

FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA PARALELO APLICADO EM SISTEMAS TRIFÁSICOS A QUATRO-FIOS

Leonardo B. G. Campanhol¹ Sergio A. Oliveira da Silva¹ Alessandro Goedtel¹

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR¹

Av. Alberto Carazzai, 1640, CEP. 86.300-000

Cornélio Procopio – PR, Brasil.

campanhol@utfpr.edu.br¹ augus@utfpr.edu.br¹ agoedtel@utfpr.edu.br¹

Resumo - Este trabalho apresenta o estudo de um filtro ativo de potência paralelo (FAPP), o qual é implementado utilizando três inversores monofásicos em ponte completa compartilhando o mesmo barramento CC de tensão. Os algoritmos adotados para obtenção das correntes de compensação do FAPP são baseados no sistema de eixos de referência síncrona (SRF), de forma que, em um sistema trifásico a quatro-fios, cada uma das correntes de fase possa ser controlada de maneira independente ou não. Portanto, os algoritmos de compensação são testados por meio de duas estratégias distintas. Na primeira, chamada de compensação de corrente independente por fase, o FAPP atua na compensação de potência reativa e supressão das correntes harmônicas da carga. Na segunda, o FAPP atua também na compensação dos desequilíbrios das correntes de carga. O desenvolvimento teórico é validado e o desempenho do FAPP é avaliado por meio de testes experimentais.

Palavras-Chave – Algoritmos SRF, Compensação de Reativos, Qualidade da Energia Elétrica, Harmônicos.

SHUNT ACTIVE POWER FILTER APPLIED TO THREE-PHASE FOUR-WIRE SYSTEMS

Abstract – This work deals with the study of a shunt active power filter (SAPF), which is implemented by using three single-phase full-bridge converters sharing the same dc-bus voltage. The algorithms adopted for obtaining the current references are based on the synchronous reference frame (SRF) control method, such that, in a three-phase four-wire system, each phase current can be controlled independently or not. Two different operation strategies of the SAPF are implemented. In the first one, which is called independent phase-current control, the SAPF performs harmonic current suppression and reactive power compensation. In the second, the SAPF performs load unbalance compensation, too. The theoretical development is validated and the performance of the SAPF is evaluated through experimental tests.

Keywords - SRF-based Algorithms, Reactive Power Compensation, Power Quality, Harmonics.

Artigo submetido em 12/09/2012. Revisado em 12/12/2012. Aceito para publicação em 08/03/2013 por recomendação do editor Henrique A. C. Braga.

I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, em função da evolução tecnológica dos componentes semicondutores, a eletrônica de potência obteve um avanço significativo em termos de desenvolvimento e aplicabilidade. A utilização cada vez maior de cargas não lineares por consumidores residenciais, comerciais e industriais, como por exemplo, retificadores controlados e não controlados, inversores de tensão e corrente, cicloconversores, fontes chaveadas, dentre outras, vem contribuindo para piorar a qualidade da energia elétrica (QEE) dos sistemas elétricos de potência, não só pela geração de reativos, mas também por drenarem da rede correntes com elevado conteúdo harmônico.

As correntes harmônicas, ao interagirem com a impedância da linha, acarretam o aparecimento de harmônicos e quedas de tensão, afetando a qualidade da forma de onda de alimentação disponibilizada a outros usuários conectados ao mesmo ponto de acoplamento comum (PAC) do sistema elétrico. Efeitos adicionais podem ser notados através de aquecimentos excessivos de transformadores, motores, aumento dos ruídos na frequência audível, sem contar que tensões distorcidas na rede causam oscilações mecânicas em motores [1]. Além dos harmônicos, outros problemas de QEE podem ser citados, tais como as variações de tensão de curta duração (interrupções, afundamentos e elevações de tensão), fator de potência, flutuações e desequilíbrios de tensão, dentre outros [2].

Na configuração dos sistemas elétricos de potência trifásicos a quatro-fios, quando alimentando cargas monofásicas lineares desequilibradas, tem-se como resultado a presença de uma corrente circulando pelo condutor de neutro. No entanto, quando cargas monofásicas com características não lineares são alimentadas, existirá a circulação da corrente de neutro, mesmo que estas sejam perfeitamente balanceadas. Ou seja, pelo fato da corrente de neutro ser a soma algébrica das correntes trifásicas de fase não senoidais, a somatória resultante pode não ser necessariamente igual à zero. Observa-se ainda que em circuitos trifásicos, as correntes harmônicas de neutro múltiplas de três (3° , 9° , 15° , etc.), se somam ao invés de se cancelarem. Além disso, em algumas situações, as amplitudes destas correntes podem exceder as amplitudes das correntes de fase, causando danos ao condutor de neutro [3].

Uma alternativa para minimizar os problemas de QEE causados pelo uso de cargas não lineares é a utilização de filtros ativos de potência paralelos (FAPP) [4-11]. Estes tem a finalidade de condicionar as correntes da rede tornando-as senoidais. Além disso, em sistemas trifásicos a quatro-fios a corrente de neutro também é compensada [8-11].

Neste trabalho, um FAPP é implementado para realizar a supressão de correntes harmônicas e desbalanços das correntes de carga, bem como atuar na compensação de reativos em sistemas trifásicos a quatro-fios. Este é formado por três inversores monofásicos em ponte completa (*three full-bridge* – 3F-B) conectados a um barramento de tensão CC comum [6, 8]. Com a topologia 3F-B adotada um melhor desempenho na compensação de corrente é assegurado, pois o controle é realizado de forma independente por fase.

Em [8], algoritmos baseados na teoria *pq* foram utilizados para obtenção das correntes de referência de compensação para cada uma das fases de um FAPP. No entanto, estes algoritmos são fortemente influenciados pela presença de harmônicos e/ou desequilíbrios nas tensões da rede elétrica, podendo ocasionar distorções nas correntes de referência geradas [11]. Portanto, como alternativa para contornar este problema, algoritmos de controle baseados no sistema de eixos de referência síncrona (SRF - *synchronous reference frame*) têm sido utilizados [12-14].

Os algoritmos SRF também podem ser empregados em sistemas monofásicos, bastando, para isso, a criação de um sistema trifásico fictício. Mais especificamente, com o intuito de controlar cada uma das correntes de fase individualmente, os sistemas trifásicos a quatro-fios poderão ser tratados como se fossem formados por três sistemas monofásicos independentes.

Duas estratégias de compensação de corrente utilizando os algoritmos SRF são implementadas neste trabalho para o controle do FAPP, sendo elas: compensação de corrente independente por fase (CCIF) e compensação de desbalanços das correntes de carga (CDCC). Na estratégia CCIF, o FAPP atua na supressão das correntes harmônicas e compensação de potência reativa da carga, sem considerar possíveis desequilíbrios de corrente entre as fases. Neste caso, as correntes compensadas na rede serão senoidais, no entanto desequilibradas. Já na estratégia CDCC, além de realizar a supressão das correntes harmônicas e compensação de

reativos da carga, o FAPP atua também na compensação dos desequilíbrios de corrente entre as fases. Neste caso, as correntes na rede serão senoidais e equilibradas.

Resultados experimentais são realizados para comprovar o desenvolvimento teórico e avaliar o desempenho do FAPP considerando as estratégias CCIF e CDCC propostas.

II. FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA PARALELO

A Figura 1 mostra o diagrama em blocos do FAPP adotado neste trabalho, sendo este implementado utilizando três inversores monofásicos *full-bridge* (3F-B).

Verifica-se que esta topologia necessita de um número maior de chaves de potência para sua implementação, quando comparada com as topologias *split capacitor* (S-C) e *four-legs* (F-L) [8-11]. Entretanto, a tensão do barramento CC é reduzida por um fator de 2, quando comparada com a topologia S-C, e por um factor de $\sqrt{3}$, quando comparado com a topologia F-L. A tensão reduzida no barramento CC resulta em menor tensão direta aplicada nas chaves de potência, tornando esta topologia atrativa para aplicações de maiores potências.

Outra característica importante desta topologia é a possibilidade de controlar os três inversores *full-bridge* de forma independente por fase. Assim, dependendo do algoritmo de compensação adotado, o FAPP pode atuar apenas na compensação de reativos e supressão dos harmônicos de corrente da rede, não sendo, neste caso, considerada a compensação dos desbalanços de corrente entre as fases. Desta forma, as componentes fundamentais de seqüência negativa e zero não são compensadas, reduzindo a potência a ser processada pelo FAPP.

Conforme mostra a Figura 1, observa-se que os três inversores *full-bridge* são acoplados à rede por intermédio de transformadores de isolamento, devido ao compartilhamento do mesmo barramento CC. No entanto, as indutâncias de dispersão dos mesmos podem ser usadas como filtros.

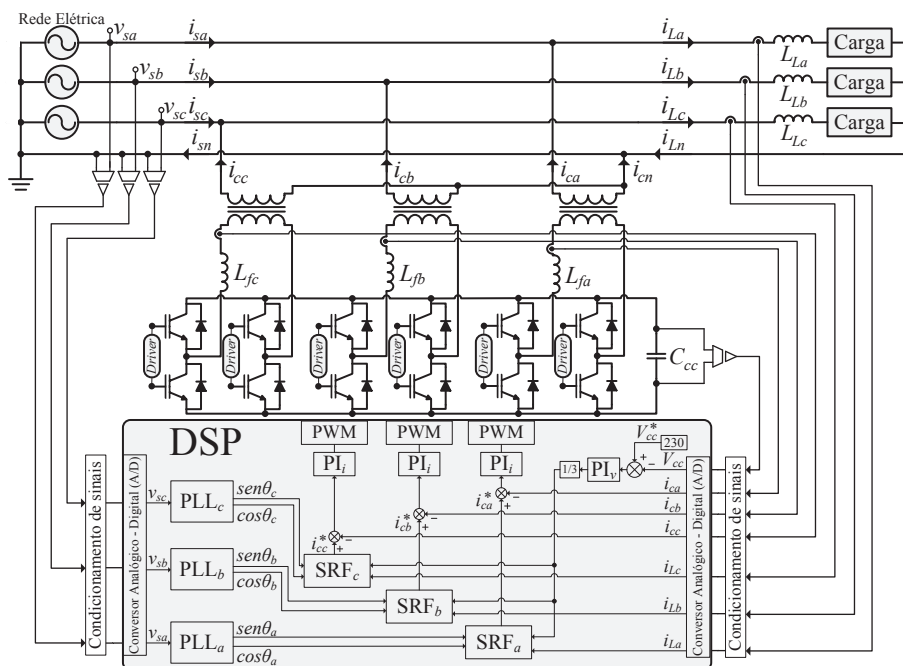


Fig. 1. Diagrama em blocos do FAPP.

III. ALGORITMO DE GERAÇÃO DAS REFERÊNCIAS DE COMPENSAÇÃO

Neste trabalho, as correntes de referência de compensação, a serem utilizadas no FAPP, são obtidas através de algoritmos baseados no sistema de eixo de referência síncrona (SRF).

A Figura 2 mostra o diagrama em blocos do algoritmo SRF convencional usado em sistemas trifásicos a três e a quatro fios. Assim, as correntes da carga (i_{La} , i_{Lb} e i_{Lc}) do sistema trifásico estacionário abc são medidas e transformadas para o sistema bifásico estacionário $\alpha\beta 0$ (i_α , i_β e i_0), e em seguida para o sistema de eixos de referência síncrona dq . A corrente i_0 representa a componente de sequência zero de um sistema trifásico a quatro fios. No sistema de eixos síncronos dq , a componente fundamental da corrente da carga é transformada em uma grandeza contínua no eixo direto d (i_d). Já as harmônicas são transformadas em grandezas oscilantes, as quais são filtradas utilizando um filtro passa baixa (FPB). Portanto, a corrente contínua resultante id_{cc} , obtida na saída do FPB (Figura 2), representa a parcela ativa fundamental da corrente da carga. Desse modo, as correntes de referência fundamentais (i_{sa}^* , i_{sb}^* e i_{sc}^*) são obtidas através da matriz apresentada por (1). Já as correntes de referência de compensação (i_{ca}^* , i_{cb}^* e i_{cc}^*), a serem utilizadas no FAPP, são encontradas através da subtração das correntes de referência fundamentais ($i_{sa,b,c}^*$) pelas respectivas correntes de carga ($i_{La,b,c}$), conforme (2).

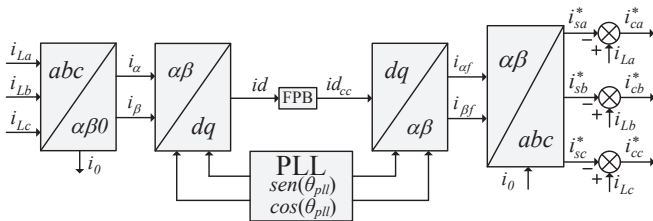


Fig. 2. Diagrama em blocos do algoritmo SRF trifásico.

$$\begin{bmatrix} i_{sa}^* \\ i_{sb}^* \\ i_{sc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha f} \\ i_{\beta f} \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[i_{ca,b,c}^*] = [i_{La,b,c}] - [i_{sa,b,c}^*] \quad (2)$$

A. Algoritmo SRF Adotado para Sistemas Monofásicos

Como o algoritmo SRF mostrado na Figura 2 é naturalmente utilizado em sistemas trifásicos, algumas modificações devem ser feitas para possibilitar sua aplicação em sistemas monofásicos. Desta forma, considera-se o algoritmo SRF modificado mostrado na Figura 3, onde as correntes do sistema trifásico fictício podem ser representadas pelas correntes fictícias bifásicas ($i_\alpha = i_L$, i_β). Sendo assim, é possível utilizar este algoritmo em cada uma das fases de um sistema trifásico a quatro-fios, de modo a realizar as compensações de corrente individualmente em cada uma das fases. Portanto, caso existam desequilíbrios das componentes fundamentais de corrente entre as fases, estes não serão compensados.

O algoritmo apresentado na Figura 3 consiste em medir a corrente da carga (i_L) e introduzir uma atraso de $\pi/2$ radianos

na mesma. Assim, a corrente medida é considerada a corrente fictícia i_α (eixo- α), enquanto a corrente defasada é considerada a corrente fictícia em quadratura i_β (eixo- β), como definidas em (3). Desta forma, as correntes podem ser representadas no sistema de eixos estacionário bifásico fictício $\alpha\beta$ (eixo- $\alpha\beta$).

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L(\omega t) \\ i_L(\omega t - \pi/2) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Obtida a grandeza de corrente id , conforme (4), é possível extrair a sua componente contínua id_{cc} através da utilização de um FPB. Esta componente representa o valor de pico da parcela fundamental da corrente da carga. Portanto, a corrente fundamental de referência (i_s^*) pode ser obtida diretamente por (5). Já a corrente de referência de compensação (i_c^*) é encontrada através da subtração de i_L por i_s^* , conforme (6).

B. Algoritmos SRF Utilizados no FAPP

Duas estratégias de compensação de corrente são implementadas neste trabalho, sendo elas a CCIF e a CDCC. A Figura 4 mostra os diagramas em blocos dos algoritmos utilizados para obtenção das correntes de referência de compensação do FAPP.

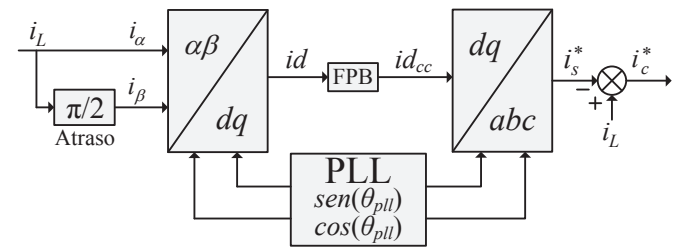


Fig. 3. Diagrama em blocos do algoritmo SRF (sistemas 1 Φ).

$$id = i_\alpha \cdot \cos(\theta_{pll}) + i_\beta \cdot \text{sen}(\theta_{pll}) \quad (4)$$

$$i_s^* = id_{cc} \cdot \cos(\theta_{pll}) \quad (5)$$

$$i_c^* = i_L - i_s^* \quad (6)$$

Na estratégia CCIF são utilizados três algoritmos SRF monofásicos, os quais controlam cada uma das fases da rede elétrica independentemente. Assim, os desequilíbrios das correntes fundamentais entre as fases não são compensados. Desta forma, as correntes da rede serão senoidais, em função da compensação de todos os harmônicos e reativos da carga, no entanto estas serão desequilibradas.

Já na estratégia CDCC, são utilizados os três algoritmos SRF monofásicos em conjunto com o algoritmo de compensação de desequilíbrio de corrente entre as fases, conforme mostrado na Figura 4. Nesta estratégia, as componentes contínuas das três fases no eixo síncrono (id_{Tcc_a} , id_{Tcc_b} e id_{Tcc_c}) são somadas e divididas por três, obtendo-se uma parcela média id_{Tcc} conforme (7). A constante $\sqrt{3}/2$ é utilizada para adequar o ganho referente à transformação do sistema de eixos estacionários $abc/\alpha\beta$, a qual não é utilizada no algoritmo em função das correntes das fases medidas serem consideradas as próprias correntes no eixo- α . A corrente id_{Tcc} é transformada do eixo síncrono dq para o eixo estacionário $\alpha\beta$ como dado por (8). Já as correntes fundamentais de referência (i_{sa}^* , i_{sb}^* e i_{sc}^*) são

obtidas através da matriz apresentada por (9), enquanto as correntes de compensação (i_{ca}^* , i_{cb}^* e i_{cc}^*) são obtidas por meio da subtração entre as correntes de referência e da carga.

Verifica-se na Figura 4 a malha de controle da tensão do barramento CC, onde a componente i_{ccT} é responsável por controlar a tensão deste barramento, de forma a compensar as perdas relacionadas com as indutâncias de filtragem, chaves de potência, dentre outros. Portanto, i_{ccT} representa a corrente ativa total a ser drenada da rede para manter constante a tensão do barramento CC em um valor de referência desejado. Verifica-se que i_{ccT} é dividida por três, antes de ser somada às parcelas id_{cc} de cada uma das fases. Isto permite que as correntes ativas drenadas da rede sejam divididas igualmente entre os três conversores.

$$id_{Tcc} = \sqrt{3/2} \left(\frac{id_{cca} + id_{ccb} + id_{ccc}}{3} \right) \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha T} \\ i_{\beta T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} id_{Tcc} \cdot \cos(\theta_{pu})_a \\ id_{Tcc} \cdot \sin(\theta_{pu})_a \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} i_{sa}^* \\ i_{sb}^* \\ i_{sc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha T} \\ i_{\beta T} \end{bmatrix} \quad (9)$$

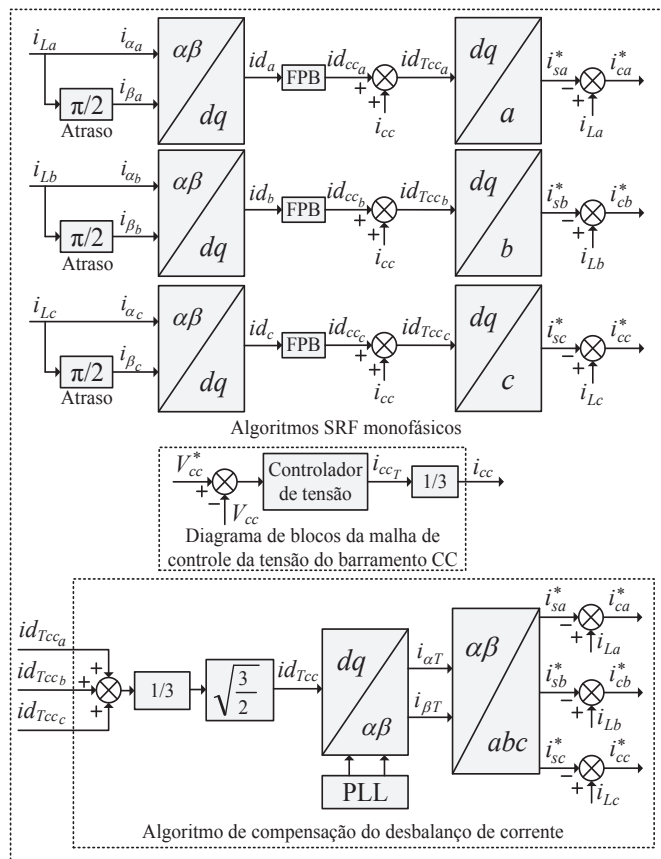


Fig. 4. Diagrama em blocos do algoritmo SRF utilizado para obtenção das correntes de referência de compensação do FAPP.

C. Malhas de Controle de Corrente e Tensão do FAPP

O modelo do sistema de controle de corrente do FAPP é obtido através do circuito monofásico equivalente mostrado

na Figura 5.a, onde a tensão do barramento V_{cc} é assumida constante. As impedâncias do secundário do transformador são referidas para o lado primário, sendo L_{Lt} a indutância de dispersão do transformador, L_f a indutância de filtragem, R_{L_t} e R_{L_f} as suas respectivas resistências, n a relação de transformação ($n = 1$) e v_s a tensão de fase da rede.

O diagrama em blocos da malha de controle de corrente de cada um dos conversores monofásicos *full-bridge* é mostrado na Figura 5.b, na qual as correntes de referência $i_{ca,b,c}^*$ são obtidas por meio dos algoritmos SRF representados na Figura 4. A respectiva função de transferência de malha fechada pode ser representada por (10) [17].

$$\frac{\hat{i}_{ca,b,c}(s)}{\hat{i}_{ca,b,c}^*(s)} = \frac{K_{PWM}V_{cc}(K_{P_i}s + K_{I_i})}{L_{eq}s^2 + (K_{P_i}K_{PWM}V_{cc} + R_{eq})s + K_{I_i}K_{PWM}V_{cc}} \quad (10)$$

onde K_{P_i} e K_{I_i} são os ganhos proporcional e integral do controlador de corrente; K_{PWM} é o ganho do modulador PWM definido em [17]; $L_{eq} = n^2L_{Lt} + L_f$ e $R_{eq} = n^2R_{L_t} + R_{L_f}$ são, respectivamente, a indutância e a resistência equivalente referidas ao primário do transformador.

O diagrama em blocos do modelo da malha de controle de tensão do FAPP está mostrado na Figura 5.c. Para a obtenção deste modelo foi considerado que a parcela de potência ativa média que flui da rede para o FAPP (p_{sc}) é igual à potência ativa média no barramento CC (p_{cc}), como dado por (11). Neste caso foram desprezadas as perdas, tanto de chaveamento como nos elementos passivos do FAPP.

$$p_{sc} = v_d \cdot i_{dc} = v_{cc} \cdot i_{cc} = p_{cc} \quad (11)$$

onde v_d é a tensão da rede representada no referencial síncrono dq ; i_{dc} é a parcela ativa de corrente que flui da rede para o FAPP também no referencial síncrono; v_{cc} e i_{cc} são a tensão e a corrente do barramento CC, respectivamente.

A partir de (11) é possível encontrar a seguinte equação não linear:

$$\frac{dv_{cc}}{dt} = \frac{1}{C_{cc}} \frac{v_d \cdot i_{dc}}{v_{cc}} \quad (12)$$

Considerando que a variação de tensão no barramento CC é pequena, pode-se construir a malha de controle usando um modelo de pequenos sinais. Realizando a linearização de (12) obtêm-se (13) como segue:

$$\frac{V_{cc} d\hat{v}_{cc}}{dt} = \frac{1}{C_{cc}} v_d \cdot \hat{i}_{dc} \quad (13)$$

Aplicando a transformada de Laplace em (13) obtêm-se (14), a qual representa a função de transferência da planta.

$$\frac{\hat{v}_{cc}(s)}{\hat{i}_{dc}(s)} = \frac{v_d}{C_{cc} \cdot V_{cc} \cdot s} \quad (14)$$

Desse modo, a função de transferência do sistema de controle da tensão do barramento CC, na qual o controlador PI da Figura 5.c foi considerado, é representada como segue:

$$\frac{\hat{v}_{cc}(s)}{\hat{v}_{cc}^*(s)} = \frac{v_d K_{P_v} s + v_d K_{I_v}}{C_{cc} V_{cc} s^2 + v_d K_{P_v} s + v_d K_{I_v}} \quad (15)$$

onde K_{P_v} e K_{I_v} são os ganhos proporcional e integral do controlador de tensão; C_{cc} é a capacitância do barramento CC e V_{cc} é o valor inicial da tensão no capacitor C_{cc} .

As respostas em frequência dos controladores de corrente e tensão do barramento CC, assim como os procedimentos

adotados para a sintonia dos controladores estão detalhadamente descritos em [17].

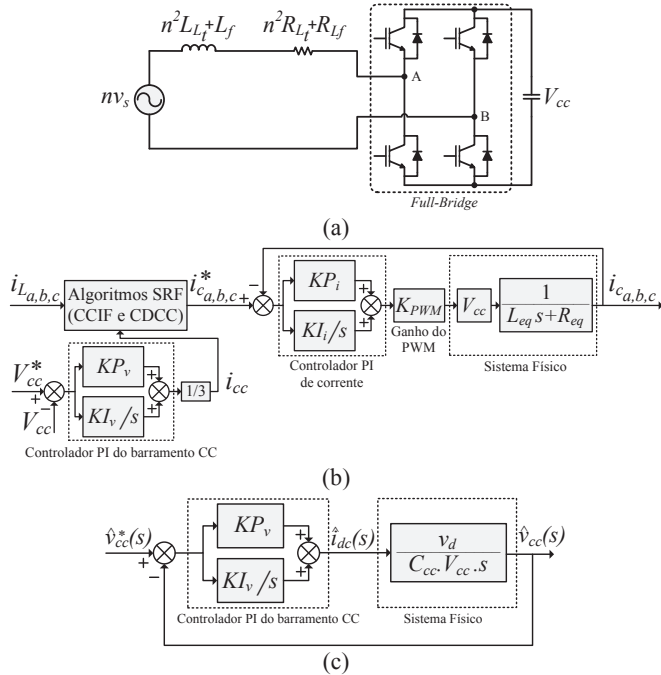


Fig. 5. (a) Circuito equivalente do FAPP; (b) Diagrama em blocos das malhas de corrente; (c) Diagrama em blocos da malha de tensão do barramento CC.

IV. SISTEMA PLL

As informações da rede elétrica, tais como ângulo de fase e frequência, necessárias para a geração das coordenadas do vetor unitário síncrono $\text{sen}(\theta_{pll})$ e $\text{cos}(\theta_{pll})$, utilizado no algoritmo SRF, podem ser obtidas através de sistemas PLL (*phase-locked loop*).

Neste trabalho, por se tratar de uma aplicação trifásica, o ângulo de fase poderia ter sido estimado utilizando um único sistema PLL trifásico. No entanto, optou-se pela utilização de um sistema PLL monofásico em cada uma das fases do FAPP. Neste caso a ausência de tensão em uma das fases da rede elétrica não interfere no funcionamento dos demais inversores *full-bridge*, levando-se em conta que cada um destes inversores pode ser considerado como um módulo independente de FAPP monofásico, com a característica de que o barramento de tensão CC é comum a todos. Assim, se um dos três módulos monofásicos se danificar, os demais podem continuar operando normalmente.

O sistema PLL monofásico utilizado neste trabalho é descrito detalhadamente em [15]. Este é baseado na teoria da potência ativa instantânea trifásica (p-PLL). Assim, como este sistema utiliza o eixo estacionário bifásico de coordenadas $\alpha\beta$, uma tensão fictícia de quadratura (v'_β) necessita ser gerada, de forma a assegurar que esta seja ortogonal à tensão monofásica medida. Para obtenção do sistema bifásico $\alpha\beta$ fictício, a tensão monofásica (v_s) medida da rede elétrica é considerada a própria tensão v'_α . Já para a obtenção da tensão v'_β , uma defasagem de $\pi/2$ radianos é introduzida na tensão monofásica v_s .

Porém, distúrbios na rede elétrica como harmônicos de tensão e variações de frequência, podem influenciar o desempenho do p-PLL. Para aumentar a sua capacidade de rejeição frente a estes distúrbios, as tensões de entrada do p-PLL são filtradas utilizando um filtro auto-sintonizado (*self-tuning filter* - STF) [16], e a frequência estimada pelo p-PLL realimenta o STF no intuito de adaptar sua frequência de sintonia. A Figura 6.a mostra o diagrama em blocos do sistema STF. Este foi inicialmente proposto para aplicação em sistemas trifásicos.

Neste trabalho, o STF é empregado juntamente com o sistema p-PLL resultando o algoritmo STF-pPLL, conforme mostrado na Figura 6.b e descrito detalhadamente em [18]. O STF é utilizado para extrair as componentes fundamentais das tensões de fase da rede, enquanto o p-PLL é usado para estimar a frequência e o ângulo de fase da tensão da rede.

Como citado anteriormente, a frequência angular de referência do p-PLL (ω^*) é usada para adaptar a frequência de corte do STF, considerando-se que as variações na frequência da rede podem introduzir erros no ângulo de fase estimado pelo p-PLL apresentado em [15]. Assim, como pode ser observado na Figura 6.b, os sinais de entrada do p-PLL são as tensões de saída filtradas do STF ($v_{\alpha f}$ e $v_{\beta f}$), as quais são obtidas a partir das tensões em quadratura (v_α e v_β) geradas a partir da tensão da rede v_s e da frequência estimada pelo p-PLL.

As funções de transferência do STF são mostradas em (16) e (17), onde a frequência de corte ω_c representa a frequência angular nominal da rede elétrica, e o parâmetro K define a selectividade do filtro [18].

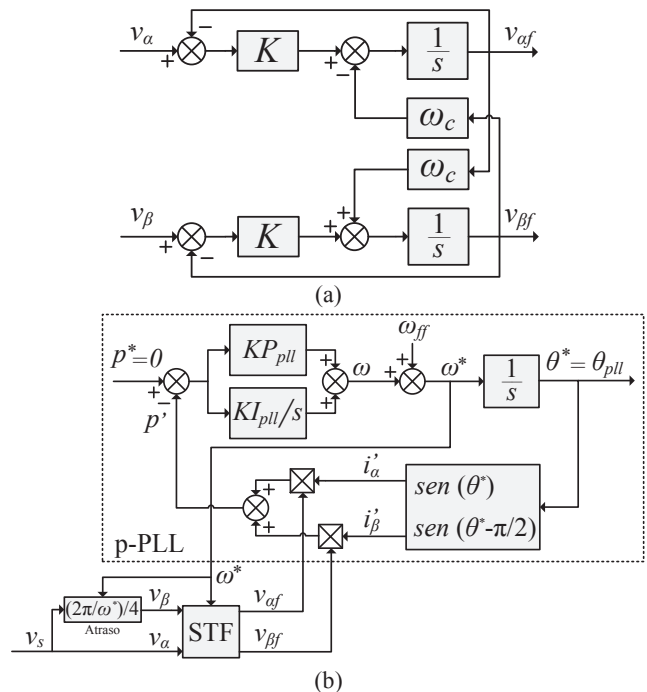


Fig. 6. PLL: (a) Sistema STF; (b) Algoritmo STF-pPLL.

$$v_{\alpha f}(s) = \frac{K}{s} [v_\alpha(s) - v_{\alpha f}(s)] - \frac{\omega_c}{s} v_{\beta f}(s) \quad (16)$$

$$v_{\beta f}(s) = \frac{K}{s} [v_\beta(s) - v_{\beta f}(s)] - \frac{\omega_c}{s} v_{\alpha f}(s) \quad (17)$$

V. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O diagrama em blocos que representa o FAPP implementado está mostrado na Figura 1 enquanto o protótipo construído está mostrado na Figura 7. A área sombreada da Figura 1 consiste na parte digital do sistema, sendo esta composta pelo kit DSP TMDSPRE28335, onde foram implementados os algoritmos SRF (Figura 4) e STF-pPLL (Figura 6.b), bem como as malhas de controle das correntes de compensação e tensão do barramento CC. Os parâmetros do FAPP e as cargas não lineares utilizadas nos testes são mostrados nas Tabelas I e II, respectivamente.

As Figuras 8, 9 e 10 mostram os resultados obtidos do FAPP para o modo de operação CCIF mostrado na Figura 4, considerando as cargas monofásicas 1, 2 e 3 da Tabela II.

Para o sistema alimentando a carga 1, as correntes das cargas (i_{La} , i_{Lb} e i_{Lc}) e a corrente de neutro da carga (i_{Ln}) são mostradas na Figura 8.a. As correntes compensadas da fonte (i_{sa} , i_{sb} e i_{sc}) e corrente de neutro da fonte (i_{sn}) são mostradas na Figura 8.b, enquanto as correntes de compensação sintetizadas pelo FAPP (i_{ca} , i_{cb} e i_{cc}) e a corrente de neutro do FAPP (i_{cn}) são mostradas na Figura 8.c. Já as Figuras 9 e 10 mostram as correntes das cargas, da rede e de compensação do FAPP, com suas respectivas correntes de neutro, para o sistema alimentando as cargas 2 e 3, respectivamente.

Observa-se que as correntes compensadas da rede tornaram-se muito próximas de uma senoide, porém desequilibradas. Isso demonstra que o FAPP não compensou as componentes de sequência negativa e zero na frequência fundamental, resultando no desequilíbrio de corrente entre as fases, bem como na circulação da componente fundamental da corrente de neutro na rede.

TABELA I

Parâmetros Utilizados nos Ensaios Realizados do FAPP

Tensão eficaz de fase da rede	$V_{sa,b,c} = 127V$
Frequência da rede	$f_s = 60Hz$
Frequência de chaveamento dos inversores	$f_{ch} = 20kHz$
Indutâncias de acoplamento do FAPP	$L_{fa,b,c} = 0,5mH$
Resistências série dos indutores de acoplamento	$R_{Lfa,b,c} = 0,22 \Omega$
Indutâncias de dispersão dos transformadores	$L_{di} = 1,08mH$
Resistências dos transformadores de acoplamento	$R_{ta,b,c} = 0,265 \Omega$
Relação de transformação dos transformadores	$n = 1$
Indutâncias de comutação	$L_{La,b,c} = 1,0mH$
Tensão do barramento CC	$V_{cc} = 230V$
Capacitância do barramento CC	$C_{cc} = 2300\mu F$
Frequência de amostragem do DSP	$f_a = 60kHz$
Ganho do modulador PWM	$K_{PWM} = 5,33 \cdot 10^{-4}$
Ganhos do controlador da malha de corrente (PI_i)	$K_{P_i} = 95\Omega$ $K_{I_i} = 3,5 \cdot 10^5 \Omega/s$
Frequência de cruzamento das malhas de corrente	$\omega_{ci} = 7854 \text{ rad/s}$
Margem de fase das malhas de corrente	$MF_{ip} = 67^\circ$
Ganhos do controlador da malha de tensão (PI_v)	$K_{P_v} = 0,275\Omega$ $K_{I_v} = 1,56\Omega/s$
Frequência de cruzamento da malha de tensão (barramento CC)	$\omega_{cc} = 150,8 \text{ rad/s}$
Margem de fase da malha de tensão CC	$MF_{vcc} = 88^\circ$
Ganhos do controlador do p-PLL (PI_{pll})	$K_{P_{pll}} = 180\text{rad/Ws}$ $K_{I_{pll}} = 1300\text{rad/Ws}^2$
Frequência de cruzamento da malha do pPLL	$\omega_{c_{pll}} = 180 \text{ rad/s}$
Margem de fase da malha do pPLL	$MF_{pll} = 87,7^\circ$
Ganho K do STF	$K = 20$

TABELA II

Parâmetros das Cargas Utilizadas nos Testes

Cargas monofásicas	Fase A	Fase B	Fase C	
Retificador 1 Φ de onda completa	1	R=6,3 Ω L=380mH	R=7,5 Ω L=346mH	R=9,4 Ω L=357mH
	2	R=5,8 Ω L=900mH	R=7,5 Ω L=346mH	R=18,8 Ω C=940 μF
	3	R=6,3 Ω L=380mH	R=7,5 Ω L=346mH	-----
Cargas trifásicas		Fases ABC		
Retificador 3 Φ de onda completa	1	R=16 Ω		
	2	R=16 Ω	C=95 μF	
	3	R=16 Ω	L=900mH	

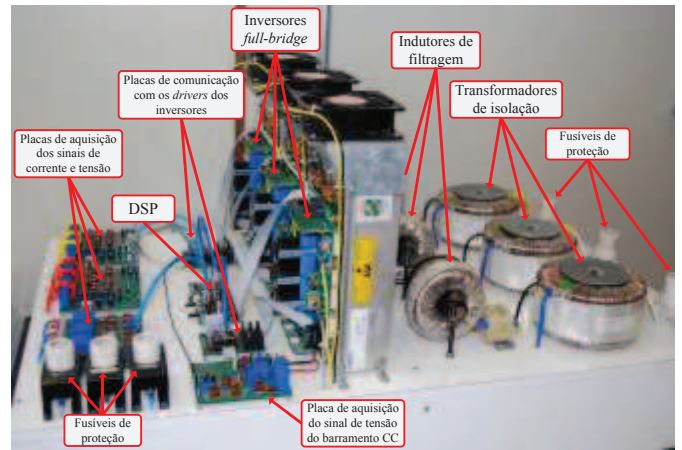


Fig. 7. Protótipo do FAPP trifásico.

Nas Figuras 11, 12 e 13 mostram os resultados obtidos do FAPP para o modo de operação CDCC (Figura 4), considerando também as cargas monofásicas 1, 2 e 3 apresentadas na Tabela II.

As correntes das cargas (i_{La} , i_{Lb} e i_{Lc}) e a corrente de neutro da carga (i_{Ln}) são mostradas nas Figuras 11.a, 12.a e 13.a. Já as correntes compensadas da fonte (i_{sa} , i_{sb} e i_{sc}) e corrente de neutro da fonte (i_{sn}) são mostradas nas Figuras 11.b, 12.b e 13.b, enquanto as correntes de compensação sintetizadas pelo FAPP (i_{ca} , i_{cb} e i_{cc}) e a corrente de neutro do FAPP (i_{cn}) são mostradas nas Figuras 11.c, 12.c e 13.c, para o sistema alimentando as cargas 1, 2 e 3, respectivamente.

Verifica-se a compensação do desequilíbrio de corrente entre as fases, além da supressão dos harmônicos e compensação de reativos. Desta forma, todas as componentes de sequência negativa e zero foram compensadas, resultando no equilíbrio de corrente entre as fases e, conseqüentemente, em uma corrente de neutro da fonte aproximadamente nula.

A Figura 14 mostra os resultados obtidos para o sistema alimentando as cargas trifásicas 1, 2 e 3 mostradas na Tabela II. Verifica-se a efetiva compensação realizada pelo FAPP.

A Tabela III mostra a distorção harmônica total (DHT) das correntes da carga (i_{La} , i_{Lb} e i_{Lc}) e da rede já compensadas (i_{sa} , i_{sb} e i_{sc}), para todos os casos mostrados, ou seja, para as cargas monofásicas e trifásicas 1, 2 e 3. Em todos os casos houve uma significativa redução da TDH da corrente compensada na rede, mesmo considerando a carga

não linear monofásica 2 (fase c) onde a TDH foi reduzida de 77,2% para aproximadamente 9%. Isto também pode ser observado para a carga trifásica 2.

TABELA III
DHT das Correntes da Carga e da Rede

Cargas monofásicas (1Φ) e trifásicas (3Φ)		Distorção Harmônica Total (DHT%)					
		i_{La}	i_{Lb}	i_{Lc}	i_{sa}	i_{sb}	i_{sc}
Carga 1 (1Φ)	CCIF	25,0	25,6	25,8	3,7	3,8	3,7
	CDCC				4,6	3,6	2,5
Carga 2 (1Φ)	CCIF	34,6	23,8	77,2	4,1	4,2	9,0
	CDCC				5,7	4,2	8,3
Carga 3 (1Φ)	CCIF	25,0	25,6	--	3,7	3,7	--
	CDCC				5,1	4,3	--
Carga 1 (3Φ)	CDCC	25,0	25,0	25,8	6,2	6,5	6,1
Carga 2 (3Φ)	CDCC	55,2	55,0	57,6	8,7	9,1	8,8
Carga 3 (3Φ)	CDCC	24,1	23,9	24,0	5,1	5,5	5,2

A Figura 15 mostra os resultados transitórios no intuito de verificar o comportamento dinâmico do FAPP nas transições entre os modos de operação CCIF e CDCC, bem como na entrada e saída de operação do FAPP. Para estes testes foi utilizada a carga monofásica 1 apresentada na Tabela II. A Figura 15.a mostra a transição do modo CCIF para o CDCC enquanto na Figura 15.b mostra a transição do modo CDCC para o CCIF. Já as Figuras 15.c e 15.d mostram a entrada e a saída de operação do FAPP, atuando com a estratégia CCIF. Verifica-se que em ambos os casos, o FAPP realiza a transição sem causar qualquer tipo de distúrbio no sistema

elétrico, demonstrando um adequado desempenho para estes tipos de transitórios.

Os resultados experimentais relacionados ao controle da tensão do barramento CC (V_{cc}) do FAPP, no instante da pré-carga do banco de capacitores e variação de carga no sistema, são mostrados na Figura 16. As Figuras 16.a e 16.b mostram a tensão V_{cc} e as correntes da rede, nas etapas de pré-carga do capacitor C_{cc} (E1, E2, E3 e E4). Na etapa E1, têm-se $V_{cc} = 35V$ devido à alimentação dos *drivers* dos inversores. Em E2 ocorre a pré-carga do banco de capacitores, onde o FAPP comporta-se como um retificador não controlado, resultando em $V_{cc}=178V$. Nesta etapa, a corrente drenada da rede apresenta amplitude reduzida como observado pela Figura 16.b devido à utilização de resistores de pré-carga ligados em série com o FAPP. Já na etapa E3, os resistores de pré-carga são curto-circuitados, elevando V_{cc} para 180V. Por fim, em E4, é acionado o FAPP de forma a controlar somente a tensão do barramento CC. Verifica-se que os conversores drenam da rede uma pequena parcela de corrente em ambas as fases, necessária para manter a tensão no valor de referência desejado, ou seja, $V_{cc}=230V$. As Figuras 16.c e 16.d mostram a tensão V_{cc} e as correntes da rede, respectivamente, para degraus de saída e entrada de carga nas três fases simultaneamente. Verifica-se comportamento dinâmico do sistema de controle de tensão do barramento CC, tanto para degraus de entrada como de saída de carga no sistema, validando o modelo apresentado na Seção III. A Figura 17 mostra as correntes compensadas da rede e a corrente de neutro quando, em um determinado instante de tempo, o inversor conectado à fase “b” do FAPP deixa de operar. Percebe-se que as correntes das outras fases continuam sendo compensadas normalmente.

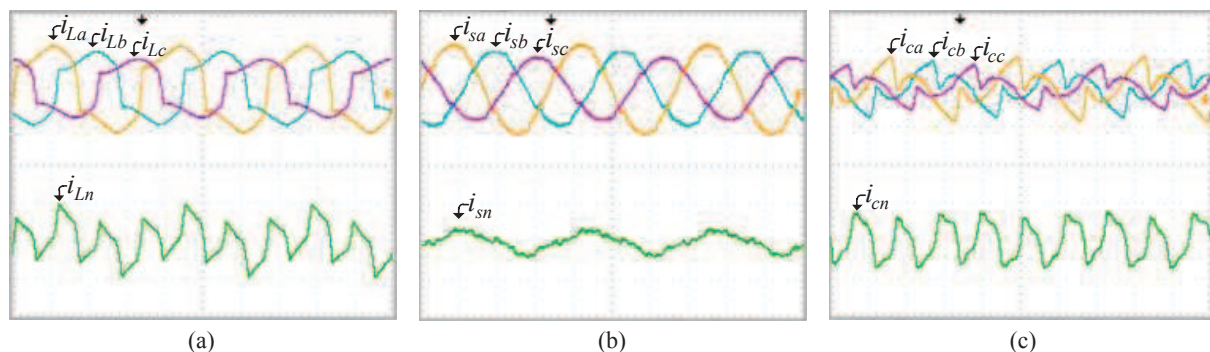


Fig. 8. Modo de operação CCIF para carga monofásica 1 (20A/div, 5ms/div): (a) Correntes das cargas (i_{La} , i_{Lb} , i_{Lc}) e i_{Ln} ; (b) Correntes compensadas da rede (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc}) e i_{sn} ; (c) Correntes de compensação do FAPP (i_{ca} , i_{cb} , i_{cc}) e i_{cn} .

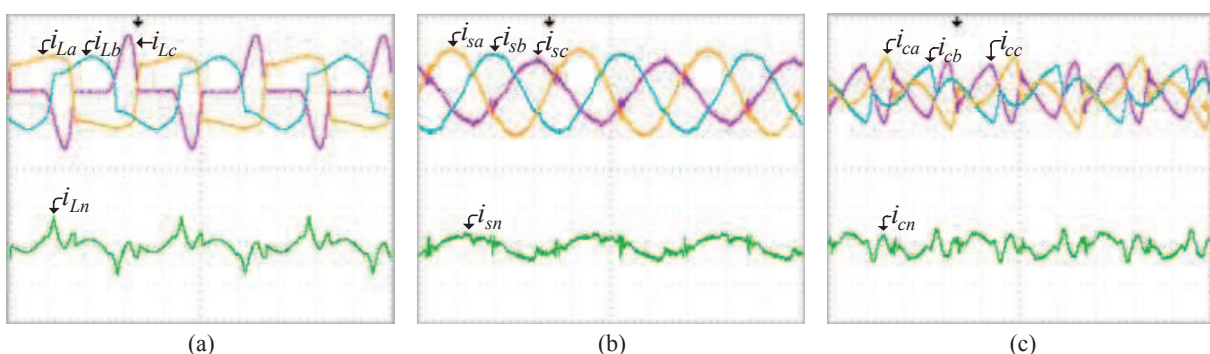


Fig. 9. Modo de operação CCIF para carga monofásica 2 e (20A/div, 5ms/div): (a) Correntes das cargas (i_{La} , i_{Lb} , i_{Lc}) e i_{Ln} ; (b) Correntes compensadas da rede (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc}) e i_{sn} ; (c) Correntes de compensação do FAPP (i_{ca} , i_{cb} , i_{cc}) e i_{cn} .

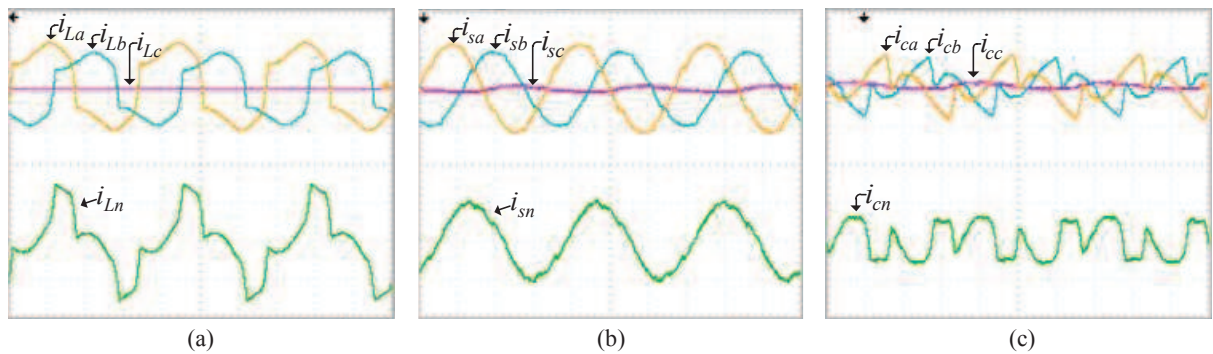


Fig. 10. Modo de operação CCIF para carga monofásica 3 e (20A/div, 5ms/div): (a) Correntes das cargas (i_{La} , i_{Lb} , i_{Lc}) e i_{Ln} ; (b) Correntes compensadas da rede (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc}) e i_{sn} ; (c) Correntes de compensação do FAPP (i_{ca} , i_{cb} , i_{cc}) e i_{cn} .

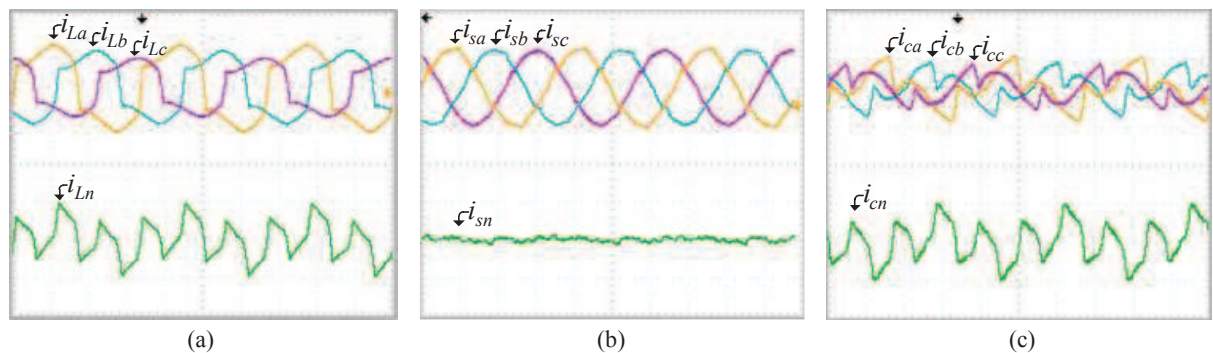


Fig. 11. Modo de operação CDCC para carga monofásica 1 (20A/div, 5ms/div): (a) Correntes das cargas (i_{La} , i_{Lb} , i_{Lc}) e i_{Ln} ; (b) Correntes compensadas da rede (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc}) e i_{sn} ; (c) Correntes de compensação do FAPP (i_{ca} , i_{cb} , i_{cc}) e i_{cn} .

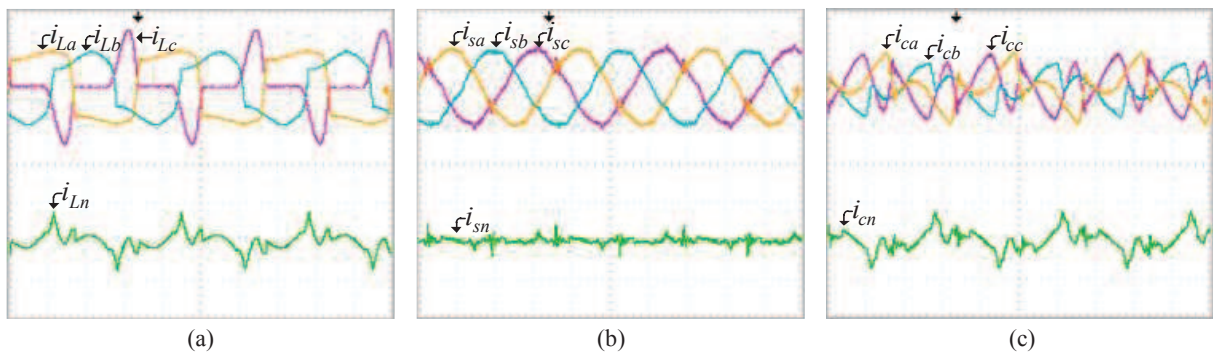


Fig. 12. Modo de operação CDCC para carga monofásica 2 (20A/div, 5ms/div): (a) Correntes das cargas (i_{La} , i_{Lb} , i_{Lc}) e i_{Ln} ; (b) Correntes compensadas da rede (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc}) e i_{sn} ; (c) Correntes de compensação do FAPP (i_{ca} , i_{cb} , i_{cc}) e i_{cn} .

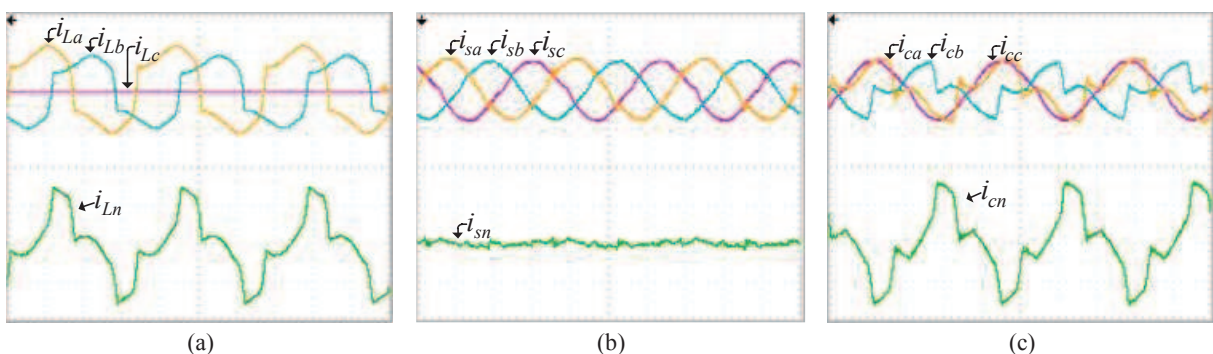


Fig. 13. Modo de operação CDCC para carga monofásica 3 (20A/div, 5ms/div): (a) Correntes das cargas (i_{La} , i_{Lb} , i_{Lc}) e i_{Ln} ; (b) Correntes compensadas da rede (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc}) e i_{sn} ; (c) Correntes de compensação do FAPP (i_{ca} , i_{cb} , i_{cc}) e i_{cn} .

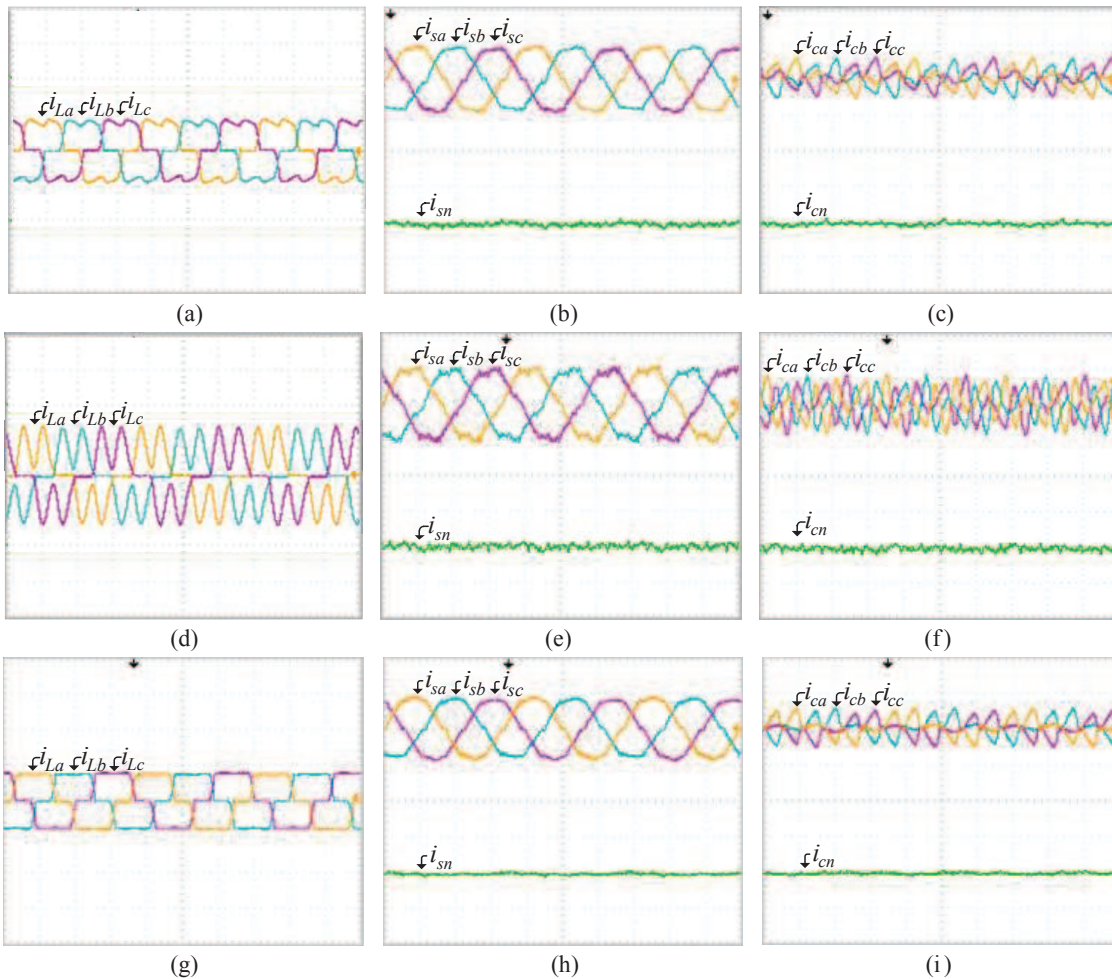


Fig. 14. Modo de operação CDCC: Carga trifásica 1 (20A/div, 5ms/div): (a) Correntes das cargas (i_{La} , i_{Lb} , i_{Lc}) e i_{Ln} ; (b) Correntes compensadas da rede (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc}) e i_{sn} ; (c) Correntes de compensação do FAPP (i_{ca} , i_{cb} , i_{cc}) e i_{cn} ; Carga trifásica 2 (20A/div, 5ms/div): (d) Correntes das cargas, (e) Correntes compensadas da rede, (f) Correntes de compensação do FAPP; Carga trifásica 3 (20A/div, 5ms/div): (g) Correntes das cargas, (h) Correntes compensadas da rede, (i) Correntes de compensação do FAPP.

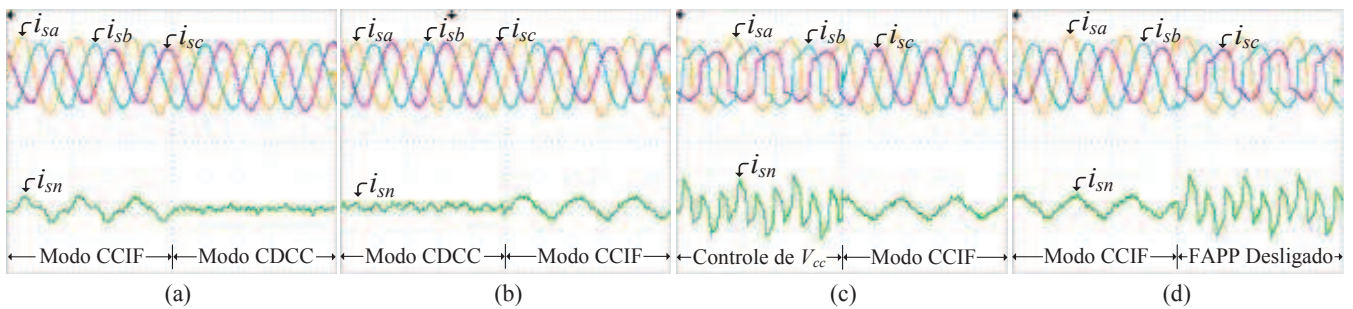


Fig. 15. Correntes compensadas da rede para transições do FAPP (20A/div, 10ms/div): (a) Transição do modo CCIF para CDCC; (b) Transição do modo CDCC para CCIF; (c) Entrada de operação do FAPP; (d) Saída de operação do FAPP.

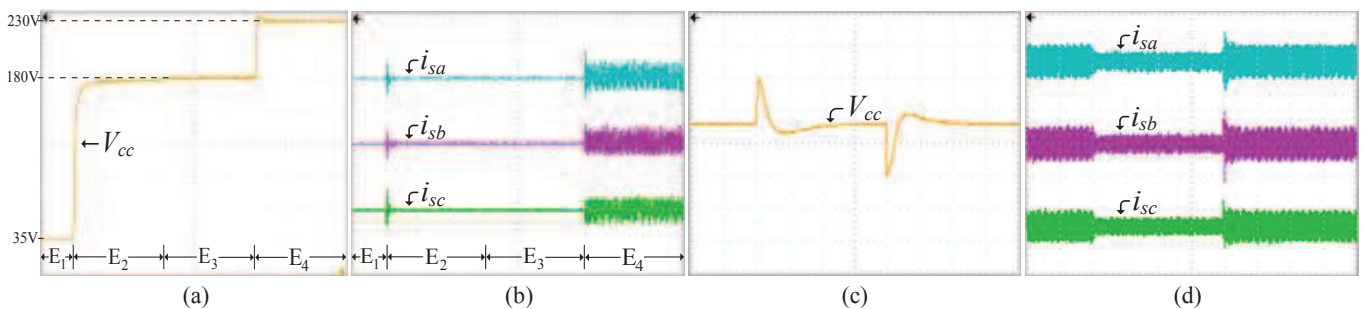


Fig. 16. Pré-carga do barramento CC e degraus de carga do FAPP: (a) Tensão V_{cc} na etapa de pré-carga do barramento CC (30V/div; 1s/div); (b) Correntes da rede na etapa de pré-carga do barramento CC (5A/div; 1s/div); (c) Tensão V_{cc} para degraus de saída e entrada de carga (50V/div; 100ms/div); (d) Correntes da rede para degraus de saída e entrada de carga (40A/div; 100ms/div).

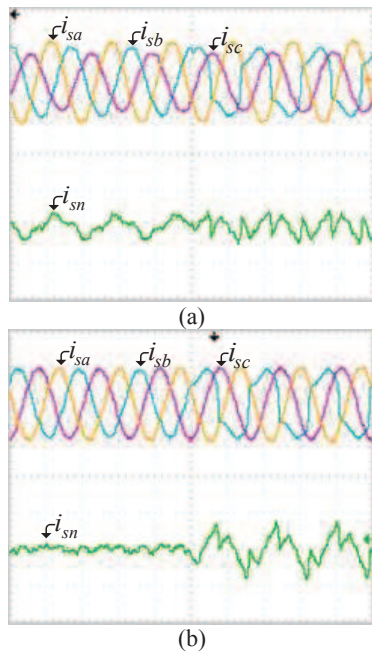


Fig. 17. Inibição da fase “b” do FAPP alimentando a carga monofásica 1 (20A/div, 10ms/div): (a) CCIF; (b) CDCC.

No intuito de se estimar os custos de implementação das três topologias de FAPP usadas em sistemas trifásicos a quatro fios, sendo elas a 3F-B, a Four-Legs (F-L) e a Split-Capacitor (S-C), tomou-se como base o dimensionamento de um FAPP alimentando três cargas monofásicas com potências individuais iguais. Foram utilizados módulos de IGBTs contendo duas chaves de potência, os quais foram empregados na composição de cada um dos braços dos inversores. As correntes de cada módulo são similares, no entanto as tensões de bloqueio direto das chaves são diferentes, dependendo da topologia adotada (Tabela IV).

Na estimativa de custos foram considerados os seguintes elementos: chaves do inversor (IGBTs); gate drivers; transformador de acoplamento (considerado apenas para a topologia 3F-B); indutores de acoplamento, os quais foram empregados apenas nas topologias F-L e S-C, considerando que para a topologia 3F-B estes foram suprimidos, uma vez que as indutâncias de dispersão dos transformadores de acoplamento podem realizar esta função; capacitor do barramento CC; elementos diversos compostos pelos sensores de efeito Hall de tensão e corrente, e demais componentes que compõem as placas de condicionamento de sinais, DSP (TMDSXP28335), placa de comunicação com o DSP, fontes auxiliares, dissipadores de calor, elementos de proteção (fusíveis), contatores de partida (pré-carga do barramento CC), dentre outros. Para efeito de simplificação, os custos dos respectivos elementos diversos foram considerados iguais para os três FAPPs.

A Tabela IV resume os custos estimados dos FAPPs considerando que a base 1 pu se refere à topologia 3F-B. Ressalta-se que foram considerados no levantamento de custos, os módulos de potência dos inversores e os gate drivers (SKHI 20opA) fornecidos pela Semikron.

Embora a topologia 3F-B necessite de um número maior de chaves, quando comparado com as topologias S-C e F-L, esta apresenta menor tensão no barramento CC, resultando

na escolha de chaves com tensões de bloqueio direto menores. No entanto, o uso dos transformadores implica diretamente no aumento de custo desta topologia. Por outro lado, o isolamento galvânico do FAPP em relação à rede é obtido, além da flexibilidade de operação da estrutura, exemplificado pelos testes experimentais.

TABELA IV

Custo Comparativo dos FAPPs (Carga Nominal 4,5KVA)

Elementos	3F-B	F-L	S-C
Módulo Inversor (IGBTs)	6x (40A/600V) 0,23 pu	4x (40A/1200V) 0,22 pu	3x (40A/1200V) 0,165 pu
Gate Driver (IGBTs)	6x 0,19 pu	4x 0,13 pu	3x 0,1 pu
Transformador de Acoplamento	3x T_a 0,32 pu	0x T_a 0 pu	0x T_a 0 pu
Indutor de Filtragem	0x L_f 0 pu	4x L_f 0,225 pu	3x L_f 0,17 pu
Capacitor CC	1x C_{cc} (350V) 0,04 pu	1x C_{cc} (500V) 0,105 pu	2x C_{cc} (350V) 0,08 pu
Diversos	0,22 pu	0,22 pu	0,22 pu
Custo Total	1 pu	0,90 pu	0,735 pu

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o estudo e a implementação de um FAPP aplicado em sistemas trifásicos a quatro-fios, o qual foi utilizado na eliminação de harmônicos, bem como na compensação de reativos e desbalanços das correntes de carga. Os algoritmos adotados para obtenção das correntes de referência de compensação são fundamentados no método de controle baseado no sistema de eixos de referência síncrona. Com a criação de sistemas trifásicos fictícios, obtidos a partir de cada uma das fases do sistema trifásico a quatro-fios, os algoritmos SRF foram empregados individualmente por fase, ou seja, o sistema trifásico a quatro-fios pôde ser tratado como três sistemas monofásicos independentes.

Duas estratégias de compensação de corrente foram empregadas. Na estratégia CCIF, o FAPP foi controlado para suprimir as correntes harmônicas da carga, bem como compensar potência reativa. Neste caso, a compensação das componentes fundamentais de sequência negativa e zero não foram realizadas. Assim, as correntes compensadas da rede permaneceram desbalanceadas e aproximadamente senoidais. Com a estratégia CDCC, além da supressão de harmônicos e compensação da potência reativa, a compensação dos desequilíbrios das correntes de fase foi obtida.

O FAPP com a topologia 3F-B possibilitou o controle independente dos três inversores monofásicos. Isto representa uma importante vantagem, pois se um dos três inversores apresentar problemas no seu funcionamento, os demais continuam operando normalmente. Além disso, a topologia 3F-B garante maior precisão na compensação do desequilíbrio de corrente entre as fases.

Os ensaios experimentais possibilitaram a análise do comportamento estático e dinâmico do FAPP. Para as duas estratégias de compensação adotadas, obteve-se um bom desempenho, considerando a transição entre os modos de operação CCIF e CDCC, degraus de carga, entrada e saída de operação do FAPP e controle do barramento CC.

REFERÊNCIAS

- [1] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, 3ª Edição, Nova Iorque, 2012.
- [2] *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)*, módulo 8, revisão 4, 2012.
- [3] T. M. Cruzes, “A Survey of Neutral Currents in Three-Phase Computer Power Systems”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 26, no. 4, pp. 719-725, July/August 1990.
- [4] L. R. Limongi, D. Roiu, R. Bojoi, A. Tenconi, “Analysis of Active Power Filters Operating with Unbalances Loads”, *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 15, no. 3, pp. 166-174, Junho/Agosto 2010.
- [5] D. A. Fernandes, S. R. Naidu, K. P. Medeiros, “Uma Estratégia de Controle Aplicada a Retificadores PWM e Filtros Ativos de Potência em Derivação”, *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 16, no. 4, pp. 312-319, Setembro/Novembro 2011.
- [6] B. Singh, K. A. Haddad, A. Chandra, “A Review of Active Filters for Power Quality Improvement”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 5, pp. 960-971, October 1999.
- [7] R. F. Pinheiro, C. B. Jacobina, A. M. N. Lima, E. R. Cabral da Silva, “A Revision of the State of the Art in Active Filters”, in *Proc. of COBEP*, pp. 857-862, 1999.
- [8] V. Khadkikar, A. Chandra, “An Independent Control Approach for Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter Based on Three H-Bridge Topology under Unbalanced Load Conditions”, in *Proc. of PESC*, pp. 4643-4649, 2008.
- [9] H. K. M. Paredes, D. I. Brandão, E. V. Liberado, F. P. Marafão, “Compensação Ativa Paralela Baseada na Teoria de Potência Conservativa”, *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 17, no. 1, pp. 409-418, Fevereiro 2012.
- [10] R. F. Camargo, H. A. Gründling, H. Pinheiro, “Filtro Ativo de Potência para Compensação de Harmônicos de Tensão em Sistemas de Distribuição Trifásicos a Quatro-Fios”, *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 12, no. 1, pp. 63-70, Março 2007.
- [11] M. I. M. Monteiro, E. R. Cadaval, F. B. González, “Comparison of Control Strategies for Shunt Active Power Filters in Three-Phase Four-Wire System”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 1, pp. 229-236, January 2007.
- [12] S. Bhattacharya, P-T. Cheng, D. M. Divan, “Hybrid Solutions for Improving Passive Filter Performance in High Power Applications”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 3, pp. 732-747, May/June 1997.
- [13] S. A. O. Silva, P. F. Donoso-Garcia, P. C. Cortizo, P. F. Seixas, “A Three-Phase Line-Interactive UPS System Implementation with Series-Parallel Active Power-Line Conditioning Capabilities”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 6, pp. 1581-1590, November/December 2002.
- [14] S. A. O. Silva, P. F. Donoso-Garcia, P. C. Cortizo, P. F. Seixas, “A Line-Interactive UPS System Implementation with Series-Parallel Active Power-Line Conditioning for Three-Phase, Four-Wire Systems”, *Revista Controle & Automação*, vol. 16, no. 2, pp. 200-210, 2005.
- [15] S. A. O. Silva, R. Novochadlo, R. A. Modesto, “Single Phase PLL Structure Using Modified p-q Theory for Utility Connected Systems”, in *Proc. of PESC*, pp. 4706-4711, 2008.
- [16] M. Abdusalam, P. Poure, S. Karimi, S. Saadate, “New Digital Reference Current Generation for Shunt Active Power Filter under Distorted Voltage Conditions”, *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 5, pp. 759-765, May 2009.
- [17] L. B. G. Campanhol, “*Filtro Ativo de Potência Paralelo Utilizando Inversores Monofásicos Full-Bridge Aplicado em Sistemas Trifásicos a Quatro-Fios*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CP), 2012.
- [18] V. D. Bacon, S. A. O. Silva, R. A. Modesto, “UPS Line-Interactive Monofásica para Aplicações de Baixo Custo Utilizando uma Estratégia de Controle Simplificada”, in *Proc. of 10th IEEE INDUSCON*, pp. 1-9, 2012.

DADOS BIOGRÁFICOS

Leonardo Bruno Garcia Campanhol, nascido em 05/06/1986 em Rolândia-PR, é tecnólogo em automação industrial (2009), especialista em controle e automação de processos industriais (2010) e mestre em engenharia elétrica (2012) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CP), *Campus* Cornélio Procópio. Atualmente é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UTFPR-CP. Suas áreas de interesse são: processamento digital de sinais e suas aplicações, automação industrial, filtros ativos de potência e qualidade da energia elétrica.

Sérgio Augusto Oliveira da Silva, nascido em Joaquim Távora-PR, é engenheiro eletricista (1987) e mestre em engenharia elétrica (1989) pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); e doutor em engenharia elétrica (2001) pela Universidade Federal de Minas Gerais. É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Cornélio Procópio (UTFPR-CP) desde 1993. Suas áreas de interesse são: filtros ativos de potência, sistemas de energia ininterrupta (UPS), sistemas de controle empregando DSP's, qualidade da energia elétrica e ensino de Engenharia Elétrica. É membro da SOBRAEP.

Alessandro Goedtel, nascido em 12/02/1972 em Arroio do Meio-RS, é engenheiro eletricista (1996) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS-DEE); mestre em engenharia industrial (2003) pela Universidade Estadual Paulista (UNESP-FEB) e doutor em engenharia elétrica (2007) pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP). É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CP) desde 2007. Suas áreas de interesse são: acionamento de máquinas, sistemas inteligentes e ensino de Engenharia Elétrica. É membro da SBA.