

Estimação Harmônica via Técnicas de Separação Cega de Fontes Aplicada no Contexto de Geração Eólica

Daniel Ramalho de Oliveira* Marina Martins Mattos*
 Thales Wulfert Cabral* Rômulo Delgado dos Santos*
 Mateus Mostaro de Oliveira* Marcelo Antônio Alves Lima*
 Leandro Rodrigues Manso Silva* Carlos Augusto Duque*

* Departamento de Circuitos Elétricos, Faculdade de Engenharia,
 Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG.

Abstract: This work presents a technique for the estimation of harmonic and interharmonic components, based on filter bank applied to wind generation scenario. The design of the filters is adaptive and uses blind source separation techniques for adjusting the filters' frequency responses to the spectral content of the signal of interest, that is, the filters are designed only for the components existing in the signal. The results presented show the efficiency of the method applied to harmonic and interharmonic estimation in fault and load variation scenarios in a wind generation grid.

Resumo: Este trabalho apresenta uma técnica de estimação de componentes harmônicos e interharmônicos baseada em banco de filtros aplicada a um cenário de geração eólica. O projeto dos filtros é adaptativo e utiliza técnicas de separação cega de fontes ajustando as respostas em frequência dos filtros ao conteúdo espectral do sinal de interesse, ou seja, são projetados filtros apenas para os componentes existentes no sinal. Os resultados apresentados mostram a eficiência do método para a estimação de componentes harmônicos e interharmônicos em cenários de falta e variação de carga não linear em uma rede com geração eólica.

Keywords: Harmonic Estimation; Blind Source Separation; Wind Generation; Filter Bank; Power Quality.

Palavras-chaves: Estimação de Harmônicos; Separação Cega de Fontes; Geração Eólica; Banco de Filtros; Qualidade de Energia Elétrica.

1. INTRODUÇÃO

A presença de equipamentos não lineares nos sistemas interligados de eletricidade está proporcionando situações indesejadas para as concessionárias, bem como para o Sistema Interligado Nacional (SIN). Grande parte deste desconforto advém do fato de que estes dispositivos contribuem para a deterioração da Qualidade de Energia Elétrica (QEE), especialmente, por meio da inserção de distúrbios no Sistema Elétrico de Potência (SEP).

A natureza dos equipamentos não lineares pode ser distinta, contida em diversos segmentos da sociedade. Nas indústrias, estes dispositivos podem ser motores com controle eletrônico de velocidade, fornos a arco, transformadores saturados, etc (Bollen and Gu, 2006). No segmento residencial, podem ser televisores, computadores, lâmpadas eletrônicas, etc (George et al., 2011). Na geração de energia, como a Geração Distribuída (GD), tais fontes podem ser os inversores que realizam a conversão estática de energia (Saxena et al., 2010). Destaca-se que a geração eólica vem ganhando espaço segundo os dados da associação brasileira de energia eólica, registrando um crescimento de pouco mais de 14% entre os anos de 2017 e 2018, produzindo um total de 46,47 TWh (Associação

Brasileira de Energia Eólica, 2019). No entanto, na geração eólica, por exemplo, os aerogeradores podem se tornar fontes de distúrbios, sobretudo, quando estão em operação junto ao SEP (Liu et al., 2018).

Diversos distúrbios elétricos podem ser gerados como subproduto da utilização de GD. Na literatura, estão registrados vários distúrbios: os de curta duração, como elevação e afundamento de tensão (Kusko and Thompson, 2007); os de longa duração, como subtensão e sobretensão (Kusko and Thompson, 2007); além disso, alguns fenômenos promovem a distorção das formas de onda de um SEP, tais como ruído, cortes de tensão (*notchings*), inter-harmônicos e harmônicos.

Com posição de destaque, os harmônicos aparecem de forma recorrente nos SEPs, em especial, quando se trata de geração eólica, na qual os aerogeradores atuam como fontes harmônicas (Moura et al., 2017). Por conseguinte, estes distúrbios são o foco de apreciação do presente trabalho. Além disso, é válido salientar que os harmônicos são formalmente definidos como distúrbios cuja frequência é múltipla inteira da frequência fundamental do SEP.

Nesse contexto, a QEE é o ramo da engenharia elétrica que busca soluções de estimação, análise e mitigação de

tais fenômenos. Consequentemente, a área de QEE possui uma gama de recursos para o tratamento destes distúrbios, e dentre eles, destacam-se as ferramentas de processamento de sinais. Assim, quando trata-se da estimação destes distúrbios, foco deste trabalho, dentre as vastas técnicas de processamento de sinais, a separação cega de fontes, do inglês *Blind Source Separation* (BSS), é uma técnica altamente competente.

A BSS é um processo de extração de fontes, por meio de conjuntos de observações obtidas a partir de sensores (O'grady et al., 2005), conhecidas por medições. Nesse contexto, o termo “cego” se refere ao fato de não se possuir conhecimento de como as fontes estão interagindo com o sistema, o denominado processo de mistura. Por conseguinte, a solução trabalha com poucas informações sobre o sistema, o que se torna uma vantagem da aplicação.

A partir da filosofia de BSS, a presente pesquisa propõe um método cujo objetivo reside em estimar os harmônicos variantes no tempo, que estão presentes nos sinais elétricos. O trabalho é justificável devido à presença destas distorções no SEP e a necessidade em identificá-los para uma futura mitigação. Nesse contexto, o trabalho ainda preocupa-se na utilização inteligente de recursos, no qual adota-se a abordagem de canal único, ou seja, não é necessário realizar medições em diferentes pontos do sistema (Hyvärinen et al., 2001a).

O presente trabalho está organizado em: (1) Uma breve introdução, (2) a metodologia empregada para realizar a estimação dos componentes harmônicos e inter-harmônicos, (3) o sistema utilizado para gerar o sinal a ser avaliado, (4) os resultados obtidos e, por fim, (5) as conclusões alcançadas.

2. METODOLOGIA EMPREGADA

2.1 Separação Cega de Fontes

De acordo com (Hyvärinen et al., 2001a), a abordagem de BSS pode ser definida a partir de um modelo com m medições conhecidas e p fontes não acessíveis diretamente para a medição. Nesse contexto, busca-se estimar as fontes não mensuráveis via minimização da dependência estatística entre as mesmas.

Formalmente, o modelo básico da BSS é definido conforme (Hyvärinen et al., 2001b), em que é adotado um modelo estatístico de variáveis latentes e com fontes estatisticamente independentes entre si. Assim, as m misturas observadas podem ser representadas pelo vetor $\mathbf{x}[n] = \{x_1[n], \dots, x_m[n]\}^T$ e as p fontes desconhecidas podem ser representadas pelo vetor $\mathbf{s}[n] = \{s_1[n], \dots, s_p[n]\}^T$. Além disso, o problema pode ser representado por combinações lineares conforme (1):

$$x_k[n] = a_{k1} \cdot s_1[n] + a_{k2} \cdot s_2[n] + \dots + a_{kp} \cdot s_p[n] \quad (1)$$

sendo x_k é a k -ésima mistura, s_p é a p -ésima fonte e a_{kp} é um coeficiente real associado à k -ésima mistura e à p -ésima fonte. Assumindo uma notação compacta, todo o processo pode ser representado de forma matricial por (2):

$$\mathbf{x}[n] = \mathbf{A} \cdot \mathbf{s}[n] + \mathbf{u}[n] \quad (2)$$

em que $\mathbf{u}[n] = \{u_1[n], \dots, u_m[n]\}^T$ é o vetor de ruídos aditivos independentes e identicamente distribuídos (*i.i.d.* - *independent and identically distributed*) somados às m misturas, e \mathbf{A} é uma matriz de dimensão $m \times p$, conhecida por matriz de misturas.

Em contrapartida, a técnica busca encontrar uma matriz inversa correspondente a \mathbf{A} , conhecida por matriz de separação \mathbf{W} , a qual é responsável por determinar estimativas das fontes originais. Este processo pode ser representado por (3):

$$\hat{\mathbf{s}}[n] = \mathbf{W} \cdot \mathbf{x}[n] \quad (3)$$

sendo \mathbf{W} possui dimensão $p \times m$.

Intuitivamente, o que se está fazendo é encontrar a combinação linear correspondente conforme (4):

$$\hat{s}_k[n] = w_{k1} \cdot x_1[n] + w_{k2} \cdot x_2[n] + \dots + w_{km} \cdot x_m[n] \quad (4)$$

em que \hat{s}_k é a k -ésima estimativa ($k = 1, \dots, p$), x_m é a m -ésima mistura e w_{km} é um coeficiente de separação associando a k -ésima estimativa com a m -ésima mistura.

Um diagrama que sumariza o problema de BSS está representado na Figura 1.

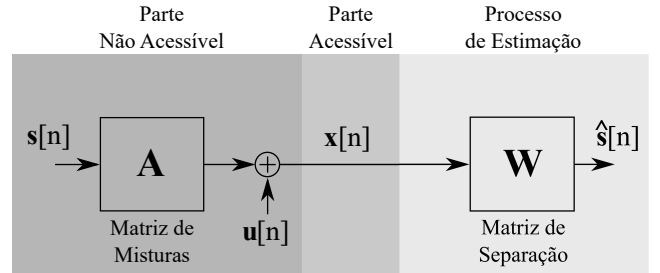


Figura 1. Fluxo da Separação Cega de Fontes.

2.2 Single Channel Blind Source Separation

Normalmente, em aplicações de BSS o número de sinais de mistura ($x[n]$) linearmente independentes é igual ao número de fontes originais ($s[n]$), de tal modo que a matriz de misturas (\mathbf{A}) seja quadrada e de posto completo (Hyvärinen et al., 2001a). Entretanto, neste trabalho utiliza-se de uma técnica de canal único (um único sinal de mistura) denominada SCBSS (*Single Channel Blind Source Separation*), a qual foi inicialmente apresentada em (Oliveira et al., 2019).

Tal técnica é uma variação da técnica SCICA (*Single Channel Independent Component Analysis*) (Davies and James, 2007). Ela consiste em aumentar artificialmente o número de sinais de mistura utilizando de sucessivos atrasos temporais aplicados no sinal medido, e por fim utilizar as matrizes de mistura e separação para calcular coeficientes de filtros FIR (*Finite Impulse Response*), de modo a separar linearmente cada fonte do sinal medido. Para calcular as matrizes de mistura e separação, utiliza-se do algoritmo SOBI (*Second Order Blind Identification*)

(Belouchrani et al., 1997), com modificações propostas na etapa de branqueamento do algoritmo de modo a realizar a separação entre subespaço de sinal e subespaço de ruído (Oliveira et al., 2019).

A Figura 2 apresenta um diagrama de blocos da técnica proposta.

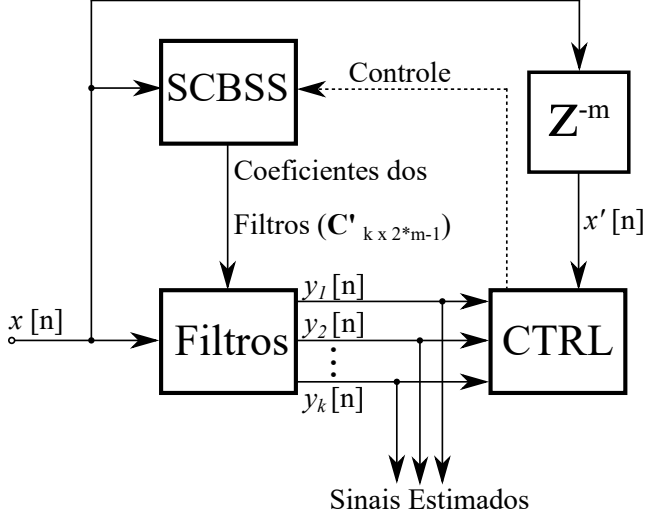


Figura 2. Diagrama de blocos da técnica SCBSS associada com sistema de controle.

No diagrama apresentado na Figura 2 tem-se os seguintes blocos: (i) “Filtros”, que representa o banco de filtros utilizado para a decomposição do sinal em seus componentes harmônicos e inter-harmônicos, e que é determinado de maneira cega pelo SCBSS; (ii) “SCBSS”, que representa a técnica que calculará e atualizará os coeficientes dos filtros quando for necessário (quando houver “novidade” no sinal $x[n]$); (iii) “ Z^{-m} ”, que representa um atrasador de ordem m que possui o intuito de sincronizar o sinal de saída dos filtros com o sinal de entrada $x[n]$, e; (iv) “CTRL”, o sistema de controle empregado que será mais detalhado a seguir.

Para determinar o momento em que deve-se realizar o reprojetado dos filtros, deve-se calcular alguma medida de erro. Optou-se neste trabalho pelo erro quadrático médio relativo (*Root Mean Square Error* - RMSE), calculado a partir da diferença entre a soma dos sinais estimados ($y[n] = y_1[n] + y_2[n] + \dots + y_k[n]$) e o sinal de mistura sincronizado ($x'[n]$), durante a janela de um ciclo do componente fundamental. Seu equacionamento pode ser visto a seguir.

$$E_{RMSE}[n] = \frac{\sqrt{\sum_{i=0}^{L-1} (y[n-i] - x'[n-i])^2}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{L-1} (x'[n-i])^2}} \quad (5)$$

sendo L a representação do número de amostras, neste caso igual a um ciclo do componente fundamental. O $E_{RMSE}[n]$ é calculado a cada amostra e é comparado com um valor de tolerância, ou seja, um limite máximo de erro, escolhido empiricamente. Se o $E_{RMSE}[n]$ for maior que a tolerância durante L amostras consecutivas, inicia-se o processo de preparação para o SCBSS.

Durante a etapa de preparação monitora-se, novamente, o $E_{RMSE}[n]$ e, caso o mesmo permaneça abaixo de uma tolerância previamente definida por pelo menos L amostras consecutivas, cancela-se o reprojetado dos filtros digitais. Tal ação se justifica devido à ação de distúrbios transitórios que possam vir a ocorrer no sinal monitorado, e não necessariamente alteram o comportamento harmônico do sistema.

Caso o reprojetado seja necessário, a janela de sinal utilizada para isso inicia-se na primeira amostra em que o $E_{RMSE}[n]$ ultrapassar a tolerância e termina 12 ciclos após (200 ms). De posse desta janela de sinal, a técnica SCBSS calcula novos filtros para o banco e o sinal passa a ser decomposto por este novo banco.

3. SISTEMA SIMULADO

Neste trabalho utilizou-se o *software* Simulink para realizar a simulação de um conjunto de seis aerogeradores idênticos de 1,5 MW (totalizando 9 MW de potência) conectados a uma rede de distribuição. Um diagrama unifilar simplificado desse sistema pode ser visto na Figura 3.

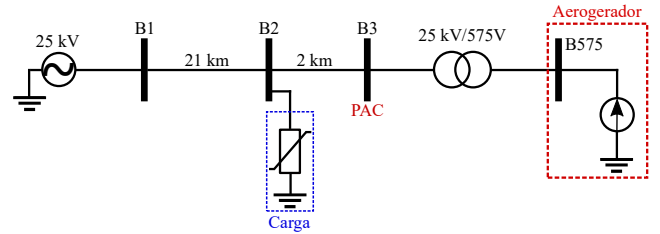


Figura 3. Diagrama unifilar da rede simulada.

O sistema mostrado na Figura 3 apresenta quatro barras, designadas a seguir: uma barra de alimentação de 25 kV (barra B1); barra B2, na qual uma carga não linear (em azul) poderá ser conectada; barra B3, também denominada PAC (Ponto de Acoplamento Comum), na qual a medição será realizada, e; barra B575, na qual os aerogeradores (em vermelho) encontram-se conectados. A barra B575 é conectada à barra B3 por meio de um transformador.

Os aerogeradores possuem a configuração DFIG (*Doubly-Fed Induction Generator*) (Taveiros, 2014) e os parâmetros individuais de cada aerogerador podem ser vistos na Tabela 1. Os aerogeradores entram em operação no instante $t = 0$ s e permanecem ativos durante toda a simulação.

Tabela 1. Parâmetros dos geradores DFIG.

Potência nominal	1,5 MW
Tensão nominal no estator	575 V
Tensão nominal no rotor	1,975 kV
Frequência nominal	60 Hz
Impedância do estator	$0,023 + j0,18$ p.u.
Impedância do rotor	$0,016 + j0,16$ p.u.
Indutância de magnetização	2,9 p.u.
Corrente máxima, lado da rede	0,8 p.u.
Indutor de acoplamento, lado da rede	$0,003 + j0,3$ p.u.
Tensão nominal do barramento CC	1150 V
Capacitor do barramento CC	0,01 F
Capacitor de filtro de linha (Q = 50)	120 kVAR

A carga não linear, modelada por fontes de correntes, injeta harmônicos de 3^a, 5^a e 7^a ordens, causando distorções

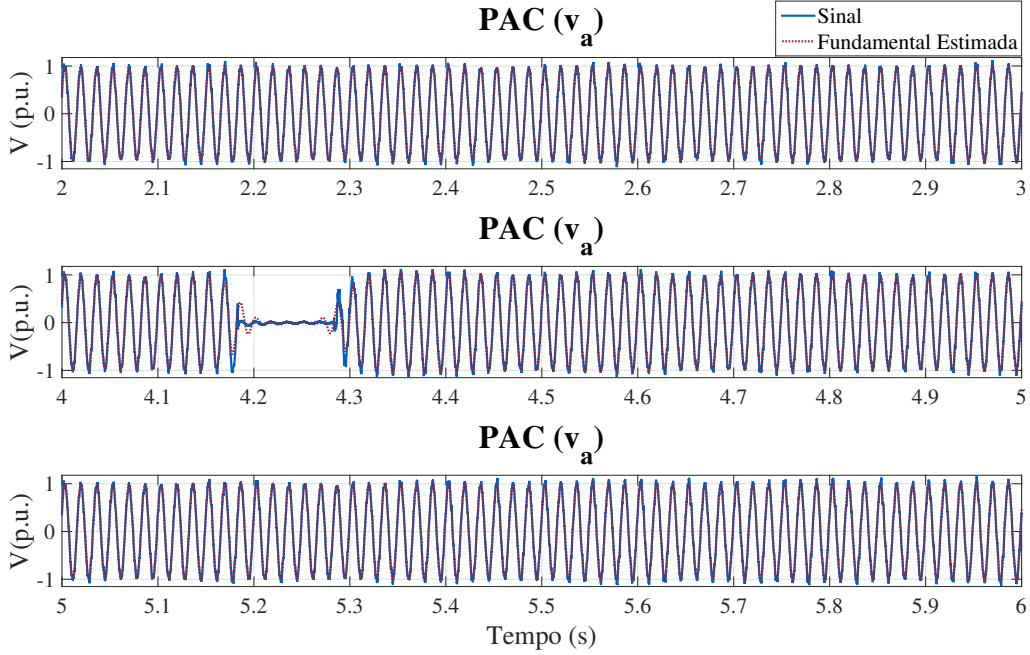


Figura 4. Estimação do componente fundamental.

na tensão medida em relação à magnitude do componente fundamental de 3,453%, 2% e 2,96%, respectivamente. Além disso, ela foi inserida no sistema no instante $t = 5,35$ s e permaneceu conectada até o fim da simulação, no instante $t = 7$ s. O intuito de se chavear essa carga durante a simulação é de alterar a distorção harmônica no PAC de modo que haja a necessidade de se reprojeter os filtros.

Além da carga não linear e dos aerogeradores, a fim de testar em situações adversas o sistema de controle da técnica de estimação harmônica proposta, durante o intervalo de $t = 4,15$ s a $4,25$ s ocorrerá um distúrbio de falta localizado entre a barra B1 e a barra B2.

Utilizou-se uma frequência de amostragem $F_s = 7,68$ kHz. O E_{RMSE} de tolerância do detector de novidade foi mantido constante e igual a 0,05. O número de amostras para realizar o cálculo dos coeficientes dos filtros de decomposição foi $N_s = 1536$ amostras, correspondente a 0,2 s (ou 12 ciclos) de sinal. O número de atrasos (m) utilizados pelo SCBSS foi de 256 amostras, e, conseqüentemente, os filtros FIR projetados pela técnica possuem ordem igual a 511 (Davies and James, 2007). Considerou-se o primeiro segundo de simulação como período transitório dos aerogeradores, portanto descartou-se as amostras do sinal durante esse período de tempo. Na seção a seguir apresenta-se os resultados da simulação da técnica de estimação proposta.

4. RESULTADOS

Esta seção aborda os resultados obtidos pela simulação. Inicialmente será avaliada a estimação do componente fundamental durante toda o intervalo de tempo em análise. A Figura 4 apresenta em linhas contínuas azuis o sinal de tensão da fase A na barra do PAC, sincronizado com a saída do respectivo filtro, mostrada em linhas pontilhadas vermelhas. Nesta figura, pode-se observar três intervalos distintos do sinal: (i) O intervalo de $t = 2$ s a $t = 3$ s, no

qual o sinal está estacionário; (ii) o intervalo de $t = 4$ s a $t = 5$ s, no qual o sinal apresenta um afundamento de curta duração, devido à falta aplicada entre as barras B1 e B2; (iii) o intervalo de $t = 5$ s a $t = 6$ s, no qual se introduz uma nova carga não linear ao sistema, na barra B2. Visualmente, nota-se que o componente fundamental estimado é bastante próximo ao sinal original; isso se deve ao fato da energia deste componente ser muito mais elevada que as dos demais.

Na Figura 4, o gráfico central mostra o comportamento da estimativa durante a etapa de afundamento, mostrando o período transitório dos filtros tanto antes quanto depois do afundamento. Destaca-se que depois deste período a estimativa volta à estabilidade. Por último, pode-se dizer que a introdução de uma nova carga no sistema alterou muito pouco a estimativa do componente fundamental.

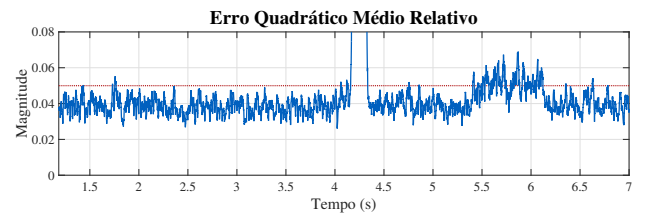


Figura 5. $E_{RMSE}[n]$ ao longo do tempo.

Além de avaliar a estimação do componente fundamental, também pode-se avaliar o erro de reconstrução ($E_{RMSE}[n]$) apresentado durante toda simulação. A Figura 5 apresenta, em linha azul contínua, o erro de reconstrução ao longo do sinal e, em linha vermelha tracejada, o limiar de tolerância do detector de novidade, com o intuito de disparar o reprojeto dos filtros quando necessário.

Nota-se que durante o distúrbio de falta (intervalo de $t = 4,15$ s a $t = 4,25$ s), como previsto previamente, o período

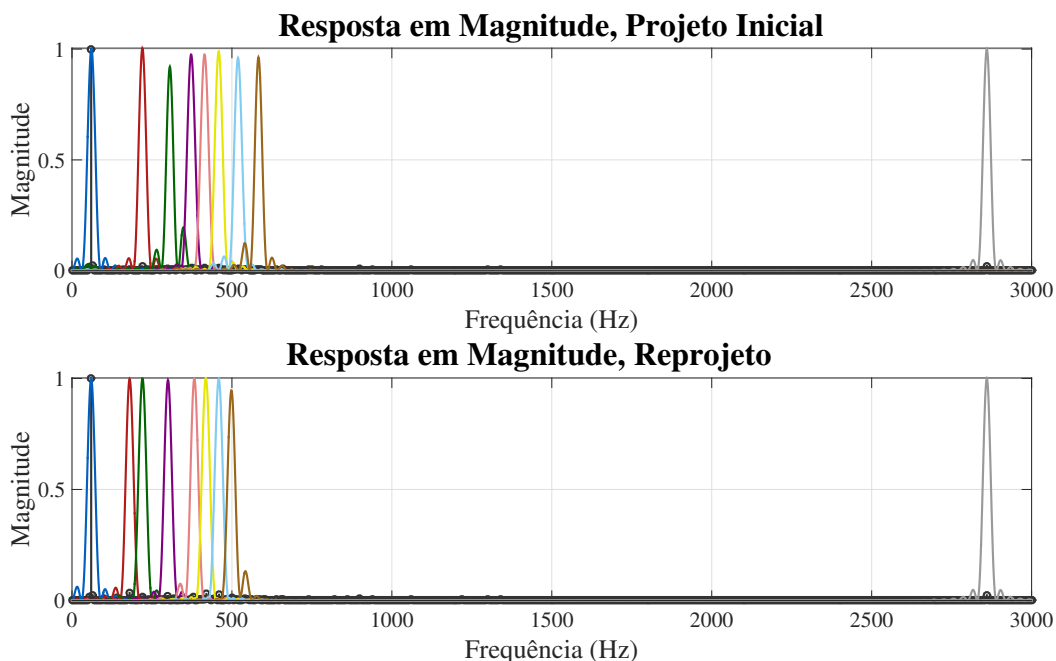


Figura 6. Resposta em magnitude do banco de filtros projetado pelo SCBSS.

transitório de resposta dos filtros faz com que o erro de reconstrução seja bastante elevado; porém, logo após o final do distúrbio, o erro volta a se normalizar no mesmo patamar anterior à ocorrência da falta. Sendo assim, como explicado anteriormente, cancela-se o reprojeção dos filtros. Entretanto, a mesma situação não ocorre depois da adição da carga não linear, que implica em uma elevação do erro, mesmo que para um patamar ligeiramente superior à tolerância, porém, de forma prolongada, implicando assim, no reprojeção dos filtros. Esse reprojeção ocorre no intervalo aproximado de $t = 5.9$ s a $t = 6.1$ s. Apesar da carga não linear ter sido adicionada no instante $t = 5.35$ s, seus efeitos são sentidos mais à frente; isso se deve à característica indutiva da rede. Deve-se destacar, então, que o sistema só realizou o reprojeção do banco de filtro quando a característica harmônica da rede foi alterada.

Para ilustrar o reprojeção dos filtros, tem-se os resultados da Figura 6. Nela, apresenta-se na cor preta o espectro de magnitude obtido por meio da aplicação da FFT (*Fast Fourier Transform*) (Mitra and Kuo, 2006), normalizada pela componente fundamental, do seguimento do sinal utilizado para o projeto dos filtros pelo SCBSS e; em cores diversas, a resposta em magnitude de cada filtro projetado.

A partir da Figura 6, é possível perceber que os filtros são alterados durante a fase de reprojeção. O banco de filtros projetados inicialmente (subfigura superior, Filtros Iniciais) possui filtros centralizados em 60 Hz, 220 Hz, 306 Hz, 372 Hz, 414 Hz, 459 Hz, 519 Hz, 583 Hz e 2860 Hz, e depois do reprojeção (subfigura inferior, Filtros Finais), os filtros estão centralizados nas frequências de 60 Hz, 180 Hz, 220 Hz, 300 Hz, 382 Hz, 420 Hz, 459 Hz, 498 Hz e 2860 Hz, o que confirma a mudança da natureza harmônica do sinal. É importante destacar que, além dos componentes harmônicos, existem também alguns componentes inter-

harmônicos presentes no sinal e que a técnica proposta foi capaz de localizá-los.

Destaca-se que existe uma mudança na ordem das frequências centrais dos filtros depois da etapa de reprojeção, e essa mudança impacta diretamente nos componentes estimados. Deste modo, tem-se que avaliar o impacto do reprojeção dos filtros nos componentes estimados. As Figuras 7 e 8 mostram, respectivamente, as formas de onda dos três primeiros componentes e as respostas em magnitude dos três primeiros filtros, antes e após o reprojeção.

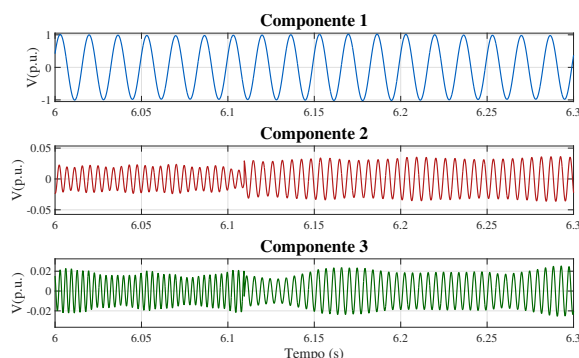


Figura 7. Três primeiros componentes estimados pelo SCBSS.

Na Figura 7, apresenta-se os três primeiros componentes estimados: em azul, tem-se o primeiro componente, que nesse caso, é o componente fundamental; em vermelho, tem-se o segundo componente, possuindo, inicialmente, a frequência de 220 Hz, e passando a apresentar a frequência de 180 Hz após o reprojeção, e; por fim, em verde, tem-se a representação do terceiro componente que, inicialmente, apresenta frequência de 306 Hz e passa a apresentar, após o reprojeção, frequência de 220 Hz.

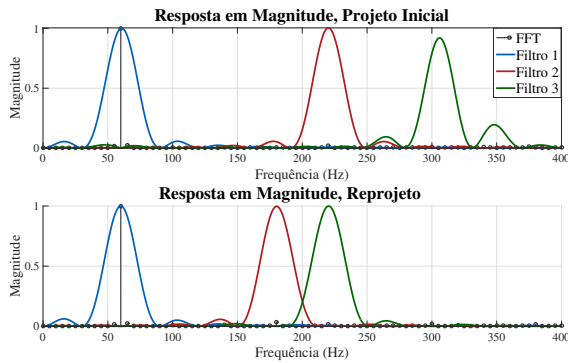


Figura 8. Resposta em magnitude dos três primeiros filtros obtidos pelo SCBSS.

Já a Figura 8 apresenta a resposta em magnitude dos filtros projetados para os três primeiros componentes. Essa segue o mesmo padrão de cores da Figura 7, sendo azul para representar o primeiro componente, vermelho para o segundo componente e verde para o terceiro componente. Além disso, de forma semelhante à Figura 6, a Figura 8 apresenta em sua subfigura superior a resposta em magnitude do primeiro banco de filtros projetado e em sua subfigura inferior a resposta em magnitude do reprojeto do banco de filtros.

Nota-se na Figura 7 que pouca ou nenhuma alteração ocorre no componente fundamental, algo que pode ser confirmado avaliando-se a Figura 8, a qual apresenta duas respostas em magnitude semelhantes para o Filtro 1. Também destaca-se que a Figura 7 não apresenta um novo período transitório para o novo banco de filtros, pois apenas se modifica os coeficientes dos filtros, não sendo necessário reiniciar o processo de filtragem. O efeito desta modificação pode ser observado por meio dos “saltos” apresentados nos componentes 2 e 3. Também é válido observar que a resposta em magnitude do Filtro 2 antes do reprojeto é semelhante à resposta em magnitude do Filtro 3 após o reprojeto. Isto implica que o componente de 220 Hz é presente durante todo o sinal e pode ser recuperado utilizando as estimativas dos componentes 2 e 3.

5. CONCLUSÃO

Dado o objetivo principal deste trabalho, o qual é realizar a estimação de componentes harmônicos e inter-harmônicos variantes no tempo, pode-se afirmar que a integração da técnica SCBSS com um sistema de controle e detecção de novidades apresenta bons resultados, visto as características de frequência do sinal e as respostas em magnitude dos conjuntos de filtros projetados.

Além disso, a integração do sistema permite a utilização da técnica de processamento em blocos SCBSS de modo mais eficiente, já que normalmente ela seria executada novamente para cada bloco do sinal que fosse adquirido, mesmo quando não houvesse real modificação no conjunto de filtros estimados, ou seja, o sinal se mantivesse estacionário de um bloco para outro. Com a nova abordagem, o SCBSS é executado novamente somente se houver alteração harmônica no sinal monitorado.

Por fim, pode-se concluir que o sistema de controle apresenta robustez para não atuar devido a distúrbios transitórios; porém, com sensibilidade para atuar quando altera-se as características harmônicas da rede.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido dentro do projeto “Estudo de Metodologias para Conexão de Usinas Eólicas Offshore de Grande e Pequeno Porte e Aspectos Elétricos e Energéticos” PD-0553- 0045/2016 no âmbito do programa de P&D do sistema elétrico regulado pela ANEEL. O presente trabalho também contou com apoio financeiro da Capes- Brasil, FAPEMIG, INERGE, PPEE - UFJF e CNPq.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Energia Eólica, A. (2019). Boletim anual de geração eólica 2018. *ABBEólica*.
- Belouchrani, A., Abed-Meraim, K., Cardoso, J.F., and Moulines, E. (1997). A blind source separation technique using second-order statistics. *IEEE Transactions on signal processing*, 45(2), 434–444.
- Bollen, M.H. and Gu, I.Y. (2006). *Signal processing of power quality disturbances*, volume 30. John Wiley & Sons.
- Davies, M.E. and James, C.J. (2007). Source separation using single channel ica. *Signal Processing*, 87(8), 1819–1832.
- George, V., Bagaria, A., Singh, P., Pampattiwar, S.R., and Periwal, S. (2011). Comparison of cfl and led lamp-harmonic disturbances, economics (cost and power quality) and maximum possible loading in a power system. In *2011 International Conference & Utility Exhibition on Power and Energy Systems: Issues and Prospects for Asia (ICUE)*, 1–5. IEEE.
- Hyvärinen, A., Karhunen, J., and Oja, E. (2001a). *Independent component analysis*, volume 46. John Wiley & Sons.
- Hyvärinen, A., Karhunen, J., and Oja, E. (2001b). *Independent component analysis, adaptive and learning systems for signal processing, communications, and control*. John Wiley & Sons, Inc, 1, 11–14.
- Kusko, A. and Thompson, M.T. (2007). *Power quality in electrical systems*, volume 23. McGraw-Hill New York.
- Liu, Y.y., Xu, L.l., Zhou, S.j., Yang, L., Li, Y.q., and Feng, D.d. (2018). Identification of major power quality disturbance sources in regional grid based on monitoring data correlation analysis. In *2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 4257–4263. IEEE.
- Mitra, S.K. and Kuo, Y. (2006). *Digital signal processing: a computer-based approach*, volume 2. McGraw-Hill New York.
- Moura, L.P. et al. (2017). Avaliação experimental do desempenho de unidades eólicas quanto à geração de distorções harmônicas.
- O’grady, P.D., Pearlmutter, B.A., and Rickard, S.T. (2005). Survey of sparse and non-sparse methods in source separation. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 15(1), 18–33.
- Oliveira, D.R.d., Cabral, T.W., Lima, M.A.A., Silva, L.R.M., and Duque, C.A. (2019). Comparação de técnicas

cas de alta resolução espectral para estimação de componentes harmônicos e inter-harmônicos não-estacionários. *CBQEE, Congresso Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica*.

Saxena, D., Verma, K., and Singh, S. (2010). Power quality event classification: an overview e key issues. *International journal of engineering, science e technology*, 2(3), 186–199.

Taveiros, F.E.V. (2014). *Sistema de conversão de energia eólica baseado no gerador de indução duplamente alimentado: análise e contribuição ao controle da máquina*. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.