

MONITORAMENTO MULTIDIMENSIONAL DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA PARA SMART GRIDS: IMPLEMENTAÇÃO EM FPGA E LABVIEW

THAIS MARTINS MENDES*, EULER RODRIGUES SOUSA FARIA*, LUCAS APARECIDO VIZIOLI PERLE*,
DANTON DIEGO FERREIRA*, BRUNO HENRIQUE GROENNER BARBOSA*

**Departamento de Engenharia
Universidade Federal de Lavras
Lavras, Minas Gerais, Brasil*

Emails: thais.mendes.13@hotmail.com, eulerrodriguesousa@gmail.com,
lucasavperle@gmail.com, danton@deg.ufla.br, brunohb@deg.ufla.br

Abstract— Power Quality (PQ) has emerged as an important research field in recent years. The development and increasing use of high power converters and the increase of nonlinear loads with high power cause unwanted changes in the electrical signal (current and voltage). These changes are called electrical disturbances. This work proposes a multidimensional approach, however with reduced computational complexity, for detecting PQ disturbances. The innovation of this work is the development of a simple method for online applications, not proposed in the literature yet. The main advantage of the method is low computational complexity.

Keywords— Power quality. Disturbance detection. Electric disturbances.

Resumo— Qualidade de Energia Elétrica (QEE) tem emergido como um campo importante de pesquisa nos últimos anos. O desenvolvimento e uso crescente de conversores de alta potência, e o aumento de cargas não lineares com potência cada vez mais elevada causam alterações não desejadas no sinal elétrico (corrente e tensão). Estas alterações são chamadas de distúrbios elétricos. Este trabalho propõe uma abordagem multidimensional, porém de reduzida complexidade computacional, para o monitoramento da QEE. A inovação deste trata-se do desenvolvimento de um método de detecção de distúrbios simples, para aplicações online, que proporciona um índice de QEE geral (independente do tipo de distúrbio). A principal vantagem do método é a baixa complexidade computacional.

Palavras-chave— Qualidade de Energia Elétrica, Detecção de Distúrbios, Distúrbios Elétricos.

1 Introdução

O termo “qualidade de energia elétrica” (QEE), em geral, compreende a qualidade das formas de onda da tensão e corrente elétricas em um sistema elétrico (Ribeiro et al., 2013; Bollen et al., 2010). Este termo tem recebido bastante atenção de pesquisadores.

O aparecimento de deformidades nas formas de onda da tensão e corrente caracteriza a falta de qualidade da energia elétrica. Estas deformidades são definidas pelo IEC (Commission, 1991) como fenômenos eletromagnéticos ou simplesmente distúrbios, dentre os quais se destacam os harmônicos, interharmônicos, flutuações de tensão, afundamentos, transitórios, entre outros. Algumas modificações e complementações na classificação do IEC foram realizadas pela norma IEEE (QUALITY, 1995), com a inclusão da categoria de ruído, de elevação de tensão e a definição da categoria de distorção de forma de onda da corrente alternada, que inclui as distorções harmônicas, interharmônicas e de componente contínua. Estes distúrbios estão relacionados com diferentes eventos nos sistemas de potência. Alguns são gerados pela operação normal dos sistemas, tais como chaveamento de banco de capacitores e entrada e saída de grandes cargas lineares ou não, enquanto outros estão relacionados com eventos não operacionais do sistema, como as descargas atmosféricas e as faltas na rede elétrica. Uma das prin-

cipais atribuições do monitoramento da qualidade de energia elétrica é a análise dos distúrbios elétricos. Para tal, os sinais de tensão e/ ou corrente do sistema monitorados devem ser armazenados para posterior análise ou analisados em tempo real. No entanto, o armazenamento destes gera arquivos de dados de grande extensão. Portanto, torna-se importante utilizar sistemas de detecção para que possam armazenar (ou processar no caso de monitoramento em tempo real) apenas os sinais elétricos com distúrbios e, posteriormente, analisá-los realizando a classificação, identificação e localização das fontes geradoras dos mesmos. A detecção deve ser realizada por sistemas com reduzida complexidade computacional e, consequentemente, rápido processamento de sinais (Ferreira, 2010).

A detecção de distúrbios elétricos, em geral, compreende basicamente a extração de parâmetros e a aplicação de um algoritmo que realize a detecção baseada nos parâmetros extraídos. A extração de parâmetros consiste em uma transformação dos dados para um novo espaço onde as características dos distúrbios são destacadas em relação aos sinais sem distúrbios. Estas características são então selecionadas e apresentadas à técnica de detecção. Assim, o compromisso em projetar um detector com alto desempenho e rápido processamento está na escolha das técnicas de extração de parâmetros e de detecção.

Este trabalho propõe um método simples de

monitoramento de QEE, que opera em um espaço multidimensional, com dimensão igual à janela de sinal processado. O método detecta os distúrbios elétricos e proporciona um índice de QEE utilizando apenas o cálculo do quadrado da distância euclidiana como parâmetro para detectar os distúrbios.

O método proposto é avaliado utilizando sinais simulados e sinais reais com implementações em MatLab e em FPGA (*Field-programmable gate array*) com interface em LabVIEW, e comparado com o método baseado em filtragem digital e morfologia matemática (MMF) (Radil et al., 2008).

O método proposto em Radil et al. (2008) utiliza um filtro digital e morfologia matemática para detectar transitórios e distorções na forma de onda da tensão, enquanto que os distúrbios de curta e longa duração tais como afundamentos, elevações e interrupções de tensão são detectados através da comparação do RMS do sinal monitorado com o RMS de um sinal nominal.

O artigo está organizado da seguinte maneira. Na próxima seção é apresentada a formulação do problema de detecção de distúrbios elétricos. Na Seção III é apresentado o método proposto. Na Seção IV é apresentada a base de dados utilizada para avaliar o método. Os resultados são apresentados na Seção V e as conclusões finais na Seção VI.

2 Materiais e Métodos

O problema de detecção de distúrbios elétricos pode ser formulado pelas hipóteses (Ferreira et al., 2014):

$$H_0 : v = f + r, \quad (1)$$

$$H_1 : v = f_c + i + t + h + r, \quad (2)$$

em que $f = [f[n] \dots f[n - N - 1]]^T$, $f_c = [f_c[n] \dots f_c[n - N - 1]]^T$, $i = [i[n] \dots i[n - N - 1]]^T$, $t = [t[n] \dots t[n - N - 1]]^T$, $h = [h[n] \dots h[n - N - 1]]^T$ e $r = [r[n] \dots r[n - N - 1]]^T$ correspondem a N amostras, respectivamente, do sinal fundamental nominal (frequência e amplitude fixa), do sinal fundamental corrompido por alguma variação na frequência ou amplitude, interharmônicos, transitórios, harmônicos e ruído. A hipótese (1) está associada à operação nominal do sistema elétrico e a hipótese (2) está associada às condições anormais do sistema elétrico, isto é, a presença de distúrbios elétricos.

2.1 Método Proposto

No método proposto neste trabalho, o centro do espaço d -dimensional, definido conforme (3), é utilizado como referência para os sinais de tensão monitorados, uma vez que os eventos nominais

formam uma circunferência em d -dimensões. Ou seja,

$$c = [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0_d], \quad (3)$$

em que d é a dimensão dos dados, dado pelo número de amostras em cada janela de sinal monitorado.

Para a extração de características foi calculado o quadrado da distância euclidiana do sinal até a origem do espaço d -dimensional (ponto multidimensional c). Como o monitoramento é feito por janelas deslizantes de um ciclo do componente fundamental, o espaço de origem dos sinais a serem detectados são de 256 dimensões, equivalente a 256 amostras de segmento processado.

Para se ter uma ideia da distribuição dos dados no espaço, considere a representação em 3D, formada pelas amostras de número 30, 60 e 120 dos sinais nominais, mostrada na Fig. 1. Observa-se, claramente, que os sinais elétricos, com fase variando de -180° a $+180^\circ$, constituem um círculo no espaço, cujo centro é o ponto multidimensional c , conforme (3). Dessa forma, calculando-se a distância (D) de diferentes sinais nominais até a origem, pode-se afirmar que um sinal sem distúrbio terá o mesmo valor D , independente da sua fase.

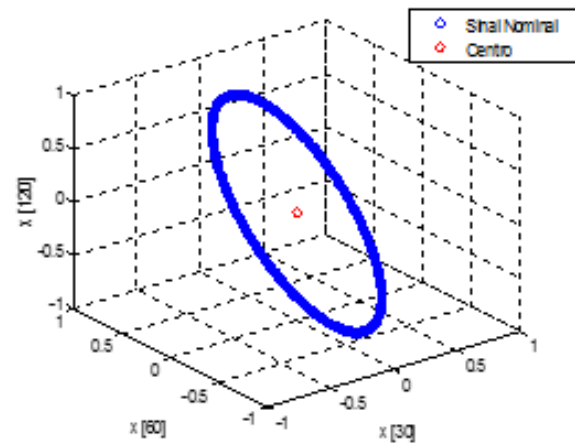


Figura 1: Espaço de parâmetros da classe de sinais nominais em 3D.

Na fase operacional do método proposto, mede-se o quadrado da distância euclidiana dos sinais monitorados ao centro (ponto multidimensional c), conforme (4) e verifica-se se o valor da distância obtido está dentro do intervalo definido por um par de limites (superior e inferior) previamente definido. Este intervalo de limiares define uma região fechada em torno da circunferência que modela os sinais nominais, de modo que os eventos no interior dessa região são atribuídos à operação nominal (sem perturbação) e eventos fora desta região são atribuídos a perturbações (2).

Este parâmetro de distância pode ser utilizado como um índice geral de QEE, medindo o quanto

o sinal monitorado desviou de um sinal nominal. Esta abordagem está de acordo com a definição básica de QEE, que mede o desvio do sinal elétrico de uma onda senoidal perfeita (tensão e frequência nominal).

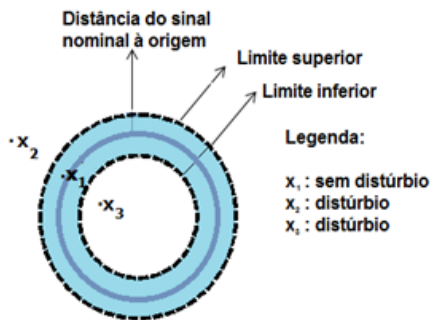


Figura 2: Limiares em torno da circunferência que modela os sinais nominais.

$$D(v, c) = E \{ \|v - c\|^1 \}, \quad (4)$$

em que $E\{\cdot\}$ é o operador esperança.

2.2 Base de Dados

Para avaliação de desempenho, sinais de tensão sint ticos foram gerados com uma frequência de amostragem igual a 15.360 Hz. Seis classes de distúrbios foram consideradas: harmônicos, afundamentos de tensão, elevação de tensão, interrupções, transitórios oscilatórios, transitórios impulsivos e notches. Um total de 500 eventos foi gerado para cada classe de distúrbios, e 500 sinais foram gerados sem distúrbios (classe de sinais nominais). Os sinais foram gerados com um ruído branco Gaussiano aditivo a SNRs (Signal-to-noise ratio) de 60 dB, 50 dB, 40 dB, 30 dB e 25 dB. Metade dos dados foi usada para o projeto do método e a outra metade para a avaliação de desempenho.

A fim de avaliar o desempenho do método para sinais reais, 60 formas de onda de distúrbios na tensão foram apresentadas ao método. Estes sinais foram fornecidos pelo grupo de trabalho do IEEE (P1159.3) (IEEE, n.d.).

2.3 Sistema de Detecção de Distúrbios em Tempo Real

Com o intuito de testar a praticidade do método em um sistema de aquisição real e sua complexidade computacional, foi desenvolvido um sistema de aquisição na plataforma LabVIEW (versão 2011 Professional) utilizando o hardware da National Instruments da linha compactRio modelo 9076-e, módulo de entrada analógica NI9201 e uma ponta de prova Tektronix P5 100A como mostra a Figura 3.

O sistema de aquisição foi criado baseado na arquitetura do conjunto de instrução pertencente

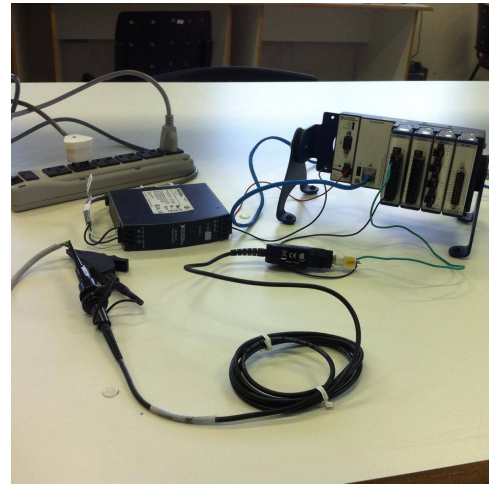


Figura 3: Sistema de Aquisição

a linha *compact Rio*, no qual divide o projeto em basicamente três *targets*: FPGA, Real Time target (RT), Remote Machine (Instruments, 2012), como mostrado na Figura 4.

A aquisição foi executada pelo módulo NI9201 que possui um conversor analógico digital interno do tipo SAR (*Successive Approximation Register*) acoplado ao chassi do núcleo de FPGA da *compact Rio*. O Virtual instrument (Vi) desenvolvido no FPGA utiliza de uma FIFO do tipo DMA para enfileirar os dados provenientes da aquisição controlando a frequência de amostragem a uma taxa de 16kHz com o intuito de respaldar qualquer possível perda de comunicação entre o módulo e o FPGA. Os dados são transferidos para o Real Time target via PCI BUS como mostrado na Figura 4. O Real Time target foi programado através de um VI desenvolvido para comunicar-se com o FPGA target. Esse VI   responsável pelo ajuste de alguns parâmetros tais como a profundidade da FIFO e a quantidade de amostras a serem lidas. Foi desenvolvido também um sistema de flush para caso ocorra um possível overflow o sistema responda automaticamente esvaziando a fila e reiniciando a aquisição, garantindo assim uma aquisição intermitente via software. Para aplicação do método proposto foi criado um SubVI chamado Select como mostrado na Figura 5.

O SubVi Select executa o método proposto na abordagem B, apresentado na Figura 6, permitindo apenas o envio das janelas que cont m distúrbios, através da Network Stream que baseia-se em uma comunicação ethernet, para qualquer computador ligado a rede local. Isso permite que o usuário, especialista em qualidade energia elétrica possa acompanhar o monitoramento do sistema elétrico de qualquer local que tenha acesso à rede local.

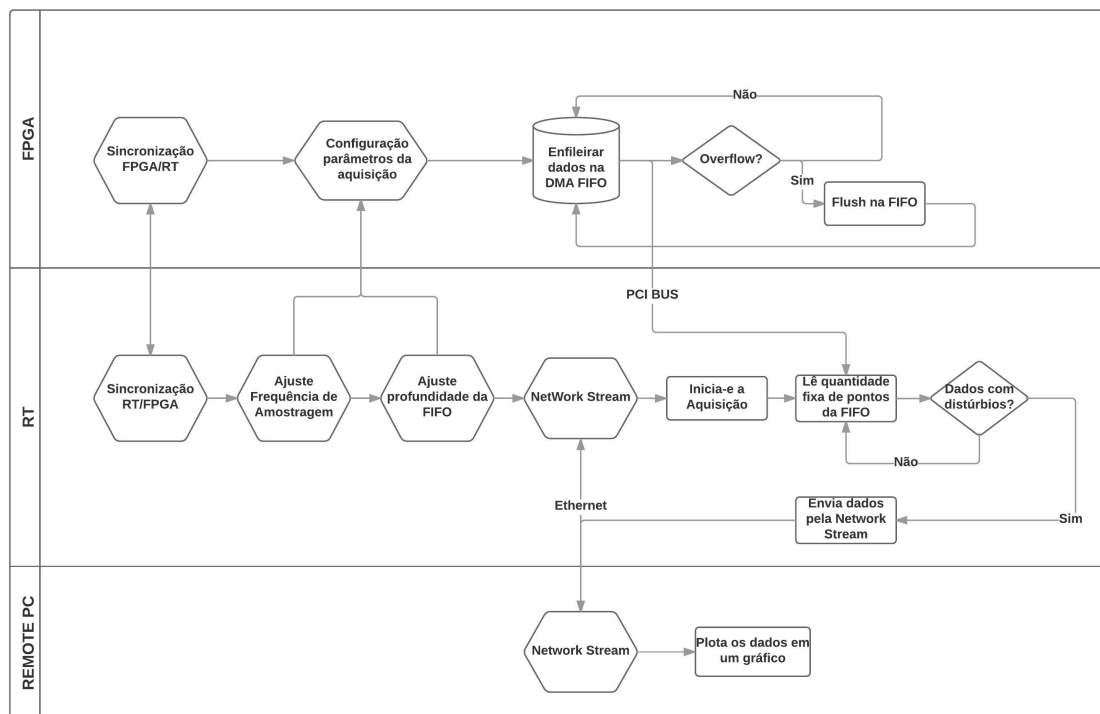


Figura 4: Fluxograma do algoritmo de aquisição

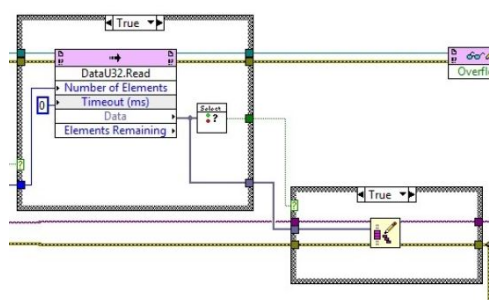


Figura 5: SubVI Select

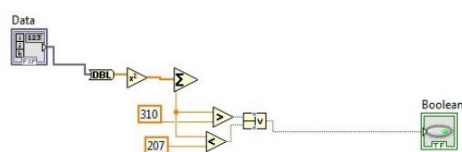


Figura 6: Abordagem B

3 Resultados

3.1 Resultados para Sinais Simulados

Para o método proposto, duas abordagens foram consideradas:

- Abordagem A): utiliza uma distância do sinal nominal à origem do espaço multidimensional fixa e os limites superior e inferior também fixos, definidos pelo banco de sinais nominais com SNR de 60 dB e;
- Abordagem B): utiliza uma distância e limi-

tes superior e inferior ajustados para cada nível de SNR considerada neste trabalho.

A Fig. 7 mostra a média dos quadrados das distâncias euclidianas dos eventos nominais (sem distúrbios) até o centro (ponto multidimensional c), para cada SNR considerada. À medida que a SNR aumenta, a distância tende a estabilizar, aproximando-se da distância de um sinal sem ruído ao centro. Para SNR pequena, a distância aumenta, e aumenta também o desvio padrão da média, ou seja, aumenta a variação da distância obtida dentro de um conjunto de eventos nominais com a mesma SNR. Logo, para o projeto do detector, devem-se ajustar dois limites de variação da distância, superior e inferior, seguindo os valores mostrados na Fig. 7, tomando um par de limites para cada SNR.

Na prática, já que os sistemas elétricos estão sujeitos a variações de SNR devido a interferências que podem ser causadas por diversas fontes, o ideal seria monitorar a relação SNR e ajustar o valor dos limites (superior e inferior) de acordo com as variações da SNR, conforme abordagem B) do método proposto. A Tabela 1 apresenta o desempenho do método proposto e do método apresentado em Radil et al. (2008), para os sinais simulados em função das taxas de probabilidade de detecção (P_d) e probabilidade de falso alarme (P_f). Observa-se que a abordagem A) apresentou altas taxas de falso alarme para SNR menor que 60 dB. A abordagem B) apresentou melhores resultados com menores taxas de falso alarme. Para SNR de 60 dB, as duas abordagens do mé-

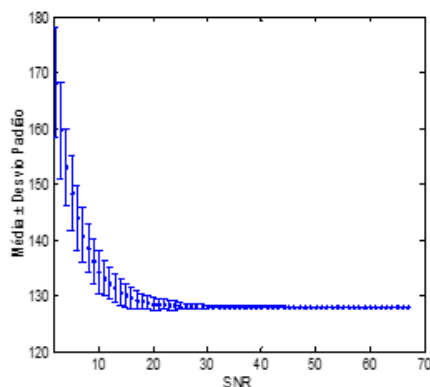


Figura 7: Valores de média $\pm$ desvio padrão do quadrado da distância euclidiana dos eventos nominais até a origem, ponto multidimensional c , em função da SNR.

todo proposto apresentaram resultados similares ao método MMF. Para SNR de 50 dB, apenas a abordagem B) do método proposto apresentou resultados similares ao método MMF, com falso alarme nulo. Para maiores níveis de ruído, SNR igual 25 dB, o método proposto na abordagem B) apresentou as menores taxas de falso alarme seguido de uma probabilidade de detecção de 90.3%.

Tabela 1: Desempenho de Detecção de Distúrbios em % para Sinais Simulados.

Métodos		SNR				
		60	50	40	30	25
Proposto Abord. A	Pd	99.4	97.7	97.7	99.8	99.9
	Pf	0.0	23.8	73.2	88.8	94.6
Proposto Abord. B	Pd	99.4	99.3	99.2	97.4	90.3
	Pf	0.0	0.0	6.4	8.0	10.0
MMF	Pd	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5
	Pf	0.0	0.0	0.0	2.5	99.5

De acordo com Tomić et al. (2007), a SNR de sinais de tensão em sistemas de potência varia, na prática, de 50 a 70 dB. Os resultados da Tabela 1 mostram que nesta faixa de ruídos o método proposto apresenta boas taxas de detecção (Pd e Pf).

3.2 Resultados para Sinais Reais

O desempenho do método proposto para sinais reais foi de 100%, de forma que todas as 60 formas de onda de distúrbios na tensão foram detectadas. O método apresentado em Radil et al. (2008) não foi aplicado ao banco de sinais reais, visto que o mesmo utiliza um filtro digital como pré-processamento para eliminar a componente fundamental do sinal de tensão e este filtro gera um transitório que influencia na detecção dos distúrbios, levando a resultados errôneos. O transitório não pôde ser eliminado devido ao número

de amostras limitado dos sinais do banco IEEE.

Ademais, em termos de complexidade computacional, o método proposto apresenta reduzida complexidade computacional, visto que não requer pré-processamento de filtragem, requerendo apenas o cálculo do quadrado da distância euclidiana entre dois pontos, o que favorece sua implementação em tempo real, por exemplo, em plataformas DSP (*Digital Signal Processor*).

3.3 Resultados do Sistema de Aquisição

O método proposto apresentou 100% de acerto para testes executados de acordo com os limites inferior e superior referentes distúrbios de abaixamento e elevação de tensão, apresentando ainda baixa complexidade computacional facilitando a implementação do mesmo. A Figura 8 apresenta o resultado para um ensaio com o gerador de função ajustado para uma função senoide de frequência 60Hz e com amplitude superior a onda normalizada caracterizando-se assim como um possível distúrbio de elevação de tensão.

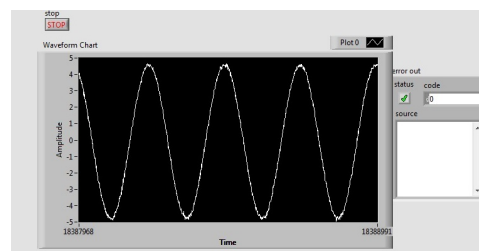


Figura 8: Remote Reader VI

4 Conclusões

Este trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento de um método de detecção de distúrbios elétricos em sistemas de potência. A inovação do método está no fato de se trabalhar no espaço d-dimensional dos dados, já que foi mostrado que a classe de sinais nominais forma uma circunferência em d-dimensões. Ademais, apenas um parâmetro foi usado para a detecção, o quadrado da distância Euclidiana dos sinais monitorados ao centro da classe de sinais nominais. Além de poder ser utilizado na detecção de distúrbios, este parâmetro de distância pode ser bastante útil para quantificar a severidade do distúrbio ocorrido em função do seu desvio em relação ao sinal de tensão ideal (nominal), fornecendo a um índice geral de QEE. Considerando a nova configuração de geração de energia decentralizada, um novo índice de QEE para verificar a energia gerada e injetada no sistema elétrico é muito importante.

O método apresentou bons resultados na detecção de distúrbios em geral, porém, mostrou ser afetado pelo nível de ruído presente no sinal processado. Uma alternativa para melhorar o desem-

penho do método proposto a variações de SNR no sinal monitorado seria usar um estimador de SNR como pré-processamento e atualizar o limiar do detector de acordo com as estimativas de SNR, conforme mostrado pela abordagem B) do método.

A vantagem do método proposto é a reduzida complexidade computacional na fase operacional. O método requer apenas o quadrado da distância euclidiana do sinal monitorado a um ponto d-dimensional e a comparação do mesmo com um limiar previamente definido. Com isso foi possível implementar este método em um sistema real baseado em FPGA de forma satisfatória.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação e Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo suporte financeiro.

Referências

- Bollen, M. H., Ribeiro, P., Gu, I. Y. and Duque, C. A. (2010). Trends, challenges and opportunities in power quality research, *European Transactions on Electrical Power* **20**(1): 3–18.
- Commission, I. I. E. (1991). IEC-91- Draft Classification of Electromagnetic Environments, *Technical report*, IEC: TC77WG6 (Secretary) 110-R5.
- Ferreira, D. D. (2010). *Análise de Distúrbios Elétricos em Sistemas de Potência*, PhD thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Ferreira, D. D., de Seixas, J. M., Duque, C. A., Cerqueira, A. S. and Ribeiro, P. F. (2014). A direct approach for disturbance detection based on principal curves, *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014 IEEE 16th International Conference on*, IEEE, pp. 747–751.
- IEEE (n.d.). Power Quality Data of the IEEE P1159.3 Task Force, <http://grouper.ieee.org/groups/1159/3/docs.html>. This reference was last accessed is 10/12/2012.
- Instruments, N. (2012). *NI LabVIEW for CompactRIO Developer's Guide*, j12 edn. Recommended LabVIEW Architectures and Development Practices for Control and Monitoring Applications.
- QUALITY, O. P. (1995). Iscc. iieee recommended practice for monitoring electric power quality.
- Radil, T., Ramos, P. M., Janeiro, F. M. and Serra, A. C. (2008). Pq monitoring system for real-time detection and classification of disturbances in a single-phase power system, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* **57**(8): 1725–1733.
- Ribeiro, P. F., Duque, C. A., Ribeiro, P. M. and Cerqueira, A. S. (2013). *Power systems signal processing for smart grids*, John Wiley & Sons.
- Tomić, J. J., Kušljević, M. D. and Vujičić, V. V. (2007). A new power system digital harmonic analyzer, *Power Delivery, IEEE Transactions on* **22**(2): 772–780.