

# COMPENSAÇÃO DISTRIBUÍDA DE HARMÔNICOS EM MICRORREDES MONOFÁSICAS DE BAIXA TENSÃO

AUGUSTO M. S. ALONSO, FERNANDO P. MARAFÃO

*Grupo de Automação e Sistemas Integráveis, Universidade Estadual Paulista  
18087-180, Sorocaba, São Paulo, Brasil*

*E-mails: augusto.alonso@unesp.br, fmarafao@sorocaba.unesp.br*

DANILO I. BRANDÃO

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais  
31270-901, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil*

*E-mail: dibrandao@ufmg.br*

ELISABETTA TEDESCHI

*Department of Electric Power Engineering, Norwegian University of Science & Technology  
NO-7491, Trondheim, Norway*

*E-mail: elisabetta.tedeschi@ntnu.no*

**Abstract**— Multifunctional inverters have been playing a key role in applications related to power quality improvement in modern energy microgrids, particularly due to their capability to be employed on ancillary services, such as reactive power support and harmonic compensation. Such additional services are particularly interesting in scenarios of weak grids, which are known to suffer with the presence of heavy distorted currents and voltages drawn by nonlinear loads. Moreover, with the smart grid perspective rising as a trend in this new energy paradigm, the coordination of every inverter spread over microgrids becomes crucial. Therefore, this work proposes a hierarchical control approach capable of cooperatively controlling distributed multifunctional inverters in single-phase low-voltage microgrids, by means of a current sharing technique based on peak currents terms. Such methodology allows accurate sharing of active, reactive parcels, also selectively providing distributed harmonic compensation respecting the physical limitations of all inverters. Simulations are presented aiming at showing the operation of the methodology under different operational goals and under sinusoidal or distorted grid voltage conditions.

**Keywords**— Cooperative control, harmonic compensation, multifunctional inverter, power quality, power sharing.

**Resumo**— Inversores multifuncionais têm se tornado uma alternativa promissora em aplicações relacionadas à melhoria de qualidade de energia em microrredes, especialmente devido à capacidade de prover serviços auxiliares, tal como suporte à injeção de potência reativa e compensação harmônica. Estas multifuncionalidades são ainda mais interessantes em cenários de microrredes fracas de energia, que são amplamente conhecidas por sofrerem instabilidades operacionais na presença de carga não lineares que drenam correntes altamente distorcidas. Ademais, seguindo a tendência de operação integrada e harmoniosa dos dispositivos aplicados às redes inteligentes de energia, torna-se essencial buscar alternativas para a operação coordenada de cada inversor distribuído dentro da microrrede. Portanto, este trabalho propõe uma metodologia de controle cooperativo de inversores multifuncionais distribuídos em microrredes monofásicas de baixa tensão, a qual se baseia em termos de pico de corrente. Esta abordagem tem a capacidade de propiciar compartilhamento de correntes ativa e reativa, e ainda, compensação distribuída e seletiva de harmônicos respeitando as capacidades individuais de cada inversor. Resultados de simulação são apresentados para fins de validação da metodologia proposta, considerando diferentes objetivos operacionais, tal como em cenários com tensão distorcida no ponto de acoplamento comum da microrrede.

**Palavras-chave**— Compensação harmônica, compartilhamento de potência, controle cooperativo, inversores multifuncionais, qualidade de energia.

## 1 Introdução

Com o uso cada vez mais intenso de fontes alternativas e renováveis de energia, recursos energéticos distribuídos (RED) têm se proliferado em redes elétricas, propiciando um novo paradigma advindo da possibilidade de fluxo bidirecional de energia, maior integração entre elementos ativos e agregação de inteligência aos dispositivos envolvidos (Khodaei, 2015). Incorporado a esta concepção inteligente de sistemas elétricos, conversores CC-CA se evidenciam devido à sua indispensável presença em múltiplas topologias de geradores distribuídos (GD) pertencen-

tes a REDs, e ainda à sua fácil adaptabilidade operacional. Ademais, além de atuarem fundamentalmente como fornecedores de potência ativa, sua extensão à multifuncionalidade (Yang, 2016) tem fortalecido a existência de tais dispositivos em redes elétricas modernas. O emprego de multifuncionalidades em inversores torna adicionalmente possível empregá-los, de forma flexível (Teke, 2014), em serviços auxiliares de melhoria de qualidade de energia ou suporte à rede, tal como oferecimento de potência reativa e compensação de harmônicos (Gaona, 2017).

De forma particular, a existência de níveis significativos de distorção harmônica em correntes e ten-

sões é amplamente conhecida por diversas possíveis consequências indesejáveis, tal como ressonância de capacitores, sobreaquecimento e perda de torque em máquinas elétricas, falso desarmamento de chaves de proteção, entre outros (Arrilaga, 2004). Um caso mais crítico da existência de harmônicos é referente ainda a cenários de redes fracas de energia (Rocabert, 2012), assim como em microrredes de baixa tensão, as quais devem prover operacionalidade robusta, sob condições intermitentes de demanda de carga, durante modos ilhado ou conectado a uma rede principal.

Como consequência, compensação de reativos e harmônicos tem sido explorada em microrredes, sendo primariamente proposta e realizada através de aplicações de filtros passivos ou ativos de potência (FAP), evoluindo de um panorama local (Akagi, 1996), para aplicações radiais (Akagi, 1997), e então descentralizadas (Cheng, 2006), assim como exemplificado na Figura 1. Ainda, uma vez que inversores multifuncionais (IM) são inerentes a REDs, o emprego auxiliar destes dispositivos em tais operacionalidades de condicionamento de energia tem crescido e se mostrado significativamente mais flexível e atrativo economicamente em cenários distribuídos (Kroposki, 2016). Em contrapartida, o controle coordenado de IMs é fundamental para adequada operacionalidade da microrrede, propiciando que cada elemento não interfira nas funcionalidades locais de operação de outros e todos cooperem para um objetivo global.

Devendo ser robustas a condições intermitentes de oferecimento de energia e demandas variáveis de cargas, e ainda a interações dinâmicas entre fases e nós dentro uma microrrede, metodologias hierárquicas de coordenação de agentes distribuídos, visando o mencionado controle cooperativo de IMs, vêm sendo propostas, de forma generalizada, sob perspectivas de gerenciamento centralizadas ou descentralizadas (Han, 2017; Guerrero, 2011).

Abordagens de coordenação descentralizada têm sido amplamente discutidas na literatura (Golsorkhi, 2017; He, 2017), especialmente baseadas em metodologias de controle *droop*, as quais operam IMs como fonte de tensão, emulando geradores síncronos. Embora tal método apresente vantagens dadas principalmente pela operação autônoma, independente de comunicação, suas principais desvantagens são com relação ao compromisso entre precisão do compartilhamento de potências e regulação de tensão e frequência na rede, necessidade de prévio conhecimento de parâmetros físicos da rede e respostas transitórias relativamente lentas (Guerrero, 2011). Algumas metodologias adaptadas (Sreekumar, 2016) têm, entretanto, sido apresentadas buscando tais melhorias.

Arquiteturas hierárquicas centralizadas (Hen, 2016), por sua vez, se baseiam na existência de um controlador central/mestre (CC), o qual coordena dispositivos escravos, caracterizados por REDs com módulos de comunicação integrados a seus IMs. Metodologias como o algoritmo *Power-Based Control* (PBC) (Caldognetto, 2015) são um exemplo de tal

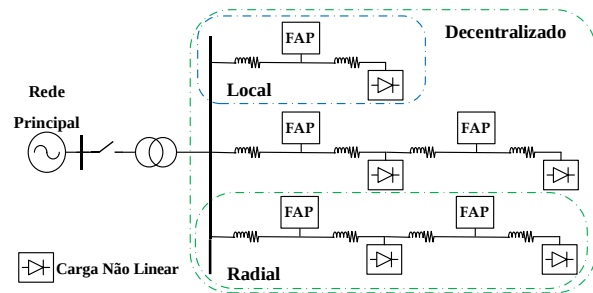


Figura 1. Evolução das metodologias de controle de FAPs.

caso, propiciando o compartilhamento de potência ativa e reativa entre diversos REDs sem requerer conhecimento de parâmetros físicos da microrrede. Ainda, apenas realizando intercâmbio de informações com quantidades mínimas de dados de estado entre REDs (IMs) e CC. Entretanto, como desvantagem, o PBC não se apresenta capaz de prover o compartilhamento de termos harmônicos de corrente circulantes na microrrede.

Metodologias de controle cooperativo hierárquico têm sido apresentadas à literatura baseadas fundamentalmente na análise de compartilhamento de termos de potências entre os IMs distribuídos (Han, 2017). Embora estudos recentes tenham buscado realizar abordagens com base em parcelas de corrente (Mousavi, 2018), nenhuma metodologia totalmente fundamentada em tais termos é encontrada. Ademais, seletividade na compensação distribuída de harmônicos e mútuo controle do fluxo de correntes no ponto de acoplamento comum (PAC) não foi demonstrada na literatura.

Uma abordagem hierárquica para a coordenação de inversores distribuídos em microrredes monofásicas de baixa tensão é apresentada neste trabalho, totalmente baseada em termos de pico de corrente, com o objetivo de propiciar o compartilhamento de correntes ativa, reativa e componentes harmônicas de forma seletiva. A metodologia é ainda capaz de prover balanceamento do esforço térmico de cada IM distribuído, respeitando suas limitações físicas operacionais, e propiciando controle sob a circulação de parcelas de corrente no PAC de uma microrrede. Ressalta-se que, devido a este trabalho ser direcionado a aplicações em microrredes monofásicas, não objetiva-se realizar compensação de desbalanços ou componentes de sequência. Estas considerações serão alvo de estudos posteriores.

Seguindo tais premissas, a Seção II deste trabalho apresenta a topologia hierárquica adotada no desenvolvimento da arquitetura centralizada de controle, bem como suas respectivas premissas operacionais. A Seção III apresenta a metodologia de controle cooperativo proposta e suas aplicações. Na Seção IV uma validação através de simulações computacionais é apresentada, demonstrando a operacionalidade do algoritmo de controle sob diversas condições operacionais. Uma conclusão finaliza as discussões sobre o trabalho.

## 2 Arquitetura de Controle Hierárquico Adotada

Arquiteturas de gerenciamento hierárquico de microrredes são fundamentas por camadas de controle que apresentam funcionalidades e responsabilidades distintas umas das outras, com relação à operacionalidade da rede e os dispositivos inseridos no seu contexto. Camadas primárias, particularmente no escopo deste trabalho, são responsáveis pelo gerenciamento local de quantidades elétricas e funcionalidades dos IMs ativos da rede. Exemplos de tais operações são dados pelos laços de controle de tensão e corrente do inversor, procedimentos de sincronização com a rede principal, algoritmos de MPPT, anti-ilhamento e diversas outras (Yang, 2016). Ressalta-se também que o gerenciamento do oferecimento de serviços ancilares também se enquadra nesta camada.

A camada secundária de controle aqui proposta é composta basicamente pelo algoritmo de controle coordenado de IMs distribuídos. Esta proposta, denominada Controle Fundamentado em Correntes de Pico (CFCP), a qual é apresentada detalhadamente na Seção III, baseia-se em termos de magnitude de correntes que fluem pelo PAC e nos nós de cada IM ativo conectado à microrrede. Assim como mostrado na Figura 2, esta camada secundária está inserida no controlador central (CC) da microrrede, o qual geralmente está instalado próximo ao PAC, sendo responsável por estabelecer coeficientes de controle que coordenam, de forma proporcional, a camada primária quanto à injeção de correntes ativa, reativa e harmônicas sintetizadas pelos IMs.

Note que outra importante característica desta arquitetura é a necessidade da existência de um conversor formador de rede no PAC. Tal conversor interativo (Brandao, 2015) pode também participar como um elemento ativo no compartilhamento de correntes da microrrede, e tem como principal função agir como conversor formador de rede em casos de operação ilhada. Esta topologia dá suporte à coordenação dos IMs, que por sua vez são modelados como fontes de corrente, a fim de seguir a diretriz de inversores atualmente comercializados (Rocabert, 2012) e minimizar impactos de desvios de tensão e frequência ocasionados, por exemplo, por inversores operando como fonte de tensão, como os controlados por *droop*.

Por fim, a camada terciária é dada por um supervisor da microrrede, o qual estabelece as ofertas de corrente no PAC e os requerimentos operacionais de toda a microrrede. Por exemplificação, estabelece-se o operador central de uma concessionária de energia como tal gerenciador desta camada mais elevada.

## 3 Controle Fundamentado em Correntes de Pico

A metodologia do CFCP pode ser genericamente dividida em três etapas principais de operação que se baseiam em, respectivamente: 1) avaliações locais de

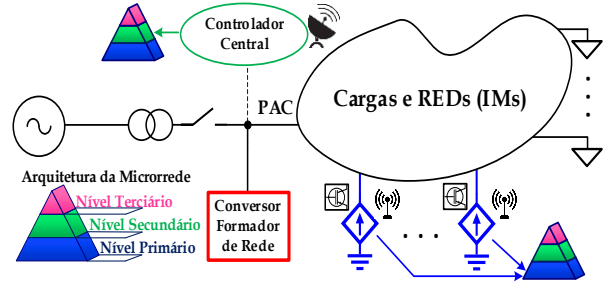


Figura 2. Arquitetura de microrrede hierárquica adotada.

quantidades elétricas e técnicas de sincronismo nodal; 2) procedimentos relacionados à aquisição e transmissão de dados entre os elementos ativos da microrrede; 3) processamento de informações globais junto à delegação de coeficientes de controle aos elementos distribuídos.

### 3.1 Avaliação Local de Quantidades Elétricas

Em cada nó ativo da microrrede, i.e., PAC e outros nós onde existam IMs ativos à cooperação proposta, medições de tensão e corrente locais são realizadas para suprimento de referências necessárias à camada primária de operação. Inicialmente, cada IM usa a referência nodal de tensão ( $v_{nó,n}$ ) no processamento local de um algoritmo de sincronismo com a rede principal, ou referência imposta pelo conversor formador de rede quando em modo ilhado. Tal processamento é realizado por meio de um algoritmo *phase-locked loop* (PLL), o qual possibilita a obtenção do ângulo de sincronismo da componente fundamental ( $\theta_1$ ). Consequentemente, através do cálculo respectivo de cossenos e senos, é possível sintetizar sinais unitários em fase ( $x_{h||}$ ) ou em quadratura ( $x_{h\perp}$ ), para cada componente harmônica ( $h$ ) desejada, com referência a  $v_{nó,n}$  e a  $\theta_h = h \cdot \theta_1$ .

Em posse das referências unitárias sincronizadas,  $x_{h||}$  e  $x_{h\perp}$ , e também baseando-se na medição de corrente local ( $i_{nó,n}$ ), os valores de pico (magnitude) de qualquer respectiva componente harmônica em fase ( $I_{h||}$ ) e em quadratura ( $I_{h\perp}$ ) podem ser obtidos por meio de uma transformada rápida de Fourier (FFT), a qual é aqui realizada por meio de filtros de média móvel (MAF – *moving average filter*) com relação ao período  $T$  do sinal fundamental, assim como apresentado em (1.a) e (1.b). Qualquer parcela de corrente local pode ser restaurada no domínio do tempo por (2), e consequentemente pode ser adotada para geração de referências locais de controle para os IMs através de (3).

$$I_{h||} = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T i_{nó,n} \cdot x_{h||} \cdot dt \quad (1.a)$$

$$I_{h\perp} = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T i_{nó,n} \cdot x_{h\perp} \cdot dt \quad (1.b)$$

$$i_{h||} = I_{h||} \cdot x_{h||} \quad (2.a)$$

$$i_{h\perp} = I_{h\perp} \cdot x_{h\perp} \quad (2.b)$$

$$i^* = \sum_{h=1,3,5,\dots}^H i_h \quad (3)$$

### 3.2 Aquisição e Transmissão de Dados

Sabendo que o CFCP se baseia em uma arquitetura centralizada mestre/escravo, é necessário que as informações requeridas para o processamento da metodologia cooperativa sejam transmitidas de cada nó ativo local para o controlador central. Dessa forma, periodicamente, cada IM “ $n$ ” transmite as seguintes quantidades ao CC:

- Capacidade nominal de corrente de pico do conversor ( $I^{fn}_{nom}$ );
- Máxima corrente que pode ser gerada no atual ciclo de controle pelo conversor ( $I^{fn}_{max}$ ), uma vez que tais dispositivos são integrados a DERs;
- Valores de pico das componentes de corrente sendo atualmente injetadas pelo IM ( $I^{fn}_{h||}$  e  $I^{fn}_{h\perp}$ ).

Em posse de tais informações, juntamente com as referências de corrente global requisitada no PAC ( $I^{PAC}_{h||}$  e  $I^{PAC}_{h\perp}$ ) e imposta pelo gestor da microrrede (i.e., camada terciária), o algoritmo de coordenação será processado na camada secundária e o CC transmitirá, através do barramento de comunicação, os coeficientes de controle globais ( $\alpha^*_{h||}$  e  $\alpha^*_{h\perp}$ ) que escalam a participação dos IMs.

### 3.3 Processamento de Dados e Delegação de referências

Este estágio da metodologia de controle ocorre no CC, o qual processa as informações advindas dos  $n$  IMs distribuídos com base nos objetivos operacionais da microrrede a cada ciclo de controle “ $k$ ”. Em tais instantes periódicos, o CC necessita saber qual a capacidade nominal total de corrente dos IMs ( $I^{fn}_{nom}$ ), tão bem quanto à máxima quantidade de pico corrente que pode ser disponibilizada para injeção na microrrede ( $I^{fn}_{max}$ ), e ainda o valor de total de pico de corrente que os IMs atualmente injetam para cada termo harmônico em fase ( $I^{fn}_{h||}$ ) e em quadratura ( $I^{fn}_{h\perp}$ ). Cada uma destas quantidades é calculada, respectivamente, por (4), (5) e (6).

$$I^{ft}_{nom} = \sum_{n=1}^N I^{fn}_{nom}(k) \quad (4)$$

$$I^{ft}_{max} = \sum_{n=1}^N I^{fn}_{max}(k) \quad (5)$$

$$I^{ft}_{h||} = \sum_{n=1}^N I^{fn}_{h||}(k) \quad (6.a)$$

$$I^{ft}_{h\perp} = \sum_{n=1}^N I^{fn}_{h\perp}(k) \quad (6.b)$$

Paralelamente, sabe-se que analisando a corrente nodal no PAC, com referência a cada componente harmônica “ $h$ ”, a corrente de pico de referência a ser compartilhada pelos IMs da microrrede no ciclo de controle  $k+1$  é dada por (7). Note que  $I^{PAC*}_{h||}(k+1)$  e  $I^{PAC*}_{h\perp}(k+1)$  são os termos de referência advindos da terceira camada hierárquica.

$$I^*_{h||}(k+1) = I^{PAC}_{h||}(k) + I^{ft}_{h||}(k) - I^{PAC*}_{h||}(k+1) \quad (7.a)$$

$$I^*_{h\perp}(k+1) = I^{PAC}_{h\perp}(k) + I^{ft}_{h\perp}(k) - I^{PAC*}_{h\perp}(k+1) \quad (7.b)$$

Com base nestas correntes de referência, variáveis que escalam a proporção de atuação de cada IM, com referência a cada ordem harmônica, são determinadas por (8). Como os termos de pico de corrente, em fase e em quadratura, são advindas de quantidades ortogonais, a capacidade total de corrente atual dos IMs ( $AI$ ) é obtida por uma soma fasorial destes componentes. Ainda, percebe-se que, para evitar que sobrecorrentes ocorram no sistema controlado, é necessário que  $AI$  seja recalculado recursivamente após cada atribuição de proporção de injeção de um termo de corrente. Os termos  $\alpha^*$  podem assumir valores entre -1 e +1, correspondendo, por exemplo, à injeção ou absorção/armazenamento de corrente ativa (para o termo fundamental em fase), ou injeção de corrente reativa com característica indutiva ou capacitiva (termo fundamental em quadratura).

$$\alpha^*_{h||} = \frac{I^*_{h||}(k+1)}{\sqrt{\Delta I}} \quad (8.a)$$

$$\alpha^*_{h\perp} = \frac{I^*_{h\perp}(k+1)}{\sqrt{\Delta I}} \quad (8.b)$$

Dessa forma, finalmente, quando estes coeficientes de escala são transmitidos aos IMs e processados localmente, uma injeção proporcional às capacidades de operação de cada elemento “ $n$ ” pode ser obtida por (9). Note que, localmente, a capacidade de corrente atual ( $AI^n$ ) deve também ser calculada recursivamente.

$$i^* = \sum_{h=1,3,5,\dots}^H [(\alpha^*_{h||} \cdot \sqrt{\Delta I^n}) \cdot x^n_{h||} + (\alpha^*_{h\perp} \cdot \sqrt{\Delta I^n}) \cdot x^n_{h\perp}] \quad (9)$$

Devido ao fato de IMs estarem primariamente presentes em redes de energia para injeção de corrente ativa advinda da geração de seus REDs, este termo tem preferência durante o processamento do algoritmo. Dessa forma, a capacidade remanescente do IM então é empregada sequencialmente em atividades de compensação de reativos e harmônicos até que a limitação nominal do conversor seja atingida. Entretanto, o algoritmo é flexível ao ponto de suportar qualquer outra lógica sequencial na alocação de injeção de termos de correntes.

Com relação à implementação prática do algoritmo CFCP, tratando-se da capacidade requerida de processamento computacional, destaca-se que os filtros de média móvel (MAFs) propostos devem ser implementados nos processadores digitais (DSP) de cada IM, tão bem quanto em um DSP independente, o qual é responsável pelos cálculos do CC. Requer-se que, em cada processador, um vetor de média móvel seja implementado para cada parcela de componente harmônica, em fase ou quadratura, a ser compartilhada. Como consequência desta abordagem, nota-se que a complexidade computacional do algoritmo CFCP é proporcional ao tamanho da janela dos MAFs.

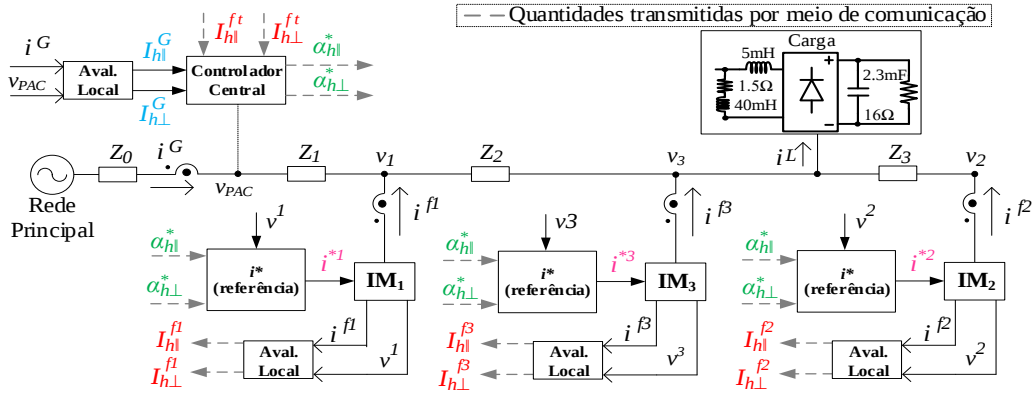


Figura 3. Infraestrutura de microrrede adotada para validação por meios de simulação

#### 4 Simulações de Controle Cooperativo de IMs Visando Compensação Distribuída de Harmônicos

##### 4.1 Infraestrutura de Microrrede e Parâmetros de Projeto dos Inversores

Uma microrrede monofásica, com condição nominal de tensão igual a  $127V_{rms}$  e frequência  $f_0=60$  Hz, foi adotada como ambiente experimental para as simulações propostas, sendo ainda apresentada na Figura 3. Note que, para as análises aqui discutidas, uma infraestrutura em modo de conexão à rede é apresentada com o intuito de enaltecer a funcionalidade de controle de fluxo de correntes no PAC. A presença de uma carga não linear, vista na Figura 3, é essencial para demonstrar que, sob a presença de correntes distorcidas, a metodologia de controle é capaz de seletivamente propiciar a compensação de termos indesejados concomitantemente à oferta de corrente ativa. Tendo como foco microrredes de baixa tensão, impedâncias de linhas foram definidas e alocadas entre diversos nós da rede, seguindo comportamento resistivo (elevada razão R/X) (Rocabert, 2012).

Quanto aos conversores adotados, foram projetados três IMs monofásicos de dois ramos em ponte completa, apresentando diferentes capacidades nominais para exemplificar o compartilhamento proporcional de correntes respeitando as limitações operacionais físicas de cada dispositivo. Filtros LC de saída foram projetados para cada inversor, atendendo ao requisito de baixa ondulação de corrente de saída, i.e., aproximadamente 5%. Tais IMs foram modulados por uma metodologia de PWM unipolar, com uma taxa de amostragem ( $f_s$ ) duas vezes maior que a frequência de chaveamento ( $f_{sw}$ ).

Controladores proporcional-ressonante foram projetados seguindo a metodologia presente em (Buso, 2015), sendo sintonizados em frequências ímpares da fundamental ( $f_0$ ) até a 13ª harmônica ( $13.f_0$ ). Uma vez que o CFCP é dependente de um barramento de comunicação, uma taxa de transmissão de dados entre o CC e IMs foi estabelecida para ocorrer uma vez por ciclo da fundamental ( $f_0$ ). Todos os parâmetros adotados foram sumarizados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros da microrrede e dos inversores.

| Característica                                 | Especificação           |
|------------------------------------------------|-------------------------|
| IM <sub>1</sub> - Corrente nominal             | 33,30 A <sub>pico</sub> |
| IM <sub>2</sub> - Corrente nominal             | 23,30 A <sub>pico</sub> |
| IM <sub>3</sub> - Corrente nominal             | 9,99 A <sub>pico</sub>  |
| IM <sub>1</sub> - Indutor (filtro LC de saída) | 1,47 mH                 |
| IM <sub>2</sub> - Indutor (filtro LC de saída) | 2,10 mH                 |
| IM <sub>3</sub> - Indutor (filtro LC de saída) | 4,90 mH                 |
| Frequência de chaveamento ( $f_{sw}$ )         | 12 kHz                  |
| Frequência de amostragem ( $f_s$ )             | 24 kHz                  |
| Impedâncias de linha ( $Z_0=Z_1=Z_2=Z_3$ )     | $0,1+j.0,02 \Omega$     |
| Taxa de Transmissão de Dados                   | 16,66 ms                |

Ressalta-se também que o software PSIM foi utilizado para realização das simulações e o algoritmo CFCP foi codificado somente para processar termos de corrente fundamentais (ativo e reativo), tão bem quanto, de 3ª, 5ª e 7ª ordens harmônicas. Com o intuito de demonstrar a funcionalidade do compartilhamento de corrente ativa, uma fonte de tensão ideal foi acoplada ao barramento CC de cada IM, apresentando tensão nominal de 235 V.

##### 4.2 Compensação Seletiva de Harmônicos

Com o intuito de simplificar a exemplificação dos resultados obtidos, a Tabela 2 resume as diferentes etapas de simulação propostas para análise do CFCP operando na injeção de correntes ativas e reativas e na compensação seletiva de harmônicos. Estas etapas visam, a cada instante, demonstrar as diversas possibilidades ofertadas para a coordenação IMs e compartilhamento de correntes na microrrede, tendo os resultados simulados apresentado na Figura 4.

A primeira etapa é apresentada com o intuito de demonstrar o comportamento da corrente drenada pela carga não linear existente na microrrede. Note que esta corrente no PAC é altamente distorcida, apresentando distorção harmônica total de  $DHT_i = 28,80\%$ , mesmo sob condição senoidal de tensão na rede. Na Etapa 2, o algoritmo CFCP passa a coordenar IM<sub>1</sub> e IM<sub>2</sub> para compartilharem as correntes ativa e reativa circulantes. Uma vez que somente componentes fundamentais estão sendo injetadas, somente correntes harmônicas passam então a circular no PAC, com  $DHT_i = 1422\%$ . Ressalta-se ainda que como a capacidade nominal de corrente de IM<sub>1</sub> é

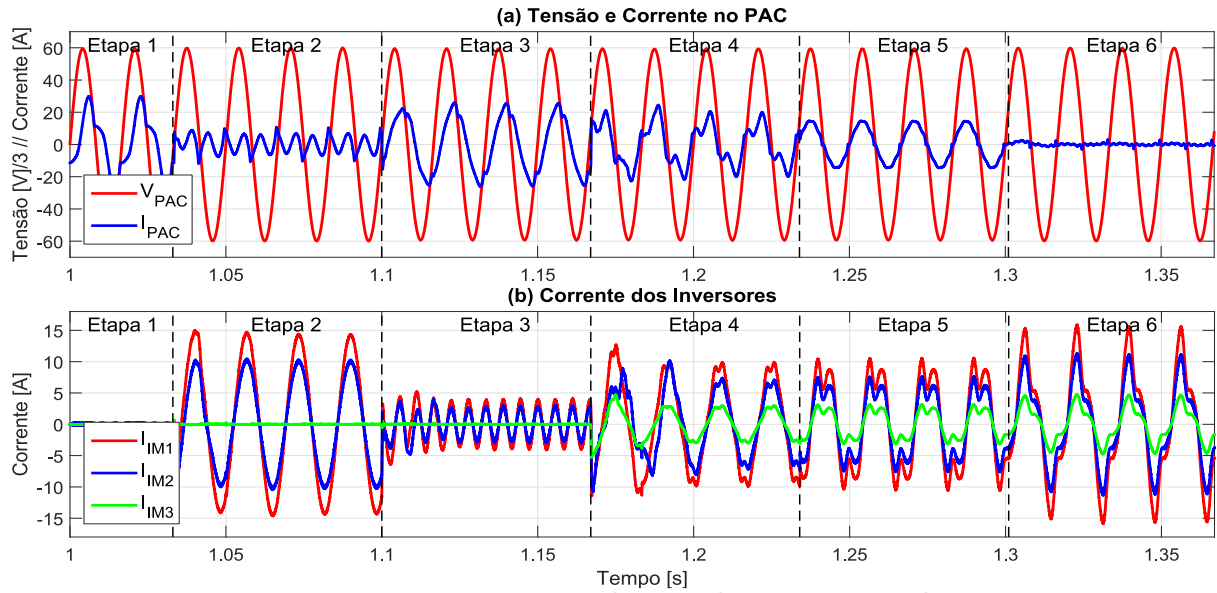


Figura 4. Compensação seletiva de harmônicos através de inversores distribuídos.

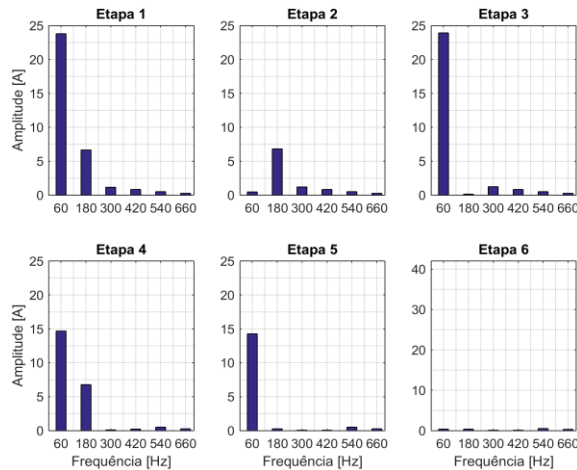


Figura 5. Espectro harmônico da corrente do PAC no caso 4.2.

Tabela 2. Parâmetros da microrrede e dos inversores.

|         |                 | Operação Controlada                   |  |
|---------|-----------------|---------------------------------------|--|
| Etapa 1 | IM <sub>1</sub> | -                                     |  |
|         | IM <sub>2</sub> | -                                     |  |
|         | IM <sub>3</sub> | -                                     |  |
| Etapa 2 | IM <sub>1</sub> | Ativo + Reativo                       |  |
|         | IM <sub>2</sub> | Ativo + Reativo                       |  |
|         | IM <sub>3</sub> | -                                     |  |
| Etapa 3 | IM <sub>1</sub> | 3ª Harm.                              |  |
|         | IM <sub>2</sub> | 3ª Harm.                              |  |
|         | IM <sub>3</sub> | -                                     |  |
| Etapa 4 | IM <sub>1</sub> | Reativo + 7ª Harm.                    |  |
|         | IM <sub>2</sub> | Reativo + 7ª Harm.                    |  |
|         | IM <sub>3</sub> | Reativo + 7ª Harm.                    |  |
| Etapa 5 | IM <sub>1</sub> | Reativo + 3ª + 5ª + 7ª Harms.         |  |
|         | IM <sub>2</sub> | Reativo + 3ª + 5ª + 7ª Harms.         |  |
|         | IM <sub>3</sub> | Reativo + 3ª + 5ª + 7ª Harms.         |  |
| Etapa 6 | IM <sub>1</sub> | Ativo + Reativo + 3ª + 5ª + 7ª Harms. |  |
|         | IM <sub>2</sub> | Ativo + Reativo + 3ª + 5ª + 7ª Harms. |  |
|         | IM <sub>3</sub> | Ativo + Reativo + 3ª + 5ª + 7ª Harms. |  |

aproximadamente 1,42 vezes maior que a de IM<sub>2</sub>, cada inversor injeta termos seguindo tal proporcionalidade.

Na Etapa 3, a compensação seletiva de harmônicos começa a ser exemplificada com os mesmos IMs injetando apenas correntes de 3ª ordem harmônica. Note que, ao fazer isto, a corrente no PAC se torna significativamente menos distorcida, com  $DHT_i = 6,95\%$ , já que tal componente, com relação apenas às outras harmônicas, é a que apresenta maior amplitude na corrente drenada pela carga.

Nas etapas 4 e 5, o terceiro IM é conectado à operação, demonstrando as capacidades plug & play da metodologia de controle, se adaptando rapidamente a mudanças na rede. Demonstra-se ainda que, através da injeção mútua de termos reativo e harmônicos, pode-se intervir conforme requerido na condição de corrente no PAC, realizando compensação de termos indesejados de forma flexível, resultando em  $DHT_i = 49,25\%$  e  $DHT_i = 5,31\%$  respectivamente.

Finalmente, na Etapa 6 é demonstrado que, caso os IMs e seus REDs tenham a capacidade de compartilhar toda a demanda de corrente, pode-se obter fluxo zero de corrente na rede, sempre respeitando os limites operacionais dos dispositivos, seguindo a taxa de proporcionalidade entre suas capacidades e equalizando o estresse térmico da operação. Na Figura 5 a representação do espectro harmônico da corrente resultante no PAC para cada etapa de operação é apresentada. Observa-se que, respectivamente para cada estágio, somente as harmônicas determinadas no compartilhamento de correntes são afetadas, deixando as demais ordens praticamente inalteradas com relação à Etapa inicial 1.

#### 4.3 Compensação Harmônicos Sob Condições Distorcidas de Tensão

Sabendo que microrredes de baixa tensão são susceptíveis a condições não senoidais de tensão, é necessário que o algoritmo CFPC seja capaz de suportar uma operação robusta mesmo sob tal condição. Portanto, uma condição de tensão altamente distorcida ( $v_{PAC} = 179 \cdot \cos(2\pi 60t) + 44.9 \cdot \sin(3 \cdot (2\pi 60t - 30^\circ))$ ) foi adotada para as etapas de simulação descri-

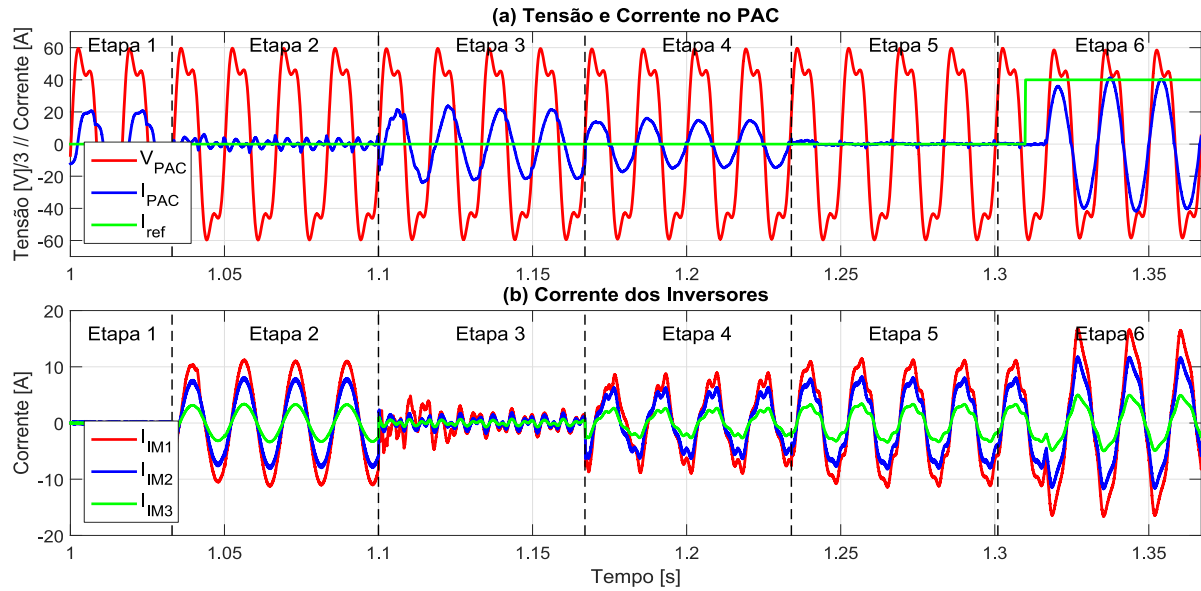


Figura 6. Compartilhamento de correntes ativa, reativa e harmônicas sob condições não senoidais de tensão no PAC

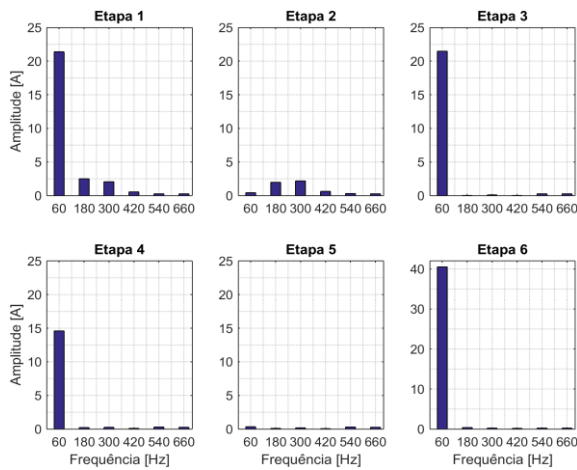


Figura 7. Espectro harmônico da corrente do PAC no caso 4.3.

Tabela 3. Parâmetros da microrrede e dos inversores.

|         |                 | Operação Controlada                             |
|---------|-----------------|-------------------------------------------------|
| Etapa 1 | IM <sub>1</sub> | -                                               |
|         | IM <sub>2</sub> | -                                               |
|         | IM <sub>3</sub> | -                                               |
| Etapa 2 | IM <sub>1</sub> | Ativo + Reativo                                 |
|         | IM <sub>2</sub> | Ativo + Reativo                                 |
|         | IM <sub>3</sub> | -                                               |
| Etapa 3 | IM <sub>1</sub> | 3ª + 5ª + 7ª Harms.                             |
|         | IM <sub>2</sub> | 3ª + 5ª + 7ª Harms.                             |
|         | IM <sub>3</sub> | 3ª + 5ª + 7ª Harms.                             |
| Etapa 4 | IM <sub>1</sub> | Reativo + 3ª + 5ª + 7ª Harms.                   |
|         | IM <sub>2</sub> | Reativo + 3ª + 5ª + 7ª Harms.                   |
|         | IM <sub>3</sub> | Reativo + 3ª + 5ª + 7ª Harms.                   |
| Etapa 5 | IM <sub>1</sub> | Ativo + Reativo + 3ª + 5ª + 7ª Harms.           |
|         | IM <sub>2</sub> | Ativo + Reativo + 3ª + 5ª + 7ª Harms.           |
|         | IM <sub>3</sub> | Ativo + Reativo + 3ª + 5ª + 7ª Harms.           |
| Etapa 6 | IM <sub>1</sub> | Ativo + Reativo + 3ª + 5ª + 7ª + Controle Ativo |
|         | IM <sub>2</sub> | Ativo + Reativo + 3ª + 5ª + 7ª + Controle Ativo |
|         | IM <sub>3</sub> | Ativo + Reativo + 3ª + 5ª + 7ª + Controle Ativo |

tas na Tabela 3, com resultados vistos na Figura 6.

Note que, mesmo quando não há intervenção dos IMs, a corrente inicialmente já é significativamente

distorcida, aproximadamente com  $DHT_1 = 16,00\%$ . A partir da Etapa 2, demonstra-se que, fazendo com que  $IM_1$ ,  $IM_2$  e  $IM_3$  compartilhem proporcionalmente a corrente fundamental (ativa e reativa), somente componentes harmônicas permanecem no PAC. Ao inverter tal condição na Etapa 3, injetando os termos harmônicos mais significantes drenados pela carga não linear, uma corrente praticamente senoidal, com  $DHT = 2,51\%$ , pode ser vista no PAC.

Uma vez que as correntes reativas estão diretamente relacionadas à depreciação do fator de potência e outros problemas de qualidade de energia, na Etapa 4 é simulada a condição dos IMs operando como filtros ativos de potência, com capacidade seletiva de mitigação de distúrbios harmônicos. Destaca-se que a corrente remanescente no PAC se apresenta em fase com a tensão, com  $DHT = 4,13\%$ , demonstrando que o CFCEP é capaz de propiciar características operacionais de síntese de corrente senoidal (Zuniga, 2002). Fluxo zero de corrente no PAC pode ser obtido, de forma similar ao caso 4.2.

Finalmente, uma vez que os objetivos globais da microrredes advém da camada terciária, pode-se também controlar a magnitude desejada de corrente fundamental circulante no PAC ( $I_{ref}$ ), através do controle seletivo do termo  $I_{I||}$ , mesmo sob condições distorcidas de tensão. Note que, considerando uma situação na qual o gestor da microrrede estabelece uma referência de pico de corrente fundamental  $I_{I||}=40$  A, assim como apresentado nas Figuras 6 e 7, o algoritmo CFCEP é capaz de propiciar tal condição operacional juntamente com quaisquer outras funcionalidades, com a pré-condição de que as limitações dos IMs atendam a tal requisição.

## 5 Conclusão

Este artigo apresentou uma metodologia de controle capaz de coordenar cooperativamente diversos inversores multifuncionais distribuídos em uma mi-

correde monofásica de baixa tensão, ressaltando como principais contribuições e conclusões que:

- O CFCP é uma ferramenta robusta para a coordenação de IMs distribuídos em redes monofásicas de baixa tensão, independente se sob condições senoidais ou não de tensão no PAC;
- O compartilhamento de termos de correntes ativa, reativa e harmônicas pode ser realizado proporcionalmente às capacidades nominais dos IMs, equilibrando o esforço térmico destes conversores;
- Pode ainda controlar o fluxo de correntes no PAC também em modo de conexão à rede principal;
- Compensação distribuída de harmônicos pode ser obtida de forma seletiva e flexível, diminuindo significativamente a distorção de correntes circulantes na microrrede.

### Agradecimentos

Esta pesquisa foi financiada pela CAPES, CNPq (420850/2016-3), FAPESP (2016/08645-9, 2017/24652-8) e Conselho de Pesquisa da Noruega (261735/H30).

### Referências Bibliográficas

- Akagi, H., (1996) "New trends in active filters for power conditioning. IEEE Transactions on Industry Applications," Vol. 32, No. 6, pp. 1312–1322.
- Akagi, H., (1997) "Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, p. 354–363.
- Arrilaga, J., (2004) *Effects of harmonic distortion - Power System Harmonics*, John Wiley & Sons.
- Brandao, D. I. (2015) Coordinated Power-Based Control and Utility Interface Converter in Low Voltage Microgrids. Tese de Doutorado, UNICAMP.
- Buso, S.; Mattavelli, P. (2015) *Digital Control in Power Electronics*, 2nd Ed., Morgan&Claypool.
- Caldognetto, T. et al, (2015) "Power-Based Control of Low-Voltage Microgrids", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 3, No. 4, pp. 1056-1066.
- Cheng, P. T.; Le, T. L., (2006) "Distributed active filter systems (dafss): A new approach to power system harmonics. IEEE Transactions on Industry Applications," Vol. 42, No. 5, p. 1301–1309.
- Gaona, D. C. et al, (2017) "Fast Selective Harmonic Mitigation in Multifunctional Inverters Using Internal Model Controllers and Synchronous Reference Frames," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 64, No. 8, pp. 6338-6349.
- Golsorkhi, M. S.; Lu, D. D.; Guerrero, J. M., (2017) "A GPS-Based Decentralized Control Method for Islanded Microgrids," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 2, pp. 1615-1625.
- Guerrero, J. M. et al, (2011) "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids-A General Approach Toward Standardization", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 1, pp. 158-172.
- Han, Y. et al, (2017) "Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 3, pp. 2427-2451.
- He, J. et al, (2017) "A Simple Decentralized Islanding Microgrid Power Sharing Method without Using Droop Control," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. PP, no. 99.
- Hen, Y.; Shen, P.; Guerrero, J. M., (2016) "An Enhanced Power Sharing Scheme for Voltage Unbalance and Harmonics Compensation in an Islanded AC Microgrid," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 31, no. 3, pp. 1037-1050.
- Khodaei, A., (2015) "Provisional Microgrids", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, No. 3, pp. 1107-1115.
- Kroposki, B., (2016) "Can solar save the grid? IEEE Spectrum," Vol. 53, No. 11, p. 42–47.
- Mousavi, S. Y. M. et al, (2018) "Autonomous Control of Current and Voltage Controlled DG Interface Inverters for Reactive Power Sharing and Harmonics Compensation in Islanded Microgrids," IEEE Trans. Power Electron., vol. PP, no. 99, pp. 1-12.
- Rocabert, J.; Luna, A.; Blaabjerg, F.; Rodriguez, P., (2012) "Control of Power Converters in AC Microgrids", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, No 11, pp. 4734-4749.
- Sreekumar, P.; Khadkikar, V., (2016) "A New Virtual Harmonic Impedance Scheme for Harmonic Power Sharing in an Islanded Microgrid", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 31, No. 3, pp. 936-945.
- Teke, A.; Latran, M. B., (2014) "A Review of Multifunctional Inverter Topologies and Control Schemes Used in Distributed Generation Systems", Journal of Power Electronics, Vol. 14, No. 2, pp. 324-340.
- Yang, Y.; Blaabjerg, F.; Wang, H.; Simoes, M. G., (2016) "Power control flexibilities for grid-connected multi-functional photovoltaic inverters", IET Renewable Power Generation, Vol. 10, No. 5, pp. 504-513.
- Zuniga, T. E.; Pomilio, J. A., (2002) "Shunt Active Power Filter Synthesizing Resistive Loads", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 17, nº 2.