, p. 219-229, 2018.
- (17) AKAGI H (2005) Active harmonic fillters. *Proceedings of the IEEE* 93(12):2128-2141.
- (18) SILVA, S. M. *Estudo e Projeto de um Restaurador Dinâmico de Tensão*. 215 p. Dissertação (Mestrado) — PPGEE-UFMG, Agosto 1999.
- (19) SILVA, S. M.; FILHO, B. Component-minimized voltage sag compensators. In: *CONFERENCE RECORD OF THE IEEE INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 2, p. 883–889.
- (20) CHEN, S. ET AL. Analysis and design of repetitive controller for harmonic elimination in pwm voltage source inverter systems. *IET Power Electronics*, IET, v. 1, n. 4, p. 497–506, 2008.
- (21) SILVA, A. F. B. O. *Aplicação de controle repetitivo em inversor PWM monofásico com filtro LC de saída utilizado em fonte programável C.A.* 71 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica UFSJ/CEFET-MG, Agosto 2012.
- (22) COTA, ANNA PAULA LEITE. Desenvolvimento de ferramentas computacionais para a análise de perdas em conversores estáticos: aplicação ao cálculo de rendimento de UPSs trifásicas de dupla conversão. 2016.
- (23) ANTUNES, HÉLIO MARCOS ANDRÉ. Conversor multifuncional reconfigurável e tolerantes a falhas para microrredes de energia elétrica. 2018.



Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais com ênfase em Eletrônica de Potência e Sistemas de Energia Elétrica (2018), além de Técnico em Eletrotécnica pelo Instituto Federal do Espírito Santo (2012). Experiência em conversores estáticos de potência e seu controle aplicado à área automotiva 48-12V estagiando na Infineon Technologies, França (2016). MBA em Gestão Empresarial pela Faculdade Multivix (2019). Experiência como Analista de Projetos no setor fotovoltaico (2020). Atualmente, mestrando em Engenharia Elétrica na ênfase de Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade da Energia Elétrica pela UFMG, pós-graduando em Engenharia de Segurança do Trabalho e Análise de Dados.

- (2) HÉLIO MARCOS ANDRÉ ANTUNES  
Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Viçosa (2007) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo (2009). É doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade

Federal de Minas Gerais (2018). Atualmente é professor adjunto II na Universidade Federal do Espírito Santo. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: Qualidade de Energia Elétrica, Sistemas Elétricos de Potência, Filtros Híbridos, Filtros Ativos, Filtros Passivos, Cicloconvertidores, Microrredes de Energia elétrica e Simulação Hardware-in-the-Loop.

(3) SIDELMO MAGALHÃES SILVA  
 Sidelmo M. Silva possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (1997 - Medalha de Ouro, 1999 e 2003). De outubro de 2001 a agosto de 2002, trabalhou no Departamento de Desenvolvimento de Produtos da ABB, na Suíça, onde atuou no desenvolvimento de equipamentos para aplicações em Qualidade da Energia Elétrica. Entre agosto de 2017 a julho de 2018, o professor Sidelmo M. Silva realizou pós-doutorado na University of Wisconsin-Madison, EUA, em microrredes de energia elétrica. Atualmente é Professor Associado do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG onde atua em cursos de graduação e pós-graduação.