



**Moisés Hamssés Sales de Sousa**

**Detecção de harmônicas em redes industriais utilizando métodos no domínio da frequência e do tempo**

**João Pessoa - PB  
Agosto de 2020**



**Moisés Hamssés Sales de Sousa**

**Detecção de harmônicas em redes industriais utilizando métodos no domínio da frequência e do tempo**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia da Paraíba como parte dos requisitos necessários para à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Cleumar da Silva Moreira, Dr.  
Orientador

Edgard Luiz Lopes Fabrício, Dr.  
Coorientador

João Pessoa – PB, Agosto de 2020

Moises Hamssés Sales de Sousa – moiseshamsses@yahoo.com.br

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP  
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *campus* João Pessoa

S725d

Sousa, Moisés Hamssés Sales de.

Detecção de harmônicas em redes industriais utilizando métodos no domínio da frequência e do tempo / Moisés Hamssés Sales de Sousa. – 2020.

73 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB / Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Cleumar da Silva Moreira.

1. Engenharia elétrica. 2. Sistemas elétricos industriais. 3. Frequências harmônicas - Detecção. 4. Qualidade de Energia Elétrica (QEE). I. Título.

CDU 621.3.018.3

Bibliotecária responsável Taize Araújo da Silva – CRB15/536

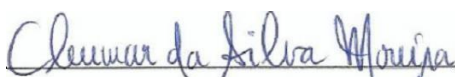
**Moisés Hamssés Sales de Sousa**

**Detecção de harmônicas em redes industriais utilizando métodos no domínio da frequência e do tempo**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia da Paraíba como parte dos requisitos necessários para à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

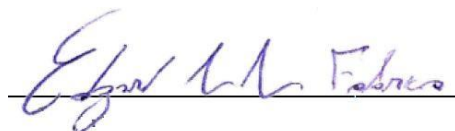
Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 08/ 07/2020.

**BANCA EXAMINADORA**



Cleumar da Silva Moreira, Dr. – IFPB

**Orientador**



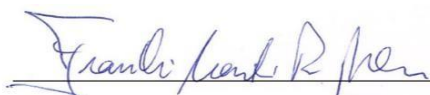
Edgard Luiz Lopes Fabrício, Dr. – IFPB

**Co-orientador**



Suzete Élide Nóbrega Correia, Dr. – IFPB

**Examinador interno**



Franklin Martins Pereira Pamplona, Dr. – IFPB

**Examinador externo**

João Pessoa – PB  
Agosto de 2020

À minha mãe pelo carinho, amor inestimável, por acreditar sempre que iríamos  
conseguiu concluir esta caminhada.

À minha irmã pela imensa motivação em suas palavras, por seu afeto e fundamental  
compreensão, pela sua fé imensurável e por ter certeza e acreditar que sempre atingiria  
este grau de estudos.

À minha família, esposa e filhos, pela imensa ajuda, compreensão, renúncia, por  
acreditar no meu sonho e assim fazendo-o dela também, pelo incentivo e tolerância  
durante os inúmeros momentos que estive ausente no decorrer dessa jornada.

Dedico.

## AGRADECIMENTOS

Aos que de certa forma estiveram por perto e contribuíram para que pudesse estar sempre em comunhão com meus valores, ideais princípios e sonhos, fundamentalmente nos momentos de enorme adversidade.

Ao orientador pelas palavras serenas e por me dar oportunidade de agregar conhecimentos científicos aos anseios gerados durante a vida profissional prática que tive.

Aos professores Suzete Elida Nobrega Correa, Alfredo Gomes Neto, Silvana Luciene Do Nascimento Cunha Costa pela enorme contribuição ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica do IFPB.

Ao coorientador, um célebre profissional, detentor de vasto conhecimento científico e que foi preponderante no desenvolvimento e na aplicação dos postulados desse trabalho, e indiretamente me auxiliou a compreender o sentido da perseverança.

Á todos os amigos, em especial, Paulo Ixtânio, Aldeni Sudário, Evandson Dantas, Juan Pereira, Samuel Sobrinho, Pablo Ursulino e Maria De Fátima Kallyna esses dois últimos estando, por vezes como meus direcionadores em alguns momentos de aborrecimento, indignação, descontentamento e ansiedade.

E, principalmente, a Santíssima Trindade que sempre em minha credibilidade particular estiveram comigo, intercedendo, protegendo e abençoando. Sendo meu refúgio e me dando forças nos momentos em que fui dominado pela fraqueza e por uma pouca fé.

*“A vida não tem pena de quem não luta.”*

*– Léo Tarcísio*

## RESUMO

Em sistemas de energia elétrica tem-se à existência de distúrbios elétricos que ocasionam danos, gerando custos com indisponibilidade de equipamentos, processos produtivos e sistemas parados, bem como um baixo desempenho dos equipamentos eletrônicos. Os valores e níveis de tais distúrbios são pré-estabelecidos por um conjunto de normas e associações, que regem a operação do sistema elétrico. A manter os níveis deve ser algo garantido, tanto pelos consumidores, quanto pelas concessionárias de fornecimento de energia elétrica. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema para detecção de frequências harmônicas contidas em um circuito elétrico com uma carga não-linear, aplicando dois métodos, um para sinais no domínio da frequência e outro para sinais no domínio do tempo, e apresentá-los de forma unificada e *on-line*. Os algoritmos propostos para a detecção utilizaram recursos, como o algoritmo *Phase Locked Loop* - PLL, Transformada de *Park*, Transformada Discreta de Fourier Recursiva – TDFR e filtro de segunda ordem, que foram aplicados em rotinas programáveis compiladas num processador de sinais digitais. Os resultados experimentais foram obtidos e enviados para uma aplicação *WEB*, via a ferramenta GUI Composer. Assim, ao aplicar os métodos para o domínio da frequência e domínio do tempo, foi possível observar as amplitudes harmônicas de 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup>, contidas no sinal lido, para o domínio da frequência foi necessário aplicar a TDFR e o algoritmo PLL, e para o domínio do tempo a Transformada de *Park* para obter as coordenadas *d* e *q* e os ângulos de fase com o PLL. Em ambos os métodos o conteúdo harmônico foi bem similar sendo superior a 99%, contudo observou-se que devido ao número de operações matemáticas o método para o domínio da frequência precisou de ajustes ao requerer melhor dinâmica nas simulações. Observou-se também que os valores de Total de Distorções Harmônicas apresentaram valores bem próximos divergindo em 1,2% um método em relação ao outro. Para ambientes industriais o método para o domínio do tempo tem caráter mais exequível pelo fato da aplicação computacional se dá com um código bem difundido e por haver em alguns relés de proteção a pré-disposição de conversão da linguagem de programação em C++ para linguagem de Blocos ou *Ladder*.

*Palavras-Chave:* Qualidade de energia elétrica. Total de Distorções Harmônicas.



## ABSTRACT

In electrical energy systems, there are electrical disturbances that cause damage, generating costs with unavailability of equipment, production processes and stopped systems, as well as low performance of electronic equipment. The values and levels of such disturbances are pre-established by a set of norms and associations, which govern the operation of the electrical system. Maintaining the levels must be something guaranteed, both by consumers and by electricity supply concessionaires. The objective of this work was to develop a system for detecting harmonic frequencies contained in an electrical circuit with a non-linear load, applying two methods, one for signals in the frequency domain and the other for signals in the time domain, and unified and online form. The algorithms proposed for the detection used resources, such as the Phase Locked Loop - PLL, Park Transform, Discrete Recursive Fourier Transform - TDFR and second order filter, which were applied in programmable routines compiled in a digital signal processor. The experimental results were obtained and sent to a WEB application, via the GUI Composer tool. Thus, when applying the methods for the frequency domain and time domain, it was possible to observe the harmonic amplitudes of 5th, 7th, 11th and 13th, contained in the read signal, for the frequency domain it was necessary to apply the TDFR and the PLL algorithm, and for the time domain the Park Transform to obtain the coordinates of the phase angles with the PLL. In both methods, the harmonic content was very similar, being greater than 99%, however, he observed that due to the number of mathematical operations, the method for the frequency domain needed adjustments to require better dynamics in the simulations. It was also observed that the values of Total Harmonic Distortions showed very close values, diverging by 1.2% one method in relation to the other. For industrial environments, the method for the time domain has a more feasible character because the computational application occurs with a widespread code and because there are in some protection relays the pre-disposition of converting the programming language in C ++ to Block language or Ladder.

Keywords: Electric power quality. Total Harmonic distortions.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Instalação Elétrica Típica.....	19
Figura 2 - Estrutura genérica de um medidor de harmônico.....	27
Figura 3 - Estrutura de um medidor de harmônicos em blocos.....	28
Figura 4 - Etapas básicas executadas pela Transformada Discreta de Fourier. ....	34
Figura 5 - (a) Trem de impulsos no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência.....	35
Figura 6 - Diagrama da obtenção da Transformada Discreta de Fourier Recursiva.....	37
Figura 7 - Algoritmo da transformada de Fourier recursiva. ....	38
Figura 8 - Sinal co-senoidal amostrado no intervalo $T_w$ . ....	39
Figura 9 - Diagrama de correção da fase da TDFR. ....	42
Figura 10 - O princípio da DFT aplicada em janela deslizante. ....	42
Figura 11 - Diagrama genérico $dq$ síncrono para a 5ª ordem Harmônica.....	44
Figura 12 - Diagrama de blocos com sistema de detecção do protótipo. ....	46
Figura 13 - Estrutura de um PLL. ....	47
Figura 14 - Visão Geral do Medidor Proposto.....	49
Figura 15 - Retificador Trifásico.....	50
Figura 16 - Circuito carga não-linear Trifásico .....	50
Figura 17 - Bancada didática experimental.....	52
Figura 18 - Processador Digital de Sinais com o (a) Kit DSP com entradas A/D e (b) Indutores .....	53
Figura 19 - Placa de condicionamento de sinais com (a) Pontos para conexão com o DSP, (b) sensor de corrente e (c) sensor de tensão. ....	54
Figura 20 - Corrente de entrada modo da frequência (a) $ia$ , (b) $ib$ e (c) $ic$ .....	57
Figura 21 – Amplitudes harmônicas para o método domínio da frequência.....	62
Figura 22 - Análise espectral do sinal no domínio da frequência nas correntes de referencia (a) $ia$ , (b) $ib$ e (c) $ic$ . ....	63
Figura 23 - Total de distorção harmônica contida na corrente (a) $ia$ , (b) $ib$ e (c) $ic$ .....	64
Figura 24 - THD das correntes após o transitório.....	65
Figura 25 - Interface desenvolvida para visualizar o Sistema no Domínio da Frequência.....	65
Figura 26 - Corrente de entrada modo do tempo (a) $ia$ , (b) $ib$ e (c) $ic$ . ....	66
Figura 27 – Amplitudes harmônicas para o método domínio do Tempo.....	67
Figura 28 - Análise espectral do sinal no domínio do Tempo .....	68
Figura 29 - Total de distorção harmônica contida nas correntes (a) $ia$ , (b) $ib$ e (c) $ic$ .....	69

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Categorias e características dos problemas relacionados à QEE.....	25
Tabela 2 - Parâmetros para realização das simulações. ....	53
Tabela 3 – Resumo dos Harmônicos contidos no Sistema para Dominio Frequência.....	61
Tabela 4 – Resumo dos Harmônicos contidos no Sistema para Dominio do Tempo.....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico para Digital
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
App	Aplicativo
ARM	<i>Advanced RISC Machines</i>
ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCS	Code Composer Studio
DFT	Transformada Discreta de Fourier
DSP	Processamento Digital do Sinal
$E$	Energia
ENOB	<i>Effective Number of Bits</i>
$f$	Frequência
$f_0$	Frequência fundamental
FFT	Transformada Rápida de Fourier
$\theta_n$	Ângulo de defasagem da componente Harmônica
$f_s$	Frequência de amostragem
$g$	Função de translação
GRPS	Serviços Gerais de Pacote por Rádio
GSR	Resposta Galvânica da Pele
$h$	Número da ordem
HTML	<i>Hypertext Markup Language</i>
HVDC	<i>High Very Direct Current</i>
Hz	Hertz
$i(t)$	Corrente fornecida pela concessionária de Energia Elétrica

IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
$j$	Unidade imaginário
$k$	Passo de amostragem
$k$	Número inteiro
LACA	Laboratório de Acionamentos, Controle e Automação
LwIP	<i>Lightweight TCP/IP</i>
$m$	Número inteiro
$m$	Identificador da ordem harmônica de um sinal no domínio da frequência
$máx$	Máximo
MB	<i>Mega Byte</i>
MHz	Mega Hertz
$mín$	Mínimo
$n$	Número inteiro maior que zero
$N$	Número de pontos por período para sinais amostrados
$n$	Identificador da amostra de um sinal discreto no domínio do tempo
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
$p$	Número real
PHP	<i>Personal Home Page</i>
PIC	<i>Peripheral Interface Controller</i>
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
PRODIS	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico
$q$	Número inteiro
$q^{-1}$	Operador de atraso para sistemas discretos

QEE	Qualidade de Energia Elétrica
$r(t)$	Função pulso retangular da janela de amostragem
RISC	Computador com um conjunto reduzido de instruções
RTC	<i>Real Time Clock</i>
$s$	Sinal
$s(t)$	Sinal no tempo contínuo contido dentro da janela de amostragem $T_w$
$s_1(k)$	Amostras da componente fundamental de $s(t)$
SE	Sistemas Embarcados
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SFDR	<i>Spurious Free Dynamic Range</i>
$sin$	Sinal do sistema
SNR	Relação Sinal – Ruído
SVD	Decomposição dos valores singulares
$t$	Variável tempo
$T_w$	Largura da janela de amostragem retangular
$T_I$	Período da componente fundamental do sinal $v_1(t)$
TDF	Transformada Discreta de Fourier
TDFR	Transformada Discreta de Fourier Recursiva
THD	Distorção Total de Harmônica
$T_s$	Período de amostragem
$T_w$	Largura da janela retangular de amostragem da TDF
$u_I(t)$	Sinal contínuo senoidal e unitário
$u_I[k]$	Sinal discreto senoidal e unitário
$v(t)$	Tensão Instantânea
$v[n]$	Amostra específica de um vetor discreto com valores de tensão no Domínio do Tempo
$v_I(t)$	Tensão fundamental contínua no domínio do tempo

$v_l[k]$	Tensão fundamental discreta no domínio do tempo
$V_l[k]$	Componente fundamental da Transformada de Fourier de $v[k]$ tomada a cada passo de amostragem
$V_h(t)$	Tensão contínua referente ao conteúdo harmônico
$v_h[k]$	Tensão discreta referente ao conteúdo harmônico
$V_m$	Amostra específica de um vetor discreto com valores de tensão no domínio da frequência
$v_m[k]$	Tensão temporal discreta referente a uma componente harmônica específica
$V_m[k]$	Componente de ordem $m$ da Transformada de Fourier de $v[k]$ tomada a cada passo de amostragem
$x$	Função Contínua
$Y_0$	Amplitude da Componente Contínua
$Y_n$	Amplitude da componente Harmônica ordem $n$
$\delta$	Impulso unitário
$\Delta_{\theta c}$	Fase de correção para obtenção de sincronismo
$\theta$	Ângulo de defasagem
$\theta_1$	Fase de sinal periódico
$\phi$	Função amostral
$\Phi[k]$	Fase (argumento) da TDF
$\omega$	Frequência Angular
$\omega_0$	Frequência Angular Fundamental

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1. Objetivo geral.....	21
1.2. Objetivos específicos .....	21
1.3. Organização do trabalho .....	21
<b>2. TEORIA DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA .....</b>	<b>23</b>
2.1. Normas para medição de indicadores de QEE.....	23
2.2. Sistemas para monitorar indicadores de QEE à sinais em domínio da frequência .....	28
2.3. Sistemas para monitorar indicadores de QEE à sinais em domínio do tempo.....	29
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>32</b>
3.1. Método de detecção de harmônicas no domínio da frequência .....	32
3.1.1. Transformada Discreta de Fourier (DFT) e Transformada Discreta de Fourier Recursiva (TDFR).....	32
3.1.2. Frequência de amostragem e Janelamento móvel.....	39
3.1.3. Sincronismo da Transformada Discreta de Fourier Recursiva (TDFR).....	40
3.2. Método de detecção de harmônicas no domínio do tempo .....	43
3.2.1. Referência Síncrona $dq$ .....	43
3.2.2. Controlador Proporcional Aplicado ao Filtro .....	48
3.3. Indicadores de distorção pelo conteúdo harmônico .....	48
3.4. Sistema proposto para a detecção das amplitudes harmônicas .....	49
3.4.1. Perfil das cargas utilizadas nas simulações.....	50
3.4.2. Parâmetros e Plataforma Experimental.....	51
3.4.3. Processador Digital de Sinais – DSP .....	55
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>57</b>
4.1. Resultados no domínio da frequência .....	57
4.2. Resultados das simulações no domínio do tempo.....	62
4.3. Comparação entre os métodos .....	66
<b>5. CONCLUSÃO GERAL .....</b>	<b>68</b>
5.1. Trabalhos futuros .....	69
5.2. Publicações oriundas da pesquisa .....	69
<b>Referências.....</b>	<b>70</b>



## 1. INTRODUÇÃO

A partir da segunda metade da década de 80, o tema Qualidade da Energia Elétrica vem se tornando objeto de estudos e de interesse das diversas classificações de consumidores de energia elétrica: consumidores industriais, residenciais e comerciais, bem como as concessionárias fornecedoras de energia elétrica (Fernandes, 2009).

A descrição dos conceitos de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) agrega vários fenômenos eletromagnéticos, bem como distúrbios existentes nos sistemas elétricos, que causam problemas aos consumidores de energia elétrica, o que deu notoriedade e interesse sobre esse tema, segundo (Deckmann et. al, 2005), se consolidou após o acréscimo e uso de equipamentos eletrônicos como: televisores, computadores, refrigeradores, condicionadores de ar, impressoras, motores de indução, bombas injetoras, ponte rolante, compressores, entre outros, que são cargas que apresentam características não lineares e sensíveis a distúrbios no sistema elétrico de potência –(SEP).

De acordo como visto no trabalho de (Semlyen e Shlash, 2000), a presença de cargas eletrônicas tem aumentado consideravelmente nos últimos anos, o que tem possibilitado o surgimento de uma nova área dentro de um contexto industrial brasileiro. Devido a este aumento de cargas, observa-se a elevação nos níveis de distorção harmônica, as quais podem degradar a QEE, visando tentar mitigar os efeitos causados nos sistemas elétricos, pesquisadores propõem métodos para analisar a presença de harmônicos, sendo possível realizar a localização e identificação de fontes harmônicas (Fernandes, 2009).

Em grande maioria, nas instalações elétricas à depender do tipo de equipamentos a ela conectados, ou de acordo com as características específicas das cargas elétricas bem como tipos de acionamentos e aplicações dos mesmos, se faz necessário efetuar a medição das grandezas elétricas do sistema como um todo, principalmente parâmetros que influenciam na diminuição da QEE, um deles vem a ser a existência nos sistemas de energia das harmônicas. Porém esse tema é muito amplo e aborda outros fenômenos também: transitórios, variações de curta e de longa duração, desequilíbrios de tensão, distorções na forma de onda, flutuações de tensão e variações na frequência proposto por (BIONDI et. al, 2007).

A existência das harmônicas de tensão e corrente em uma rede de distribuição pode provocar inúmeros efeitos nas instalações industriais, dentre eles pode-se citar: queima de células capacitivas em bancos de capacitores; aumento das perdas elétricas; crescimento de ocorrências de ressonâncias harmônicas; introdução de torque em oposição à rotação de

máquinas elétricas; surgimento de ruídos em transformadores; aquecimento em condutores elétricos, carbonização de cabos e nas conexões, aumento na incidência de queima das placas bem como nos circuitos eletrônicos (ESTEVEZ, E. A. C, 2012).

Com o intuito de garantir a manutenção da QEE, são estabelecidos parâmetros e níveis que mensuram o quantitativo dos mesmos, tempos mínimos de duração de um indicador abaixo ou acima da faixa assim determinada, período para coleta dos dados, índices máximo e mínimo, para que de posse dos mesmos definam-se padrões a serem seguidos, e as consequências que a não manutenção da qualidade de energia elétrica provocam nas redes de energia.

Diante dessa prerrogativa, segundo (Maia, R. M., 2011), compreende-se que o tema “Qualidade da Energia Elétrica”, passa a exigir uma ação integrada das partes envolvidas, ou seja, concessionárias, consumidores e fabricantes de equipamentos eletroeletrônicos, sendo os mesmos, na maioria das vezes, assessorados por instituições de ensino e pesquisa, nas quais são desenvolvidos estudos com o objetivo de conhecer os perfis operacionais dos equipamentos e conseqüentemente, maneiras para mitigar os efeitos de um fornecimento de energia elétrica inadequado.

No entanto, de forma que essas entidades possam seguir um certo padrão para estudos e possuir informações comparativas de qualidade, surge a necessidade de se formular normas e procedimentos aplicados em redes de energia elétrica e sistemas de energia.

Assim, as normas são formuladas por agências de regulamentação, padronização e controle, onde realizam a gestão dos indicadores, definindo procedimentos para medição das grandezas elétricas, os níveis, tempos de interrupção, etc. Dentre essas agências, as principais instituições relativas que definem indicadores de QEE, são:

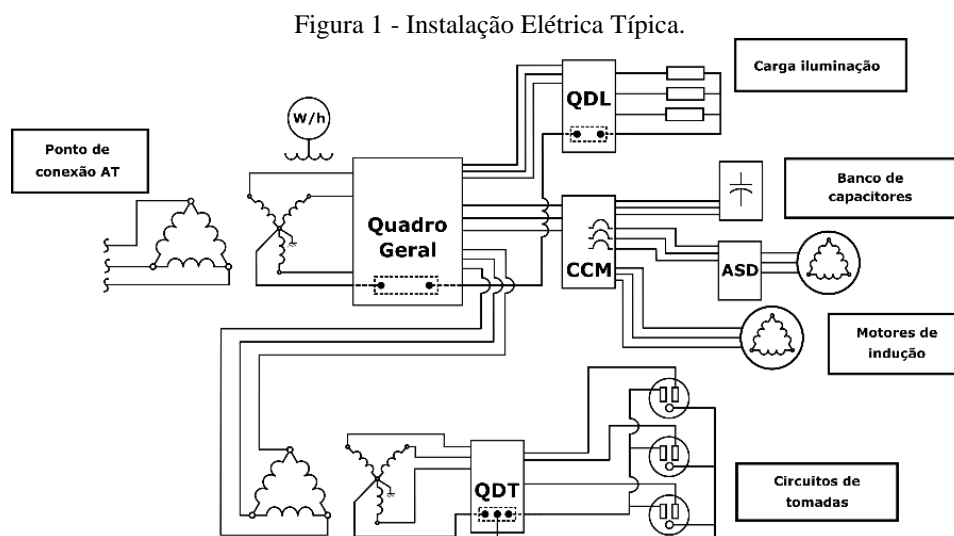
- Comitê Europeu de Normalização Eletrotécnica - CENELEC;
- *Internacional Electrotechnical Commission* – IEC;
- Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos – IEEE;
- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL;
- Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

Contudo, cada uma das normas tem seus direcionamentos e especificidades em relação aos sistemas de medição e monitoramento da QEE. Em tal caso, é de suma importância a existência de sistemas de medição e monitoramento do consumo de energia elétrica e distúrbios elétricos, para que, assim, possa-se evitar a redução da eficiência de equipamentos e sistemas de energia elétrica, além de sanções que oneram as faturas dos consumidores que atuam de forma preventiva, reduzindo quebras nos equipamentos (Dugan, R. C. et. al, 2003).

Portanto, para que se tenha um sistema de medição eficiente faz-se necessário embasado em parâmetros que estão contidos nas normas e padrões relacionados à qualidade de energia elétrica. O que leva a outro ponto importante, que é o de que um sistema de medição integrado, via rede de comunicação, com vários pontos de conexão, para que se possa efetuar as medições das grandezas e distúrbios da QEE nos dias atuais.

Todavia, estas variáveis, inseridas em um contexto de eletrificação, só poderão ser mensuradas, diagnosticadas, contabilizado seu consumo de energia, coletados pontualmente e comparados com os parâmetros estabelecidos dentre as normas, quando parâmetros como: tipos de cargas, características construtivas distintas, regimes operacionais intermitentes e dentre outras especificidades das cargas (lineares ou não-lineares), forem levados em consideração (Faria, 2009).

Contudo, é imprescindível ter uma visão mais ampla e específica acerca dos distúrbios gerados nas instalações elétricas, qual sua natureza, bem como onde há problemas ou estão sendo produzidos os danos e a dimensão dos mesmos. Daí, a enorme contribuição de um sistema de monitoramento da medição de indicadores da QEE aplicado em um ambiente industrial. Na Figura 1, é ilustrado a disposição de equipamentos e cargas típicas de um ambiente industrial.



Fonte: Edson, M [38].

De posse das análises e para as respectivas medições executadas nas instalações, são propostas soluções, tais como: o dimensionamento de filtros, bancos capacitivos, desmembramento de cargas específicas ou reconfiguração da instalação elétrica (Martinho, E 2009). Em alguns tipos de processos produtivos ou nas instalações elétricas, caso haja

necessidade de uma análise acerca dos transitórios harmônicos e suas respectivas magnitudes, faz-se crucial obter um gráfico de tendência com os espectros harmônicos do sinal de tensão ou corrente da rede. Tais figuras podem ser utilizadas como embasamento para a emissão de um parecer assertivo sobre as características dos dados, ora obtidos nas medições, podendo ser executadas através da decomposição dessas harmônicas existentes no sistema, através da série de Fourier como abordado no trabalho (SILVA, L. C. E, 2008).

Apesar disso, para que as análises das harmônicas tenham maior precisão, a coleta das medições são executadas com o uso de sistemas micro controlados, onde eventualmente devem ser decompostas, para que, assim, seja visualizado em níveis. Dentro desse contexto, pesquisas recentes apontam que, uma das técnicas mais utilizadas para análise em sinais no domínio da frequência é a Transformada Discreta de Fourier (TDF) (McGrath e Galloway, 2005). Transformada essa que consiste em uma representação no domínio da frequência de sequências com duração finita, ou seja, de sinais amostrados no tempo (OPPENHEIM e WILLSKY, 2010).

Embora haja alguns tipos de métodos para detecção das frequências harmônicas, técnicas no domínio da frequência e domínio do tempo são comumente utilizadas. Destacam-se entre esses métodos, a teoria da obtenção das componentes, a partir da tensão instantânea como em (Asiminoael, Blaabjerg e Hansen, 2007), (Akagi et. al, 1984), o método da referência síncrona  $dq$  (Asiminoael, Blaabjerg e Hansen, 2007), (Bhattacharya et. al, 1996), e o método  $dq$  harmônico (Bhattacharya et. al, 1998).

No método  $dq$ , a componente da frequência fundamental é convertida em um valor contínuo e as amplitudes harmônicas em um valor alternado. As componentes da frequência fundamental são inseridas em um filtro do tipo passa-baixa que detectará as frequências harmônicas no sinal de referência  $dq$ , sendo decompostas em coordenadas em corrente alternada e contínua ( $id^*$  e  $iq^*$ ). Sobretudo, para utilizar o método de detecção para sinais no domínio do tempo o método referência síncrona  $dq$  foi o adotado, obtendo com ele a velocidade angular da frequência da componente fundamental, com o auxílio de um PLL – *Phase Locked Loop*.

Há alguns pontos relevantes ao se desenvolver um sistema para detecção de harmônicas a serem observados: o grau de complexidade ao efetuar os cálculos matemáticos inseridos na lista de instruções contida no algoritmo de detecção, se há a capacidade, caso necessite de armazenamento das medições executadas, a alta velocidade de processamento e frequência de amostragem, bem como funções de tratamento digital do sinal implementadas no *Hardware* (D. Angyal et. al, 2018). Contudo, para se obter uma bom desempenho na análise, deve-se

utilizar alguns equipamentos específicos na detecção, bem como o microcontrolador e transdutores capazes de garantir confiabilidade nos resultados.

Diante do exposto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um dispositivo de medição inteligente das harmônicas aplicando as respectivas medições em dois cenários, sendo o primeiro para detecção no domínio do tempo, implementando o método *dq* síncrono. No segundo cenário, tem-se a detecção das harmônicas no domínio da frequência, no qual é empregado a TDFR.

No medidor é aplicado a comunicação via internet após a aquisição dos dados coletados, com o auxílio de *softwares*, sensores com precisão adequada, e um processador digital de sinais que, ao ser devidamente programado capaz de coletar, converter, processar e armazenar as informações de forma controlada e/ou autônoma.

## 1.1. OBJETIVO GERAL

Estudar e comparar métodos utilizados para a detecção de frequências harmônicas, e desenvolver um sistema de Detecção de harmônicas em redes industriais utilizando métodos no domínio da frequência e do tempo.

## 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Realizar estudos sobre tecnologias aplicadas ao monitoramento, classificação e processamento de sinais digitais, DFT e recursos matemáticos, método *dq*.
- b) Desenvolver protótipo para aquisição de sinais com o uso de sensores, auxílio de um *hardware* dedicado ou processador digital de sinais;
- c) Desenvolver plataforma capaz de efetuar a aquisição, e expressá-los graficamente, em uma IHM com auxílio da IOT *on-line*.
- d) Comparar as metodologias desenvolvidas na detecção de harmônicas.

## 1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em capítulos e sessões no qual o capítulo 1 é realizado uma abordagem geral sobre o trabalho, objetivo geral e específicos.

O capítulo 2 é realizado uma abordagem sobre a Teoria da Qualidade de energia e sistemas desenvolvidos para monitoramento, abordando alguns trabalhos recentes e relevantes relacionados com as vertentes dos objetivos do trabalho, envolvendo a qualidade de energia e técnicas aplicadas.

No capítulo 3 são abordados algumas características e parâmetros utilizados nas simulações, são detalhados os dois métodos utilizados, seus principais fundamentos matemáticos para o desenvolvimento do sistema de detecção das frequências harmônicas, aplicando no domínio da frequência e no domínio do tempo, sendo utilizados respectivamente a Transformada discreta recursiva de Fourier – TDFR e a Transformada de Park, em ambos o algoritmo PLL.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com a aplicação dos métodos para o domínio da frequência, domínio do tempo e o Total de Distorção Harmônicas e a Interface do *app* desenvolvido.

Por fim o capítulo 5 apresenta a conclusão geral bem como sugestão para trabalhos futuros e as produções oriundas deste trabalho.

## 2. TEORIA DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Este capítulo apresenta uma revisão de trabalhos desenvolvidos e publicados em periódicos e congressos relacionados ao tema QEE, em particular na detecção de harmônicas. Também apresentou-se a aplicabilidade de um sistema utilizando a Transformada Discreta de Fourier – DFT, bem como seus recursos matemáticos.

### 2.1. NORMAS PARA MEDIÇÃO DE INDICADORES DE QEE

No que tange ao monitoramento, medição, detecção de redes de energia elétrica, é necessário definir qual grandeza do sistema vai ser monitorada e mensurada. Essa diretriz é quem irá definir, a arquitetura e característica construtiva do equipamento e a metodologia aplicada na aquisição dos dados durante à medição.

Com os objetivos de padronizar e normatizar as diretrizes técnicas relacionadas ao bom desempenho e funcionamento dos sistemas de distribuição de energia, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), elaborou Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (ANEEL, 2015).

Visando garantir o cumprimento dessa padronização, no Brasil, por exemplo, tem-se o conjunto de procedimentos de distribuição – PRODIST no sub-módulo 8.1, que ao ser levado em conta como premissa para o desenvolvimento de um sistema de medição de energia, traz consigo limitações, ao ser relacionado à medição e duração da medição, pois não define ao certo o intervalo de coleta dos dados, a não ser que não haja interrupções expressivas, preconizando que os instrumentos utilizados no ato das medições atendam as normas vigentes, relacionadas para técnicas de medição, bem como devem observar o cumprimento dos protocolos de medição.

No conjunto de Procedimentos de Rede do PRODIST, em seu sub-módulo 2.2, está definido que o tempo de aquisição do valor eficaz de tensão do medidor seja igual há 10 minutos contendo 1008 intervalos consecutivos durante esse tempo. Determina-se o valor que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período equivalente a um dia (24 horas), ao longo de 7 (sete) dias, sem interrupções. O valor adotado como base na medição, para ser comparado, será o maior entre os sete valores obtidos anteriormente. Isso em uma amostragem diária (ANEEL, 2015). No módulo-8 do PRODIST é estabelecido os seguintes termos, voltados tão somente a manutenção de qualidade da energia elétrica - QEE:

- Tensão em regime permanente: valor RMS da tensão definida no intervalo de tempo onde não ocorreram distúrbios elétricos capazes de invalidar a leitura, definido como sendo de 10 (dez) minutos.
- Fator de potência: razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétricas ativa e reativa, consumidas em um mesmo período especificado, sendo definido pela seguinte equação:  $FP = \frac{kWh}{kVAh}$ , em que a potência ativa é dada em  $kW$  e a potência reativa definida por  $kVAR$ , no Brasil, de acordo com o Prodist módulo - 08 o valor de FP não pode adotar valores superiores à 0,92.
- Harmônicos: fenômenos associados à deformações na forma de onda da tensão e da corrente, em relação à senoide de frequência fundamental. Basicamente é uma forma de onda com frequências múltiplas à frequência fundamental, tendo como base as cargas não-lineares.
- Desequilíbrio de tensão: desvio máximo da média das correntes ou tensões trifásicas, dividido pela média das correntes ou tensões trifásicas, expresso em percentual.
- Variação de frequência: fenômeno associado a desvios no valor da frequência fundamental.
- Flutuação de tensão: variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor RMS da tensão.
- Variação de tensão de curta duração (VTCD): desvio significativo da amplitude do valor eficaz da tensão em intervalo de tempo compreendido entre 16,67ms (um ciclo) e 3 (três) minutos.

Dentre os distúrbios que afetam a qualidade da energia, acima supracitados, tem-se especificações que devem ser observadas para o melhor entendimento acerca dos indicadores. Abaixo, A Tabela 1, apresenta com os indicadores e especificações de distúrbios relacionados à QEE.



Tabela 1 - Categorias e características dos problemas relacionados à QEE

CATEGORIA	CONTEÚDO ESPECTRAL TÍPICO	DURAÇÃO TÍPICA	MAGNITUDE DE TENSÃO TÍPICA
<b>Transitório</b>			
<b>Impulsivo</b>			
Nanosegundo	5 ns subida	< 50 ns	
Microsssegundo	1 µs subida	50 ns – 1 ms	
Milissegundo	0,1 ms subida	> 1 ms	
<b>Oscilatório</b>			
Baixa frequência	< 5 kHz	0,3-50 ms	0-4 p.u.
Média frequência	5-500 kHz	20 µs	0-8 p.u.
Alta frequência	0,5-5 MHz	5 µs	0-4 p.u.
<b>Variação de tensão de curta-duração</b>			
<b>Instantâneo</b>			
Afundamento		0,5-30 ciclos	0,1-0,9 p.u.
Elevação		0,5-30 ciclos	1,1-1,8 p.u.
<b>Momentâneo</b>			
Interrupção		0,5 ciclos – 3 s	< 0,1 p.u.
Afundamento		30 ciclos – 3 s	0,1-0,9 p.u.
Elevação		30 ciclos – 3 s	1,1-1,4 p.u.
<b>Temporário</b>			
Interrupção		>3 s – 1 min	< 0,1 p.u.
Afundamento		>3 s – 1 min	0,1-0,9 p.u.
Elevação		>3 s – 1 min	1,1-1,2 p.u.
<b>Variação de tensão de longa-duração</b>			
Interrupção sustentada		> 1 min	0,0 p.u.
Subtensão		> 1 min	0,8-0,9 p.u.
Sobretensão		> 1 min	1,1-1,2 p.u.
Sobrecarga de corrente		> 1 min	
<b>Desequilíbrio</b>			
Tensão		Regime permanente	0,5-2%
Corrente		Regime permanente	1,0-30%
<b>Distorção da forma de onda</b>			
Nível CC		Regime permanente	0-0,1%
Harmônicas	0-9 kHz	Regime permanente	0-20%
Inter-harmônicas	0-9 kHz	Regime permanente	0-2%
Notching		Regime permanente	
Ruído	Banda larga	Regime permanente	0-1%
Flutuação de tensão	< 25 Hz	Intermitente	0,1-7%
Variações de frequência		< 10 s	± 0,10 Hz

Fonte: Dugan et. al, 2004.

Outro norma dentre os anteriormente supracitados, comumente utilizado em sistemas de medição é o da norma International Electro Technical Commission - IEC 555-2(IEE, vol. 29, 1993), onde está definido que o tempo total de observação seja equivalente a uma semana, realizada por meio do valor médio da tensão eficaz medida durante um intervalo de dez minutos. Neste sistema, tem-se como referência o maior valor, dentre 1008 valores medidos e armazenados, durante o intervalo semanal comparado com os valores limites.

A norma IEEE Std. 519 pode ser vista trabalho de Morais (2016), não traz, em seu conteúdo, qualquer abordagem quanto metodológica acerca da obtenção de um valor limite coletado de referência e sim enfatiza o número de ciclos durante a medição para validar os valores coletados.

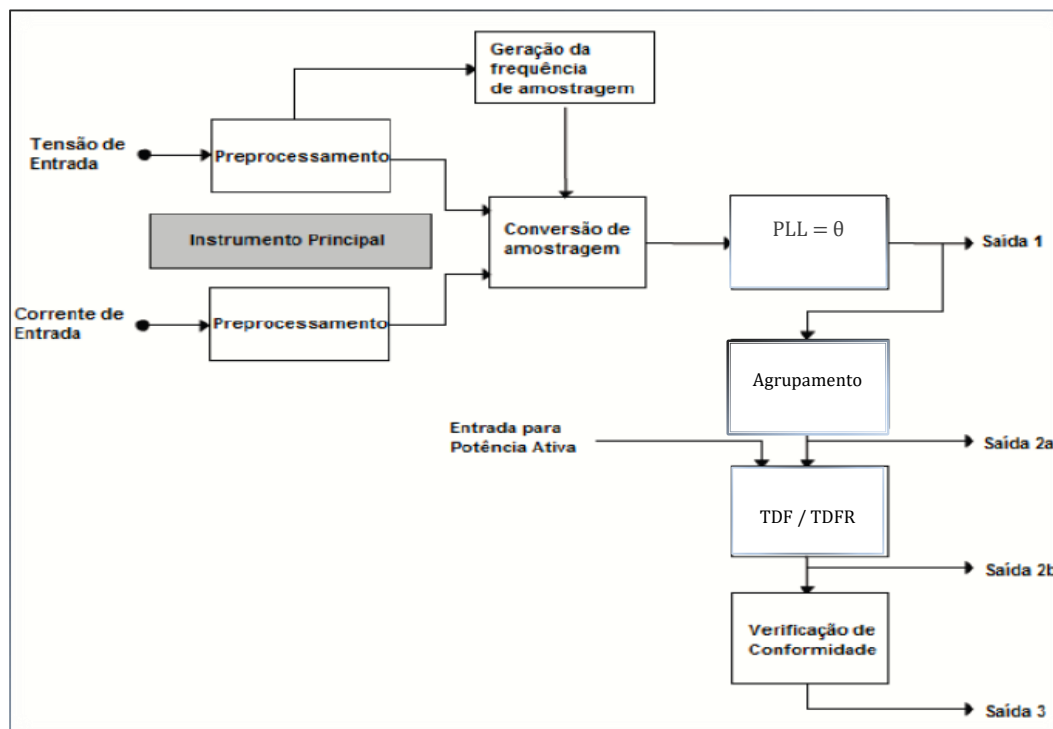
A Norma Europeia EN 50160 estabelece que, o tempo total para se obter uma medição é total de uma semana. Bem como, durante esse período de registro tem-se que observar os tratamentos estatísticos e as taxas de amostragem nos intervalos de 10 minutos. Diante do que preconiza as diretrizes determinadas pela norma IEC, diferente das demais, os níveis são considerados aceitáveis, contanto que, não ultrapassem os limites superiores por um tempo maior que 5% do tempo total da medição.

Para medições de transientes de tensão, faz-se necessário, segundo a IEC 61000-4-30 descrito por (Kaura e Blasko, 1997) e IEEE 519 (Caetano et al, 2016), a obtenção do valor RMS a cada meio ciclo de amostragem. Para esses casos específicos, o transdutor de medição efetuará a captação do sinal, para que o sistema de medição possa mensurar os seguintes parâmetros: elevações de curta e longa duração, afundamentos, ruídos elétricos, transientes com taxa elevada, harmônicas e distorções da forma de onda.

De acordo com a IEC 61000-4-7 abordada no trabalho de (Zodape e Kamat, 2016) a mesma é um guia geral de medições e instrumentação de harmônicas e inter-harmônicas, um instrumento de medição da harmônicas genericamente apresenta a seguinte estrutura como disposta na Figura 2, compreendendo dos seguintes itens à seguir relacionados: conversores analógicos digitais, unidade de amostragem e quantização, circuitos de entrada com filtros *antialiasing*, sincronização e unidade de janelamento caso necessite e um processador para o cálculo da FFT que irá fornecer os coeficientes obtidos de Fourier  $x_a$  e  $x_b$ .

Para que ocorra o sincronismo da janela de tempo durante a medição é necessário que transcorra entre dez e doze ciclos, determinados pela frequência do sistema analisado sendo de 50 Hz ou 60 Hz. A Transformada Discreta de Fourier é a técnica segundo a norma que realiza o processamento do sinal de tensão ou de corrente, oriundos do bloco conversão de amostragem independentemente do tipo de método utilizado para tal fim.

Figura 2 - Estrutura genérica de um medidor de harmônicos



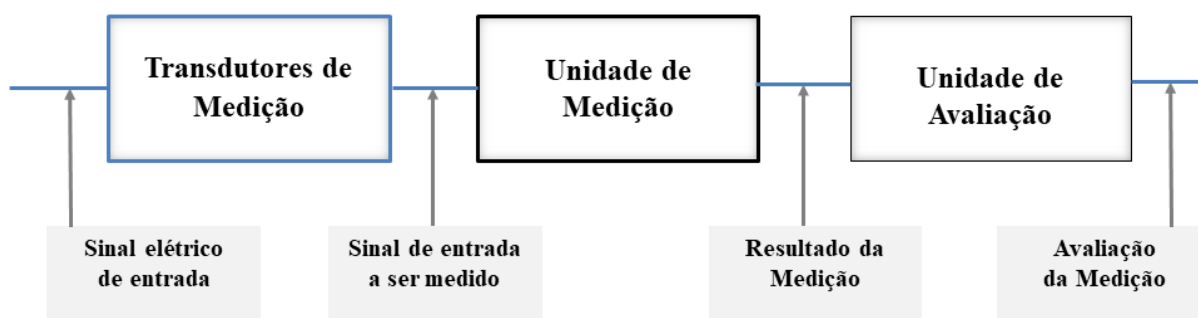
Fonte: Zodape e Kamat, 2016.

Além disso, a norma estabelece as classes dos tipos de fenômenos existentes nos sistemas de energia elétrica e seus respectivos percentuais de erros obtidos durante as medições das grandezas elétricas do sistema (Zodape e Kamat, 2016).

Ao que se refere a Norma IEC 61000-4-30, a medição de distúrbios presentes em um sistema elétrico a ser medido e seus respectivos índices, leva-se em consideração indicadores como magnitude da tensão de alimentação, afundamentos rápidos de tensão, cintilação (*Flicker*), elevações e interrupções momentâneas de tensão – VTCD, desequilíbrio de tensão, harmônicas e tensões inter-harmônicas recomendadas por IEC 61000-4-30(2003).

Com isso, sistemas de medição que adotam a norma IEC 61000-4-30 tornam-se de fácil conexão em baixa tensão. A Figura 3 traz o diagrama de blocos de um sistema de medição de harmônicas, tendo a obtenção da frequência fundamental com o uso de transdutores.

Figura 3 - Estrutura de um medidor de harmônicos em blocos.



Fonte: IEC 61000-4-30, (2003).

No desenvolvimento dos sistemas de medição, leva-se em conta, fundamentalmente, o tipo de aplicação a ser desenvolvida, a técnica a ser empregada e qual pós-medição será embarcada no medidor. Pois em cada um deles existem as classes e categorias, quantitativo de erros admissíveis, segundo as normas e padrões que estabelecem os princípios e técnicas de medição. Em um âmbito geral, à aquisição dos dados é feita por transdutores, que devem ser devidamente dimensionados para tal.

## 2.2. SISTEMAS PARA MONITORAR INDICADORES DE QEE À SINAIS EM DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Tendo como princípio o monitoramento com auxílio de ferramentas da *WEB*, voltadas a qualidade de energia elétrica bem como as anomalias das redes elétricas, até hoje foram desenvolvidas várias técnicas para detectar, compilar e monitorar tais grandezas elétricas em sistemas de energia.

Com o grande crescimento de indústrias de manufatura, bem como da transformação e as grandezas elétricas, distúrbios ou fenômenos existentes nos mais diversos sistemas de energia, levanta a necessidade de supervisão e monitoramento das grandezas e suas respectivas características. O desenvolvimento dos medidores e qualímetros, gerados a partir dessas necessidades, acabam possuindo as mais diversas especificações técnicas e aplicações distintas.

Os autores Souza, A. W. et al, (2015) e Sousa, R. P., (2017) afirmam que alguns trabalhos, que desenvolveram sistemas de medição e monitoramento de grandezas elétricas existentes em sistemas de energia elétrica, dentre elas as harmônicas, aplicando a Transformada Rápida de Fourier – FFT em sistemas conectados à rede, onde gera acesso aos dados de modo *online*, remoto e com bons quantitativos, auxiliam no gerenciamento dos sistemas de energia.

Fundamentado nesse contexto, os medidores existentes no mercado, para extrair as informações das componentes harmônicas, são desenvolvidos de modo a captar os sinais elétricos de tensão ou corrente elétrica em um sistema, sendo que a captura das mesmas vem a ser no domínio da frequência bem como no domínio do tempo, para que seja dada ênfase à eficiência energética e a manutenção da mesma.

Esses sistemas, utilizando a transformada de Fourier em sinais no domínio da frequência e aplicando uma tecnologia Mobile, avaliaram a existência de harmônicas em cargas lineares e não-lineares. Para as não-lineares predominaram as harmônicas de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> ordem, e para as cargas lineares, as harmônicas não tiveram valores relevantes em (Bhattacharya, et. al, 1998) e (Sousa, 2017).

Apesar disso, a ordem máxima a ser alcançada, utilizando a transformada de Fourier, foi a de 13<sup>a</sup> ordem (Bhattacharya, et. al, 1998) e (Sousa, 2017).

Ao comparar os sistemas desenvolvidos por (Bhattacharya, et. al, 1998) com o (Akagi, H. et. al, 1984) encontrou-se um erro padrão de, aproximadamente, 8% ao comparar os dados coletados com os de instrumentos comercializados no mercado. Nesses instrumentos, o THD assumiu valores excedentes aos valores toleráveis em norma, mais precisamente na IEEE 519-1992, gerando, assim, oportunidades de melhoria nos sistemas com as necessidades de utilização de técnicas de filtragem e ajustes.

### 2.3. SISTEMAS PARA MONITORAR INDICADORES DE QEE À SINAIS EM DOMÍNIO DO TEMPO

Em uma prospecção voltada à qualidade de energia elétrica nos sistemas de energia, encontra-se a necessidade do monitoramento e manutenção dos índices relacionados aos indicadores da qualidade de energia. Tanto sendo a mesma executada pelos consumidores, de maneira geral, quanto para as concessionárias de distribuição de energia elétrica, tomando como posse as respectivas normas que definem os índices, níveis, ou até mesmo os tipos de técnicas de medição aplicadas bem como o tempo necessário para se obter um valor coerente com o cenário medido e analisado.

Para se prover de um diagnóstico preciso e confiável das medições de energia elétrica, com uma boa velocidade de processamento do algoritmo e do método implementado, deve-se observar alguns aspectos fundamentais ao desenvolver um sistema de medição eficiente, inclusive, considerando o tipo de método aplicado ao fator a se observar para projetar o sistema.

As especificações técnicas do sistema, como por exemplo: frequência de amostragem, capacidade de processamento, números de conversores A/D, dentre outros inúmeros dados técnicos, podem ser preponderantes no tocante tempo de resposta, precisão, confiabilidade dentre outros aspectos que definem a eficiência e eficácia do sistema de detecção. Assim, tais informações dão sustentabilidade para novos estudos, relacionados ao desempenho dos sistemas e detecção dos indicadores de qualidade aplicados em sistemas no domínio do tempo ambos desenvolvidos por (Akagi, H. et. al, 1984), (Diniz e Evangelista, 2017), (Rocha, 2016) e (Xavier, 2011).

Os primeiros sistemas ou equipamentos desenvolvidos, para efetuar medições de sinais no domínio do tempo, foram modelos da marca FLUKE, Minipa, Instrutherm, criados para comparar a dinâmica de oscilações durante a medição e os valores obtidos respectivamente pelos *softwares* e supervisórios instalados em redes industriais, com valores obtidos por meio dos analisadores de qualidade de energia elétrica pertencentes as marcas acima supracitados.

Mesmo que o desenvolvimento dos sistemas de detecção de indicadores tenham a mesma finalidade, utilizando de microprocessadores diferentes sendo eles, PIC 16F786 por (Akagi, H. et. al, 1984), o microprocessador Esp8266 por (Diniz e Evangelista, 2017), Arduino Mega por (Rocha, 2016) e DSP - TEXAS (Xavier, 2011), os mesmos apresentam distintas taxas de amostragem, bem como a capacidade de processamento digital dos sinais, Porém, possuem grande similaridade acerca dos valores medidos experimentalmente com os protótipos, ao comparar com os valores obtidos em leituras utilizando instrumentos comercializados para tal fim.

Dentro dos estudos abordados, (Akagi, H. et. al, 1984), (Diniz e Evangelista, 2017), (Rocha, 2016) e (Xavier, 2011) a uma certa divergência nos valores medidos, chega-se, em média a uma divergência entre os trabalhos observados em torno de aproximadamente de 3,8%, 0,9%, 1,7% e 1,59% para leituras de mais de dois indicadores da qualidade de energia elétrica potência ativa, potência reativa, fator de potência, harmônicas e potência aparente, respectivamente. E em nenhum dos trabalhos foi enfatizado uma baixa performance, relevante, no processamento dos sinais de energia.

As medições, exclusivamente, para harmônicas de corrente nos sistemas experimentais apresentam valores divergentes aos valores obtidos com medidores comercializados, em média 2%. Para as medições de harmônicas de tensão, a discrepância ficou em torno de 5%, sendo as divergências relativamente consideradas dentro do padrão normativo. Estes valores ainda são baixos se comparadas com os valores medidos com o uso dos medidores industrializados.

Os autores (Akagi, H. et. al, 1984), (Diniz e Evangelista, 2017), (Rocha, 2016) e (Xavier, 2011) pontuaram, concomitantemente, informações semelhantes e relevantes da necessidade de otimização nas técnicas de filtragem, haja vista que ajustes precisaram ser executados. Para uma maior proximidade dos valores e precisão, eles observaram que ao efetuar somente medições de harmônicas a dinâmica operacional dos sistemas experimentais obtém-se melhores resultados, haja vista que, ao executar medições de três ou mais indicadores de QEE o tempo de resposta aumenta, apontado, assim, uma limitação dos sistemas, fazendo-se necessário uma adequação na velocidade do processamento ou substituição de componentes.

Diante dessa diversidade de tecnologias e métodos para se detectar ou medir indicadores de QEE, o trabalho apresenta a aplicação de dois métodos distintos para a detecção de harmônicas existentes em sistemas de energia, aplicando as técnicas no domínio da frequência e no domínio do tempo, onde verificou alguns aspectos que determinam a aplicabilidade de qual métodos e similaridades entre os mesmos caso seja observado.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Tipos de métodos de detecção de harmônicas, existentes em sistemas de energia, podem ser definidos à depender do tipo de algoritmo aplicado (Asiminoael, et. al, 2007). Os métodos mais utilizados são classificados em dois grupos: os métodos de detecção de harmônicos no domínio do tempo, bem como no domínio da frequência.

Neste capítulo desenvolveram-se duas técnicas para a construção de um medidor de harmônicas, a primeira discorre consiste na aplicação do método para o domínio da frequência e a outra para o domínio do tempo, o desenvolvimento de tais técnicas foi no Laboratório de Acionamentos, Controle e Automação (LACA), situado no Instituto Federal da Paraíba – IFPB, *campus* João Pessoa. As seções 3.1 e 3.2 apresentam os métodos de detecção de harmônicas no domínio da frequência e tempo, respectivamente; a seção 3.3 define a taxa de distorção provocada pelas harmônicas e; a seção 3.4 mostra o sistema proposto para detecção das amplitudes harmônicas nos dois domínios.

#### 3.1. MÉTODO DE DETECÇÃO DE HARMÔNICAS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Os métodos de detecção de harmônicas no domínio da frequência são destacados principalmente pela análise de Fourier. Para este trabalho, deu-se ênfase, principalmente, aos métodos de Transformada de Fourier Discreta – DFT e Transformada de Fourier Discreta Recursiva – TDFR.

##### 3.1.1. Transformada Discreta de Fourier (DFT) e Transformada Discreta de Fourier Recursiva (TDFR)

A Transformada Discreta de Fourier (DFT) vem sendo amplamente utilizada como ferramenta para detecção de componentes harmônicas da rede elétrica. Sua função é a de obter a representação discreta no domínio da frequência a partir de sinais periódicos temporais amostrados (OPPENHEIM e SCHAFER, 1998).



Tomando-se por definição da Transformada Discreta de Fourier (OPPENHEIM e SCHAFER, 1998), uma sequência periódica discreta  $v[n]$  com  $N$  amostras por período é dada como:

$$V_m = \sum_{n=0}^{N-1} v[n]. \exp^{-j\frac{(2\pi m)n}{N}} \quad (1)$$

em que:

$V_m$  é o número complexo que representa o valor de cada componente harmônica de ordem  $m$  e  $n$  é o contador de amostras.

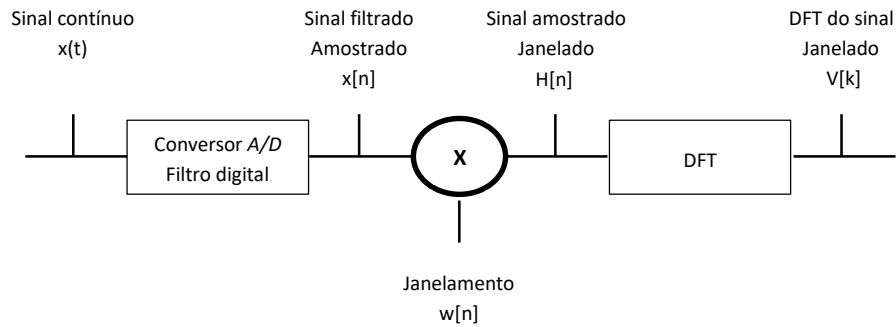
No entanto, uma das dificuldades em empregar as ferramentas de controle digital está em manter o sincronismo entre o sinal de saída e o sinal de entrada do sistema, pois perde-se informações de frequência e fase do sinal original, uma vez que a TDF trabalha apenas com amostras (PÁDUA et. al, 2007).

O método da Transformada Rápida de Fourier – FFT tem sua representação conforme a da DFT, porém apresenta um número menor de operações realizadas. Em contraste, a TDFR ganha espaço, mesmo baseada na metodologia da DFT, pois se diferencia ao ser calculada por meio de janela retangular móvel, possui capacidade de captar as pequenas variações das frequências coletadas, além de que, independente de qual seja o tipo ou conteúdo analisado, consegue se estabilizar no tempo fixo de dois ciclos, pois trabalha com o cálculo da Transformada Discreta de Fourier apenas para a componente da fundamental do espectro harmônico (PÁDUA et. al, 2007). Facilitando, assim, a dinâmica computacional e sendo mais ágil do que a dinâmica da FFT.

Bem como os outros métodos de detecção e controle, a TDFR tem sua limitação, já que há necessidade de um sincronismo com a rede para uma melhor leitura da frequência fundamental (Deckmann, 2016). Logo, para que o sistema seja considerado eficiente e mais dinâmico, alguns recursos devem ser implementados concomitantemente às etapas de sincronização.

A DFT pode ser derivada a partir da FFT no domínio da frequência, através da amostragem e janelamento do tempo, técnicas de filtragem, seguido de amostragem no modo da frequência (SILVA, 2013); (GIRGIS, 1991). A Figura 4 demonstra as etapas básicas executadas pela Transformada Discreta de Fourier:

Figura 4 - Etapas básicas executadas pela Transformada Discreta de Fourier.



Fonte: OPPENHEIM, 1998.

O filtro Anti-aliasing foi utilizado para garantir que, antes do sinal ser amostrado seja restringido, a largura da banda do sinal, satisfazendo o teorema da amostragem. Através da aplicabilidade do filtro, pode-se eliminar todo o espectro indesejado de frequências no sinal à ser observado e toda frequência que esteja fora da faixa a ser objeto de análise (OPPENHEIM e SCHAFER, 1998), bem como extrair as frequências amostradas da frequência fundamental.

Após o sinal ser filtrado  $x(t)$ , o mesmo é enviado para o conversor A/D, onde o sinal contínuo é transformado em uma sequência numérica.

Sendo a Transformada Discreta de Fourier uma sequência finita de amostras, igualmente espaçadas na frequência da Transformada de Fourier de um sinal contínuo. Em adição a sua importância como uma representação de Fourier para sequências, a Transformada Discreta de Fourier tem papel importante na implementação de diversos algoritmos para processamento de sinais digitais (OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, 2010). Sabendo que há diversos tipos de algoritmos computacionalmente eficientes da Transformada Discreta de Fourier.

Ao se passar os anos juntamente com o avanço da tecnologia digital aplicado nos sinais e sistemas de tempo discreto de baixo custo, portáteis, programáveis e de fácil reprodução. Se faz importante e crucial para as análises de sinais e sistemas reproduzir um sinal de tempo contínuo em um sistema de tempo discreto (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010), (Silva, 2013).

Tal amostragem do sinal é efetuada multiplicando um sinal de tempo contínuo por um trem de impulsos periódico. O trem de impulsos periódico  $p(t)$  é conhecido como uma função de amostragem, o período  $T$ , como período de amostragem e a frequência fundamental  $\omega_s = \frac{2\pi}{T}$  sendo a frequência de amostragem. Portanto, um sinal de tempo contínuo  $x(t)$  se torna um sinal

amostrado  $x_p(t)$  conforme mostrado nas equações definidas por (OPPENHEIM; WILLISKY, 2010):

$$x_p(t) = x(t) p(t) \quad (2)$$

em que:

$$p(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} x(nT) \delta(t - nT) \quad (3)$$

No domínio da frequência temos a seguinte expressão:

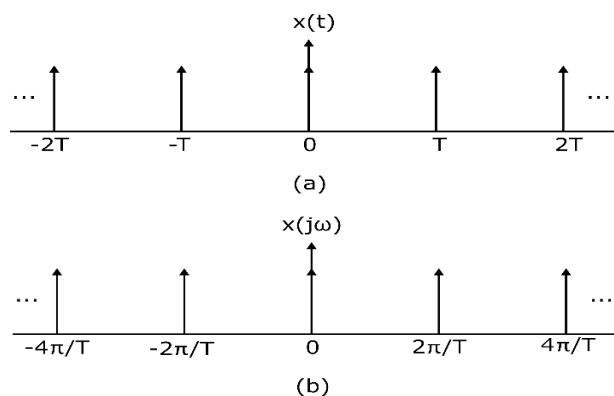
$$Xp(j\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\theta) Pj(\omega - \theta) d\theta \quad (4)$$

representando o trem de impulsos no domínio da frequência:

$$p(j\omega) = \frac{2\pi}{T} \sum_{-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2k\pi}{T}\right) \quad (5)$$

Assim, a Transformada de Fourier de um trem de impulsos periódicos com período igual a  $T$  no domínio do tempo é um trem de impulsos no domínio da frequência deslocados no período de  $\frac{2\pi}{T}$ , como demonstrado pela Figura 5.

Figura 5 - Trem de impulsos: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência.



Fonte: Própria

Dentro do contexto do trem de impulso no domínio frequência pela DFT, pode-se observar que a transformação matemática de um sinal em sua respectiva discretização pode

definir a Transformada Discreta de Fourier Recursiva (TDFR), a qual foca, principalmente, na informação de fase de um harmônico do sinal, bem como da amplitude do harmônico especificado, conforme demonstrado pela Equação 6:

$$X(h) = \sum_{N=0}^{N-1} x(n) \cos\left(\frac{2\pi \cdot h \cdot n}{N}\right) - j \sum_{N=0}^{N-1} x(n) \sin\left(\frac{2\pi \cdot h \cdot n}{N}\right) \quad (6)$$

em que:

$x(n)$ : sinal de entrada (corrente ou tensão) em função da amostra  $n$ ;

$N$ : é o número de amostras por período da frequência fundamental;

$X(h)$ : O vetor complexo de Fourier do harmônico  $h$ .

Como os cálculos da TDFR ocorrem em uma janela móvel, quando ela é deslocada durante todo tempo de amostragem com um número fixo de amostras, usualmente uma amostra por simplicidade, pode-se aplicar a DFT nos novos pontos.

A fim de garantir informação necessária para o cálculo da transformada, um sinal de tensão  $v(t)$  é amostrado com uma frequência  $f_s = \frac{N}{T_w}$  onde  $T_w$  é o tamanho da largura da janela de amostragem retangular móvel e  $N$  é o número de amostras a cada intervalo  $T_w$ . Considere agora uma sequência de amostra  $v[n]$ , no intervalo  $k - N \leq n \leq k - 1$ ,  $k \geq 1$ . A transformada discreta deste conjunto de amostras, onde  $v[n] = 0$  se  $n \leq 0$  é dada por (Oppenheim,1998):

$$V_m(K - 1) = \sum_{n=k-N}^k v[n] \cdot \exp^{-j \frac{(2\pi \cdot (n-1) \cdot m)}{N}} \quad (7)$$

Os componentes em frequência são identificados a cada conjunto de  $N$  amostras de  $v(t)$ , isto é, a cada passo de amostragem, expresso, neste caso, pelo argumento  $(k-1)$ . A amostra seguinte é inserida no instante  $k$ , formando um novo conjunto de amostras no intervalo  $k - N + 1 \leq n \leq k$  e uma nova transformada é calculada (Oppenheim,1998):

$$V_m(k) = \sum_{n=k-N+1}^k v[n] \cdot \exp^{-j \frac{(2\pi \cdot (n-1) \cdot m)}{N}} \quad (8)$$

Subtraindo a Equação 7 da Equação 8, obtém-se:

$$\begin{aligned}
 V_m(k) &= V_m[k-1] + (v[k] - v[k-N]) \cdot \exp\left(\frac{j(2\pi \cdot (k-1) \cdot m)}{N}\right) = \\
 &= \left\{ \operatorname{Re}\{V_m(k-1)\} + (v[k] - v[k-N]) \cos\left(\frac{2\pi \cdot (k-1) \cdot m}{N}\right) \right\} + \\
 &+ j \left\{ \operatorname{Im}\{V_m(k-1)\} - (v[k] - v[k-N]) \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi \cdot (k-1) \cdot m}{N}\right) \right\}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Portanto, a equação (9) é a expressão para o cálculo recursivo da TDF, com  $V_m(0) = 0$ . Ou seja, seu cálculo no instante  $k$  é baseado apenas no histórico da TDF e na diferença entre a  $k$ -ésima e a  $(k-N)$ -ésima amostras da sequência. Desta forma, pode-se concluir que com um intervalo de  $N$  amostras (1 ciclo) é possível obter a transformada de um sinal (Oppenheim, 1998).

Para fins de demonstração segue na Figura 6 o diagrama de obtenção da Transformada Discreta de Fourier Recursiva.

Figura 6 - Diagrama da obtenção da Transformada Discreta de Fourier Recursiva.

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{v}[\mathbf{n}] \cdot e^{\frac{j(2\pi \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{m})}{N}} \quad \Rightarrow \quad V_n \\
 \\
 V_m[k] &= \cancel{V_{k-N+1}} + \cancel{V_{k-N+2}} + \dots + \cancel{V_{k-2}} + \cancel{V_{k-1}} + V_k \\
 -V_m[k-1] &= -V_{k-N} - \cancel{V_{k-N+1}} - \cancel{V_{k-N+2}} - \dots - \cancel{V_{k-2}} - \cancel{V_{k-1}} \\
 \\
 V_m[k] - V_m[k-1] &= V_k - V_{k-N}
 \end{aligned}$$

**Fonte: Mcgrath et. al, (2005).**

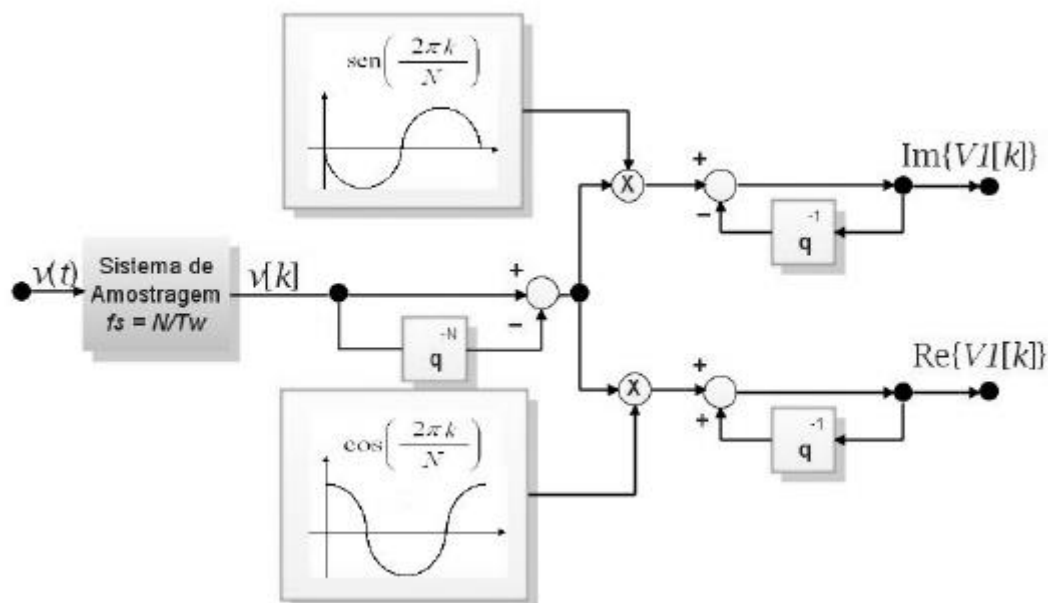
Separando a parte real da imaginária e empregando o operador de atraso  $q^{-1}$ , conforme (Goodwin et. al, 1984) (Feuer e Goodwin, 2007), tem-se:

$$\begin{aligned}
 \operatorname{Re}\{V_1[k]\} &= q^{-1} \operatorname{Re}\{V_1[k]\} + (v[k] - q^{-N} v[k]) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot K}{N}\right) \\
 \operatorname{Im}\{V_1[k]\} &= q^{-1} \operatorname{Im}\{V_1[k]\} - (v[k] - q^{-N} v[k]) \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi \cdot K}{N}\right)
 \end{aligned} \tag{10}$$

$, K = 0, 1, \dots, N-1$

A modelagem matemática aplicada no algoritmo de detecção é observada na Figura 7.

Figura 7 - Algoritmo da Transformada de Fourier Recursiva.



Fonte: Própria.

Na aplicação computacional do algoritmo é imprescindível que o mesmo armazene sempre os últimos valores das  $N$  posições, oriundo do sinal no domínio do tempo. A partir disso, quem assumirá os valores a cada conjunto com  $N$  passos de cálculo serão as funções seno e cosseno, tornando mais dinâmica a execução da lista de instruções do algoritmo.

Para que haja a obtenção em particular da frequência fundamental do sinal de entrada e este seja demonstrado na Figura 7, o mesmo sistema de aquisição no algoritmo pode ser implementado para o cálculo de qualquer componente harmônico, sendo necessário apenas modificar os conteúdos das tabelas de seno e cosseno.

Tendo como base essa premissa, para se obter a terceira ordem no espectro do sinal lido é necessário obter as tabelas à partir das funções  $\cos\left(\frac{2\pi \cdot K \cdot 3}{N}\right)$  e  $\sin\left(\frac{2\pi \cdot K \cdot 3}{N}\right)$ , que correspondem as partes imaginária e real, respectivamente.

No algoritmo de programação, desenvolvido em C++ a seguinte expressão para obtenção da frequência fundamental e as respectivas amplitudes harmônicas, são:

$$X_{re}[n] += v_a \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot k \cdot n / ((\text{double})N))$$

$$X_{im}[n] += v_a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot k \cdot n / ((\text{double})N))$$

$$X_{re}[k] -= V_a[n] \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot k \cdot n / ((\text{double})N))$$

$$X_{im}[k] = Va[n].\sin(2.\pi.k.n/((double)N))$$

sendo ambas detentoras de expressões computacionais aplicadas no algoritmo, no qual  $Va$  e  $va$  são os sinais de entrada do sistema lidos.

### 3.1.2. Frequência de Amostragem e Janelamento Móvel

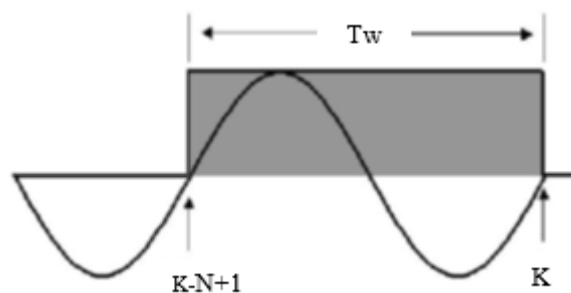
Entende-se que são necessários para a efetivação do cálculo ( $q^{-l-N}$ ) sempre os últimos  $N$  valores da transformada, e o de que, qualquer alteração no valor do sinal  $v[n]$  traz efeito transitório na saída do sinal medido. Logo para estabilizar o algoritmo precisa-se de um intervalo relativo à amostragem de todos os pontos obtidos com transformada que independe da taxa de distorção harmônica.

Na seção anterior foi definido que  $v[k]$  contém as amostras de tensão  $v(t)$  e que  $N$  representa o quantitativo de pontos considerados pela TDFR, sendo todos os valores fora do intervalo  $[k - N + 1, k]$  desprezados. Com isso, o produto do sinal de entrada aplicado a uma janela retangular unitária móvel (Marafão et. al, 2003), sempre estará atrelado ao número de amostras obtidas bem como à frequência de amostragem, como descrito abaixo:

$$T_w = N \cdot T_s \quad (11)$$

em que:  $T_w$  é a largura da janela retangular aplicada e a  $T_s$  é o período de amostragem. A Figura 8 mostra a janela no instante em que a amostra de um sinal co-senoidal atinge valores de 0 a  $2\pi$ , nela observa-se que o período do sinal amostrado foi estabelecido de forma a não coincidir com o valor de  $T_w$ .

Figura 8 - Sinal co-senoidal amostrado no intervalo  $T_w$ .



Fonte: Adaptado [59].

Na Equação resultante da Figura 6, a TDFR efetua o cálculo apenas para os pontos que estão compreendidos na janela e todas as amostras anteriores a  $[k - N + 1]$  são consideradas nulas. Na Figura 08, observa-se que se o período do sinal amostrado não for o mesmo com o

valor de  $T_w$ , o algoritmo da TDFR terá um padrão de  $v[k]$  distinto do valor real. Contudo é fundamental que o número de amostras coincida com o intervalo do ciclo da componente fundamental de  $v(t)$ , realizada por Pádua (2006). Para tal o período da amostragem, empregase a seguinte relação:

$$T_s = \frac{T_1}{N} \quad (12)$$

ou substituindo a Equação 11 na Equação 12, tem-se:

$$T_1 = T_w \quad (13)$$

sendo  $T_1$  o período da frequência fundamental do sinal de entrada.

Com o intuito de garantir informação necessária para o cálculo da transformada, um sinal  $v(t)$  é amostrado com uma frequência  $f_s = \frac{N}{T_w}$ , onde  $T_w$  é o tamanho de uma janela de amostragem retangular móvel e  $N$  é o número de amostras a cada intervalo  $T_w$ .

Para que, o processamento do algoritmo seja eficiente, e não seja influenciado pelas variações de frequência contidas nos sistemas elétricos, podendo levar ao processamento incorreto da TDFR, e possivelmente gerando um desfasamento e oscilações na amplitude, é crucial que o período do ciclo da rede de alimentação se mantenha constante, para garantir, assim, a relação estabelecida pela Equação 11, uma vez que a função  $T_w$  terá parâmetros constantes do sistema obtido na Equação 13.

### **3.1.3. Sincronismo da Transformada Discreta de Fourier Recursiva (TDFR)**

Para que, se tenha uma certa eficiência com as aplicações de filtragem, é importante que a largura da janela de amostragem coincida com o período da componente da fundamental a ser filtrado embasando tais aplicações e conceitos nas técnicas contidas na TDFR.

Com isso, sabe-se que a frequência da rede elétrica não tem uma constância para todos instantes de tempo. A fim de minimizar tal característica que se torna prejudicial para a detecção das amplitudes, faz-se necessário que o sistema de detecção consiga obter o valor da frequência fundamental em meio às suas variações, para que seja válida a relação estabelecida na Equação 13, bem como mitigando as consequências da não permanência dessa relação de



obtenção da frequência fundamental estabilizada deve-se ter uma janela onde seja possível tal obtenção de leitura.

A fim de tratar esse possível problema de sincronismo, faz-se importante a implantação de um modelo que estabeleça o cálculo da transformada Discreta de Fourier, sendo o mesmo em função de  $T_l$  e  $T_w$  realizado por Pádua (2006).

McGrath, Holmes e Galloway (2005) propõem com o intuito de se obter uma onda unitária, para usá-la como sinal de entrada, computacionalmente, sintetizar os valores correspondentes à frequência angular do sinal no domínio do tempo, tal como:

$$u1[k] = \cos \left( \frac{2\pi}{N}k + \theta_1 + \Delta\theta \right) \quad (14)$$

Sendo,  $\theta_1 + \Delta\theta$  dado por:

$$(\theta_1 + \Delta\theta) = \phi[k] + \frac{1}{2}(\phi[k] - \phi[k - N]) \quad (15)$$

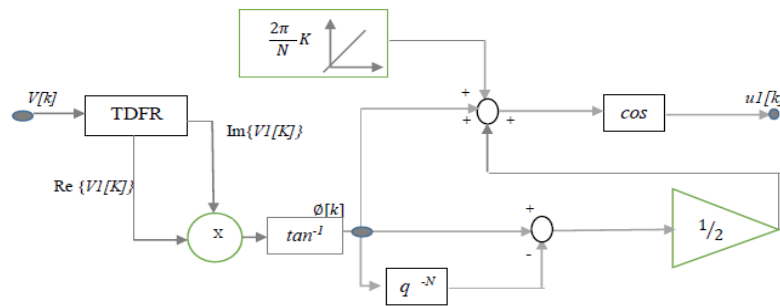
Agora substituindo a Equação 14 em Equação 15, tem-se:

$$u1[k] = \cos \left( \frac{2\pi}{N}k + \phi[k] + \frac{1}{2}(\phi[k] - \phi[k - N]) \right) \quad (16)$$

Analisando a Equação 14, observa-se que foram necessárias  $N$  amostras do argumento da TDFR para o processamento corrigir a defasagem do ângulo. Isto resulta na equivalência do intervalo da janela de amostragem, ressaltando que na TDFR é preciso do período para convergir. Assim, a saída da fundamental da rede demandou aproximadamente 2 ciclos para se estabilizar (PÁDUA et. al, 2007).

O diagrama completo da correção da fase da TDFR pode ser visto na Figura 9, onde o bloco nomeado “TDFR” corresponde ao algoritmo da Figura 7. Cada bloco na Figura 4 corresponde a uma etapa da lista de instruções na programação do protótipo implementado nas simulações, levando em conta o período de estabilização inicial.

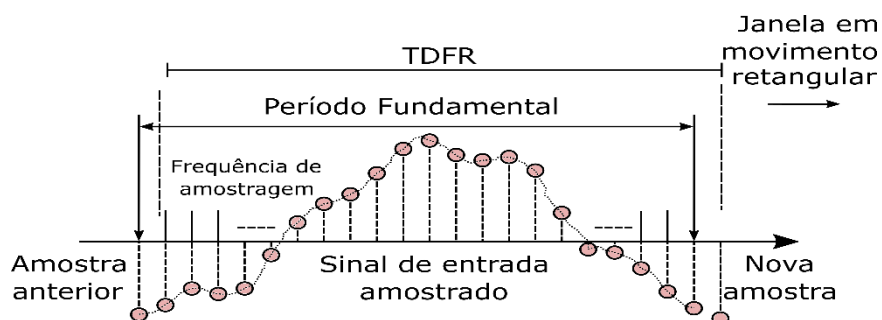
Figura 9 - Diagrama de correção da fase da TDFR.



Fonte: Própria.

Como é definido em (PÁDUA et. al, 2007), a expressão para a obtenção da onda fundamental unitária em fase com o sinal de entrada é vista na Equação 16. Sobretudo, aplicou-se as funções do seno e cosseno para efetuar os cálculos da Transformada Discreta de Fourier Recursiva, bem como a sintetização da frequência fundamental. Outro aspecto deste método é o do tempo demandado na estabilização sendo necessário o aumento no fator  $N$ , com isso o tamanho da janela aumenta sendo fundamentalmente necessário dois ciclos percorridos da fundamental para que inicie a atribuição de valores durante a medição das harmônicas, a Figura 10 demonstra a variância até o sinal percorrer dois ciclos.

Figura 10 - O princípio da DFT aplicada em janela deslizante.



Fonte: Adaptado [10].

Observando a Figura 10 nota-se, que com o tipo de janela deslizante (retangular) aplicada na Transformada de Fourier Discreta Recursiva (TDFR) que utiliza o mesmo princípio da DFT, iniciando a obtenção das primeiras amostras, sem que haja necessidade de obtenção de novas amostras para atualizar o gráfico, como abordado no (WU e JOU, 1996).

Sabe-se que, em vias gerais dinâmica durante o processamento da TDFR é menor do que os algoritmos baseados tão somente na TDF, dado à necessidade do sincronismo com a

rede detectando assim a defasagem e oscilações contidas nos sinais, isso demanda certo esforço computacional, sendo fundamentalmente usado a função arco tangente. Sendo que para tal deve-se efetuar a implementação das funções seno e cosseno.

Haja vista que para que os sistemas de detecção de harmônicas sejam eficientes ao aplicar as funções outrora citadas, é exigido um considerável espaço na memória e uma rápida velocidade de processamento do microcontrolador. Resultando em certa limitação para esse tipo de aplicação.

Outro ponto desse método é o de necessitar de certo tempo para o sistema estabilizar, sempre levando dois ciclos da fundamental para convergir, para qualquer nível de distorção harmônica contida no sinal.

## 3.2. MÉTODO DE DETECÇÃO DE HARMÔNICAS NO DOMÍNIO DO TEMPO

Alguns métodos aplicados para detecção de frequências harmônicas em sinais no domínio do tempo se demonstram mais dinâmicos que os métodos no domínio da frequência.

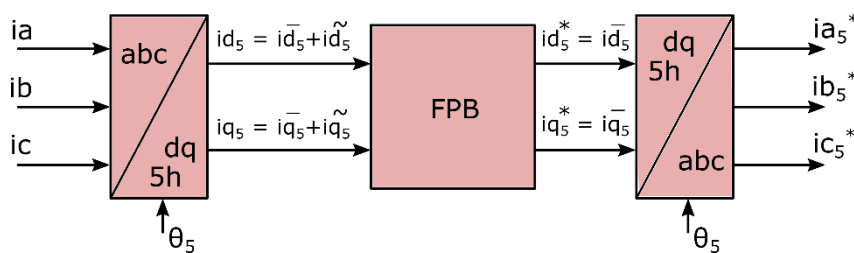
Eles oferecem um número menor de cálculos matemáticos bem como maior velocidade, se comparado aos métodos utilizados para detecção em sinais no domínio da frequência.

Como há vários métodos de controle e detecção para o domínio do tempo, dentre eles destacam-se a teoria da obtenção das componentes, a partir da tensão instantânea abordado pelos autores (Asiminoael, Blaabjerg e Hansen, 2007), (Yadav e Chavda, 2014), o método *dq* harmônico (Silva et. al, 2017) e (Kanazawa et. al, 1984) e o método da referência síncrona *dq* (Asiminoael, Blaabjerg e Hansen, 2007) e (Juhász et. al, 2018).

Com o intuito de conversão e obtenção das amplitudes das frequências harmônicas no domínio do tempo para este trabalho, foi utilizado o método de referência síncrona *dq*.

### 3.2.1. Referência Síncrona *dq*

O método *dq* síncrono, de um sistema trifásico, é baseado na transformação de coordenadas de *abc* para um referencial *dq*, sendo as componentes constantes e suas harmônicas transformadas em componentes oscilatórios e que através de um *filtro passa-baixa* (FPB) consegue-se separar tais componentes, conforme Figura 11.

Figura 11 - Diagrama genérico  $dq$  síncrono para a 5ª ordem Harmônica.

Fonte: Própria

A aplicabilidade do método  $dq$  utilizado ocorre por intermédio dos sensores de correntes, onde as correntes de cargas são obtidas em coordenadas  $abc$  e convertidas para coordenadas  $dq$  por meio da Transformada de Park, conforme demonstrado pela Equação 17 demonstrado por (Kanazawa et. al, 1984):

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\text{sen}(\theta) & -\text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Para a obtenção das coordenadas  $d$  e  $q$ , o filtro faz a separação do conteúdo harmônico contido no sinal Corrente Contínua. Assim, a Transformada de Park requer dois vetores unitários,  $\text{sen}(\theta)$  e  $\cos(\theta)$ , em fase e a  $90^\circ$ , respectivamente, com a tensão da rede.

Geralmente, estes sinais são obtidos através de um PLL (*Phase Locked Loop*), circuito este, que efetua a varredura continuamente na frequência e a fase da componente fundamental da tensão da rede como descrito por (Asiminoael, Blaabjerg e Hansen, 2007).

Com isso, da mesma forma que ocorre na teoria da potência instantânea, as componentes,  $i_d$  e  $i_q$ , podem ser decompostas em componentes contínuas e alternadas:

$$i_d = i_d^- + i_d^- \tilde{\quad} \quad (18)$$

$$i_q = i_q^- + i_q^- \tilde{\quad} \quad (19)$$

Neste caso, se o sistema for equilibrado e com uso de um filtro passa-baixa, as correntes contínuas ( $i_d^-$ ,  $i_q^-$ ) representam a corrente fundamental e, as componentes alternadas ( $i_d^- \tilde{\quad}$ ,  $i_q^- \tilde{\quad}$ ) retratam as correntes harmônicas, pois como o referencial  $dq$  rotaciona com uma velocidade angular da frequência fundamental, logo, nesse método, a componente fundamental foi

transformada em um valor Corrente Contínua e as componentes harmônicas em um valor Corrente Alternada. Assim, a detecção das harmônicas ocorre por um FPB (Kanazawa et. al, 1984).

Para que seja fosse possível a obtenção das amplitudes das respectivas harmônicas, o método  $dq$  foi inserido como sinal de entrada de correntes trifásicas, com a necessidade de se implementar a matriz para a obtenção dos coeficientes  $dq$  através da Transformada de Park (Kanazawa, 1984). Assim temos, o algoritmo fundamental síncrono  $dq$ -frame, Equação 20:

$$\begin{bmatrix} il_d \\ il_q \\ il_0 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} il_a \\ il_b \\ il_c \end{bmatrix} \quad (20)$$

em que,

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ -\text{sen}(\theta) & -\text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Com essa relação,  $il_d$ ,  $il_q$  e  $il_0$  são as correntes de carga, enquanto  $il_a$ ,  $il_b$  e  $il_c$ , para o controlador, trazem as correntes de referência.

Logo, conforme a Equação 22 definem-se quais foram as correntes de referência para o controlador e quais as inseridas no sistema de filtragem para a detecção da respectiva amplitude harmônica.

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = P^{-1} \begin{bmatrix} i_a^- \\ i_b^- \\ i_c^- \end{bmatrix} \quad (22)$$

Nesse caso, as correntes de entrada do sistema ( $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$ ) executam a relação entre elas, e as correntes de referência tem a admissibilidade com a matriz, onde  $\theta$  é o ângulo de referência da fundamental. Por conseguinte obtido os coeficientes  $d$  e  $q$ , as correntes são aplicadas ao sistema de controle do filtro, de forma que este consegue gerar a respectiva harmônica outrora selecionada (BOYLESTAD, R. L. , 2004).

Porém, por ser uma técnica amplamente utilizada para a extração do conteúdo harmônico, devido sua eficiência e a mínima geração de ruídos indesejados, suas especificidades de funcionamento estão ligadas diretamente ao algoritmo PLL, variável esta que não possui simples implementação (McGrath e Galloway, 2005).

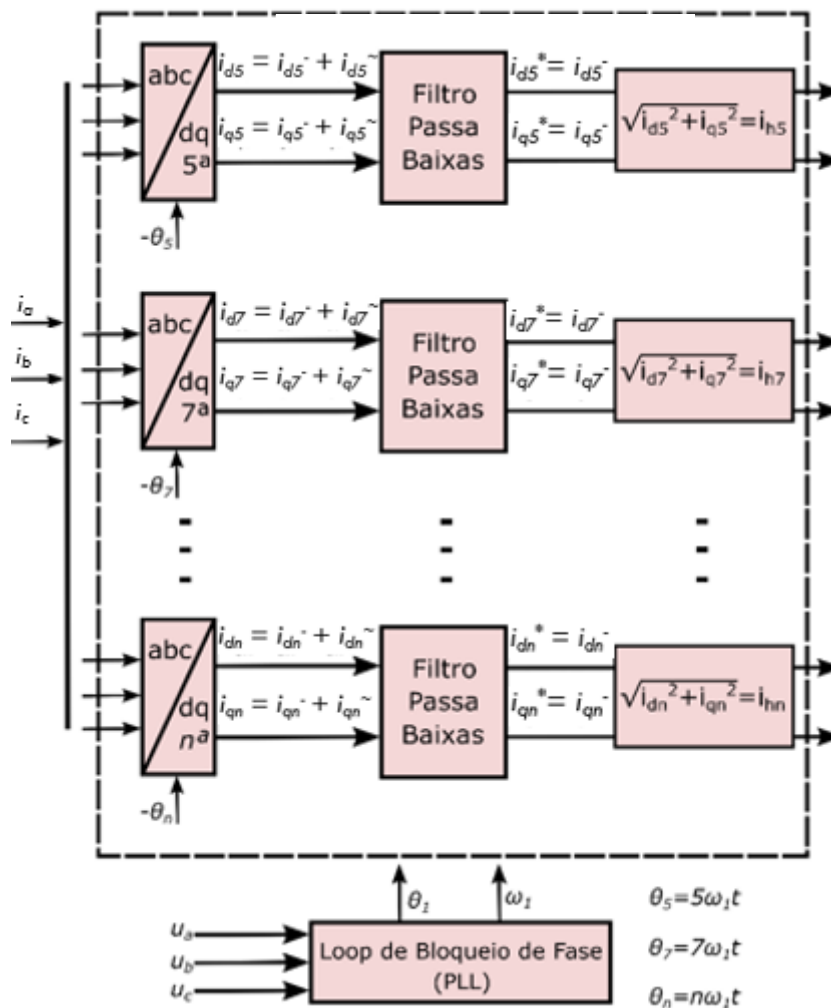
### a) Algoritmo *Phase-Locked Loop* (PLL)

Um dos recursos matemáticos que converge no desenvolvimento de algoritmos, aplicando consigo as técnicas para o processamento de energia, é a detecção pela sincronização da amplitude ou instantânea, ângulos de fase e frequência em sinais de corrente e tensão contidos em sistemas elétricos de potência, o algoritmo utilizado para a sincronização destes sinais é o *Phase-Locked Loop* – PLL desenvolvido em (Asiminoael, Blaabjerg e Hansen, 2007).

O PLL, estando em sincronismo com as tensões de rede, recebe sinal de tensão ou corrente lidas na saída do filtro. A partir disso, ele passa a fornecer a posição angular das fases ou correntes para a Transformada de Park, conforme Equação 22.

Quando executado, o PLL influencia, fundamentalmente, no desempenho e na resposta do sistema, conforme demonstra a Figura 12.

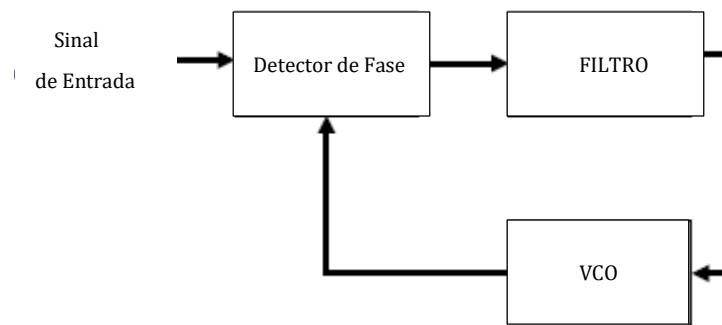
Figura 12 - Diagrama de blocos com sistema de detecção do protótipo.



Fonte: Própria.

Em sua origem, os PLLs são aplicados comumente para a reprodução de sinais, com uma pré-determinada faixa de frequência em laço fechado, que são utilizados principalmente na sintonização de rádios. Decorrente disso, ao longo dos anos esses algoritmos vem ganhando novos arranjos e principalmente em outras aplicações (A.B. Grebene, 1971).

Figura 13 - Estrutura de um PLL.



Fonte: Adaptado de S.C. Gupta, 1975.

Na estrutura genérica de um PLL, conforme Figura 13, é possível observar que ele contém três grandes etapas para a detecção do ângulo de uma senóide em um sinal de entrada:

- Detector de fase: executa a comparação entre o sinal de entrada e o sinal determinado a partir da frequência de amostragem do mesmo;
- Um filtro de primeira ordem: com a funcionalidade de um filtro passa-baixa, atenua as componentes alternadas de alta frequência do bloco detector de fase;
- Oscilador controlador por tensão (VCO): etapa que tem como função estimar o sinal com base na amostra filtrada, funcionando basicamente como um oscilador interno do PLL de acordo com a lista de instruções contidas no algoritmo (S.C. Gupta, 1975).

A influência dos PLLs em alguns métodos de detecção de harmônicas ocorre de forma que seja preciso isolar cada componente harmônico a ser mitigado para a criação da indutância ativa, que sintoniza o filtro em cada frequência desejada. Para tanto, utiliza-se um sistema de coordenadas síncrono com cada harmônico  $h$  com os vetores unitários  $sen(\theta)$ , e  $cos(\theta)$ , gerados a partir do PLL em estudos apontados por (Mcgrath, B. P.; Holmes, 2005). Isto posto, as componentes podem ser isoladas das demais ( $i_d$  e  $i_q$ ) através do filtro passa-baixa.

Com aplicação do PLL encontra-se uma redução no tempo de resposta do filtro, já que para obter o componente harmônico do sinal ele representa um atraso no processamento do sinal.

Neste interim, esse aspecto particular deve ser levado em conta, para dimensionar o filtro e para que este tenha boa atenuação. Porém, a dinâmica do PLL pode ser influenciada pelos parâmetros do controlador proporcional aplicado ao filtro.

### 3.2.2. Controlador Proporcional Aplicado ao Filtro

O responsável em detectar as frequências harmônicas selecionadas bem como contidas no sinal de referência da rede é um filtro passa-baixa (FPB). Para a obtenção das correntes  $d$  e  $q$  inseridas na entrada deste filtro, o filtro extrai as componentes  $d$  e  $q$  contidas no sinal, após ocorrido isso é efetuada a separação de cada ordem em cada frequência harmônica.

Desta forma, o controlador PI é fundamental na concepção do filtro, por conta do tempo de resposta deste. Assim, observa-se que o filtro é composto por uma soma de termos, conforme Equação 23:

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + j \omega R \cdot C^{-1}} \quad (23)$$

em que,

- $R = e^{-2\pi f_c}$  ;
- $f_c = \frac{\text{frequência de corte}}{\text{frequência de amostragem}}$

No protótipo do trabalho foi aplicado um filtro para cada um dos cinco primeiros harmônicos contidos no sinal lido, sendo as amplitudes harmônicas  $h = \{5^a, 7^a, 11^a, 13^a \text{ ordens}\}$ .

## 3.3. INDICADORES DE DISTORÇÃO PELO CONTEÚDO HARMÔNICO

Além do desenvolvimento de um sistema para a medição de distorções harmônicas, na qual trata-se de um distúrbio na QEE, objetiva-se quantificar a distorção produzida por essas harmônicas. O indicador mais utilizado para mensurar o conteúdo harmônico, conforme os padrões elaborados pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), é o parâmetro Distorção Harmônica Total (DHT), em inglês *Total Harmonic Distortion* (THD) podendo ser adotado tanto para tensão como para corrente, (Dugan et. al, 2004). O índice de *THD* é obtido através da Equação 24:



$$THD = \left( \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \right) \times 100 \quad (24)$$

em que:

$THD$  = distorção harmônica total;

$I_1$  - valor *rms* da frequência fundamental.

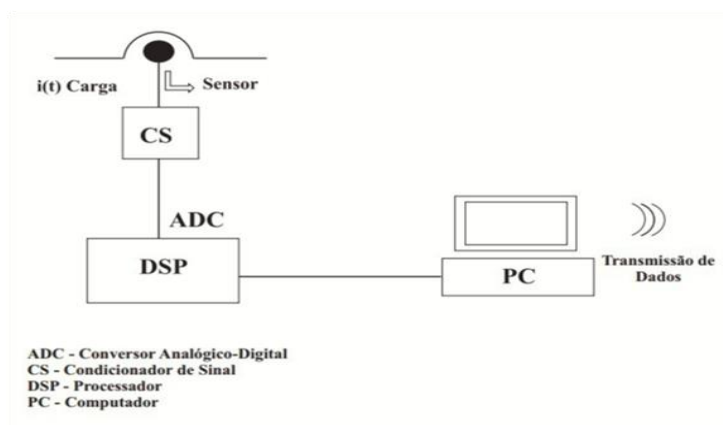
$I_n^2$  - é a tensão *rms* do  $n$ ésimo harmônico.

### 3.4. SISTEMA PROPOSTO PARA A DETECÇÃO DAS AMPLITUDES HARMÔNICAS

O sistema para detecção e monitoramento das harmônicas foi desenvolvido com o auxílio de *softwares* para executar as simulações e implementar a programação, com o foco em oportunizar ao usuário uma análise preliminar dos dados coletados e armazenados por meio de uma *IHM* de fácil acesso, a ser visualizada em um computador, onde foi implementado o monitoramento das frequências harmônicas contidas em um sistema de energia com uma carga não-linear.

O medidor proposto para a mensuração das harmônicas é composto por conversor analógico-digital, condicionador de sinais, processador e computador, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Visão Geral do Medidor Proposto.



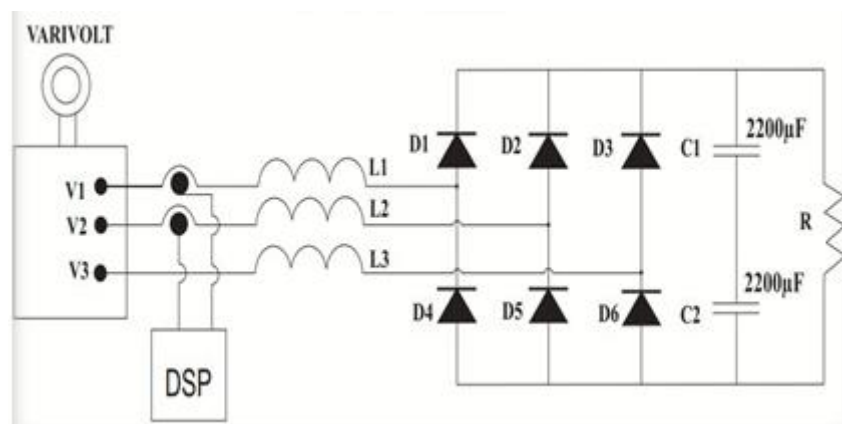
Fonte: Própria.

Para simular os efeitos gerados na rede de energia elétrica, por conta do comportamento linear e não-linear das cargas inseridas nos sistemas de distribuição de energia, foi utilizado no trabalho um retificador trifásico.

### 3.4.1. Perfil das cargas utilizadas nas simulações

Os retificadores trifásicos, conforme Figura 15, estão, presentes em sua maioria, nos circuitos para acionamentos de motores elétricos, controle sequenciado de partidas de motores, conversores CC/CA, sistemas de controle dinâmico para motores, dentre outras inúmeras aplicações para os mesmos.

Figura 15 - Retificador Trifásico.



Fonte: Própria

Dá-se o nome de carga linear ao circuito elétrico resultante da associação de um resistor mais um indutor, ou resistor mais um capacitor o resultado da alimentação de tensão com 60Hz deve apresentar uma corrente de 60Hz, pois os elementos lineares são os resistores, capacitores e indutores. São denominados circuitos não-lineares, aqueles que produzem correntes e frequências diferentes da frequência da rede, pois ao se alimentar com uma tensão de um sinal de 60Hz de frequências, produzem uma corrente com frequência múltipla da frequência da rede.

A não linearidade é resultante do fato de se tratar de componentes semicondutores que em geral eles têm efeitos de condução e bloqueio regular durante um período senoidal, porém durante os períodos de ora bloqueio ou ora condução, produzem essas não linearidades, pois inicialmente ele não conduz, portanto, corrente igual a zero, depois de um dado tempo ele vai ter corrente maior que zero no semi-ciclo positivo, após o capacitor irá descarregar enviando energia CC para suprir a demanda consumida pela carga.

A medida que o capacitor conclui esse ciclo de carga e descarga, é injetada uma corrente no circuito elétrico. Sobretudo essa periodicidade cíclica, trazendo as componentes em outras

frequências de ordem  $n$ , conhecidas como frequências harmônicas, são características dos retificadores que fornecem, assim, energia para as cargas  $CC$  existentes nos circuitos eletrônicos.

Entende-se, que a maioria dos equipamentos eletrônicos, tais como: computadores, circuitos de iluminação, condicionadores de ar e equipamentos de vídeo, trazem consigo o inconveniente de provocar deformações nas formas de onda, também chamadas de tensões e correntes harmônicas, podendo contribuir para a degradação da qualidade de energia elétrica (Macias e Exposito,1998).

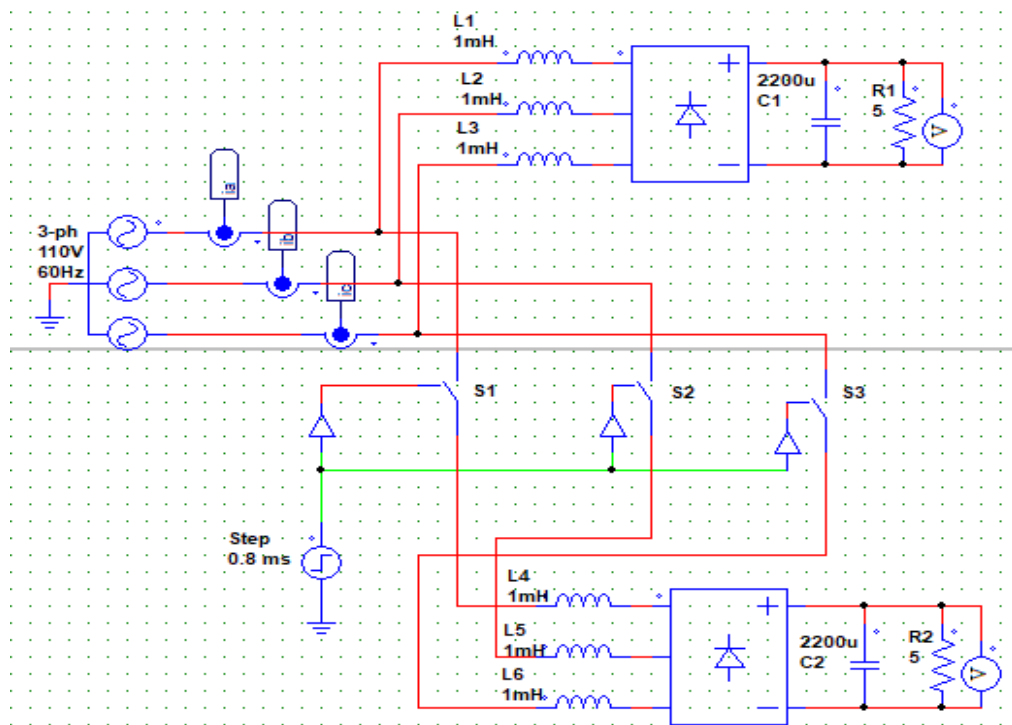
A presença de harmônicas em instalações muitas vezes é aceitável. O problema é, quando há interação com o sistema de distribuição, podendo ocasionar distorções e perdas na tensão (Dugan et. al, 2003)

Quando as distorções nas harmônicas atingem níveis elevados, seus efeitos são sentidos pelos equipamentos conectados ao sistema, tanto em motores, equipamentos eletrônicos, transformadores e disjuntores, quanto em instrumentos de medição (Vermesan e Friess, 2013) e (Macias e Exposito,1998).

### **3.4.2. Parâmetros e Plataforma Experimental**

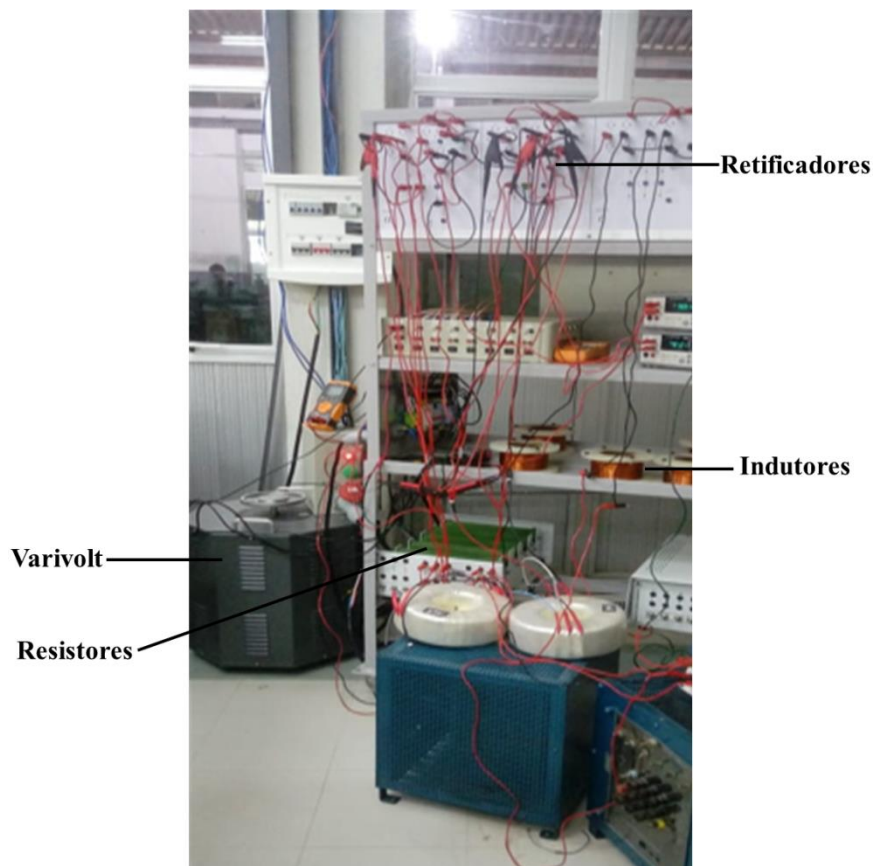
Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizada uma bancada experimental Kit DSP, disponibilizada no Laboratório LACA/IFPB. O dimensionamento do circuito trifásico utilizado para simular o sistema de detecção de harmônicas, foi executado com o auxílio do *software* PSIMTM®, abaixo na Figura 16 está o circuito desenvolvido para as respectivas medições. A plataforma, como ilustrada pela Figura 18, é composta por um Processador Digital de Sinais – DSP, demonstrado na Figura 17 estão os: indutores de filtro; cargas não lineares; sensores e placas condicionadores de sinal.

Figura 16 – Circuito carga não-linear Trifásico



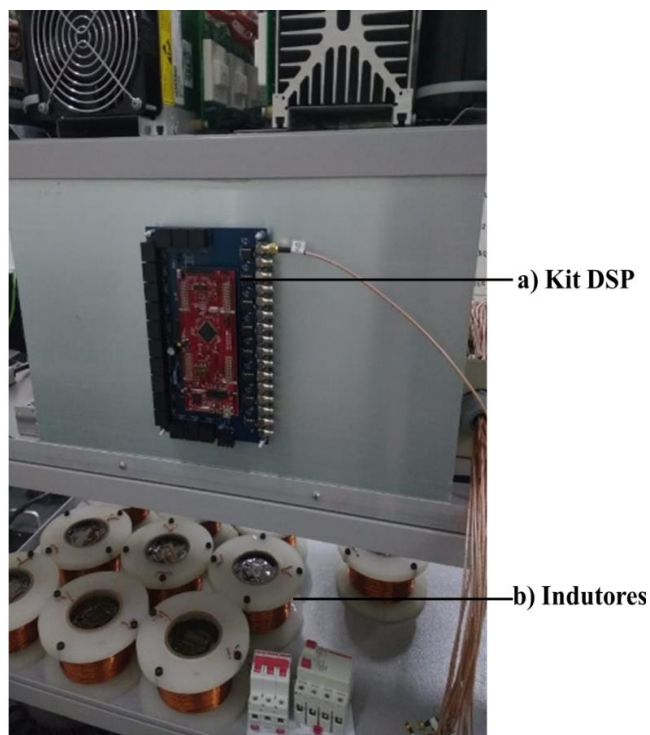
Fonte: Própria.

Figura 17 - Bancada didática experimental.



Fonte: Própria.

Figura 18 - Processador Digital de Sinais com o (a) Kit DSP com entradas A/D e (b) Indutores.



Fonte: Própria.

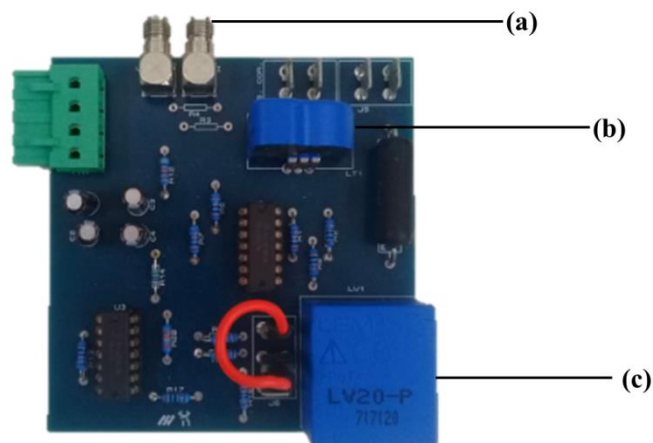
O funcionamento do algoritmo desenvolvido para à detecção de harmônicas foi verificado aplicando a TDFR, bem como sua respectiva modelagem matemática, validando assim, os conceitos e definições acerca do tema apresentado. Os respectivos parâmetros das cargas, conforme descrito pela Tabela 2, foram implementados com o auxílio do *software* PSIMTM® e Code Composer-CCS para o circuito contido na Figura 16.

Tabela 2 - Parâmetros para realização das simulações.

COMPONENTES	VALORES
Período de amostragem(ms)	1000
Passo da simulação (s)	1E-005
Frequência de chaveamento (KHz)	5
Tensão elétrica da rede (Vms)	220
Frequência da rede (Hz)	60
Indutor (mH)	7
Capacitor ( $\mu$ F)	2200
Resistor ( $\Omega$ )	10
Indutor (mH)	2
Resistor ( $\Omega$ )	25
IGBT SKM50GB123D	-
Sensor LT S15-NP (V)	$\pm 1,5$
DSP TMS320F28335	-
Potência ativa carga 1(W)	10167,5
Corrente eficaz carga 1(A)	$\pm 29,82$

Na bancada há um circuito para realizar o condicionamento do sinal, este é composto de um sensor de corrente e tensão onde serão efetuados as coletas dos respectivos valores de leitura, conforme disposto pela Figura 19.

Figura 19- Placa de condicionamento de sinais com (a) Pontos para conexão com o DSP, (b) sensor de corrente e (c) sensor de tensão.



Fonte: Própria.

Para que a placa de condicionamento de sinais execute leituras mais precisas, foram limitados os níveis de tensão entre 0V e 3,0V estando dentro da faixa aceitável para o processador DSP TMS320F28379D, para que o sinal seja compatível com essa faixa de conversão dos valores analógicos. Na bancada é utilizado um sensor de corrente LEM LV20P de efeito *hall*, um de tensão LT S15-NP fabricante LEM, com faixa de leitura de -1,5V à 1,5V.

O circuito de condicionamento dos sinais de corrente de entrada, tem como função preparar os sinais de saída dos sensores antes que sejam ligados nas entradas do processador.

Em vias gerais, este circuito é formado por três etapas que se diferenciam: sensor de corrente, somador de offset. Já no diagrama de bloco tem-se o PLL, para proporcionar a obtenção mais precisa do ângulo de fase do sinal da rede elétrica, mesmo estando em condições extremas de distorções, evitando leituras com discrepância elevada e muito abaixo do pré-estabelecido na entrada do processador. O filtro digital para fazer a separação do conteúdo harmônico do sinal sem distorção e o bloco onde é programado o tipo de método aplicado para a detecção das harmônicas sendo o dq ou a TDFR.

Outros pontos de conexões que são de suma importância para que o sistema execute com segurança as listas de instruções efetuando o envio e a comunicação das variáveis analógicas lidas para o DSP são os conversores A/D.

No A/D é onde são inseridos os níveis de tensão elétrica de alimentação, sendo convertidas por meio do conversor A/D interno no DSP em valores numéricos, as respectivas

tensões de saída são coletadas por meio de um circuito elétrico composto por sensores do tipo efeito *hall*, que por sua vez caso haja necessidade, o mesmo tendo o seu ganho variado através do ajuste de valores limitados pelas especificações técnicas do A/D, onde são inseridos os valores de tensão input nas entradas do processador.

### 3.4.3. Processador Digital de Sinais – DSP

Para o trabalho desenvolvido, o processador tem como função fundamental gerenciar os dados coletados durante a aquisição. O modelo de processador utilizado, por onde o código para detecção das harmônicas foi embarcado, foi o *Digital Signal Processing – DSP*, da Texas Instruments TMS320F28379D. O *software* utilizado para a compilação do código foi o Code Composer Studio v9.0.

O processador Digital de Sinais – DSP é dito como de baixo custo para otimização de sistemas se comparados a outros processadores semelhantes, bem como há uma gama de aplicações para o mesmo e das mais diversas, comumente utilizado em controle de acionamento de motores elétricos, chaveamento de inversores, sistemas digitais.

Sendo o Code Composer Studio - CCS denominado um ambiente para desenvolvimento de projetos integrado-IDE, que interage com vários modelos de microcontroladores e processadores, nele está contido uma serie de ferramentas para a produção, modificação, emulação e depuração das listas de instruções desenvolvidas, bem como um compilador que utiliza a linguagem de programação em C/C++ de otimização. Aquisição do conversor ou a frequência de amostragem foi de 10KHz para o domínio do tempo e de 5KHz para o domínio da frequência, ambos por meio de *software* e dados observados através dos gráficos obtidos com o *software*, efetivação dos cálculos e modelos matemáticos implementados, bem como dar a resposta digitalizada ao usuário do sistema.

Os dados coletados e devidamente processados são enviados via rede de comunicação, sendo monitorados, visualizados e analisados por meio da interface em aplicativo, de fácil acesso, que foi desenvolvido na versão *web* do *software* GUI Composer – GC. Esta ferramenta da Texas Instruments e utilizada para desenvolver interfaces e aplicativos para usuários efetuarem a supervisão e monitoramento, de maneira personalizada.

Uma das vantagens do GUI é a possibilidade de criar telas dos aplicativos de supervisão com certa independência do CCS, suas telas são de um grau de complexidade pequeno,

tornando-se, assim, uma criação fácil e de possível visualização dos status das variáveis que são necessárias.

Dentre as características que serviram para a escolha do método de medição das harmônicas, levou-se em consideração os seguintes fatores para considerar o sistema de medição de harmônica mais eficaz:

- Capacidade de armazenamento do processador;
- Custo computacional do algoritmo;
- Tensão de entrada do processador compatível ao sinal enviado pelo sensor;
- Análise do sinal em modo frequência ou no modo do tempo;
- Necessidade de implementar filtros digitais ou analógicos;
- Precisão dos dados coletados;
- Período de amostragem;
- Linguagem de programação aplicada e de fácil acesso;
- Custo e acessibilidade de implementação;
- Tempo de resposta do sinal processado no sistema de acordo com o método;
- Existência de A/D no processador;
- Tipo de pré-disposição para comunicação do processador;
- Estabilidade do sistema de medição.



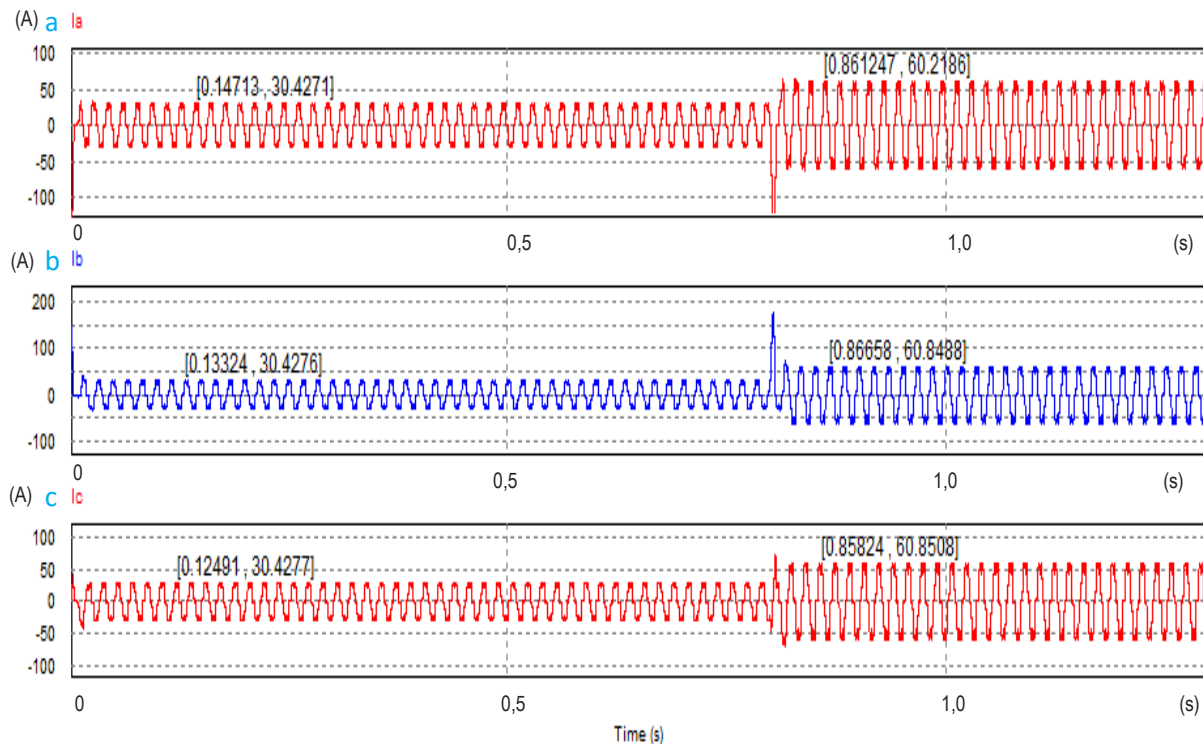
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. RESULTADOS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

De acordo com o que foi exposto, a simulação para o método de detecção no domínio da frequência, tem por objetivo principal verificar a implementação do algoritmo no DSP para desempenhar o sistema de detecção de harmônicas. Para efetuar tais cálculos matemáticos, durante as simulações e experimentos fez-se necessário reduzir a frequência de amostragem da simulação de 10 KHz para 5 KHz, fazendo, assim, que fosse possível o algoritmo ser processado. Os testes iniciam com uma carga (1) que fornece para o circuito uma corrente de aproximadamente  $I_s = 30(A)$ , sendo a mesma do tipo não linear e após ter transcorrido 0.8 milissegundos é inserido outra carga com as especificações técnicas idênticas a carga (1), fornecendo pra o circuito uma corrente elétrica total de algo em torno de  $I_{Ts} = 60(A)$ .

As correntes de entrada do sistema obtidas respectivamente por meio de simulações, são assim nomeadas correntes de referência ( $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$ ) do sistema de detecção das harmônicas para o domínio da frequência, conforme ilustra a Figura 20. Na figura é possível observar uma variação na corrente lida, a mesma se dá após 0.8 ms com a inserção de outra carga.

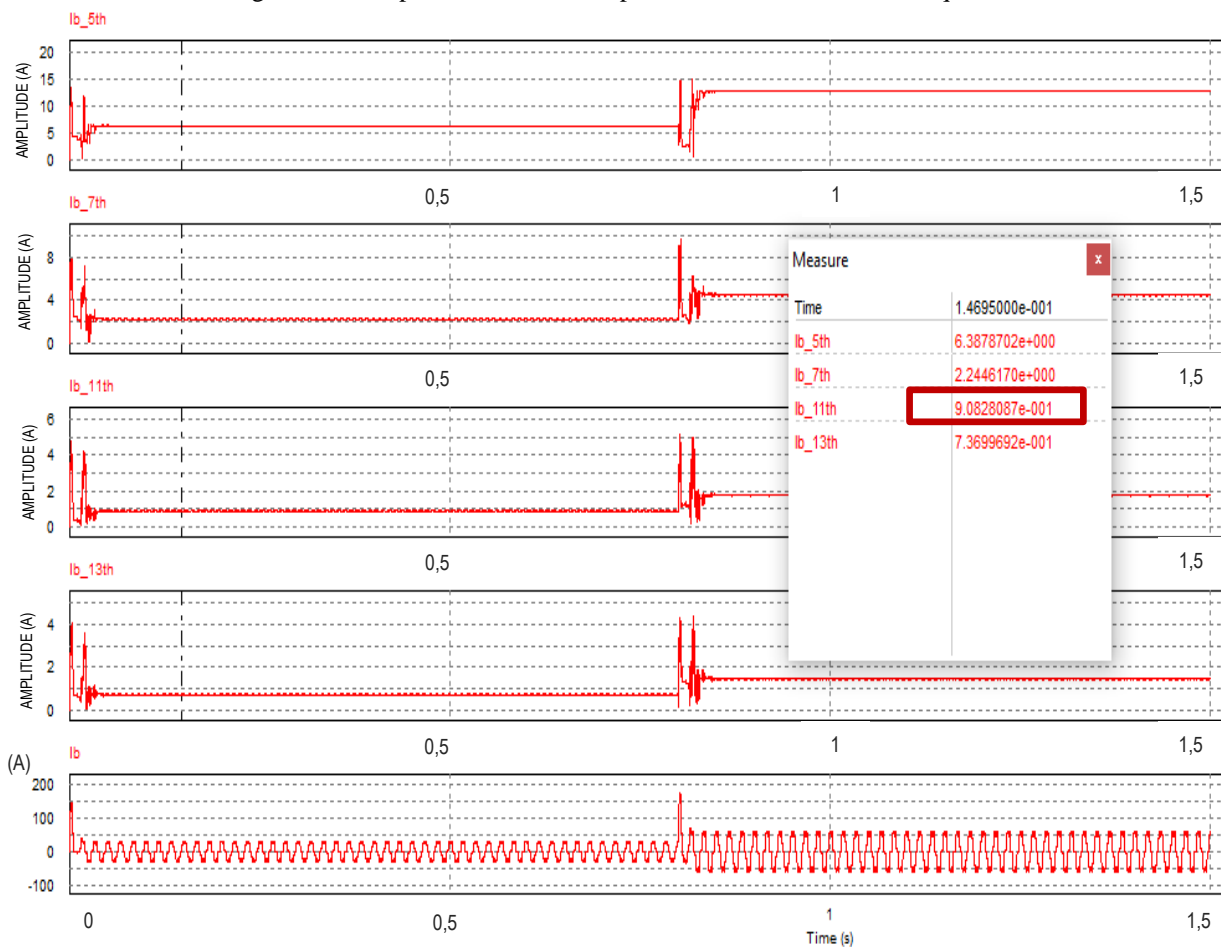
Figura 20 - Corrente de entrada modo da frequência (a)  $i_a$ , (b)  $i_b$  e (c)  $i_c$ .



Fonte: Própria

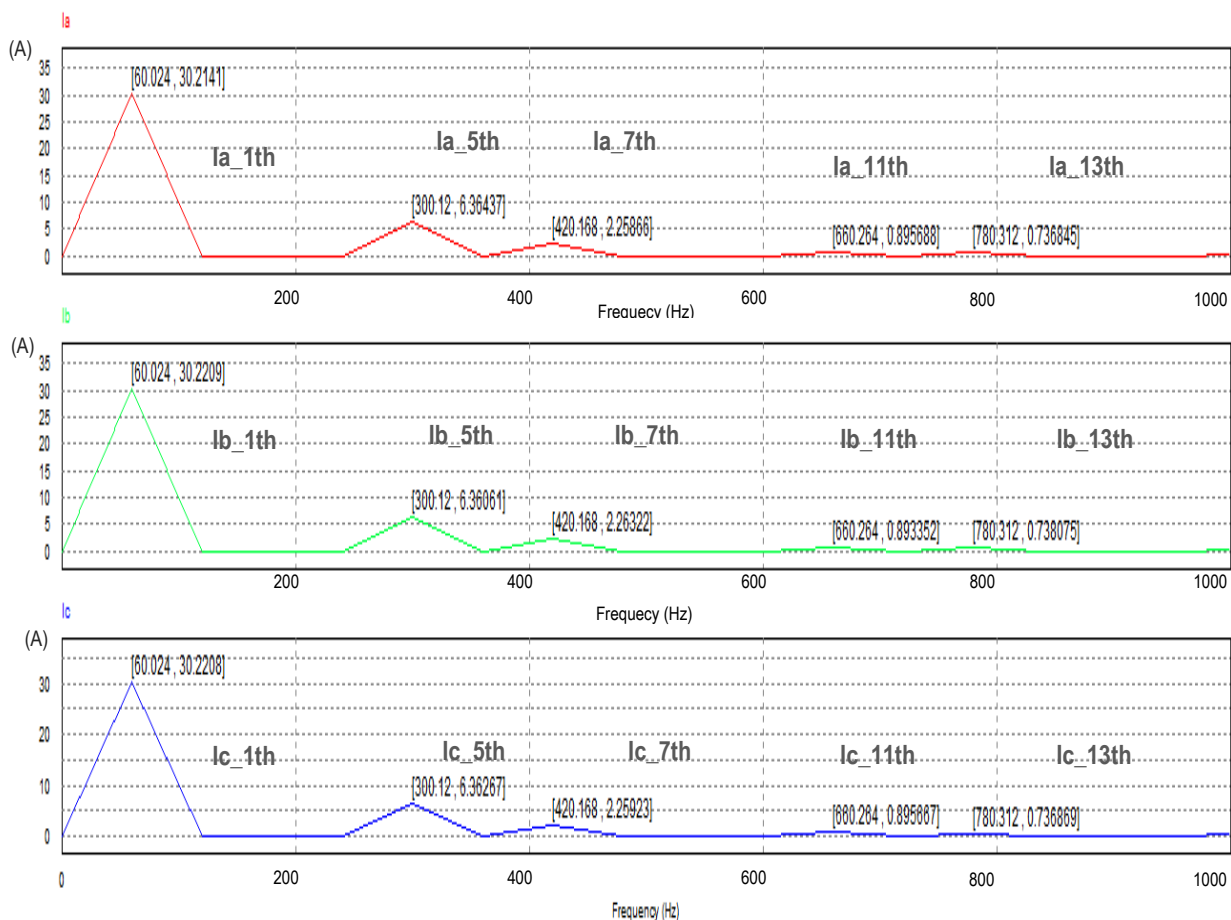
Para a obtenção das amplitudes harmônicas, nas simulações, foi utilizado o *software* PSIMTM®, bem como a montagem de experimentos aplicando o método de detecção de Transformada Discreta de Fourier Recursiva com janela deslizante retangular, foi obtido as seguintes amplitudes harmônicas contidas nas correntes de entrada do sistema sendo as mesmas de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordens, conforme visto na Figura 21 as amplitudes harmônicas e seus respectivos valores.

Figura 21 – Amplitudes harmônicas para o método domínio da frequência



Fonte: Própria

Foi utilizado um recurso do *software* de programação, para observar no espectro do sinal as amplitudes de harmônicas. Na Figura 22 está contida análise espectral das amplitudes podendo ser vistas as amplitudes das 1ª, 5ª, 7ª, 11ª e 13ª harmônicas contidas no sinal de entrada para as correntes.

Figura 22 - Análise espectral do sinal no domínio da frequência das correntes (a)  $i_a$ , (b)  $i_b$  e (c)  $i_c$ .

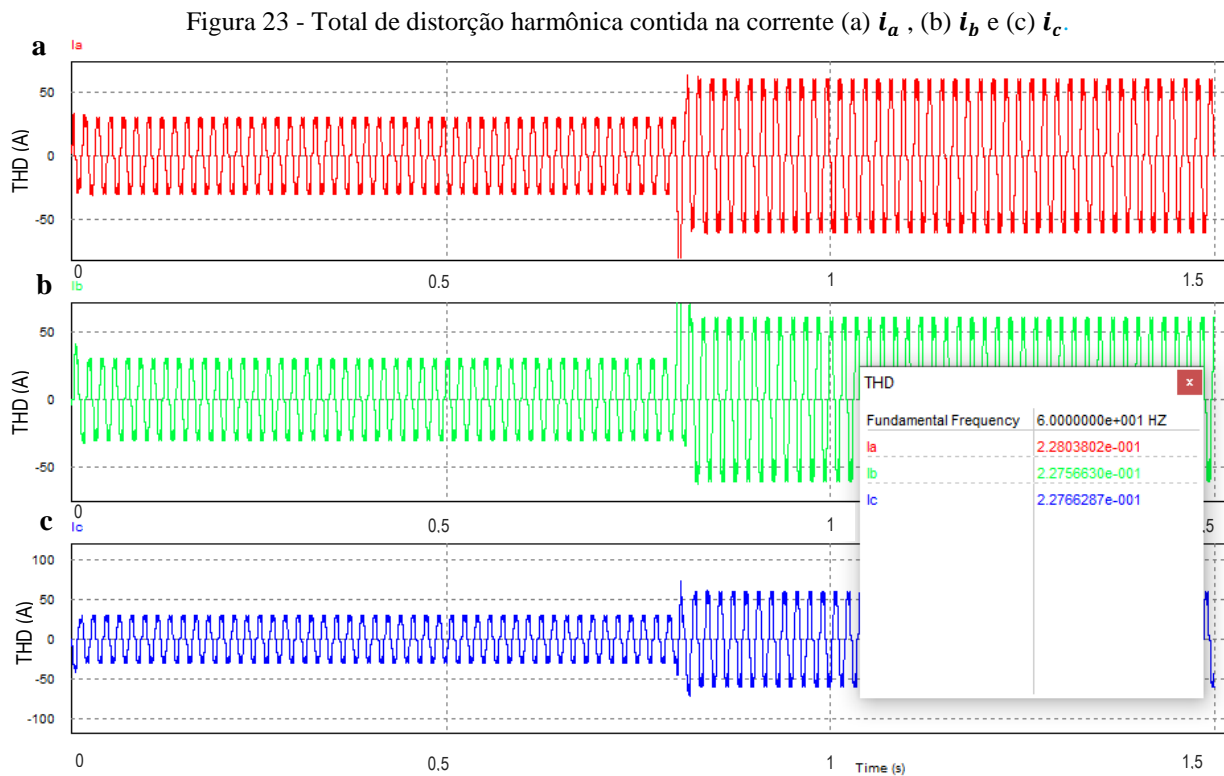
Fonte: Própria

Objetivando quantificar a distorção produzida pelas harmônicas, através do parâmetro Distorção Harmônica Total, observou-se que a taxa distorção harmônica de frequência contidas nas correntes (a)  $i_a$ , (b)  $i_b$  e (c)  $i_c$ , apresentam valores bem aproximados para cada corrente de fase, conforme Tabela 3 bem como o erro dos valores adquiridos com a aplicação do método em relação aos obtidos com o uso do *software*.

Tabela 3 - Resumo dos harmônicos contidos no sistema para domínio Frequência.

Ordem harmônica	Fase A		Fase B		Fase C		Erro(%) Comparativo
	Frequência (Hz)	Corrente (A)	Frequência (Hz)	Corrente (A)	Frequência (Hz)	Corrente (A)	
1	60,024	30,214	60,024	30,220	60,024	30,220	0,0001
5	300,360	6,3643	300,120	6,3606	301,123	6,3626	0,0016
7	420,168	2,2586	420,168	2,2632	420,168	2,2592	0,0039
11	660,264	0,8956	660,264	0,8935	660,264	0,8934	0,8057
13	780,312	0,7368	780,312	0,7364	780,312	0,7359	0,0276
<b>I<sub>THD</sub></b>	60,026	22,7701	60,026	22,7691	60,026	22,7663	0,0862

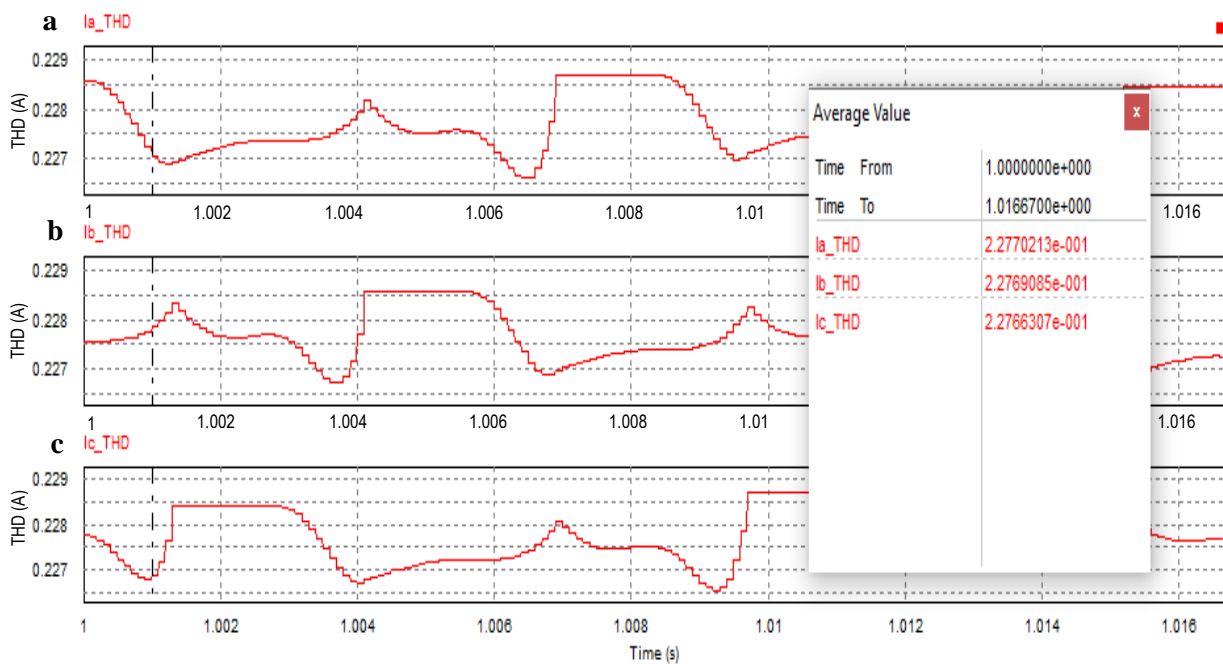
No sistema desenvolvido temos as correntes da fase (a) uma taxa de 22,80%, fase (b) uma taxa de 22,75% e a fase (c) uma taxa de 22,76% de deformação da onda de corrente, para tal, foi utilizado um recurso do *software* para obtenção dos respectivos valores de THD, conforme ilustrado pela Figura 23.



Fonte: Própria

Na Figura 24, observa-se os gráficos com os respectivos valores médios de THDs das correntes no domínio da frequência (a)  $i_a$ , (b)  $i_b$  e (c)  $i_c$  obtidos com o *software* PSIMTM®, ao se programar os blocos em C++ para plotar o valor nos gráficos.

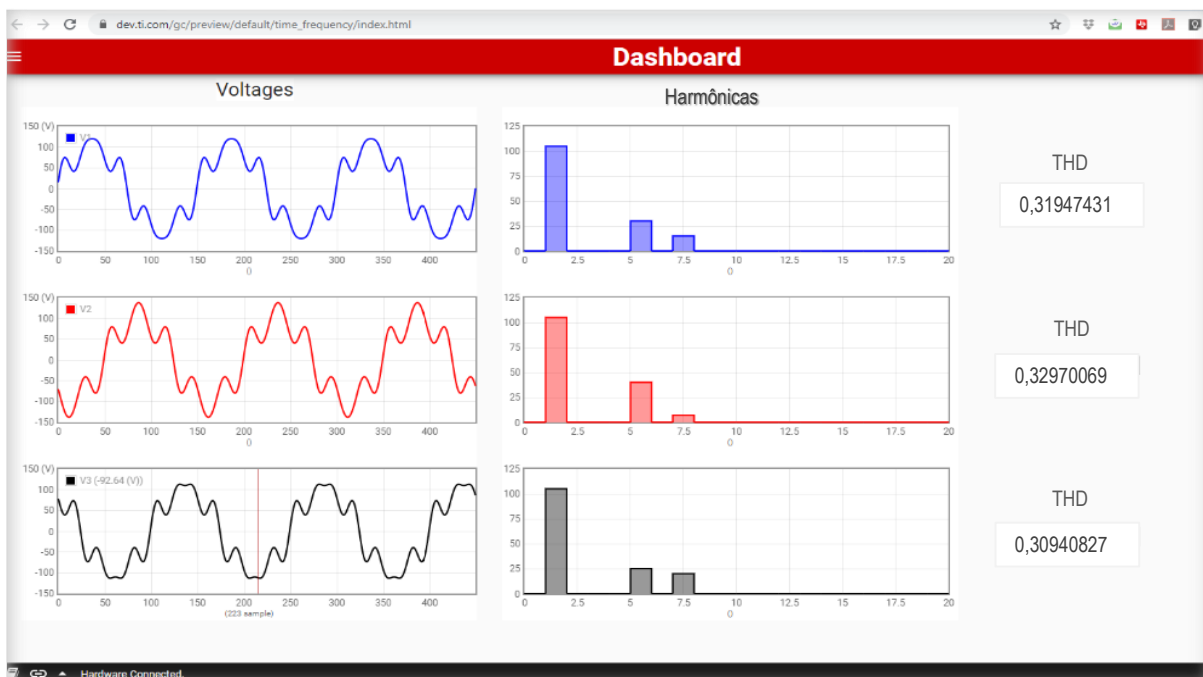
Figura 24 - TDH das correntes após o transitório.



Fonte: Própria

Na imagem obtida através da interface do sistema de detecção de harmônicas desenvolvida com o uso do *GUI Composer*, obteve-se as correntes senoidais de entrada  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$ , bem como as harmônicas contidas em cada uma das respectivas correntes e o valor percentual referente ao total de distorções harmônicas em cada uma das correntes, conforme ilustrado na Figura 25.

Figura 25 - Interface desenvolvida para visualizar o Sistema no Domínio da Frequência

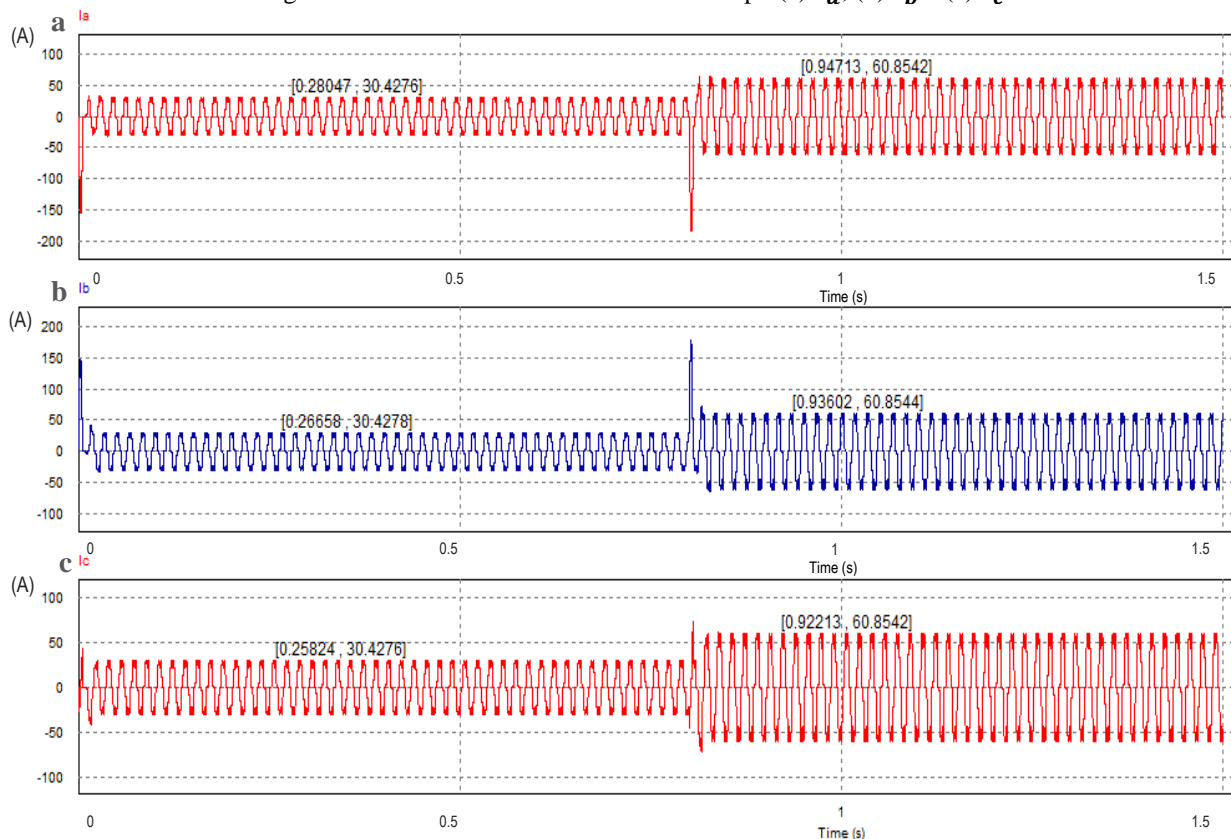


Fonte: Própria

## 4.2. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NO DOMÍNIO DO TEMPO

Para validar o sistema de detecção de harmônicas projetado para o domínio do tempo, o experimento foi dividido com a obtenção dos gráficos referentes as correntes aplicadas na entrada do sistema. Após, passado 0.8 segundos na Figura 26 é possível observar uma variação na corrente lida, a mesma se dá com a inserção de outra carga.

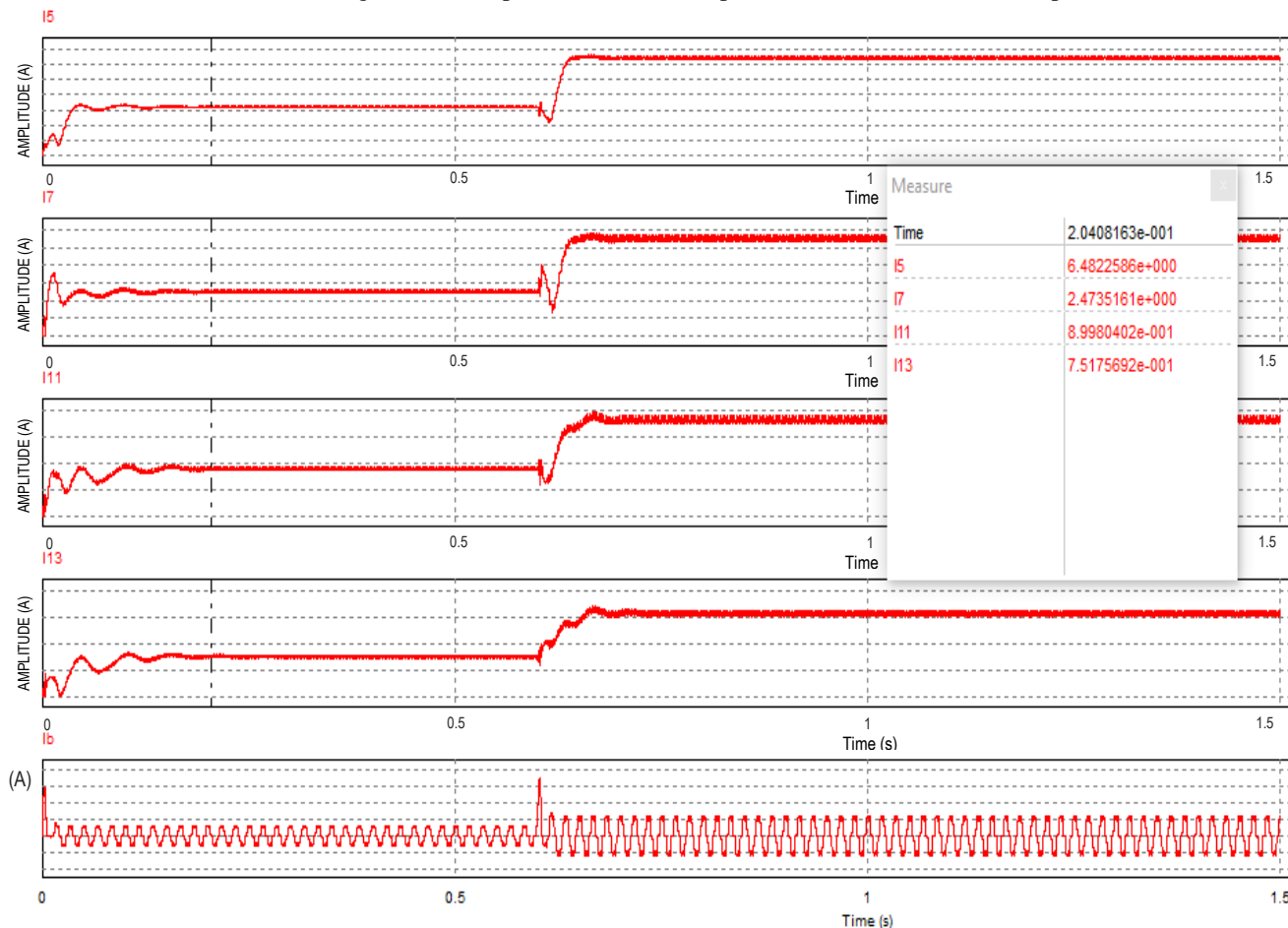
Figura 26 - Corrente de entrada modo do tempo (a)  $i_a$ , (b)  $i_b$  e (c)  $i_c$ .



Fonte: Própria.

Para a obtenção das amplitudes harmônicas, nas simulações foi utilizado o *software* PSIMTM<sup>®</sup>, bem como na programação aplicando os método *dq* síncrono e o algoritmo *PLL*. Com a 1<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> harmônica contidas no sinal de entrada para as correntes no domínio do tempo devido o comportamento das cargas, foi obtido graficamente as amplitudes das 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> harmônicas com a simulação no software, conforme visto na Figura 27 as amplitudes harmônicas e seus respectivos valores.

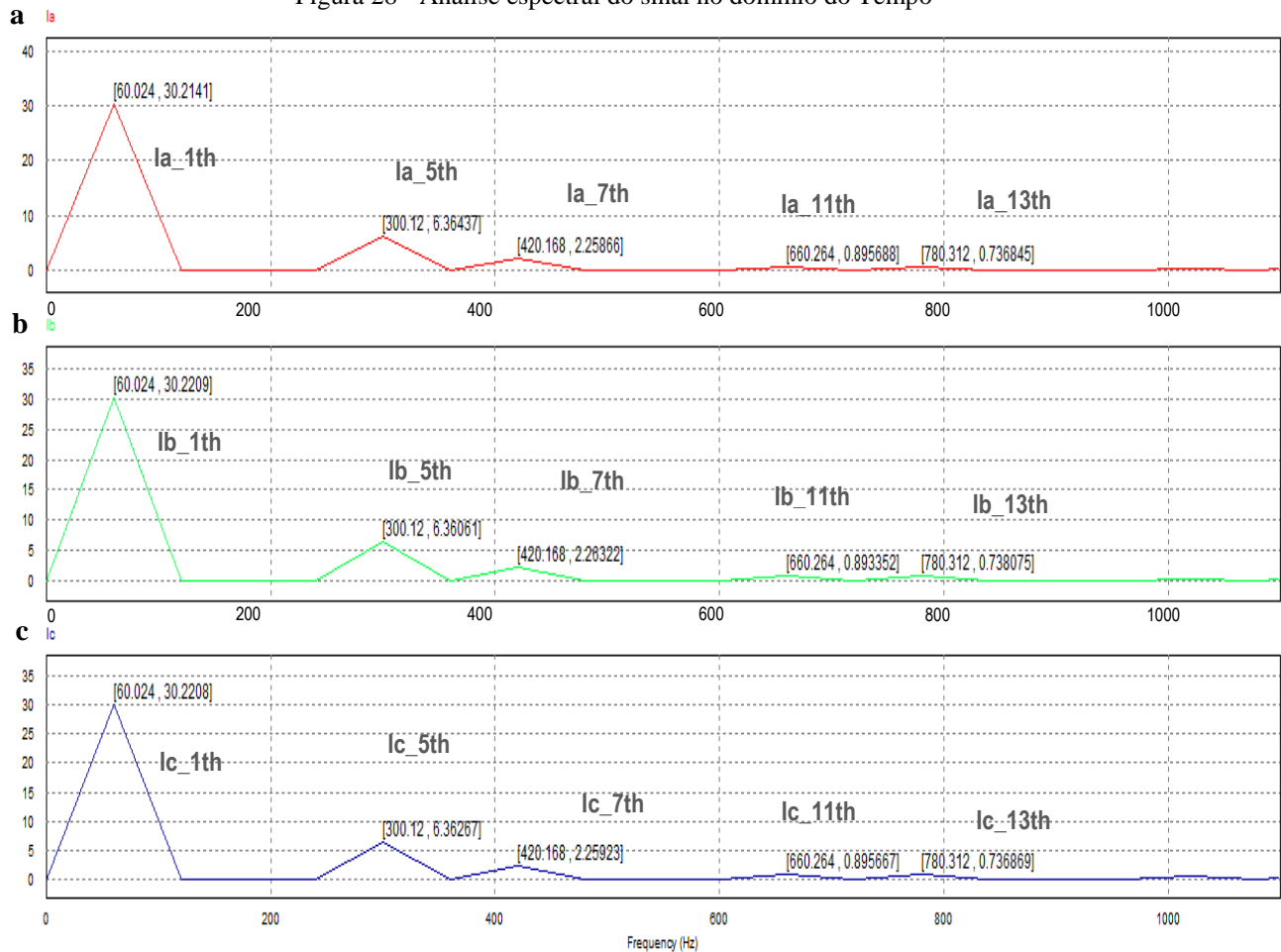
Figura 27 – Amplitudes harmônicas para o método domínio do Tempo



Fonte: Própria.

Para que se possa observar os espectro do sinal analisado, foi utilizado um recurso do *software*, para converter o sinal para modo da frequência e assim serem visualizadas as respectivas amplitudes harmônicas bem como os valores de corrente. Na Figura 28 a análise espectral das amplitudes pode ser vista com as amplitudes 1ª, 5ª, 7ª, 11ª e 13ª harmônica contidas no sinal de entrada para as correntes.

Figura 28 - Análise espectral do sinal no domínio do Tempo



Fonte: Própria.

Objetivando quantificar a distorção produzida pelas harmônicas, através do parâmetro Distorção Harmônica Total, observou-se que a taxa distorção harmônica de tempo contidas nas correntes (a)  $i_a$ , (b)  $i_b$  e (c)  $i_c$  apresentam valores sem diferença significativa para cada corrente de fase, conforme Tabela 4, bem como o erro dos valores adquiridos com a aplicação do método em relação aos obtidos com o uso do *software*.

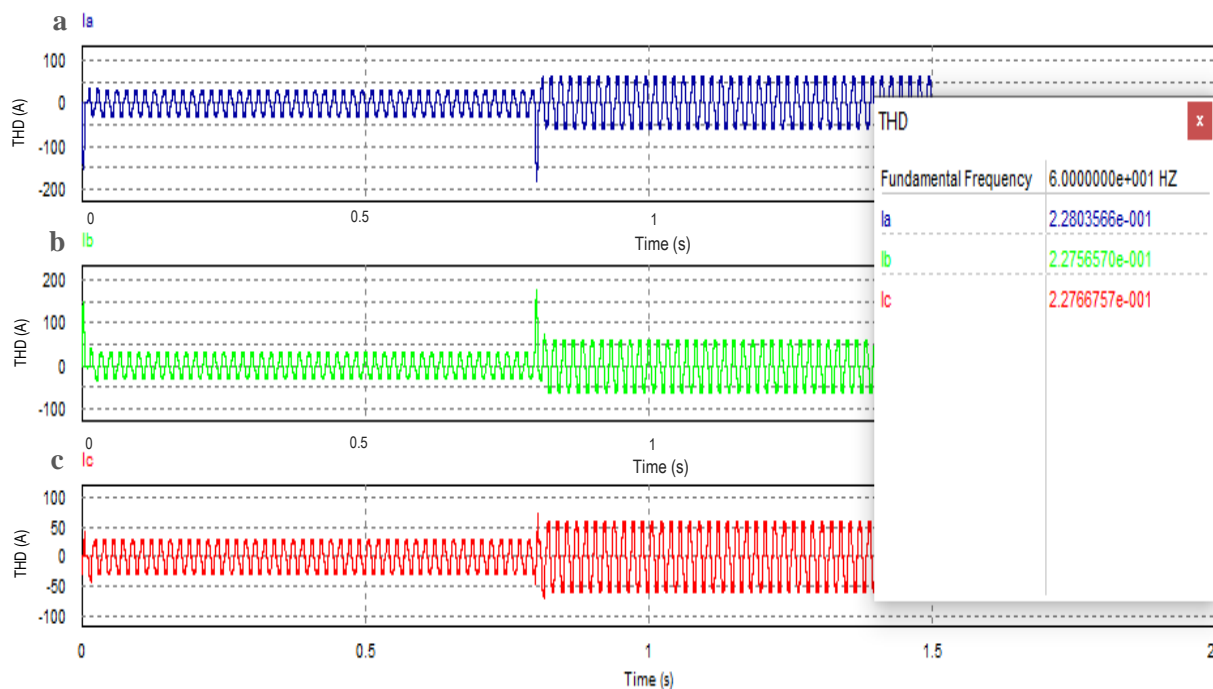
Tabela 4 – Resumo dos harmônicos contidos no sistema no domínio do Tempo.

Ordem harmônica	Fase A		Fase B		Fase C		Erro (%) Comparativo
	Dom.Freq. (Hz)	Dom.Temp (Hz)	Dom.Freq. (Hz)	Dom.Temp (Hz)	Dom.Freq. (Hz)	Corrente (Hz)	
1	60,024	60,024	60,024	60,024	60,024	60,024	0,0001
5	300,120	300,360	300,120	300,120	301,123	301,123	0,0016
7	420,168	420,168	420,168	420,168	420,168	420,168	0,0040
11	660,264	660,264	660,264	660,264	660,264	660,264	0,2831
13	780,3127	780,312	780,312	780,312	780,3123	780,3120	0,1435
<b>I_THD</b>	22,7701	22,803	22,7663	22,7565	22,7663	22,7667	0,2262



Para se verificar a distorção produzida pelas harmônicas na frequência fundamental e seus respectivos valores utilizou-se o recurso do próprio *software*, onde o mesmo plota no gráfico o respectivo valor de THD da frequência escolhida. No sistema desenvolvido temos as correntes da fase (a) uma taxa de 22,80%, fase (b) uma taxa de 22,75% e a fase (c) uma taxa de 22,76% de deformação da onda de corrente conforme ilustrado pela Figura 29 a taxa de distorção total harmônicas de frequência contidas nas correntes (a)  $i_a$ , (b)  $i_b$  e (c)  $i_c$ .

**Figura 29 - Total de distorção harmônica contida nas correntes (a)  $i_a$ , (b)  $i_b$  e (c)  $i_c$ .**



**Fonte: Própria.**

Para os métodos de detecção de harmônicas adotando a obtenção dos componentes  $dq$ , uma limitação que deve-se levar em conta é a necessidade de captação do ângulo do sinal lido, para que, em posse desse ângulo o algoritmo seja capaz de processar a lista de instruções e com isso obtenha as amplitudes harmônicas contidas no sinal (Asiminoael, L., Blaabjerg, F., Hansen, S.2007), (A.B. Grebene, 1971). A estrutura do algoritmo, deve possuir necessariamente filtros numéricos implantados, passa baixa ou passa alta, respectivamente, conforme especificidade da medição, podendo assim influenciar diretamente na dinâmica do sistema (Bhattacharya, S.; ET AL, 1998), (Goodwin e SIN,1984).

No entanto, conseguiu-se observar com este método que, se é possível obter tais coeficientes de maneira dinâmica, onde as harmônicas também serão detectadas com uma melhor rapidez no processamento ao se comparar com o método aplicando a TDFR.

### 4.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

No tocante à TDFR comparado com outros algoritmos que utilizam somente da TDF, o mesmo se apresenta relativamente ter um menor tempo de resposta. Porém, é notório que a sincronização do sistema de medição com a rede, demanda um esforço computacional relativamente alto, uma vez que a TDFR aplica as funções *seno* e *coseno*, que computacionalmente, são compostas de várias multiplicações, e apresentam uma limitação ao método, o fato de demandar um custo computacional expressivo, sendo, fundamentalmente, necessário a utilização de uma janela maior com 2 ciclos da fundamental até estabilizar as medições de acordo com a Figura 10. Todavia, esse intervalo depende, especificamente, do nível de distorção harmônica do sinal coletado.

Haja vista que, para a detecção no domínio da frequência, devido a lista de instruções conter cálculos matemáticos de custo computacional, relativamente elevado, sendo as operações de produto e divisão, o sistema apresentou-se com um maior tempo de resposta se comparado ao método no domínio do tempo, havendo a necessidade de que fosse ajustado a frequência de amostragem de 10KHz para 5KHz, pois após a inserção no código do cálculo para contabilizar o total de distorção harmônica, o controlador começou a travar o seu processamento, para as simulações com o método para o domínio do tempo manteve uma frequência de amostragem de 10KHz, não havendo alterações.

Entretanto se compararmos a outros métodos estudados, o método utilizado para distorção harmônica no tempo apresentou-se eficiente e eficaz, no tocante tão somente na precisão dos resultados, tendo um erro aproximando de 0,3% em relação aos valores obtidos em simulação. Havendo, ainda, a necessidade de ajustes no filtro passa-baixa ou até mesmo à implementação de um filtro digital, porém, este fator quem determinará será o tipo da aplicabilidade do sistema de detecção das harmônicas.

Para o domínio do tempo, aplicando o algoritmo PLL e o método de obtenção dos coeficientes  $d$  e  $q$ , foi notório que os valores obtidos graficamente se aproximaram acerca de cem por cento dos valores das harmônicas contidas no sistema de energia. Outro aspecto observado é que, a dinâmica do sistema se faz notória se comparada à outros métodos com a mesma aplicação, porém a especificidade de tal aplicação é que se torna determinante para o dimensionamento de tal método.

Contudo, ao efetuar uma analogia na aplicabilidade dos dois métodos, tem-se que, para sinais analisados em domínio da frequência o sistema se comporta menos dinâmico que para os sinais analisados em domínio do tempo. Sobretudo, deve ser enfatizado que, ao depender das variáveis de coleta a ser processadas pelo micro controlador, o sistema de medição se torna mais lento, principalmente em domínio da frequência, havendo necessidade de ajustes ou até mesmo substituição de componentes do sistema de medição, como anteriormente citado.

Porém, ao se levar em conta a precisão dos valores ora dimensionados e posterior medidos, os dois sistemas apresentam valores bem próximos aos de projeto e dentro dos padrões preconizados por norma, entretanto com o método *dq* síncrono o sistema de detecção se faz mais preciso.

É claro que ambos os métodos se mostraram eficazes na aplicação de detecção de harmônicas, no entanto, particularmente, por conta unicamente da lista de instruções usada na programação do DSP ser de fácil interpretação e implementação, o sistema para sinais em domínio do tempo pode ser mais acessível nas aplicações em ambientes industriais, inclusive por conta do tipo da fonte de alimentação do microcontrolador que é de 5V Vcc podendo ser inclusive energizado via cabo USB.

## 5. CONCLUSÃO GERAL

Neste trabalho estudou-se dois métodos para a detecção de harmônicas em correntes elétricas. No trabalho a Transformada Discreta de Fourier Recursiva e seus fundamentos matemáticos, foi aplicada para a obtenção da componente fundamental de sinais distorcidos, bem como a detecção das amplitudes harmônicas.

Durante as simulações experimentais, aplicando o método em sinais no domínio do tempo, para obtenção dos coeficientes  $d q$  e o ângulo entre fase utilizando o algoritmo do *PLL*, notou-se que foi necessário mudar alguns parâmetros, tais como passo de cálculo, bem como o tamanho da janela. Com essas aplicabilidades, pode-se observar o tempo de inserção do aumento de carga e tal efeito nas harmônicas e corrente do sinal medido.

Este trabalho apresentou bases teóricas científicas acerca de alguns dos métodos utilizados para detecção de harmônicas para tentar contribuir num melhor entendimento sobre o tema. Tratou-se, especificamente, de dois amplos cenários para aplicação dos métodos propostos, utilizando um método no domínio do tempo bem como no domínio da frequência, ambos os métodos para a obtenção do  $THD_i$  apresentaram valores praticamente iguais, e para obtenção de harmônicas os métodos apresentaram divergência em média de 1,2%.

É importante enfatizar que, o *hardware* utilizado no trabalho para o desenvolvimento do sistema de detecção das harmônicas foi um processador digital de sinais - DSP, sendo a ferramenta para envio dos dados via web e o GUI *Composer*, sendo ambos do mesmo fabricante.

Com o ambiente de análise dos *softwares* utilizados, é possível disponibilizar, continuamente, os resultados em uma página web com gráficos de vários tipos, caixas de textos, botões, ícones de status dentre outros inúmeros recursos existentes no site. Este software, encontra-se no site da Texas Instruments, onde se tem à opção de observar as medições efetuadas on-line. Tais recursos otimizam as possibilidades de um monitoramento remoto das medições à que se deseja supervisionar e acompanhar os seus respectivos níveis, especificidades e comportamentos.

Os resultados obtidos nesse trabalho contemplam o cenário de um sistema de energia elétrica ou assim denominado de um rede elétrica, pois contém cargas não-lineares ativas conectadas a rede, no qual a proposta consistia, em analisar esse tipo de carga e suas frequências harmônicas geradas na rede bem como o comportamento da frequência fundamental da rede elétrica.

## 5.1. TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos em simulação e experimentalmente, foram obtidos a partir do uso da bancada didática disponibilizada no LACA e o uso do DSP TMS320F28335. Os resultados validaram os métodos para detecção de harmônicas.

Assim, é importante que sejam desenvolvidos trabalhos futuros, onde 1) a realização de um sistema possa efetuar a correção das frequências harmônicas com a utilização das medições realizadas por este trabalho; 2) efetuar medições de outras grandezas elétricas existentes na rede de energia elétrica; 3) enviar os dados em formato de um gráfico de tendência com os dados coletados nas medições.

## 5.2. PUBLICAÇÕES ORIUNDAS DA PESQUISA

Durante a realização deste estudo foram submetidos dois trabalhos para publicação, sendo:

- Um artigo publicado na revista SODEBRAS – Soluções para o desenvolvimento do País, vol. 14, nº170, em Fevereiro de 2020.

## REFERÊNCIAS

- Akagi, H.; Kanazawa, Y.; Nabae, A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions Industrial Applications*, 1984. 625-630.080.
- A.A. Girgis, W.B. Chang, and E.B. Makram, "A digital recursive measurement scheme for online tracking of power system harmonics," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 6, no. 3, pp. 1153–1160, 1991.
- A.B. Grebene, "The monolithic phase-locked loop – a versatile building block", *IEEE Spectrum*, vol. 8, nº 3, pp. 38-49, Mar. 1971.
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2015. Resolução Normativa Nº 687, de 24 de novembro de 2015. Brasília – DF. Disponível em: <[http://www.lex.com.br/legis\\_27047031\\_RESOLUCAO\\_NORMATIVA\\_N\\_687\\_DE\\_24\\_DE\\_NOVEMBRO\\_DE\\_2015.aspx](http://www.lex.com.br/legis_27047031_RESOLUCAO_NORMATIVA_N_687_DE_24_DE_NOVEMBRO_DE_2015.aspx)> Acesso em 23/11/2018.
- ALI, S. A. "Modeling of Power Networks by ATP-Draw for Harmonics Propagation Study.", In: *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, Ano 2013, Vol. 14, No. 6, pp. 283-290, Dezembro, 2013, Disponível em : <<http://dx.doi.org/10.434313/TEEM.2013.14.6.283>> Acesso em 24/11/2018.
- ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional-PRODIST. [S.L], 2016. Disponível em < [http:// www.ameel.gov.br/area.cfm?idArea=82](http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82)>. Acesso em 24/11/2018.
- Asiminoael, L., Blaabjerg, F., Hansen, S. (2007). "Detection is key-Harmonic detection methods for active power filter applications". *Industry Applications Magazine - IEEE*, Vol. 13, pp. 22-33, doi: 10.1109/MIA.2007.4283506.
- Bhattacharya, S.; ET AL. Active filter system implementation. *IEEE Transactions Industrial Application*, 1998. 47-63.
- Bhattacharya, S.; ET AL. Flux based active filter controller. *IEEE Transactions Industrial Applications*, vol. 32, no. 3, 1996. 491-502.
- BOYLESTAD, R. L. Introdução à análise de circuitos. 10ª edição: Pearson Education do Brasil, 2004.
- Bucci, G., Fiorucci, E., Landi, "Carmin. Digital measurement station for power quality analysis in distributed environments". In: *Instrumentation and Measurement Technology Conference- IMTC 2003. Proceedings of the 18th IEEE* , vol.1, no., pp.368-373. doi:10.1109/TIM.2003.809
- Caetano, C. E. F. et al, "Development of a Low Frequency Magnetic Field and Harmonic Current Meter," 2016 International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, Brazil, 2016, pp 1-5. doi: 10.1109/ICHQP.20167783365.
- CAMPOS, A., WANDERLEY, A., and BIONDI, R., "Análise Experimental da Influência da Tecnologia Homeplug na Qualidade da Energia Elétrica.", In: *Revista Holos*, vol. 2, Ano 23, 2007.

CHAMPMAN, D. Harmônicas, causas e efeitos. Guia de aplicação de qualidade de energia. Procobre, 2002. Disponível em: <[http://procobre.org/pt/wpcontent/uploads/sites/2/delightfuldownloads/2014/07/QE07\\_GUIA\\_3\\_1\\_HARM%C3%94NICAS\\_CAUSAS\\_EFEITOS.pdf](http://procobre.org/pt/wpcontent/uploads/sites/2/delightfuldownloads/2014/07/QE07_GUIA_3_1_HARM%C3%94NICAS_CAUSAS_EFEITOS.pdf)>. Acesso em: 18/11/2018.

D. Angyal, A. Vágner and I. Juhász, "Algorithm of oscillometric blood pressure measurement applied on microcontroller," 2018 IEEE International Conference on Future IoT Technologies (Future IoT), Eger, 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/FIOT.2018.8325602.

Diniz, B. R. A., Evangelista, A. A., "Projeto e Desenvolvimento de um medidor digital de Energia Elétrica Monofásico para Aplicações Residenciais," 2017, In: Revista HOLOS, Ano 33, vol. 07, 2017, pp 55-68, Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=481554852006>>. Acesso em 24/11/2018.

Dugan, R. C. et. al. Electrical Power System Quality. 2ª. Ed [S.I]: McGraw Hill 2003.

Dugan, R. C., Mc Granaghan, M.F., Santoso, S. and Beaty h. W., (2004), Electrical Power System Quality. Mc Graw-Hill Companies, Second Edition.

ESTEVES, E. A. C., "Impactos na Qualidade da Energia Elétrica Provenientes do Rápido Crescimento da Demanda No Sudeste do Estado do Pará." Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Belém do Pará – PA, 2012.

F.P. Marafão, S.M. Deckmann, J. A. Pomilio, R.Q. Machado, "Metodologia de Projeto e Análise de Algoritmos de Sincronismo PLL", Eletrônica de Potência – Sobrap, vol. 10, nº 1, pp. 7-13, Junho 2005.

Faria, T. L. Filtro Ativo Paralelo Trifásico para Sistemas de Baixa Potência. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, 2009.

Fernandes, R. A. S. "Identificação de Fontes de Correntes Harmônicas por Redes Neurais Artificiais". Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade de São Paulo, Brasil, 2009.

Feuer, A.; Goodwin, G. C. Sampling in Digital Signal Processing and Control. 7ª Ed.: Universidade de Michigan, 2007. 541p.

Goodwin, G. C.; SIN, K. S. Adaptive Filtering, Prediction and Control. Prentice-Hall Information and System Sciences Series. Prentice-Hall, Inc., Englewood Clis, NJ, 1984.

Herman, B., Ahmad, M., Hussain, J. "Analysis of power system harmonics using singular value decomposition, least square estimation and FFT." 2014 In: International Conference on Energy and Policies-ICESP, pp 1-5, doi: 10.1109/ICESP.2014.7346973.

IEC 61000-4-30, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods, 2003.

IEC 61000-4-7, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques - Guia Geral de Medição e Instrumentação de Harmônicos e Interharmônicos para Sistemas Supridores de Energia e equipamentos conectados, 2003.

IEEE Comparison of Standards and PowerSupply Design Options for Limiting Harmonic Distortion in Power Systems. In: IEEE Transactions On Industry Applications. Vol. 29, pp 688 – 695, July 1993.

IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE Std 519-2014, In: (Revision of IEEE Std 519-1992), p. 1–29, June 2014.

IEEE Standards Board. IEEE Std 519 – 1992: Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. 1992.

J. Jacobs, D.O. Detjen, and R.W. De Doncker, “An overview of methods to determine the harmonics in three-phase systems,” in Proc. IEEE Young Researchers Symp. Electrical Power Engineering Distributed Generation, 2002. S. Rechka, T. Ngandui.

L. Asiminoaei, F. Blaabjerg and S. Hansen, “Detection is Key,” IEEE Industry Applications Magazine, 2007, pp. 22-33.

LIMA, D. D. S. “Desenvolvimento de um simulador de Redes Elétricas para Estudos da Propagação de Harmônicos.” Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Belém do Pará – PA, 2016.

Lopez, R. A. Qualidade na energia elétrica: Efeitos dos distúrbios, diagnósticos e soluções. 2. Ed. São Paulo: ARTLIBER, 2013.

Macias, J. A. R.; Exposito, A. G. Efficient Moving-Window DFT Algorithms. In: IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, Vol. 45, nº 2, 1998. pp. 256-260.

Maia, R. M., “Caracterização das Variações de Tensão de Curta Duração e seus Impactos em uma Planta da Indústria Alimentícia.” Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Belo Horizonte, MG, 2011.

Marafão, F.P.; Mattavelli, P.; Buso, S.; Deckmann, S. M. Repetitive-based Control for Selective Active Filters Using Discrete Cosine Transform. In: Brazilian Power Electronics Conference (COBEP). 2003.

Marcelino, C. E. J.; Costa, C. C. T.; Morais, R. R. P. Protótipo de um medidor de energia elétrica inteligente: Aplicado a unidades consumidoras residenciais. In: Simpósio internacional de gestão de projetos, inovação e sustentabilidade, 5, 2016, São Paulo - SP.

Martinho, E., Distúrbios da energia elétrica. 3ª edição: Érica, 2009. In: ISBN, no. 9788536502311.

Mcgrath, B. P.; Holmes D. G.; Galloway, J. Power Converter Line Synchronization Using a Discrete Fourier Transform (DFT) Based on a Variable Sample Rate. In: IEEE TRANSACTIONS ON POWER Electronics ELECTRONICS. Vol. 20, nº 4, 2005. pp. 877-844.

McGrath, B. P.; Holmes, D. G. and Galloway, J (2005). Power Converter Line Synchronization Using a Discrete Fourier Transform (DFT) Based on a Variable Sample Rate. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, no. 4, pp. 877-844.

O. Vermesan e P. Friess, Internet of Things: Converging Technologies for Smart Environments and Integrated Ecosystems, Roma: River, 2013, p. 348.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. Discrete-Time Signal Processing. Second. New Jersey: Prentice Hall, 1998. ISBN 0-13-754920-2.

OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S. Sinais e Sistemas. Segunda. [S.l.]: Pearson Education do Brasil, 2010. ISBN 978-85-7605-504-4.

Pádua, M. S. Técnicas Digitais para Sincronização com a Rede Elétrica, com Aplicação em Geração Distribuída. 2006. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2006.



Pádua, Marcelo S.; Deckmann, Sigmar M.; Lopes, Amauri; Moreira, Alexandre C.; Marafão, Fernando P. Algoritmo Recursivo da TDF para a Identificação da Frequência e da Fase da Tensão da Rede. In: IEEE 7TH International Conference On Industrial Applications (INDUSCON). Recife, Brasil, 2006.

Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional –PRODIST, Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica, 2015. Disponível em <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo5\\_F.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo5_F.pdf)>. Acesso em: 27/11/2018.

Radil, T.; Ramos, P., “Power quality detection and classification method for IEC 61000-4-30 class a instruments.” 2010 In: IEEE International Instrumentation and Technology - I2MTC, pp. 691-696, doi: 10.1109/IMTC.2010.5488085.

Rocha, A. P. , “Plataforma de Dados e Algoritmo não Embarcado para Medição de Distorção Harmônica na Rede Elétrica.” Trabalho de conclusão de curso Bacharelado em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2016.

S. Bhattacharya, T.M. Frank, D.M. Divan, and B. Banerjee, “Active filter system implementation,” IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 4, no. 5, 1998.

S.C. Gupta, “Phase-Locked Loops”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, n° 2, pp. 291-301, Feb. 1975.

Santos, et al. Conservação de energia: Eficiência energética de equipamentos e instalações. 3ª ed. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2006.

Semlyen, A., Shlash, M. (2000). “Principles of modular harmonic power flow methodology”. In: Proceedings Generation Transmission and Distribution- IEEE, Vol.147, No.1., pp. 1-6. Doi: 10.1049/ip-gtd: 20000003.

Silva, D. H. de J. Processamento de Sinais Para Monitoramento de Vibrações em Unidades Geradoras Hidrelétricas. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte –MG, 2013.

SILVA, L. C. E. “Efeitos das Distorções Harmônicas (Tensões e Correntes) e Desequilíbrios (Tensões) em Medidores Eletrônicos Trifásicos de Energia Elétrica Ativa.” Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira - SP, 2008.

SILVA, M. L. P. E et al, “Development of a Monitoring System for Electrical Energy Consumption and Power Quality Analysis,” Proceedings of the World Congress on Engineering, London, UK, vol. 1, July 2017, ISSN: 2078-0966.

Sousa, R. P. “Desenvolvimento de um dispositivo para medição de energia elétrica com análise de distorção Harmônica e Fator de Potência.” Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Centro Universitário de Maringá - UniCesumar, Maringá - PR, 2017.

Souza, A. W. et al, “Power Quality, Smart Meters and Additional Information from Different Power Terms,” 2015, IEEE Latin America Transactions, vol. 13, no. 1, pp 158-165, JAN. 2015.

V. Kaura, V. Blasko, "Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions," IEEE Transactions on Industry Applications, vol.33, no.1, pp.58-63, Jan/Fev 1997.

WU, J. C.; JOU, H. L. Simplified control method for the single-phase active power filter. IEE Proceedings - Electric Power Applications, v. 143, n. 3, p. 219-224, Maio 1996.

XAVIER, A. E. P. "Analisador da Qualidade de Energia baseado em DSP. " Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa–IST LISBOA, PORTUGAL, 2011.

Yadav, P., Chavda, N. V. " Development of Power Monitoring and Analysis System based on Web Server," 2014, International Journal of Engineering Development and Research-IJEDR, vol. 2, n. 2, pp278-282, ISSN: 2321-9939.

Zodape, S. M, Kamat, N. V."Use of Smart Metering for Resolving Harmonic Issues," 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), Chennai, India, 2016, pp 3-5. doi:10.1109/ICEEOT.2016.7755457.