

FILTROS ADAPTATIVOS APLICADOS EM CONDICIONADORES DE ENERGIA

Sílvia C. Ferreira, Rondineli R. Pereira, Robson B. Gonzatti, Carlos H. da Silva,
Luiz Eduardo B. da Silva, Germano Lambert-Torres

Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Itajubá - MG, Brasil

e-mail: rondineli@unifei.edu.br, leborges@unifei.edu.br

Resumo - Este artigo apresenta uma comparação entre quatro algoritmos para a compensação do conteúdo harmônico e da potência reativa através de condicionadores de energia. Os quatro algoritmos testados são: o método da referência síncrona, o filtro adaptativo sintonizado utilizando PLL para gerar os sinais de referência, o filtro adaptativo sintonizado utilizando a Transformada de Clarke para gerar os sinais de referência e o filtro adaptativo sintonizado com estimador de frequência. O principal objetivo é demonstrar a habilidade dos filtros adaptativos em acompanhar as variações do sinal de entrada, sem a necessidade de um algoritmo de sincronismo, como o PLL. Os algoritmos foram simulados, implementados no DSP TMS320F2812 e testados diretamente em filtros ativos de potência. Diversos aspectos relativos ao tempo de execução, à velocidade de convergência e ao erro em regime permanente são apresentados.

Palavras-Chave – Condicionadores de Energia, Estimação de Frequência, Filtro Adaptativo, Filtro Ativo de Potência, Harmônicos, Potência Reativa.

ADAPTIVE NOTCH FILTERS APPLIED TO POWER CONDITIONERS

Abstract - This paper presents a comparison of four algorithms for the compensation of the harmonic content and the reactive power through power conditioners. The tested algorithms are: the method of synchronous reference, adaptive filter tuned using the PLL to generate reference signals, the adaptive tuned filter using the Clarke Transformation to generate reference signals and the adaptive tuned filter with frequency estimator. The objective is to demonstrate their ability of tracking the signal variations without the use of synchronization techniques, like a PLL. The algorithms are simulated and implemented in DSP TMS320F2812 for active power filter structures. Several important aspects concerning the computation time, convergence speed and steady-state error are presented.

Keywords – Active Power Filter, Adaptive Filters, Frequency Estimation, Harmonic, Power Conditioners, Reactive Power.

Artigo submetido em 24/07/2014. Primeira revisão em 08/10/2014. Aceito para publicação em 17/11/2014, por recomendação do Editor Cassiano Rech.

I. INTRODUÇÃO

A circulação de correntes harmônicas gera um impacto negativo nos sistemas de distribuição, podendo causar danos em equipamentos e deteriorar a qualidade da energia. Os principais geradores dessas correntes harmônicas são os acionamentos industriais que cada vez mais têm feito uso de sistemas baseados em eletrônica de potência. Assim, com a finalidade de eliminar as componentes harmônicas da corrente, os equipamentos que possam fazer esta compensação vêm se tornando um assunto cada vez mais relevante.

Uma das soluções tradicionais para a compensação de harmônicos, que também é utilizada para a correção do fator de potência, é o uso de filtros passivos sintonizados. Isto tem ocorrido devido à robustez desses filtros e ao seu baixo custo. Entretanto, apesar destas vantagens e de sua extensiva utilização industrial, o uso deste tipo de filtro está associado a uma série de desvantagens, que a cada dia se tornam mais evidentes na operação sistêmica cotidiana, tais como: ressonâncias, perda de sintonia com consequente perda de sua utilidade, forte dependência dos parâmetros da rede, entre outras [1]. Com o advento dos filtros ativos de potência e, posteriormente, dos filtros ativos híbridos, surgiu uma alternativa mais eficiente para mitigar os conteúdos harmônicos da rede, sem causar os problemas que a introdução de filtros passivos ocasiona [1]-[3].

Da mesma forma que os filtros passivos, os filtros ativos também necessitam de um certo tipo de sintonia para que possam operar corretamente. Nos filtros passivos esta sintonia é feita através de um conjunto de estudos da carga, gerando uma compensação estática. Nos filtros ativos, esta sintonia é dinâmica, ou seja, o filtro busca um ajuste a cada instante. Este ajuste depende basicamente da correta estimação do conteúdo harmônico dos sinais de corrente. Assim, diferentes técnicas para extração de conteúdo harmônico foram desenvolvidas ao longo do tempo para melhorar o desempenho destes filtros, entre elas pode-se mencionar: a referência síncrona [4] e a teoria da potência instantânea (*teoria p-q*) [5], que são os dois métodos mais utilizados em filtros ativos.

Entretanto, mesmo sendo os dois métodos mais utilizados ainda apresentam certos problemas: a teoria p-q não apresenta bom desempenho quando a tensão do sistema é distorcida e a referência síncrona depende de algoritmos de sincronismo, como o PLL (*Phase-Locked-Loop*) para ter bons resultados.

Recentemente, o uso de filtros adaptativos tem se mostrado uma importante alternativa para extração do conteúdo harmônico dos sinais de corrente, além de conseguir capturar

informações sobre a componente reativa da corrente [6]-[10]. Os filtros adaptativos já têm sido utilizados em outras aplicações no sistema elétrico para a estimação de frequência [7], sincronismo com a rede [8], [9] e em outros tópicos relacionados à qualidade de energia [10]. O uso de filtros adaptativos em aplicações de eletrônica de potência e na análise da qualidade de energia se tornou viável e interessante devido à sua capacidade de acompanhar as variações de amplitude, de fase e, principalmente, da frequência dos sinais do sistema elétrico, com simplicidade e robustez.

Normalmente, os algoritmos adaptativos são apresentados na literatura como uma alternativa aos métodos clássicos, como a referência síncrona [6]-[10]. Entretanto, estas técnicas ainda não foram comparadas entre si, em termos de precisão, resposta dinâmica e tempo de processamento.

Deste modo, este trabalho apresenta uma comparação entre quatro algoritmos para extração de conteúdo harmônico: referência síncrona (RS), filtro adaptativo sintonizado com PLL (FAS-PLL), filtro adaptativo sintonizado com Transformada de Clarke (FAS-Clarke) e filtro adaptativo sintonizado com estimador de frequência (FAS-estimador). Esta comparação é feita para auxiliar na escolha do melhor algoritmo de extração harmônica para diferentes condições de carga. O objetivo principal é garantir que os filtros adaptativos são adequados para aplicações em condicionadores de energia, com melhor resposta dinâmica e tempo de processamento do que os métodos tradicionais. Além disso, para comprovar estas características, os algoritmos de filtragem adaptativa foram implementados no DSP TMS320F2812 e aplicados em diferentes condicionadores de energia para compensação de harmônicos e controle da potência reativa.

II. FILTROS ADAPTATIVOS

Um filtro adaptativo é composto de duas partes principais: um filtro digital e um algoritmo de adaptação para ajustar os coeficientes do filtro. Em geral, existem dois tipos de filtros digitais que podem ser utilizados como filtros adaptativos, que são: os filtros FIR (“*Finite Impulse Response*”) e os filtros IIR (“*Infinite Impulse Response*”). Os filtros IIR são conhecidos por superar os filtros FIR, por causa de sua menor complexidade computacional. Entretanto, os filtros IIR podem se tornar instáveis durante o processo de adaptação se um polo for alocado fora do círculo de raio unitário. Por esta razão, a escolha do algoritmo de adaptação é uma questão muito importante no uso destes filtros [11]. O algoritmo de adaptação LMS (“*Least Mean Square*”) é um dos mais populares na filtragem adaptativa, devido à sua facilidade de implementação e baixa complexidade computacional. Entretanto, este algoritmo apresenta um problema de compromisso entre precisão e resposta dinâmica. Diferentes soluções para melhorar o problema associado ao uso do algoritmo de adaptação LMS já foram propostas na literatura, e são, em sua maioria, baseadas no controle do passo de adaptação [12].

Neste contexto de filtragem adaptativa, duas estruturas chamam a atenção por sua simplicidade e aplicação em condicionamento de energia [6], [13]. A primeira estrutura é um filtro adaptativo sintonizado, que foi introduzido por

Widrow [14], para o cancelamento de ruído. Posteriormente, esta estrutura foi utilizada em aplicações para detecção do conteúdo harmônico e melhoria na qualidade de energia [6]. Este filtro depende de dois sinais ortogonais como referência. A frequência desses sinais define a frequência de sintonia do filtro digital. Além disso, este filtro adaptativo tem estrutura semelhante a um filtro FIR tradicional, porém, possui apenas dois coeficientes a serem adaptados pelo algoritmo LMS. Em [6], um novo método para a geração dos sinais ortogonais baseado na Transformada de Clarke é apresentado. Este método soluciona os problemas de velocidade de convergência associado ao uso desse filtro com o algoritmo LMS.

A segunda estrutura é um filtro adaptativo, que utiliza um filtro digital sintonizado tipo IIR e um algoritmo para estimar a frequência de sintonia. Este filtro foi inicialmente proposto no domínio do tempo por Bodson e Douglas [15], e modificado por Hsu et al. [16], para solucionar os problemas de instabilidade de um filtro IIR. Depois disso, esta estrutura foi estendida para um arranjo capaz de extrair individualmente as componentes senoidais de um dado sinal e, conseqüentemente, estimar a componente fundamental e os harmônicos [7].

As seguintes topologias de filtros adaptativos são explicadas e comparadas nas seções seguintes: (a) filtro adaptativo sintonizado utilizando um PLL para gerar os sinais de referência (FAS-PLL), (b) filtro adaptativo sintonizado utilizando a Transformada de Clarke para gerar os sinais de referência (FAS-Clarke) e (c) filtro adaptativo sintonizado com estimador de frequência (FAS-estimador). Essas topologias de filtros adaptativos serão comparadas com a referência síncrona (RS). A descrição da referência síncrona não foi adicionada neste trabalho, por se tratar de um método bastante conhecido para extração de conteúdo harmônico. Entretanto, sua descrição completa pode ser encontrada em [4]. O objetivo desta comparação é garantir que os filtros adaptativos sejam adequados para aplicações em condicionadores de energia, com melhor resposta dinâmica e maior eficiência do que os métodos tradicionais.

A. Filtro Adaptativo Sintonizado com PLL

A estrutura mostrada na Figura 1 mostra o filtro adaptativo sintonizado proposto por Widrow [14]. Quando esta estrutura é aplicada para extração do conteúdo harmônico, $d(n)$ representa o sinal com harmônicos.

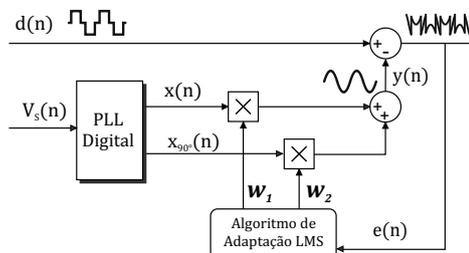


Fig. 1. Estrutura do FAS com PLL.

O objetivo do filtro adaptativo é aproximar $y(n)$ do sinal fundamental, acompanhando continuamente as variações do sinal de entrada em amplitude e fase. Finalmente, o sinal $e(n)$ representa o conteúdo harmônico do sinal de entrada e, $w_1(n)$ e $w_2(n)$, são os coeficientes do filtro adaptativo.

Observando-se a Figura 1, nota-se que os coeficientes do filtro adaptativo são ajustados pelo algoritmo LMS, cuja fórmula geral é dada pelas seguintes equações:

$$y(n) = w_1(n)x(n) + w_2(n)x_{90^\circ}(n) \quad (1)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2)$$

$$w_1(n+1) = w_1(n) + \mu e(n)x(n) \quad (3)$$

$$w_2(n+1) = w_2(n) + \mu e(n)x_{90^\circ}(n) \quad (4)$$

onde $x(n)$ e $x_{90^\circ}(n)$ são os sinais ortogonais de referência fornecidos pelo PLL e μ é o passo de adaptação. O parâmetro μ controla a taxa de convergência do algoritmo e sua precisão. Desta forma, quanto maior for o valor de μ pior é a precisão e mais rápida é a resposta dinâmica do algoritmo, e oposto ocorre quanto menor for o valor de μ [14]. Basicamente, o passo de adaptação define o tempo que o algoritmo LMS gasta para adaptar os coeficientes $w_1(n)$ e $w_2(n)$. Isso ocorre de forma que ao serem multiplicados pelos sinais de referência $x(n)$ e $x_{90^\circ}(n)$, o sinal de saída, $y(n)$, se aproxime em amplitude e fase da componente fundamental do sinal $d(n)$.

Então, o passo de adaptação para este filtro adaptativo sintonizado deve ser escolhido de maneira a atender um compromisso entre resposta dinâmica e precisão. Por outro lado, uma das principais vantagens deste filtro adaptativo sintonizado é que ele possui apenas dois parâmetros para adaptar, o que resulta em uma configuração mais simples e fácil para a extração do conteúdo harmônico se comparada a outras já apresentadas na literatura [2]-[12]. Esta estrutura utiliza um PLL para gerar os sinais ortogonais de entrada. Entretanto, o PLL apresenta uma série de desvantagens, como, por exemplo, o aumento no tempo de processamento e possíveis perdas de sincronismo frente a variações de frequência. Além disso, quando os sinais ortogonais são gerados pelo PLL é necessário aplicar técnicas auxiliares para melhorar a resposta dinâmica do filtro adaptativo, pois os sinais do PLL são unitários e não acompanham as variações da carga, cabendo ao algoritmo de adaptação todo o trabalho. Os algoritmos adicionais para melhorar a resposta dinâmica nesse caso utilizam técnicas que modificam o valor do passo de adaptação [12].

B. Filtro Adaptativo Sintonizado com Transformada de Clarke

Uma técnica diferente para geração dos sinais ortogonais de sintonia, foi proposta em [6] e demonstrou ser rápida e precisa para a detecção do conteúdo harmônico da corrente

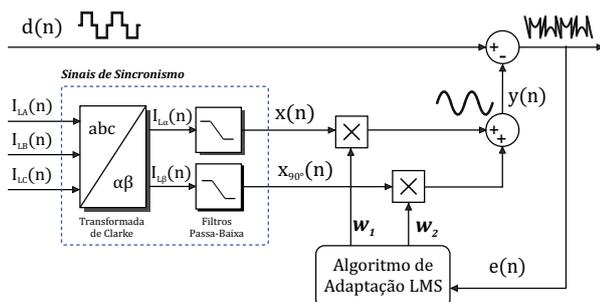


Fig. 2. Estrutura do FAS com Transformada de Clarke.

para sistemas trifásicos. A Figura 2 mostra como fica a estrutura do filtro adaptativo sintonizado com a Transformada de Clarke.

Esta técnica aplica a Transformada de Clarke nos sinais da corrente da carga, $I_{L,a,b,c}$, para a geração dos sinais ortogonais. Para tanto, $x(n)$ e $x_{90^\circ}(n)$ são obtidos aplicando-se a Transformada de Clarke nos sinais de corrente da carga, conforme expresso em:

$$\begin{bmatrix} I_{L\alpha} \\ I_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{La} \\ I_{Lb} \\ I_{Lc} \end{bmatrix} \quad (5)$$

onde $I_{L\alpha}$ e $I_{L\beta}$ são os sinais ortogonais gerados pela Transformada de Clarke. Depois disso, esses sinais são filtrados por um filtro passa-baixa de terceira ordem com uma frequência de corte de 100 Hz. O sinal filtrado possui apenas a frequência fundamental e é utilizado como referência do filtro adaptativo sintonizado, eliminando a necessidade de se utilizar o PLL. Além disso, o uso da Transformada de Clarke faz com que este algoritmo apresente resposta dinâmica mais rápida do que o anterior, pois como os sinais ortogonais são gerados a partir do próprio sinal de corrente, a função do filtro adaptativo é apenas ajustar os coeficientes $w_1(n)$ e $w_2(n)$ para corrigir os erros de amplitude e fase causados pelo uso do filtro passa-baixa. Desta forma, como os sinais de referência acompanham as variações da corrente de carga, incluindo as variações de frequência, a adaptação se torna mais rápida e precisa.

C. Filtro Adaptativo Sintonizado com Estimador de Frequência

O filtro adaptativo sintonizado com o estimador de frequência foi proposto em [7]. Este filtro é capaz de extrair a componente fundamental de um dado sinal a partir da estimação de sua frequência. O diagrama em blocos da Figura 3 mostra a estrutura completa deste filtro adaptativo.

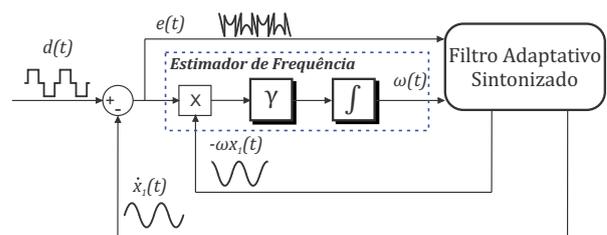


Fig. 3. Estrutura do FAS com estimador de frequência.

Nesta estrutura, $d(t)$ é o sinal a ser filtrado que possui harmônicos. A frequência fundamental deste sinal, $\omega(t)$, é estimada e, em seguida, utilizada para ajustar a frequência de sintonia do filtro adaptativo. Por sua vez, o filtro fornece dois sinais de saída: \hat{x}_i , que é a componente fundamental de $d(t)$ e sua ortogonal ωx_i . Estes sinais são utilizados para obtenção do erro, $e(t)$, e no estimador de frequência, respectivamente.

Caso seja necessário estimar as componentes harmônicas, outros subfiltros podem ser facilmente sintonizados, apenas acrescentando um multiplicador i , proporcional à ordem harmônica de interesse, na frequência estimada. Além disso, mesmo que apenas a frequência fundamental seja necessária,

a adição de outros subfiltros pode ser utilizada para aumentar a velocidade de convergência do algoritmo [7]. Este filtro adaptativo sintonizado com o estimador de frequência pode ser definido pelo seguinte conjunto de equações:

$$\dot{\omega} = -\gamma x_1(t)\omega(t)e(t) \quad (6)$$

$$\ddot{x}_i(t) = 2\zeta_i\omega(t)e(t) - i^2\omega^2(t)x_i(t) \rightarrow i = 1, 3, 5, \dots, n \quad (7)$$

$$e(t) = d(t) - \sum_{l=1}^n x_l. \quad (8)$$

O sinal de erro, $e(t)$, é utilizado no processo de adaptação do estimador de frequência. Os parâmetros γ e ζ são o coeficiente de adaptação e o fator de amortecimento, respectivamente. Estes parâmetros determinam o comportamento do filtro e a adaptação da frequência, em termos de velocidade e precisão.

Deve-se notar que o estimador de frequência pode ser implementado apenas uma vez e a frequência estimada $\omega(t)$ utilizada para sintonizar os demais filtros. Neste caso, como tensão e corrente possuem a mesma frequência, é interessante utilizar o estimador de frequência na tensão da rede. Isto deve ocorrer pois, em geral, a tensão é menos distorcida e apresenta menores variações de amplitude, o que melhora os resultados fornecidos pelo algoritmo do estimador de frequência. Uma das vantagens deste filtro adaptativo é que esta estrutura possui apenas dois parâmetros a serem definidos, γ e ζ , e também não precisa de técnicas de sincronismo, como o PLL. O método ainda fornece informações úteis do sinal analisado tais como, magnitude, ângulo de fase, frequência, entre outros [7].

Para implementar este filtro digitalmente, suas equações são divididas em duas variáveis de estado (x_i e \dot{x}_i), da seguinte maneira:

$$\omega(t) = - \int \gamma x_1(t)\omega(t)e(t) \cdot dt \quad (9)$$

$$\dot{x}_i(t) = \int 2\zeta_i\omega(t)e(t) - i^2\omega^2(t)x_i(t) \cdot dt \quad (10)$$

$$x_i(t) = \int \dot{x}_i(t) \cdot dt \rightarrow i = 1, 3, 5, \dots, n \quad (11)$$

$$e(t) = d(t) - \sum_{l=0}^n x_l(t). \quad (12)$$

Os integradores são digitalizados utilizando a aproximação de Euler, resultando nas seguintes equações:

$$\omega(n+1) = \omega(n) - T\gamma x_1(n)\omega(n)e(n) \quad (13)$$

$$\dot{x}_i(n+1) = \dot{x}_i(n) + T[2\zeta_i\omega(n)e(n) - i^2\omega^2(n)x_i(n)] \quad (14)$$

$$x_i(n+1) = x_i(n) + T\dot{x}_i(n) \rightarrow i = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

$$e(n+1) = d(n) - \sum_{l=0}^N x_l(n). \quad (16)$$

Sabe-se que os métodos de discretização têm forte influência na precisão do algoritmo. Entretanto, a extensiva utilização do método de Euler para a discretização de integradores, disponível na literatura, facilita avaliar esta influência [17]. Além disto, este método é simples e tem um tempo de processamento baixo. E mais, os resultados

apresentaram boa precisão para a frequência de amostragem utilizada, o que não justifica o uso de outra técnica de discretização.

III. ANÁLISE COMPARATIVA

Uma análise comparativa dos filtros adaptativos sintonizados descritos anteriormente é apresentada. Como o Método da Referência Síncrona é uma das técnicas mais conhecidas para a extração de conteúdo harmônico no domínio do tempo, é interessante também comparar os resultados obtidos com este método. Uma descrição completa da referência síncrona pode ser encontrada em [4]. Os algoritmos são comparados através de simulações e resultados práticos, para mostrar as principais vantagens dos filtros adaptativos na extração do conteúdo harmônico.

A. Resultados de Simulação - Precisão e Resposta Dinâmica

Para verificar a precisão e a resposta dinâmica dos algoritmos, as quatro estruturas foram simuladas utilizando-se uma modelagem via Matlab/Simulink. Os parâmetros utilizados para cada filtro na simulação estão apresentados na Tabela I.

TABELA I
Parâmetros do Algoritmo

Algoritmo	Parâmetros	Algoritmos Auxiliares
RS	$f_c = 9 \text{ Hz}$	Uso do PLL e filtros Butterworth passa-baixa de 2ª ordem.
FAS-PLL	$\mu = 0,001$	Uso do PLL para gerar os sinais de referência.
FAS-Clarke	$\mu = 0,0000055;$ $f_c = 100 \text{ Hz}$	Utilização da Transformada de Clarke da corrente da carga e filtro Butterworth passa-baixa de 3ª ordem para obtenção dos sinais de referência.
FAS-estimador	$\zeta = 0,45; \gamma = 1$	Filtro adaptativo adicional para estimação da frequência da tensão. Uso de sub-filtros para o 5º e 7º harmônicos para melhorar a resposta dinâmica.

Os parâmetros dos algoritmos foram obtidos heurísticamente para que todos eles possuam o mesmo erro em regime permanente e seja possível estabelecer um padrão de comparação. A frequência de corte do filtro passa-baixa da referência síncrona, bem como o passo de adaptação μ do filtro adaptativo sintonizado (FAS-PLL e FAS-Clarke) influenciam diretamente na qualidade da filtragem e na resposta dinâmica desses algoritmos. Entretanto, o passo de adaptação do FAS-Clarke é significativamente menor que o passo de adaptação do FAS-PLL. Isso ocorre porque os sinais de referência do FAS-Clarke não são unitários. Observando (3) e (4) é possível perceber que o FAS-Clarke precisa de um passo de adaptação menor já que a amplitude dos sinais ortogonais não é unitária.

Já para o FAS-Estimador é preciso ajustar dois parâmetros: o coeficiente de adaptação γ e o fator de amortecimento ζ . O coeficiente de adaptação γ determina a velocidade da adaptação e consequentemente a capacidade do FAS em acompanhar as variações de frequência do sinal. O aumento do valor de γ , melhora a velocidade da estimação da frequência, mas pode levar o sinal a ter oscilações. Já coeficiente de amortecimento ζ é o parâmetro que define a banda de passagem do filtro sintonizado, e se aumentado reduz as

possíveis oscilações causadas pelo aumento de γ . Desta forma, esses dois parâmetros trabalham em conjunto para garantir a precisão e a resposta dinâmica do algoritmo.

Com relação ao PLL utilizado, as suas características de implementação e resposta dinâmica seguem as apresentadas, em detalhes, em [18]. A frequência de amostragem é 40 kHz. Para os filtros adaptativos sintonizados que utilizam o algoritmo LMS a escolha da frequência de amostragem deve respeitar o Teorema de Nyquist. Entretanto, os passos de adaptação devem ser ajustados para que a precisão e resposta dinâmica do algoritmo continuem os mesmos.

Já para o FAS-estimador, como se trata de um filtro IIR, quanto maior for a frequência de amostragem utilizada mais as funções de transferência do filtro sintonizado e do estimador de frequência se aproximam de um filtro ideal. Entretanto, esta frequência pode ser mais baixa, desde que utilize-se o método de discretização correto [17].

Os quatro algoritmos descritos são utilizados para a extração do conteúdo harmônico da corrente de um retificador trifásico a diodos. A tensão da rede é de 220 V / 60 Hz (fase-fase). A corrente de carga apresenta uma taxa de distorção harmônica (TDH) de 48,54%. A Figura 4 mostra a resposta no tempo dos quatro algoritmos durante um transitório de 100% da carga. A componente fundamental aumenta de 8,2 para 16,4 A e é mostrada pela linha pontilhada.

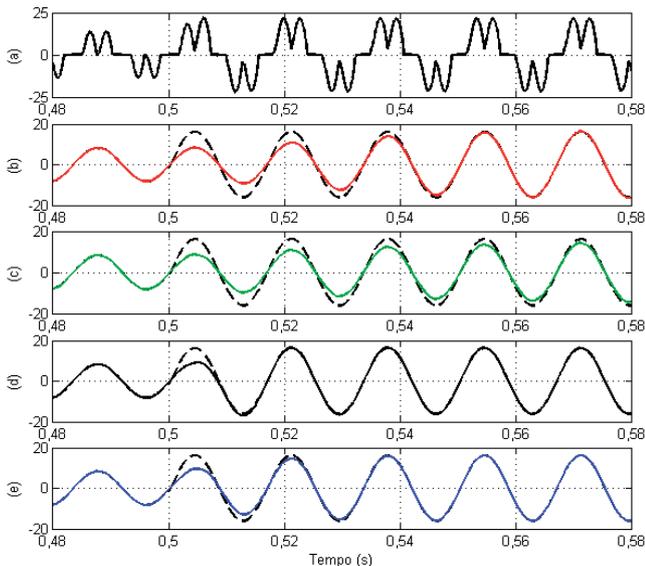


Fig. 4. (a) Degrau da corrente de carga. Extração da componente fundamental e referência (linha pontilhada) para : (b) RS, (c) FAS-PLL, (d) FAS-Clarke, (e) FAS-estimador.

Como esses algoritmos apresentam erros em diferentes frequências, os parâmetros foram ajustados para possuírem o mesmo erro eficaz em regime permanente. O erro eficaz (e_{rms}) é dividido pela corrente fundamental (I_{1rms}) para obter um erro percentual ($e\%$). Este erro foi ajustado para 0,5%, e o tempo de convergência de cada algoritmo é apresentado na Figura 5.

A partir das Figuras 4 e 5 é possível observar que o tempo de convergência do FAS-Clarke e FAS-estimador é inferior ao da referência síncrona (RS). O FAS-Clarke tem um tempo

de resposta menor do que um ciclo da fundamental. O uso da Transformada de Clarke elimina a necessidade do PLL e melhora significativamente o tempo de convergência do algoritmo quando comparada com o FAS-PLL e outras estruturas disponíveis na literatura [2]-[10]. Por outro lado, o FAS-estimador também apresenta uma rápida resposta dinâmica, um pouco maior do que um ciclo da fundamental.

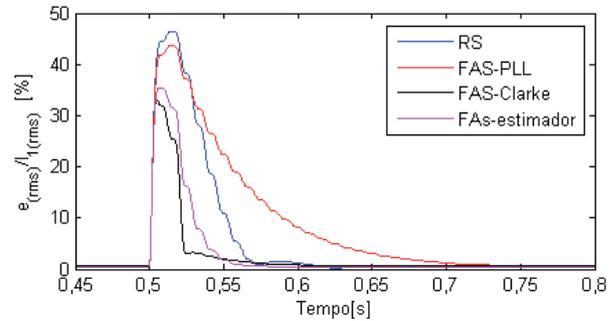


Fig. 5. Tempo de convergência dos algoritmos.

B. Eficiência Computacional

Os algoritmos foram implementados no DSP TMS320F2812 e o número de ciclos que cada algoritmo requer para extrair o conteúdo harmônico dos sinais trifásicos da corrente de carga foi contabilizado através do software Code Composer Studio v4.0. O tempo total de execução dos algoritmos é calculado assumindo-se 6,67 ns para cada ciclo do DSP. Os resultados são exibidos na Tabela II.

TABELA II
Eficiência Computacional

Algoritmo	Ciclos do DSP	Tempo de Execução μs
RS	1631	10,88
FAS-PLL	934	6,23
FAS-Clarke	815	5,44
FAS-estimador	885	5,90

O tempo de execução do PLL foi medido separadamente, resultando em 4,09 μs . Portanto, o PLL representa uma grande parte do tempo de processamento dos algoritmos que o utilizam. Este resultado confirma o alto esforço computacional associado ao uso deste algoritmo. Verifica-se então que o algoritmo FAS-Clarke é o mais eficiente em termos de tempo de execução, seguido pelo FAS-estimador, que mesmo com o uso de um filtro adicional para a estimação da frequência da tensão, continua tendo um baixo custo computacional.

C. Considerações Adicionais

Os resultados das seções anteriores são analisados e algumas considerações adicionais acerca dos algoritmos para extração do conteúdo harmônico são apresentadas a seguir.

O método da referência síncrona é uma das técnicas mais conhecidas para extração do conteúdo harmônico e foi utilizada como um padrão de comparação. Este método é dependente do PLL para realizar os propósitos de filtragem. O uso do PLL é criticado pelo seu alto tempo de processamento e perda de precisão quando ocorrem variações de frequência.

Além disso, a precisão e resposta dinâmica deste método são dependentes da ordem e da frequência de corte dos filtros passa-baixa utilizados no sistema de coordenadas dq .

O filtro adaptativo sintonizado com algoritmo LMS é exibido com duas diferentes estruturas para gerar os sinais de referência. Uma delas utiliza o PLL e, portanto, apresenta as mesmas desvantagens já mencionadas e relacionadas ao seu uso. Se comparada com o método da referência síncrona, tem um tempo de processamento consideravelmente menor. Entretanto, esta estrutura apresenta um problema de compromisso entre a resposta dinâmica e a precisão, apresentando a pior resposta dinâmica entre os algoritmos analisados. Este problema pode ser amenizado utilizando técnicas de controle do passo de adaptação [12].

O filtro adaptativo com algoritmo LMS foi também implementado utilizando-se a Transformada de Clarke para geração dos sinais de referência. Como esses sinais têm amplitude similar a da corrente de carga, este algoritmo apresenta a resposta dinâmica mais rápida entre todos. Além disso, a frequência dos sinais de referência é sempre a própria frequência da rede, portanto, este algoritmo é muito robusto em caso de variações de frequência. Entretanto, este filtro é mais adequado para sistemas trifásicos equilibrados e não apresenta a mesma resposta se for aplicado a sistemas monofásicos ou sistemas trifásicos desequilibrados. Isso ocorre porque quando a Transformada de Clarke é aplicada à sistemas desequilibrados não é possível garantir que esses sinais atendam o requisito de ortogonalidade necessário para sua utilização.

Finalmente, o filtro adaptativo com estimador de frequência demonstrou ser uma escolha interessante para aplicações na detecção do conteúdo harmônico. Este filtro apresenta melhor resposta dinâmica e menor custo computacional do que os métodos tradicionais baseados em algoritmos de sincronismo, com a mesma precisão. Ao compará-lo com o FAS-Clarke, apresenta uma resposta dinâmica e um tempo de processamento mais lentos e seu estimador de frequência não é tão robusto. Entretanto, esta estrutura permite aplicações em sistemas monofásicos ou trifásicos e, também, pode ser utilizada para extração da componente reativa da corrente.

Considerando estas análises, a estrutura do FAS-Clarke é a melhor opção para aplicações em compensação harmônica quando o sistema é tipicamente equilibrado, devido a seu rápido tempo de processamento e resposta dinâmica. Desta forma, este algoritmo tem sido utilizado como componente principal da estratégia de controle de um filtro ativo de potência paralelo (FAPP), compensando o conteúdo harmônico de uma carga do tipo fonte de corrente equilibrada [6]. Por outro lado, devido às características do FAS-estimador, este pode também ser utilizado para a compensação da potência reativa. O controle da potência reativa em sistemas distorcidos também é altamente dependente do método de extração do conteúdo harmônico. Então, o FAS-estimador tem sido utilizado no controle da potência reativa em um protótipo de filtro ativo híbrido (FAH), alimentando uma carga distorcida e desequilibrada [13]. Além disso, deve-se ressaltar que embora os algoritmos tenham sido aplicados para condicionadores de energia com topologias diferentes, o foco

principal é avaliar seu desempenho na extração do conteúdo harmônico quando implementados no DSP TMS320F2812. Estas duas aplicações em condicionadores de energia são mostradas a seguir.

IV. APLICAÇÕES PRÁTICAS

A. Compensação Harmônica com FAPP

O FAS-Clarke é utilizado para compensação harmônica em um filtro ativo de potência paralelo. Este filtro ativo é composto por três pontes H do tipo VSI (“Voltage Source Inverter”), com potência de 35 kVA, frequência de chaveamento de 40 kHz e link CC de 500 V. O indutor de alisamento (L_F) utilizado para conectar o FAPP à rede é de 5 mH. A tensão do sistema é 220 V / 60 Hz (fase-fase). A carga utilizada é uma ponte de diodos de 15 kVA do tipo fonte de corrente. O diagrama completo do FAPP é mostrado na Figura 6. Três sensores medem a corrente da carga que representa o sinal $d(n)$ de entrada do filtro adaptativo. O passo de adaptação do FAS é ajustado para $\mu = 0,0000015$ e todo o algoritmo de controle é implementado no DSP TMS320F2812.

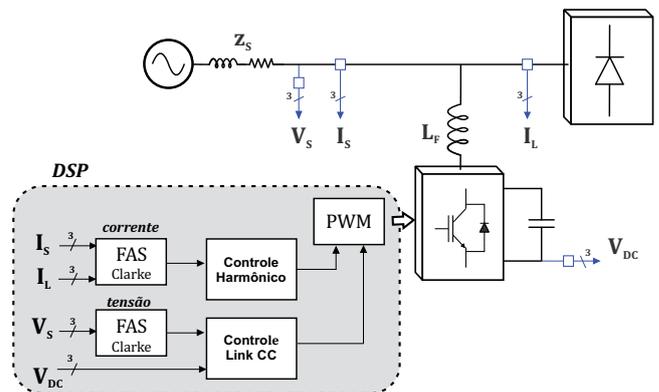


Fig. 6. Diagrama de blocos do filtro ativo de potência paralelo.

A Figura 7 apresenta a corrente de carga (I_{LA}) de 19 A, a corrente de compensação (I_{CA}) e a corrente da fonte da fase A (I_{SA}) depois da compensação, utilizando FAS-Clarke para a extração do conteúdo harmônico.

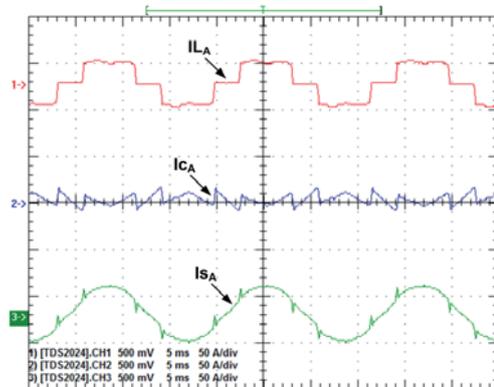


Fig. 7. FAS-Clarke aplicado para compensação harmônica.

Na Figura 8, o espectro harmônico da corrente da fonte antes e depois da compensação é mostrado. A taxa de

distorção harmônica (TDH) da corrente da fonte (I_{SA}) é reduzido de 28,9% para 4,63%.

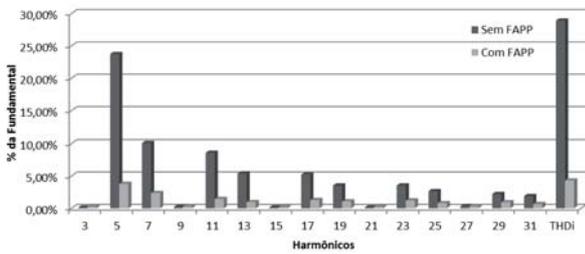


Fig. 8. Espectro harmônico da corrente: FAS-Clarke.

A Figura 9 mostra a resposta transitória utilizando-se o FAS-Clarke para um degrau de carga de 100%. O resultado mostra que o tempo de convergência do algoritmo (T_c) é menor que um ciclo, assim como o resultado apresentado na simulação. Este resultado mostra uma importante melhoria em relação aos resultados apresentados na literatura para utilização de filtros adaptativos para extração harmônica.

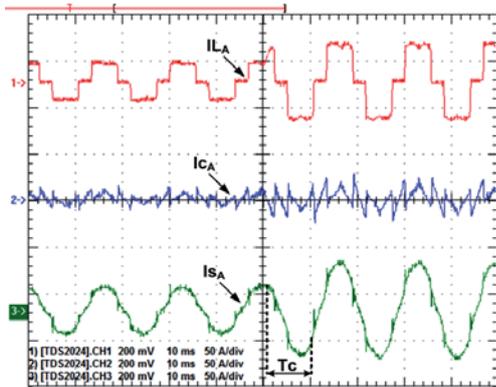


Fig. 9. Desempenho do FAS-Clarke em um degrau de carga.

B. Compensação da Potência Reativa com FAH

O FAS-estimador é aplicado a um protótipo de um Filtro Ativo Híbrido para compensação da potência reativa. Este filtro ativo é composto por três pontes H do tipo VSI de 25 kVA, trabalhando com uma frequência de chaveamento de 20 kHz e link CC ajustado para 440 V, conforme ilustrado na Figura 10. O transformador de acoplamento é 4:1 (440: 110 V) com potência de 1 kVA e o capacitor do filtro é de 60 μF . Foram utilizadas duas cargas para criar um desequilíbrio no sistema. A primeira carga (Carga 1) é uma ponte trifásica tiristorizada do tipo CSI de 10 kVA com o ângulo de disparo ajustado para $\alpha = 60^\circ$. A segunda carga (Carga 2) é uma resistência de 40 Ω que foi inserida entre as fases A e B. O algoritmo de controle foi implementado no mesmo DSP TMS320F2812, com uma frequência de amostragem de 40 kHz. O FAS-estimador foi aplicado para as três tensões e as correntes da rede, com dois subfiltros para o 5° e 7° harmônicos, com a intenção de melhorar a resposta dinâmica do conjunto. Os parâmetros de ajuste utilizados foram: $\zeta = 0,45$; $\gamma = 1$.

A topologia mostrada na Figura 10 é capaz de compensar dinamicamente a potência reativa entregue pelo filtro ativo

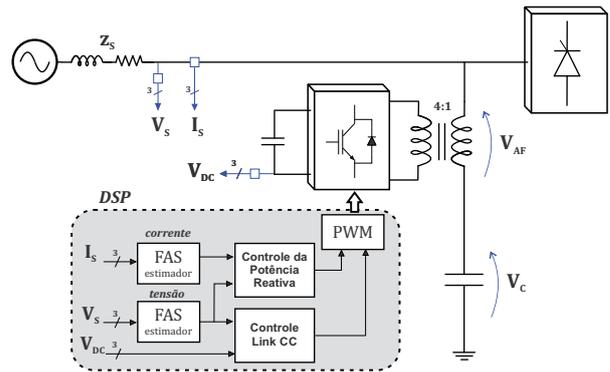


Fig. 10. Diagrama de blocos do filtro ativo híbrido.

híbrido controlando a tensão fundamental aplicada pelo conversor. O FAS-estimador é utilizado para extrair, individualmente, o conteúdo harmônico de cada fase. Esses sinais de saída são então empregados para o cálculo da potência reativa de sequência positiva (Q_1^+), conforme a recomendação IEEE 1459-2010 [10], [13].

A Figura 11 mostra os sinais da corrente da ponte trifásica tiristorizada com ângulo de disparo $\alpha = 60^\circ$ (Carga 1). Em seguida, uma resistência (Carga 2) é inserida entre as fases A e B, resultando em uma corrente distorcida e desequilibrada.

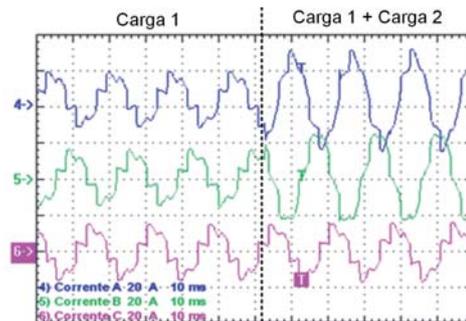


Fig. 11. Corrente da fonte durante transitório de carga.

A Figura 12 apresenta o diagrama fasorial e as potências do sistema medidas pelo FLUKE 435 antes da compensação da potência reativa. Já a Figura 13 mostra a atuação do filtro ativo híbrido no controle da potência reativa, apresentando seu diagrama fasorial e as potências medidas.

Com a inserção de uma carga resistiva, a potência reativa consumida pela carga deve se manter a mesma. Portanto, a Figura 14 mostra o comportamento das principais variáveis de compensação do filtro ativo híbrido, durante o transitório de entrada da Carga 2.

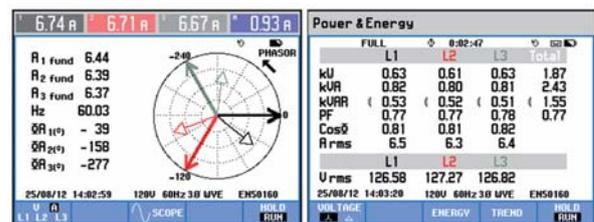


Fig. 12. Diagrama fasorial e potências antes da compensação da potência reativa.

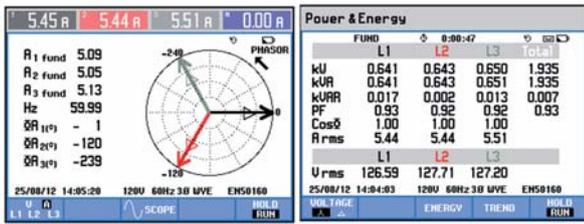


Fig. 13. Diagrama fasorial e potências após a compensação da potência reativa.

Embora a carga inserida seja puramente resistiva, o diagrama fasorial e as potências medidas pelo FLUKE 435, na Figura 15, continuam mostrando a existência de potência reativa nas fases A e B. Entretanto, quando existe desequilíbrio, a defasagem angular entre tensão e corrente de cada fase, também conhecida como fator de potência de deslocamento, pode ocorrer devido à presença de desequilíbrio ou potência reativa. Neste caso, pode-se afirmar que esta defasagem angular é causada pelo desequilíbrio e não pela presença de potência reativa nas fases A e B, pois a potência reativa trifásica total é próxima de zero. Isto mostra a importância da correta identificação da parcela reativa da corrente para aplicação em condicionadores de energia.

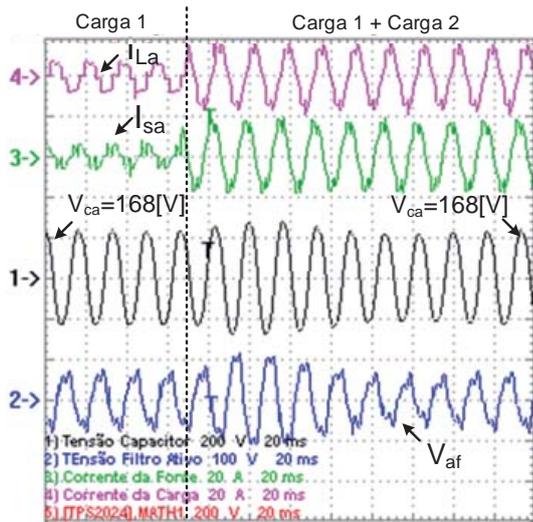


Fig. 14. Principais variáveis do FAH durante o transitório.

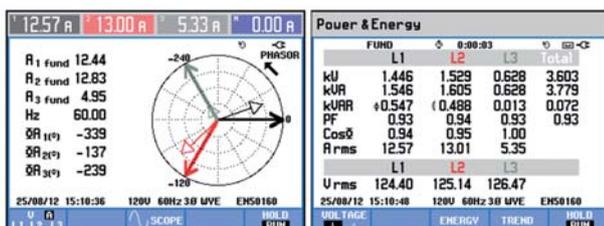


Fig. 15. Diagrama fasorial e potências após a entrada da carga resistiva.

V. CONCLUSÃO

Nas aplicações em tempo real, o tempo de execução e a resposta dinâmica são problemas críticos e devem

ser levados em consideração. Para isto, a escolha dos algoritmos utilizados para compensação de harmônicos e da potência reativa interferem de forma significativa. Este artigo apresentou uma comparação entre quatro algoritmos diferentes, que foram: o método da referência síncrona, o filtro adaptativo sintonizado utilizando o PLL, o filtro adaptativo sintonizado utilizando a Transformada de Clarke para gerar os sinais de referência e o filtro adaptativo sintonizado com estimador de frequência, evidenciando a eficiência dos filtros adaptativos e suas principais vantagens sobre outros algoritmos já apresentados na literatura.

O filtro adaptativo sintonizado com a Transformada de Clarke se mostrou um algoritmo simples e com resposta dinâmica muito rápida, enquanto, o filtro adaptativo sintonizado com estimador de frequência é um algoritmo muito flexível que permite aplicação em sistemas monofásicos ou trifásicos. Uma das principais vantagens destes filtros é fato de não precisarem de algoritmos de sincronismo como PLL, reduzindo o seu tempo de processamento e evitando erros quando ocorrem desvios de frequência.

Além disso, os resultados dos dois últimos filtros adaptativos sintonizados mostraram rápida resposta transitória e tempo de execução, até mesmo melhor que a referência síncrona, que é o método tradicional aplicado para extração do conteúdo harmônico. Os resultados de simulação e experimentais mostraram a viabilidade de aplicação dos algoritmos para a compensação harmônica e correção do fator de potência, e sua aplicabilidade em diferentes protótipos de condicionadores de energia. Entretanto, como este desenvolvimento foi feito baseado somente em estudos de casos, a extensão das conclusões deste trabalho para outras situações deve ser efetuada, observando-se com cuidado suas condições de contorno.

REFERÊNCIAS

- [1] N. da Silva, J. A. Pomilio, E. A. Vendrusculo, "Análise e Implementação de um Filtro Ativo Híbrido de Potência," *Eletrônica de Potência-SOBRAEP*, vol.17, no.3, pp.575-583, Agosto 2012.
- [2] G. J. França, B. J. C.Filho, "Series-Shunt Compensation for harmonic mitigation and dynamic power factor correction," *Eletrônica de Potência -SOBRAEP*, vol. 17, no.3, pp.641-650, Agosto 2012.
- [3] L. B. G. Campanhol, S. A. O. da Silva, A. Goedel, "Filtro Ativo de Potência Paralelo Aplicado em Sistemas Trifásicos a Quatro Fios", *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, vol. 18, no.3, pp.782-792, Fevereiro 2013.
- [4] A. Bhattacharya, C. Chakraborty, S. Bhattacharya "Shunt compensation," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol.3, no.3, pp.38-49, Setembro 2009.
- [5] L. S. Czarnecki, "Constraints of instantaneous reactive power p-q theory," *IET Power Electronics*, vol.7, no.9, pp.2201-2208, Setembro 2014.
- [6] R. R. Pereira, C. H. da Silva, L. E. B. da Silva, G. Lambert-Torres, J. O. P. Pinto, "New Strategies for Application of Adaptive Filters in Active Power Filters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.47, no.3, pp.1136-1141, Maio 2011.

- [7] D. Yazdani, A. Bakhshai, P. K. Jain, "A Three-Phase Adaptive Notch Filter-Based Approach to Harmonic/Reactive Current Extraction and Harmonic Decomposition," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.25, no.4, pp.914-923, Abril 2010.
- [8] K. -J. Lee, J.-P. Lee, D. Shin, D.-W. Yoo, H.-J. Kim, "A Novel Grid Synchronization PLL Method Based on Adaptive Low-Pass Notch Filter for Grid-Connected PCS," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.61, no.1, pp.292-301, Janeiro 2014.
- [9] R. Cardoso, H. A. Gründling, "Grid Synchronization and Voltage Analysis Based on the Kalman Filter," *Kalman Filter Recent Advances and Applications*, Victor M. Moreno and Alberto Pigazo, Abril 2009.
- [10] S. Rafiei, A. Moallem, A. Bakhshai, D. Yazdani, "Application of a digital ANF-based power processor for micro-grids power quality enhancement," in *Twenty-Ninth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp.3055-3059, Março 2014.
- [11] B. Farhang-Boroujeny, "Adaptive Filters: Theory and Applications." John Wiley and Sons, 1998, ch. 12.
- [12] S. Ghazanfari-Rad, F. Labeau, "Optimal variable step-size diffusion LMS algorithms," in *IEEE Workshop on Statistical Signal Processing (SSP)*, pp.464-467, Junho 2014.
- [13] S. C. Ferreira, R. B. Gonzatti, C. H. da Silva, L. E. B. da Silva, G. Lambert-Torres, L. G. F. Silva, "Control strategies applied to an hybrid reactive power compensator to single and three phase systems," in *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pp.1219-1225, Outubro 2013.
- [14] B. Widrow, J. R. Glover, J. M. McCool, J. Kaunitz, C. S. Williams, R. H. Hearn, J. R. Zeidler, Eugene Dong Jr., R. C. Goodlin, "Adaptive noise cancelling: Principles and applications," *Proceedings of the IEEE*, vol.63, no.12, pp.1692,1716, Dezembro 1975.
- [15] M. Bodson, S. Douglas, "Adaptive Algorithms for rejection of sinusoidal disturbances with unknown frequencies," in *13th IFAC World Conference*, Julho 1996.
- [16] Liu Hsu, R. Ortega, G. Damm, "A globally convergent frequency estimator," in *1st Int. Conference of Control Oscillations and Chaos*, vol.2, pp.252-257, 1997.
- [17] A. G. Yepes, F. D. Freijedo, J. Doval-Gandoy, O. Lopez, J. Malvar, P. Fernandez-Comesaña, "Effects of Discretization Methods on the Performance of Resonant Controllers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.25, no.7, pp.1692-1712, Julho 2010.
- [18] C. H. da Silva, R. R. Pereira, L. E. B. da Silva, G. Lambert-Torres, B. K. Bose, S. U. Ahn, "A Digital PLL Scheme for Three-Phase System Using Modified Synchronous Reference Frame," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.57, no.11, pp.3814-3821, Novembro 2010.

DADOS BIOGRÁFICOS

Sílvia Costa Ferreira possui Mestrado (2012) e Graduação em Engenharia Elétrica (2010) pela Universidade Federal

de Itajubá. Atualmente está cursando Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, atuando principalmente nos temas: Processamento Digital de Sinais, Sistemas de Controle, Filtros Adaptativos, Eletrônica de Potência e Filtros Ativos.

Rondineli Rodrigues Pereira é Professor de Eletrônica de Potência da Universidade Federal de Itajubá. Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (2011). Possui mestrado em Engenharia Elétrica (2009) e graduação em Engenharia da Computação (2006) pela Universidade Federal de Itajubá. Atua nas áreas de Eletrônica de Potência, Processamento Digital de Sinais, Filtros Ativos, Filtragem Adaptativa e Sistemas de Controle.

Robson Bauwlez Gonzatti possui Graduação em Engenharia de Controle e Automação pela Universidade Federal de Itajubá (2011) e Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (2012). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica Industrial. Atuando nos seguintes temas: Filtro Ativo, controle, energias renováveis e compensação Harmônica.

Carlos Henrique da Silva possui Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de São João Del-Rei (2002), Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (2005), Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (2009). Atualmente é Professor da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Brasil. Atua nas áreas de Filtro Ativo, Processamento Digital de Sinais e sistemas de controle.

Luiz Eduardo Borges da Silva possui Graduação (1977) e Mestrado (1982) em Engenharia Elétrica pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá, e Doutorado pela École Polytechnique de Montréal, Canada, em 1988. Atualmente, é Professor Titular no Departamento de Eletrônica na Universidade Federal de Itajubá. Foi Professor Visitante na University of Tennessee em Knoxville, em 1998. Suas áreas de pesquisa são focadas em eletrônica de potência, sistemas elétricos, conversores e aplicações de controle inteligente e adaptativo em problemas industriais. É Coordenador do Grupo de Eletrônica de Potência e Controle Industrial (GEPCI) da UNIFEI. Tem coordenado diversos projetos na sua área de atuação para diversas companhias no País e é autor de mais de 200 artigos técnicos. Orientou mais de 30 dissertações de mestrado e teses de doutorado. É Membro Sênior do IEEE.

Germano Lambert-Torres possui Graduação em Economia, Licenciatura Plena em Matemática e Engenharia Elétrica, pela Faculdade de Ciências Econômicas do Sul de Minas, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Itajubá e Escola Federal de Engenharia de Itajubá, em 1981, 1981 e 1982, respectivamente. Mestrado em Engenharia Elétrica pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá, em 1986, e Doutorado pela École Polytechnique de Montréal, Canada, em 1990. Foi Professor Titular da Universidade Federal de Itajubá por mais de 20 anos, tendo orientado mais de 70 dissertações de mestrado e teses de doutorado. Atualmente, é Diretor de Pesquisa e Desenvolvimento da PS Soluções, Pesquisador-Associado e Membro do Conselho Técnico-Científico do Instituto Gnarus. É Fellow do IEEE.