

# Medidor de harmônicas em instalações industriais aplicando a Transformada discreta recursiva de Fourier em hardware embarcado e IoT

## Harmonic meter in industrial installations applying the discrete Fourier recursive transform in embedded hardware and IoT

DOI:10.34117/bjdv7n5-220

Recebimento dos originais: 07/04/2021

Aceitação para publicação: 03/05/2021

### **Moisés Hamssés Sales de Sousa**

Mestre em Engenharia elétrica  
Instituto federal da Paraíba  
E-mail: moiseshamsses@yahoo.com.br

### **Juan Pereira Silva**

Bacharel em Engenharia elétrica  
Universidade federal do Amapá  
E-mail: juan.pereira.silva@hotmail.com

### **Francivaldo Balbino da Silva**

Licenciado em Química  
Universidade Estadual da Paraíba  
E-mail: francivaldoquimica@yahoo.com.br

### **Ayla de Assunção Neris**

Licenciatura em Matemática  
Faculdade Madre Tereza - AP  
E-mail: Ayla.neris33@gmail.com

### **Ezenhouer Carlos Araújo silva**

Tecnólogo em Automação Industrial  
Faculdade SENAI da Paraíba  
E-mail: ezenhouer@gmail.com

## **RESUMO**

No trabalho será proposto a aplicação de dois métodos de processamentos de sinais, tais como a Transformada rápida de Fourier - FFT, a Discreta de Fourier - DFT, bem como a Discreta recursiva de Fourier - TDFR ambas no domínio da frequência. Para tais fins, pretende-se utilizar um hardware dedicado, sendo um processador de sinais digitais - DSP. Os resultados experimentais serão obtidos por uma plataforma de desenvolvimento, onde será possível a aquisição das medições das amplitudes harmônicas de corrente contidas na rede elétrica trifásica analisada. Estas medições serão avaliadas e enviadas usando recursos de Internet das Coisas (IoT, do inglês Internet of Things).

**Palavras-chave:** Transformada rápida de Fourier, Processador de sinais digitais, Harmônicas, Internet das coisas, transformada de Plack.

## ABSTRACT

In the work it will be applied to two signal processing methods, the Fourier Fast Transform - FFT, Fourier Discrete - DFT, as well as the Recursive Discrete Fourier - TDFR has no frequency domain. For these fins you can use dedicated hardware, being a digital signal processor - DSP. The results of the experiments will be selected by a development platform, where it will be possible to acquire the measurements of amplitudes detrimental to the direct current in the analyzed three phase electric grid. These measurements will be evaluated and selected using the Internet of Things (IoT).

**Keywords:** Fast Fourier Transform, Digital Signal Processor, Harmonics, Internet of Things, Plack Transform.

## 1 INTRODUÇÃO

A descrição dos conceitos de Qualidade da Energia Elétrica-QEE está atrelada à vários fenômenos eletromagnéticos que causam problemas nas redes de energia elétrica que fornecem o vetor energético aos consumidores de energia elétrica. A abordagem dos conceitos fundamentais de QEE faz-se necessária devido ao principal enfoque deste documento, consistindo na identificação de fenômenos relacionados à qualidade do produto comumente encontrados em sistemas elétricos industriais FERNANDES, R. A. S (2009).

A partir da segunda metade da década de 80, esse tema vem se tornando objeto de estudos e instrumento de interesse das diversas classificações de consumidores de energia elétrica: consumidores industriais, residenciais e comerciais bem como as concessionárias fornecedoras de energia elétrica. Este, sendo um tema que abrange uma série de fenômenos e distúrbios que possivelmente podem ocorrer nos sistemas elétricos em baixa, média e alta tensão Fernandes, R. A. S (2009).

Esse aumento no interesse em QEE e suas vertentes ASIMINOAL, L (2007), se consolidou após o acréscimo e uso de equipamentos eletrônicos como:

televisores, computadores, refrigeradores, condicionadores de ar, impressoras, entre outros equipamentos elétricos, que são denotados de cargas, apresentando características elétricas não lineares e sensíveis a distúrbios existentes no sistema elétrico de potência – SEP. Nos estabelecimentos de assistência à saúde TONIELO, E. et al. (2019) ainda se tem uma maior preocupação para com os distúrbios, devido ao grau de complexidade dos serviços ali prestados. Segundo SEMLYEN, A. et al (2000) a presença de cargas eletrônicas tem aumentado consideravelmente nos últimos anos, o que tem possibilitou o surgimento de uma nova área dentro de um contexto industrial brasileiro à QEE.

Devido a esse fato, observou-se a elevação nos níveis de distorção harmônica, as quais podem degradar a qualidade de energia elétrica. ESTEVES, E. A. C. (2012) a elevação contínua dos níveis de distorção harmônica nas redes de distribuição causa preocupação às concessionárias de energia elétrica, pois são devido aos comportamentos distintos das cargas elétricas lineares ou não-lineares conectados comumente a um só alimentador elétrico ou individualmente na mesma fonte de alimentação que definem a característica da harmônica, quanto a sua ordem e especificidade da mesma, sendo de tensão ou de corrente elétrica.

Diante do exposto, o projeto propõe o desenvolvimento de um dispositivo de detecção inteligente das amplitudes harmônicas podendo ser aplicado em uma rede de alimentação trifásica convencional. CHAMPMAN, D (2002) uma tensão ou corrente harmônica pode ser definida como um sinal senoidal cuja frequência é múltipla inteiro da frequência fundamental do sinal de alimentação, o que provoca deformações nas formas de onda presente no sistema elétrico analisado.

O objetivo desse trabalho é a aplicação de dois métodos para a detecção para posterior analisar os níveis de harmônicas numa rede elétrica trifásica, com cargas não-lineares a ela conectadas, sendo o primeiro método no domínio do tempo e o segundo no domínio da frequência.

O artigo está composto por cinco seções incluindo esta. Na seção dois pode ser verificada o referencial teórico aplicado no desenvolvimento da pesquisa. Na seção três está contido a metodologia aplicado no desenvolvimento do trabalho, na quatro consta os resultados obtidos, na última que é a quinta seção traz principais conclusões acerca do trabalho desenvolvido.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Ao se falar em qualidade de energia elétrica ou a falta da mesma, deve-se levar em conta vários aspectos científicos e normativos para se ter um embasamento teórico suficiente à cerca desse tema. Entretanto um dos parâmetros que vem sendo muito difundido no âmbito acadêmico, seria a aplicação de métodos que viabilizem e torne os sistemas de medição ou detecção dos respectivos parâmetros da qualidade de energia elétrica mais dinâmicos e ao mesmo tempo com maior nível de precisão.

Dentro desse contexto destaca-se a transformada discreta de Fourier e seus recursos sendo as TDFR e a DFT, que se dão com uma transformação matemática para sinais discretos, que munindo o sistema de informações das amplitudes das harmônicas

selecionadas, para uma melhor performance do sistema de detecção, a TDFR vem sendo muito utilizada no domínio da frequência como ferramenta para detecção de componentes harmônicas da rede elétrica. Sua função é obter a representação discreta no domínio da frequência a partir de sinais periódicos temporais amostrados segundo OPPENHEIM, A. V. et al. (1998).

Outro método que é utilizado para a detecção é o PLL com seus algoritmos de sincronismo de fase dq, ajustando a frequência de amostragem através o controle de malha fechada para garantir que haja o sincronismo das componentes harmônicas e que se possa obter as amplitudes harmônicas. Sua principal desvantagem está no tempo de resposta transitória do sistema, que em alguns casos pode ter duração de vários ciclos da frequência fundamental do sinal de entrada MARAFÃO, F.P et al (2003).

A importância de um algoritmo de detecção das amplitudes harmônicas, se dá pelo fato que o mesmo é fundamental para processar os sinais medidos bem como os recursos matemáticos que são inseridos como métodos para medição dos sinais, sendo que para cada método sua eficiência e robustez se dá de acordo com cada especificidade no que está a se medir e em que tipo de sistema foi conectado. Um maior desafio dos projetistas, está em viabilizar a otimização do sistema de medição e assim reduzir o esforço computacional demandado durante os cálculos das transformadas, permitindo assim a detecção das harmônicas no domínio da frequência com a Transformada de Fourier cuja a ideia principal do trabalho desenvolvido por OPPENHEIM, A. V. et al. (1998).

O seu uso se faz muito comum, quando se quer transformar um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, e com essa conversão efetuar análises das harmônicas.

Esta transformada pode ser derivada a partir da função contínua através da amostragem, tipo utilizado de janelamento por exemplo que tem uma precisão e dinâmica operacional mais ou menos elevada de acordo com o tipo de janela aplicada na transformada, técnicas de filtragem, seguido de amostragem no modo da frequência SILVA, D. H. de J (2013) e J. Jacobs, et al, (2002). A Figura 1 abaixo, traz as etapas básicas executadas pela Transformada Discreta de Fourier:

Figura 1 – Etapas básicas executadas pela FFT



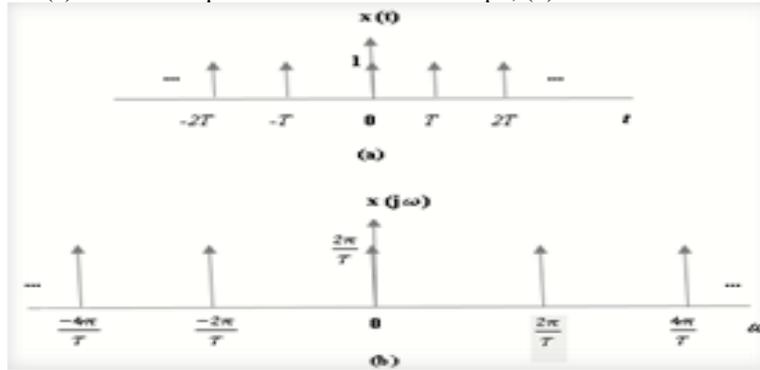
Fonte: Adaptado de Oppenheim, A. V. et al. (1998).

No diagrama de blocos descrito na figura 1, traz o filtro *anti-aliasing*, que é utilizado no trabalho para tentar minimizar, alguns efeitos causados pelo número de vezes que se repete o processamento digital do sinal. Utilizando esse tipo de filtro pode-se eliminar todo o espectro indesejado de frequências no sinal medido que esteja fora da faixa a ser objeto de análise, bem como retira as frequências  $\omega_m < \omega_s/2$ . Após o sinal filtrado  $X_c(t)$  o mesmo é enviado para o conversor *ADC*, onde o sinal contínuo é transformado em uma sequência, durante a filtragem em  $H_{as}(j)$  a mudanças nos componentes de Fourier, e nos de entrada da frequência, bem como na banda de transição, pois o filtro não admite ser ideal e a resposta do mesmo resulta nessa mudança. Durante a conversão do sinal  $X_c(t)$  para as amostras  $X[n]$ , é representado no domínio da frequência com sua periodicidade e normalização da frequência conforme é observado na Equação (1):

$$V(e^{j\omega}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X e^{j\theta} W(e^{j(\omega-\theta)}) d\theta \quad (1)$$

Em seguida, acontece o janelamento que no trabalho proposto foi desenvolvido no algoritmo de programação uma janela deslizante, onde tendo a sequência  $X[n]$  gerada, a mesma é multiplicada pela janela de duração finita, onde temos a seguinte sequência:  $v[n] = \omega[\eta] \chi[\eta]$ . O efeito desse janelamento é uma convolução. Com isso, a Transformada de Fourier tem uma notação de um trem de impulsos periódicos com período igual a  $T$  numa representação gráfica no domínio do tempo e um trem de impulsos deslocados  $2\pi/T$  no domínio da frequência conforme abaixo na Figura 2.

Figura 2 – (a) Trem de impulsos no domínio do tempo, (b) e no domínio da frequência



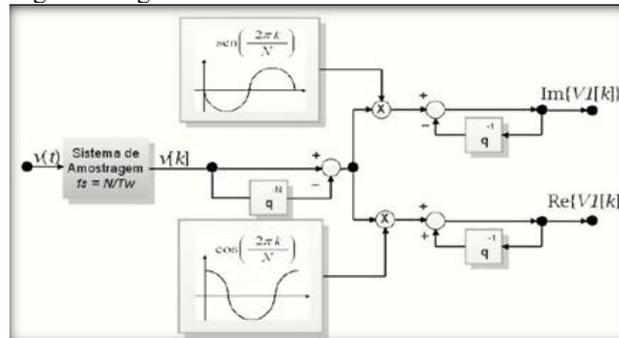
Fonte - Propria

Assim como temos na convolução com um impulso, simplesmente atuando de tal forma à deslocar o sinal em função do tempo, se somente si assumir a seguinte condição na igualdade:  $[X(j\omega) * \delta(\omega - \omega_0) = X(j(\omega - \omega_0))]$ , como podemos observar disposto na Equação (2):

$$X_p(j\omega) = \frac{1}{T} \sum_{-\infty}^{\infty} (X(j(\omega - k\omega_0))) \quad (2)$$

Daí, temos quem  $X_p$  é a função de  $\omega$ , periódica que advém de uma sobreposição das réplicas deslocadas de  $X_p$ . Para a obtenção da *RDFT* temos que inserir no algoritmo de programação matematicamente os cálculos da parte real e imaginária para se obter a frequência fundamental, contudo temos que, separando a parte real da imaginária e empregando o operador de atraso q-1, segundo Goodwin, G. C. et al (1984) e FEUER, A. et al (2007), temos que o algoritmo da *RDFT* se dá da forma a seguir demonstrado na figura 3, abaixo:

Figura 3- Algoritmo da Transformada de Fourier recursiva



Fonte - Própria

Para aplicação computacional do algoritmo, é imprescindível que o mesmo armazene um sempre os últimos valores de N posições, oriundo do sinal no domínio do

tempo. Quem assumirá os valores a cada conjunto com  $n$  passos de cálculo será as funções seno e cosseno, tornando mais dinâmica a execução da lista de instruções do algoritmo. Na programação, desenvolvida em C++ a seguinte expressão para obtenção da frequência fundamental de cada uma das componentes do sistema trifásico e suas respectivas amplitudes harmônicas que a compõem, temos para a efetuação dos cálculos matemáticos as seguintes expressões abaixo, sendo a parte imaginária e a real assim denominadas para a função seno e cosseno. Abaixo segue a lista de instrução:

$$X_{re}[k] += ia * \cos(2 * \pi * k * n / ((double)N)) \quad (3)$$

$$X_{im}[k] += ia * \sin(2 * \pi * k * n / ((double)N)) \quad (4)$$

$$X_{re}[k] -= Ia[n] * \cos(2 * \pi * k * n / ((double)N)) \quad (5)$$

$$X_{im}[k] -= Ia[n] * \sin(2 * \pi * k * n / ((double)N)) \quad (6)$$

Ambas são obtidas como demonstrado na decomposição efetuada pelo algoritmo na figura 3.

Temos que alguns métodos para detecção de harmônicas tem um melhor desempenho e rapidez, aplicando os sinais no domínio do tempo, as detecções se mostram mais rápidas em relação ao custo computacional do que com os métodos em domínio da frequência.

Para uma maior precisão do sistema de detecção das amplitudes harmônicas, na linguagem da programação o algoritmo necessariamente deve possuir filtros numéricos implantados sendo os mesmos, passa baixa ou passa alta respectivamente de acordo com a especificidade da medição, e a capacidade de processamento deve ser de certa forma com mais rapidez devido ao excesso número de cálculos matemáticos, esse por fim, influencia diretamente na dinâmica do sistema, o tornando mais preciso e eficiente.

### 3 METODOLOGIA

Nesta seção, são apresentados os materiais utilizados como objetos de estudo na pesquisa e a metodologia aplicada para execução das simulações computacionais.

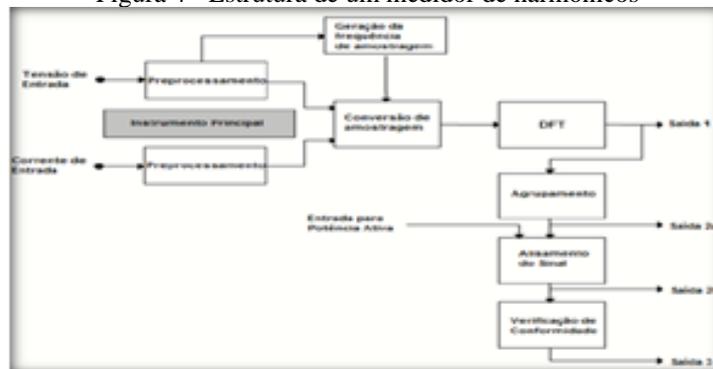
Os sistemas de detecção de amplitudes harmônicas foram abordados durante a pesquisa apresentada. As respectivas simulações foram realizadas afim de comparar os métodos de detecção das amplitudes no domínio do tempo e em domínio da frequência, ambos foram simulados com a utilização do *software* PSIM<sup>®</sup> para verificar a aplicabilidade dos métodos e em seguida foi utilizado um Processador digital de sinais-

DSP da Texas Instruments® que por meio do *software* Code composer® teve executada sua programação, para que pudesse efetuar as respectivas medições das grandezas elétricas, condicionar os sinais e efetuar as listas de instruções dos respectivos métodos para a detecção das amplitudes a[harmônicas nos sinais coletados.

Após os sinais condicionados e compilados no *DSP*, um arquivo será criado e enviado para uma página na http na internet para a ferramenta Gui composer onde será desenvolvida a uma interface de fácil manuseio da própria Texas Instruments® de forma à visualizar as amplitudes harmônicas e os níveis de tensão da rede elétrica onde o sistema de detecção estiver conectado.

Sobretudo devemos saber que de acordo com a Comissão Eletrotécnica Internacional - IEC 61000-4-7(2003), um instrumento de medição das amplitudes harmônicas, em vias gerais apresenta a seguinte estrutura disposta na Figura 4, compreendendo dos seguintes itens a seguir relacionados: conversores analógicos digitais, unidade de janelamento caso necessite, circuitos de entrada com filtros Antialiasing, unidade de amostragem e quantização do sinal, sin- cronização e processador da *FFT* que irá fornecer os coeficientes de Fourier  $a_m$  e  $b_m$ .

Figura 4 - Estrutura de um medidor de harmônicos



Fonte: IEC 61000-4-7 (2003).

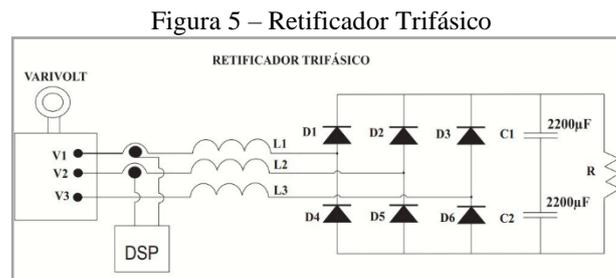
Para que ocorra o sincronismo da janela de tempo durante a medição é necessário que transcorra entre 10 e 12 ciclos, determinados pela frequência do sistema analisado sendo de 50 Hz ou 60 Hz de acordo com IEC 61000-4-7 (2003).

O processador digital de sinais – DSP, é dito como de baixo custo para otimização de sistemas se comparados a outros processadores semelhantes bem como à uma gama de aplicações das mais diversas, no tocante controle de acionamento de motores elétricos, chaveamento de inversores, sistemas digitais, apresenta um excelente compilador para linguagens de alto nível, controle aplicado em motores AC e CC

utilizando o método sensorless, dentre outras vertentes. No protótipo o processador tem como fundamental função gerenciar os dados coletados durante a aquisição, efetivação dos cálculos e modelos matemáticos bem como dar a resposta digitalizada ao usuário do sistema.

Os dados coletados e devidamente processados serão enviados via rede de comunicação sendo monitorados, visualizados e analisados por meio da interface em aplicativo de fácil acesso que será desenvolvida na versão web do GUI composer ferramenta da Texas Instruments, fixo em um computador que exibirá os dados referentes ao sistema de medição de harmônicas.

Para simular os efeitos gerados na rede de energia elétrica por causa do comportamento linear e não-linear das cargas inseridas nos sistemas de distribuição de energia, foi utilizado no trabalho um retificador trifásico. Abaixo na Figura 5 é mostrado o diagrama do sistema desenvolvido para detecção de harmônicas:



Fonte – Própria

Os retificadores trifásicos estão em sua maioria em circuitos para acionamento de motores elétricos em geral, conversores cc/ca, em sistemas de controle dinâmico para motores dentre outras inúmeras aplicações para os mesmos.

Dá-se o nome de carga linear ao circuito elétrico resultante da associação de um resistor mais um indutor, ou resistor com capacitor, o resultado da alimentação de tensão com 60 Hz deve apresentar uma corrente de 60 Hz, pois os elementos lineares são os resistores, capacitores e indutores.

São denominados circuitos não-lineares pois produzem correntes e frequências diferentes da frequência da rede CHAMPMAN, D.(2002), pois ao se alimentar com uma tensão de um sinal de 60 Hz de frequências e produz uma corrente múltipla na ordem de 5 à 7 vezes da frequência fundamental da rede. Para que se possa desenvolver um sistema de medição eficaz e capaz de efetuar as medições dessas frequências múltiplas

da fundamental, se faz necessário que seja levado em conta os indicadores de QEE contidos na norma IEC 61000-4-7.

Contudo para que seja feito um diagnóstico das harmônicas, deve-se levar em conta algumas premissas fundamentais para obter eficiência e eficácia em relação ao método implementado, na Tabela 1 está contido algumas premissas à serem observadas para a concepção de um sistema de medição das amplitudes harmônicas.

#### 4 RESULTADOS DA PESQUISA

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações utilizando o simulador Psim e os resultados dos experimentos com o DSP, visando comparar os dados obtidos via simulações com as medições efetuadas experimentalmente, inserindo um sinal de entrada no sistema contendo amplitudes harmônicas e comparando com os gráficos das decomposições das mesmas em outros gráficos individuais, verificando assim se as mesmas convergem para o gráfico do sinal de entrada do sistema de detecção gerado nas simulações.

##### 4.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Para aplicação do método de detecção das amplitudes harmônicas foi obtido através do software CCS com o DSP aplicando para o sinal no domínio da frequência foi necessário aplicar a TDFR com janela deslizante, abaixo segue os gráficos com o sinal de entrada do sistema, obtido com o CCS através das leituras efetuadas pelo DSP.

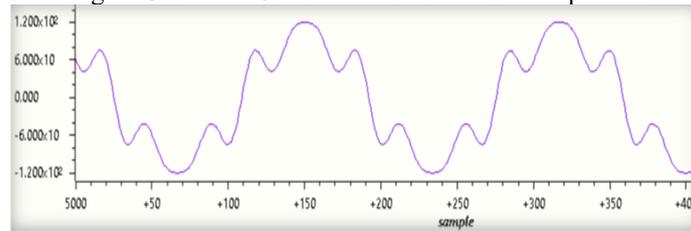


Fonte: Elaboração própria



Fonte: Elaboração própria

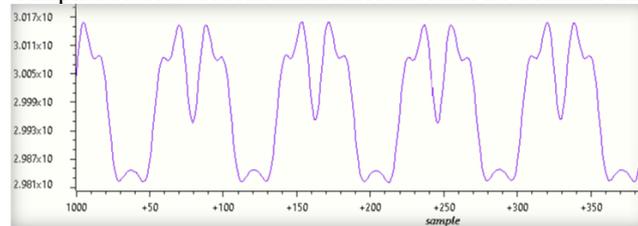
Figura 8 – Tensão3 de entrada no modo da frequência



Fonte: Elaboração própria

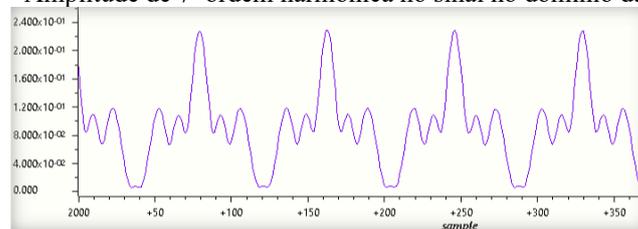
Nas figuras 9, figura 10 e figura 11 e figura 12, estão os gráficos com as amplitudes harmônicas obtidos no CCS com o DSP no domínio da frequência. Os mesmos trazem as amplitudes de quinta, sétima, décima primeira ordem contidas no sinal de entrada.

Figura 9 – Amplitude de 5ª ordem harmônica no sinal no domínio da frequência



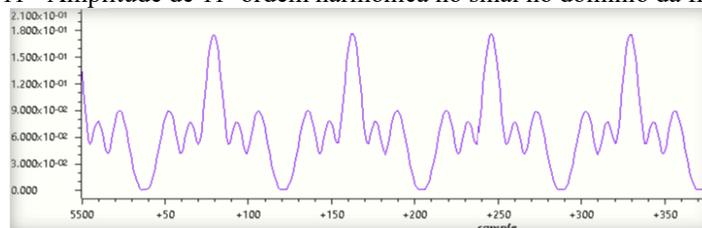
Fonte: Elaboração própria

Figura 10 – Amplitude de 7ª ordem harmônica no sinal no domínio da frequência



Fonte: Elaboração própria

Figura 11 - Amplitude de 11ª ordem harmônica no sinal no domínio da frequência



Fonte: Elaboração própria

## 5 CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES

Nota-se que para o método aplicado, ora por meio de simulação com o uso do software PSIM utilizado também pra projetar e dimensionar o sistema de detecção, afim de verificar sua confiabilidade e à aplicabilidade do método no domínio da frequência,

e com isso ser possível inserir a programação contendo o método de detecção de harmônicas em um micro controlador DSP Texas.

Após as simulações e experimentos realizados em ambiente experimental no laboratório constatou-se que o sistema de detecção de harmônicas apresenta valores bem próximos dos estimados em projeto do sistema de detecção, chegando aproximadamente a ter uma similaridade de 99% dos valores obtidos em simulações e comparado com os valores obtidos com o uso do DSP.

Contudo é importante enfatizar que o método para detecção das harmônicas no domínio da frequência se faz em vias gerais relativamente dinâmico para tal aplicação, pois demanda um custo computacional relativo. No entanto o método para domínio da frequência se faz relevante pois é muito eficiente na detecção.

## REFERÊNCIAS

- 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.
- AKAGI, H. et al. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. **IEEE Transactions Industrial Applications**, 1984. pp. 625-630.
- 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. Fluxbased active filter controller. **IEEE Transactions Industrial Applications**, vol. 32, no. 3, 1996. pp. 491-502.
- CHAMPMAN, D. Harmônicas, causas e efeitos. **Guia de aplicação de qualidade de energia. Procobre**,2002.Disponível em:[http://procobre.org/pt/CAUSAS\\_EFEITOS.pdf](http://procobre.org/pt/CAUSAS_EFEITOS.pdf)>. Acesso em: 18/11/ 2019.
- ESTEVEES, E. A. C., “Impactos na Qualidade da Energia Elétrica Provenientes do Rápido Crescimento da Demanda No Sudeste do Estado do Pará. ” Dissertação – **Universidade Federal do Pará, Belém do Pará** – PA, 2012.
- FERNANDES, R. A. S. “Identificação de Fontes de Correntes Harmônicas por Redes Neurais Artificiais”. Dissertação - Universidade de São Paulo, Brasil, 2009.
- 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.
- FEUER, A.; GOODWIN, G. C. Sampling in Digital Signal Processing and Control. 7ª Ed.: Universidade de Michigan, 2007. 541p.
- IEC 61000-4-7, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques - Guia Geral de Medição e Instrumentação de Harmônicos e Inter-harmônicos para Sistemas Supridores de Energia e equipamentos conectados, 2003.
- J. Jacobs, *et al* “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.
- Marafão, F.P. et al. Repetitive-Based Control For Selective Active Filters Using Discrete Cosine Transform. In: **Brazilian Power Electronics Conference (Cobep)**. 2003.
- OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S. Sinais e Sistemas. Segunda. [S.l.]: Pearson Education do Brasil, 2010. ISBN 978-85-7605-504-4.
- 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. Dói: 10.1049/ip-gtd:20000003.

SILVA, D. H. de J. Processamento de Sinais Para Monitoramento de Vibrações em Unidades Geradoras Hidrelétricas. Dissertação Universidade de Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

S. Bhattacharya, *et al* “Active filter system implementation,” **IEEE Trans. Ind. Applicat.**, vol. 4, no. 5, 1998.

TONIELO, E. *et al*. Instalações elétricas de equipamentos eletro médicos: Avaliação dos impactos da qualidade de energia em Instituições de saúde. **Revista Sodebras** [on line]. v. 14, n.158, fev. /2019, p. 41-46. ISSN 1809-3957. Disponível em:<http://www.sodebras.com.br/edicoes/N117.pdf>. Acesso em 04 dez. 2019.

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.