

SINCRONISMO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA BASEADO EM MODELOS MONOFÁSICO E TRIFÁSICO DE FILTRO DE KALMAN

Marcelo S. Pádua⁺, Sigmar M. Deckmann⁺, Fernando P. Marafão^{*}, Amauri Lopes⁺, Alexandre C. Moreira⁺

⁺ Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Departamento de Sistemas e Controle de Energia Elétrica, Av. Albert Einstein – 400 – Cidade Universitária CEP: 13083-970, Campinas, SP - Brasil.

E-mails: (marcelo, sigmar, amoreira)^{@dsce.fee.unicamp.br}

amauri^{@decom.fee.unicamp.br}

^{*} Universidade Estadual Paulista, Engenharia de Controle e Automação, CEP: 18087-180, Sorocaba, SP - Brasil.

E-mail: fmarafao^{@sorocaba.unesp.br}

Resumo – Considerando o crescente interesse em sistemas de Geração Distribuída (GD), este artigo apresenta uma alternativa para sincronização de geradores com a rede elétrica que faz uso do Filtro de Kalman (FK) para identificação da amplitude, do ângulo de fase e da frequência das tensões fundamentais da rede e do gerador, mesmo na presença de perturbações nas formas de onda. Baseado nos sinais senoidais de tensão de um sistema de energia elétrica, dois métodos são apresentados e desenvolvidos através de variáveis de estado: um para o caso de sistemas monofásicos e outro para o de trifásicos. Em seguida, é proposto um método simplificado para obtenção da frequência fundamental da(s) tensão(ões) medida(s) com base no ângulo de fase instantâneo. Considerando diferentes condições para o sinal de entrada, será mostrado através de resultados de simulação que, apesar da dinâmica da filtragem ser dependente dos ruídos de medição e de estado, bem como do estado inicial do sistema, os algoritmos são perfeitamente capazes de identificar as informações requeridas. Para analisar o comportamento do FK em um sistema prático, resultados experimentais foram obtidos, através de um sistema de aquisição e de processamento de dados, durante a conexão de uma máquina síncrona com a rede.

Palavras-Chave – Filtro de Kalman; Sincronismo; Geração distribuída; Detecção da fase instantânea; Identificação da frequência fundamental.

DISTRIBUTED GENERATION SINCHRONIZATION BASED ON SINGLE AND THREE-PHASE KALMAN FILTER

Abstract – Considering the growing interest in distributed generation systems, this paper presents an alternative technique for the synchronization of independent generators, by means of Kalman Filter (KF) for the identification of amplitude, phase angle and frequency of the grid and generator fundamental voltages, even considering waveform distortions. Based on the assumption of sinusoidal voltage signals for a

general power grid, two methods have been proposed and developed using state variables: one for single phase systems and another for three phase systems. A simplified method for fundamental frequency identification is also proposed by means of the measure of the instantaneous phase angle. Considering different conditions of the input voltage signals, it has been shown that although the filtering dynamic dependence of noise parameters of measurement and processing, as well as from initial conditions, the proposed algorithms are perfectly capable of identifying the required information. In order to confirm the expectations of the behavior of the KF, experimental results have been obtained by means of a practical acquisition and processing system, during the connection of a small synchronous generator with the power grid.

Keywords – Kalman filter; Synchronism; Distributed Generation; Instantaneous phase detection; Fundamental frequency identification.

I. INTRODUÇÃO

Determinadas cargas especiais necessitam de fornecimento ininterrupto de energia. Outros consumidores, com o objetivo de diminuir o consumo de energia provida pela concessionária, recorrem à geração própria com fontes alternativas. Em países onde a geração é predominantemente termelétrica, sistemas de geração que utilizam fontes renováveis começam a ser bastante empregados com o intuito de diminuir a emissão de poluentes. Estes são três exemplos que estimulam o desenvolvimento de técnicas para a chamada Geração Distribuída (GD). Esta opção tornou-se atraente a partir da recente reestruturação do setor energético mundial, quando muitos países optaram pelo regime de competição nesse setor e passaram a incentivar a evolução de tecnologias de geração eficientes e confiáveis, mesmo em baixas potências.

Uma das maiores dificuldades para a sua operacionalização reside no procedimento necessário para o sincronismo entre o gerador local e a rede. Como se sabe, a conexão suave entre as fontes de energia e a rede CA depende do ajuste perfeito das amplitudes, frequências e ângulos de fase das tensões geradas e as da rede. Nos últimos anos, tem-se buscado resolver esse problema através do processamento digital dessas tensões. Diferentes algoritmos têm sido propostos visando uma resposta dinâmica rápida,

Nota de rodapé na página inicial será utilizada apenas pelo editor para indicar o andamento do processo de revisão. Não suprima esta nota de rodapé quando editar seu artigo.

precisão em regime permanente e robustez na presença de distorções harmônicas ou transitórios [1-7].

Um algoritmo bastante empregado quando se deseja uma filtragem rápida e eficiente de sinais é o filtro de Kalman (FK), proposto em 1960, por R. E. Kalman [8]. Baseado no método dos mínimos quadrados, o FK tem como princípio a modelagem de um sistema via variáveis de estado. O filtro estima o estado desse sistema interpretando-o como um processo estocástico, com conseqüente tratamento estatístico. Tem sido usado com sucesso em diversas áreas como, por exemplo, em navegação [9, 10], radares [9, 11], telefonia [10], demografia [9], sistemas de controle [9]. Na área de sistemas de potência e eletrônica de potência, o uso de algoritmos baseados no FK é relativamente recente, destacando-se as propostas de [1, 2, 13, 14].

Neste trabalho, as tensões de um sistema de energia elétrica, sujeitas a distúrbios, serão modeladas através de variáveis de estado para que suas ondas fundamentais sejam estimadas pelo FK. A partir delas, será mostrado como obter os ângulos de fase instantâneos, que serão utilizados para estimar a frequência fundamental, dispensando assim, técnicas mais elaboradas para sua detecção [1, 2] ou mesmo, para a alteração da frequência de amostragem [7]. Além disto, nos modelos propostos, eventuais distorções de tensão serão interpretadas como ruídos de medição do sistema, o que simplifica consideravelmente a modelagem do FK.

Inicialmente, será apresentado um algoritmo para sistemas monofásicos, em que a estimativa dos sinais de interesse é baseada na medida de um único sinal de tensão. A seguir, um algoritmo trifásico será proposto e analisado.

II. FK - ESTIMAÇÃO DO ESTADO DE UM SISTEMA

Conforme proposto por Kalman [8] e também em [9, 11, 15], considere um modelo temporal discreto na forma de variáveis de estado:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{B}\mathbf{x}_k + \mathbf{z}_k \end{cases}, \quad (1)$$

onde:

- k é o passo de cálculo,
- \mathbf{x}_k é o vetor de estado $n \times 1$ do sistema no passo k ,
- \mathbf{y}_k é um vetor coluna $m \times 1$ de medições das grandezas no passo k ,
- \mathbf{A} é uma matriz quadrada de ordem n ,
- \mathbf{B} é uma matriz $m \times n$,
- \mathbf{w}_k é um vetor $n \times 1$ que representa o ruído de estado devido à perturbações e inexatidões do modelo dinâmico,
- \mathbf{z}_k é um vetor $m \times 1$ cujos elementos são ruídos de medição, relacionados com a precisão e a relação sinal-ruído dos circuitos de transdução e de condicionamento dos sinais a serem digitalizados.

No caso da aplicação proposta, a matriz \mathbf{B} é invariante no tempo. A priori, a matriz \mathbf{A} também pode ser considerada constante. Entretanto, como será visto adiante, os valores dessa matriz deverão ser atualizados em função de variações da frequência do sinal medido.

Os ruídos \mathbf{w}_k e \mathbf{z}_k são assumidos como ruídos brancos não-correlacionados, possuindo médias nulas e covariâncias:

$$\text{cov}(\mathbf{w}_k) = E[\mathbf{w}_k \cdot \mathbf{w}_k^T] = \mathbf{Q} \quad \text{e} \quad \text{cov}(\mathbf{z}_k) = E[\mathbf{z}_k \cdot \mathbf{z}_k^T] = \mathbf{R}, \quad (2)$$

onde as matrizes \mathbf{Q} e \mathbf{R} são quadradas, diagonais e com elementos todos positivos:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & q_{22} & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & q_{nn} \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r_{22} & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & r_{mm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Além disso, considera-se que o estado inicial \mathbf{x}_0 do sistema é estatisticamente independente de \mathbf{w}_k e \mathbf{z}_k .

O Filtro de Kalman é considerado um estimador ótimo para o estado de (1), isto é, o que minimiza a variância do erro entre \mathbf{x}_k e sua estimativa correspondente. Este processo pode ser feito em duas etapas: uma de previsão e outra de correção, como ilustrado na Figura 1. A primeira é responsável por projetar no tempo o estado “um passo a frente” $\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}$ (estimativa a priori) e obter a covariância $\mathbf{P}_{k/k-1}$ do erro entre o estado \mathbf{x}_k e esta estimativa (erro a priori). A segunda calcula o ganho de Kalman \mathbf{K}_k , estima novamente o estado $\hat{\mathbf{x}}_k$ (estimativa a posteriori) atualizando a estimativa a priori com base nas medições, e obtém a covariância \mathbf{P}_k do erro entre o estado e esta nova estimativa (erro a posteriori).

III. PARÂMETROS DE PROJETO DO FILTRO

Uma característica importante do FK é que a qualidade da filtragem e a velocidade de convergência do método dependem das matrizes \mathbf{R} e \mathbf{Q} . Com o intuito de projetar um filtro que apresente um desempenho razoável em quaisquer condições, procede-se a seguinte análise a respeito de sua dependência com relação a \mathbf{R} e \mathbf{Q} .

Quando o ruído de medição é grande, o traço de \mathbf{R} é grande e os elementos de \mathbf{K}_k são pequenos, o que implica que será dada pouca credibilidade à medição \mathbf{y}_k quando for computada a próxima estimativa e, com isso, a convergência será lenta. Por outro lado, quando o ruído de medição é pequeno, o traço de \mathbf{R} é pequeno e os elementos de \mathbf{K}_k são grandes, implicando uma maior credibilidade à medição \mathbf{y}_k para a próxima estimativa e uma convergência mais rápida.

Quando o ruído de estado é grande, os traços de \mathbf{Q} e $\mathbf{P}_{k/k-1}$ e os elementos de \mathbf{K}_k são grandes, implicando uma maior credibilidade à medição \mathbf{y}_k para a próxima estimativa,

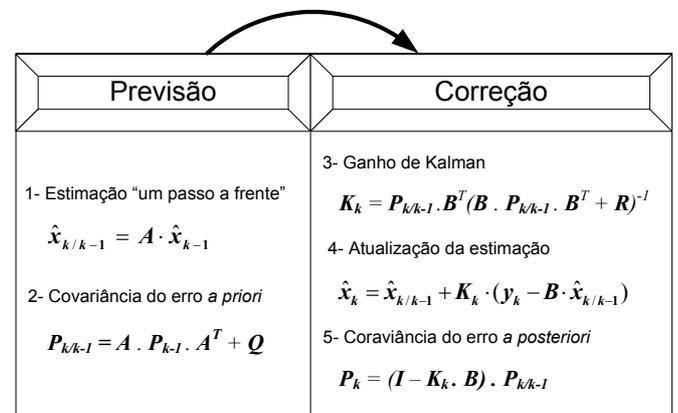


Fig. 1. Modelo do FK.

assegurando uma convergência rápida. Se for pequeno, os traços de \mathbf{Q} e $\mathbf{P}_{k/k-1}$ e os elementos de \mathbf{K}_k são pequenos, o que implica que será dada pouca credibilidade à medição y_k quando for computada a próxima estimativa e, com isso, a convergência será mais lenta. Desta forma, o ajuste do FK depende de um compromisso entre precisão e velocidade de convergência. Entretanto, apesar de existirem \mathbf{R} e \mathbf{Q} que otimizam o desempenho do algoritmo, nem sempre é fácil determiná-las.

Originalmente, o FK pressupõe que os vetores correspondentes ao ruído de medição e ao ruído de estado poderiam ser compostos por sinais gaussianos [8], os quais corresponderiam, estatisticamente, a um tipo de ruído de espectro bastante amplo. Entretanto, nas aplicações de sistema de potência, em geral, o tipo de ruído presente possui um comportamento muito mais previsível. Como será discutido a seguir, os modelos utilizados neste trabalho para o projeto do FK são baseados nos sinais fundamentais da tensão da rede, de modo que qualquer distorção de forma de onda será considerada como ruído de medição para o processo, ou seja, estará inclusa em z_k .

Sendo assim, o nível de distorção dos sinais afeta diretamente o valor das matrizes \mathbf{Q} e \mathbf{R} . E, no sentido de manter a coerência do modelo exposto em (1), \mathbf{Q} e \mathbf{R} devem ser ajustados também de acordo com o nível de tensão no qual o FK será utilizado.

Uma vez que o objetivo é a estimação da amplitude, da frequência e do ângulo de fase da fundamental para a aplicação proposta, os modelos apresentados são mais simples e suficientes que outros presentes na literatura [1, 2, 13, 14].

IV. TENSÕES DA REDE MODELADAS VIA VARIÁVEIS DE ESTADO

A. Sistema Monofásico [1, 2, 13, 14]

Sob regime estacionário, a onda fundamental da tensão de um sistema elétrico de potência (SEP) pode ser escrita de forma discreta, no instante de amostragem $k-1$, como sendo:

$$v_1(k-1) = V_1 \sin\left[\frac{2\pi(k-1)}{N} + \theta_v\right], \quad (4)$$

onde V_1 e θ_v são amplitude e ângulo de fase e N é o número de amostras por período. No instante seguinte, (4) resulta em:

$$v_1(k) = V_1 \sin\left(\frac{2\pi k}{N} + \theta_v\right) = V_1 \sin\left[\frac{2\pi(k-1)}{N} + \frac{2\pi}{N} + \theta_v\right]. \quad (5)$$

A partir de identidades trigonométricas conhecidas, (5) pode ser reescrita como:

$$v_1(k) = V_1 \left\{ \sin\left[\frac{2\pi(k-1)}{N} + \theta_v\right] \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) + \cos\left[\frac{2\pi(k-1)}{N} + \theta_v\right] \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) \right\}, \quad (6)$$

ou:
$$v_1(k) = v_1(k-1) \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) - v_{1\perp}(k-1) \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right), \quad (7)$$

sendo:

$$v_{1\perp}(k-1) = -V_1 \cos\left[\frac{2\pi(k-1)}{N} + \theta_v\right], \quad (8)$$

ortogonal e atrasado (sistema causal) com relação a $v_1(k-1)$. De (7), é possível descrever a tensão fundamental de um sistema monofásico em variáveis de estado como sendo:

$$\mathbf{V}_1(k) = \mathbf{A} \mathbf{V}_1(k-1), \quad (9)$$

onde: $\mathbf{V}_1(k) = \begin{bmatrix} v_1(k) \\ v_{1\perp}(k) \end{bmatrix}$ e $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos(2\pi/N) & -\sin(2\pi/N) \\ \sin(2\pi/N) & \cos(2\pi/N) \end{bmatrix}$.

Uma vez que o componente fundamental da tensão pode ser extraído da tensão $v(k)$ da rede, pode-se escrever, ignorando erros de medição e eventuais distorções, que:

$$v(k) = \mathbf{B} \mathbf{V}_1(k), \quad (10)$$

com $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$.

Na presença de ruídos de medição e de estado, a tensão de um sistema monofásico, modelada via variáveis de estado, assume a forma:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_1(k) = \mathbf{A} \mathbf{V}_1(k-1) + \mathbf{w}_{k-1} \\ v(k) = \mathbf{B} \mathbf{V}_1(k) + z_k, \end{cases} \quad (11)$$

em que \mathbf{w}_k tem dimensão 2×1 e z_k , 1×1 . Neste caso, como distorções de forma de onda não estão previstas em (9), estas serão automaticamente consideradas em z_k .

Com isso, é possível desenvolver o FK para a estimação da onda fundamental $v_1(k)$ da tensão $v(k)$ medida na rede.

A matriz \mathbf{A} é responsável por tornar o FK funcional quando as tensões estão sujeitas a variações de frequência, uma vez que todos os seus elementos dependem de N . Como $N = f_s / f_1$, onde f_1 é a frequência fundamental e f_s é a frequência de amostragem, alterações em f_1 implicam alterações nos elementos da matriz \mathbf{A} ou em f_s . Assim, para que o FK seja imune a esse tipo de distúrbio, a identificação de f_1 é essencial.

B. Sistema Trifásico

A fundamental da tensão da fase a em um SEP trifásico, suposto equilibrado, pode ser escrita com relação ao passo anterior, de forma análoga ao caso monofásico:

$$v_{a1}(k) = V_1 \left\{ \sin\left[\frac{2\pi(k-1)}{N} + \theta_v\right] \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) + \cos\left[\frac{2\pi(k-1)}{N} + \theta_v\right] \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) \right\}. \quad (12)$$

As tensões fundamentais das fases b e c , no passo $k-1$, podem ser escritas como:

$$\begin{aligned} v_{b1}(k-1) &= V_1 \sin\left[\frac{2\pi(k-1)}{N} + \theta_v + \frac{2\pi}{3}\right] = \\ &= V_1 \left\{ -\frac{1}{2} \sin\left[\frac{2\pi(k-1)}{N} + \theta_v\right] + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\left[\frac{2\pi(k-1)}{N} + \theta_v\right] \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

e:

$$\begin{aligned} v_{c1}(k-1) &= V_1 \sin\left[\frac{2\pi(k-1)}{N} + \theta_v - \frac{2\pi}{3}\right] = \\ &= V_1 \left\{ -\frac{1}{2} \sin\left[\frac{2\pi(k-1)}{N} + \theta_v\right] - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\left[\frac{2\pi(k-1)}{N} + \theta_v\right] \right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

Subtraindo (14) de (13), resulta:

$$V_1 \cos\left[\frac{2\pi(k-1)}{N} + \theta_v\right] = \frac{1}{\sqrt{3}} [v_{b1}(k-1) - v_{c1}(k-1)]. \quad (15)$$

Substituindo (15) em (12), é possível escrever a fundamental da tensão da fase a no passo k em função das fundamentais das fases a , b e c no passo $k-1$:

$$v_{a1}(k) = \left\{ \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right)v_{a1}(k-1) + \frac{1}{\sqrt{3}}\sin\left(\frac{2\pi}{N}\right)v_{b1}(k-1) - \frac{1}{\sqrt{3}}\sin\left(\frac{2\pi}{N}\right)v_{c1}(k-1) \right\}. \quad (16)$$

Usando o mesmo raciocínio, é possível escrever as fundamentais das tensões das fases b e c no passo k em função das fundamentais das fases a , b e c no passo $k-1$. A partir das três equações resultantes e considerando ainda o sinal ortogonal $v_{a1\perp}(k)$, chega-se ao modelo trifásico:

$$\mathbf{V}_1(k) = \mathbf{A} \mathbf{V}_1(k-1), \quad (17)$$

onde:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) & \frac{1}{\sqrt{3}}\sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) & -\frac{1}{\sqrt{3}}\sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}}\sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) & \frac{1}{\sqrt{3}}\sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}}\sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) & -\frac{1}{\sqrt{3}}\sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) & 0 \\ \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) & 0 & 0 & \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) \end{pmatrix}$$

$$\text{e } \mathbf{V}_1(k) = \begin{pmatrix} v_{a1}(k) \\ v_{b1}(k) \\ v_{c1}(k) \\ v_{a1\perp}(k) \end{pmatrix}.$$

Da relação entre as tensões $\mathbf{v}(k)$ da rede e seus componentes fundamentais e ignorando as imprecisões de medida e as distorções, tem-se:

$$\mathbf{v}(k) = \mathbf{B} \mathbf{V}_1(k), \quad (18)$$

$$\text{com } \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \text{ e } \mathbf{v}(k) = \begin{pmatrix} v_a(k) \\ v_b(k) \\ v_c(k) \end{pmatrix}.$$

Na presença de ruídos de medição e de estado, as tensões de um SEP trifásico, modeladas via variáveis de estado, assumem a forma:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_1(k) = \mathbf{A} \mathbf{V}_1(k-1) + \mathbf{w}_{k-1} \\ \mathbf{v}(k) = \mathbf{B} \mathbf{V}_1(k) + \mathbf{z}_k, \end{cases} \quad (19)$$

em que \mathbf{w}_k tem dimensão 4×1 e \mathbf{z}_k , 3×1 . Da mesma forma que no caso monofásico, as distorções de forma de onda são consideradas no vetor \mathbf{z}_k .

Verificou-se que, caso \mathbf{Q} e \mathbf{R} sejam ajustados para a atenuação de harmônicas, o modelo trifásico apresenta uma convergência mais rápida que o monofásico. Isto porque, estatisticamente, seu modelo dispõe de mais informações sobre as tensões que o monofásico. Entretanto, destaca-se que a complexidade da implementação de um sistema 4×4 (trifásico) é maior do que a de um 2×2 (monofásico).

É importante observar que o modelo do FK trifásico proposto pressupõe tensões equilibradas e simétricas. Quando submetido a desequilíbrios de amplitude, os sinais fundamentais fornecidos pelo FK corresponderão à média aritmética das fundamentais dos sinais originais, o que, neste caso, representa a seqüência positiva das tensões. Quando submetido a tensões assimétricas em fase, a média aritmética da amplitude dos sinais resultantes corresponderá à amplitude fundamental dos sinais originais, porém o ângulo de fase dos sinais fornecidos pelo FK pode não estar em fase nem com as tensões originais, nem com a seqüência positiva.

Isto significa que, neste caso, o FK não deve ser utilizado como detector de fundamental ou de seqüência positiva, apesar de estar fornecendo corretamente a freqüência das fundamentais. Entretanto, para o sincronismo de sistemas de GD, isto não deve ser um problema, uma vez que a conexão de geradores nestas condições não é indicada.

V. OBTENÇÃO DA FASE INSTANTÂNEA E DA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL

Do exposto anteriormente, vê-se que o FK é responsável pela estimação dos sinais fundamentais das tensões medidas, bem como de um sinal ortogonal a uma das fases. Como é necessário conhecer a freqüência desses sinais, tanto para a aplicação desejada quanto para a atualização do modelo, um método para obtê-la deve ser previsto.

Será apresentada uma forma de estimação da freqüência da rede a partir da evolução do ângulo de fase instantâneo $\theta(k)$ das tensões filtradas. Essa informação é obtida a partir dos sinais $v_1(k)$ e $v_{1\perp}(k)$, no caso monofásico, ou dos sinais $v_{a1}(k)$ e $v_{a1\perp}(k)$, no caso trifásico. Como esses sinais são ortogonais e de mesma amplitude, o cálculo do arco-tangente da razão entre eles pode ser usado para obtenção de $\theta(k)$:

$$\theta(k) = \text{tg}^{-1} \left[-\frac{v_1(k)}{v_{1\perp}(k)} \right] \text{ ou } \theta(k) = \text{tg}^{-1} \left[-\frac{v_{a1}(k)}{v_{a1\perp}(k)} \right]. \quad (20)$$

De (20), é possível propor um método simples, através de detecção de passagem de $\theta(k)$ por zero, para obtenção da freqüência fundamental. Em princípio, poder-se-ia fazer a detecção de passagem por zero diretamente nas funções $v_1(k)$ ou $v_{1\perp}(k)$. No entanto, estas duas funções são sujeitas aos transitórios da rede, enquanto que a razão entre elas é praticamente imune a esses transitórios.

Visto que a estimativa da freqüência depende do número de amostras por período, supondo f_s constante, a detecção de pequenas variações de f_l só é possível através de uma média sobre alguns ciclos de $\theta(k)$. Nos testes realizados, utilizou-se uma média de 4 ciclos, que melhora a precisão, porém torna a convergência um pouco mais lenta.

Outras técnicas poderiam ter sido adotadas para identificação da freqüência fundamental da tensão [1, 2]. No entanto, optou-se pela escolha do método de cruzamento por zero da fase instantânea, dada sua simplicidade e facilidade de implementação. Neste caso, a dinâmica de convergência do método pode ser controlada em função do número de ciclos utilizados para a média de f_l .

VI. SIMULAÇÕES

A fim de verificar o comportamento dos algoritmos, algumas simulações serão apresentadas e discutidas a seguir. Em todos os casos, foi escolhida aleatoriamente uma freqüência de amostragem f_s de 12 kHz, com o número de amostras por período N , alterando-se em função de f_l ($N = 200$ para $f_l = 60$ Hz), e $\mathbf{P}_0 = \mathbf{Q}$. Como \mathbf{w}_k e \mathbf{z}_k são desconhecidos, foram testados alguns valores para as matrizes \mathbf{Q} e \mathbf{R} de modo a proporcionar ao filtro uma velocidade de resposta e uma qualidade de filtragem adequadas para a aplicação de sincronismo em GD, além de resultar, nos modelos monofásico e trifásico, uma mesma

dinâmica sob transitórios de frequência. Os valores considerados adequados foram:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{R} = [25]. \quad (21)$$

para o filtro monofásico, e:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0.0025 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0025 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0025 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0025 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 16 & 0 & 0 \\ 0 & 16 & 0 \\ 0 & 0 & 16 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

para o trifásico, ajustados com base na sugestão em [11]. Observar que os valores em \mathbf{R} resultam muito maiores do que os valores em \mathbf{Q} . Isto se deve ao fato das distorções harmônicas serem incluídas em \mathbf{z}_k .

Cabe ressaltar que tais valores devem ser alterados de acordo com o nível de tensão ao qual os filtros serão submetidos e com o compromisso entre velocidade de resposta e qualidade de filtragem que a aplicação requer.

A. FK Monofásico

Nas figuras que seguem, serão mostrados resultados referentes a 3 casos:

- Caso 1 – Tensão senoidal de 127 V_{rms}, 60 Hz, ângulo de fase inicial 60° (Figura 2);
- Caso 2 – Tensão contendo 5% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas, restante igual ao caso anterior (Figura 3);
- Caso 3 – Tensão do caso 2, com afundamento de 50% (Figura 4).

Na Figura 2, destaca-se a importância do valor do estado inicial, que neste caso foi estabelecido supondo um sinal de entrada com ângulo de fase de 0°, para a dinâmica de inicialização. No gráfico superior, tem-se a tensão senoidal v com os sinais em fase (v_1) e ortogonal ($v_{1\perp}$) resultantes da filtragem, que convergem em 6 ciclos. No gráfico do meio, está o ângulo de fase θ condizente com o sinal v_1 . Já no inferior, está a frequência fundamental f_1 calculada, inicializada com o valor padrão de 60 Hz. Os transitórios observados são decorrentes da diferença entre o estado inicial real do sistema e o fixado no algoritmo.

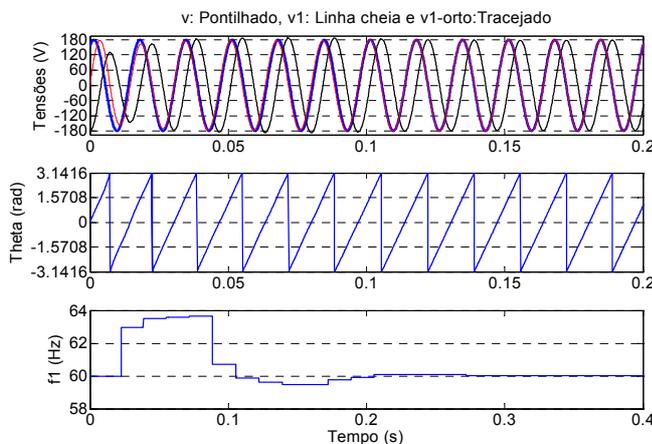


Fig. 2. FK-1 ϕ : Tensões de entrada (127 V_{rms}, 60 Hz, 60°) e de saída do filtro, θ e f_1 .

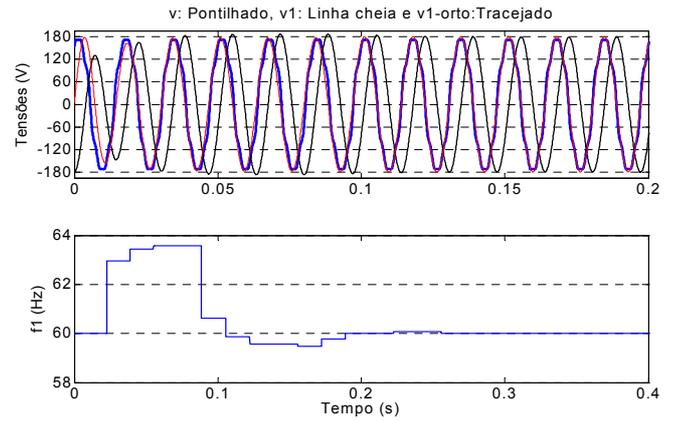


Fig. 3. FK-1 ϕ : Tensões de entrada (127 V_{rms}, 60 Hz, 60°), com 5% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas, e de saída do filtro e f_1 .

A qualidade de filtragem do FK-1 ϕ pode ser observada através da Figura 3. A Distorção Harmônica Total (DHT), que para a tensão de entrada era de 8,66%, foi reduzida para 1,41%, demonstrando a boa capacidade de atenuação do FK.

A Figura 4 mostra o desempenho do FK-1 ϕ quando submetido a transitórios de amplitude. Observar que as tensões convergem em 2 ciclos, enquanto que o valor da frequência praticamente não sofre alterações.

B. FK Trifásico

Nas próximas figuras, serão mostrados resultados referentes aos 3 casos seguintes:

- Caso 1 – Tensões desequilibradas (70% na fase b e 85% na fase c), contendo 5% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas (Figura 5);
- Caso 2 – Tensões equilibradas e distorcidas, com um afundamento de 50% (Figura 6).
- Caso 3 – Tensões do caso 2, com transição brusca de f_1 de 60 Hz para 59 Hz (Figura 7);

A qualidade de filtragem do FK-3 ϕ pode ser observada através da Figura 5. Novamente se nota a convergência dos sinais filtrados em 6 ciclos e a mesma dinâmica de inicialização do caso anterior. A DHT, que para a tensão de entrada era de 8,66%, foi reduzida para 0,79%, o que

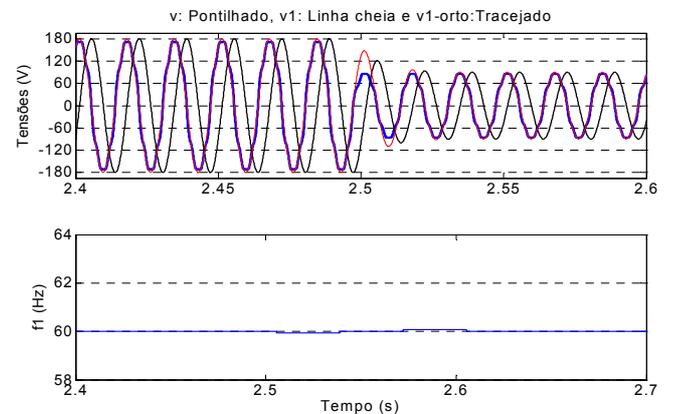


Fig. 4. FK-1 ϕ : Tensões de entrada e de saída do filtro e f_1 , após um afundamento de tensão.

demonstra a boa capacidade de atenuação deste modelo de filtro. Além disso, nota-se que a amplitude tanto de v_{a1} , quanto dos outros sinais resultantes, é de $179,6 \times (1+0,7+0,85)/3 \cong 152,66$ V, ou seja, é a média entre as amplitudes das tensões medidas e que, neste caso, coincide com a amplitude da seqüência positiva.

As Figuras 6 e 7 mostram o desempenho do FK-3 ϕ quando submetido a transitórios de amplitude e de freqüência. Na primeira, as tensões convergem em 1 ciclo, enquanto o valor da freqüência praticamente não sofre alterações. Na segunda, as tensões filtradas seguem as medidas e o valor de f_i necessita de 9 ciclos para estabilizar. Pequenas oscilações (58,98 Hz - 59,04 Hz) podem ser notadas, já que a razão f_s/f_i deixa de ser um número natural.

VII. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os algoritmos propostos foram avaliados através da implementação em um sistema de aquisição e processamento de dados baseado no conceito de instrumentação virtual. Tal sistema era composto de uma placa de aquisição de dados de oito canais de aquisição simultânea, com um conversor AD de 16 bits e freqüência de amostragem de até 200 kHz (PCI-6143, da *National Instruments* - NI). Os sinais analógicos foram medidos através de sensores de Efeito Hall de tensão e de corrente (LV-25P e LA-55P da *LEM*). O sistema foi

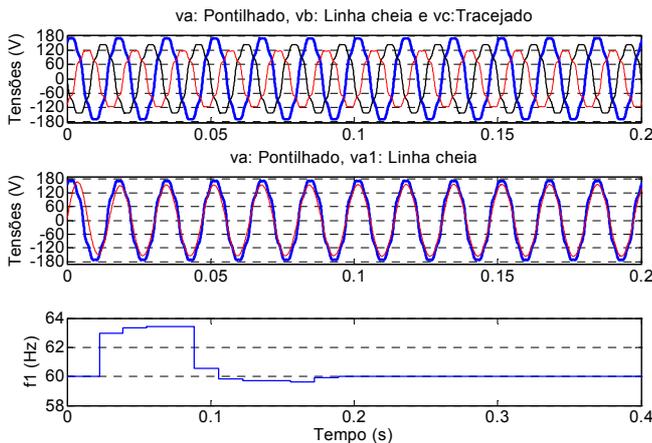


Fig. 5. FK-3 ϕ sujeito a tensões distorcidas e desequilibradas.

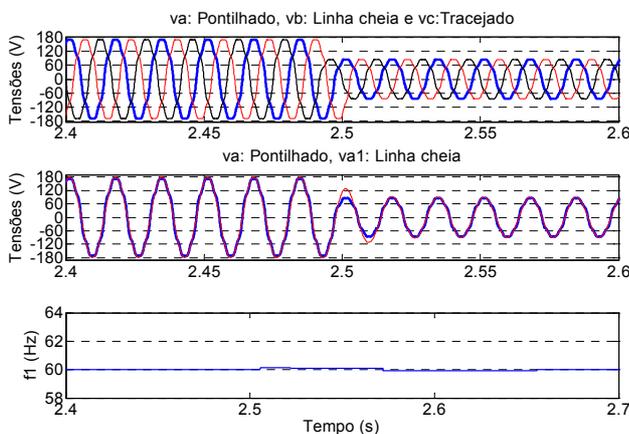


Fig. 6. FK-3 ϕ sob tensões distorcidas e afundamento de tensão.

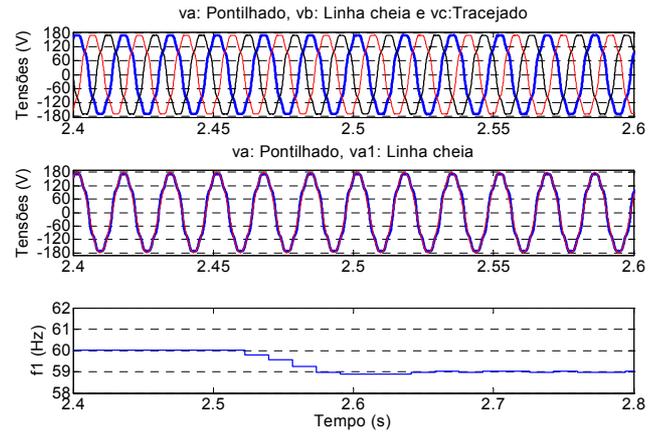


Fig. 7. FK-3 ϕ sob tensões distorcidas e transitório de freqüência.

implementado em um micro-computador com processador Pentium 4 e plataforma LabView 7.1 da NI. Em seguida, os algoritmos foram utilizados para sincronizar um pequeno gerador síncrono com a rede do laboratório.

A. FK sob diferentes condições da tensão medida

Com o auxílio de uma fonte de tensão trifásica programável (California Instruments), modelo 4500iL, o FK-1 ϕ foi submetido a diferentes condições de tensão.

Na Figura 8, a tensão de entrada da figura anterior sofre um afundamento de 50% no instante indicado. Esta variação da tensão não impediu que o algoritmo executasse sua operação, convergindo praticamente em 1 ciclo. Na Figura 9, ao invés de um afundamento, a tensão sofre uma alteração em sua freqüência fundamental, passando de 60 para 59 Hz. A amplitude da tensão filtrada não é afetada, enquanto a freqüência leva cerca de 10 ciclos para se estabilizar.

B. Sincronismo de um gerador síncrono

Utilizando o mesmo sistema de instrumentação, o FK-1 ϕ foi avaliado na sincronização de um gerador (2 kVA, 230 V_{rms}, 4 pólos) em paralelo com a rede elétrica. Como mencionado na Introdução, este procedimento requer que a chave de conexão seja fechada sob mínima diferença de potencial, ou seja, as tensões fornecidas pelo gerador e as da rede devem ter, idealmente, as mesmas seqüências de fase, magnitudes, freqüências e ângulos de fase.

Partindo-se de que a seqüência de fases é conhecida a priori, o FK-1 ϕ deve fornecer as demais informações que são necessárias para garantir a conexão suave, de modo que a circulação de corrente pela chave seja a menor possível. No esquema utilizado no ensaio (Figura 10), o gerador síncrono era acionado através de um motor CC. Na estrutura usada, o controle da amplitude da tensão gerada foi realizado através da corrente de excitação da máquina síncrona; o da velocidade (freqüência), através da corrente de excitação do motor CC e o do conjugado (potência gerada), pela variação da corrente da armadura do motor CC, todos manualmente.

As Figuras 11 e 12 ilustram duas condições observadas durante o processo de sincronização. As curvas e os valores apresentados na Figura 11 correspondem à situação após o ajuste da freqüência do gerador. Destaca-se a tensão na chave, mostrando que a amplitude e a fase não estão devidamente ajustadas. Neste caso, a diferença entre as

amplitudes da tensão gerada e da rede era de 28,57 V e a defasagem entre elas, de 122,92°, para um erro desprezível de frequência. Na Figura 12, realizados os demais ajustes, a chave de interconexão foi fechada e a corrente através dela pode ser observada. O fato desta corrente praticamente não apresentar transitório demonstra que a conexão suave foi realizada com sucesso, sob supervisão do FK-1φ.

VIII. CONCLUSÕES

O FK, além de ser uma ferramenta amplamente utilizada para filtragem de sinais em aplicações diversas, foi usado neste trabalho para sincronizar um sistema típico de geração distribuída. Com o FK, a amplitude e fase instantânea da fundamental de tensão podem ser estimadas através do

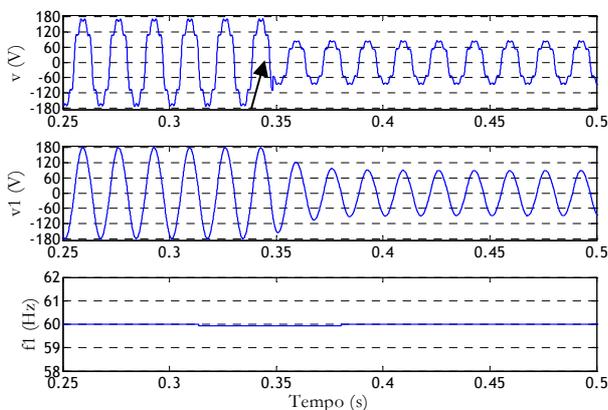


Fig. 8. FK-1φ: Afundamento de 50% na tensão de entrada.

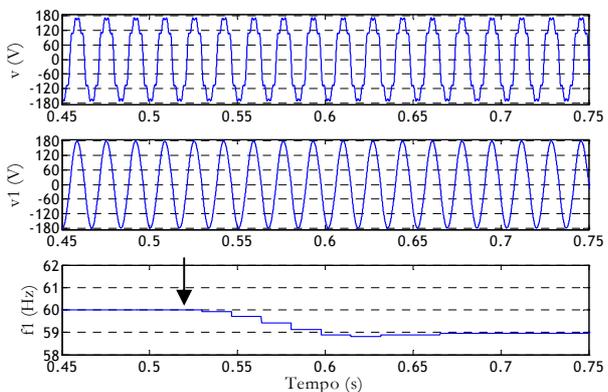


Fig. 9. FK-1φ: Transitório de f_i de 60 Hz para 59 Hz.

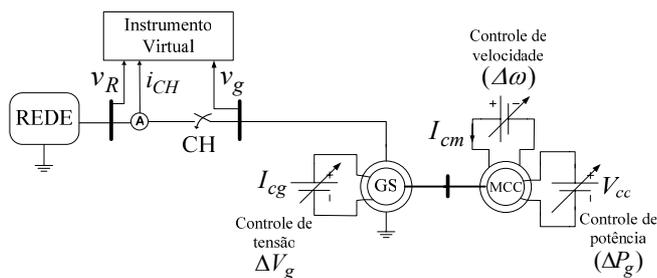


Fig. 10. Esquemático para o ensaio de sincronismo do gerador.

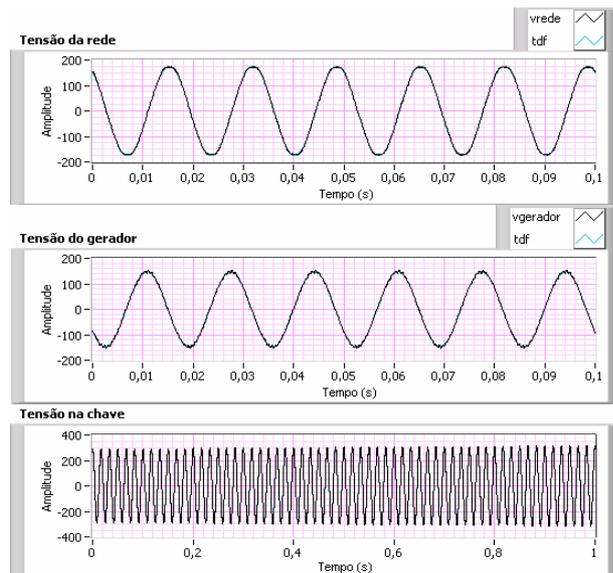


Fig. 11. Sincronização com a rede: após o ajuste da frequência.

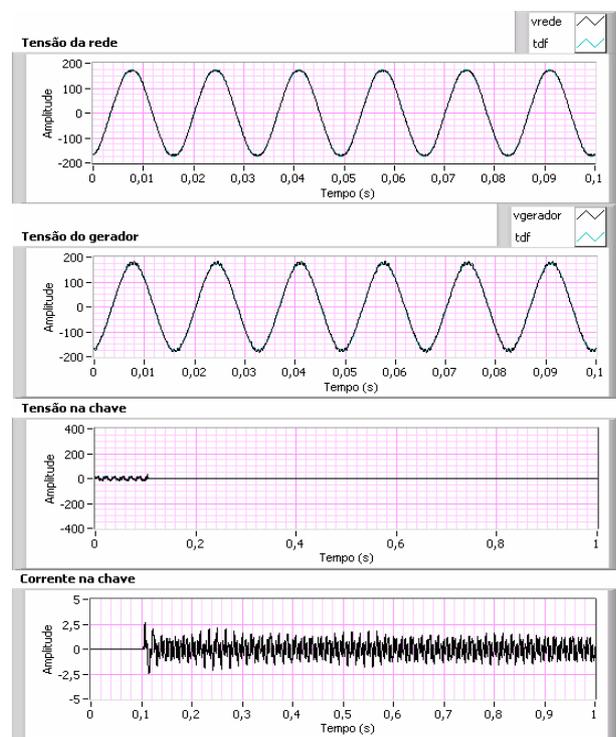


Fig. 12. Sincronização com a rede e fechamento da chave.

tratamento estatístico de suas amostras e da aplicação de técnicas de modelagem em variáveis de estado.

Como foi demonstrado, o método de detecção de passagem por zero da fase instantânea do sinal fundamental estimado apresenta desempenho satisfatório para a obtenção da frequência, dispensando o uso de técnicas auxiliares para desempenhar essa tarefa, mesmo na presença de harmônicas. Com isso, pode-se usar o valor de frequência obtido para a atualização de N na matriz A e, conseqüentemente, readaptar o algoritmo quando submetido a alterações na frequência fundamental das tensões medidas.

O fato de o FK utilizar cálculos matriciais poderia parecer pouco atraente para sua implementação na prática. Porém,

em se tratando da aplicação proposta, as matrizes serão, no máximo, 2×2 no caso monofásico, sendo possível efetuar os cálculos elemento por elemento. Já o trifásico merece destaque pela estimação das tensões com amplitude média quando submetido a tensões desequilibradas, dispensando, em alguns casos, o uso de detectores de seqüência positiva [6]. E, conforme os valores atribuídos a \mathbf{Q} e \mathbf{R} , pode apresentar um desempenho melhor que o monofásico.

Considerando outras técnicas de sincronismo com a rede avaliadas pelos autores [6, 7] e/ou disponíveis na literatura [1-6, 13, 14], como por exemplo, algoritmos baseados em PLLs ou na Transformada Discreta de Fourier (TDF), pode-se afirmar que o FK proposto é tão preciso em regime permanente quanto os outros dois; tão rápido e sensível a distorções de tensão de entrada quanto um algoritmo PLL, porém mais simples computacionalmente que outros algoritmos baseados nos Filtros de Kalman ou na TDF.

Sendo assim, os algoritmos propostos são alternativas interessantes para aplicações que requeiram sincronismo com a rede, como é o caso dos sistemas de geração distribuída e sistemas com fontes renováveis de energia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo apoio financeiro e ao Prof. Dr. Diego Colon pelas valiosas contribuições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. V. Ribeiro, S. M. Deckmann, J. M. T. Romano, "Adaptive filtering, wavelet and lapped transforms for power quality problem detection and identification", *International Symposium on Industrial Electronics (ISIE '03)*, vol. 1, pp. 301-306, June 2003.
- [2] R. Cardoso, R.F. de Camargo, H. Pinheiro, H. A. Grundling, "Kalman Filter Based Synchronization Methods", *IEEE 37th Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, pp. 1-7, Jeju, June 2006.
- [3] M. Karimi-Ghartemani, M. R. Iravani, "A method for synchronization of power electronic converters in polluted and variable-frequency environments", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1263-1270, August 2004.
- [4] M. Ciobotaru, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, "A new single-phase PLL structure based on second order generalized integrator", *IEEE 37th Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, pp. 1-6, Jeju, June 2006.
- [5] A. Patapoutian, "On phase-locked loops and Kalman filters", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 47, no. 5, pp. 670-672, May 1999.
- [6] M. S. Pádua, *Técnicas Digitais para Sincronização com a Rede Elétrica, com aplicação em Geração Distribuída*, Dissertação de Mestrado, Unicamp, Campinas, 2006.
- [7] F. P. Marafão, S. M. Deckmann, J. A. Pomilio, R. Q. Machado, "Metodologia de Projeto e Análise de Algoritmos de Sincronismo PLL", *Eletrônica de Potência*, vol. 10, no. 1, June 2005.
- [8] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems", *Transaction of the ASME - Journal of Basic Engineering*, pp. 35-45, March 1960.
- [9] H. W. Sorenson, *Kalman Filtering: Theory and Application*, IEEE Press, Nova Iorque, 1985.
- [10] R. G. Brown, *Introduction to Random Signal Analysis and Kalman Filtering*, John Wiley & Sons, Nova Iorque, 1983.
- [11] D. Simon, "Kalman Filtering", *Embedded Systems Programming Magazine*, pp. 72-79, June 2001.
- [12] S. M. Bozic, *Digital and Kalman Filtering*, Edward Arnold, Londres, 1979.
- [13] S. Liu, "An adaptive Kalman filter for dynamic estimation of harmonic signals", *8th International Conference on Harmonics And Quality of Power*, vol. 2, pp. 636-640, October 1998.
- [14] W. Rebizant, D. Bak, J. Szafran, "High-speed measurements with adaptive Kalman filter", *8th IEE International Conference on Developments in Power System Protection*, vol. 1, pp. 52-55, April 2004.
- [15] G. Welch, G. Bishop, "An Introduction to the Kalman Filter", University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science, Chapel Hill, NC, EUA, TR95-041, 1995.

DADOS BIOGRÁFICOS

Marcelo Suzart de Pádua, nascido em 09/10/1981, Brasília (DF), é bacharel (2004) e mestre (2006) em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas.

Sigmar Maurer Deckmann, nascido em 06/04/1946 em Cruz Alta (RS), é engenheiro eletricitista (1973), mestre (1976) e doutor (1980) pela Universidade Estadual de Campinas. Atualmente, professor aposentado da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, onde trabalhou de 1974 a 2006. Suas principais linhas de pesquisa têm sido: instrumentação, qualidade de energia, estudos sobre a propagação de harmônicos e *Flicker* e filtros ativos de potência.

Fernando Pinhabel Marafão, nascido em 26/09/1975 em José Bonifácio (SP), é engenheiro eletricitista (1998) pela Universidade Estadual Paulista, mestre (2000) e doutor (2004) pela Universidade Estadual de Campinas. Atualmente é professor na Universidade Estadual Paulista. Áreas de interesse: processamento digital aplicado a eletrônica de potência e sistemas de energia, qualidade e condicionamento de energia e definições de potência sob distorções e assimetrias. É membro da SOBRAEP, da SBA e do IEEE.

Amauri Lopes, nascido em 28/01/1950 em Campinas (SP), graduou-se e obteve os títulos de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas em 1972, 1975 e 1982, respectivamente. Desde 1973, é professor da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas. Suas áreas de interesse são: processamento de sinais, teoria de circuitos, arranjo de sensores e processos estocásticos. É membro do IEEE e da SBT.

Alexandre Cândido Moreira, nascido em 15/01/1981, em Goiânia (GO), é engenheiro eletricitista (2003) pela Universidade Federal de Goiás e mestre (2006) em Engenharia Elétrica pela Universidade de Estadual de Campinas.