



# Mapeamento Sistemático da Análise de Distúrbios Elétricos Usando Sistemas Embarcados

Reneilson Y. C. Santos<sup>1</sup>, Edward D. Moreno<sup>1</sup>, Maria A. S. N. Nunes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal de Sergipe, Av. Marechal Rondon, s/n, 49100-000, Rosa Elze, São Cristóvão, SE, Brasil. Email: {reneilson1, edwdavid, gutanunes}@gmail.com

**Resumo**—O monitoramento da qualidade de energia elétrica tem sido um tema recorrente devido ao aumento no gasto, principalmente dentro de indústrias, causado por falhas nos equipamentos devido a distúrbios elétricos. Neste contexto, o uso de sistemas embarcados, com seu baixo custo e alta performance, tem crescido, o que possibilitou ao monitoramento das redes elétricas ser feito mais eficientemente. Desta maneira, este trabalho apresenta um mapeamento sistemático da literatura, no qual 552 artigos foram mapeados e 56 selecionados para estudar e analisar as questões de pesquisa: quais são os métodos/algoritmos mais usados para detecção e/ou classificação de distúrbios?, quais são os sistemas embarcados mais utilizados?, e quais são os distúrbios mais estudados nos artigos?

**Palavras-chave**— distúrbios elétricos, monitoramento, classificação, distúrbios, mapeamento sistemático.

## Systematic Map of Electrical Disturbance Analysis Using Embedded Systems

**Abstract**—The electrical power quality monitoring has been a recurring theme due to the growth in the expense, mainly inside the industries, caused by equipments failure because of the electrical disturbances. In this context, the use of embedded systems, with its low cost and high performance, have growth, what has allowed the monitoring of the electrical networks be made more efficiently. Hence, this paper shows a systematic literature map, where 552 papers were mapped and 56 were selected to study and analyze the research questions: which are the methods/algorithms most used to detect and/or classify disturbances?, which are the embedded platform most used?, and which are the disturbances more addressed in the literature?

**Keywords**— electrical disturbance, monitoring, classification, detection, disturbance, systematic map.

### I. INTRODUÇÃO

NOS últimos anos tem aumentado o interesse em pesquisas relacionadas à qualidade da potência (ou energia) elétrica [1], a qual, segundo o padrão 1159-2009, refere-se à variedade de fenômenos eletromagnéticos que acontecem na tensão, corrente ou potência elétrica.

Kennedy [2] apresenta um aspecto que pode ter influenciado esse recente interesse em pesquisas relacionadas à qualidade da energia elétrica: o aumento do gasto relacionado a problemas na rede elétrica devido ao crescente

número de equipamentos com cargas não-lineares ligados à mesma. Ainda segundo [2], na década de 1990, só nos Estados Unidos, mais de um bilhão de dólares foram perdidos devido a problemas relacionados à qualidade da energia elétrica.

No que tange a energia elétrica, esta é entregue pelo sistema de transmissão/distribuição como uma onda senoidal de tensão com amplitude e frequência aproximadamente constantes. No entanto, a qualidade entregue pelas concessionárias pode se deteriorar devido a questões específicas de alguns equipamentos conectados à rede ou problemas na própria transmissão/distribuição.

Os distúrbios elétricos, que causam a baixa qualidade da energia, são comumente definidos como qualquer mudança na potência, tensão, corrente ou frequência que interfira na operação normal do equipamento elétrico [3].

Eles podem ser caracterizados, segundo o padrão 1159-2009 da IEEE em sete categorias distintas: os transientes, as variações de curta duração no valor RMS, variações de longa duração no valor RMS, desbalanceamento, distorções na forma de onda, flutuações e variações na frequência. Em cada categoria, pode-se ainda analisar subcategorias de distúrbios de acordo com sua duração e magnitude [1].

Diante deste quadro foi desenvolvido ao longo dos anos uma variedade de sistemas monitores de distúrbios elétricos [4], inclusive com a utilização de sistemas embarcados [5]. Com este avanço nos equipamentos, pode-se desenvolver sistemas capazes tanto de trabalhar em tempo real, quanto de armazenar uma grande quantidade de dados para análise de comportamento da qualidade da energia elétrica a posteriori.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo mapear os sistemas utilizados para detecção e classificação de distúrbios elétricos, verificar sua capacidade de trabalho em tempo real, quais os métodos utilizados para a caracterização destes distúrbios bem como quais as plataformas de hardware são utilizadas para a confecção destes sistemas. Para este fim, o presente artigo foi dividido da seguinte maneira: a Seção II apresenta o Método adotado no mapeamento; na Seção III faz-se a Análise dos Resultados seguido pela Seção IV, na qual é apresentada a Conclusão.

## II. METODOLOGIA

Com o objetivo de mapear os estudos acerca dos sistemas utilizados para monitoramento de distúrbios elétricos utilizando sistemas embarcados com base em questões de pesquisa estabelecidas, foi adotado o método de mapeamento sistemático (SLM, *Systematic Literature Mapping*), que, segundo [6], é definido como um estudo secundário no qual, para se alcançar o objetivo é seguido o processo de: definir as questões de pesquisa, fazer a busca por artigos com estudos primários, classificar, extrair informações deles e mapear os seus resultados, como apresentado na Fig. 1.

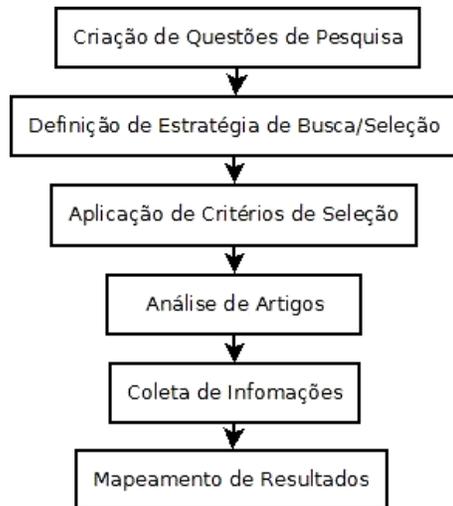


Figura 1. Metodologia para realização do mapeamento sistemático com processo definido por Petersen et al. [6]

Seguindo este método de mapeamento sistemático, esta seção traz os passos necessários para condução deste estudo. Para tanto faz-se necessário a apresentação das questões de pesquisa, da estratégia de busca e da metodologia (critérios) utilizada para a seleção dos artigos de estudos primários. Além disso, cada subseção seguinte detalha cada um dos passos no processo de mapeamento sistemático realizado no presente estudo.

### A. Questões de Pesquisa

Tendo em vista que o objetivo deste trabalho é mapear os artigos com a utilização de sistemas embarcados na solução do problema de detecção e/ou classificação de distúrbios elétricos, verificando os algoritmos que são utilizados e se esta implementação é de tempo real ou não, as seguintes questões de pesquisa foram elaboradas:

- Q1) Quais os algoritmos utilizados para detecção e/ou classificação dos distúrbios elétricos?
- Q2) Quais as plataformas de hardware utilizadas na detecção e/ou classificação de distúrbios elétricos?
- Q3) Os sistemas de monitoramento de distúrbios elétricos trabalham em tempo real ou de maneira offline?
- Q4) Quais os tipos de distúrbios elétricos mais abordados nos sistemas propostos?

### B. Estratégia de Busca e Seleção

Para a realização da busca por estudos relevantes foram selecionadas as bases Scopus e Web of Science. O portal de periódicos da Capes (<https://www.periodicos.capes.gov.br>) foi utilizado para obter acesso aos artigos disponíveis nessas bases.

A escolha da base Scopus deu-se devido ao fato dela possuir em seu acervo os artigos presentes em bases importantes da área de computação e engenharia elétrica (IEEE, ACM, Elsevier, entre outras) [SCOPUS 2017], já o Web of Science fora escolhido devido falta de alguns artigos desta base na Scopus.

As palavras chaves definidas para busca foram: *electrical disturbance*, *embedded system*, *classification*, *detection*, *monitoring* (palavras que foram mapeadas, a partir de artigos conhecidos da área previamente). Como forma de abranger sinônimos (e com base em alguns artigos encontrados previamente) foram adicionadas as palavras: FPGA, DSP, *Digital Signal Processor*, SoC e *System on Chip* como formas de sinônimos para *embedded system*; e *power quality*, *power fault*, *power disturbance* e *voltage disturbance*, como forma de sinônimos para *electrical disturbance*. Desta forma, as *strings* de busca foram:

Scopus: TITLE-ABS-KEY ( ( "EMBEDDED SYSTEM" OR "FPGA" OR "DSP" OR "SOC" OR "SYSTEM ON CHIP" OR "DIGITAL SIGNAL PROCESSOR" ) AND ( "ELECTRICAL DISTURBANCE" OR "POWER FAULT" OR "POWER DISTURBANCE" OR "POWER QUALITY" OR "VOLTAGE DISTURBANCE" ) AND (MONITORING OR DETECTION OR CLASSIFICATION))

Web of Science: TS=( ( "EMBEDDED SYSTEM" OR "FPGA" OR "DSP" OR "SOC" OR "SYSTEM ON CHIP" OR "DIGITAL SIGNAL PROCESSOR" ) AND ( "ELECTRICAL DISTURBANCE" OR "POWER FAULT" OR "POWER DISTURBANCE" OR "POWER QUALITY" OR "VOLTAGE DISTURBANCE" ) AND ( MONITORING OR DETECTION OR CLASSIFICATION ) )

As pesquisas com estas *strings* de busca foram realizadas em abril de 2017, retornando 391 artigos na base Scopus e 168 artigos na base Web of Science. Totalizando 559 trabalhos. A partir destes artigos foi iniciada a fase de seleção de acordo com os critérios a seguir apresentados.

### C. Critérios de Seleção

Com o intuito de filtrar os artigos encontrados, buscando-se apenas aqueles relevantes para o objetivo proposto, foram definidos os seguintes critérios de inclusão:

- 1) Foram incluídos artigos que resolvem o problema (caracterização de distúrbios elétricos) utilizando sistema(s) embarcado(s);
- 2) Foram incluídos artigos cujo conteúdo seja relacionado ao problema da qualidade elétrica relacionada

especificamente a distúrbios elétricos;

3) Foram incluídos artigos cujas fontes fossem conferências ou Journals.

Os critérios de inclusão foram utilizados baseando-se no resumo (*abstract*) dos artigos encontrados.

Em paralelo aos critérios de inclusão, foram definidos critérios de exclusão, descritos a seguir:

1) Foram excluídos artigos duplicados;  
 2) Foram excluídos artigos que não disponibilizavam o texto completo;

3) Foram excluídos artigos que não apresentassem uma abordagem voltada para a detecção, classificação ou monitoramento dos distúrbios elétricos;

4) Foram excluídos artigos que não apresentassem os algoritmos de detecção/classificação dos distúrbios elétricos.

Com base nos critérios de inclusão e exclusão adotados, dos 559 artigos encontrados inicialmente, foram selecionados 56 para responder às questões de pesquisa do presente mapeamento sistemático.

O quadro I apresenta o resultado do critério de seleção para cada base de pesquisa utilizada.

QUADRO I  
 TOTAL DE ARTIGOS SELECIONADOS COM CRITÉRIOS APLICADOS EM CADA BASE

Base	Resultado da pesquisa	Selecionados pelo Critério de Seleção
Scopus	391	41
Web of Science	168	15

Utilizando os 56 artigos selecionados após aplicados os critérios de inclusão e exclusão, foi feita a análise detalhada de cada artigo para posterior extração de informações que possam responder às questões de pesquisa propostas e, conseqüentemente, alcançar o objetivo do presente trabalho.

### III. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção é apresentada a análise dos resultados obtidos a partir da extração de informações dos 56 estudos relevantes para responder às questões de pesquisa do presente estudo.

A seguir são apresentados os resultados dos estudos relevantes relacionando-os com as questões de pesquisa apresentadas na seção II deste mapeamento.

*Q1) Quais os algoritmos utilizados para detecção e/ou classificação dos distúrbios elétricos?*

Esta questão visa analisar a tendência da utilização das técnicas de identificação de distúrbios elétricos (detecção ou detecção e classificação). Na Fig. 2 é apresentado um gráfico que ilustra que, apesar da maioria das pesquisas estarem relacionadas ao processo de classificação e detecção, ainda uma parte significativa faz apenas a detecção dos distúrbios elétricos, desta forma, deixando desta forma em aberto a

possibilidade de trabalhos futuros que permitam realizar a classificação dos distúrbios detectados.

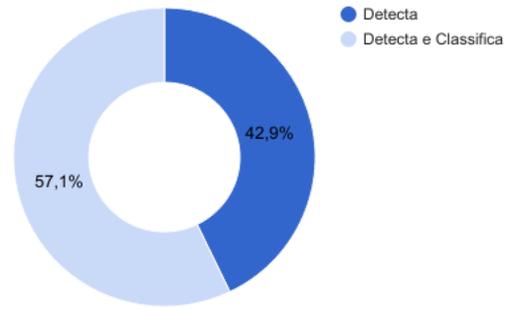


Figura 2. Uso de algoritmos de detecção ou detecção e classificação nos 56 estudos selecionados.

Dentro destes algoritmos de detecção e classificação, ver-se-á a seguir quais foram utilizados para a realização destas tarefas, tendo em vista, em sua grande maioria, a implementação em uma plataforma cujo poder de processamento é inferior ao de um ambiente computacional mais robusto.

#### a) Algoritmos de Detecção

Como forma de ilustrar a utilização dos algoritmos de detecção, na Fig. 3 é apresentado um gráfico de frequência trazendo-os.

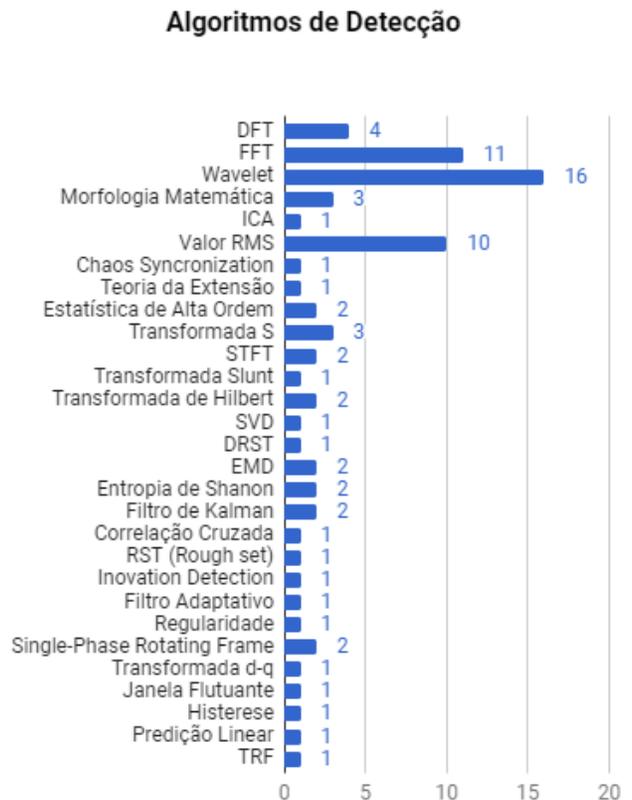


Figura 3. Algoritmos de detecção (como pode-se visualizar, a soma é superior a 56, o que indica que em alguns trabalhos foram utilizados múltiplos algoritmos de detecção).

Como pode-se visualizar na Fig. 3, o algoritmo mais utilizado para detecção de distúrbios elétricos é a Wavelet, isso deve-se provavelmente ao fato de sua implementação ser facilmente transferida para o ambiente embarcado, mesmo este possuindo uma menor capacidade de processamento. O Quadro II, apresentado a seguir, identifica os artigos contidos na Fig. 3.

QUADRO II  
ALGORITMOS DE DETECÇÃO

Algoritmo	Referências
DFT (Transformada Discreta de Fourier)	[3], [7], [8], [10]
FFT ( <i>Fast Fourier Transform</i> )	[11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21]
Wavelet	[10], [17], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34]
Morfologia Matemática	[35], [36], [37]
ICA	[38]
Valor RMS	[7], [11], [30], [36], [37], [39], [40], [41], [42], [43]
Chaos Synchronization	[39]
Teoria da Extensão	[39]
Estatística de Alta Ordem	[44], [45]
Transformada S	[12], [46], [47]
STFT	[46], [48]
Transformada Slunt	[49]
Transformada de Hilbert	[50], [51]
SVD (Decomposição em valores singulares)	[17]
DRST ( <i>Double Resolution S Transform</i> )	[52]
EMD ( <i>Empirical Mode Decomposition</i> )	[53], [54]
Entropia de Shanon	[53], [54]
Filtro de Kalman	[21], [60]
Correlação Cruzada	[55]
RST ( <i>Rough set</i> )	[55]
Inovation Detection	[56]
Filtro Adaptativo	[57]
Regularidade	[58]

<i>Single-Phase Rotating Frame</i>	[40], [59]
Transformada d-q	[61]
Janela Flutuante	[41]
Histerese	[57]
Predição Linear	[62]
TRF ( <i>Time-Frequency Representation</i> )	[63]

A maioria dos autores utilizam algoritmos já conhecidos na literatura para o processo de detecção, apenas [58] propõe um novo algoritmo (baseado na regularidade do sinal de entrada), no entanto, faz apenas a detecção de distúrbios transientes na onda senoidal de tensão.

Os artigos que apresentam a utilização do valor RMS (ou o algoritmo de morfologia matemática), no geral, fazem apenas a detecção de distúrbios elétricos com características mais bem definidas no domínio do tempo (como amplitude do sinal em determinado período de tempo [*sag*, *swell*, interrupção]).

Os trabalhos que apresentam detecção e classificação utilizam os algoritmos de detecção para reduzir a carga de trabalho de algoritmos de classificação, seja reduzindo a quantidade de dados (como no caso da Wavelet) ou então transformando sua forma de apresentação (como a FFT).

#### b) Algoritmos de Classificação

Na Fig. 4 é apresentado um diagrama de barras que relaciona a quantidade de artigos com o algoritmo utilizado para classificação de distúrbios para os 56 trabalhos selecionados, seguido pelo Quadro III, que apresenta as referências dos trabalhos onde estes algoritmos são utilizados.

Algoritmos de Classificação

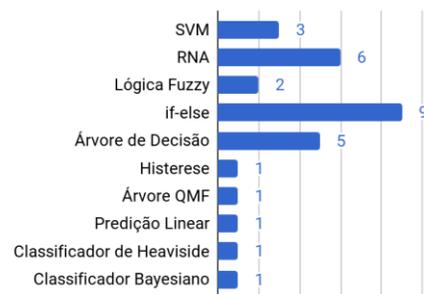


Figura 4. Algoritmos de classificação (pode-se observar que, pela soma dos artigos que utilizam algoritmos de classificação, não totaliza 56, ou seja, a quantidade total de artigos analisados, isto dá-se devido a nem todos os artigos utilizar a classificação dos distúrbios elétricos, ficando apenas na sua detecção).

QUADRO III  
ALGORITMOS DE CLASSIFICAÇÃO

Algoritmo	Referências
-----------	-------------

SVM	[17], [38], [52]
RNA (Perceptron)	[24], [26], [45], [50], [53], [54]
Lógica Fuzzy	[26], [51]
<i>if-else</i>	[27], [30], [33], [36], [37], [42], [44], [46], [61]
Árvore de Decisão	[7], [35], [45], [52], [63]
Histerese	[57]
Árvore QMF	[24]
Predição Linear	[62]
Classificador de Heaviside	[63]
Classificador Bayesiano	[45]

Apesar da intensificação dos estudos relacionados a distúrbios elétricos ter iniciado a partir da década de 1990, somente em 2001 Montero-Hernandez e Enjeti (2001) fizeram um sistema embarcado que tinha capacidade de realizar a classificação dos distúrbios elétricos, neste caso utilizou-se uma abordagem baseada em lógica condicional baseada nos valores obtidos com a Transformada d-q, em que foi possível classificar os distúrbios em *sag*, *swell* e interrupção.

Desde então, outros autores propuseram diferentes abordagens para realizar a classificação como [45] em que são utilizados dois algoritmos para abordar o problema (árvore de decisão em conjunto com uma rede neural do tipo perceptron).

Percebe-se uma propensão nos trabalhos a utilizar a lógica condicional (*if-else*) como forma de classificação, isso dá-se devido a agilidade no processamento de tal técnica quando comparado a qualquer outra. No entanto, ao utilizar esta técnica faz-se necessário um bom pré-processamento para aquisição de variáveis que caracterizem os distúrbios de maneira eficaz, por isso, uma tendência futura pode ser uma pesquisa mais voltada para técnicas de extração de características dos sinais com distúrbios elétricos que a busca por novos algoritmos que consigam melhores resultados.

Neste contexto, dada a diversidade de algoritmos utilizados tanto na classificação como na detecção dos distúrbios elétricos, a seguir são apresentados em quais plataformas tais algoritmos são implementados.

*Q2) Quais as plataformas de hardware utilizadas na detecção e/ou classificação de distúrbios elétricos?*

A resposta para esta pergunta é ilustrada na Fig. 5, que apresenta um gráfico de frequência apresentando os sistemas embarcados utilizados nos sistemas de monitoramento da

qualidade da energia elétrica. A partir desta figura, pode-se observar que os pesquisadores trabalham, em sua maioria, com DSP (*digital signal processor*) e FPGA (*field programmable gate array*) como plataforma para implementação dos algoritmos de detecção e classificação.

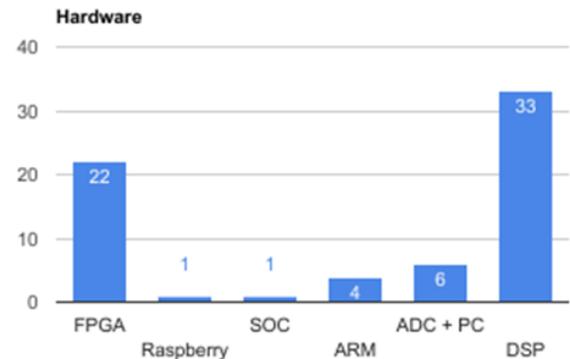


Figura 5. Hardware utilizado no sistema de monitoramento. (Alguns artigos utilizam mais que um dispositivo embarcado em seu sistema de monitoramento).

Em todas as propostas vistas na literatura foi utilizado um circuito ADC (conversor analógico-digital) para fazer a captura dos sinais dos sensores conectados a rede elétrica (sejam os que fazem experimento controlado ou em ambiente real), não obstante, no gráfico é apresentado com rótulo “ADC + PC” apenas os trabalhos que utilizam apenas um circuito ADC na forma de hardware “embarcado” e aplicam o algoritmo de classificação e/ou detecção em microcomputador.

Alguns trabalhos apresentam ainda a combinação de FPGA e DSP ou ARM e DSP aproveitando melhor a qualidade de cada dispositivo.

Pode-se salientar também que apenas em [11] é utilizado *Raspberry*. Isto, provavelmente deve-se ao fato do *Raspberry* possuir um poder de processamento maior que os dispositivos microcontrolados (DSP) ou mesmo que o FPGA, desta forma, visando um sistema de monitoramento mais básico, o uso de DSP ou FPGA é mais viável. Já em [39] (que apresenta um algoritmo baseado na teoria do caos para detecção) apresenta a possibilidade de trabalhar-se com o algoritmo em um SoC, no entanto detectando apenas quatro tipos de distúrbios simples. O Quadro IV apresenta os artigos que utilizaram cada uma das plataformas apresentadas no gráfico da Fig. 5.

QUADRO IV  
PLATAFORMAS DE HARDWARE

Hardware	Referências
FPGA	[7], [8], [10], [12], [18], [19], [20], [22], [26], [27], [33], [35], [38], [41], [44], [45], [49], [50], [51], [53], [54], [56]
Raspberry	[11]
SoC	[39]

ARM	[17], [19], [25], [28]
ADC	[24], [32], [36], [37], [48], [56]
DSP	[3], [7], [10], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [21], [22], [23], [25], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [40], [42], [43], [46], [52], [55], [57], [58], [59], [60], [61], [62], [63]

Além de saber da forma como os distúrbios são detectados e/ou classificados (qual a plataforma utilizada), é importante também entender como se dá o processo de detecção e/ou classificação, ou seja, se a tendência é se ter um trabalho cujo tempo de execução é suficiente para se ter uma resposta em tempo real ou se o foco é obter os dados para posteriormente trabalhar em cima deles, e é sobre isso que se trata a terceira questão do presente estudo.

*Q3) Os sistemas de monitoramento de distúrbios elétricos trabalham em tempo real ou offline?*

A Fig. 6 apresenta um gráfico mostrando o percentual de trabalhos que fazem o monitoramento em tempo real e de maneira offline.

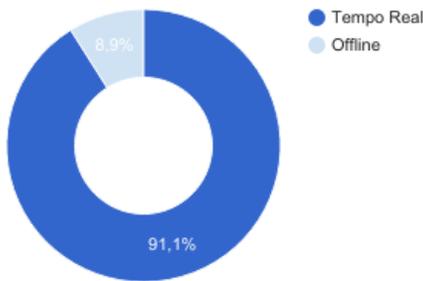


Figura 6. Monitoramento em Tempo Real e Offline.

Como pode-se analisar, a grande maioria dos trabalhos são realizados para obter-se um monitoramento em tempo real, apenas seis estudos primários ([32], [19], [10], [20], [31]) apresentam uma abordagem de classificação offline, este resultado já era esperado, devido ao contexto no qual a pesquisa fora sustentada (ambiente embarcado), pois, trabalhando neste tipo de ambiente, normalmente busca-se uma resposta mais rápida (em tempo real). No Quadro V é apresentado o resultado completo, com os artigos onde são apresentados sistemas que trabalham em tempo real e de maneira offline.

QUADRO V  
TIPO DE MONITORAMENTO

Monitoramento	Referências
Tempo real	[3], [7], [8], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42].

	[43], [44], [45], [46], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61], [62], [63]
Offline	[10], [19], [20], [31], [32]

Por fim, é importante compreender quais são os distúrbios mais capturados pelos sistemas de monitoramento propostos nos trabalhos estudados, e é sobre isso que se trata a última pergunta desse mapeamento sistemático.

*Q4) Quais os tipos de distúrbios elétricos mais abordados nos sistemas propostos?*

A Fig. 7 apresenta um gráfico que traz a frequência com a qual os distúrbios são trabalhados nos 56 estudos analisados.

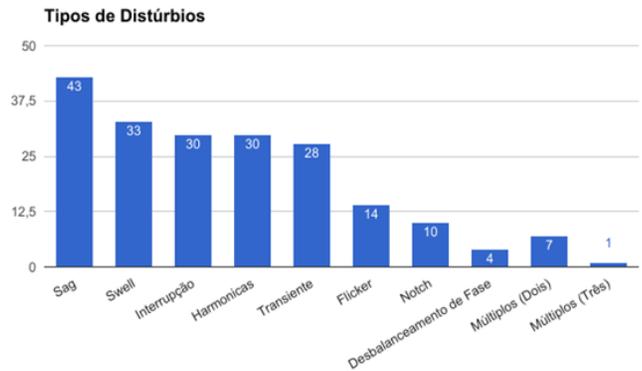


Figura 7. Tipos de distúrbios estudados nos estudos primários. (Como os artigos fazem, normalmente, detecção e/ou classificação de mais de um distúrbio, a soma dos valores apresentado no gráfico ultrapassar os 56 artigos analisados).

Como pode-se perceber a partir do gráfico na Fig. 7, o tipo de distúrbio mais comumente estudado é o *sag*, que é uma queda na amplitude da tensão por um determinado tempo [1022], seguido pelo *swell* que, ainda segundo [1022], é o aumento na amplitude da tensão por um determinado período de tempo. Interrupção, harmônicas e transientes são outros tipos de distúrbios bastante analisados nos sistemas estudados, inclusive, *sag* e harmônicas possuem uma grande quantidade de estudos primários que tratam unicamente deles, [21], [33] e [57] trazem estudos que tratam apenas na detecção de *sags* e [18], [14], [29] e [17] trazem estudos focados apenas em detecção de harmônicas ou cálculo de TDH (taxa de distorção harmônica).

A ampla detecção e classificação de distúrbios do tipo *sag* pode ser explicada pelo alto custo causado por este tipo de distúrbios na indústria. Segundo [9], só na Europa, em uma pesquisa feita com 16 indústrias em 25 países, descobriu-se que o *sag* (ou *dip*) e interrupções curtas corresponderam a um gasto de mais de 85 bilhões de euros no ano de 2004.

Poucos trabalhos apresentam a classificação de distúrbios que acontecem simultaneamente na rede elétrica (representados como “Múltiplos (Dois)” e “Múltiplos (Três)”

no gráfico da Fig. 7), são apenas sete trabalhos que apresentam soluções para tais problemas sendo que [45] apresenta solução para distúrbios duplos e tripos acontecendo simultaneamente e [55], [45], [52], [12], [38], [7], [23], [15], [19] apresentam soluções para detecção e classificação de distúrbios duplos. No Quadro VI são apresentadas todas as referências e quais distúrbios são analisados em cada uma delas.

QUADRO VI  
DISTÚRBIOS ELÉTRICOS

Distúrbio Elétrico	Referências
<i>Sag</i>	[3], [7], [8], [10], [11], [12], [16], [17], [21], [23], [25], [26], [27], [28], [30], [31], [32], [33], [35], [36], [37], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55], [57], [59], [60], [61], [62], [63],
<i>Swell</i>	[7], [8], [10], [11], [12], [17], [23], [25], [26], [27], [28], [30], [32], [35], [36], [37], [39], [41], [42], [44], [45], [46], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55], [60], [61], [62]
Interrupção	[3], [7], [8], [11], [12], [17], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [30], [35], [36], [37], [39], [43], [45], [46], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55], [60], [61]
Harmônicas	[7], [8], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [18], [20], [22], [26], [29], [31], [32], [36], [37], [39], [44], [45], [49], [50], [52], [53], [54], [55], [59], [60], [63]
Transiente	[3], [7], [11], [12], [13], [16], [17], [22], [23], [24], [25], [26], [28], [31], [32], [34], [36], [37], [44], [45], [46], [52], [53], [54], [55], [56], [58], [60]
<i>Flicker</i>	[3], [7], [11], [12], [13], [16], [17], [22], [23], [24], [25], [26], [28], [31], [32], [34], [36], [37], [44], [45], [46], [52], [53], [54], [55], [56], [58], [60]
<i>Notch</i>	[3], [7], [10], [12], [23], [31], [34], [46], [53], [54]
Desbalanceamento de Fase	[15], [19], [22], [60]
Múltiplos (2x)	[7], [12], [15], [19], [23], [38], [45], [52], [55]
Múltiplos (3x)	[45]

É interessante observar também como deu-se o avanço no número de pesquisas nesta área nos últimos anos, com base nos artigos selecionados. O gráfico de frequência mostrado na Fig. 8 apresenta este desenvolvimento de pesquisas relacionadas a sistemas embarcados no monitoramento de distúrbios elétricos.

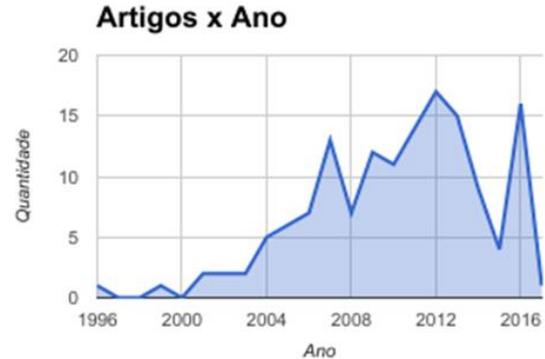


Figura 8. Número de publicações por ano.

Como pode-se visualizar, as pesquisas na área vinham crescendo e teve uma queda no ano de 2015, com apenas quatro pesquisas relacionadas, mas, voltando a crescer no ano de 2016. Possivelmente, esta baixa no ano de 2015 corresponde a um período no qual eram-se desenvolvidos sistemas mais robustos sem a utilização de sistemas embarcados, o que pode ser verificado posteriormente com um mapeamento sistemático mais abrangente, utilizando termos que não limite a pesquisa somente ao ambiente embarcado. Além disso, vale ressaltar que o pequeno número de publicações em 2017 deve-se ao mês em que a pesquisa fora realizada (abril de 2017).

#### IV. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um mapeamento sistemático cujo objetivo foi a análise e identificação de tendências da utilização de sistemas embarcados e de algoritmos no monitoramento de distúrbios na rede elétrica apresentados nos estudos selecionados.

Nesta esteira, o processo seguido para realização do mapeamento consistiu da criação de questões de pesquisa que nortearam o desenvolvimento da busca e seleção de artigos para análise mais aprofundada. De modo que foram encontrados 552 artigos em duas bases de dados distintas (Scopus e Web of Science), sendo que destes, ao serem aplicados os critérios de seleção, reduziram-se a 56 artigos considerados relevantes para o objetivo proposto.

Em conseqüente, a partir da análise dos estudos primários pode-se encontrar as tendências e pontos a serem desenvolvidos na área de classificação e detecção de distúrbios elétricos. Descobriu-se ainda que a maioria dos sistemas de monitoramento fazem a classificação e detecção dos distúrbios elétricos, sendo os algoritmos utilizados

bastante diversificados, tendo destaque para a transformada de Wavelet, que possui a vantagem de fornecer uma representação no domínio do tempo e da frequência, além de permitir a redução (compressão) dos dados (Q1).

Adicionalmente, devido à busca realizada com foco em sistemas embarcados, a maioria dos sistemas propostos operam em tempo real (Q3) e, quase todos apresentam a detecção do distúrbio do tipo *sag*, todavia poucos trabalhos verificam a ocorrência de distúrbios múltiplos (ou simultâneos) na rede elétrica (Q4).

Por fim, verificou-se que os sistemas embarcados são criados, em sua maioria, nas plataformas DSP (*Digital Signal Processor*) e FPGA (*Field Programmable Gate Array*) (Q2).

Desta forma, acredita-se que o presente trabalho contribui de maneira relevante para a academia, fornecendo suporte para pesquisadores da área de Sistemas Embarcados e Qualidade da Energia Elétrica, como uma fonte de consulta para visualizar os algoritmos e as plataformas utilizadas para garantir uma resposta adequada aos problemas de distúrbios na energia elétrica.

Frente aos resultados apresentados, pode-se ainda notar uma tendência na utilização de abordagens simples para realização de classificação, o que permite a redução de custos nos projetos embarcados, devido ao pouco processamento necessário para execução de tais técnicas. Frente a isto, verifica-se que a busca de técnicas de extração de características dos sinais elétricos, que possam apresentar as anomalias verificadas nos distúrbios, pode ser uma área promissora.

Ademais, como trabalhos futuros, pode-se fazer uma análise mais detalhada dos países e universidades que mais contribuem para a área de detecção/classificação de distúrbios elétricos utilizando sistemas embarcados; como estão os sistemas de monitoramento nos diferentes países; seguindo uma abordagem mais técnica, comparar pontos como a eficiência e eficácia dos algoritmos utilizados ou ainda fazer uma verificação conjunta de tempo de processamento, algoritmo e plataforma utilizada, para verificar em quais plataformas e com quais algoritmos consegue-se maior eficiência.

Este mapeamento serve, ainda, como base para o desenvolvimento de uma dissertação em que se propõe a construção de um sistema de monitoramento de distúrbios elétricos em ambiente embarcado, para detecção e classificação destes em tempo real.

#### AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro da CAPES – Brasil. Os autores agradecem ainda aos revisores e editores deste periódico que ajudaram a elevar o nível do presente artigo.

#### REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Std 1159-2009 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
- [2] Kennedy B. Power Quality Primer. McGraw-Hill; 2000.
- [3] Arrillaga J, Bradley DA, Bodger PS. Power System Harmonics. Wiley; 1985.
- [4] Santoso S, Grady M, Powers E, Lamoree J, Bhatt S. Characterization of Distribution Power Quality Events with Fourier and Wavelet Transforms; 2000.
- [5] Angrisani, L., Daponte, P., D'Apuzzo, M., & Pietrosanto, A. (1999). A VXI power quality analyser implementing a wavelet transform-based measurement procedure. *Measurement*, 26(2), 91-102.
- [6] Petersen, K., Feldt, R., Muftaba, S.; Mattson, M., (2008). Systematic mapping studies in software engineering. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering*, 68-77.
- [7] Zhang, M., & Li, K. (2010, April). DSP-FPGA based real-time power quality disturbances classifier. In *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES* (pp. 1-6). IEEE.
- [8] Morales-Velazquez, L., de Jesus Romero-Troncoso, R., Herrera-Ruiz, G., Morinigo-Sotelo, D., & Osornio-Rios, R. A. (2017). Smart sensor network for power quality monitoring in electrical installations.
- [9] Targosz, Roman; Manson, Jonathan. Pan-european power quality survey. In: *Electrical Power Quality and Utilisation, 2007. EPQU 2007. 9th International Conference on*. IEEE, 2007. p. 1-6.
- [10] Kapisch, E. B., Silva, L. R. M., Martins, C. H. N., Barbosa, A. S., Duque, C. A., Tavil, A. E., & de Souza, L. A. R. (2016). An implementation of a power system smart waveform recorder using fpga and arm cores. *Measurement*, 90, 372-381.
- [11] Zheng, X. Y., Chen, C. P., & Jiang, J. A. (2014, August). An Embedded-Based Distributed Private Cloud: Power Quality Event Classification. In *High Performance Computing and Communications, 2014 IEEE 6th Intl Symp on Cyberspace Safety and Security, 2014 IEEE 11th Intl Conf on Embedded Software and Syst (HPCC, CSS, ICESS), 2014 IEEE Intl Conf on* (pp. 1237-1242). IEEE.
- [12] He, S., Li, K., & Zhang, M. (2013). A real-time power quality disturbances classification using hybrid method based on S-transform and dynamics. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 62(9), 2465-2475.
- [13] Salem, M. E., Mohamed, A., Samad, S. A., & Mohamed, R. (2005). Development of a DSP-Based Power Quality Monitoring Instrument for Real-Time Detection of Power Disturbances. In *Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005. International Conference on* (Vol. 1, pp. 304-307). IEEE.
- [14] Gherasim, C., Van den Keybus, J., Driesen, J., & Belmans, R. (2003, May). Power measurements based on the IEEE trial-use standard 1459. In *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2003. IMTC'03. Proceedings of the 20th IEEE* (Vol. 2, pp. 1042-1047). IEEE.
- [15] Xiang-wu, Y., Wei, K., He-ming, L., Li-xia, Z., Zhi-jun, H., & Rui, K. (2006, May). The application of dsp and virtual instrument to online power quality detection. In *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006. International Symposium on* (pp. 761-764). IEEE.

- [16] Yongxian, S., Yuan, F., Chenlong, G., & Naibao, H. (2011, March). Design of Electric Power Parameter Monitoring System Based on DSP and CPLD. In *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*, 2011 International Conference on (Vol. 1, pp. 638-641). IEEE.
- [17] Wang, A., Pan, F., Li, Y., & Tao, R. (2012, June). The design of power quality detecting system based on OMAP-L138. In *Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, 2012 IEEE 13th Workshop on (pp. 1-4). IEEE.
- [18] Erişti, B., Yıldırım, Ö., Erişti, H., & Demir, Y. (2013). An FPGA-based system for real-time monitoring of voltage harmonics. *IMEKO*.
- [19] Yang, G. H., & Wen, B. Y. (2006, May). A device for power quality monitoring based on ARM and DSP. In *Industrial Electronics and Applications*, 2006 1ST IEEE Conference on (pp. 1-5). IEEE.
- [20] Liang, W., & Da, L. (2011, June). Research on key technologies of FPGA based power quality monitoring system. In *Computer Science and Automation Engineering (CSAE)*, 2011 IEEE International Conference on (Vol. 2, pp. 623-626). IEEE.
- [21] Amaris, H., Alvarez, C., Alonso, M., Florez, D., Lobos, T., Janik, P., ... & Waclawek, Z. (2008, September). Application of advanced signal processing methods for accurate detection of voltage dips. In *Harmonics and Quality of Power*, 2008. ICHQP 2008. 13th International Conference on (pp. 1-6). IEEE.
- [22] Xu, W., Xu, G., & Yuan, H. (2014, September). High performance distributed power quality monitoring IED used in smart grid. In *Electricity Distribution (CICED)*, 2014 China International Conference on (pp. 706-710). IEEE.
- [23] Salem, M. E., Mohamed, A., & Samad, S. A. (2007). Power quality disturbance detection using DSP based continuous wavelet transform. *Journal of Applied Sciences*, 7(6), 893-902.
- [24] Daponte, P., Di Penta, M., & Mercurio, G. (2004). TransientMeter: A distributed measurement system for power quality monitoring. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(2), 456-463.
- [25] Duan, Y., & Guo, X. (2012, May). Research and design of power quality monitoring equipment. In *Measurement, Information and Control (MIC)*, 2012 International Conference on (Vol. 2, pp. 740-744). IEEE.
- [26] Choong, F., Reaz, M. B. I., & Mohd-Yasin, F. (2005, April). Power quality disturbance detection using artificial intelligence: A hardware approach. In *Parallel and Distributed Processing Symposium*, 2005. Proceedings. 19th IEEE International (pp. 7-pp). IEEE.
- [27] Huang, S. J., Yang, T. M., & Huang, J. T. (2002). FPGA realization of wavelet transform for detection of electric power system disturbances. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17(2), 388-394.
- [28] Lu, P., Su, S., Liu, G., Rong, H., & Zheng, L. (2008, April). A new power quality detection device based on embedded technique. In *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on (pp. 1635-1640). IEEE.
- [29] Gorecki, K. (2014, May). WPT in power quality measurement system based on digital signal processor. In *Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2014 IEEE 16th International Conference on (pp. 783-787). IEEE.
- [30] Wang, Z. Q., & Zhu, S. Z. (2002, October). Comparative study on power quality disturbance magnitude characterization. In *Power System Technology*, 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on (Vol. 1, pp. 106-111). IEEE.
- [31] Salem, M. E., Mohamed, A., Samad, S. A., & Jones, O. (2006, November). DSP implementation of power quality disturbance analysis using continuous wavelet transform. In *Power and Energy Conference*, 2006. PECon'06. IEEE International (pp. 94-98). IEEE.
- [32] Back, J. A., Tedesco, L. P., Molz, R. F., & Nara, E. O. B. (2016). An embedded system approach for energy monitoring and analysis in industrial processes. *Energy*, 115, 811-819.
- [33] Arrais, E., Roda, V. O., Neto, C. M., Ribeiro, R. L., & Costa, F. B. (2014, May). FPGA versus DSP for wavelet transform based voltage sags detection. In *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, 2014 IEEE International (pp. 643-647). IEEE.
- [34] Szweda, M. (2009). Dwt Analysis Of Selected Transient And Notching Disturbances. signal (comparison with the prevent steady-state waveform), 3, 15.
- [35] Rodriguez, M. V., Hernandez, L. A. M., Rangel, J. P. B., & Gonzalez, A. D. (2016). Real-Time Monitoring of Voltage Variations using Mathematical Morphology. *IEEE Latin America Transactions*, 14(5), 2138-2145.
- [36] Radil, T., Matz, V., Janeiro, F. M., Ramos, P., & Serra, A. C. (2007, April). On-line detection and classification of power quality disturbances in a single-phase power system. In *Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 2007. POWERENG 2007. International Conference on (pp. 713-718). IEEE.
- [37] Ramos, P. M., Janeiro, F. M., & Serra, A. C. (2008). PQ monitoring system for real-time detection and classification of disturbances in a single-phase power system. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57(8), 1725-1733.
- [38] Ruiz-Llata, M., Guarnizo, G., & Boya, C. (2011, July). Embedded power quality monitoring system based on Independent Component Analysis and SVMs. In *Neural Networks (IJCNN)*, The 2011 International Joint Conference on (pp. 2229-2234). IEEE.
- [39] Yau, H. T., Wang, M. H., Wang, T. Y., & Chen, G. (2015). Signal clustering of power disturbance by using chaos synchronization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64, 112-120.
- [40] Malaysia, L. (2011). New Detection of Voltage Sag Based on Phase Angle Analysis. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(7), 405-419.
- [41] Meena, P., Rao, K. U., & Ravishankar, D. (2009, December). Real-time detection and analysis of PQ disturbances with DSP using MATLAB embedded link to code composer studio. In *Power Systems*, 2009. ICPS'09. International Conference on (pp. 1-5). IEEE.
- [42] Meena, P., Uma Rao, K., & Deekshit, R. (2011). A Simple Method For Real-Time Detection Of Voltage Sags and Swells in Practical Loads. *EPE Journal*, 21(3), 33-40.
- [43] Yingkayun, K., Premrudeepreechacharn, S., & Oranpiroj, K. (2009, July). A power quality monitoring system for real-time fault detection. In *Industrial Electronics*, 2009. ISIE 2009. IEEE International Symposium on (pp. 1846-1851). IEEE.
- [44] Moreno-Garcia, I. M., Moreno-Munoz, A., Domingo-Perez, F., Pallares-Lopez, V., Real-Calvo, R., &

- Santiago-Chiquero, I. (2012). Implementation of a Smart Grid Inverter through Embedded Systems. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 19(3), 3-6.
- [45] Ribeiro, E. G., Dias, G. L., Barbosa, B. H., & Ferreira, D. D. (2016, October). Real-time system for automatic classification of power quality disturbances. In *Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2016 17th International Conference on (pp. 908-913). IEEE.
- [46] Salem, M. E., Mohamed, A., Samad, S. A., & Yahya, I. (2007). Software tool for real time power quality disturbance analysis and classification. In *Research and Development, 2007. SCOREd 2007. 5th Student Conference on* (pp. 1-5). IEEE.
- [47] Szweda, M. (2009). DWT ANALYSIS OF SELECTED TRANSIENT AND NOTCHING DISTURBANCES. signal (comparison with the prevent steady-state waveform), 3, 15.
- [48] Moussa, A. E., El-Gammal, M., Abdallah, E., & El-Seoud, A. A. (2004, January). Hardware-software structure for on-line power quality assessment: Part I. In *ASME/IEEE 2004 Joint Rail Conference* (pp. 147-152). American Society of Mechanical Engineers.
- [49] Hsieh, C. T., Lin, J. M., & Huang, S. J. (2010). Slant transform applied to electric power quality detection with field programmable gate array design enhanced. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 32(5), 428-432.
- [50] Granados-Lieberman, D., Valtierra-Rodriguez, M., Morales-Hernandez, L. A., Romero-Troncoso, R. J., & Osornio-Rios, R. A. (2013). A hilbert transform-based smart sensor for detection, classification, and quantification of power quality disturbances. *Sensors*, 13(5), 5507-5527.
- [51] Yang, G. H., & Wen, B. Y. (2006, May). A device for power quality monitoring based on ARM and DSP. In *Industrial Electronics and Applications, 2006 1ST IEEE Conference on* (pp. 1-5). IEEE.
- [52] Li, J., Teng, Z., Tang, Q., & Song, J. (2016). Detection and Classification of Power Quality Disturbances Using Double Resolution S-Transform and DAG-SVMs. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65(10), 2302-2312.
- [53] Gonzalez-Cordoba, J. L., Mejia-Barron, A., & Valtierra-Rodriguez, M. (2015, November). Automatic detection and classification of electrical disturbances by means of empirical mode decomposition method. In *Power, Electronics and Computing (ROPEC), 2015 IEEE International Autumn Meeting on* (pp. 1-6). IEEE.
- [54] Gonzalez-Cordoba, J. L., Mejia-Barron, A., & Valtierra-Rodriguez, M. (2015, November). Automatic detection and classification of electrical disturbances by means of empirical mode decomposition method. In *Power, Electronics and Computing (ROPEC), 2015 IEEE International Autumn Meeting on* (pp. 1-6). IEEE.
- [55] Dalai, S., Chatterjee, B., Dey, D., Chakravorti, S., & Bhattacharya, K. (2013). Rough-set-based feature selection and classification for power quality sensing device employing correlation techniques. *IEEE Sensors Journal*, 13(2), 563-573.
- [56] Kapisch, E. B., Silva, L. R. M., Martins, C. H. N., Barbosa, A. S., Duque, C. A., de Andrade Filho, L. M., & Cerqueira, A. S. (2014, May). An electrical signal disturbance detector and compressor based on FPGA platform. In *Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2014 IEEE 16th International Conference on (pp. 278-282). IEEE.
- [57] Cuma, M. U., Teke, A., Meral, M. E., Bayindir, K. C., & Tumay, M. (2013). Implementation of a non-linear adaptive filter based sag detection method for Dynamic Voltage Restorers under unbalanced fault conditions. *Journal of Power Electronics*, 13(2), 304-312.
- [58] Artioli, M., Pasini, G., Peretto, L., Sasdelli, R., & Filippetti, F. (2004). Low-cost DSP-based equipment for the real-time detection of transients in power systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 53(4), 933-939.
- [59] Sadigh, A. K., & Smedley, K. M. (2016). Fast and precise voltage sag detection method for dynamic voltage restorer (DVR) application. *Electric Power Systems Research*, 130, 192-207.
- [60] Carniato, A. A., Godoy, R. B., & Pinto, J. O. P. (2009, September). Development of hardware and software for three-phase power quality disturbances detection, classification and diagnosis using Kalman Filter theory. In *Power Electronics Conference, 2009. COBEP'09. Brazilian* (pp. 451-457). IEEE.
- [61] Montero-Hernandez, O. C., & Enjeti, P. N. (2001, September). A fast detection algorithm suitable for mitigation of numerous power quality disturbances. In *Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE* (Vol. 4, pp. 2661-2666). IEEE.
- [62] Jiasheng, L., & Shijie, C. (2010, March). Design of Power Quality Disturbances Monitoring Device Based on Linear Prediction Mechanism. In *Challenges in Environmental Science and Computer Engineering (CESCE), 2010 International Conference on* (Vol. 2, pp. 358-360). IEEE.
- [63] Wang, M., Rowe, G. I., & Mamishev, A. V. (2004). Classification of power quality events using optimal time-frequency representations-Part 2: application. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(3), 1496-1503.
- [64] Targosz, Roman; Manson, Jonathan. Pan-european power quality survey. In: *Electrical Power Quality and Utilisation, 2007. EPQU 2007. 9th International Conference on*. IEEE, 2007. p. 1-6.