

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
UNIDADE DE PÓS-GRADUAÇÃO, EXTENSÃO E PESQUISA
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E TECNOLOGIA EM SISTEMAS
PRODUTIVOS

José Leovaldo da Silva Mello

TÍTULO:

**Desenvolvimento de Eletrônica Embarcada para Detecção de Harmônicos em
Instalações Elétricas Visando a Otimização da Energia dos Processos Produtivos**

José Leovaldo da Silva Mello

TÍTULO:

Desenvolvimento de eletrônica embarcada para detecção de harmônicos em instalações elétricas visando a otimização da energia dos processos produtivos

Projeto de Dissertação apresentado como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, no Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos, sob a orientação do Prof. Dr. Humber Furlan.

São Paulo

Junho/2020

M527d Mello, José Leovaldo da Silva

Desenvolvimento de eletrônica embarcada para detecção de harmônicos em instalações elétricas visando a otimização da energia dos processos produtivos / José Leovaldo da Silva Mello. – São Paulo: CPS, 2020.

71 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Humber Furlan

Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos). – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, 2020.

1. Sistemas Produtivos. 2. Distorção harmônica. 3. Filtro ativo. 4. Paralelo de potência. 5. Análise de Fourier. I. Furlan, Humber. II. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. III. Título.

José Leovaldo da Silva Mello

TÍTULO:

Desenvolvimento de eletrônica embarcada para detecção de harmônicos em instalações elétricas visando a otimização da energia dos processos produtivos

Prof. Dr. Humber Furlan

Prof. Dr. Eduardo Barbosa

Prof. Dr. Luiz Antônio Rasia

São Paulo, 24 de junho de 2020

A minha amada esposa Cláudia pelo apoio incondicional. Aos meus filhos José e Ana que me estimularam e compreenderam minha ausência pelo tempo dedicado aos estudos.

AGRADECIMENTOS

Ao mundo por estar em constante mudança. Mudanças essas que me fazem cada vez mais forte para seguir aprender e continuar caminhando.

Ao Centro Paula Souza, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior.

Ao Prof. Dr. Humber Furlan, meu orientador e exemplo profissional, por ter me acolhido, orientado e pela confiança. E sobretudo por seu exemplo de alegria no exercício de seu trabalho.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, a todos o meu sincero e profundo: Muito Obrigado!

Reze e trabalhe, fazendo de conta que esta vida é um dia de capina com sol quente, que às vezes custa muito a passar, mas que sempre passa. E você ainda pode ter um muito pedaço bom de alegria (...) Cada um tem a sua hora e a sua vez: você há de ter a sua.

(Guimarães Rosa)

RESUMO

MELLO, J. L. S Desenvolvimento de eletrônica embarcada para detecção de harmônicos em instalações elétricas visando a otimização da energia dos processos produtivos. 71f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2020.

Neste trabalho, foi elaborado um estudo sobre incidência de distorções harmônicas em redes de distribuição em baixa potência que alimentam, de uma forma ou outra sistemas de processos produtivos. A literatura referência a evolução dos componentes eletrônicos e suas interferências nas redes elétricas o que determina efeitos com aquecimentos dos equipamentos elétricos, drenagens de correntes elétricas aumentos de ruídos e outros fatores. Como estratégia, foi desenvolvido um dispositivo que avalia esses fenômenos indesejados e que contribui para diminuir os efeitos, tendendo à uma rede elétrica mais limpa, com ondas de tensão e correntes de melhor qualidade. O dispositivo proposto apresenta bons rendimentos-permitindo observar a rede de distribuição e propor uma correção em tempo real através de análises de Fourier, atuando como um filtro ativo.

Palavras-chave: Sistemas Produtivos; Distorção Harmônica, Filtro Ativo Paralelo de Potência, Análise de Fourier.

ABSTRACT

MELLO, J. L. S Desenvolvimento de eletrônica embarcada para detecção de harmônicos em instalações elétricas visando a otimização da energia dos processos produtivos. 71f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2020.

In this work, a study was carried out on the incidence of harmonic distortions in low power distribution networks that supply, in one way or another, production process systems. The literature refers to the evolution of electronic components and their interference in electrical networks, which determines effects with heating of electrical equipment, drainage of electrical currents, increased noise and other factors. As a strategy, a device was developed that assesses these unwanted phenomena and that contributes to reduce the effects, tending to a cleaner electrical network, with voltage waves and quality currents. The proposed device presents good yields allowing to observe the distribution network and to propose a correction in real time through Fourier analyzes, as if it were an active filter,

Keywords: Productive Systems; Harmonic Distortion, Parallel Active Power Filter, Fourier Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Número de documentos publicados desde 1994.....	22
Figura 2:	Número de documentos publicados entre 2015 e 2018	23
Figura 3:	Nuvem da frequência de termos encontrados nos títulos dos artigos.	24
Figura 4:	Nuvem da frequência de autores encontrados e citados nos artigos....	25
Figura 5:	Onda distorcida e harmônicas.	31
Figura 6:	Algoritmo FFT usando Decimação em Frequência com 8 pontos	34
Figura 7:	Estrutura básica da FFT.	35
Figura 8:	Sistema para filtrar um sinal de tempo contínuo a partir de um filtro digital...	36
Figura 9:	Filtros harmônicos amortecidos: (a) sintonizado; (b) amortecido; (c) Tipo C .	38
Figura 10:	Filtragem passiva de corrente em carga não-linear.....	38
Figura 11:	Diagrama de bloco da função de transferência de um filtro.	39
Figura 12:	Diagrama de bode $ H(j\omega) $ da função de resposta em frequência de um filtro passa-baixas ideal.	40
Figura 13:	Configurações (a) inversora e (b) não-inversora de um filtro passa-baixas de ordem 1.....	43
Figura 14:	Diagrama em blocos de um filtro FAPP.	47
Figura 15:	Filtro ativo tipo derivação monofásico.	48
Figura 16:	(a) Inversor de tensão em meia ponte, (b) em ponte completa, (c) com grampeamento no ponto neutro e (d) inversores de tensão em série.	48
Figura 17:	Diagrama em blocos de inversor genérico.....	49
Figura 18:	Inversor de corrente.....	50
Figura 19:	Inversor de corrente operando como filtro ativo.....	51
Figura 20:	Fotografia da placa Arduino Due.....	52
Figura 21:	Diagrama em blocos do projeto	55
Figura 22:	Fluxograma de processo do programa FFT do Arduino.....	56
Figura 23:	Fluxograma de processo do programa FFT inversa do Arduino	57
Figura 24:	Função de transferência de um filtro de Butterworth de 8 ordem.....	57
Figura 25:	Diagrama de filtro de 8 ordem com operacionais.....	58
Figura 26:	Onda e Espectro de corrente em carga resistiva obtidas no osciloscópio.....	58

Figura 27:	Forma de onda e o espectro harmônica da fonte de um computador obtidas pelo osciloscópio.	59
Figura 28:	Forma de onda e o espectro harmônica da fonte de oito computadores obtidas pelo osciloscópio.....	59
Figura 29:	Corrente de uma fonte de notebook capturado pelo Arduino Due.....	60
Figura 30:	Transformada Rápida de Fourier Corrente de uma fonte de notebook capturado pelo Arduino Due.....	61
Figura 31:	Transformada Rápida de Fourier Corrente Normalizada	61
Figura 32:	Transformada Inversa de Fourier Corrente Normalizada	62
Figura 33:	Forma de onda dos harmônicos de ordem superior a 2.....	62
Figura 34:	Forma de onda da frequência fundamental do sinal.....	63
Figura 35:	Análise de um sinal de onda quadrada no domínio do tempo e da frequência.....	63
Figura 36:	Carga não linear de 21 amperes.....	63
Figura 37:	Análise harmônica de carga não linear.....	64
Figura 38:	Distorção harmônica da carga não linear analisada.....	65
Figura 39:	Saída do filtro analógico de Butterworth	65
Figura 40:	Diagrama de saída do FAPP.....	66
Figura 41:	Sinal corrigido a partir do FAPP.....	66
Figura 42:	Distorção harmônica no FAPP.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Limites de tensão harmônica	28
Tabela 2:	Limites de distorção de corrente para sistemas de 120V até 69kV	29
Tabela 3:	Polinômios normalizados de Butterworth	42

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	Conversor Analógico Digital
ARM	Advanced RISC Machine
DAC	Conversor Digital Analógico
DFT	Transformada Discreta de Fourier
DIF	Decimação em Frequência
DIT	Decimação em Frequência
DSP	Processador digital de Sinais
FAPP	Filtro ativo de potência paralelo
FFT	Transformada Rápida de Fourier
FPGA	Field Programmable Gate Array
EN	European Normalization
IDE	Integrated development Environment
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC	International Electrotechnical Commission
Irms	Corrente média quadrática
RAM	Memória de Acesso Aleatório
rms	Valor Médio Quadrático
ROM	Memória de Apenas Leitura
SRAM	Memória de Acesso Aleatório Estática
QEE	Qualidade de energia
THDi	Distorção de Corrente harmônica total
THDv	Distorção de Tensão harmônica total
Vrms	Tensão média quadrática

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 MOTIVAÇÃO	18
1.2 OBJETIVO GERAL	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1 PESQUISA BIBLIOMÉTRICA	21
2.1.1 ANÁLISE BIBLOMÉTRICA	22
2.1.2 ANÁLISE DESCRITIVA DOS AUTORES.....	23
2.2 DISTORÇÃO HARMÔNICA	25
2.3 TRANSFORMADA DE FOURIER.....	29
2.3.1 SERIE DE FOURIER	29
2.3.2 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (DFT)	31
2.3.3 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)	32
2.3.3 TRANSFORMADA INVERSA DE FOURIER (FFT⁻¹)	35
2.4 FILTROS DIGITAIS	36
2.5 FILTROS PASSIVOS	37
2.6 FILTROS ATIVOS ANALOGICOS.....	39
2.7 FILTROS ATIVOS DE POTÊNCIA PARALELLOS	44
2.8 DISPOSITIVOS MICROCONTROLADOS	51
3 MÉTODO PARA PROTOTIPAGEM DO SISTEMA DE DETECÇÃO DE HARMÔNICOS NAREDE ELÉTRICA	53
3.1 DADOS EXPERIMENTAIS	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5 CONCLUSÕES.....	67
5.1 PERSPECTIVAS FUTURAS	68
6 REFERÊNCIAS	69

INTRODUÇÃO

Qualidade de energia (QEE) é uma parte fundamental de um sistema de energia elétrica. O termo QEE significa manter a corrente elétrica puramente senoidal e em fase com a tensão elétrica senoidal. A energia elétrica produzida pelos geradores de tensão alternada senoidal. Observa-se hoje que a qualidade da energia elétrica está decaindo principalmente por causa de harmônicos de corrente e tensão elétrica, alto fator de potência, quedas de tensão, aumentos de tensão, oscilação, interrupção de tensão, entre outros. O uso de cargas não lineares em aplicações industriais, comerciais e residenciais têm aumentado, o que, por sua vez, requer um fornecimento de energia reativa e harmônica que reduz perdas e mantém a qualidade da energia no sistema. Abordagens convencionais de compensação e correção do fator de potência, como filtros passivos, banco de capacitores síncronos são implementadas para melhorar a qualidade da energia (SRINATH,2017).

Campanhol (2013) destaca que componentes elétricos como retificadores controlados, reatores, inversores de tensão e corrente, fontes chaveadas, têm contribuído para a queda do nível de qualidade no suprimento da energia dos sistemas elétricos de potência, não só pela geração de reativos, mas também por drenarem correntes elétrica com elevado conteúdo harmônico. As correntes harmônicas geradas no sistema, ao interagirem com a impedância da linha, provocam o aparecimento de harmônicos e quedas de tensão, afetando e criando distorção na forma de onda de alimentação que também é disponibilizada para outros usuários conectados ao sistema elétrico. Podem ser notados efeitos, como aparecimento de correntes de neutro em cargas balanceadas ou aquecimento excessivo dos transformadores e motores. Essas distorções podem provocar variações de tensão elétrica de curta duração, fatores de potência, flutuações e desequilíbrios elétricos (CAMPANHOL, 2013).

Correntes harmônicas aumentam as perdas por histerese, corrente parasita e as perdas no núcleo em geradores, transformadores e motores de indução, causando um funcionamento indesejável de disjuntores, fusíveis, relés de proteção e sistemas de controle. Correntes elétricas harmônicas aumentam os valores de rms – (Root Mean Square) que causam perdas por efeito Joule. Os harmônicos afetam a qualidade da energia e aumentam as perdas do sistema em até 20 %, dos quais, um terço pode ser atribuído aos harmônicos (KALAIR, 2017).

Estudos recentes revelam que as perdas de energia adicionais nas redes de distribuição podem estar na faixa de 4% a 8,5% para vários níveis harmônicos. Problemas de qualidade de energia são manifestados em desvios de tensão elétrica e corrente elétrica ou frequência, resultando em falha ou funcionamento indesejável do equipamento elétrico. Problemas comuns de qualidade de energia elétrica são desvios de tensão ou frequência temporários ou estacionários, como transientes impulsivos ou oscilatórios, quedas de tensão, ondulações, harmônicas e desbalanceamentos. Os problemas de qualidade de energia elétrica causam desconforto aos consumidores e perdas econômicas para as indústrias (KALAIR, 2017).

Conversores de potência modulados por largura de pulso são amplamente usados nas aplicações atuais de conversão de energia, por exemplo, sistema de fonte de alimentação ininterrupta (nobreaks), conversor de fonte de energia renovável (painéis solares) e outras aplicações de eletrônica de potência. Nos últimos anos a demanda por geração de energia está crescendo continuamente em capacidade instalada devido ao aumento da demanda de energia e interesse em tecnologias limpas. Fontes de energia de corrente alternada programáveis fornecem tensão elétrica de saída senoidais ajustáveis. Esses sistemas de fornecimento de energia sofrem de vários distúrbios, incluindo incerteza de modelagem e flutuação de frequência em aplicações práticas. O método de controle para tais sistemas devem ser estável e robusto para as flutuações de frequência e incertezas de carga (LIU, 2018).

De um modo geral, a utilização progressiva desses dispositivos é justificada, pois os benefícios decorrentes do seu uso são muito mais visíveis do que os efeitos prejudiciais causados pelos mesmos. Não obstante a esse fato, a proliferação de equipamentos eletrônicos que operam como cargas não lineares provocando distorções harmônicas nas correntes e tensões dos sistemas elétricos têm sido relevantes no setor elétrico mundial. Sob essas perspectivas, de forma crescente, as correntes harmônicas geradas por consumidores predominantemente domésticos estão sendo somadas às emitidas por complexos industriais e consumidores do setor de serviços. Esse fato tem contribuído sistematicamente para a perda de qualidade da energia elétrica disponibilizada, resultando em graves consequências para consumidores e empresas do setor de distribuição da energia elétrica (SRINATH, 2017).

Em instalações citadas anteriormente, é importante mitigar as possíveis distorções existentes, pois quando conectadas novas cargas pode-se criar ou aumentar as

distorções pré-existentes, pois o efeito pode se propagar por toda a planta. Dessa maneira, para uma melhor produtividade energética é de fundamental importância monitorar e minimizar os efeitos de baixos fatores de potência e das distorções por correntes harmônicas (CAMPANHOL, 2013).

O controle da qualidade de energia, diretamente conectado à rede elétrica tem sido um grande desafio, pois está adquirindo cada vez mais competências. A redução das oscilações de potência leva a uma diminuição na corrente de baixa frequência. Para proteger capacitores críticos, os ruídos ou interferências de alta frequência pode ser evitados com diferentes topologias. Além disso, a redução de harmônicos de baixa frequência também diminui a corrente média e a temperatura, aumentando a vida útil dos bancos de capacitores. Da mesma forma, a redução das correntes harmônicas, especialmente, em baixas frequências, reduz o aquecimento dos cabos elétricos, capacitores, transformadores e bancos de bateria, aumentando sua durabilidade (MORIANO, 2108).

O desejo de minimizar as oscilações do fluxo de potência e de corrente harmônicas vem de diferentes partes, incluindo fabricantes de inversores e fabricantes de todos os dispositivos conectados à rede elétrica. Diferentes trabalhos incluíram melhorias em termos de oscilação de potência ativa com condições mais flexíveis de controladores ou durante desbalanceamento da malha ou falhas de rede (MORIANO, 2108).

Várias técnicas ou métodos têm sido relatados para estimar a distorção harmônica. O algoritmo numérico mais utilizado é a transformada discreta de Fourier, no entanto, isso não pode ser aplicada em tempo real, dado que se precisa de um grande número de amostras para a estimativa. Em métodos de controle de amortecimento ativo são propostos o uso de filtros ativos, com a função de mitigar os efeitos da distorção harmônica. Uma proposta para diminuir a distorção harmônica nos sinais medidos e assim obter uma maior precisão na medição. O objetivo não é mudar o sinal de um sistema, mas obter informações mais precisas que possam ajudar a tomar decisões. Para atingir esse objetivo, um escalonamento harmônico é realizado no modelo dos filtros Taylor-Kalman-Fourier (MALDONADO, 2016).

Recentemente, o uso de diferentes versões das matrizes de transformação começou a ser usada para levar em conta as harmônicas. Uma aplicação deste método de avaliação de componentes desequilibrados e distorcidos foi o uso da transformada Discrete-Wavelet, proposta para avaliar os componentes simétricos (CHICCO, 2017).

Uma alternativa para minimizar esses problemas de qualidade no suprimento da energia seria empregar o uso de filtros ativos de potência paralelos. Esta solução tem-se mostrado muito eficiente para a correção de distorção harmônica de tensão, sendo que existem muitos trabalhos e publicações a respeito do tema conforme mostra a presente pesquisa (CAMPANHOL, 2013).

O método utilizado para a análise das correntes harmônicas deve ser robusto, para uma operação adequada dos filtros ativos de potência paralelos (FAPP). O algoritmo usado deve ser insensível às variações dos sistemas reais. Para evitar a introdução de atrasos de fase, em vez de filtros passa-baixa analógicos ou digitais, devem-se usar filtros ressonantes de passagem de banda digitais, por exemplo, aqueles baseados em integradores de sinais senoidais (NICOLAE, 2015).

A aquisição harmônica é uma das partes mais importantes em filtros ativos de potência paralelos (FAPP). Um dos métodos de aquisição harmônica mais comumente usados é baseado na teoria transformada de Fourier. Este método é fácil de implementar, mas os harmônicos extraídos são misturados, o que o torna desprovido de flexibilidade. A transformada discreta de Fourier, tipicamente implementada pela transformada rápida de Fourier (FFT), é um método superior para a análise harmônica. No entanto, na aplicação do filtro de potência ativa o uso de um algoritmo FFT não é prático, pois filtros ativos de potência paralelos (FAPP) precisam de uma referência de corrente harmônica em tempo real traçando a mudança da corrente de carga (LING, 2017).

1 MOTIVAÇÃO

A qualidade da energia na rede elétrica, em virtude das características das cargas a ela conectadas é tema de estudos técnicos e normativos na atualidade.

Com o desenvolvimento da eletrônica de potência os equipamentos ligados aos sistemas elétricos evoluíram permitindo, ainda, a execução de tarefas que não eram possíveis anteriormente. Entretanto, esses equipamentos têm a desvantagem de não funcionarem como cargas lineares, consumindo correntes não senoidais e dessa forma inserindo na rede elétrica componentes de distorção harmônica. A presença de harmônicos nos sistemas de potência resulta num aumento das perdas relacionadas com a distribuição de energia elétrica, em problemas de interferências com sistemas de comunicação e equipamentos digitais e em falhas de funcionamento de grande parte dos

equipamentos ligados à rede, sobretudo daqueles mais sensíveis por incluírem sistemas de microeletrônicos. Os prejuízos econômicos resultantes destes problemas nos sistemas elétricos são enormes e, por isso, a questão da preocupação com a qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores finais (MARTINS et al 2003).

As perspectivas apresentadas são inerentes à temática da QEE onde sobressaem os fenômenos de "distorções harmônicas", esses fenômenos se manifestam nos sistemas de conversão de energia que utilizam a eletrônica de potência, presentes nas redes e instalações elétricas. A presença destas distorções nas redes e instalações elétricas pode provocar uma série de efeitos danosos aos componentes e equipamentos conectados. Dentre as falhas possíveis estão introdução de erros nos sistemas de medição de faturamento de energia, interferências eletromagnéticas em decorrência da circulação de correntes harmônicas pelo neutro das instalações e o aparecimento de tensões indesejáveis entre neutro e terra, operação intempestiva dos dispositivos de proteção, diminuição da eficiência energética dos aparelhos elétricos e eletroeletrônicos (PEÇANHA,2010).

Segundo Soares (2016) o balanço energético da indústria da geração de energia, é diretamente proporcional aos seus ganhos de produção e a ocorrência de distúrbios ou falhas nos sistemas elétricos, como os problemas relacionados à Qualidade de Energia Elétrica (QEE), são nocivos à eficiência do processo e, conseqüentemente, ao valor agregado ao Megawatt produzido. Conclui-se que existe na necessidade de utilizar mecanismos de avaliação dos valores da QEE, identificando os custos por perdas produtivas oriundas de problemas com a QEE tornando viável a análise de novos investimentos.

Torna-se cada vez maior o número de equipamentos que conectados ao SEP que geram harmônicos indesejados na rede elétrica que passaram a ser constituídos de componentes baseados em eletrônica de potência. Estes componentes modificam o comportamento na forma de onda da tensão e da corrente elétrica causando distorções na rede elétrica. O aumento dos níveis de distorção harmônica nas redes distribuição causa preocupação às concessionárias de energia, pois a presença dos harmônicos na rede de distribuição provoca o aumento de ocorrências de correntes ressonantes harmônicas, queima ou aquecimento dos bancos de capacitores, aumento das perdas elétricas,

introdução de torque em oposição à rotação de máquinas elétricas, ruídos aquecimento de transformadores e falhas em dispositivos de proteção (ROCHA et al, 2017).

Neste sentido, se faz necessário ferramentas para mitigação destas ocorrências, principalmente àquelas relacionadas com a QEE, particularmente a questão do Fator de Potência (FP) e distorções harmônicas de corrente. O baixo fator de potência traz uma série de consequências às instalações elétricas, tais como, aumento nas perdas na instalação, quedas de tensão excessivas, subutilização da capacidade instalada, dentre outros (SORAES et al, 2016).

Normas internacionais relativas ao consumo de energia elétrica tais como IEEE 519, IEC 61000 e EN 50160, limitam o nível de distorção harmônica nas tensões em que sistemas elétricos podem operar e determinam que os novos equipamentos não introduzam na rede elétrica harmônicos de corrente de amplitude superior a determinados valores. Fica evidenciada aqui a importância em resolver os problemas dos harmônicos, seja na produção de novos equipamentos ou para os equipamentos já instalados (MARTINS et al 2003).

De maneira simplificada podem-se utilizar filtros conectados à rede elétrica com a finalidade de eliminar distorções da tensão de rede e compensar ou isolar harmônicas de corrente geradas pela carga. Alguma alternativa para se efetuar essa correção são emprego de filtros passivos, ativos e a associação entre ambos, chamados filtros híbridos. As diferentes formas de se conectar estes filtros à rede elétrica (série, paralelo) definem as características do tipo de correção que se deseja. A conexão em série do filtro ativo é empregada para compensação da tensão de rede, isolando a carga de flutuações e possíveis distorções harmônicas. A conexão em paralelo é utilizada para correção de distorções na corrente, fornecendo um caminho de baixa impedância para as componentes harmônicas da corrente de carga (SOUZA, 2000).

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do trabalho consiste no desenvolvimento de um protótipo de medidor para analisar a qualidade de energia em sistemas de baixa tensão através um sistema de medição e correção inteligente em plataforma de baixo custo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Desenvolver um sistema capaz de distinguir as componentes harmônicas de até 13ª ordem em um sistema elétrico monofásico (fase-neutro) efetuando leituras de tensão e corrente, utilizando como plataforma um dispositivo para aquisição de dados microcontrolado;

- Avaliar a viabilidade de se utilizar dispositivos microcontrolados de baixo custo para efetuar a análise das distorções harmônicas de corrente e efetuar o controle do FAPP para eliminar os harmônicos escolhidos;

- Elaborar um circuito de aquisição de dados com amplificadores de instrumentação, assim como fontes de tensão para a alimentação do dispositivo;

- Implementar um protótipo para análise e correção baseado em sistemas microprocessados embarcados.

2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. PESQUISA BIBLIOMETRICA

A bibliometria é uma ferramenta de avaliação quantitativa do estado da arte de uma área científica e pode definida como a medição de textos e informações. Métodos bibliométricos são utilizados para procurar as citações de revistas acadêmicas e ajudam na análise de grandes quantidades de informações, auxiliando por meio de análises estatística e matemática em identificar padrões relevantes na literatura produzida. (FRACISCHETTI, 2014).

Foi realizada uma análise bibliométrica para mapear o conhecimento produzido sobre os termos “distorção harmônica”, “filtro ativo” e “Transformada de Fourier” nas bases de dados IEEE, ScienceDirect e Capes no período de 2015 até 2018.

Para os estudos foi executado o levantamento e análise bibliométrica sobre os termos “distorção harmônica”, “filtro ativo” e “transformada de Fourier”. Utilizou-se o software Endnote e o VOSviewer. O software VOSviewer é um programa gratuito

utilizado para construir mapas baseados em redes, utilizando técnicas de mapeamento de agrupamento de dados.

2.1.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Optou-se pela utilização da Lei de Zipf ou Lei do Mínimo Esforço que consiste em medir a frequência do aparecimento das palavras em vários textos, gerando uma lista ordenada de termos de uma determinada disciplina ou assunto (FRACISCHETTI, 2014).

A fim de identificar as tendências das pesquisas realizou-se uma análise bibliográfica nas Base de Dados Sience Direct, IEEE e Capes. A escolha dessas da base de dados se deu em virtude da disponibilização dos resumos, além dos títulos e palavras-chave. Inicialmente, realizou-se uma busca nas palavras-chave, no resumo e título das publicações da Base de Dados Capes. Contudo, os termos “distorção harmônica”, “filtro ativo de potência” e “análise de Fourier ” são de uso quase estrito do Brasil e, desta maneira, houve a necessidade de se adotar “key words” em inglês, “harmonic distortion”, “active filter”, para em seguida determinar outros termos que possam caracterizar a pesquisa.

Nessa busca verificou-se 6281 documentos distribuídos entre artigos reserch e reviews. Na primeira análise avaliou-se o número de publicações a cada ano desde 1994, com intuito de avaliar a evolução do interesse de pesquisas sobre o tema. A Figura 1, mostra o número de documentos publicados entre 1994 e 2018.

Figura 1: Número de documentos publicados.



Fonte: autor

O gráfico da Figura 1 mostra crescimento nas publicações nos últimos dez anos, o que indica relevância e atualidade do tema e a necessidade de aprofundamentos nas pesquisas relacionadas ao tema proposto.

Em uma nova pesquisa, limitaram-se os trabalhos entre os anos de 2015 até 2018 e verificou-se 742 documentos distribuídos entre artigos “research” e “reviews”. Conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2: Número de documentos publicados entre 2015 e 2018

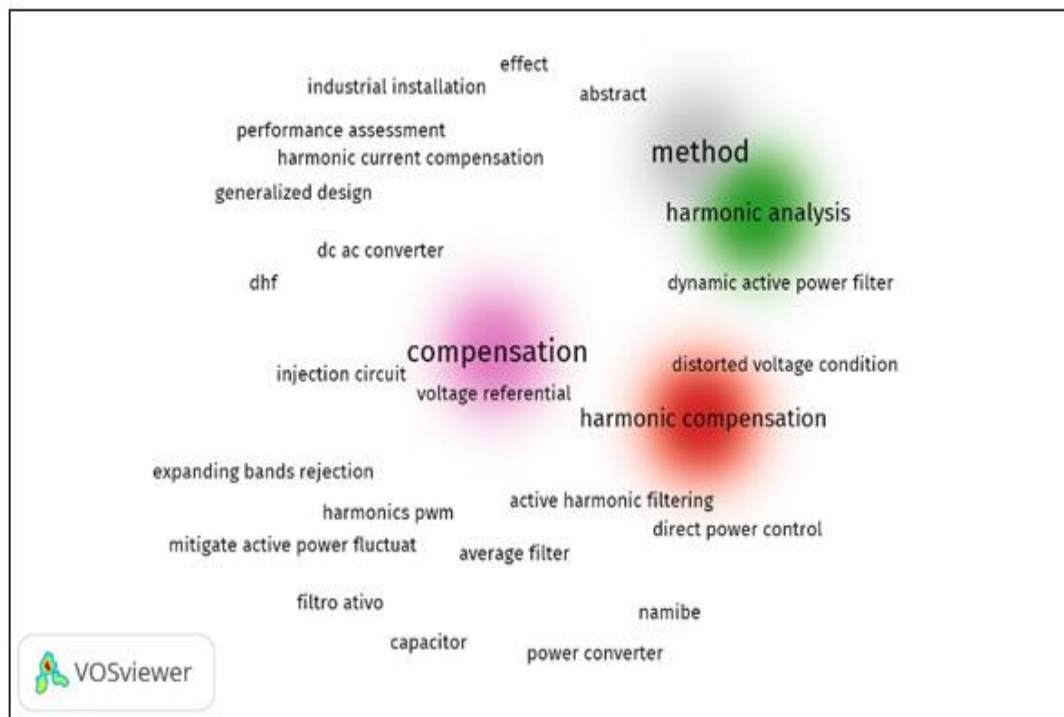


Fonte: autor

2.1.2 ANÁLISE DESCRITIVA DOS ARTIGOS PESQUISADOS

Como primeira etapa de filtragem realizou-se a exclusão dos artigos repetidos e após foram feitas a leitura dos títulos dos artigos. Dos 742 artigos encontrados nos bancos de dados, 689 foram descartados, conforme critério de pesquisa, reduzindo assim para 53 artigos selecionados, e os dados de referência foram compilados e exportados em formato *.ris para serem analisados e extraídas as informações úteis. A preparação da base de dados foi realizada no software Scimat que transforma os arquivos *.ris em tabelas para serem analisadas. Os dados foram compilados e exportados para o VOSviewer, indicando, assim a produção dos artigos selecionados no período. A Figura 3 mostra uma nuvem de palavras com os termos de destaque e mais recorrentes na pesquisa. A análise sugere utilizar o termo “*compentation*” e “*power quality*” como *key words* nas pesquisas.

Figura 3: Nuvem da frequência de termos encontrados nos títulos dos artigos.



Fonte: autor

De qualquer forma, alinhado ao que foi apresentado na pesquisa bibliométrica, identificou-se vinte e sete vezes as palavras “*harmonic analysis*” e “*harmonic compensation*” e vinte e nove vezes a palavra “*compensation*”, como sendo os termos mais frequentemente citados. Nessa mesma nuvem de frequência podem ser visualizados três “clusters” distintos: o verde, que aparentemente lida com os conceitos fundamentais da pesquisa; o vermelho, que está mais relacionado à aplicabilidade, implementação e aplicação dos conceitos da pesquisa; e o terceiro em lilás, relacionado a aplicação em engenharia.

A Figura 4 mostra a nuvem de frequência da densidade da rede de citação de artigos, cujas cores são similares a de um gráfico térmico (vermelho = mais intenso, laranja = menos intenso). Observa-se que Chicco, P.M. Nicolae e Kalair aparecem como os autores mais citados e mais influentes no tema de estudo.

conectados ao mesmo ponto de acoplamento do sistema elétrico. Os efeitos causados podem ser notados através de aquecimentos excessivos de transformadores, motores, aumento dos ruídos na frequência audível, sem contar que tensões distorcidas na rede causam oscilações mecânicas em motores, máquinas e sistemas elétricos de potência trifásicos a quatro-fios, quando alimentam cargas monofásicas lineares desequilibradas, apresentam a presença de uma corrente circulando pelo condutor de neutro. No entanto, quando cargas monofásicas com características não lineares forem alimentadas, acarretará a circulação da corrente de neutro, mesmo que estas sejam perfeitamente balanceadas. Ou seja, pelo fato de a corrente no neutro ser a soma algébrica das correntes trifásicas de fase não senoidais, o somatório resultante pode não ser necessariamente igual à zero. Observa-se, ainda, que em circuitos trifásicos as correntes harmônicas de neutro múltiplas de três (terceiro, quinto, sétimo, nono harmônico, etc.) se somam ao invés de se anularem. Além disso, em algumas situações, as amplitudes destas correntes podem exceder as amplitudes das correntes de fase, causando danos ao condutor de neutro devido ao aquecimento excessivo (CAMPANHOL, 2013).

A questão da qualidade de energia do sistema de distribuição de energia tem atraído mais e mais atenção nos últimos anos, por suas relações estreitas com os consumidores de eletricidade. Uma melhor qualidade no fornecimento de energia é cada vez mais necessária devido ao aumento de cargas sensíveis. Em resposta a tais situações, uma série de normas foi publicada para regular a qualidade de energia, como IEEE Std 519™-2014, EN 50160 de acordo com (LIU, 2018).

Para analisar uma forma de onda não senoidal, geralmente é utilizada a análise de Fourier, que é usada para a identificação das componentes harmônicas presentes no sinal conforme sugere (RODRIGUES, 2017). A forma de onda definida pela função genérica $f(t)$ pode ser representada pela série trigonométrica de Fourier, como mostrado pela equação (1).

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_1 t + b_n \sin \omega_1 t) \quad (1)$$

Onde:

$\frac{A_0}{2}$ é o valor médio da função $f(t)$

a_n e b_n são coeficientes da série de Fourier a determinar

ω é a velocidade angular t da função $f(t)$

Quando o sinal é decomposto pela série de Fourier é possível analisá-lo separadamente em cada componente do somatório da série, que são denominadas de componentes harmônicas. Os componentes com múltiplos inteiros da frequência componente fundamental são denominados de harmônicos. Esses componentes têm a característica de deformar a forma de onda senoidal (RODRIGUES,2017).

Pode-se quantificar e avaliar os distúrbios causados pelas distorções harmônicas no sistema elétrico observando indicadores como tensão e corrente do sistema. O valor eficaz ou rms da tensão e da corrente são definidos pela equação (2) e equação (3).

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2 dt} \quad (2)$$

$$I_{ms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2 dt} \quad (3)$$

Onde, " V_{rms} " é o valor da tensão eficaz e " I_{rms} " é o valor da corrente eficaz.

A distorção harmônica total segundo (IEEE, 2014) é expressa como porcentagem em relação a componente fundamental sendo utilizada para definir os efeitos das harmônicas no sistema de potência de acordo com a equação (4) e equação (5), sendo que essas equações indicam o quanto as componentes harmônicas distorcem a componente fundamental de tensão ou corrente elétrica.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n V_{rms,n}^2}}{V_{rms,1}} \times 100\% \quad (4)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n I_{rms,n}^2}}{I_{rms,1}} \times 100\% \quad (5)$$

Onde, THD_v , é o valor da distorção harmônica na tensão e, THD_i , é o valor da distorção harmônica na corrente.

Por (IEEE, 2014) define-se que devem ser consideradas harmônicas até a ordem 50ª para determinar a distorção de demanda total (TDD) e a relação do valor eficaz do conteúdo harmônico, expresso em porcentagem da máxima corrente de demanda que é definida pela equação (6), o que mostra o quanto a instalação elétrica está injetando de conteúdo harmônico no sistema elétrico de potência. Componentes harmônicos de ordem superior a 50 podem ser incluídos quando necessário de acordo com (RODRIGUES, 2017).

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_{rms,n}^2}}{I_{rms,L}} \times 100\% \quad (6)$$

Segundo Rodrigues (2017) instituições e comitês definem os limites dos níveis de distorção harmônica de tensão e corrente elétrica a fim de garantir confiabilidade e a qualidade de energia elétrica do sistema de potência. Esses indicadores devem atender às exigências de limites propostos por normas, recomendações e regulamentações. Dentre essas instituições, estão a Comissão Eletrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission - IEC), Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE) e Norma Europeia (European Normalization – EN).

No Brasil, tem-se a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (RODRIGUES, 2017). A recomendação Std. IEEE 519: 2014 estabelece limites para injeção de conteúdo harmônico de tensão e corrente no ponto de acoplamento comum, ou seja, onde é feito interfaceamento entre a concessionária distribuidora de energia e a unidade de consumo. A Tabela 1 e Tabela 2 apresentam os limites de distorção de tensão e corrente para sistemas de 120V a 69kV.

Tabela1: Limites de tensão harmônica (IEEE,2014)

Tensão da Barra no PAC	Distorção Harmônica Total (THDv%)
$V \leq 1,0\text{kV}$	8.0
$1,0 \text{ kV} < V \leq 69\text{kV}$	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161\text{kV}$	2.5
$169\text{kV} < V$	1.5

Tabela 2: Limites de distorção de corrente para sistemas de 120V até 69kV (IEEE,2014)

Máxima distorção harmônica em porcentagem da I_L					
Ordem individual harmônica (harmônicos ímpares)					
I_{sc}/I_L	<20	20 < 50	50 < 100	100 < 1000	>1000
$3 \leq h < 11$	4.0	7.0	10.0	12.0	15.0
$11 \leq h < 17$	2.0	3.5	4.5	5.5	7.0
$17 \leq h < 23$	1.5	2.5	4.0	5.0	6.0
$23 \leq h < 35$	0.6	1.0	1.5	2.0	2.5
$35 \leq h < 50$	0.3	0.5	0.7	1.0	1,4
TDD (%)	5.0	8.0	12.0	15.0	20.0

2.3. TRANSFORMADA DE FOURIER

A Transformada de Fourier é uma ferramenta matemática que realiza a transformação entre as variáveis no domínio do tempo para o domínio da frequência de sinais. Existe uma vasta literatura que trata das características da transformada de Fourier. Na forma contínua há inúmeras obras com um extenso rigor matemático. Uma das referências é o livro Sinais e Sistemas (SIMON,2001), que forma uma base sólida para o entendimento das aplicações da Transformada Discreta de Fourier, usada neste trabalho.

2.3.1 SÉRIE DE FOURIER

Seja $f(x)$ uma função que possua características do teorema integral de Fourier, ou seja, $f(x)$ contínua num intervalo finito e convergente de acordo com a equação,

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(x)| dx \quad (7)$$

O teorema integral de Fourier estabelece que:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\alpha) \cos(\alpha x) + B(\alpha) \sin(\alpha x) d\alpha \quad (8)$$

onde:

$$A(\alpha) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cos(\alpha x) dx \quad (9)$$

$$B(\alpha) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \sin(\alpha x) dx$$

A equação é válida se não houver pontos de descontinuidade; caso contrário, substitui-se $f(x)$ por:

$$\frac{f(x+0)+f(x-0)}{2}. \quad (10)$$

Cujas condições são suficientes, mas não necessárias para a solução de determinado problema.

Para uma forma de onda não senoidal utiliza-se a análise de Fourier para a identificação das componentes harmônicas presentes no sinal não senoidal. A forma de onda pode ser definida pela função $f(t)$, representada pela série trigonométrica de Fourier, de acordo com a equação (11) segundo (RODRIGUES, 2017).

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_1 t + b_n \sin \omega_1 t) \quad (11)$$

Os coeficientes A_0 , A_n e Bn da série de Fourier podem ser calculados. Os coeficientes da série de Fourier são, respectivamente como mostrados pelas equações:

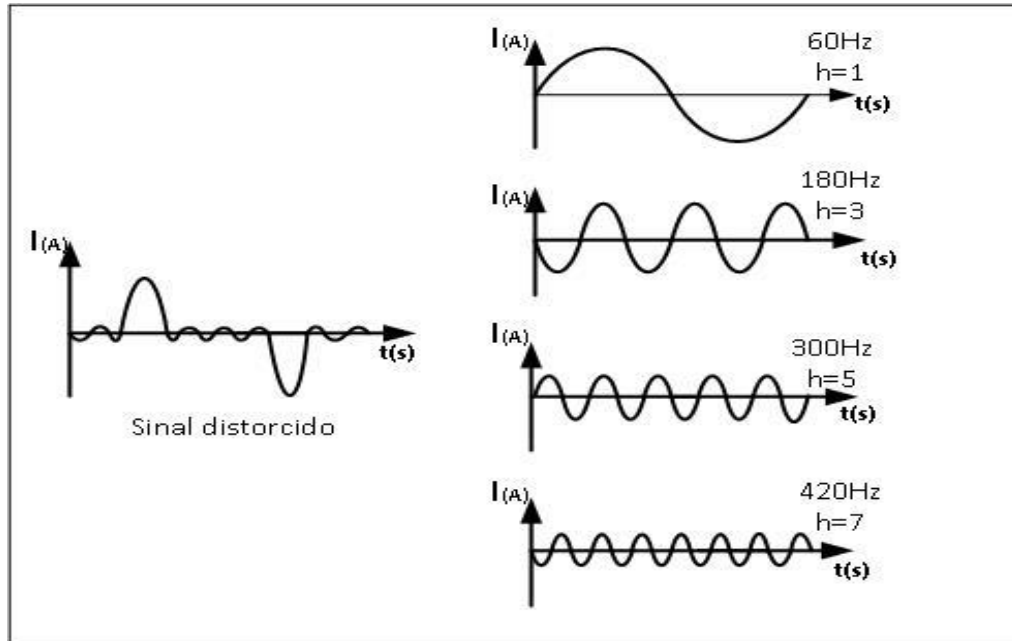
$$\frac{A_0}{2} = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (12)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos (nt\omega_1) dt, \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (13)$$

$$Bn = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin (nt\omega_1) dt, \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (14)$$

A Figura 5 ilustra uma aplicação da série de Fourier onde mostra a onda distorcida “T”, a componente fundamental “1” e a quinta harmônica “7”.

Figura 5: Onda distorcida e harmônicas.



Fonte: Adaptada de (RODRIGUES,2017)

2.3.2 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (DFT)

Para um sinal contínuo $x(t)$ representado por N amostras consecutivas de uma sequência x_m . A transformada discreta de Fourier (DFT) de N termos é definida por:

$$\bar{X}_k = \sum_{m=0}^{N-1} x_m W^k, \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

$$W = e^{-j\frac{2\pi}{N}}, j = \sqrt{-1} \quad (15)$$

Com a transformada direta definida a transformada inversa pode ser escrita como sendo:

$$y_l = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \bar{X}_k W^{-lk}, \quad l = 0, 1, \dots, N-1 \quad (16)$$

A Transformada Discreta de Fourier é produto interno dos vetores, g , com o conjunto de M , vetores ortonormais descritos por:

$$b_v = [1, W_v^N, W_{2v}^N, \dots, W_{(N-1)v}^N]^T \quad (17)$$

Onde, b_v , e a base de vetores ortonormais $N-1$.

Usando a definição de produto interno de vetores com valores complexos é possível escrever:

$$\langle g, h \rangle = \sum_{n=0}^{N-1} g_n h_n^* \quad (18)$$

e a transformada discreta de Fourier se reduz a $g = \langle g, h \rangle$.

A DFT calcula as componentes de g nas direções dos vetores projetados na base do vetor. DFT é uma função que transforma coordenada num Espaço Vetorial Complexo com N dimensões.

2.3.3. TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)

A FFT é um algoritmo ou método bem eficiente para construir para calcular uma série de pontos mais rapidamente que outros algoritmos para cálculos de séries numéricas. Ela foi apresentada em como um algoritmo eficiente para o cálculo da DFT. A Equação da FFT divide o somatório da DFT em duas partes, separando os índices pares e ímpares, ou seja, a parte real e imaginária respectivamente. O algoritmo matemático da FFT é uma forma eficiente de calcular a DFT e sua inversa com menor esforço computacional que a DFT (SHIRADO et al, 2015).

A equação de síntese da DFT é a equação 3ª, ela tem custo computacional de resolução na ordem de N^2 , onde N é o número de amostras para calcular a DFT. Uma FFT é capaz de reduzir o número de operações da ordem de N^2 para ordem de $N \log N$, sendo um dos algoritmos mais eficientes para resolução da DFT tornando possível a utilização da Transformada de Fourier em aplicações de tempo real (SHIRADO et al, 2015).

De acordo com Shirado (2105), a DFT de um sinal de tamanho amostral n pode ser reescrita como a soma de duas transformadas de Fourier, cada uma com tamanho igual a $n/2$, uma originada dos elementos pares do sinal, outra dos elementos ímpares, considerando as seguintes formulações (19) a (20).

$$F_k = \sum_{j=0}^{n-1} e^{\frac{2\pi i j k}{n}} \quad (19)$$

$$F_k = \sum_{j=0}^{\frac{n}{2}-1} e^{\frac{2\pi i k(2j)}{nf^{2j}}} + \sum_{j=0}^{\frac{n}{2}-1} e^{\frac{2\pi i k(2j+1)}{nf^{2j}+1}} \quad (20)$$

$$F_k = \sum_{j=0}^{\frac{n}{2}-1} e^{2\pi i k(\frac{n}{2})f^{2j}} + W_k \sum_{j=0}^{\frac{n}{2}-1} e^{2\pi i k(\frac{n}{2})f^{2j+1}} \quad (21)$$

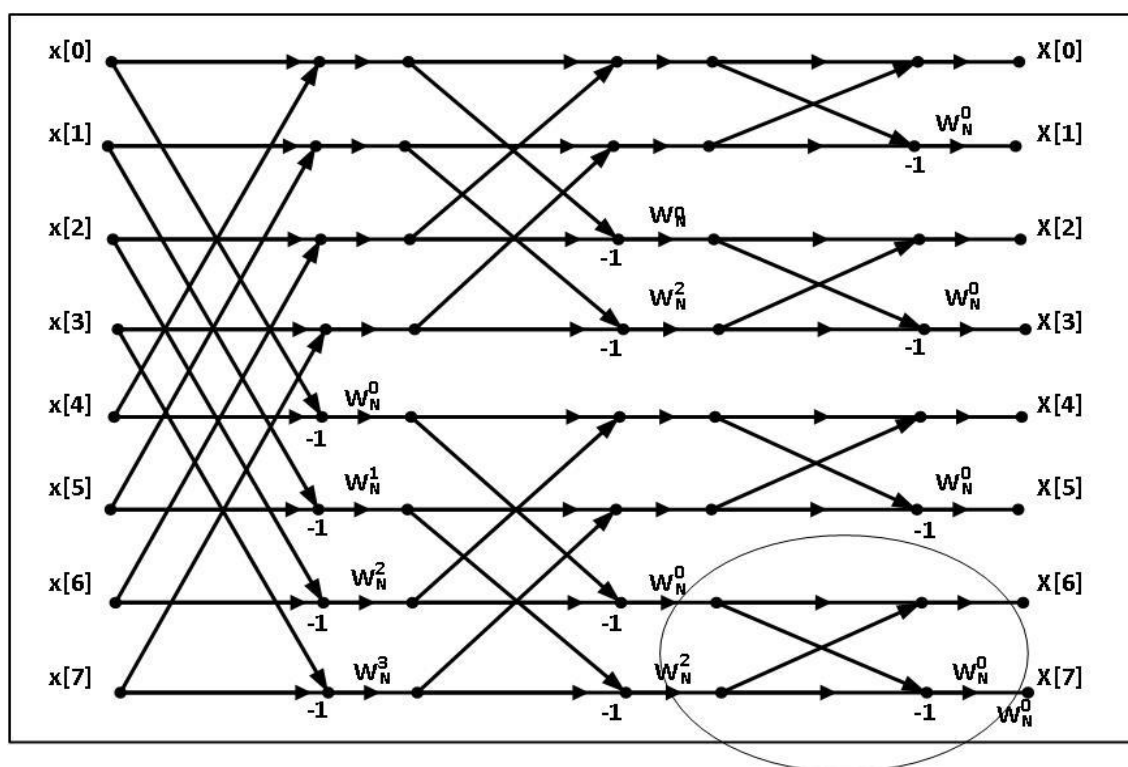
$$F_k = F_k^e + W^k F_k^0 \quad (22)$$

Onde $W = e^{2\pi i/n}$ representa uma constante

A FFT é um algoritmo complexo que calcula o espectro de frequência correspondente a N pontos no domínio do tempo. Há basicamente dois algoritmos para o cálculo da FFT: a Decimação no Tempo (DIT) e a Decimação em Frequência (DIF).

O algoritmo DIF opera sobre os dados apresentados na sequência normal, entregando-os em uma sequência diferente da original, que necessita ser corrigida ao final do algoritmo. Na Figura 6, os encontros das setas correspondem a operações de soma ou subtração (indicado por um sinal de -1 abaixo do ponto) e o sinal $x[n]$ corresponde ao número complexo descrito na equação (19). A parte identificada na Figura 6 e que se repete por todo o diagrama é denominada *butterfly* devido a sua semelhança com uma borboleta. Na Figura 6 é mostrado uma etapa de decimação na frequência para uma amostra de 8 pontos, reduzindo de uma DFT de 8 pontos para duas DFTs de 4 pontos cada e mais algumas operações, observa-se que existe um padrão de execução da decimação. Ao realizar mais uma decimação este padrão também é observado (M. GOMES, 2019).

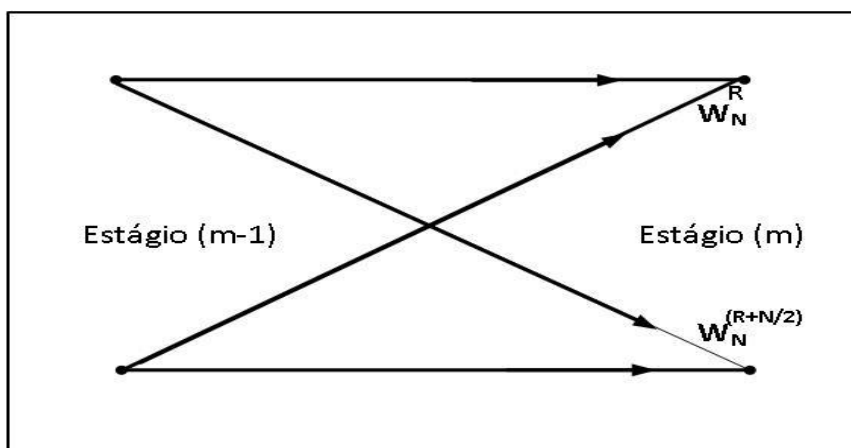
Figura 6: Algoritmo FFT usando Decimação em Frequência com 8 pontos.



Fonte: Adaptada de (M, GOMES, 2019)

A estrutura básica de uma FFT é a chamada de borboleta, já que a representação gráfica se assemelha ao inseto, está salientada na Figura 6 e mostrada na Figura 7. Ela mostra que a borboleta utiliza duas variáveis do estágio $m-1$, soma e multiplica por uma constante complexa, representada na notação da equação 2. Esta variável pode ser alocada em uma tabela para economizar custo computacional. A estrutura é repetida nos vários estágios do programa mudando-se apenas os seus índices e sendo executado como uma função onde os índices ou a fase de execução são os dados de entrada para essa função. Um algoritmo que utilize a estrutura básica como na Figura 7 é chamado FFT de raiz de 2, mas existem algoritmos de raiz 4, que são mais complexos, mas que obtêm soluções ainda mais rápidas que algoritmos raiz de 2.

Figura 7. Estrutura básica da FFT.



Fonte: Adaptada de (M, GOMES, 2019)

2.3.4. TRANSFORMADA INVERSA DE FOURIER (FFT⁻¹)

O problema de se reconstruir um sinal de tempo contínuo a partir de amostras envolve uma combinação de sinais de tempo contínuo e discreto. A FFT é uma ferramenta para analisar esse problema de reconstrução, uma vez que ela pode representar tanto sinais discretos quanto sinais contínuos no tempo.

As amostras de sinal nem sempre determinam de maneira única o sinal do tempo contínuo correspondente. Para determinar como o sinal se comporta entre amostras devemos especificar restrições para o sinal contínuo no tempo. Esses conjuntos de restrições são necessários e úteis para que o sinal faça transições suaves entre uma amostra e outra. Essa transição está diretamente ligada à frequência máxima presente no sinal a ser recuperado, consequentemente restringir a suavidade no domínio do tempo significa limitar a largura de faixa do sinal (HAYKIN, 2001).

Existe uma correspondência biunívoca entre as representações do domínio do tempo e da frequência de um sinal. Para se reconstruir um sinal de maneira única no domínio do tempo deve haver a partir de suas amostras deve existir uma correspondência única entre as transformadas de Fourier no domínio do tempo e da frequência. Essas transformadas devem produzir um sinal com mínimo de *aliasing* para não distorcer o espectro do sinal original (HAYKIN, 2001).

A frequência mínima de amostragem é denominada ou taxa de amostragem de Nyquist e deve ser igual a duas vezes a frequência máxima do sinal amostrado.

O teorema da amostragem indica quão rápido as amostras de sinal podem ser extraídas para que represente um sinal de maneira única.

A FFT^{-1} é um algoritmo rápido para executar transformada de Fourier inversa que desfaz o processo de FFT. O FFT^{-1} de uma sequência $\{ F_n \}$ que pode ser definida como:

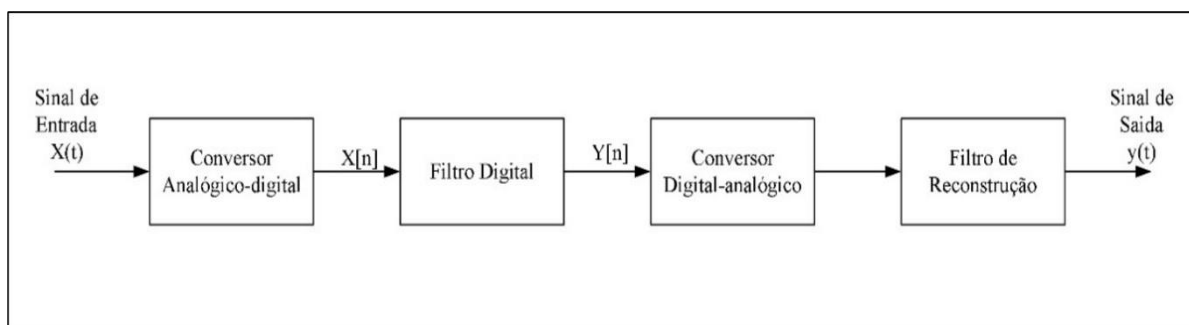
$$x_i = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} F_n e^{\frac{2\pi i j}{N} n i} \quad (23)$$

Calculada, será recuperado o resultado da FFT em seu conjunto de dados original no domínio do tempo.

2.4. FILTROS DIGITAIS

Um filtro digital usa algoritmos computacionais para implementar uma ação de filtragem que deve ser executada num sinal de tempo contínuo. A Figura 8 mostra um diagrama de blocos das operações envolvidas em tal abordagem de projeto de um filtro seletivo.

Figura 8: Sistema para filtrar um sinal de tempo contínuo a partir de um filtro digital.



Fonte: Adaptada de (HAYKIN, 2001).

O bloco conversor analógico-digital é usado para converter um sinal contínuo no tempo $x(t)$ em uma sequência $x[n]$ de números. O filtro digital processa o vetor de números $x[n]$ numa base de amostra por amostra para produzir, em uma nova sequência $y[n]$, que será convertida em um sinal contínuo no tempo, correspondente ao conversor digital-analógico. O filtro de reconstrução na saída do sistema produz um novo sinal analógico contínuo no tempo $y(t)$ (HAYKIN, 2001).

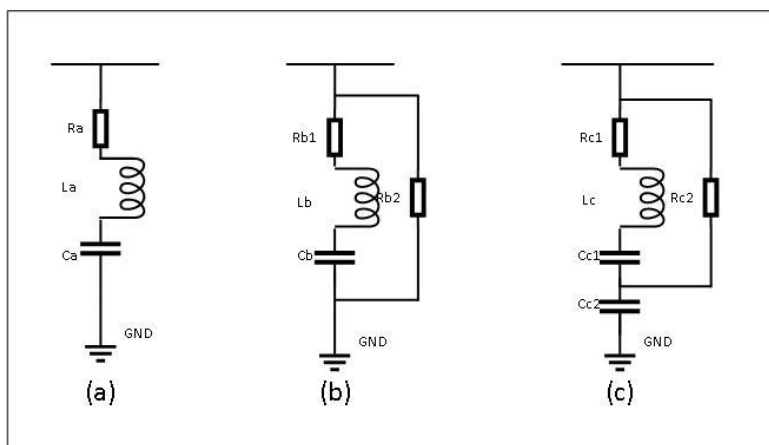
Deve observar que os dados amostrados e os cálculos internos utilizados no filtro de tempo discreto implementado na forma digital são quantizados com uma determinada precisão que faz com que sejam introduzidos erros de arredondamento e atrasos de processamento na operação do filtro digital, entregando um desempenho diferente do filtro discreto que foi derivado.

2.5 FILTROS PASSIVOS

Uma solução para lidar com problemas de qualidade de energia e consequente redução das distorções harmônicas, colocada em prática, por exemplo, é a instalação de bancos de capacitores em derivação ou filtros de potência passivos. Capacitores de derivação fixos ou mecanicamente comutados desempenham papel importante na garantia de operação econômica do sistema de energia por quase um século. Capacitores *shunt* podem reduzir o fluxo de corrente reativa através do sistema de potência, aumentando a capacidade do sistema e reduzindo as perdas de energia do sistema. Os capacitores *shunt* ainda possuem uma grande participação de mercado para compensação de potência ativa devido ao seu baixo custo e alta confiabilidade. No entanto, uma das principais desvantagens dos capacitores *shunt* é que estes podem interagir com a impedância da linha de distribuição entrando em ressonância e gerar outras correntes ou tensão harmônica e consequente queda na qualidade da energia do sistema de distribuição de energia (LIU, 2018).

Filtros passivos L-C e Capacitores foram usados convencionalmente para reduzir os harmônicos e para a melhoria do fator de potência das cargas em Corrente Alternada. Porém, vários inconvenientes como compensação fixa, grande volume e problema de ressonância, ocorrem nos filtros passivos (DEY, 2015). A Figura 9 ilustra topologias usuais dos filtros passivos mais comuns.

Figura 9: Filtros harmônicos amortecidos: (a) sintonizado; (b) amortecido; (c) Tipo C.

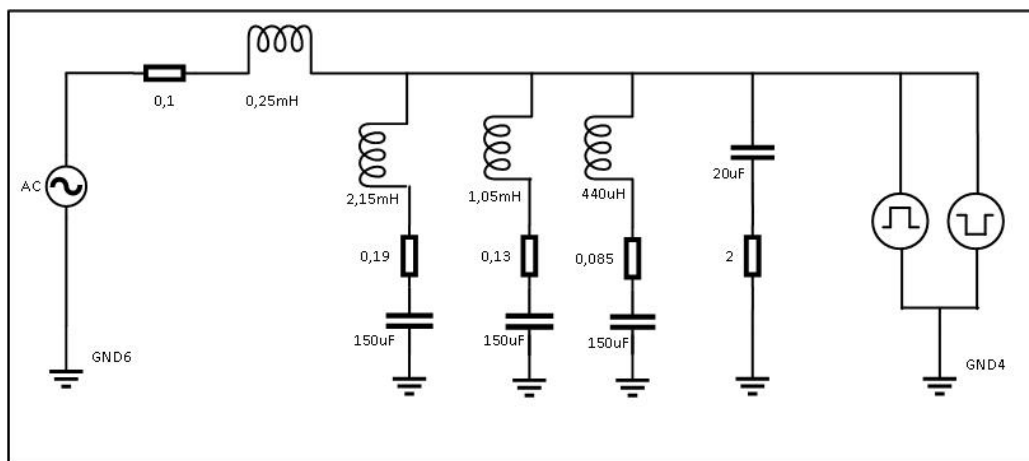


Fonte: autor

Uma solução clássica para a redução da contaminação harmônica de corrente em sistemas elétricos é o uso de filtros sintonizados conectados em derivação no alimentador. A estrutura típica de um filtro passivo de harmônicos de corrente é mostrada na Figura 10. As células LC série são sintonizadas nas proximidades das frequências que se deseja eliminar. Para as frequências maiores e utilizados, um simples capacitor funcionando como filtro passa-baixas. A carga considerada neste exemplo é do tipo fonte de corrente e é similar à que se obtém com o uso de um retificador tiristorizado trifásico, alimentando uma carga indutiva, como um motor de CC.

Na frequência da rede, os diferentes filtros apresentam uma reatância capacitiva, de modo que contribuem para a correção do fator de potência (na frequência fundamental), supondo que a carga alimentada seja de característica indutiva.

Figura 10 Filtragem passiva de corrente em carga não-linear.

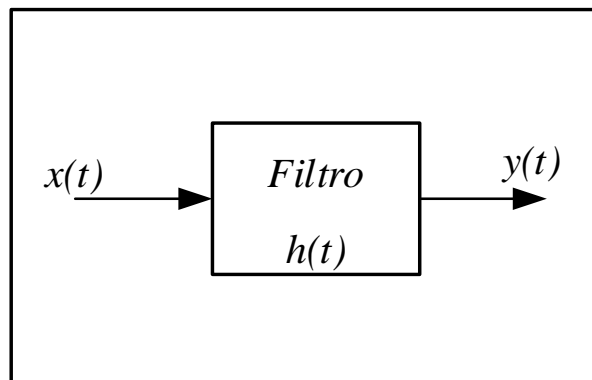


Fonte: o autor

2.6 FILTROS ATIVOS ANALOGICOS

O procedimento de filtragem é muito utilizado em processamento de sinais a fim de se selecionar uma determinada faixa de frequências, atenuando as demais. Matematicamente, um filtro pode ser modelado por um sistema linear invariante no tempo que modifica o sinal de entrada $x(t)$ através de uma função de transferência $H(s)$, fornecendo um sinal de saída $y(t)$, conforme o diagrama da Figura 11.

Figura 11: Diagrama de bloco da função de transferência de um filtro.



Fonte: autor

A relação entrada-saída do filtro da Figura 11 pode ser representada por $y(t)=h \times x(t)$, em que $h(t)$ é a resposta ao impulso do filtro de função de transferência $H(s)$. Por aplicação das funções de transferência $H(s)$ e da função de resposta em frequência $H(j\omega)$ por:

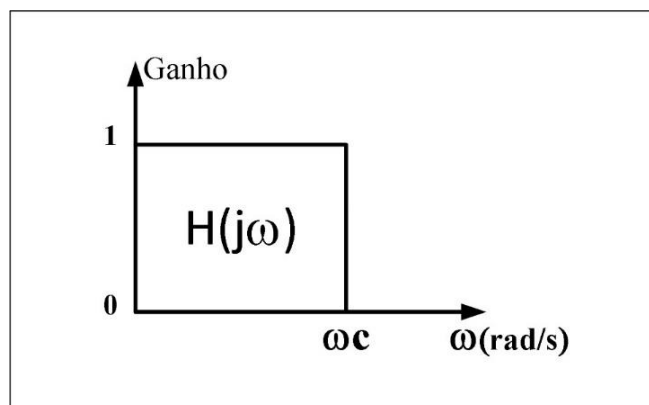
$$Y(s)=H(s) X(s) \text{ e} \quad (24)$$

$$Y(j\omega) =H(j\omega) X(j\omega). \quad (25)$$

Esta relação pode igualmente ser escrita em termos das transformadas de Laplace e de Fourier. O filtro ideal é um dispositivo capaz de selecionar com exatidão uma determinada faixa de frequências, chamada de banda de passagem, impedindo a passagem de todas as demais componentes, que constituem a chamada banda de rejeição, e a sua resposta em frequência é um filtro ideal de banda de passagem

$[0, \omega_c]$ está representada na Figura 12. Portanto igual a 1 na banda de passagem e 0 na banda de rejeição (HAYKIN, 2001).

Figura 12: Diagrama de bode $|H(j\omega)|$ da função de resposta em frequência de um filtro passa-baixas ideal.



Fonte: o autor

Um filtro ideal não pode ser implementado na prática, pois a sua função de resposta em frequência corresponde a um filtro que não é causal nem estável. Na prática, busca-se uma aproximação do comportamento ideal esperado como o da Figura 12

Para a construção prática de filtros, busca-se aproximar das características ideais das funções de transferência normalizada. Esta aproximação pode ser feita dando origem a diversas topologias de filtros. Destes, destacam-se três tipos:

1. filtros de Butterworth: buscam deixar a banda de passagem o mais plana o possível;
2. filtros de Tchebychev: buscam uma transição abrupta entre a banda de passagem e a banda de rejeição;
3. filtros de Bessel: buscam uma resposta de fase linear na banda de passagem.

Estas três características não são otimizadas independentemente, por exemplo, um filtro de Butterworth, que tem uma resposta plana na banda de passagem e uma transição entre banda de passagem e banda de rejeição mais suave que um filtro de Tchebychev de mesma ordem, já a transição abrupta garantida por um filtro de Tchebychev tem por efeito a presença de uma oscilação na amplitude desses filtros na banda de passagem.

Para a construção prática de filtros, são comumente utilizados os chamados filtros ativos, que associam componentes passivos lineares (resistores, capacitores e, dependendo da faixa de frequências utilizada, indutores) e componentes ativos lineares (amplificadores operacionais). O uso destes componentes permite escrever a relação entrada-saída de um tal filtro através de uma equação diferencial a coeficientes constantes do tipo

$$\alpha_N y^{(n)}(t) + \alpha_{N-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + \alpha_0 y(t) = \beta_M x^{(M)}(t) + \beta_{M-1} x^{(M-1)}(t) + \dots + \beta_0 x(t), \quad (26)$$

e, assim, por aplicação da transformada de Laplace, obtém-se que a função de transferência do filtro é

$$Av(S) = \frac{Av_0}{Bn(s)} \quad (27)$$

Com $S=j\omega$:

$$|Av(S)|^2 = |Av(S)||Av(-S)| = \frac{Av_0^2}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^{2n}} \quad (28)$$

Apartir das equações X e y nota-se que o módulo de Bn é dado por

$$|Bn(\omega)| = \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^{2n}} \quad (29)$$

O grau do polinômio do denominador n é chamado de *ordem* do filtro construído.

A implementação dos filtros ativos é possível a partir da combinação de amplificadores operacionais com elementos resistivos e capacitivos. Implementando filtros com o amplificador operacional, economiza-se no custo e dimensões dos componentes passivos, além do comportamento do filtro ser independente do circuito eletrônico acoplado à saída do filtro. Finalmente, o uso do amplificador possibilita uma amplificação do sinal na saída (MILLMAN, 1987).

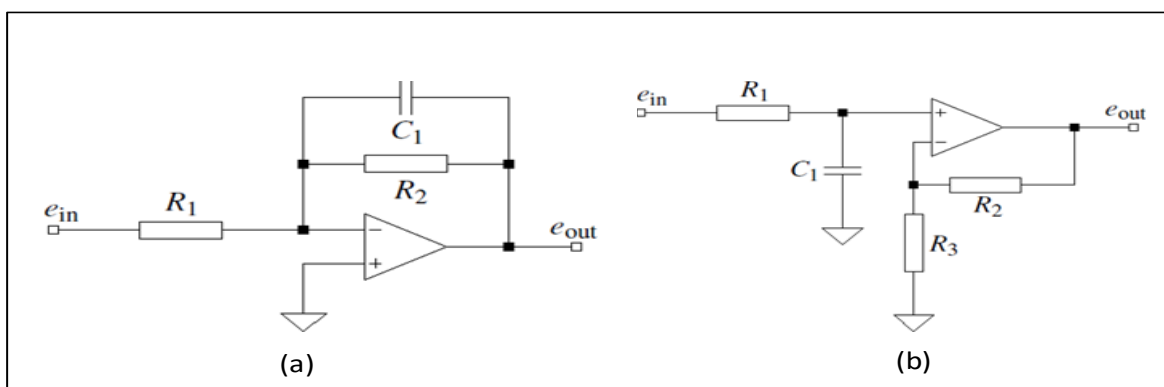
O filtro Butterworth é um tipo de projeto de filtro eletrônico que é desenvolvido de modo a ter uma resposta em frequência plana dentro da banda passante. A resposta em frequência de um filtro Butterworth é muito plana, não possui ondulação na banda passante, e se aproxima do zero na banda rejeitada. Quando visto em um gráfico

logarítmico, esta resposta desce linearmente até o infinito negativo. Para um filtro de primeira ordem, a resposta decresce em -0 dB por década. Para um filtro Butterworth de segunda ordem, a resposta em frequência tem uma queda de -40 dB por década, em um filtro de terceira ordem a variação é de -60 dB por década e assim por diante. Os filtros Butterworth possuem uma queda na sua magnitude como uma função linear com ω . O filtro Butterworth possui uma queda relativamente mais lenta e, portanto requer uma ordem maior para implementar uma especificação de banda rejeitada particular. Entretanto apresentará uma resposta em fase mais linear na banda passante do que outras topologias de filtros (MILLMAN,1987).

O projeto de um filtro deve ser iniciado escolhendo-se a ordem N do filtro, o seu ganho em baixas frequências A_0 e o seu tipo dentre Butterworth, Tchebychev e Bessel. Deve-se notar também que a frequência de corte ω_{ci} de cada filtro de ordem 1 ou 2 não é necessariamente igual à frequência de corte do filtro global ω_c , e, assim, as tabelas de coeficientes fornecem igualmente a razão ω_{ci}/ω_c entre as frequências de corte dos filtros parciais e a frequência de corte do filtro global.

Um filtro passa-baixas de ordem 1 do tipo pode ser implementado utilizando resistores, capacitores e amplificadores operacionais segundo duas configurações básicas, uma inversora e outra não-inversora, mostradas na Figura 13.

Figura 13: Configurações (a) inversora e (b) não-inversora de um filtro passa-baixas de ordem 1.



Fonte: autor

Normalizando a frequência de corte ω_0 1rad/s então a tabela 3 fornece os polinômios normalizados de Butterworth para valores de n até 8. Para os valores pares de n esses polinômios são produtos de formas quadráticas e para ordem ímpar aparece um produto adicional (S+1).

Tabela 3: Polinômios normalizados de Butterworth

n	Fatores do polinômio Pn(s)
1	(s + 1)
2	(s ² + 1,414s + 1)
3	(s + 1) (s ² + s + 1)
4	(s ² + 0,765s + 1) (s ² + 1,848s + 1)
5	(s + 1) (s ² + 0,618s + 1) (s ² + 1,618s + 1)
6	(s ² + 0,518s + 1) (s ² + 1,414s + 1) (s ² + 1,932s + 1)
7	(s + 1) (s ² + 0,445s + 1) (s ² + 1,247s + 1) (s ² + 1,802s + 1)
8	(s ² + 0,765s + 1) (s ² + 1,848s + 1) (s ² + 0,765s + 1) (s ² + 1,848s + 1)

A partir da tabela 3 e da equação 28 conclui-se que a função de transferência de filtro de Butterworth de segunda ordem é:

$$Av(S) = \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + 2k\left(\frac{s}{\omega_0}\right) + 1} \quad (30)$$

Onde $\omega_0 = 2\pi f_0$ é a frequência de corte no ponto -3dB. Analogicamente o filtro de primeira ordem é:

$$Av(S) = \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right) + 1} \quad (31)$$

Na pratica a função de transferência quando se utiliza amplificadores operacionais é:

$$Av \frac{V_0}{V_1(S)} = \frac{A_{v0} Z_3 Z_4}{Z_3(Z_1 + Z_2 + Z_3) + Z_1 Z_2 + Z_1 Z_4 (1 - A_{v0})} \quad (32)$$

Se a rede é um filtro passa- baixas, Z_1 e Z_2 serão resistores e Z_3 e Z_4 serão capacitores, para efeito de cálculos assume-se $Z_1 = Z_2 = R$ e $Z_3 = Z_4 = C$. A nova função de transferência desta rede será:

$$Av(S) = \frac{V_0}{V_1} = A_{v0} \frac{\left(\frac{1}{RC}\right)^2}{s^2 + \left(\frac{3-A_{v0}}{RC}\right)s + \left(\frac{1}{RC}\right)^2} \quad (33)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \text{ e } A_{v0} = 3 - 2k \quad (34)$$

2.7. FILTROS ATIVOS DE POTÊNCIA PARALELOS (FAPP)

Uma alternativa para minimizar os problemas de qualidade de energia causados pelo uso de cargas não lineares é a utilização dos FAPP que têm como função minimizar as correntes harmônicas da rede tornando-as senoidais. Além disso, em sistemas trifásicos a quatro-fios a corrente de neutro também é compensada (CAMPANHOL, 2013).

Os FAPPs controlam a distorção harmônica nos sistemas de potência. Eles usam conversores eletrônicos de potência para injetar componentes harmônicos na rede elétrica que cancelam os harmônicos nas correntes de fonte causadas por cargas não lineares. Agora muitos trabalhos de pesquisa são feitos nos FAPPs para o problema de mitigação de harmônicos (DEY, 2015).

A finalidade do uso do filtro ativo paralelo é reduzir as correntes que as cargas não lineares do sistema de potência produzem, juntamente com melhoria do fator de potência. O filtro ativo é projetado não só para reduzir a corrente que contém harmônicos, mas também reduzir o fator de potência no lado da corrente alternada. O filtro de frequência fundamental do sinal harmônico misto é necessário para eliminar os harmônicos. (MUKHERJEE, 2015).

Um método robusto para análise das correntes harmônicas deve ser utilizado para uma operação adequada dos FAPP que deve ser o uso de algoritmo insensível às variações dos sistemas reais (NICOLAE, 2015).

Várias técnicas ou métodos têm sido relatados para estimar a distorção harmônica, onde o algoritmo numérico mais utilizado é a transformada discreta de Fourier; no entanto, isso não pode ser aplicada em tempo real, o que irá requerer a coleta de um número de amostras significativas para proceder a estimativa. Em métodos de controle de amortecimento ativo na rede são propostos o uso de filtros ativos, com a função de mitigar os efeitos da distorção harmônica. O objetivo da aquisição dos sinais não é mudar o sinal de um sistema, mas obter informações mais precisas que possam ajudar a tomar decisões. Para atingir esse objetivo, um escalonamento harmônico é realizado no modelo dos filtros Taylor-Kalman-Fourier (MALDONADO, 2016).

O FAPP é formado basicamente por uma interface de potência com a rede, ficando responsável por injetar ou drenar as correntes no sistema de distribuição, e formar uma

malha de controle, responsável por coordenar o nível de corrente injetado na rede. Fundamentados na eletrônica de potência, os filtros ativos têm o seu princípio de funcionamento baseado no cancelamento de componentes harmônicas por meio da geração de componentes de mesmas amplitudes e frequências, mas com ângulos de fases opostos àqueles produzidos pela carga não linear.

Recentemente o uso de diferentes versões das matrizes de transformação começou a ser usada para levar em conta as harmônicas. Uma aplicação deste método de avaliação de componentes desequilibrados e distorcidos foi o uso da transformada “*Discrete-Wavelet*”, proposta para avaliar os componentes simétricos (CHICCO, 2017). A aquisição harmônica é uma das partes mais importantes em filtros ativos de potência paralelos (FAPP). Um dos métodos de aquisição harmônica mais comumente utilizado é baseado na teoria da potência reativa instantânea. Este método é fácil de implementar, mas os harmônicos extraídos são misturados, o que o torna desprovido de flexibilidade. A transformada discreta de Fourier, tipicamente implementada pela transformada rápida de Fourier (FFT), é um método superior para a análise harmônica. No entanto, na aplicação do filtro de potência ativa o uso de um algoritmo FFT não é prático, pois filtros ativos de potência paralelos (FAPP) precisam de uma referência de corrente harmônica em tempo real traçando a mudança da corrente de carga. (LING, 2017).

Os conversores de potência modulados por largura de pulso são amplamente usados nas aplicações de conversão de energia, por exemplo, sistema de fonte de alimentação ininterrupta (nobreaks), conversor de fonte de energia renovável (painéis solares) e outras aplicações de eletrônica de potência que são elementos provocadores de distorção na rede elétrica; por exemplo, fontes de energia de corrente alternada programáveis fornecem tensões de saída senoidais ajustáveis, esses sistemas de fornecimento de energia sofrem de vários distúrbios, incluindo incerteza de modelagem e flutuação de frequência em aplicações práticas. O método de controle para tal sistema deve ser estável e robusto em face das flutuações de frequência e variações de carga (LIU, 2018).

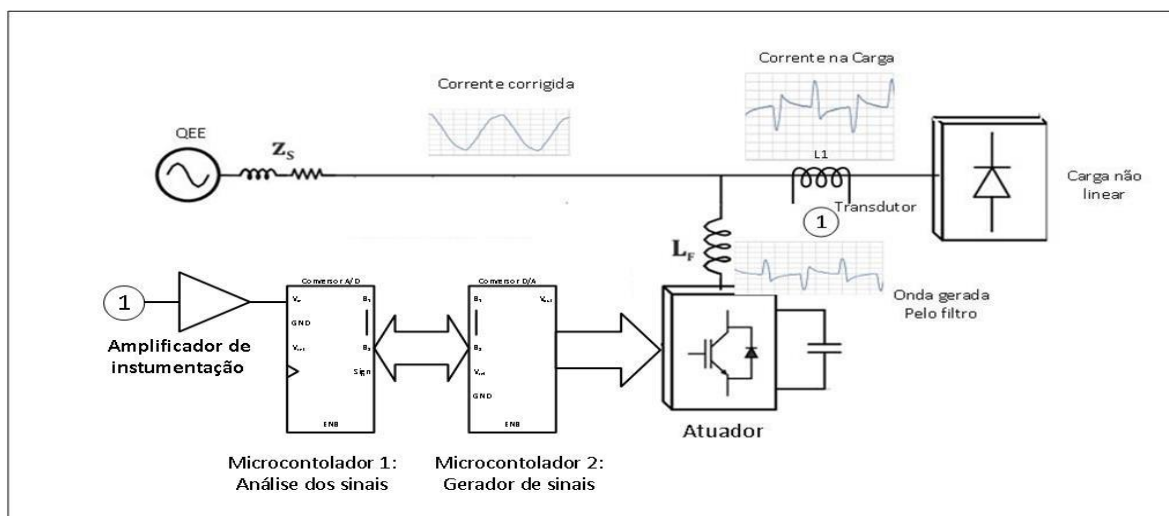
É necessário então um hardware implementado por um processador digital de sinais para visualizar os valores de tensão de entrada, corrente de entrada e tensão de saída e estimar a potência máxima na rede elétrica bem como gerar o pulso de disparo para os filtros ativos de potência paralelo (SRINATH, 2017).

A estratégia de controle do filtro de energia ativo desempenha um papel vital no desempenho geral. A redução do sinal de referência e a alta resposta dinâmica do controlador são os principais requisitos para a compensação desejada. No entanto, seguir rapidamente a corrente de referência gerada sem qualquer erro é uma função básica desses controladores, que é desafiadora devido às altas taxas de variação e largura de banda de uma referência. Com o melhor resultado, melhor seria a atenuação dos componentes de frequência de comutação. Além disso, o processo de processamento dos controladores atuais (DEY, 2015).

O sinal de referência, processado pelo controlador, é o componente chave que garante a operação correta do FAPP. A estimativa do sinal de referência é iniciada através da detecção de sinais essenciais de tensão e corrente para coletar informações precisas de variáveis do sistema. As variáveis de tensão a serem detectadas são a tensão da fonte de corrente alternada, a tensão contínua no barramento do FAPP e a tensão nos transformadores de interface. As variáveis de corrente típicas são corrente de carga, corrente de fonte corrente alternada, corrente de compensação do FAPP (DEY, 2105).

Com base nos retornos das variáveis do sistema, os sinais de referência dos níveis de tensão e corrente são estimados no domínio de frequência do domínio da frequência. A corrente harmônica a ser compensada é utilizada como um comando de referência. Com a informação obtida, o controlador é construído para compensar a distorção existente. Sinais de comando apropriados são enviados para os dispositivos de estado sólido do FAPP e assim são geradas correntes senoidais. Pode-se ver facilmente que, se houver algum erro ao estimar os sinais de comutação adequados, o desempenho geral do filtro ativo poderá ser seriamente degradado. Esse controle é realizado usando dispositivos digitais e analógicos discretos ou dispositivos programáveis avançados, como microcomputadores de chip único, DSPs ou implementação de FPGAs. A Figura 14 mostra que a parte de controle como um papel fundamental no processo de filtragem.

Figura 14: Diagrama em blocos de um filtro FAPP.

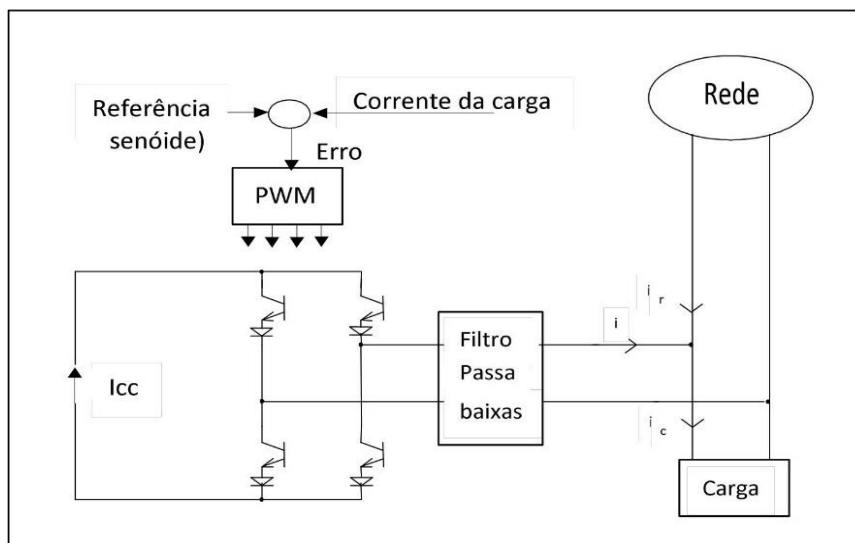


Fonte: o autor

Conforme comentado, o filtro ativo paralelo (FAP) é geralmente empregado para corrigir harmônicas de corrente de cargas não-lineares. Ele é conectado em paralelo com a rede e com a carga, atuando como um dispositivo que injeta ou drena corrente no ponto de conexão, de maneira que a corrente total drenada da rede elétrica, filtro mais carga, seja puramente senoidal e em fase com a tensão da rede. Desta forma, o conjunto de carga não linear associado ao filtro ativo possui um comportamento de carga resistiva para a rede elétrica, resultando em um fator de potência muito próximo à unidade. Com uma estratégia de controle adequada, o FAP também é capaz de compensar deslocamentos da componente fundamental de corrente proveniente de cargas lineares de caráter indutivo ou capacitivo. Esta característica contribui para a versatilidade do FAP, tornando-o mais atraente para o emprego como filtro (SOUZA,2003).

O objetivo de um filtro em derivação (“shunt”) é minimizar a distorção da corrente que flui pela rede elétrica, conforme mostra a Figura 15. O filtro deve ser capaz de injetar uma corrente que, somada à corrente da carga, produza uma corrente “limpa” na rede.

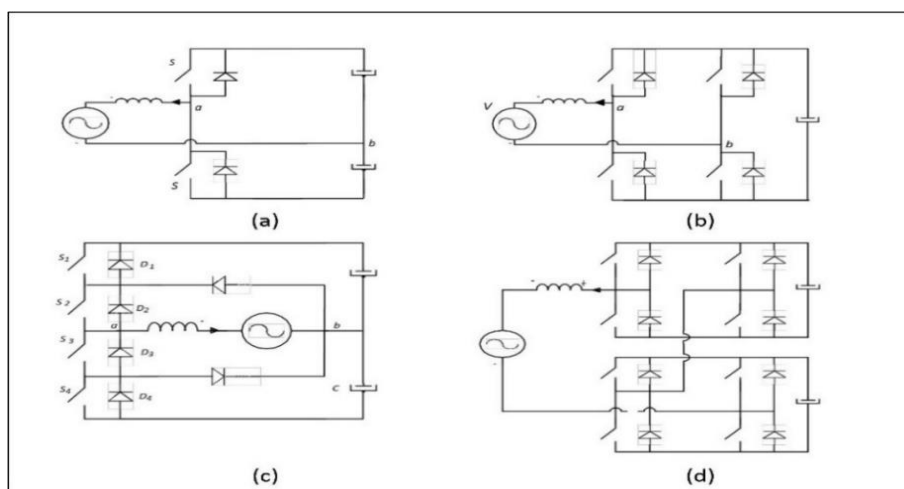
Figura 15: Filtro ativo tipo derivação, monofásico.



Fonte: o autor

Para o funcionamento como filtro ativo o inversor de tensão em ponte completa é a topologia mais utilizada. Na Figura 16 são apresentadas as topologias de inversores de tensão em meia ponte, ponte completa, com grampeamento do ponto neutro e a conexão série de inversores de tensão monofásicos.

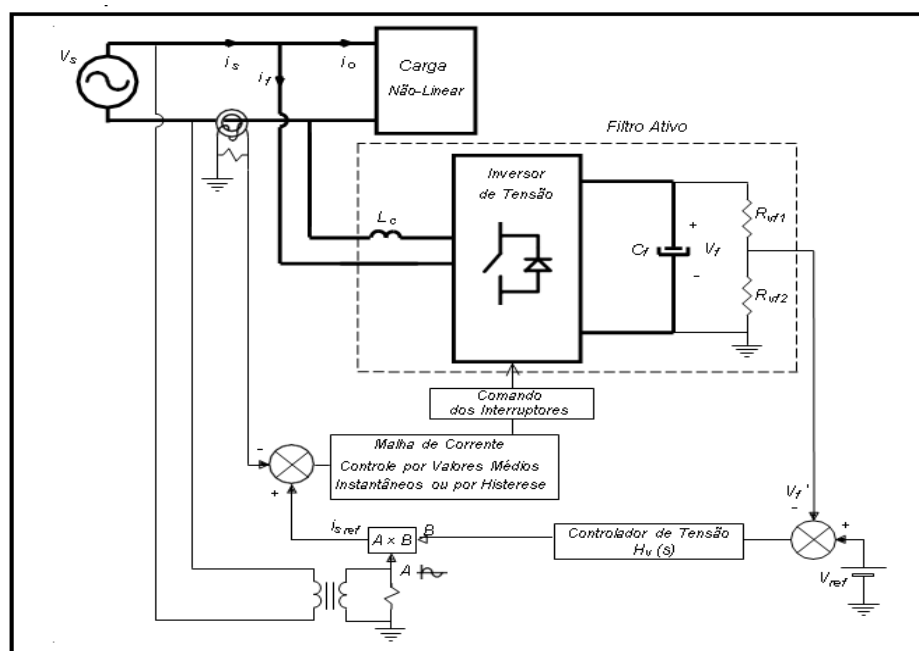
Figura 16:(a) Inversor de tensão em meia ponte, (b) em ponte completa, (c) com grampeamento no ponto neutro e (d) inversores de tensão em série



Fonte: adaptada de (SOUZA, 2003)

Na Figura 17 é apresentado um diagrama de blocos de um inversor de tensão genérico operando como filtro ativo do tipo paralelo. Este é conectado em paralelo com a carga não-linear funcionando como um caminho alternativo para as harmônicas de corrente e para a potência reativa, de maneira que, para a rede, a carga não-linear juntamente com o filtro ativo apresenta uma característica resistiva.

Figura 17: Diagrama em blocos de inversor genérico



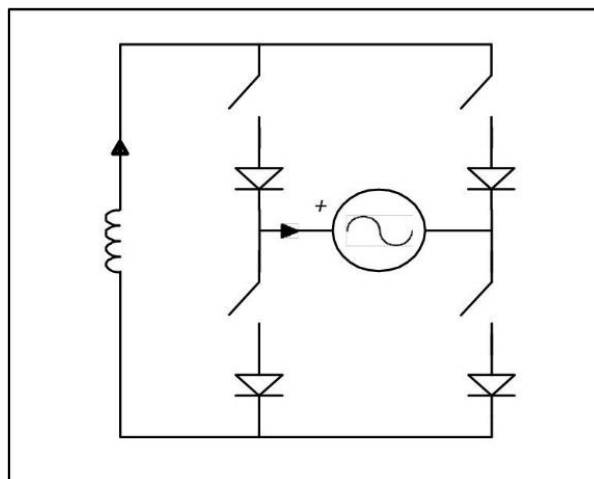
Fonte: o autor

O método de controle consiste em monitorar a corrente da rede e não a corrente na carga não-linear. Desta maneira não é necessário calcular a componente fundamental da corrente de carga e suas componentes harmônicas, o que exigiria a observação de ao menos um ciclo da rede, comprometendo o desempenho dinâmico do filtro ativo.

O inversor de corrente é apresentado na Figura 18. No lado da carga do inversor tem-se um indutor de valor elevado, que determina uma carga com característica semelhante a uma de fonte de corrente constante. No lado da corrente alternada do inversor está conectado à rede elétrica. Devido às

características de funcionamento deste conversor, os interruptores são submetidos a tensões alternadas utiliza-se, portanto, diodos em série com essas chaves.

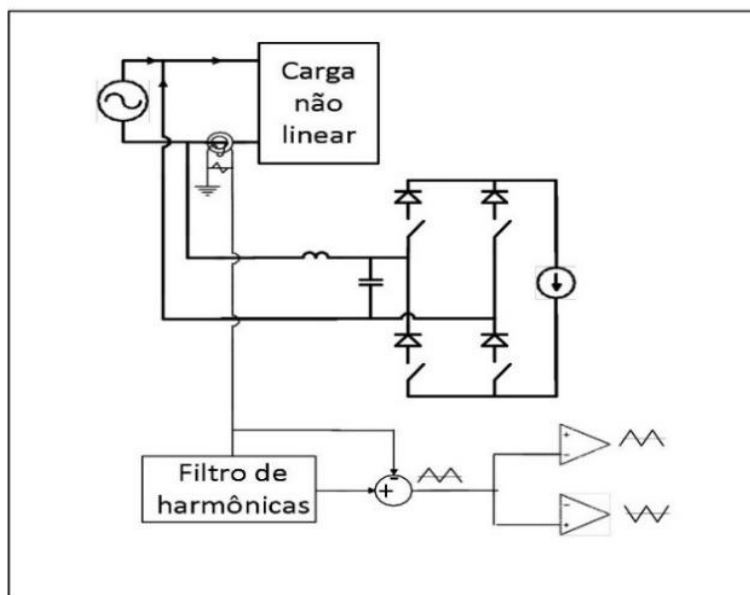
Figura 18 – Inversor de corrente



Fonte: adaptada de (SOUZA, 2003)

A maneira mais usual para o controle do inversor de corrente operando como filtro ativo é apresentada na Figura 19. Técnica que consiste em monitorar a corrente das cargas não lineares e calcular sua componente fundamental. A componente fundamental da corrente de carga é subtraída da corrente total de carga, resultando em uma corrente que representa as componentes harmônicas na carga, que é então comparada com os sinais portadores, gerando as ordens de comando para os interruptores. O problema desta metodologia de controle é que para calcular-se a componente fundamental da corrente de carga é necessário observar-se pelo menos um período de tempo da rede, que prejudica o desempenho dinâmico do filtro ativo uma vez que por alguns ciclos da rede o filtro não compensará adequadamente as cargas (SOUZA, 2003).

Figura 19: Inversor de corrente operando como filtro ativo



Fonte: o autor

2.8. DISPOSITIVOS MICROCONTROLADOS PARA IMPLEMENTAR UM SISTEMA DE CONTROLE DE HARMÔNICOS EM REDES ELÉTRICAS

Os componentes harmônicos geram uma distorção na forma de onda. É necessário fazer uma análise do espectro harmônico do sinal de tensão e corrente da rede para se obter uma medição precisa que pode ser feita através da decomposição dessas harmônicas no sistema, através da Série de Fourier (SIMON,2001). Uma forma possível de decomposição das harmônicas da rede para a análise por sistemas microcontrolados é a Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Esse tipo de análise geralmente é realizado por um Processador Digital de Sinais (DSP), dispositivo de custo superior aos microcontroladores comuns. Faz-se necessário buscar alternativa ao uso dos DSPs para possibilitar a construção de um dispositivo de baixo custo capaz de executar o algoritmo FFT.

O Arduino é um microcontrolador de placa única, projetado para tornar mais acessível o processo de utilização da eletrônica em projetos multidisciplinares. O hardware consiste em um dispositivo de código de fonte aberta, inicialmente, projetado para microcontroladores Atmel AVR de 8 bits. O software consiste na linguagem de programação C++ e do *bootloader* que roda no microcontrolador. O Arduino é o que

chamamos de plataforma de computação física ou embarcada.

A placa Arduino é composta de um microprocessador Atmel AVR, um cristal ou oscilador e um regulador de tensão de 5V. A placa do Arduino disponibiliza pinos de entrada saída do microcontrolador para que se possa conectar outros circuitos eletrônicos, sensores e atuadores.

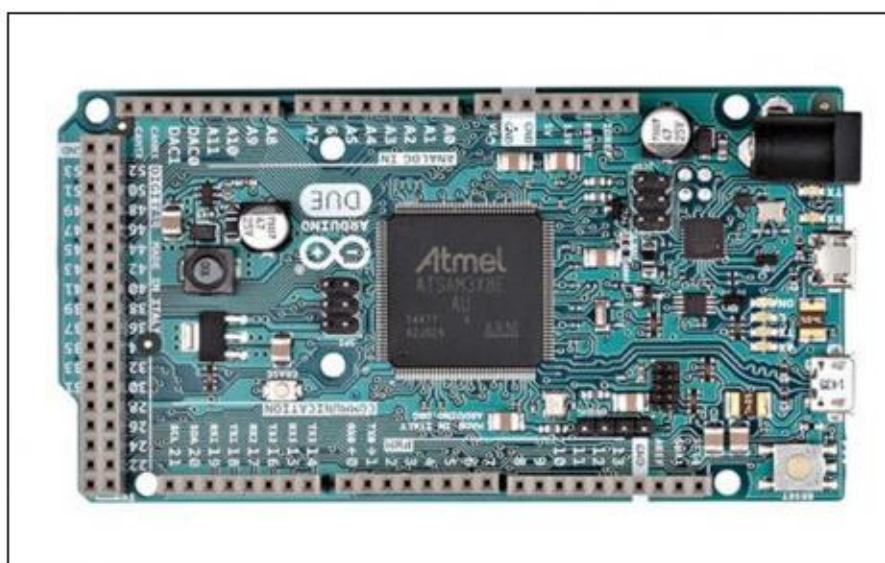
O Arduino é programado utilizando o IDE proprietária em código aberto; um software livre que lhe permite programar na linguagem C/C++ e pode até ser estendida por meio de bibliotecas C++.

O hardware e o software são *open source*, o que significa que o código, os esquemas e projeto são abertos e qualquer pessoa pode usá-los livremente para fazer o que desejar.

O Arduino Due é a primeira incursão da equipe do Arduino na utilização de processadores ARM em vez de processadores com arquitetura AVR. O Arduino Due tem um processador de 32 bits em vez do habitual processador de 8 bits, executa a uma frequência de 84 Mhz e tem 512 KB de memória flash.

A Figura 20 mostra um Arduino Due, a primeira placa de Arduino baseada em um microcontrolador do núcleo de 32-bit. Possui 54 pinos de entradas/saídas digitais e 12 entradas analógicas. O Arduino Due pode ser alimentado através do conector USB ou por uma fonte de alimentação externa. A placa pode ser alimentada com uma fonte externa de 7 V a 12 V.

Figura 20: Fotografia da placa Arduino Due



Fonte: o autor

O Arduino Due tem 512 KB (2 blocos de 256 KB) de memória flash para armazenar o código de programa. O bootloader é pré-gravado pelo fabricante Atmel e é armazenado em uma memória ROM dedicada. A memória SRAM disponível é 96 KB em dois bancos de 64 KB e 32 KB, respectivamente. Toda a memória disponível (flash, RAM e ROM) pode ser acessada diretamente. Cada um dos 54 pinos digitais pode ser configurado como uma entrada ou saída. Eles operam em 3,3 V. Cada pino pode fornecer uma corrente de 3 mA ou 15 mA ou receber uma corrente de 6 mA ou 9 mA, dependendo do pino.

O Arduino Due tem 12 entradas analógicas, cada uma das quais pode fornecer 12 bits de resolução (ou seja, 4096 valores diferentes). É possível alterar a resolução do ADC. Os pinos de entradas analógicas medem de terra para um valor máximo de 3,3 V. Tem dois pinos (DAC0, DAC1) que fornecem saídas analógicas com resolução de 12 bits (níveis de 4096). Esses pinos fornecem tensão de saída de entre 0,55 V a 2,75 V apenas.

3.MÉTODO PARA PROTOTIPAGEM DO SISTEMA DE DETECÇÃO DE HARMÔNICOS DA REDE ELÉTRICA

Neste capítulo é descrito a metodologia para desenvolvimento de um sistema capaz de distinguir as componentes harmônicas de até 13ª ordem em um sistema elétrico monofásico (fase-neutro) efetuando leituras de tensão e corrente elétrica, utilizando como plataforma um dispositivo para aquisição de dados microcontrolado com núcleo ARM de 32 bits a partir da placa de Arduino Due.

Um circuito de aquisição de dados com amplificadores de instrumentação foi desenvolvido, assim como fontes de tensão para a alimentação do dispositivo

Os locais escolhidos para a realização do estudo foram os laboratórios de informática da ETEC Paulino Botelho, em São Carlos. Inicialmente, são realizadas as medições de tensão e correntes elétricas do sistema elétrico de alimentação desses laboratórios e então é feito o diagnóstico sobre a situação destas unidades de consumo, com relação as distorções harmônicas de corrente e de fator de potência, comparativamente aos critérios recomendados pela legislação.

3.1 DADOS EXPERIMENTAIS

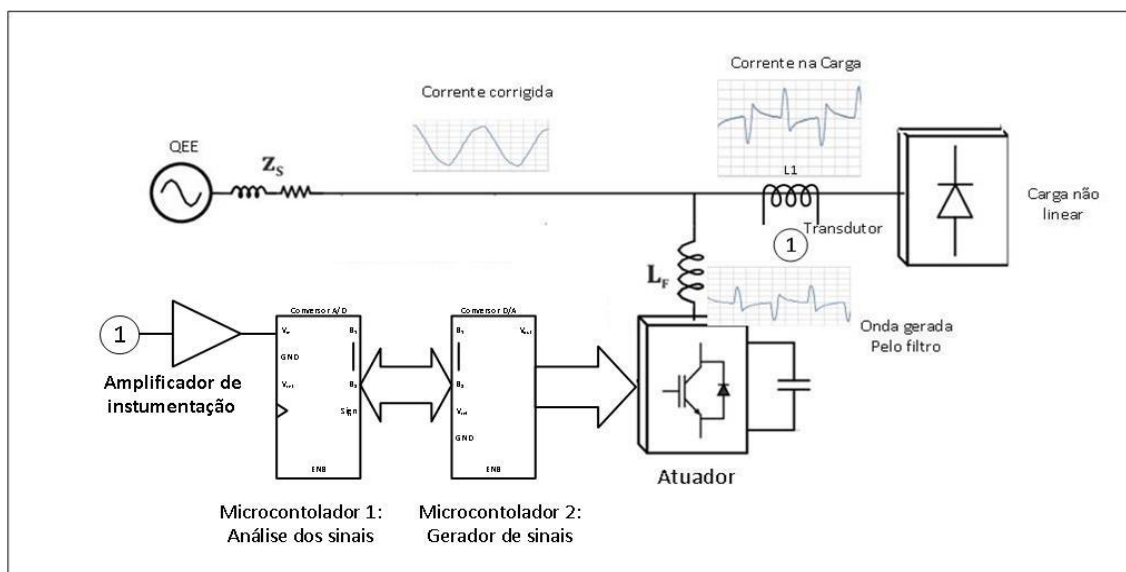
Para a avaliação de desempenho e qualidade de energia, diferentes ferramentas analíticas são aplicadas, como as descritas no capítulo 2. A Transformada rápida de Fourier (FFT) calcula a distorção harmônica total e fatores harmônicos na rede elétrica. A FFT da corrente de saída avalia e mede os diferentes componentes harmônicos da forma de onda, além da amplitude fundamental de 60 Hz, da corrente da rede. A Distorção Harmônica Total ou THD, de um sinal é uma medida da distorção harmônica presente no sistema sendo definida como a razão da soma de todas as amplitudes de todos os componentes harmônicos com a amplitude da frequência fundamental (ZHAO, 2016).

A fim de investigar dados e calcular a FFT sobre diferentes condições de carga, foi implementado um protótipo experimental microcontrolado conectado a um transdutor de corrente elétrica para aquisição de dados em tempo real capaz de capturar e analisar o sinal de corrente da rede. O dispositivo experimental e os parâmetros são mostrados da seguinte forma:

- (1) Fonte de energia: 127V / 60Hz.
- (2) Carga linear: Resistores de potência.
- (3) Carga não linear: Computadores e reatores eletrônicos.
- (4) Plataforma Microcontrolada Arduino UNO e Due.
- (5) Transdutor de corrente.
- (6) Amplificadores de instrumentação.
- (7) Notebook.
- (8) Osciloscópio Minipa modelo MO-2061.
- (9) Amperímetro Minipa modelo ET-3200.

Na Figura 21 é apresentado o diagrama de blocos do projeto idealizado, constituído de um transdutor de corrente conectado ao amplificador operacional de instrumentação, cuja saída envia sinal amostrado para o microcontrolador que efetua a captura das amostras e aplica o algoritmo FFT. O segundo microcontrolador recebe o resultado da FFT amostrada, filtra o valor da frequência fundamental do sinal de corrente e calcula sua transformada inversa, apenas com os harmônicos superiores e desfasados em cento e oitenta graus. O somatório das funções seno resultantes é devidamente sincronizado no tempo e aplicado a saída analógica do segundo microcontrolador que atua como controle do FAPP.

Figura 21: Diagrama em blocos do projeto



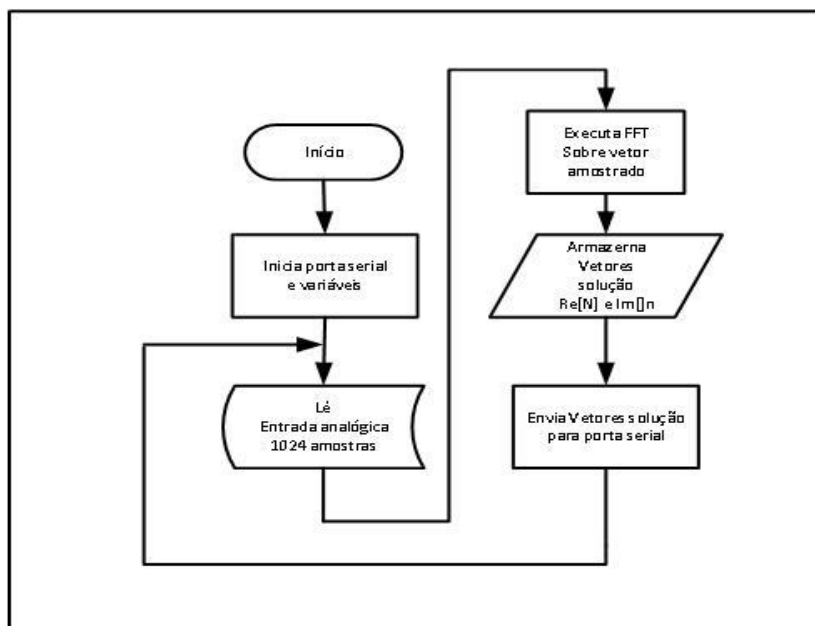
Fonte: autor

Optou-se para a validação das amostras por conectar o módulo de detecção, saída do amplificador de instrumentação analógico, ao osciloscópio digital Minipa modelo MO-2061, para essa análise de Fourier inicial.

Com o módulo de detecção preparado para processamento, foi desenvolvido um programa em C++ para Arduino para realizar a aquisição dos dados e calcular os valores de amplitudes e fases do espectro de frequência utilizando o algoritmo da transformada rápida de Fourier. Para o cálculo da FFT do sinal de entrada foi implementada uma rotina para ler um vetor de 1024 amostras dos valores do sinal de entrada, espaçados igualmente no tempo. Realizadas as operações da FFT e retorna-se dois vetores tamanho de 512 dos valores de amplitude e fase dessas frequências.

A Figura 22, mostra o fluxograma do programa desenvolvido para avaliar o algoritmo FFT e enviar para as saídas seriais do Arduino.

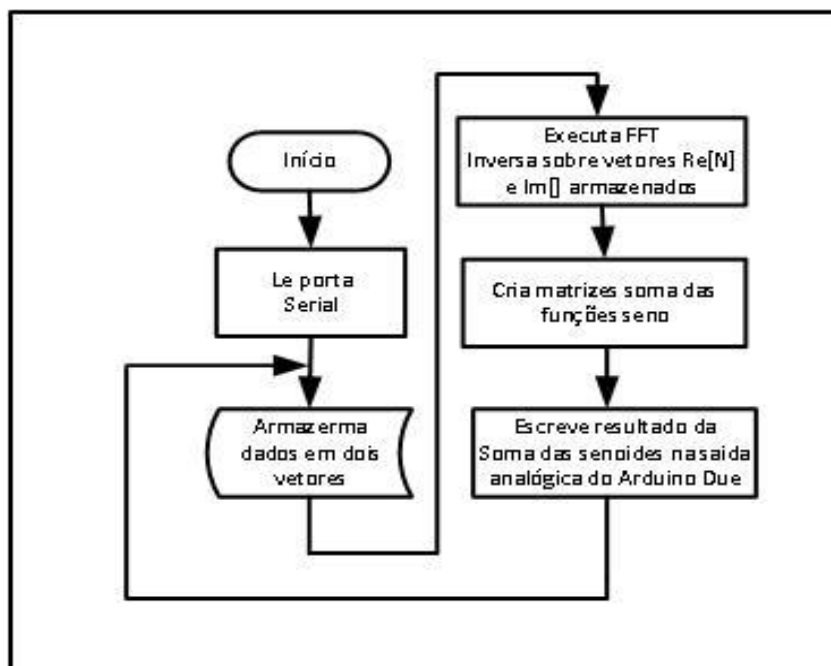
Figura 22: Fluxograma de processos do programa FFT do Arduino



Fonte: autor

Foi elaborado uma rotina em C++ para a execução da FFT inversa. Como o algoritmo de geração da FFT inversa deve ser em um loop infinito da mesma forma que o algoritmo de captura, optou-se por utilizar um segundo Arduino para executar a FFT inversa. A Figura 23 mostra o fluxograma do algoritmo para executar a FFT inversa.

Figura 23: Fluxograma de processos do programa FFT inversa do Arduino



Fonte: autor

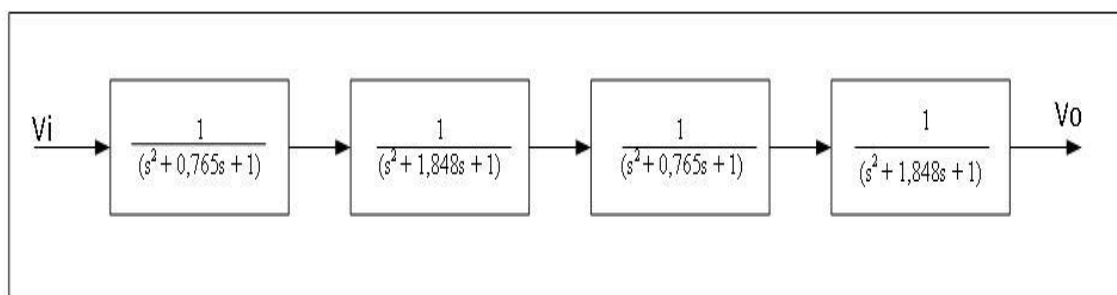
Devido a essas limitações, principalmente ao tempo de processamento, optou-se em manter o microcontrolador para a análise das distorções dos sinais e implementar um filtro ativo analógico para a filtragem das correntes harmônicas.

Os modelos utilizados para a construção filtro utilizado foram polinômios de Butterworth. Foi escolhido esse tipo de filtro devido sua em frequência ser plana na banda passante e se aproximar do zero na banda de rejeição. A simplicidade se construção dos filtros de Butterworth é que ele mantém o mesmo formato para projetos de baixa e também para as ordens mais elevadas porém com uma inclinação bastante íngreme na banda de atenuação enquanto outros tipos de filtros, Bessel, Chebyshev, possuem formatos diferentes para ordens mais elevadas portanto mais complexos em seu projeto e construção.

Optou-se por simular as perturbações promovidas por essas cargas não lineares avaliando o comportamento dos filtros analógicos projetados a partir de amplificadores nas diferentes situações. Para os testes dos filtros foi utilizado o software Multisim versão 11.

A Figura 24 mostra um diagrama em blocos da função de transferência normalizada de um filtro de 8 ordem. Para a construção de filtros de ordem par basta associar filtros de segunda ordem em série como ilustra essa figura.

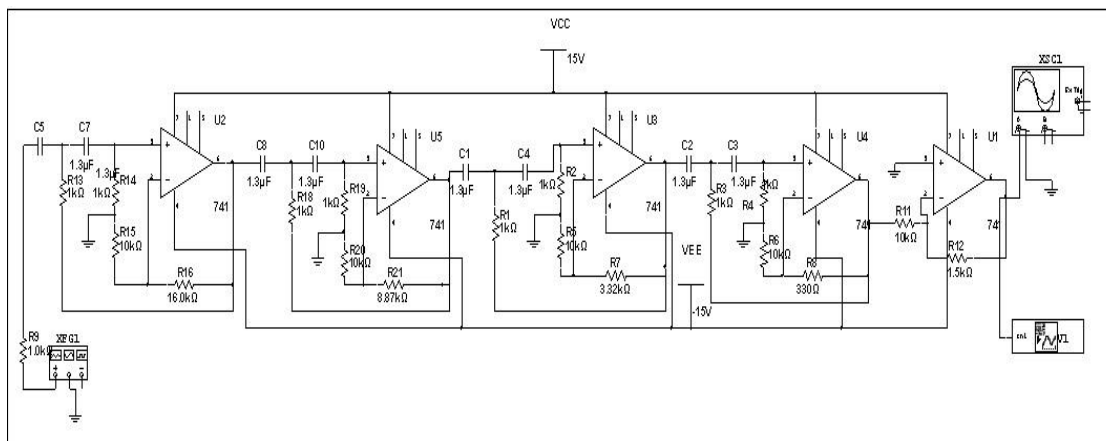
Figura 24: função de transferência de filtro de Butterworth de 8 ordem



Fonte: autor

Para validar o funcionamento do filtro utilizou-se quatro amplificadores operacionais, configurados cada um como filtro de segunda ordem, que associados realizam a função de um filtro de oitava ordem, como mostra a Figura 25.

Figura 25: Diagrama de filtro de 8ª ordem com operacionais.

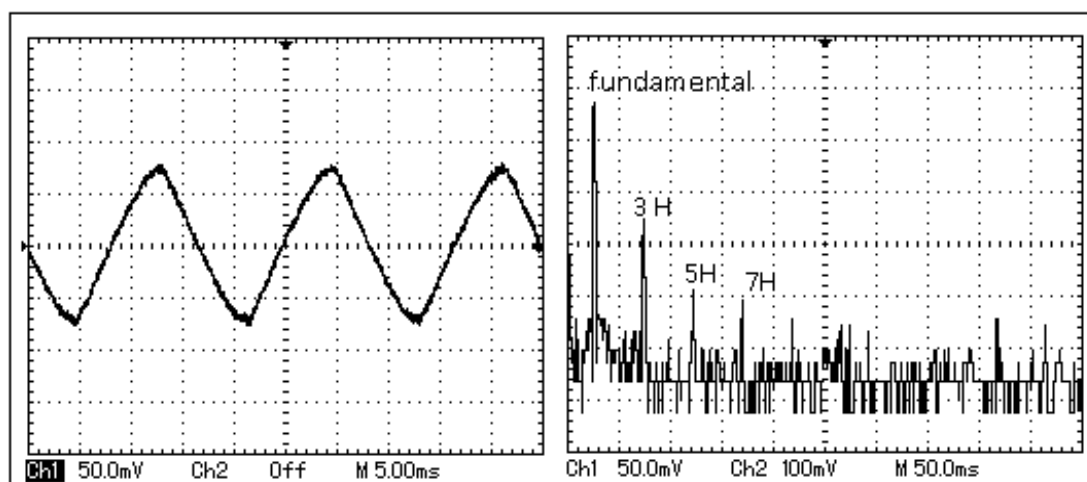


Fonte: autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foi conectado ao transdutor uma carga puramente resistiva, que foi analisada utilizando o osciloscópio digital. Essas cargas presentes nos circuitos de potência produzem uma corrente elétrica com a forma de onda apresentada na Figura 26a. A Figura 26b, mostra a forma de onda e o espectro de harmônicas de uma corrente de 1,4 Amperes em uma carga resistiva. Observou-se um sinal de corrente semelhante a um sinal senoidal levemente distorcido. Executando a análise FFT observa-se a presença de distorção harmônica, indicada pela frequência fundamental e seus harmônicos (3H, terceiro; 5H, quinto; 7H, sétimo).

Figura 26: Onda e Espectro de corrente em carga resistiva obtidas no osciloscópio.



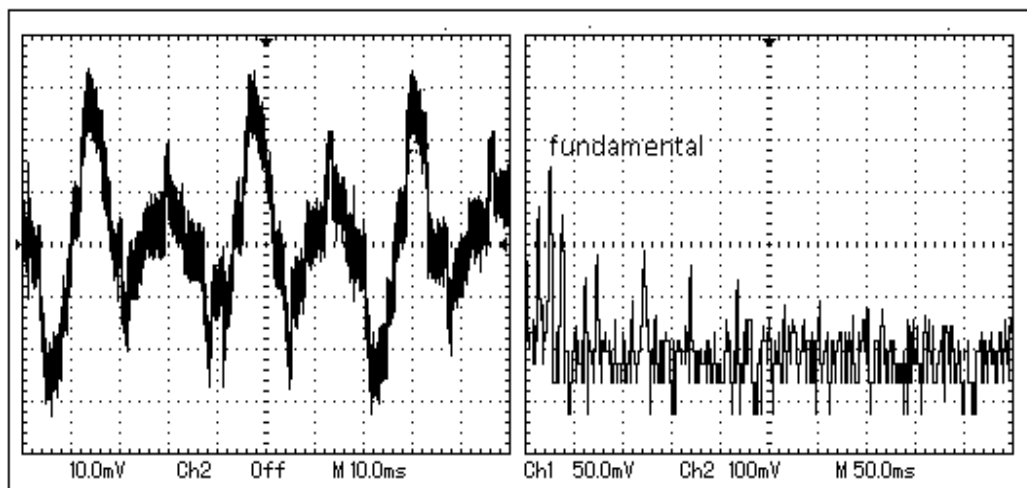
Fonte autor

(a)

(b)

A Figura 27, mostra a forma de onda medida e o espectro harmônica de uma corrente de 0,4 amperes em uma fonte de um computador. Analisando é possível observar a distorção na forma da corrente que alimenta o computador quais e são as principais harmônicas que afetam o sistema de potência, e assim estabelecer estratégias de controle.

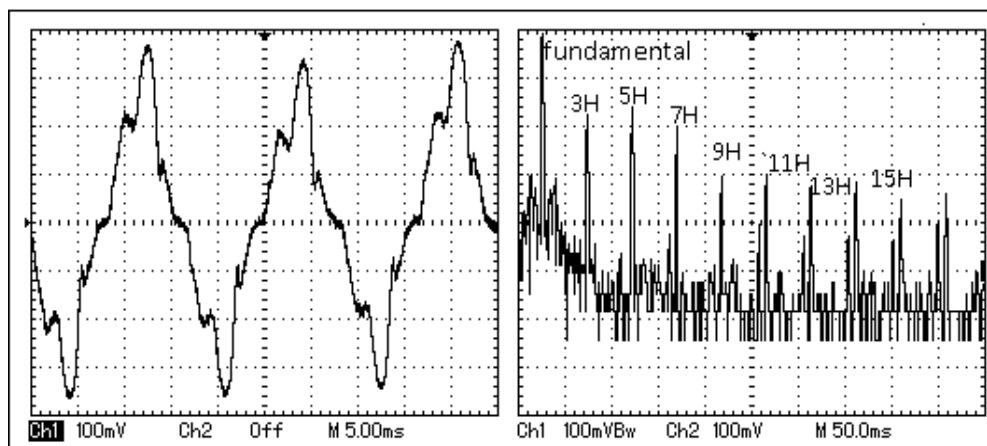
Figura 27: Forma de onda e o espectro harmônico da fonte de um computador obtidas pelo osciloscópio.



Fonte: autor

A Figura 28, mostra uma corrente de 3,2A na alimentação de oito computadores. Observa-se uma forma de onda senoidal distorcida e quais são as principais harmônicas (3H, terceiro; 5H, quinto; 7H, sétimo; etc...) que afetam esse sistema de potência. Identificadas as amplitudes das distorções pode-se estabelecer estratégias de controle para corrigir e minimizar essas correntes.

Figura 28: Forma de onda e o espectro harmônica da fonte de oito computadores obtidas pelo osciloscópio.



Fonte: autor

O modulo de detecção montado foi conectado ao Arduino a fim de realizar a aquisição dos dados e calcular os valores de amplitudes e fases do espectro de frequência utilizando o algoritmo FFT.

Foram medidos o tempo de 2 microssegundos para aquisição de dados com o microcontrolador Arduino UNO. O tempo necessário para execução da FFT foi de 2,80 segundos para um vetor de 512 amostras, e o algoritmo utilizou aproximadamente 78% da memória dinâmica do microcontrolador.

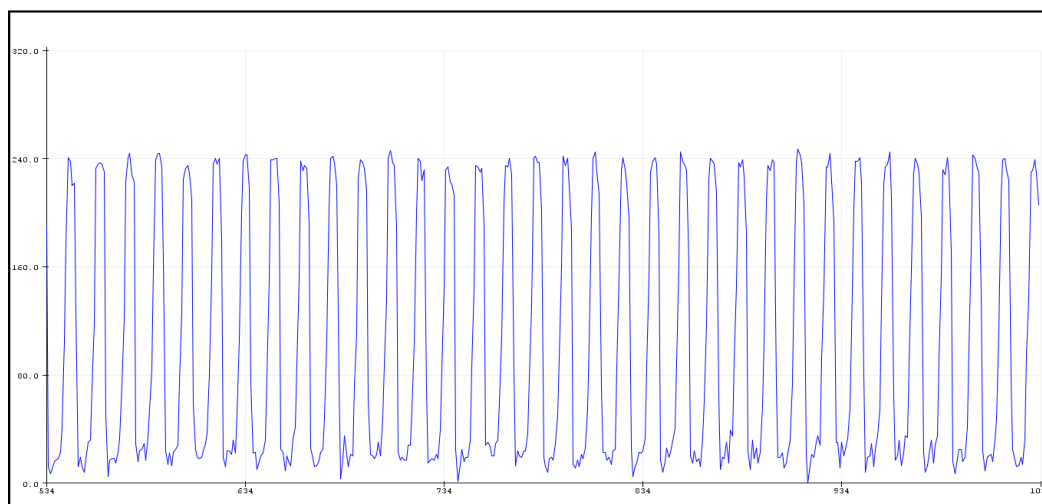
Devido às limitações observadas optou-se por conectar o modulo de detecção a um Arduino Due, e obteve-se um tempo de processamento das amostras de 40ms e uso de 4% da memória dinâmica desse microcontrolador.

Para realização dos testes da rotina, foi utilizado um gerador de sinal para gerar ondas senoidais, triangulares e quadradas de frequência fundamental 60Hz. Assim, esses sinais foram capturados, analisados e processados no Arduino para verificar o comportamento dos espectros gerados.

Após a construção do sistema de aquisição de dados, foram obtidos os gráficos de série de Fourier através dos na interface IDE do Arduino para visualização dos resultados do algoritmo desenvolvido.

A Figura 29 mostra a forma de onda da corrente elétrica consumida pela fonte de alimentação de um notebook. O número de senóides capturadas corresponde ao tamanho da janela escolhida para a FFT. Utilizou-se a janela fixa de Hamming.

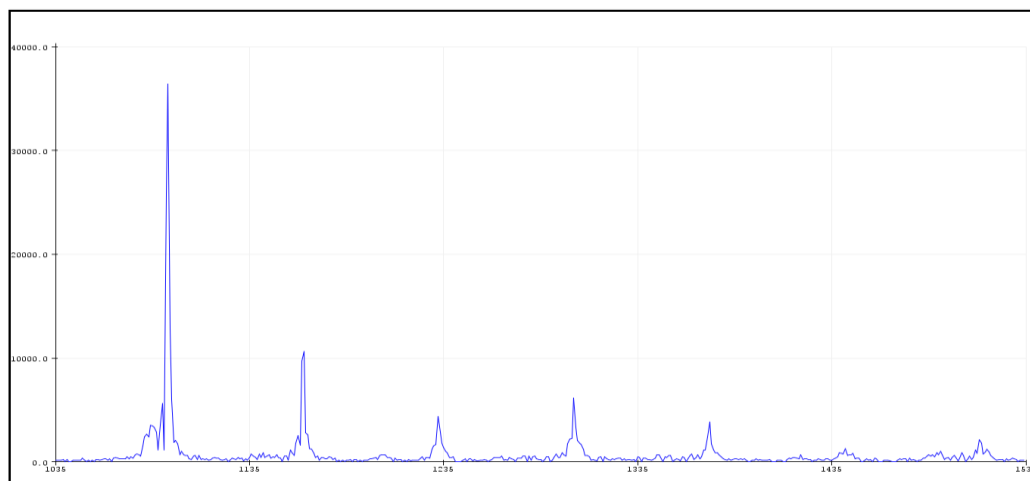
Figura 29: Corrente de uma fonte de notebook capturado pelo Arduino Due



Fonte: autor

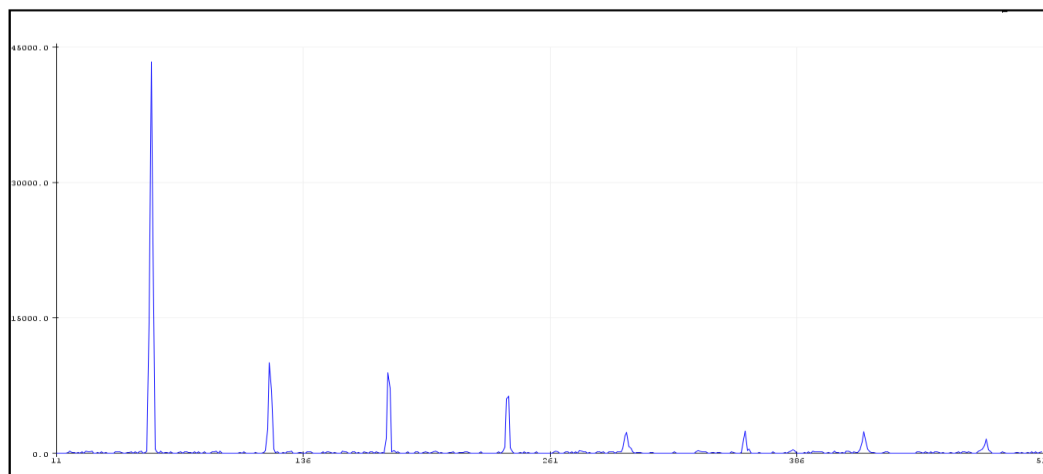
Na Figura 30, tem-se o resultado da FFT executada pelo Arduino Due, foram utilizadas 1024 amostras do sinal capturado. A Figura 31 mostra os dados da FFT normalizados, onde foram desprezados os valores de distorção insignificantes para o cálculo da FFT inversa.

Figura 30: Transformada Rápida de Fourier Corrente de uma fonte de notebook capturado pelo Arduino Due



Fonte: autor

Figura 31: Transformada Rápida de Fourier Corrente Normalizada



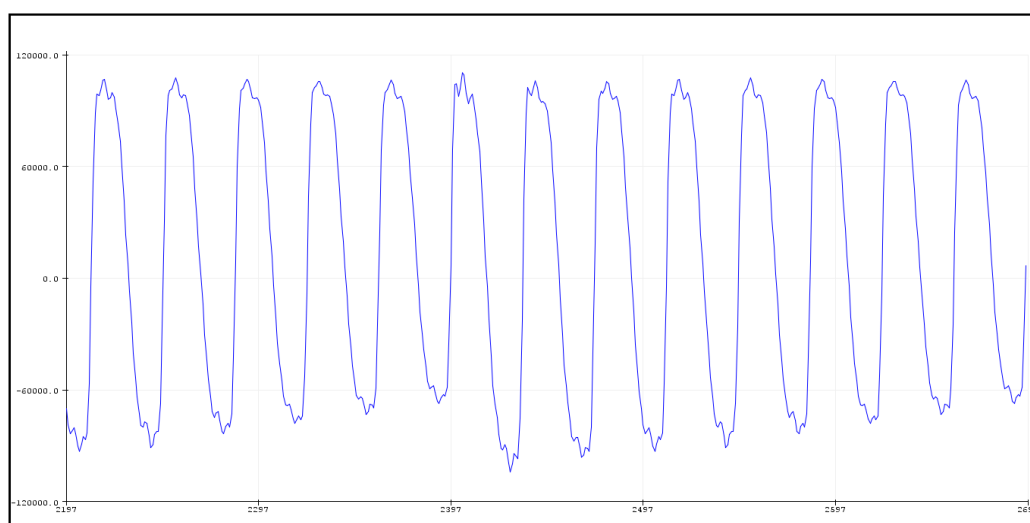
Fonte: autor

Executado a FFT, identificou-se, a existência de harmônicos nas cargas investigadas, e a partir dos vetores armazenados quais harmônicos poderiam ser eliminados.

Para isso ao vetor complexo calculado foi aplicado a rotina de execução da FFT inversa.

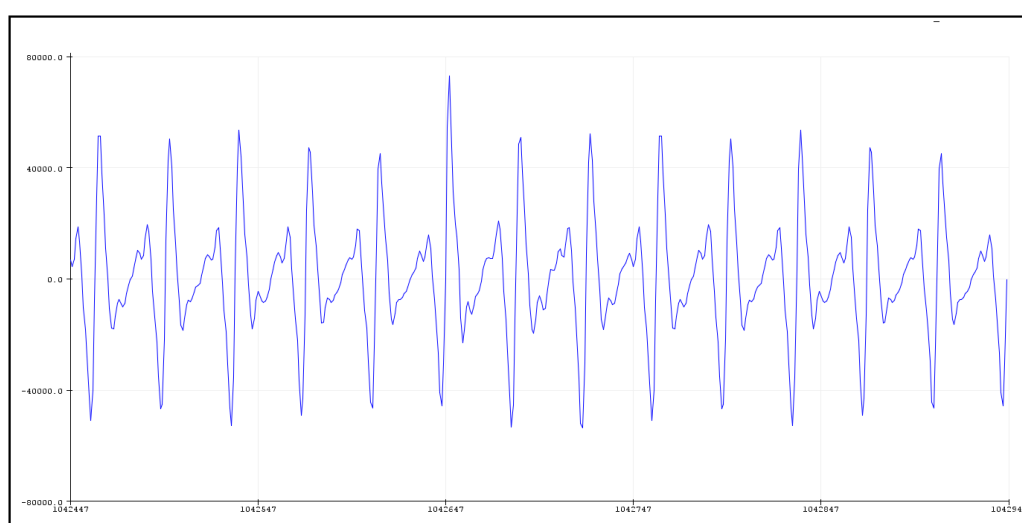
As Figuras 32,33 e 34 mostram a transformada inversa de Fourier executada pelo microcontrolador. Na figura 32 tem-se a transformada inversa sobre todos os índices de harmônicos da FFT. A figura 33 mostra a forma de onda da FFT inversa aplicada sobre os harmônicos normalizados superiores a ordem 2, foram suprimidas para o cálculo frequências inferiores a 80Hz. Finalmente a figura 34 indica a transformada inversa da frequência fundamental, valores em torno de 60Hz

Figura 32: Transformada Inversa de Fourier Corrente Normalizada



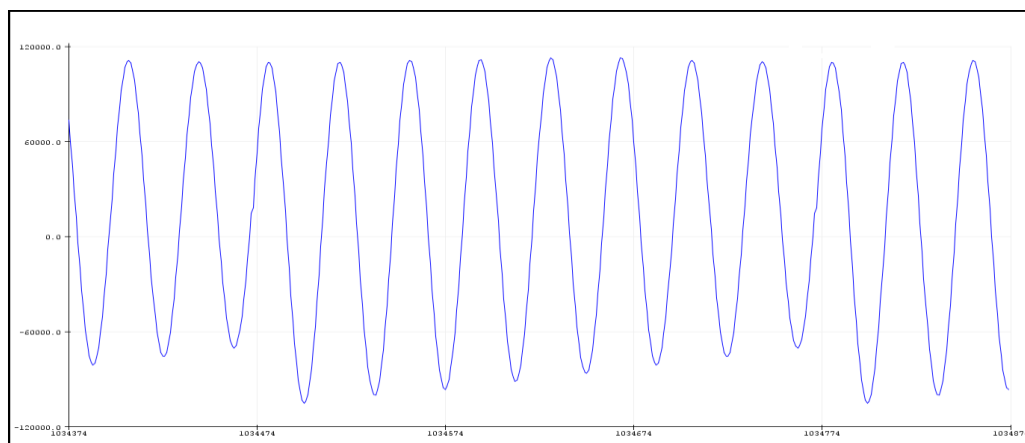
Fonte: autor

Figura 33: Forma de onda dos harmônicos de ordem superior a 2



Fonte: autor

Figura 34: Forma de onda da frequência fundamental do sinal

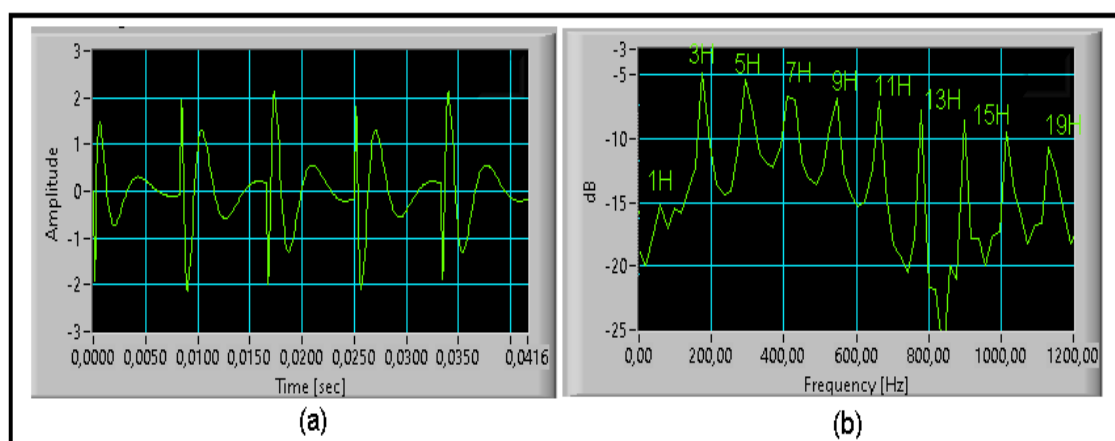


Fonte: autor

Devido às limitações de tempo no processamento da FFT inversa montou-se filtros analógicos de ordem oito com amplificadores operacionais.

Nessa fase dos testes utilizou-se um gerador de funções operando em onda quadrada na entrada do filtro, um osciloscópio e um analisador de sinais como medidores. Na Figura 35a tem-se o sinal de saída do filtro projetado no domínio do tempo, e na Figura 35b tem-se a sinal do domínio da frequência, observando que nesse teste prevalecem os harmônicos de ordem ímpar.

Figura 35: Análise de um sinal de onda quadrada no domínio do tempo e da frequência.

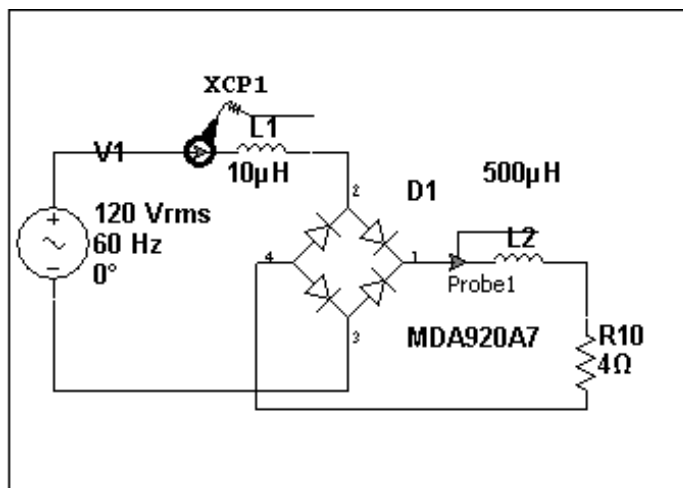


Fonte: autor

Tendo validado o funcionamento do filtro analógico, projetou-se uma carga não linear de 21Arms para se conectada a fonte de energia alternada e gerar harmônicos ímpares nessa rede. A Figura 36 mostra um retificador em onda completa que associado

a indutores de alto valor gera na carga correntes harmônicas ímpares;

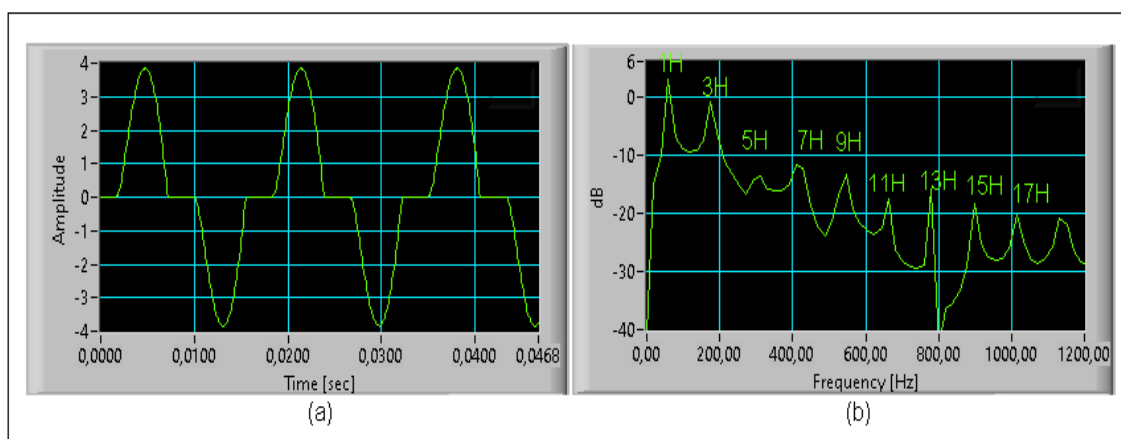
Figura 36: Circuito de carga não linear com retificação em onda completa



Fonte: autor

Foi conectado a carga não linear um transdutor de corrente XCP1, modelado de forma transformar o sinal de corrente monitorado em um sinal de tensão compatível a ser analisado pelo osciloscópio e analisador de sinais. A Carga projetada na Figura 36 gerou correntes harmônicas de ordem ímpar e uma distorção harmônica total (DHT) de 42,808 %, como ilustra a Figura 37.

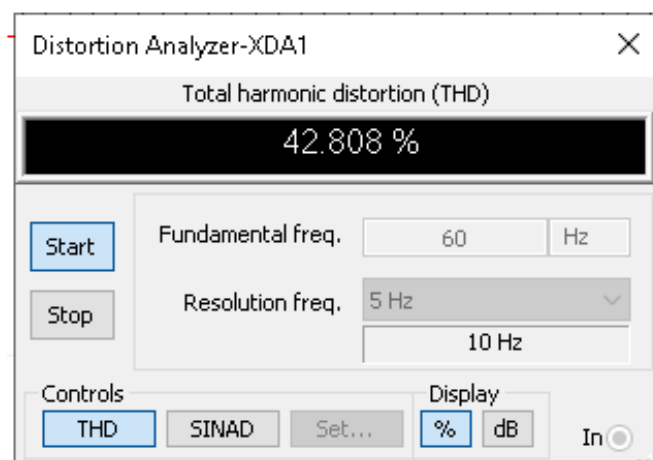
Figura 37: Análise harmônica de carga não linear



Fonte: autor

A Figura 38 mostra o valor calculado da distorção harmônica da carga investigada obtida do equipamento pela simulação no software Multisim.

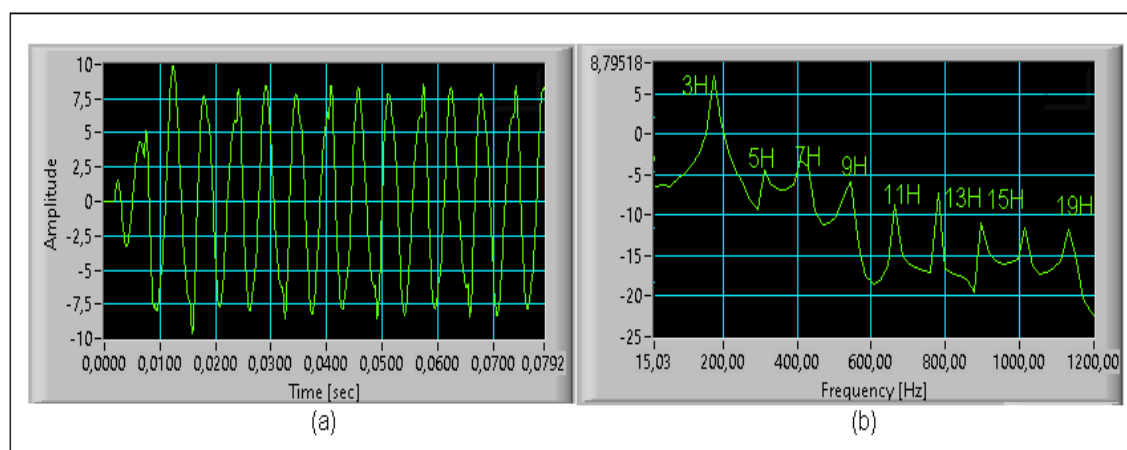
Figura 38: Distorção harmônica da carga não linear analisada



Fonte: autor

A Figura 39a mostra o sinal de saída no domínio do tempo do sinal do filtro a ser aplicado como comando do FAPP a ser conectado em paralelo com a rede elétrica para correção harmônica. Na Figura 39b, tem-se a visualização das raízes de harmônicos superiores desse sinal.

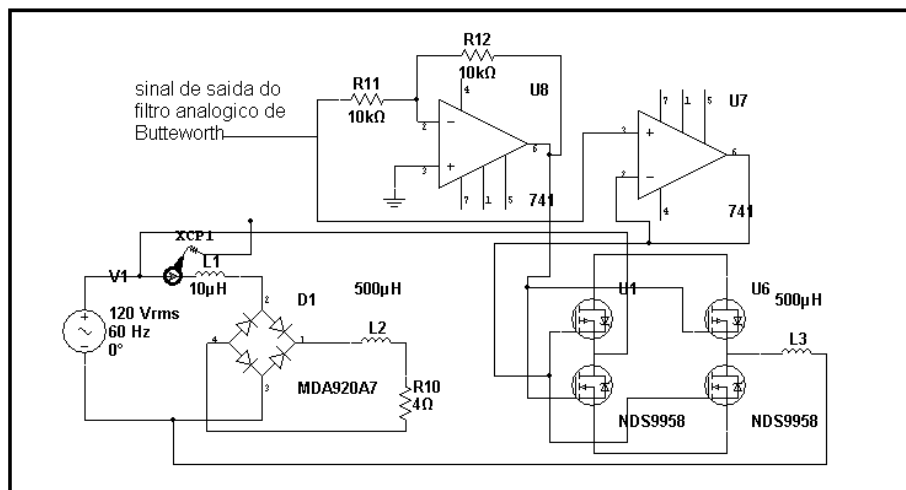
Figura 39: Saída do filtro analógico de Butterworth



Fonte: autor

Aplicou-se o sinal gerado ao FAPP em paralelo com a linha de alimentação, como ilustra o diagrama da Figura 40.

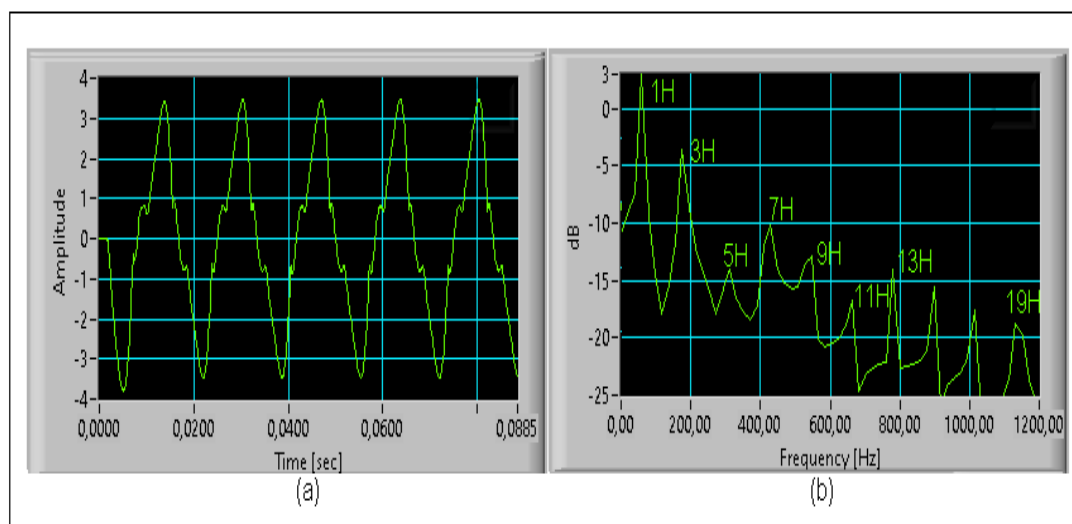
Figura 40:diagrama de saída do FAPP



Fonte: autor

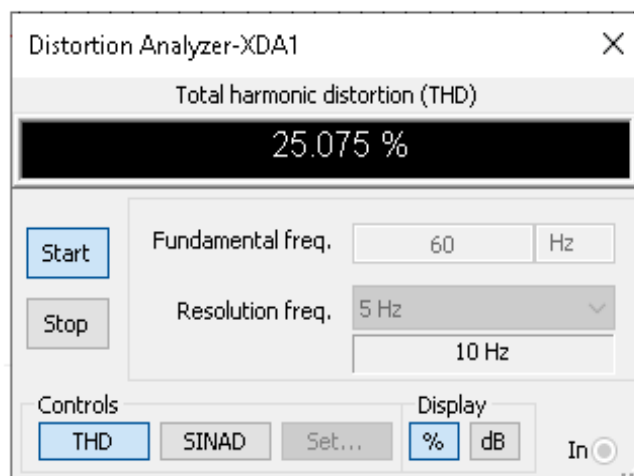
O resultado obtido foi uma redução na distorção harmônica de 42,8 % para 25 %, e uma corrente de linha semelhante a uma senóides como ilustra a Figura 41 e Figura 42

Figura 41: Sinal corrigido a partir do FAPP



Fonte: autor

Figura 42: distorção harmônica no FAPP



Fonte: autor

Foram implementados testes para simulação de cargas geradoras de harmônicas de ordem par, que foram omitidos aqui, por apresentarem erros de convergência durante as simulações.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou que há uma preocupação do meio científico em resolver problemas de harmônicos em redes de distribuição elétrica, gerados pela quantidade de novos componentes eletrônicos de chaveamentos que coexistem aos complexos sistemas de controle e processamentos.

Observou-se na leitura da literatura que distorções harmônicas podem causar falhas e prejuízos nos sistemas produtivos. O controle e a mitigação dessas distorções podem gerar economia nas instalações elétricas e aumento de sua vida útil.

Reduzir distorções harmônicas também reduz o aquecimento de cabos e dos dispositivos de proteção, que implica em aumentar a segurança nas instalações.

A solução apresentada, consta de se utilizar uma plataforma de baixo custo, ARDUINO, promovendo observação e correções possíveis diminuindo os efeitos de harmônicos nas redes de distribuição de energia elétrica de baixa potência.

O Arduino proposto, Arduino Due, apresentou um tempo resposta satisfatória para a execução da transformada rápida de Fourier, indicando ser uma ferramenta, indicando ser uma ferramenta suficiente para a análise das distorções harmônicas.

Entretanto o Arduino Due apresentou uma resposta lenta no processamento do algoritmo da transformada inversa de Fourier para gerar os sinais de comando e correção.

O acoplamento de um segundo elemento de processamento, operando da forma mestre-escravo, ganhou agilidade no processamento e na geração do sinal que foi injetado na rede, mas não se mostrou uma solução prática.

O uso de filtros analógicos, como uma solução pragmática, promoveu agilidade na resposta no sistema, pois eliminou os atrasos na geração dos sinais de comando, visto que foi eliminado o algoritmo de processamento da FFT inversa.

Se não pelo tempo, o algoritmo estabelece a análise dos dados obtidos com recursos estatísticos e de probabilidade a fim de se obter novas séries de informações que irão compor a transformada inversa para apresentar na saída do sistema à rede elétrica.

5.1 PERSPECTIVAS FUTURAS.

- Avaliar outros amplificadores operacionais para investigar origem das distorções de fase ou distorções por Slew rate
- Avaliar o uso de filtros digitais FIR e IIR para maior agilidade na FFT inversa
- Avaliar outros dispositivos FPGAS com relação a custos e velocidade
- Avaliar outros dispositivos outros embarcados para fins didáticos

5. REFERÊNCIAS

CAMPANHOL, L.; OLIVEIRA DA SILVA, S.; GOEDEL, A. FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA PARALELO APLICADO EM SISTEMAS TRIFÁSICOS A QUATRO-FIOS. 2013. 782-792.

CHICCO, G. et al. Assessment of unbalance and distortion components in three-phase systems with harmonics and interharmonics. *Electric Power Systems Research*, v. 147, p. 201-212, 2017. ISSN 03787796.

DEY, Papan & Mekhilef, Saad. (2015). Current Controllers of Active Power Filter for Power Quality Improvement: A Technical Analysis. *Automatika*. 56. 10.7305/automatika.2015.04.572

FRACISCHETTI, C. E. P. J., J. H.; PADOVEZE, C. L.. . Contabilometria: análise bibliométrica, tendências e reflexões em publicações da base de dados SCOPUS de 1982 até 2014. . 2014.

HAYKIN, SIMON; VEEM, BARRY VAN. Sinais e Sistemas. 1ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2001, p. 291-300, p.495-527.

IEEE, Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.2014.’

KALAIR, A. et al. Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 78, p. 1152-1187, 2017/10/01/ 2017. ISSN 1364-0321.

LING, F.; WEIYAN, Y.; YONG, W. A novel DFT algorithm used in active power filter under frequency distortion. 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia), 2017, 3-7 June 2017. p.1375-1379.

LIU, Z. et al. Virtual Variable Sampling Discrete Fourier Transform Based Selective Odd-Order Harmonic Repetitive Control of DC/AC Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 33, n. 7, p. 6444-6452, 2018. ISSN 0885-8993.

M. GOMES, Natanael; ABUD MARCELINO, Marcio; GRANDINETTI, Francisco José. DETERMINAÇÃO DO GÊNERO DO LOCUTOR USANDO A

TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER. **Revista Ciências Exatas**, [S.l.], v. 21, n. 2, dez. 2015. ISSN 1516-2893. Disponível em:

<<http://periodicos.unitau.br/ojs/index.php/exatas/article/view/2217>>. Acesso em: 23 abr. 2019.

MACKEY, A.; GASS, S. Common data collection measures. In. *Second language research: methodology and design*. Mahwah: Lawrence Erlbaum, 2005. p. 43-99.

MALDONADO, J. R. Total Harmonic Distortion Estimation, Minimization Inter Harmonic Amplitude and Expanding Bands Rejection in TKF filters. *IEEE Latin America Transactions*, v. 14, n. 2, p. 652-656, 2016. ISSN 1548-0992.

MARTINS, J. S., COUTO, C., AFONSO J. L., *Qualidade de Energia Elétrica*. 2003.

MILLMAN, A. & GRABEL. *Microelectronics*. McGraw-Hill, 1987 p.605-611.

MORIANO, J. et al. A Novel Multifrequency Current Reference Calculation to Mitigate Active Power Fluctuations. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 65, n. 1, p. 810-818, 2018. ISSN 0278-0046 1557-9948.

MUKHERJEE, D. Comparative Analysis of Different Filters in Power Line Harmonic Reduction. 2015.

NICOLAE, P. M. Improvement of the Controller Algorithms for Active Power Filters Operating under Distorted and Unbalanced Grid Voltages. 2015.

ROCHA, G V S, *Sistema Inteligente de Suporte a Análise da Qualidade da Energia Elétrica em regime Permanente*, 2017

SANCHES CAMARGO, L. et al. TECHNOLOGY ROADMAPPING: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA. 2017.

SIMON, H, BARRY, V V - *Sinais e Sistemas* 1. ed, Bookman, Porto Alegre, 2001

SHIRADO, W., MOREIRA, M., PALMA, J. e BARBON Júnior, S. 2015. Estudo comparativo entre algoritmos das transformadas discretas de Fourier e Wavelet. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*. 7, 3 (out. 2015), 97-107.

SOARES, E., BARBOSA, D., SILVA, K., - 2016- Impacto Da Qualidade Da Energia Elétrica No Resultado De Uma Indústria De Geração Termoelétrica: Estudo De Caso
DOI - 10.20906/CPS/SBSE2016-0129

SOUZA, Fabiana Pöttker: “Correção do Fator de Potência para Instalações de Baixa Potência Empregando Filtros Ativos”, Tese de Doutorado, PPGEEL-UFSC, Florianópolis SC/2000

SRINATH, S.; POONGOTHAI, M. S.; ARUNA, T. PV Integrated Shunt Active Filter for Harmonic Compensation. Energy Procedia, v. 117, p. 1134-1144, 2017/06/01/ 2017. ISSN 1876-6102.

ZHAO, C; Research and Implementation of Harmonic Detection and Current Compensation Technology in Active Power Filter. 2016.