



Priscila de Paula Silva

**Implementação de um medidor digital de qualidade da energia
elétrica: análise de harmônicos e variações de tensão de longa duração**

João Monlevade

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Priscila de Paula Silva

**Implementação de um medidor digital de qualidade da energia
elétrica: análise de harmônicos e variações de tensão de longa duração**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Renan Fernandes Bastos.

João Monlevade

Junho de 2017

S586i Silva, Priscila de Paula.
Implementação de um medidor digital de qualidade da energia elétrica
[manuscrito]: análise de harmônicos e variações de tensão de longa duração /
Priscila de Paula Silva. - 2017.

79f.: il.: color; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Renan Fernandes Bastos.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de
Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Engenharia Elétrica . 2. Medidas elétricas . 3. Distribuição e controle da
energia. 4. Redes elétricas . 5. Harmônicas - análise. I. Bastos, Renan
Fernandes. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621.31

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br



ATA DE DEFESA

Aos 02 dias do mês de junho de 2017, às 13 horas, no bloco E deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pela aluna **Priscila de Paula Silva**, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Renan Fernandes Bastos (orientador), Victor Costa da Silva Campos (membro), Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa (membro). A candidata apresentou a monografia intitulada: **Implementação de um medidor digital de qualidade da energia elétrica: análise de harmônicos e variações de tensão de longa duração**. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela APROVAÇÃO da candidata, com a nota média 9,0, de acordo com a Tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pela aluna.

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
Renan Fernandes Bastos	8,5
Victor Costa da Silva Campos	9,2
CARLOS HENRIQUE NOGUEIRA DE RESENDE BARBOSA	9,2
Média	

João Monlevade, 02 de junho de 2017.

Renan Fernandes Bastos

Professor Orientador

Priscila de Paula Silva

Aluna

Victor Costa da Silva Campos

Professor Convidado

[Assinatura]

Professor Convidado



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Implementação de um medidor digital de qualidade da energia elétrica: análise de harmônicos e variações de tensão de longa duração” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 02 de junho de 2017.

Priscila de Paula Silva

Priscila de Paula Silva

“Eu não vim até aqui pra desistir agora...”

(Humberto Gessinger)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas portas que abre para mim todos os dias. Agradeço aos meus pais, Sandra e José, e à minha irmã, Rafaela, por serem meu ponto de apoio, minha fortaleza e por depositarem toda fé em mim. Aos meus avós, Maria do Rosário e Artino, por acreditarem em mim desde o início. Aos meus tios, Neuza e Ivanildo e ao meu primo Felipe, pela acolhida e carinho que sempre me deram todos esses anos. Agradeço também a toda minha família que sempre esteve por perto me acompanhando e rezando por mim.

Ao meu namorado, Leandro, que em todos os momentos esteve comigo, me dando forças e coragem para continuar. A você, agradeço a paciência, proteção, ajuda e conselhos.

Aos meus amigos de Ipatinga, que me ensinaram a viver e aos meus amigos e companheiros de João Monlevade, que me acompanharam degrau por degrau, sofreram e sorriram comigo: estamos vencendo!

Agradeço a Universidade Federal de Ouro Preto pela oportunidade de crescimento pessoal que me ofereceu. Em especial, ao professor Renan Fernandes Bastos, que dividiu comigo o seu conhecimento sem medir esforços, sempre paciente e disposto. Obrigada!

RESUMO

A qualidade da energia elétrica (QEE) vem sendo discutida tanto em âmbito internacional quanto nacional devido aos distúrbios frequentes e interrupções deparadas na rede elétrica. Neste trabalho, um medidor digital de QEE monofásico é implementado para consumidores de baixa tensão. Entenda-se que esta é uma maneira de incentiva-los a terem o monitoramento da QEE em seus próprios estabelecimentos, com uma análise de harmônicos e um controle sobre as variações de tensão de longa duração, realizando um julgamento da energia elétrica adquirida a partir das concessionárias e conscientizando-os sobre seus equipamentos eletroeletrônicos e o que eles podem causar à rede elétrica, conforme resoluções normativas da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.

Palavras Chave: Qualidade da energia; Distúrbios; Interrupções; Medidor; Monitoramento; ANEEL; IEEE.

ABSTRACT

The Power Quality (PQ) has been discussed nationally and internationally due to frequent disturbances and interruptions occurring in the electricity grid. In this study, a monophasic digital meter of Power Quality (PQ) is implemented for low-voltage consumers. This is a way to encourage consumers to have their own monitoring of PQ for their establishment, with a harmonic analysis and a control over the Long-Duration Voltage Variations (LDVV), making a judgment of the concessionaires and making them aware of their electrical and electronic equipment and what they can cause in the electricity grid, according to the references established by the ANEEL (National Electric Energy Agency) and IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

Keywords: Power Quality; Disorders; Long-Duration Voltage Variations; Interruptions; Meter; Monitoring; ANEEL; IEEE.

LISTA DE FIGURAS

1 Principais distúrbios presentes na rede elétrica.....	21
2 Esquema unifilar representando a impedância da rede	22
3 Circulação de correntes harmônicas em uma rede	23
4 Exemplo FFT	28
5 Etapas do projeto	33
6 Transdutor de corrente	35
7 Circuito de condicionamento do sinal de tensão.....	35
8 Funcionamento do circuito de condicionamento do sinal de tensão	36
9 PIC18F4550	37
10 Módulo Conversor USB	38
11 Placa de aquisição dos sinais de medição	39
12 Interface Gráfica	40
13 Tensão, corrente e potência de uma lâmpada incandescente	43
14 FFT e espectro de freq. para tensão e corrente de uma lâmpada incandescente ...	43
15 Medição da corrente na lâmpada incandescente através de um amperímetro	44
16 Medição da tensão da rede através de um voltímetro.....	44
17 Tensão, corrente e potência de uma lâmpada fluorescente compacta	45
18 FFT e espectro de freq. para tensão e corrente de uma lâmpada fluoresc. comp. .	46
19 Medição da corrente na lâmpada fluorescente através de um amperímetro.	47
20 Tensão, corrente e potência de um retificador de meia onda	48
21 FFT e espectro de freq. para tensão e corrente de um retificador de meia onda ...	48
22 Medição da corrente no retificador de meia onda através de um amperímetro	49
23 Retificador de meia onda mais carga resistiva	50
24 Retificador de onda completa mais carga resistiva	52
25 Tensão (anterior à retificação) e corrente (posterior à retificação)	52
26 FFT e esp. de freq. p/ tensão (ant. à retificação) e corrente (post. à retificação) ...	52
27 Medição da corrente, posterior a retificação, através de um amperímetro	53
28 Tensão, corrente e potência, anterior à retificação	54
29 FFT e espectro de freq. para tensão e corrente, anterior à retificação	54
30 Medição da corrente, anterior a retificação, através de um amperímetro.....	55

31 Tensão, corrente e potência de um carregador de celular	56
32 FFT e espectro de freq. para tensão e corrente de um carregador de celular	56
33 Medição da corrente no carregador de celular através de um amperímetro	57
34 Tensão, corrente e potência de uma fonte de notebook	58
35 FFT e espectro de freq. para tensão e corrente de uma fonte de um notebook	58
36 Medição da corrente na fonte de um notebook através de um amperímetro	59
37 Análise de sobretensão com uma base de tensão de 110V	60
38 Análise de subtensão com uma base de tensão de 150V	61
39 Análise de interrupção permanente	61

LISTA DE TABELAS

1	Categorias e características dos distúrbios presentes na rede elétrica	20
2	Classificação dos harmônicos	24
3	Terminologia para cálculo de distorção harmônica	29
4	Valores de referência para as distorções harmônicas totais de tensão	30
5	Valores de referência para distorções harmônicas totais de corrente	30
6	Indicadores de QEE para uma lâmpada incandescente	43
7	Indicadores de QEE para uma lâmpada fluorescente compacta	46
8	Indicadores de QEE para um retificador de meia onda com carga resistiva	49
9	Indicadores de QEE com aferição de corrente posterior à retificação	53
10	Indicadores de QEE com aferição de corrente anterior à retificação	55
11	Indicadores de QEE para um carregador de celular	57
12	Indicadores de QEE para uma fonte de um notebook	59

LISTA DE SIGLAS

A/D	Analógico/Digital
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
DHT	Distorção Harmônica Total
DHTi	Distorção Harmônica Total de Corrente
DHTv	Distorção Harmônica Total de Tensão
TDF	Transformada Discreta de Fourier
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
GUIDE	<i>Graphical User Interface Development Environment</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
NBR	Normas Brasileiras
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
QEE	Qualidade de Energia Elétrica

RMS	Root Mean Square
SEP	Sistema Elétrico de Potência
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração
VTLD	Variações de Tensão de Longa Duração

SUMÁRIO

1 Introdução	14
1.1 Contextualização	14
1.2 Estrutura do Trabalho	14
1.3 Estado da Arte	15
1.2.1 Medição de QEE atual	15
1.2.2 Propostas de medições de QEE elaboradas	15
1.2.3 Medição de QEE voltada ao faturamento de consumo de energia elétrica	16
1.2.4 Medidores de QEE existentes no mercado	16
1.3 Motivação e Justificativa	17
1.5 Objetivos	18
1.5.1 Objetivos Específicos	18
2 Aspectos da Qualidade da Energia Elétrica	19
2.1 Introdução	19
2.2 Conceito Geral.....	19
2.3 Avaliações da Qualidade da Energia Elétrica	19
2.4 Harmônicos	21
2.4.1 Origem dos Harmônicos.....	22
2.4.2 Classificação dos Harmônicos.....	23
2.4.3 Principais Indicadores da Distorção Harmônica.....	25
2.4.3.1 Potência Instantânea.....	25
2.4.3.2 Potência Ativa.....	26
2.4.3.3 Potência Média de Distorção.....	26
2.4.3.4 Potência Aparente.....	26
2.4.3.5 Fator de Potência.....	27
2.4.3.6 Espectro em Frequência.....	27
2.4.3.7 Distorção Harmônica Total.....	28
2.5. Variações de Tensão de Longa Duração.....	30
2.5.1 Subtensão.....	30
2.2.2 Sobretensão.....	31
2.2.3 Interrupção Permanente.....	32
3 Projeto	33
3.1 Introdução	33
3.2 Materiais e Métodos	34
3.2.1 Transdutor de Corrente	34
3.2.2 Transformador de Tensão.....	35
3.2.3 Circuito de Condicionamento de Sinal	35
3.2.4 Microcontrolador	37
3.2.5 Porta USB.....	38
3.2.6 Interface Gráfica	38

3.3 Implementação	39
3.4 Orçamento	41
4 Análise de Resultados.....	42
4.1 Introdução.....	42
4.2 Lâmpada Incandescente.....	42
4.3 Lâmpada Fluorescente.....	45
4.4 Retificador de Meia Onda.....	47
4.5 Retificador de Onda Completa.....	51
4.6 Carregador de Celular	55
4.7 Fonte de Computador Portátil.....	57
4.8 Simulações de VTLD	59
5 Condições Finais.....	62
5.1 Propostas Futuras	63
6 Referências Bibliográficas	64
ANEXOS.....	67
Código para implementação no MatLab.....	67
Código para implementação da interface gráfica.....	71

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Na década de 80, o número de desligamentos de energia elétrica era o fator padrão para análise de qualidade de energia elétrica (QEE). Quanto menos interrupções feitas pela concessionária houvessem na distribuição, melhor era considerada a QEE. Atualmente, a energia elétrica é considerada de boa qualidade quando é entregue de forma ininterrupta, com formas de ondas senoidais compatíveis com as instalações elétricas e sistemas elétricos de distribuição e com frequência estável (RODRIGUES, 2009).

Desde o início da década de 90, as concessionárias de energia elétrica e os consumidores vêm prestando bastante atenção para a QEE, devido, principalmente, ao aumento da quantidade e amplitudes dos harmônicos gerados por cargas eletrônicas e a utilização de sistemas de controle microprocessados, resultando em cargas sensíveis aos distúrbios relacionados a QEE. Os principais sinais analisados para a caracterização da QEE são a tensão e a corrente em suas amplitudes, formas de onda e frequência. Qualquer desvio ou alteração presente nas grandezas de tensão e corrente pode detectar um problema de QEE, resultando na falha ou operação inadequada de instalações, aparelhos, máquinas ou equipamentos. Essas alterações da energia elétrica podem ser tanto geradas nas instalações de consumidores quanto no sistema de abastecimento da concessionária (POMILIO, 1997).

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do trabalho está dividida em 5 capítulos, em que:

- Capítulo 1: contextualiza o assunto e apresenta os objetivos do trabalho, a motivação e a justificativa;
- Capítulo 2: trata dos aspectos da QEE, onde são apresentados os problemas que causam os principais distúrbios na rede de distribuição de energia elétrica, com ênfase nos harmônicos e nas variações de tensão de longa duração (VTLD) além de abranger o cálculo da potência da rede elétrica;

- Capítulo 3: apresenta os materiais e métodos utilizados para a implementação do medidor de QEE;
- Capítulo 4: expõe as discussões e resultados obtidos;
- Capítulo 5: exhibe as considerações finais do trabalho.

1.3 ESTADO DA ARTE

Muitos trabalhos foram desenvolvidos nos últimos anos visando monitorar e controlar os indicadores de QEE pelo sistema elétrico brasileiro tais como os distúrbios presentes na energia distribuída. Nesse contexto, alguns trabalhos são aqui citados, referentes às medições atuais existentes e/ou já elaboradas por um(a) pesquisador(a).

1.3.1 Medição de QEE atual

Em 2002, a ANEEL implantou um sistema de monitoração de QEE que monitora as interrupções, restabelecimento de energia e avalia os níveis de tensão. O dispositivo monitora os indicadores de QEE, que dispõe da ininterrupção da distribuição de energia e a concordância dos níveis de tensão em regime permanente. Essas informações são enviadas à Central de Monitoração através de uma linha telefônica, e são disponibilizadas na Internet para os clientes pós-acontecimento. Esse equipamento é instalado em postes, próximo ao padrão de entrada, de maneira isolada da rede, e com conexão à rede trifásica, bifásica ou monofásica. Necessita de um treinamento básico para o manuseio por profissionais eletricitas das concessionárias (ANEEL, 2002). O dito equipamento é utilizado até a atualidade.

1.3.2 Propostas de medições de QEE elaboradas

Em uma dissertação de mestrado da Universidade Federal de Juiz de Fora, o autor Diego Fagundes Fabri (FABRI, 2011) propõe um analisador de harmônicos variante no tempo para operação em tempo real, no qual realiza decomposições harmônicas de sinais pelo algoritmo que implementa a DFT (em inglês *Discrete Fourier transform*, Transformada Discreta de Fourier). Essas decomposições também são válidas quando os sinais contêm inter-harmônicos ou qualquer tipo de variação na frequência fundamental. A implementação em (FABRI, 2011) também é capaz de corrigir erros de amplitude e fase provindos de filtros analógicos de entrada. Essa abordagem permite o estudo de diversos distúrbios presentes no

sistema de potência atual e incentiva o desenvolvimento de um banco de filtros FIR (Resposta ao Impulso Finita), que proporciona à decomposição harmônica (FABRI, 2011).

Tongxin Zheng, Elham B. Makram e Adly A. Girgis, publicaram um artigo na IEEE em abril de 1993 (ZHENG et al., 1993), onde um novo método de avaliação do desequilíbrio em sistemas de potência com harmônicos presentes foi desenvolvido. Trata-se de obter componentes desequilibradas a partir de fasores trifásicos originais de tensão e corrente. Essas componentes são decompostas em componente fundamental equilibrada e desequilibrada e componente harmônica equilibrada e desequilibrada, juntamente com a decomposição da potência aparente. Ambas as componentes são avaliadas por meio do fator de distorção do sistema desequilibrado proposto (ZHENG et al., 1993).

1.3.3 Medição de QEE para faturamento de consumo de energia elétrica

Luciana Carvalho Caldeirão defendeu sua dissertação de mestrado em 2005 na Universidade Estadual Paulista (CALDEIRÃO, 2005), onde analisou experimentalmente um medidor de energia elétrica ativa, kWatt-hora (KWh), monofásico e trifásico que opera com formas de onda de tensões e/ou correntes distorcidas. As análises dessas formas de onda deram-se através de aparelhos de medição adequados, nos quais o diagnóstico do desempenho dos medidores de kWh era dado de acordo com a operação em ambientes desfavorecidos. Pelo estudo tarifário, viu-se que as distorções da forma de onda da tensão e da forma de onda da corrente não são desconsideradas no cálculo de cobrança dos consumidores, ou seja, eles pagam por essa energia mesmo sendo prejudiciais a seus aparelhos domésticos (CALDEIRÃO, 2005).

1.3.4 Medidores de QEE existentes no mercado

Em maio de 2005, a ESB (fabricante de medidores) criou um medidor eletrônico de energia elétrica da família SAGA1000 para medição de fronteira ou faturamento de energia e demanda, em tempo real, com monitoramento de QEE através de monitores de tensão e carga. Esse medidor tem o custo elevado e é utilizado por empresas de médio e grande porte, para flagrar um episódio defeituoso da rede. Quando o evento é detectado, o medidor registra na memória, sinaliza a ocorrência, informa a condição de alarme no monitor do medidor, faz uma chamada remota no início do evento e no fim para um número programado alertando-o da ocorrência e realizam estatísticas desta ocorrência por período de fechamento de demanda (ESB, 2005).

A SEL (Schweitzer Engineering Laboratories), outra empresa de medidores, implantou medições e monitoramentos de QEE em dois produtos inovadores, o SEL-734 e o SEL-735, onde o primeiro se difere do segundo apenas por ser portátil. Esses equipamentos possuem entradas trifásicas de corrente e tensão e acompanham alicates de corrente e condutores de tensão para a medição direta em baixa tensão. As funções de medição desses equipamentos se resumem nas grandezas instantâneas, tais como tensões por fases e entre fases, tensões e correntes RMS, fator de potência, potência ativa, reativa e aparente, entre outros. A QEE é monitorada conforme a norma IEC 61000-4-30, e apresenta no display do medidor a distorção harmônica (até a 50ª ordem), taxa de distorção harmônica para tensão e corrente, distorção de potência, flutuação de tensão, entre outros distúrbios. O aparelho é de médio porte, alto preço e necessita de conhecimento prévio do usuário sobre QEE (SEL, 2015).

1.4 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A atual preocupação com a QEE deve-se aos seguintes motivos (RODRIGUES, 2009):

- Equipamentos atuais, tais como computadores, aparelhos eletroeletrônicos, lâmpadas fluorescentes e compactas, microondas, além de inversores de frequência, retificadores, entre outros, estão mais sensíveis aos distúrbios de QEE do que na década de 90;
- O avanço tecnológico dos equipamentos residenciais e industriais proporciona o maior uso de carga não lineares que causam perturbações a QEE;
- A vida útil dos equipamentos elétricos é menor quando expostos a uma energia de má qualidade causando prejuízos inesperados, tal como interrupção em uma atividade residencial;
- O aumento das interligações da rede causam falhas em algum componente ou quedas de energia causando consequências trágicas;
- A conscientização dos consumidores quanto a QEE.

Os fenômenos eletromagnéticos que causam distúrbio na QEE vêm sendo estudados por diversas terminologias utilizadas por diferentes comunidades técnicas, a fim de encontrar soluções. As medidas realizadas por essas equipes necessitam de adequação e segurança, para que dados precisos sejam coletados para o estudo. Sendo assim, é recomendado o estudo

sobre técnicas para definir, medir, quantificar, e interpretar perturbações eletromagnéticas sobre o sistema de energia por parte dos manipuladores das medições de QEE (IEEE Std 1159, 1995).

A ANEEL enxerga a produção de aparelhos que monitora a QEE como uma oportunidade de negócio para a indústria brasileira, onde no futuro, os próprios consumidores tomarão iniciativa de adquirir um equipamento que disponha de um mecanismo seguro de controle da qualidade do serviço recebido da concessionária (ANEEL, 2002).

1.5 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é implementar um medidor digital de QEE monofásico de baixa tensão (BT), com análise de harmônicos e variações de tensão de longa duração (VTLD), para que os consumidores residenciais, tenham direto acesso, de simples manuseio e baixo custo, as informações necessárias sobre os distúrbios presentes na rede, principalmente provindos de seus próprios equipamentos eletroeletrônicos, e a falta ou o excesso de energia consumida em seu próprio estabelecimento.

1.5.1 Objetivos Específicos

O medidor digital de QEE a ser desenvolvido mostrará os cálculos referentes à qualidade do produto: potência fornecida na rede elétrica do sistema no qual o consumidor está conectado bem como a Distorção Harmônica Total de Tensão (DTH_v) e a Distorção Harmônica Total de Corrente (DTH_i) presente na mesma.

2 ASPECTOS DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

2.1 INTRODUÇÃO

A QEE abrange diversos tipos de distúrbios em um sistema de energia elétrica, tais como variações de tensão de curta duração, variações de tensão de longa duração, desequilíbrio de tensão, deformações na forma de onda, entre outras (DUGAN, 2002). Devido a isso, este capítulo fornece aos leitores um conjunto consistente de termos e definições para descrever a QEE, voltados a análise de harmônicos e VTLD, ou seja, uma compreensão de como a qualidade pode impactar nos equipamentos do sistema de energia.

2.2 CONCEITO GERAL

A QEE refere-se à ampla variedade de fenômenos eletromagnéticos que caracterizam a tensão e a corrente em um determinado tempo e a uma dada localização sobre o sistema de energia (IEE Std 1159, 1995).

Segundo a ANEEL, os conceitos para QEE abrangem duas áreas diferentes, descritas como (ANEEL, 2008, p.3.):

A qualidade do produto define a terminologia, caracteriza os fenômenos e estabelece os parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão; A qualidade do serviço estabelece os procedimentos relativos aos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento.

De uma maneira mais abrangente, QEE é definida por uma boa qualidade de um serviço de fornecimento de energia elétrica, a custos transitáveis, funcionamento apropriado, garantido e confiável de equipamentos e processos.

2.3 AVALIAÇÕES DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

As distorções de tensão e corrente da rede elétrica dão-se por alguns distúrbios principais devidos a natureza ou ao mau funcionamento de equipamentos (AFONSO; MARTINS, 2004). Os principais distúrbios presentes no sistema elétrico são mostrados na Tabela 1 (IEEE Std 1159, 1995), (IEEE Std 446,1995).

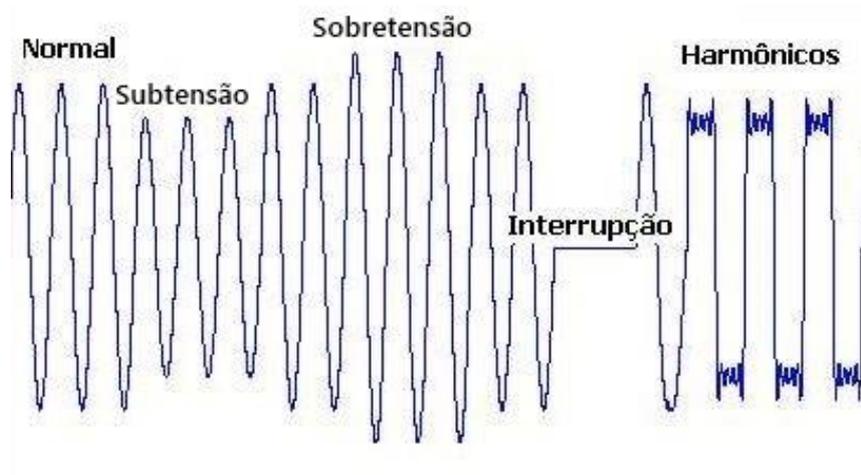
Tabela 1 – Categorias e características dos distúrbios presentes na rede elétrica

CATEGORIA	ESPECTRO	DURAÇÃO	TENSÃO
1.1. Transitórios Impulsivos			
1.1.1 Nanosegundos	5 ns pico	< 50 ns	
1.1.2 Microsegundos	1us pico	50 ns – 1 ms	
1.1.3 Milisegundos	0,1 ms pico	>1 ms	
1.2. Transitórios Oscilatórios			
1.2.1 Baixa Frequência	< 5kHz	0,3 – 50 ms	0 – 4 pu
1.2.2 Média Frequência	5 – 500 kHz	20 us	0 – 8 pu
1.2.3 Alta Frequência	0,5 – 5 MHz	5 us	0 – 4 pu
2. Variações de Tensão de Curta Duração			
2.1 Instantâneo			
2.1.1 Afundamento (Sag)		0,5 - 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
2.1.2 Elevação (Swell)		0,5 - 30 ciclos	1,1 – 1,4 pu
2.2 Momentâneo			
2.2.1 Interrupção		0,5 ciclos – 3 s	< 0,1 pu
2.2.2 Afundamento (Sag)		30 ciclos – 3 s	0,1 – 0,9 pu
2.2.3 Elevação (Swell)		30 ciclos – 3 s	1,1 – 1,4 pu
2.3 Temporário			
2.3.1 Interrupção		3 s – 1 min	< 0,1 pu
2.3.2 Afundamento (Sag)		3 s – 1 min	0,1 – 0,9 pu
2.3.3 Elevação (Swell)		3 s – 1 min	1,1 – 1,4 pu
3. Variações de Tensão de Longa Duração			
3.1 Interrupção Permanente		>1 min	0,0 pu
3.2 Subtensão		>1 min	0,8 – 0,9 pu
3.3 Sobretensão		>1 min	1,1 – 1,2 pu
4. Distorção da Forma de Onda			
4.2 Harmônicos	0 – 100 thH	Est. Permanente	0 – 20 %
4.3 Inter-harmônicos	0 – 6kHz	Est. Permanente	0 – 2 %
4.4 Recortes de Comutação (Notches)		Est. Permanente	
4.5 Ruído	Banda Larga	Est. Permanente	0 – 1 %
5. Flutuação de Tensão (Flicker)	< 25 Hz	Intermitente	0,1 – 7 %

Fonte: (IEEE Std 1159, 1995).

Este trabalho tem o foco em análise de harmônicos e em variações de tensão de longa duração. Por isso, esses distúrbios serão melhores compreendidos em seções futuras deste capítulo. A Figura 1 ilustra as avaliações de qualidade da energia citadas na Tabela 1 e que terão maior foco nesse trabalho, a fim de demonstrar os efeitos nas formas de onda causados por tais distúrbios.

Figura 1 - Principais distúrbios presentes na rede elétrica



Fonte: (SCHNEIDER, 2003)

2.4 HARMÔNICOS

Harmônicos são tensões ou correntes senoidais com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental de um sistema de energia (no Brasil, 60Hz). Quando os harmônicos combinam-se com a onda senoidal de corrente ou tensão de frequência fundamental, ocorrem as distorções harmônicas (ANEEL, 2008). Ou seja, quando há presença de harmônicos na rede, significa que uma onda de tensão ou de corrente está deformada, o que denota que a distribuição de energia elétrica é perturbada e que a QEE não é ótima (SCHNEIDER, 2003).

A circulação de harmônicos nas redes elétricas residenciais deteriora a QEE causando inúmeros prejuízos, tais como (IEEE Std 519, 1992):

- Aumento da corrente eficaz nas redes de distribuição causando sobrecarga e operação inadequada de fusíveis e relés de proteção;
- Sobreaquecimento e vibrações nas máquinas rotativas (motores e geradores), devido as perdas no ferro e cobre, afetando o torque e eficiência da máquina, reduzindo sua vida útil;
- Aquecimento dos cabos de alimentação devido ao aumento da frequência de correntes;
- Ruídos e interferências nas linhas telefônicas ou redes de comunicação;

- Mau funcionamento de aparelhos eletrônicos que possuem retificadores, pois resultam em uma tensão de saída menor e pior fator de potência;
- Mau funcionamento ou ineficiência de aparelhos eletrônicos formados por inversores, pois procedem em falhas de operação por curto-circuito interno oriundo de erros de comutação;
- Aumento da temperatura do filamento de lâmpadas incandescentes, devido ao acréscimo no valor eficaz de tensão, reduzindo sua vida útil.

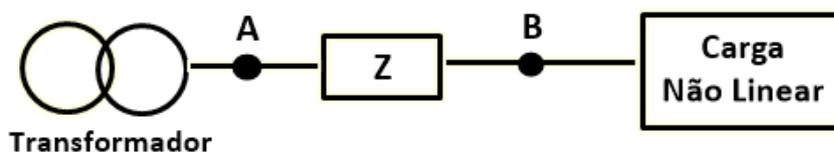
2.4.1 Origem dos Harmônicos

Uma carga é dita não-linear quando a tensão que a alimenta não possui a mesma forma de onda da corrente que ela absorve. Essas cargas estão presentes em todos os setores industriais, comerciais e domésticos, tais como máquinas de solda, inversores de frequência para motores assíncronos ou motores de corrente contínua, retificadores, computadores pessoais, máquinas copiadoras, TV's, forno de microondas, furadeira, iluminação fluorescente, no-break's, etc (SCHNEIDER, 2003).

A maioria das cargas não-lineares conectadas a rede gera correntes harmônicas que, conseqüentemente, ao circularem na rede, geram tensões harmônicas através das impedâncias da rede e, assim, uma deformação da tensão de alimentação (SCHNEIDER, 2003).

Observe a Figura 2. A corrente harmônica de ordem N, oriunda de uma carga não-linear, gera uma tensão harmônica através da impedância da rede. Dessa forma, a tensão no ponto B é deformada, e assim, todo aparelho alimentado a partir desse ponto receberá uma tensão perturbada (SCHNEIDER, 2003).

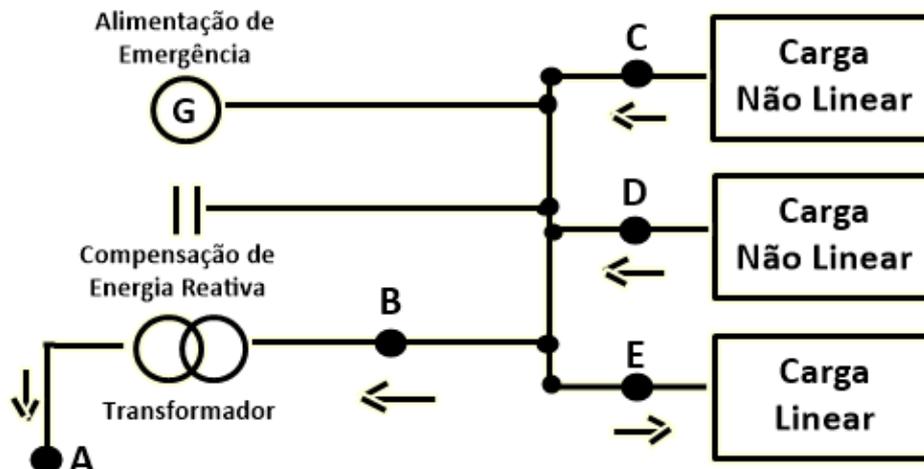
Figura 2 – Esquema unifilar representando a impedância da rede



Fonte: (SCHNEIDER, 2003).

Para melhor exemplificar o fenômeno das correntes harmônicas, considere a Figura 3.

Figura 3 – Circulação de correntes harmônicas em uma rede



Fonte: (SCHNEIDER, 2003).

A alimentação das cargas não lineares reinjetam na rede correntes harmônicas de ordem N , que somadas a corrente de ordem fundamental, 60 Hz, circulam no sentido para a fonte, como mostrados nos pontos C e D. No ponto B tem-se a soma das correntes harmônicas com a corrente fundamental, formando uma corrente distorcida, mais a tensão perturbada gerada a partir da circulação dessa corrente com a impedância do condutor. Assim, as cargas não lineares são alimentadas com uma tensão deformada e podem absorver essa corrente distorcida, como mostra o ponto E, causando um mau funcionamento nos aparelhos. Por fim, no ponto A encontram-se as perturbações harmônicas versus a rede, que circulam até a rede de distribuição de energia elétrica (SCHNEIDER, 2003).

2.4.2 Classificação dos Harmônicos

Os harmônicos são classificados quanto a sua frequência, ordem (pares e ímpares) e sequência (positiva, negativa e zero). Assim, a seguinte classificação de harmônicos é considerada (POMILIO, 1997):

Tabela 2 – Classificação dos harmônicos

Onda	Frequência (Hz)	Múltiplo (Hz)	Descrição	Sequência
1º Harmônico	60	1 x 60	Fundamental	Positiva
2º Harmônico	120	2 x 60	Harmônico par	Negativa
3º Harmônico	180	3 x 60	Harmônico ímpar	Zero
4º Harmônico	240	4 x 60	Harmônico par	Positiva
5º Harmônico	300	5 x 60	Harmônico ímpar	Negativa
6º Harmônico	360	6 x 60	Harmônico par	Zero
7º Harmônico	420	7 x 60	Harmônico ímpar	Positiva
8º Harmônico	480	8 x 60	Harmônico par	Negativa
9º Harmônico	540	9 x 60	Harmônico ímpar	Zero
10º Harmônico	600	10 x 60	Harmônico par	Positiva
11º Harmônico	660	11 x 60	Harmônico ímpar	Negativa
N Harmônico	-	N x 60	-	-

Fonte: (POMILIO, 1997).

Em uma rede elétrica existem diversos harmônicos. Porém, os efeitos danosos se encontram nas primeiras distorções, pois a amplitude dos harmônicos decresce tão rápido de modo que os que possuem frequências mais altas possuem uma baixa amplitude que já não afetam o sistema. Nas instalações elétricas em geral, os harmônicos de ordem ímpar são mais frequentemente encontrados e com maiores amplitudes, enquanto os harmônicos de ordem par são mais comuns em casos de sinal assimétrico, devido à presença de componente contínua (POMILIO, 1997).

As sequências dos harmônicos resumem-se da seguinte forma (POMILIO, 1997):

- Sequência positiva: todos os harmônicos que giram na mesma sequência da fundamental (começa com harmônico de ordem 1, a fundamental). Os harmônicos de sequência positiva causam aquecimentos, vibrações e outras perdas a equipamentos elétricos;
- Sequência negativa: todos os harmônicos que giram na sequência oposta da fundamental (começa com o harmônico de ordem 2). Os harmônicos dessa sequência também causam aquecimentos, vibrações e outras perdas a equipamentos elétricos, além de reduzirem o torque médio útil das máquinas rotativas;

- Sequência zero: todos os harmônicos que tem seu giro anulado (começa com o harmônico de ordem 3). Esses são os mais danosos a instalação elétrica e aos equipamentos ligados a ela, pois indicam que pode haver corrente circulando pelo neutro, no caso de conexões trifásicas Y a 4 fios, ou pela malha (no triângulo, na conexão Δ).

2.4.3 Principais Indicadores da Distorção Harmônica

A distorção harmônica pode ser avaliada e quantificada através de indicadores. Neste trabalho, o medidor de QEE implementado evidencia alguns deles, tais como potência instantânea, potência ativa, potência de distorção, potência aparente, fator de potência, espectro em frequência e distorção harmônica total (DHT).

A potência nominal de um eletrodoméstico é uma grandeza essencial que determina o seu funcionamento seguro e eficiente, originada a partir do fornecimento de energia elétrica para produzir trabalho considerável. Toda energia elétrica fornecida sob forma de tensões e correntes senoidais, possui potências apropriadas, definidas em regime permanente senoidal. Alguns conceitos de potência serão definidos, mas para tais, é necessário um conhecimento prévio de algumas grandezas (NILSSON; RIEDEL, 2009), em que I_m é valor da amplitude máxima da corrente enquanto V_m é da tensão. I_{rms} e V_{rms} são os valores eficazes dessas mesmas grandezas e representam a raiz quadrada da média do valor ao quadrado da corrente e da tensão (root mean square), respectivamente (JOHNSON et al, 1994).

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} [A] \quad (2.1)$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} [V] \quad (2.2)$$

2.4.3.1 Potência Instantânea

A potência instantânea é o produto entre a tensão ($v(t)$) e a corrente ($i(t)$) instantâneas (NILSSON, 2009).

$$p(t) = \pm v(t) \cdot i(t) [W] \quad (2.3)$$

A potência instantânea é positiva quando o sentido referido para a corrente for da tensão positiva para a negativa e t é o tempo de medição.

2.4.3.2 Potência Ativa

A potência ativa, também conhecida como potência média, é a absorção da energia por um elemento, independente do tempo. Essa é a potência monitorada pela concessionária de energia para a determinação da conta mensal do consumidor (JOHNSON et al, 1994). A potência ativa é o valor médio da potência instantânea, onde θ_v e θ_i são os ângulos de fase da tensão e da corrente, respectivamente (NILSSON, 2009).

$$P = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos(\theta_v - \theta_i) [W] \quad (2.4)$$

2.4.3.3 Potência Média de Distorção

Quando a corrente do sistema for composta por componentes senoidais de frequências diferentes, a soma das potências médias de cada componente agindo isoladamente constitui a potência média de distorção. Para uma corrente periódica que é a soma de $N+1$ senóides de frequências diferentes (harmônicos), tem-se (JOHNSON et al, 1994):

$$P = R I_{dc}^2 + \frac{R}{2} (I_{m1}^2 + I_{m2}^2 + \dots + I_{mN}^2) [W] \quad (2.5)$$

em que I_{dc} é uma corrente constante (c.c.) e por tanto sua frequência é zero, R é a resistência da carga acoplada ao circuito elétrico, e I_{m1} , I_{m2} e I_{mN} são os valores de amplitude máxima da corrente de ordem harmônica 1, de ordem harmônica 2 e de ordem harmônica N , respectivamente.

2.4.3.4 Potência Aparente

O produto de tensões e correntes eficazes é chamado de potência aparente. A potência aparente é sempre superior ou igual à potência ativa (JOHNSON et al, 1994).

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} [VA] \quad (2.6)$$

2.4.3.5 Fator de Potência

A razão existente entre a potência ativa e a potência aparente do sistema elétrico é chamada de fator de potência (FP), ou seja, é a eficiência da energia elétrica. Portanto, quanto maior for o fator de potência, melhor é o aproveitamento da energia (JOHNSON et al, 1994).

$$FP = \frac{P}{V_{rms} \cdot I_{rms}} = \cos(\theta v - \theta i) \quad (2.7)$$

Para o fator de potência com componentes harmônicas na rede elétrica, a equação é a mesma, porém, a potência ativa utilizada é a potência média de distorção. O fator de potência é atrasado quando a carga é indutiva, ou seja, a corrente está atrasada em relação à tensão e é adiantado quando a carga é capacitiva, de modo que a corrente esteja adiantada em relação a tensão (NILSSON, 2009).

É válido lembrar que a potência aparente é calculada com os valores eficazes da tensão e corrente, sejam eles distorcidos ou não. Ou seja, quando o FP é calculado a partir da potência média de distorção, a potência aparente terá os valores eficazes referentes as distorções harmônicas presentes na rede elétrica.

2.4.3.6 Espectro em frequência

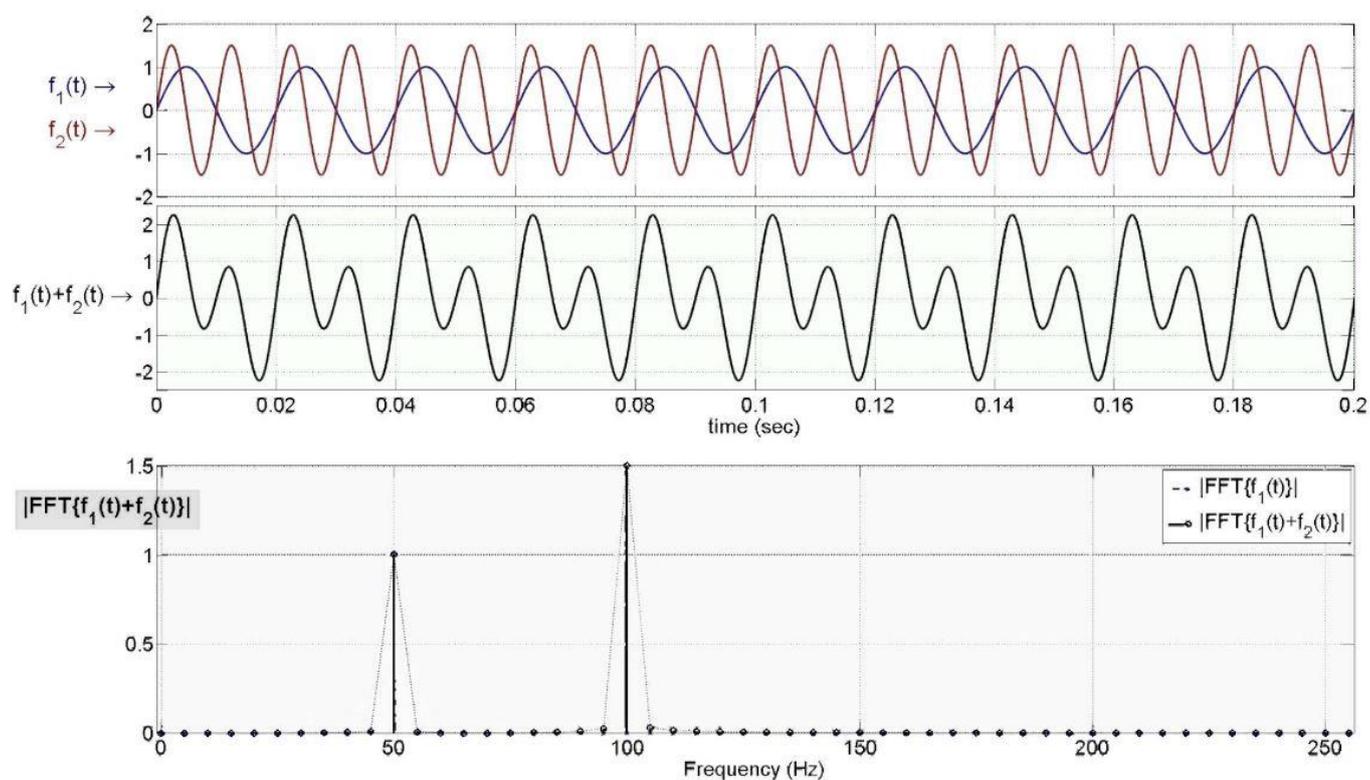
O Teorema de Fourier articula que toda a função periódica não senoidal pode ser concebida sob a forma de uma soma de expressões que é composta por uma eventual componente contínua, uma expressão senoidal em frequência fundamental e uma série de expressões senoidais com frequências múltiplas inteiras da fundamental (SCHNEIDER, 2003).

A Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês “*Fast Fourier Transform*”) permite decompor um sinal periódico nas suas componentes harmônicas (somatório). Com esse conceito, é permitido definir que um sinal período com um período qualquer T, possui uma frequência fundamental $f=1/T$, e, portanto, suas harmônicas possuem frequência $\pm 2f$, $\pm 3f$, $\pm 4f$ e assim por diante. A FFT é o espectro das componentes harmônicas, pois pode descrevê-las no domínio da frequência enquanto o sinal periódico existir no domínio do tempo (OPPENHEIM, 2012). O algoritmo da FFT

recebe como entrada uma sequência de amostras do sinal e na saída gera um vetor de saída em espectro de amplitude e fase das harmônicas (POMILIO, 1997).

Considere o exemplo da Figura 4: um sinal sinusoidal a 50Hz ($\text{sen}(2\pi*50t)$) adicionado a outro sinal sinusoidal a 100Hz ($1,5*\text{sen}(2\pi*100t)$). Ao aplicar o algoritmo da FFT, as componentes de frequência podem ser observadas claramente. No espectro de frequência, vê-se uma componente de 50Hz e uma componente de 100Hz se acumulando junto com frequências mais baixas e mais altas (MATHWORKS, 2015).

Figura 4 – Exemplo FFT



Fonte: (MATHWORKS, 2015).

2.4.3.7 Distorção Harmônica Total

A terminologia aplicável aos cálculos de referência para as distorções harmônicas estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Terminologia para cálculo de distorção harmônica

Terminologia para cálculo e referências de DHT	
Símbolo	Identificação da grandeza
h	Ordem Harmônica
hmax	Ordem Harmônica Máxima
hmin	Ordem Harmônica Mínima
V _h	Tensão Harmônica de ordem h
V ₁	Tensão Fundamental Medida
I _h	Corrente Harmônica de ordem h
I ₁	Corrente Fundamental Medida
DHT _v	Distorção Harmônica Total de Tensão (%)
DHT _i	Distorção Harmônica Total de Corrente (%)
I _{sc}	Corrente de curto-circuito
I _L	Valor eficaz da corrente de carga
PAC	Ponto de Acoplamento Comum

O indicador DHT% é o mais utilizado para quantificar harmônicos. Esses indicadores asseguram a quantificação e análise dos efeitos harmônicos, onde o nível máximo tolerável é definido por normas de regulamentação (TEIXEIRA, 2009).

$$DHTv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.8)$$

$$DHTi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (2.9)$$

Existem valores de referência para as distorções harmônicas totais determinados pela ANEEL. Esses valores servem para planejamento em termos de QEE e são estabelecidos conforme coleta de dados experimental (ANEEL, 2016). O DHT_v é dado em porcentagem da tensão fundamental, enquanto o DHT_i é dado em porcentagem da corrente fundamental.

Tabela 4 - Valores de referência para as distorções harmônicas totais de tensão

Tensão Nominal no Barramento (V_n)	DHTv (%)
$V_n \leq 1 \text{ KV}$	10
$1 \text{ KV} < V_n \leq 69 \text{ KV}$	8
$69 \text{ KV} < V_n < 230 \text{ KV}$	5

Fonte: (ANEEL, 2016).

Tabela 5 - Valores de referência para distorções harmônicas totais de corrente

$V_n \leq 69 \text{ kV}$	
I_{sc}/I_L	DHTi (%)
< 20	5
20 – 50	8
50 – 100	12
100 – 1000	15
>1000	20

Fonte: (IEEE Std. 519, 1992)

2.5 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE LONGA DURAÇÃO

Os problemas relacionados às variações de tensão por um período de tempo superior a um minuto são considerados de longa duração. Sendo assim, esses problemas são avaliados como distúrbios de regime permanente que podem ser caracterizados como anomalias que ocorrem no valor eficaz da tensão, na frequência do sistema. As VTLD são causadas por variações de carga ou por perda de interligações no sistema elétrico e são classificadas em: subtensão, sobretensão e interrupção permanente (PAULINO, 2015).

2.5.1 Subtensão

A subtensão é caracterizada por apresentar um decréscimo de no mínimo 10% no valor eficaz da tensão AC, e no máximo 20%, que equivale a valores de 0,9 a 0,8 pu,

respectivamente, por mais de 1 minuto (IEEE Std. 519, 1992). As subtensões são decorrentes de quatro principais fatores (PAULINO, 2015):

- Carregamento excessivo de circuitos alimentadores, os quais são submetidos a determinados níveis de corrente que, ao interatuar com a impedância da rede, acarretam quedas de tensão acentuadas.
- Desligamento de banco de capacitores, ocasionando o excesso de reativo transportado pelos circuitos de distribuição, limitando a capacidade do sistema no fornecimento de potência ativa e, ao mesmo tempo, elevando a queda de tensão;
- Conexão de cargas à rede elétrica, dividindo a tensão no PAC, causando quedas de tensão.
- Baixo fator de potência, indica maiores perdas reativas na distribuição, aumentando a queda de tensão no sistema.

Como a queda de tensão é função da corrente de carga, do FP e da impedância da rede, conclui-se que os consumidores mais distantes da subestação de energia estarão submetidos a níveis menores de tensão (PAULINO, 2015). Alguns dos problemas causados por subtensões à rede elétrica são (PAULINO, 2015):

- Possível interrupção ou ineficiência da operação de equipamentos eletrônicos, tais como computadores, liquidificadores, ventiladores, entre outros controladores eletrônicos;
- Menor eficiência na iluminação para os circuitos com lâmpadas incandescentes;

2.5.2 Sobretensão

A sobretensão apresenta características opostas a subtensão, onde a tensão eficaz AC é acrescida em no mínimo 10%, e no máximo 20%, atingindo valores de 1,1 a 1,2 pu, respectivamente, por um tempo superior a 1 minuto (IEEE Std. 519, 1992). As principais causas de sobretensão podem ser destacadas (PAULINO, 2015):

- Desligamento de grandes cargas, causando aumento inesperado na tensão da rede que as alimentava;

- Energização de um banco de capacitores, causando uma injeção de excesso de reativos na rede, que se manifesta por uma elevação da tensão;
- Conexão incorreta de taps dos transformadores, causando sobretensões nos sistemas por realizar uma transformação de tensão maior do que a projetada;

As sobretensões podem ocasionar algumas consequências, tais como:

- Dispositivos eletrônicos podem sofrer danos como queima de fusíveis, queima de displays e sinalizadores, aquecimento indesejável, etc;
- Cabos, disjuntores, transformadores e máquinas rotativas, quando submetidos a repetidas sobretensões, tem vida útil reduzida;
- Falhas de operação em relés de proteção;

2.5.3 Interrupção permanente

Chama-se de interrupção permanente o período de tempo, que excede a 1 minuto, onde o fornecimento de tensão permanece em zero (IEEE Std. 519, 1992). Geralmente as interrupções permanentes necessitam de intervenção humana para retomar o sistema de fornecimento de energia (PAULINO, 2015).

As interrupções permanentes podem ocorrer de forma programada ou inesperada, onde a segunda é mais comum. Algumas causas possíveis para as interrupções inesperadas são falhas nos disjuntores e queima de fusíveis, enquanto as interrupções programadas são consequências de uma manutenção de rede, tais como troca de cabos e postes, mudança do tap do transformador, etc (PAULINO, 2015).

Ao ocorrer uma falta permanente, alguns dispositivos de proteção do alimentador tentam executar três ou quatro operações para restabelecer o sistema. Caso não aconteça, o bloqueio é definitivo, fazendo-se necessário a intervenção humana para religar o sistema.

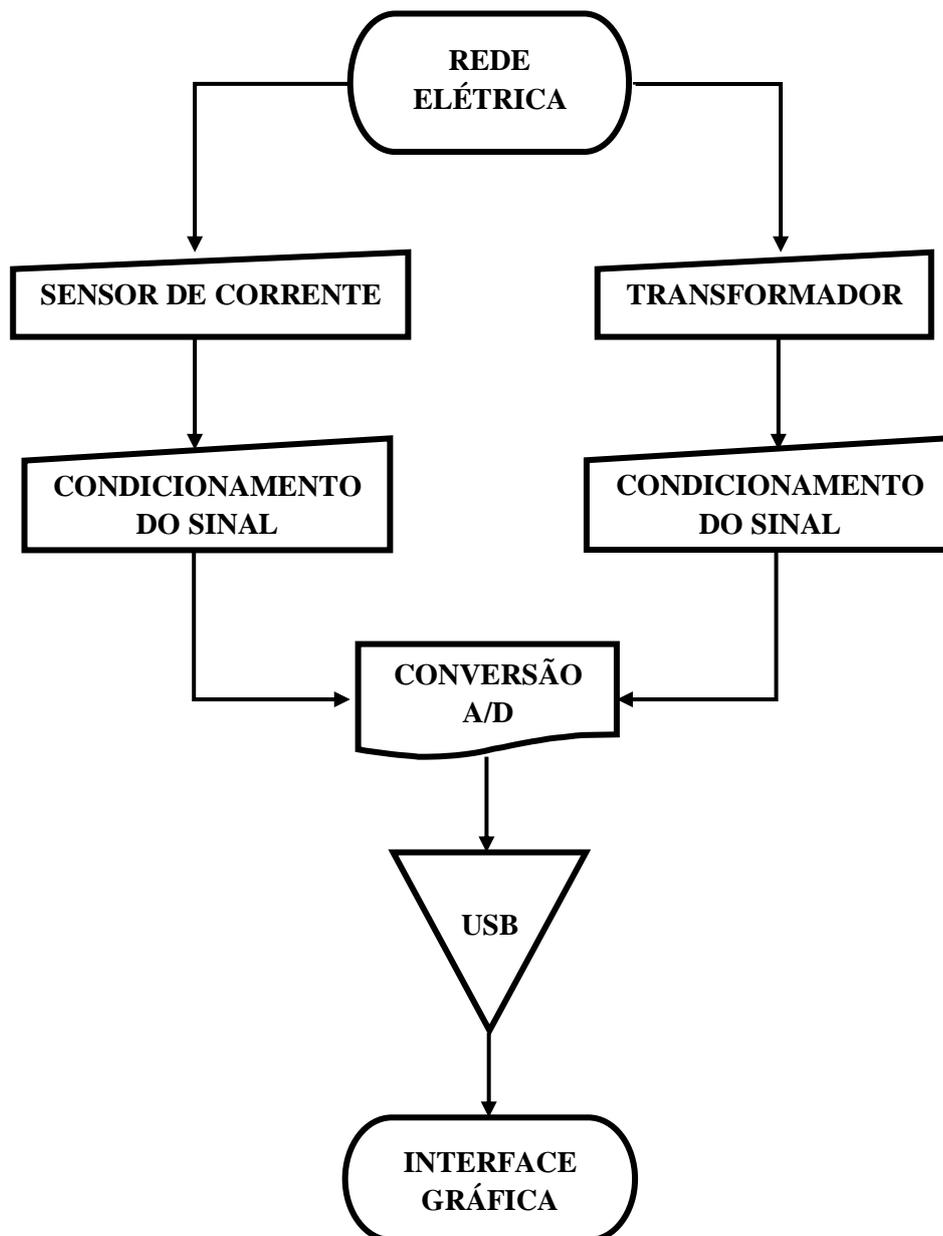
Os problemas causados pela interrupção permanente se resume em redes elétricas inoperantes, falta de iluminação, parada brusca em máquinas rotativas podendo diminuir a vida útil, etc (PAULINO, 2015).

3 PROJETO

3.1 INTRODUÇÃO

O projeto do medidor de QEE segue o protótipo do fluxograma abaixo.

Figura 5 – Etapas do projeto



O funcionamento do projeto se baseia da seguinte forma:

- 1) Adota-se uma rede monofásica, 127V ou 220V;
- 2) Um sensor de corrente é utilizado para medir precisamente o valor da corrente provinda da rede. A medição da tensão é feita através de uma redução no valor de tensão por um transformador;
- 3) O condicionamento de sinal é realizado através de um circuito de amplificadores que atenuam os valores de amplitudes da tensão e corrente da rede elétrica, a fim de assegurar os limites permissíveis pela unidade de controle que faz a conversão do sinal;
- 4) O conversor Analógico/Digital (A/D) transforma o sinal analógico em sinal digital, para a utilização da interface gráfica. Essa conversão é feita por um microcontrolador e o mesmo é encarregado de enviar os resultados para a porta de comunicação USB;
- 5) A porta USB comunica o microcontrolador com a interface gráfica, ou seja, envia os dados coletados nas medições para o programa;
- 6) A interface gráfica realiza os cálculos para parâmetros de QEE.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados para a implementação do medidor de QEE serão aqui abordados com melhor clareza.

3.2.1 Transdutor de Corrente

Para realizar a medição de corrente da rede elétrica, é utilizado um transdutor de corrente de efeito *Hall* (efeito que faz a tensão de saída variar de acordo com o campo magnético aplicado no transdutor).

O modelo do transdutor escolhido, 50CI15 do fabricante SECON, é capaz de medir correntes CA e CC em uma vasta faixa de frequência e garante isolamento galvânico entre as grandezas a serem medidas em relação ao controle, garantindo mais qualidade ao projeto. Sua capacidade de medição vai até 10A e sua relação de transformação de corrente é de 1:1000, ou seja, a corrente de entrada no sensor, em sua saída, admite um valor mil vezes menor que seu o original (SECON, 2015).

Figura 6 – Transdutor de corrente



Fonte: (SECON, 2015)

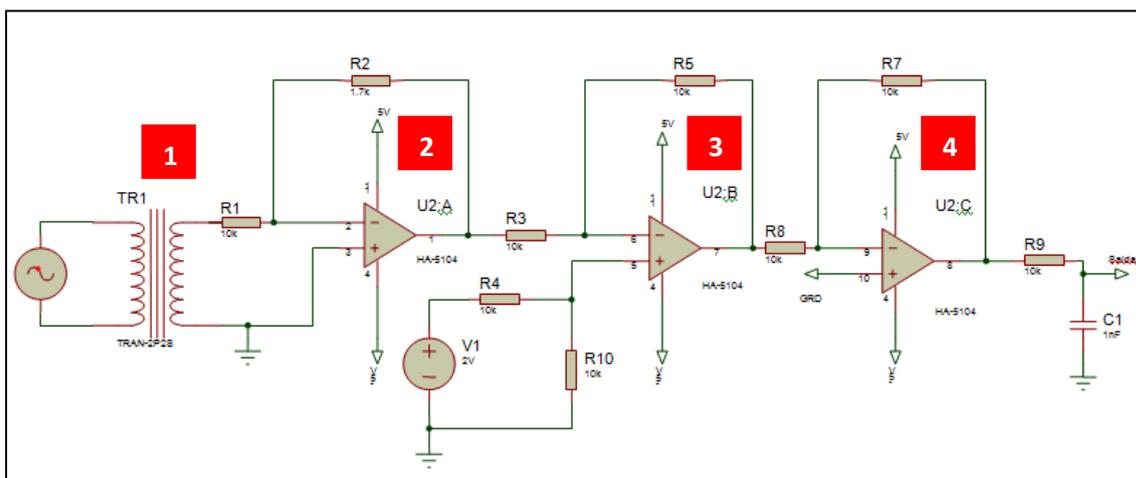
3.2.2 Transformador de tensão

Para a medição da tensão da rede elétrica, é necessário, primeiramente, reduzir seu valor eficaz. Para tal, é utilizado um transformador com entrada 127/220V e saída 12V/1A.

3.2.3 Circuito de Condicionamento de Sinal

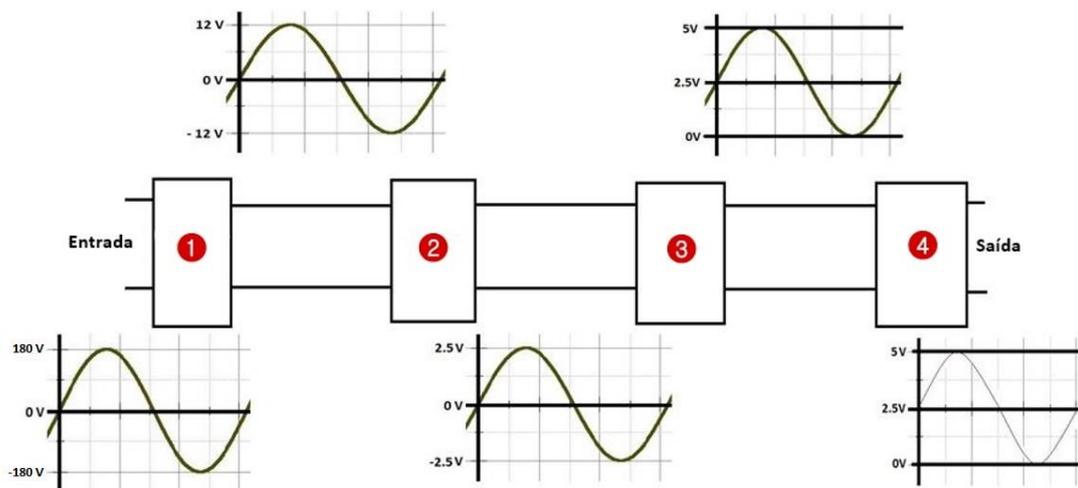
A unidade de controle do medidor exige que os sinais de corrente e tensão medidos da rede sejam condicionados, a fim de se limitarem ao nível de amplitude máxima permitida pelo microcontrolador utilizado. O circuito elaborado para tal função é visto na Figura 7:

Figura 7 – Circuito de condicionamento de sinal de tensão



Esse circuito foi elaborado no software Proteus e consta basicamente com amplificadores operacionais alimentados com $\pm 5V$ DC. Os indicadores numerais (1,2,3 e 4) são estágios do funcionamento do circuito de condicionamento de tensão, que podem ser explicados pelo diagrama de blocos exposto na Figura 8:

Figura 8 – Diagrama de blocos do circuito de condicionamento



O funcionamento dos estágios representados pelo diagrama de blocos da Figura 8 é compreendido a seguir:

- 1) A entrada do circuito, 180V de pico, passa por um transformador para ser atenuada para um módulo de 12V.
- 2) O primeiro amplificador é um atenuador, que recebe 12V na entrada e, através de um ganho controlado, diminui o sinal para 2,5V em módulo.
- 3) O segundo amplificador é um somador. Ele é utilizado para somar duas entradas de tensões diferentes, onde a saída depende da entrada multiplicada pelo seu fator de ganho. Sua saída é o sinal de entrada alternado de 2,5V somado a um offset de 2,5V, a fim de eliminar a componente alternada e ter uma tensão de 5V pico a pico. Esse offset se faz necessário, pois o microcontrolador não admite tensões negativas.
- 4) O último amplificador funciona como um filtro passa-baixa, responsável por eliminar ruídos indesejáveis do sinal.

A escolha do uso de um filtro passivo passa-baixa no estágio 4 se deve ao fato deste funcionar como um filtro anti-aliasing. Um filtro anti-aliasing é um filtro usado, normalmente antes de um conversor analógico-digital do sistema de processamento de sinal digital, para restringir a largura de banda de um sinal e satisfazer aproximadamente ou completamente o teorema de amostragem (taxa de amostragem deve ser no mínimo 2 vezes maior que a maior frequência do sinal original) sobre a faixa de interesse

(OPPENHEIM, 2012). Após a filtragem do sinal no estágio 4, o mesmo é enviado para o microcontrolador.

3.2.4 Microcontrolador

O microcontrolador é um componente eletrônico programável, empregado no controle de métodos lógicos (OLIVEIRA, 2012). O PIC18F4550 foi escolhido para a função de processar os dados da energia elétrica recebida, pois possui duas memórias diferentes que não dependem uma da outra: memória para armazenamento de programa e memória para armazenamento de dados. Isso aumenta a processabilidade do microcontrolador. O PIC18F4550 admite apenas tensões positivas, com amplitude máxima de 5V (Microchip, 2009).

O PIC18F4550 adquire amostras de tensão e corrente da rede elétrica através dos terminais de entrada. Os dados analógicos no PIC armazenados são convertidos em digitais (conversor analógico-digital interno) e enviados para a interface gráfica através de uma porta USB.

O PIC18F4550 tem frequência de clock de 48MHz. A cada 4 clocks, tem-se um ciclo de processo, e assim, o PIC processa a uma frequência de 12 MHz. O conversor A/D tem uma frequência programável, ou seja, a conversão do sinal analógico para digital é realizada conforme o tempo desejado pelo programador do microcontrolador. Neste trabalho, particularmente, foi realizada uma amostragem de 1000 pontos em torno de 10 ciclos, ou seja, uma amostragem de 1000 pontos de um sinal analógico convertido em sinal digital em uma janela de $\frac{10}{60}$ segundos, 0,1666 s. Portanto, tem-se uma taxa de amostragem de 6000 Hz, que representa a quantidade de amostras de um sinal coletado em um determinado tempo, em um período de tempo de 0,1666 ms. Esse processo foi repetido a cada 2 segundos, conforme a programação do conversor A/D.

Figura 9 – PIC18F4550



Fonte: (ENGINEERSGARAGE, 2015)

Para converter um sinal analógico qualquer, o conversor A/D faz algumas amostragens e depois representa a leitura realizada através de um valor equivalente binário (digital), de acordo com a sua precisão. Esta é determinada pelo número de *bits* que um conversor A/D pode usar em sua escala de conversão. O PIC 18F4550 tem precisão de 8 bits, ou seja, pode retornar valores dentro da faixa de 0 a 255 binário.

3.2.5 Porta USB

A porta USB tem a funcionalidade de comunicar hardwares com softwares. Com esse objetivo, é utilizado um módulo conversor USB, que permite fazer uma comunicação, para envio de dados, entre a porta serial do PIC18F4550 com a entrada USB do computador, que leva os dados até a interface gráfica.

O PIC18F4550 transmite para o módulo conversor USB um sinal serial através da porta serial presente em seu dispositivo. O módulo conversor USB, por sua vez, converte a porta USB do computador portátil em uma porta serial virtual, fazendo com que o mesmo abranja essa conexão serial.

Figura 10 – Módulo Conversor USB



Fonte: (HUINFINITO, 2015)

3.2.6 Interface Gráfica

Uma Graphical User Interface (GUI) é uma maneira de automatizar funções usadas constantemente, onde o usuário realiza uma operação através de botões, ícones e

caixas de diálogo apresentados como uma interface gráfica (MARCHAND; HOLLAND, 2003). O MatLab fornece uma GUI de fácil implementação denominada Graphical User Interface Development Environment (GUIDE).

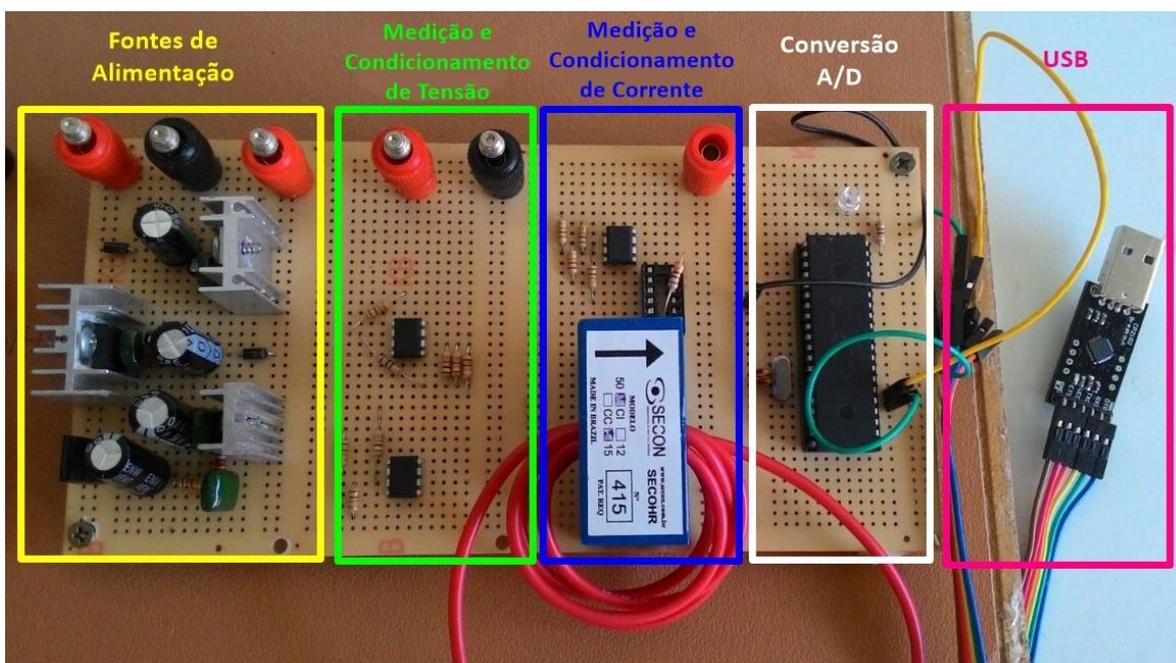
O GUIDE recebe os dados coletados da rede através da porta USB e realiza os cálculos necessários para amostragem do sinal recebido, seus harmônicos e os demais padrões de QEE. A interface é de simples manuseio e autoexplicativa.

O método implementado na codificação interna da interface conta com as teorias de Fourier para obter os harmônicos presentes na rede elétrica. Através de um comando no MatLab, a FFT decompõe a forma de onda do sinal periódico recebido numa somatória de seus harmônicos, transformando o sinal que está no domínio do tempo em um sinal que o representa no domínio da frequência, onde as amplitudes dos harmônicos presentes nesse sinal são representadas (espectro do sinal).

3.3 IMPLEMENTAÇÃO

A placa de aquisição dos sinais de tensão e corrente de medição foi feita em uma placa perfurada de fenolite.

Figura 11 – Placa de aquisição dos sinais de medição

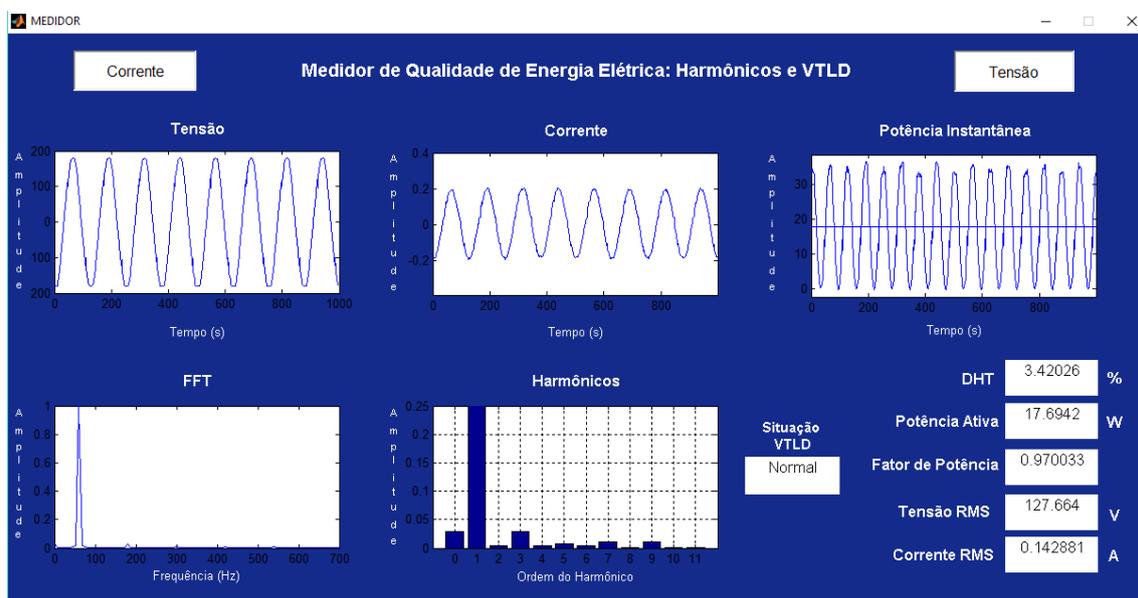


A Figura 11 é descrita abaixo:

- Retângulo amarelo: representa todas as fontes de alimentação do circuito de aquisição. Com uma entrada de 15V CA, reguladores de tensão e diodos formam uma fonte de $\pm 15V$ CC para alimentação do transdutor de corrente. Também com o uso de reguladores de tensão é criada uma fonte de $\pm 5V$ CC para alimentação dos amplificadores. Por um divisor de tensão, tem-se 2V CC para uso no somador do circuito de condicionamento como offset.
- Retângulo verde: realiza a medição de tensão e o condicionamento da mesma, onde a entrada é 12V CA e a saída é 0-5V CA para entrada no conversor de sinal.
- Retângulo Azul: medição e condicionamento do sinal de corrente da rede, onde o sensor de corrente é ligado a uma carga elétrica e seu sinal condicionado, entre 0-5V, é enviado para o microcontrolador, para a conversão do sinal.
- Retângulo branco: O PIC18F4550 recebe o sinal de tensão e corrente, realiza a conversão A/D e envia os sinais digitais para a porta de comunicação USB.
- Retângulo rosa: Mescla a placa de aquisição do sinal com a interface gráfica através do módulo de comunicação USB, enviando amostras de sinal a cada 2 segundos, conforme o código computacional implementado no GUIDE.

A interface gráfica elaborada para mostrar os resultados, quanto aos indicadores de QEE, obtidos da medição do sinal de tensão e corrente é vista na Figura 12:

Figura 12 – Interface Gráfica



3.4 ORÇAMENTO

Em sites comerciais disponibilizados na *internet*, o preço médio dos dispositivos utilizados para implantação do medidor é:

- 1 transformador 1A e 127V-220V/12V.....R\$ 30,00
- 1 transformador 1A e 127V-220/15+15V.....R\$ 35,00
- 18 bornes de conexão.....R\$ 45,00
- 4 regulares de tensão (-5, 5V, -15V e 15V).....R\$ 8,00
- 4 capacitores eletrolíticos 1000 μ F.....R\$ 0,60
- 5 capacitores poliéster 10nF.....R\$ 0,50
- 3 dissipadores de calor.....R\$ 0,45
- 2 diodos 1N4007.....R\$ 0,10
- 3 circuitos integrados LM731.....R\$ 0,45
- 13 resistores diversos.....R\$ 0,65
- 1 cristal 4MHz.....R\$ 0,10
- 1 led ultra brilho.....R\$ 2,00
- 1 placa de fenolite perfurada.....R\$ 25,00
- 1 sensor de efeito Hall SECON 50CI15.....R\$ 250,00
- 1 PIC 18F4550.....R\$ 30,00
- 1 módulo conversor USB.....R\$ 18,00
- 1 licença do software MatLab.....R\$ 550,00
- 1 computador portátil.....R\$ 1.500,00

A soma dos valores médios dos componentes necessários para a implantação do medidor digital de QEE totaliza em um custo de R\$ 2.495.85.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Para análise de resultados, algumas cargas foram analisadas para julgamento da QEE. O hardware realizou a medição de tensão da rede através do transformador e a medição de corrente na rede e na carga através do sensor de corrente. O software ficou responsável pelos cálculos dos indicadores de QEE.

Os equipamentos escolhidos para análise foram: lâmpada incandescente, lâmpada fluorescente, retificador de meia onda com carga resistiva, retificador de onda completa com carga resistiva, carregador de celular e fonte de notebook. As cargas foram escolhidas por serem de uso comum em várias residências. As medições realizadas foram em tempo real, por pouco mais de um minuto, para que as análises dos indicadores de QEE e das VTLD fossem possíveis.

4.2 LÂMPADA INCANDESCENTE

Foi utilizada uma lâmpada incandescente da marca TASCHIBRA, de 127V, 25W e FP=1. Lâmpadas incandescentes são caracterizadas como cargas lineares, uma vez que seu funcionamento é baseado no aquecimento de um filamento. São cargas puramente resistivas e, por isso, a forma de onda de corrente é muito próxima (ou igual) a forma de onda da tensão, ocasionando uma baixa taxa de distorção harmônica (GONZALEZ, 2012). A Figura 13 mostra as formas de onda da tensão, corrente, potência instantânea e potência média, respectivamente.

É válido lembrar que as amplitudes da FFT e dos harmônicos foram normalizadas. Ou seja, o valor máximo da FFT corresponde a 1, e a mesma coisa se aplica para os harmônicos, onde o maior harmônico corresponde a 1. Essa normalização foi realizada em todos os ensaios. Para melhor análise dos harmônicos de menor ordem, foi dada uma ampliação na imagem do espectro de frequência, mostrando apenas parte do harmônico fundamental. Os cálculos de tensão RMS e corrente RMS foram feitos pela integral do sinal ao quadrado e a potência ativa calculada pela média da potência instantânea para todos os ensaios. A Figura 14 mostra os resultados da FFT.

Figura 13 - Tensão, corrente e potência de uma lâmpada incandescente

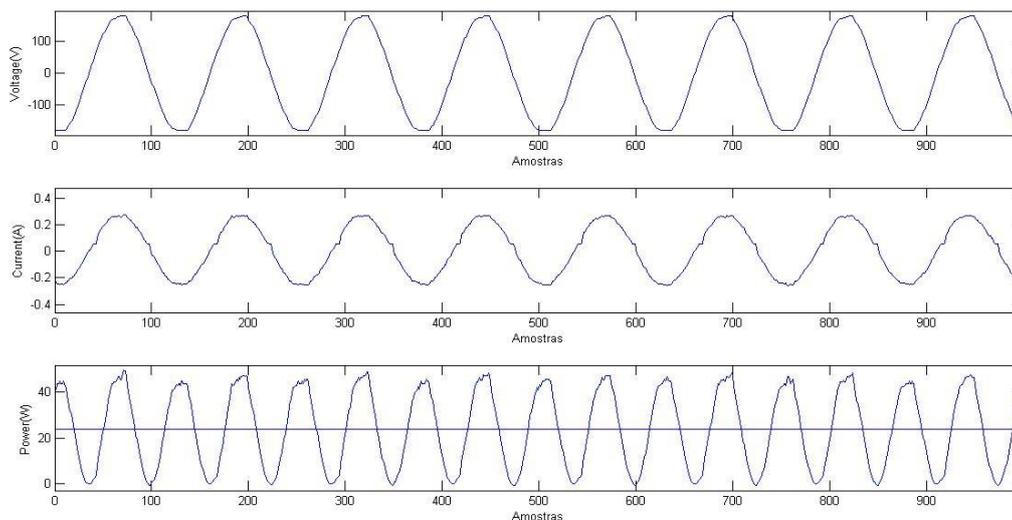
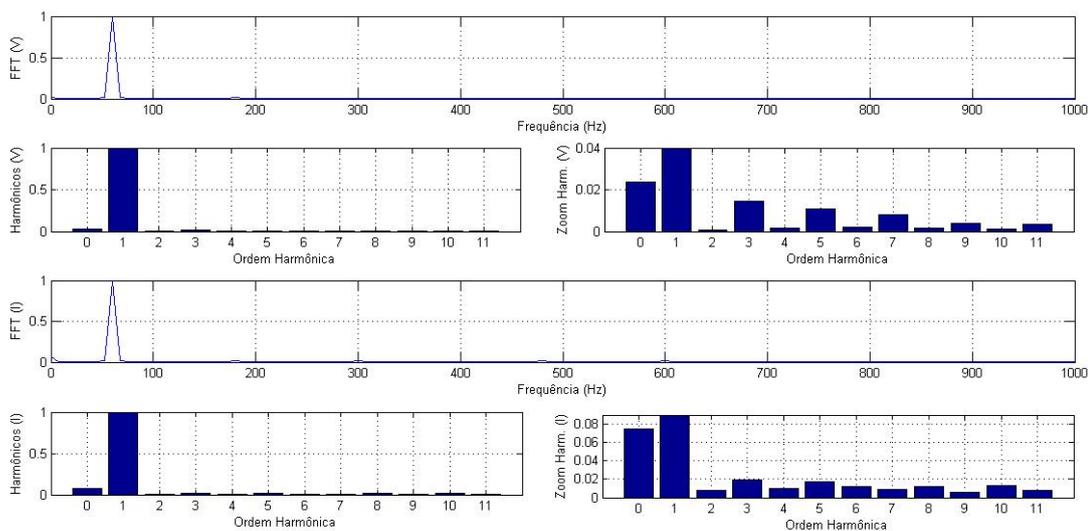


Figura 14 - FFT e espectro de frequência para tensão e corrente de uma lâmpada incandescente



Pelos cálculos dos indicadores, encontraram-se as seguintes magnitudes para lâmpada incandescente.

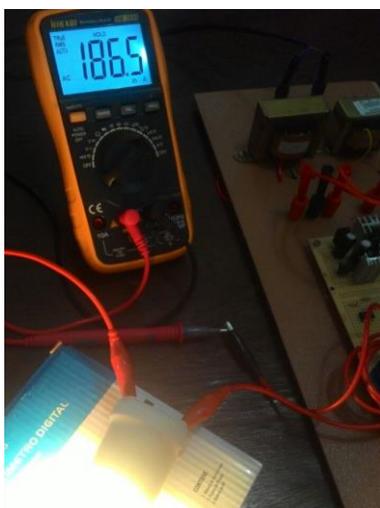
Tabela 6 – Indicadores de QEE para uma lâmpada incandescente

Carga	I_{RMS} (A)	Potência Ativa (W)	FP	DHT _i (%)	DHT _v (%)
Lâmpada Incandescente	0.1863	23.9914	0,99	3,81	2,07

Como esperado, o FP foi alto, e a DHTi e DHTv foram próximas uma da outra, garantindo formas de onda parecidas de corrente e tensão e uma boa QEE.

Para averiguar os valores, foi realizada uma medição da corrente através de um multímetro *true* RMS (considera os harmônicos para cálculo de V_{RMS} e I_{RMS}). A Figura 15 mostra que o valor obtido da corrente pelo amperímetro ($I_{RMS}=186,5\text{mA}$) foi compatível com o valor obtido pelo sensor de corrente ($I_{RMS}=186,3\text{mA}$).

Figura 15 – Medição da corrente na lâmpada incandescente através de um amperímetro.



A tensão medida pelo voltímetro é $V_{RMS}=126,8\text{V}$, e pode ser vista na Figura 16. É válido lembrar que essa tensão é a mesma aplicada em todos os ensaios.

Figura 16 - Medição da tensão da rede através de um voltímetro.



Para constatar o cálculo da potência ativa pelo medidor implementado, faz-se o cálculo da mesma com os valores obtidos pelo multímetro. Lembrando que o FP da lâmpada incandescente é 1.

$$P = V_{\text{RMS}} \cdot I_{\text{RMS}} \cdot \text{FP} \quad (4.1)$$

$$P = (126,8) \cdot (0,1865) \cdot (1)$$

$$P = 23,6482 \text{ W}$$

A potência ativa foi bem próxima em ambas as medições, o que garante uma confiabilidade no medidor implementado, que apresenta um erro percentual de 1% em relação ao multímetro.

4.3 LÂMPADA FLUORESCENTE

Foi utilizada uma lâmpada fluorescente compacta, do fabricante OSRAM DULUXSTAR, de 127V, 24W e FP=0,65. Apesar de bastante econômicas quando comparada às lâmpadas incandescentes, lâmpadas fluorescentes possuem características não lineares e apresentam distorção na forma de onda da corrente (GONZALEZ, 2012). Os resultados são mostrados a seguir, nas Figuras 17 e 18.

Figura 17 - Tensão, corrente e potência de uma lâmpada fluorescente compacta

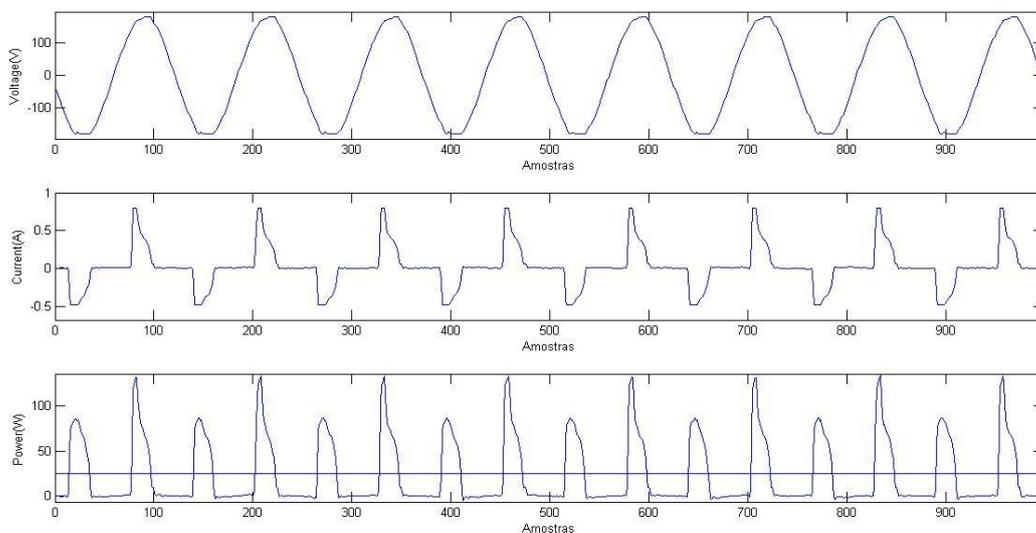
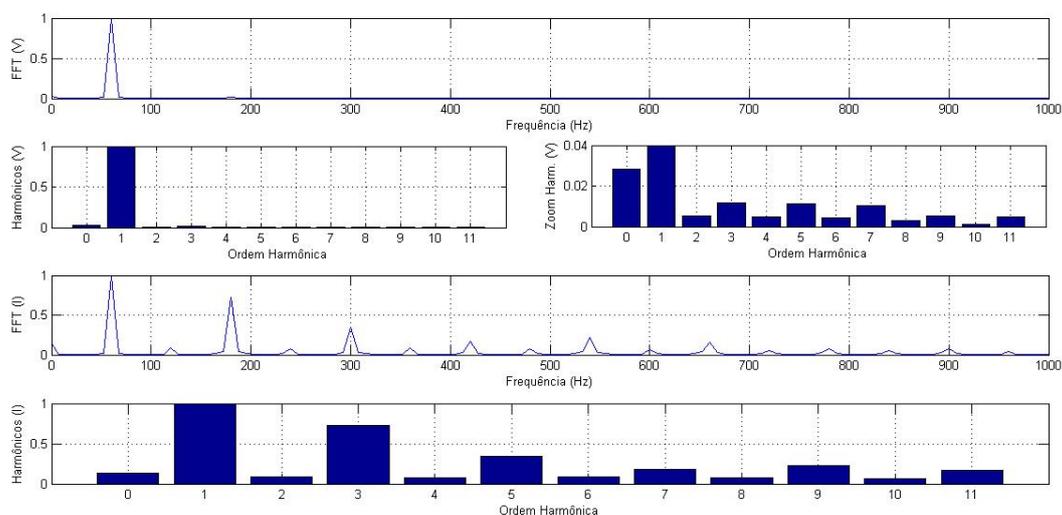


Figura 18 - FFT e espectro de frequência para tensão e corrente de uma lâmpada fluorescente compacta



Lâmpadas fluorescentes levam em torno de 30 minutos para entrarem em regime permanente (GONZALEZ, 2012), portanto, o tempo desse ensaio foi de 40 minutos, para evitar os transitórios do período de estabilização da lâmpada.

Pelos cálculos dos indicadores, encontraram-se as seguintes magnitudes para lâmpada fluorescente.

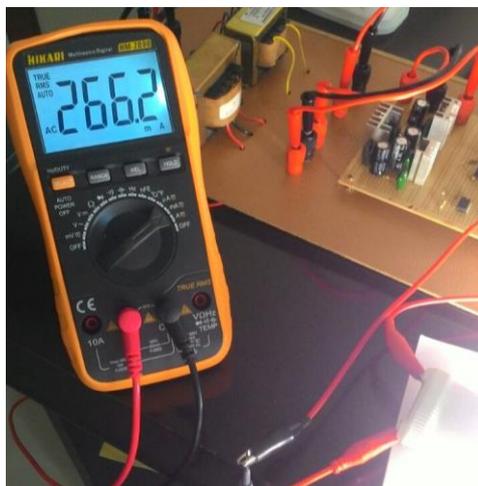
Tabela 7 – Indicadores de QEE para uma lâmpada fluorescente compacta

Carga	I_{RMS} (A)	Potência Ativa (W)	FP	DHTi (%)	DHTv (%)
Lâmpada Fluorescente	0.2680	24.6205	0,70	89,99	2,23

Nota-se que os resultados obtidos foram como os esperados: alta distorção na forma de onda da corrente, com grande conteúdo harmônico e baixo FP, podendo causar ineficiência no restante da iluminação conectada no mesmo circuito.

Para verificar os valores, foi realizada uma medição da corrente através de um multímetro true RMS. A Figura 19 mostra que o valor obtido da corrente pelo amperímetro ($I_{RMS}=266,2mA$) foi compatível com o valor obtido pelo sensor de corrente ($I_{RMS}=268mA$).

Figura 19 – Medição da corrente na lâmpada fluorescente através de um amperímetro.



Para examinar se o cálculo da potência ativa está correto pelo medidor implementado, faz-se o cálculo da mesma com os valores obtidos pelo multímetro. Lembrando que o FP da lâmpada fluorescente é 0,65 e a tensão medida pelo voltímetro é $V_{RMS}=126,8$.

$$P = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot FP$$

$$P = (126,8) \cdot (0,2662) \cdot (0,65)$$

$$P = 21,9402 \text{ W}$$

A potência ativa foi bem próxima em ambas às medições, garantindo uma confiabilidade no medidor implementado, que apresenta um erro percentual de aproximadamente 11% em relação ao multímetro.

4.4 RETIFICADOR DE MEIA ONDA

Foi utilizado um retificador de meia onda monofásico não controlado, feito com um diodo modelo 1N4007, e uma lâmpada incandescente de 25W, 127V e FP=1 como carga. O retificador de meia onda permite a passagem de corrente quando essa tem magnitude positiva e bloqueia a passagem da mesma quando negativa. Dessa forma, a tensão é retificada em meia onda, alimentando a carga resistiva com tensão DC. O

conjunto do retificador de meia onda com a carga linear, é considerado uma carga não-linear. Os resultados são mostrados nas Figuras 20 e 21.

Figura 20- Tensão, corrente e potência de um retificador de meia onda

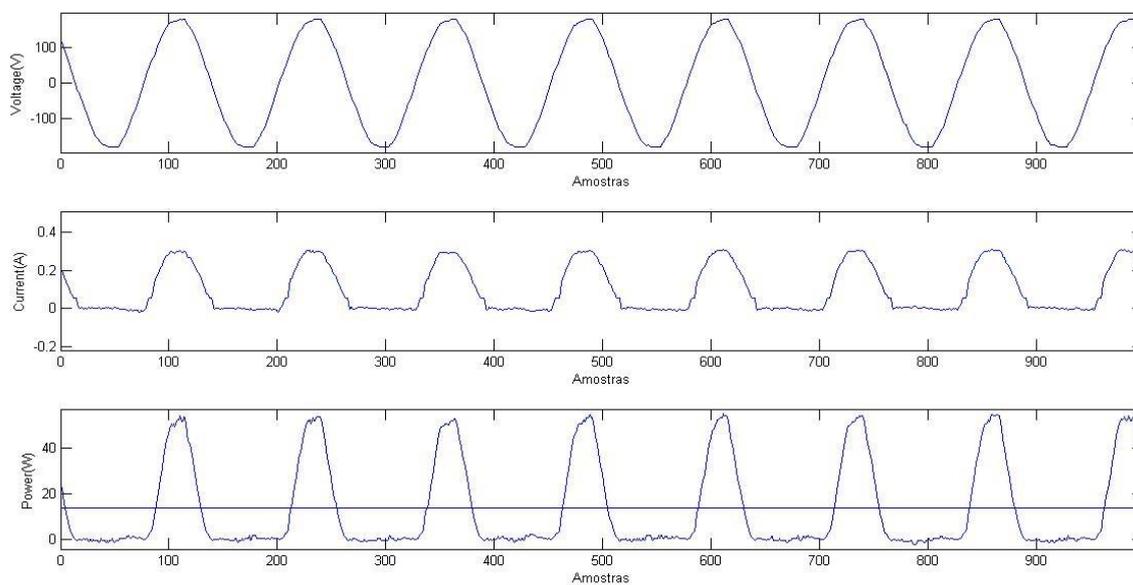
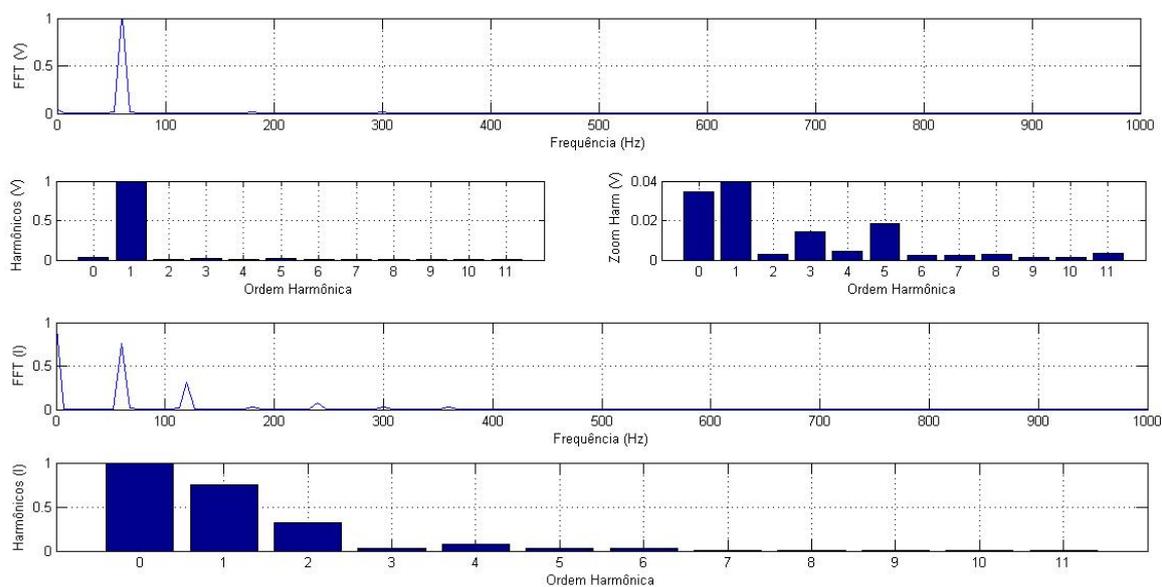


Figura 21 - FFT e espectro de frequência para tensão e corrente de um retificador de meia onda



Pelos cálculos dos indicadores, encontraram-se as magnitudes para um retificador de meia onda na Tabela 8.

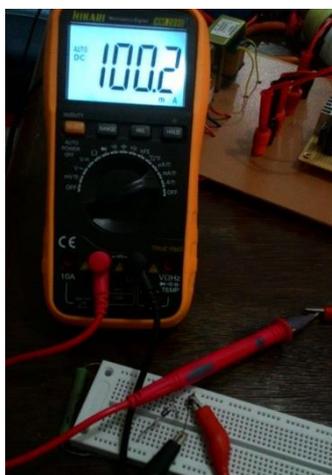
Tabela 8 – Indicadores de QEE para um retificador de meia onda com carga resistiva

Carga	I_{RMS} (A)	Potência Ativa (W)	FP	DHTi (%)	DHTv (%)
Retificador de meia onda	0.1597	14.1660	0,69	34,14	2,42

Houve uma DHTi considerável, causando um baixo FP. Pela Figura 21, observa-se a presença de harmônicos pares com alta magnitude. Isso acontece em retificadores sob condições não ideais, que geram harmônicos não característicos, que além de causar problemas adversos por estarem presentes nos sistemas elétricos, ainda representam uma preocupação maior, por não estarem previstos na concepção original do projeto (POMILIO, 1997).

A fim de garantir a confiabilidade do medidor de QEE, foi utilizado um multímetro *true* RMS para aferir a corrente. A corrente encontrada pelo amperímetro foi $I_{média}=100,2$ mA, enquanto a encontrada pelo medidor foi $I_{RMS}=155,6$ mA.

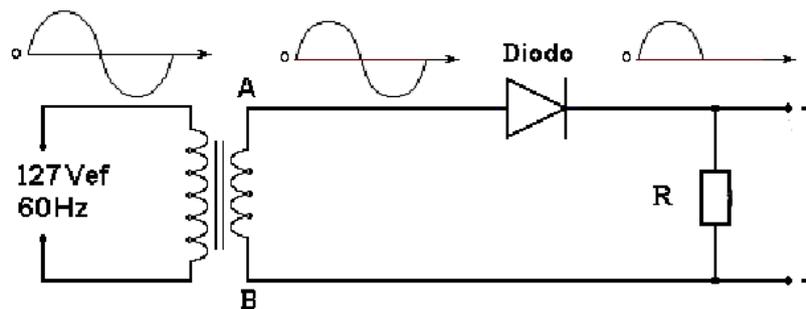
Figura 22 – Medição da corrente no retificador de meia onda monofásico através de um amperímetro.



É importante ressaltar que o multímetro, quando detecta uma corrente CA, realiza o cálculo da corrente RMS, e quando detecta uma corrente CC, realiza o cálculo da corrente média, para mostrá-la no display.

Observe a Figura 23. Após o diodo, a corrente fica meio ciclo positiva e meio ciclo nula. Como o diodo está em série com a alimentação e a carga, a corrente de entrada no diodo é a mesma de saída. Sendo assim, o multímetro considera uma corrente CC em ambos os lados, e por isso, apresenta um valor distinto do valor RMS calculado pelo software. O multímetro realiza então a média do valor de corrente medido, quando está em sua função CC.

Figura 23 – Retificador de meia onda mais carga resistiva



Para conferir as medições, faz-se o cálculo da corrente média através da corrente aferida pelo medidor. Tem-se que, para um retificador de meia onda, as correntes RMS e média são obtidas pelas seguintes equações (BARBI, 2006):

$$I_{m\acute{e}dia} = \frac{\text{corrente m\acute{a}xima de pico}}{\pi} \quad (4.2)$$

$$I_{RMS} = \frac{\text{corrente m\acute{a}xima de pico}}{2} \quad (4.3)$$

Pelo software, a corrente m\acute{a}xima de pico \u00e9 igual a $I_{m\acute{a}x} = 321,9 \text{ mA}$. Assim,

$$I_{m\acute{e}dia} = \frac{0,3219}{\pi} = 102,5 \text{ mA}$$

$$I_{RMS} = \frac{0,3219}{2} = 161 \text{ mA}$$

Pode-se ver que a corrente calculada matematicamente pelos valores obtidos no software é de $I_{\text{média}}=102,5$ mA, enquanto a aferida pelo amperímetro é $I_{\text{média}}=100,2$ mA, o que apresenta um erro percentual de 2% entre as medições de corrente realizadas pelo multímetro e o sensor de corrente. A corrente RMS obtida pelo código de implementação do medidor é $I_{\text{RMS}}=159,7$ mA, enquanto a encontrada pela equação 4.3 é $I_{\text{RMS}}=161$ mA, gerando um erro percentual de 0,8%. Os erros percentuais obtidos foram baixos, dando aval aos cálculos, de FP e potência ativa, realizados pelo medidor.

4.5 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA

O uso de um retificador de onda completa dobra a frequência do sinal de entrada no mesmo, uma vez que a retificação mostra dois ciclos do sinal em um período. Portanto, é importante afirmar que agora a fundamental se encontra em 120Hz, e a taxa de distorção harmônica é calculada a partir do harmônico de 3ª ordem.

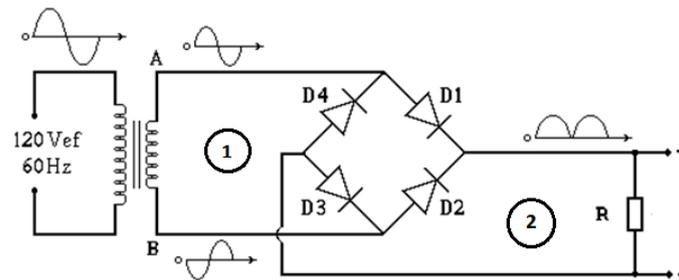
Retificadores e inversores, trifásicos ou monofásicos, são grandes geradores de harmônicos. Os retificadores que operam em onda completa geram na alimentação sinais distorcidos, porém, simétricos e periódicos. Pela teoria de Fourier, todo sinal que possui simetria de meia onda possui seus componentes pares anulados. Portanto, a priori, a presença de harmônicos pares é sinal de que os semicondutores nos dispositivos de retificação/inversão estão desregulados (ISONI, 2002).

O retificador de onda completa utilizado foi feito com uma ponte completa de diodos, modelo 1N4007, alimentando uma lâmpada incandescente de 25W, 127V e $FP=1$ como carga.

Observe a Figura 24. Para o retificador de onda completa, a potência ativa só pode ser calculada no lado CA, ou seja, antes da retificação (1). Isso acontece porque o dispositivo de medição de tensão (transformador) está fixo e só pode medir sinais CA. Portanto, para medir a potência ativa da rede, o sensor de corrente deve ser alocado antes da ponte de diodos (mesmo lado onde o transformador se encontra), realizando uma medição de corrente alternada. Quando o sensor de corrente se encontra após a retificação (2), a corrente aferida é contínua e, assim, não é possível medir a potência de distorção na carga, pois a medição de tensão feita pelo transformador é em CA. Para medir as tensões harmônicas no lado CC, faz-se necessário o uso de um sensor de

tensão de efeito Hall, que não foi utilizado na implementação do medidor de QEE devido ao custo elevado.

Figura 24 – Retificador de onda completa mais carga resistiva



Os resultados obtidos para medição da corrente após a retificação, para um retificador de onda completa, podem ser vistos nas Figuras 25 e 26.

Figura 25 – Tensão (anterior à retificação) e corrente (posterior à retificação) de um retificador de onda completa

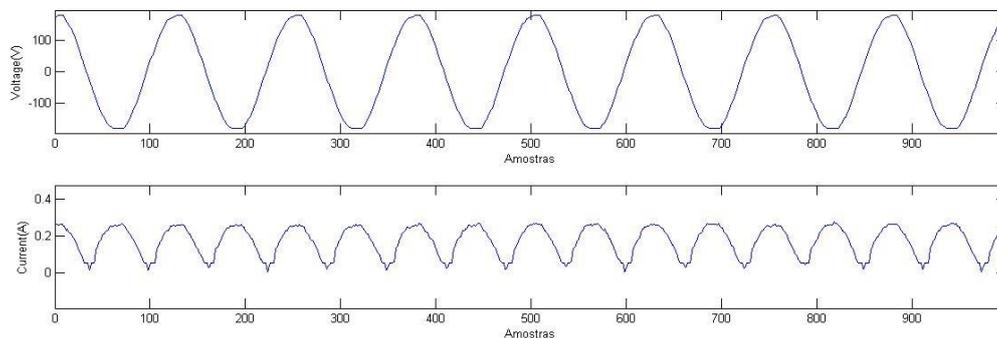
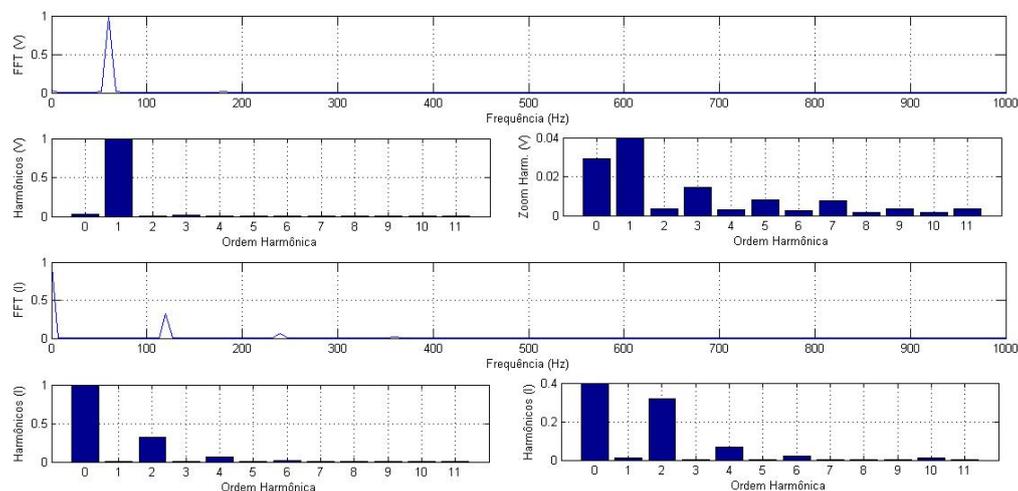


Figura 26 - FFT e espectro de frequência para tensão (anterior à retificação) e corrente (posterior à retificação) de um retificador de onda completa



Pelos cálculos dos indicadores, encontraram-se as seguintes magnitudes para o retificador de onda completa, onde a corrente foi aferida após a retificação.

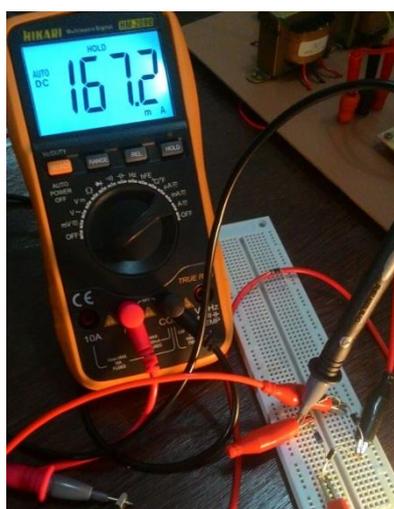
Tabela 9 – Indicadores de QEE para um retificador de onda completa com aferição de corrente posterior à retificação

Carga	$I_{média}$ (A)	DHTi (%)	DHTv (%)
Retificador de onda completa	0,1708	21,84	2,87

Houve uma DHTi considerável, uma vez que a componente CC não entra no cálculo. Porém, nota-se que tanto a DHTi quanto a DHTv foram menores ao utilizar um retificador de onda completa do que ao utilizar um retificador de meia onda. Isso acontece, pois o primeiro aproveita os dois semiciclos da rede elétrica, enquanto o segundo, por usar apenas o semiciclo positivo, cria interferências na rede, que prejudicam a eficácia do serviço de distribuição como um todo (POMILIO, 1997).

Para corrente contínua, a medição aferida é de corrente média. O multímetro, quando está em função CC, realiza a média da corrente medida e mostra no display, e o código no software realiza a média do valor de corrente medido pelo sensor, a fim de comparação dos dois dispositivos de medição.

Figura 27 - Medição da corrente no retificador de onda completa monofásico, posterior à retificação, através de um amperímetro.



A corrente encontrada pelo amperímetro foi $I_{média}=167,2$ mA, enquanto a encontrada pelo medidor foi $I_{média}=170,8$ mA. Isso gera um erro percentual de 2% entre

as medições de corrente realizadas pelo multímetro e o sensor de corrente, garantindo cálculos verídicos de FP e potência ativa realizados pelo medidor de QEE.

Os resultados obtidos das medições anteriores à retificação podem ser vistos nas Figuras 28 e 29.

Figura 28 – Tensão, corrente e potência de um retificador de onda completa, anterior à retificação

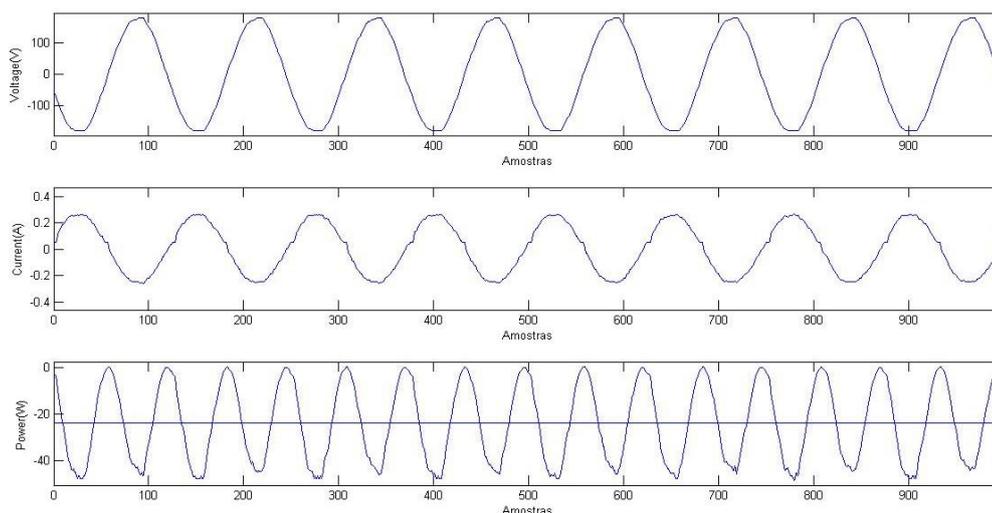
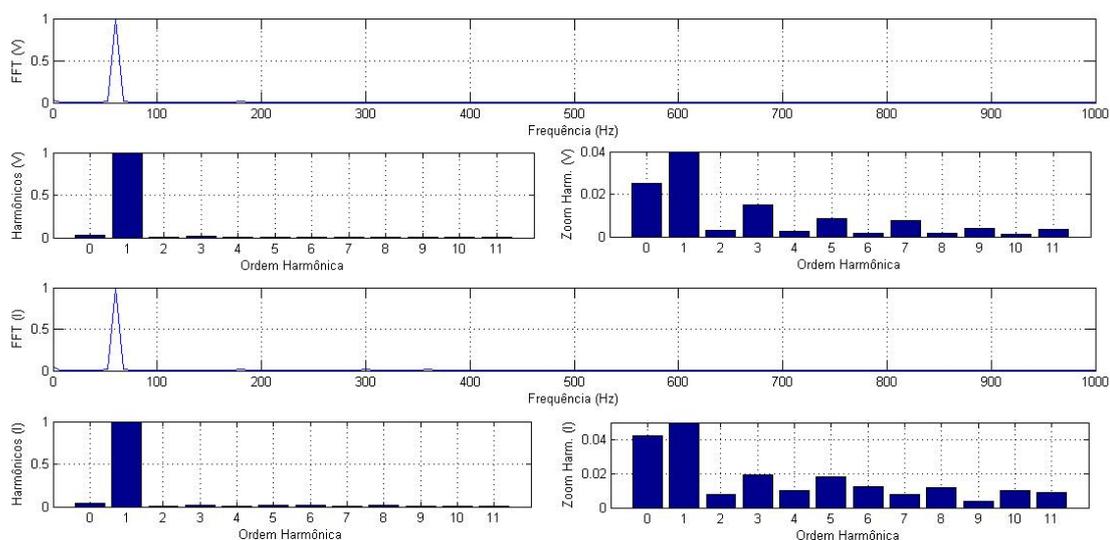


Figura 29 - FFT e espectro de frequência para tensão e corrente de um retificador de onda completa, anterior à retificação



Pelos cálculos dos indicadores, encontraram-se as seguintes magnitudes para o retificador de onda completa, com aferição da corrente anterior à retificação.

Tabela 10 – Indicadores de QEE para um retificador de onda completa com aferição de corrente anterior à retificação

Carga	I_{RMS} (A)	Potência Ativa (W)	FP	DHTi (%)	DHTv (%)
Retificador de onda completa	0,1850	23.8599	0,99	3,74	1,99

Pela Tabela 10, pode-se observar que os resultados foram próximos dos resultados do ensaio com a lâmpada incandescente (Tabela 6). Esse ensaio foi realizado para analisar o efeito causado pelo retificador de onda completa conectado à rede. Pelos resultados, observa-se que o retificador causou distorções apenas na carga, pois a rede continua com uma QEE dentro dos padrões estabelecidos pela IIEEE e ANEEL.

A corrente encontrada pelo amperímetro foi $I_{RMS}=185$ mA, exatamente a mesma obtida pelo medidor, garantindo total veracidade nos cálculos de FP e potência ativa, realizados pelo medidor de QEE.

Figura 30 - Medição da corrente no retificador de onda completa monofásico, anterior à retificação, através de um amperímetro.



4.6 CARREGADOR DE CELULAR

Foi utilizado um carregador de smartphone do fabricante Apple, com entradas 127/220 V e saídas 5V e 0,7A. Embora o carregador de celular possua baixa potência,

ele é considerado uma carga não linear e gera harmônicos na rede (CARVALHO, 2015). A seguir, podem-se observar os resultados pelas Figuras 31 e 32.

Figura 31 – Tensão, corrente e potência de um carregador de celular

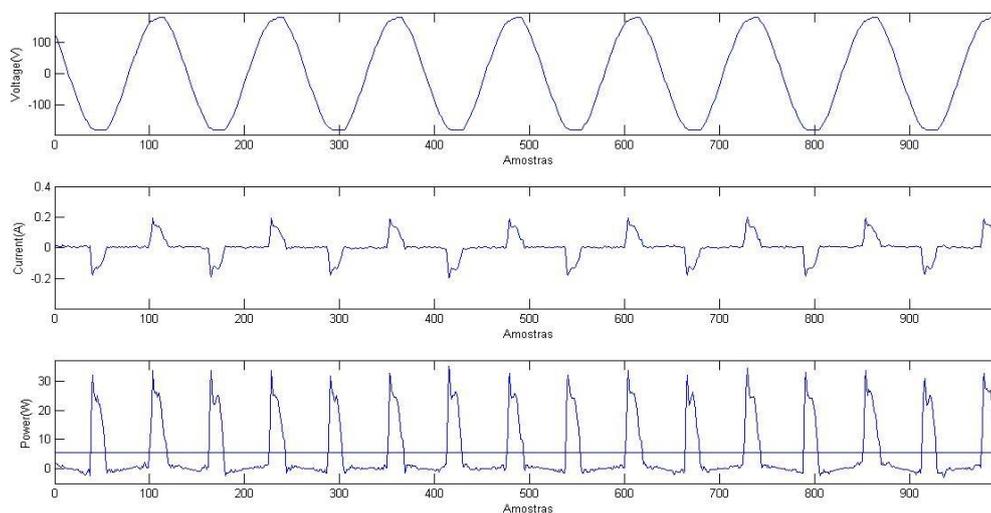
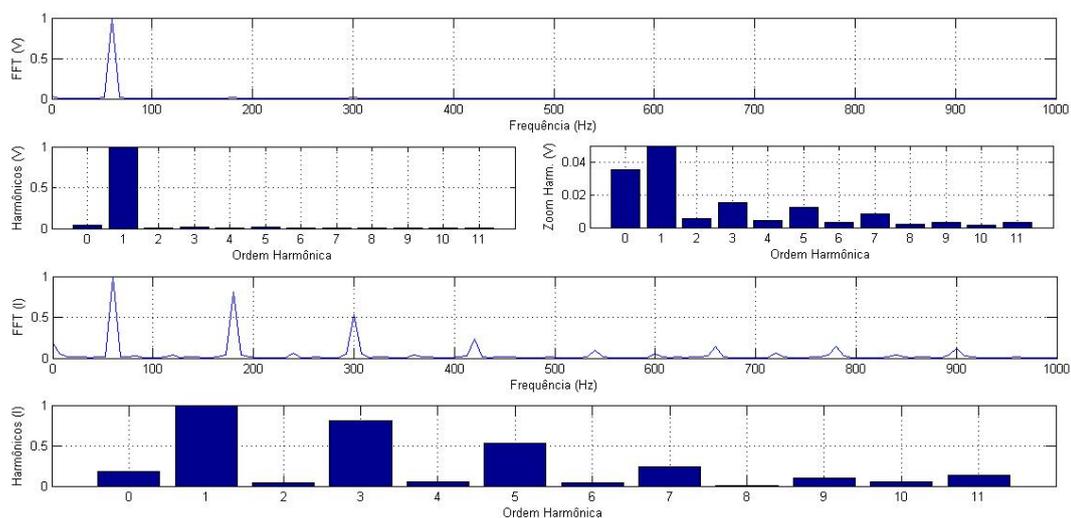


Figura 32 – FFT e espectro de frequência para tensão e corrente de um carregador de celular



Pelos cálculos dos indicadores, encontraram-se as seguintes magnitudes para o carregador de celular.

Tabela 11 – Indicadores de QEE para um carregador de celular

Carga	I_{RMS} (A)	Potência Ativa (W)	FP	DHTi (%)	DHTv (%)
Celular	0,0649	5,6065	0,66	101,67	2,31

Percebe-se pela Figura 32 que os harmônicos ímpares possuem valores bastante consideráveis e o harmônico de 3ª ordem alcança cerca de 80% da fundamental. Os harmônicos são tão ponderáveis que a soma deles ultrapassa o valor da fundamental, gerando um grande DHTi e um baixo FP, podendo causar ineficiência ao próprio carregador ou a outros dispositivos conectados no mesmo circuito.

A corrente encontrada pelo amperímetro foi $I_{RMS}=69,8$ mA, enquanto a corrente obtida pelo sensor de corrente foi $I_{RMS}=64,9$ mA, garantindo veracidade nos cálculos de FP e potência ativa, realizados pelo medidor de QEE, com um erro percentual de 7% em relação ao multímetro.

Figura 33 - Medição da corrente no carregador de celular através de um amperímetro.



4.7 FONTE DE COMPUTADOR PORTÁTIL

Utilizou-se uma fonte de alimentação de um computador portátil do fabricante HP, com entrada 127/220V e saída 18,5V e 3,5A. Observa-se os resultados nas Figuras 34 e 35.

Figura 34 – Tensão, corrente e potência de uma fonte de um computador portátil

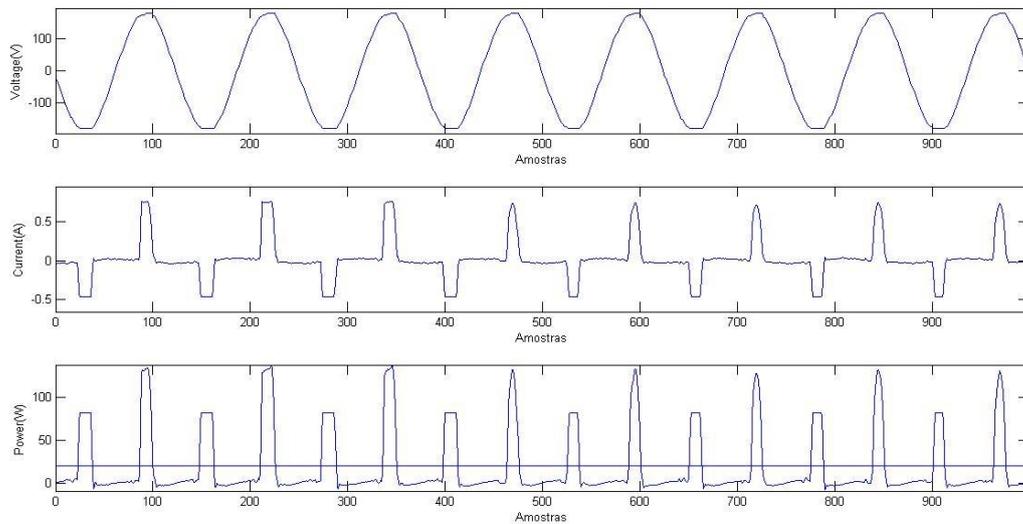
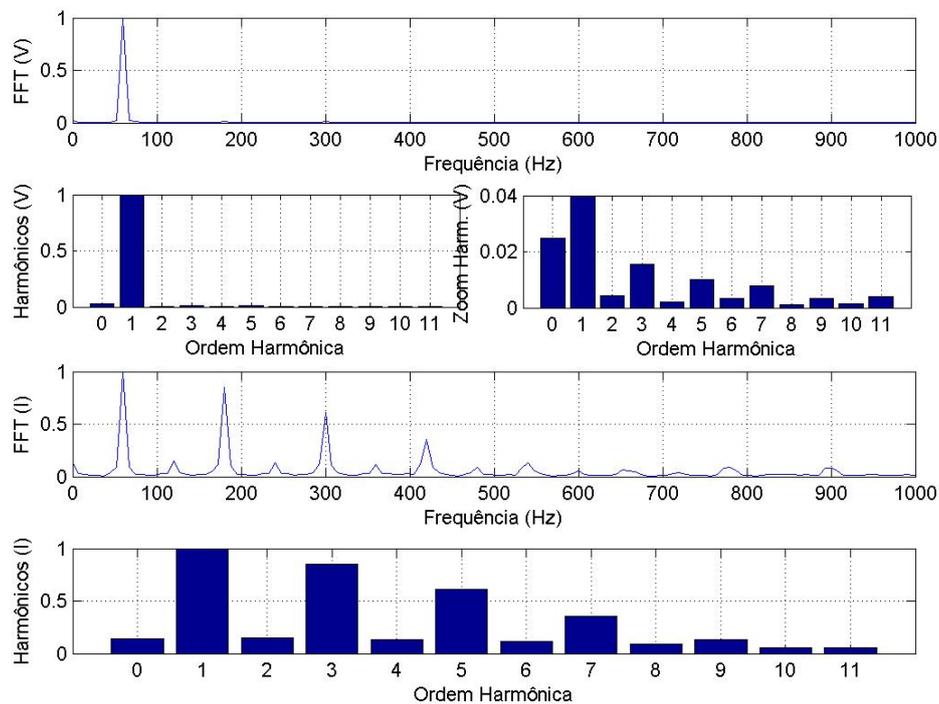


Figura 35 – FFT e espectro de frequência para tensão e corrente de uma fonte de um computador portátil



Normalmente os computadores portáteis ou computadores desktops presentes nas residências, produzem alta distorção harmônica de corrente na instalação elétrica, devido às fontes chaveadas presentes na fonte de alimentação dos mesmos,

caracterizando-os como carga não-lineares (CARVALHO, 2015). Pelos cálculos dos indicadores, encontraram-se as seguintes magnitudes para a fonte do computador portátil.

Tabela 12 – Indicadores de QEE para uma fonte de um computador portátil

Carga	I_{RMS} (A)	Potência Ativa (W)	FP	DHTi (%)	DHTv (%)
Fonte de notebook	0,2484	19,8552	0,61	114,6461	2,1710

Os resultados obtidos foram como os esperados, pois houve uma DHTi com alto índice de distorção, devido ao valor elevado da soma dos harmônicos estar acima do valor da fundamental. Assim, um baixo FP é obtido, resultando em ineficiência no próprio equipamento e nos demais conectados no mesmo circuito elétrico.

A corrente encontrada pelo amperímetro foi $I_{RMS}=250,8$ mA, enquanto a corrente obtida pelo sensor de corrente foi $I_{RMS}=248,4$ mA, garantindo veracidade nos cálculos de FP e potência ativa, realizados pelo medidor de QEE, com um erro percentual de 1% em relação ao multímetro.

Figura 36 - Medição da corrente na fonte de um computador portátil através de um amperímetro.



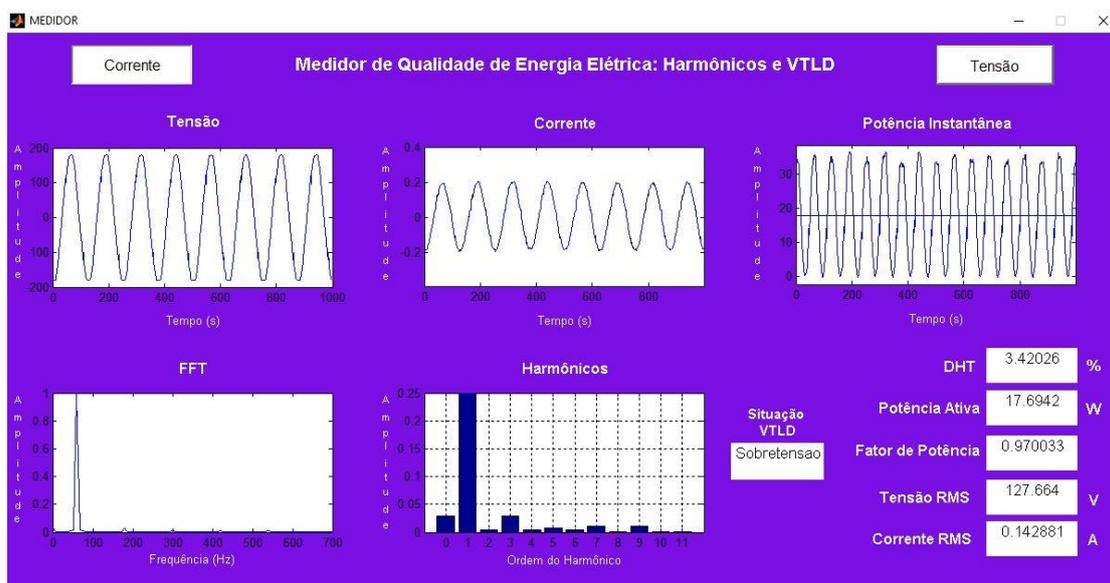
4.8 SIMULAÇÕES DE VTLD

Para verificar se o software implementado analisa corretamente a presença de VTLD, assumiu-se, hipoteticamente e arbitrariamente, uma base de tensão igual a

110V. Conforme o regulamento da IEEE, uma sobretensão é acusada quando a tensão máxima do circuito está entre 1.1 pu a 1.2 pu por mais de 1 minuto (IEEE Std 1159, 1995). Admitindo a base de tensão como 110V, tem-se que o máximo valor de tensão RMS permitido é 121V para que a rede elétrica esteja em seu estado normal.

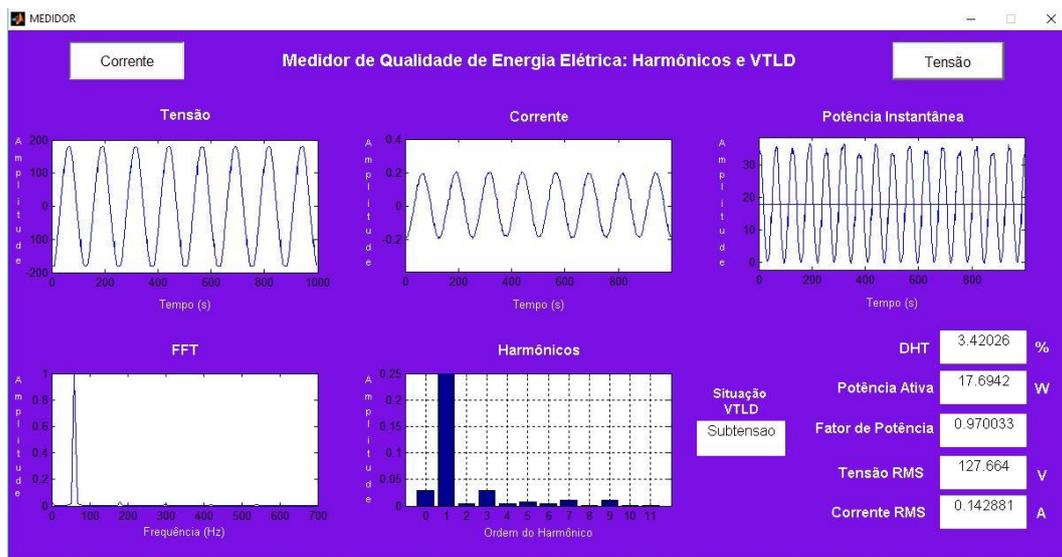
Ao realizar a medição em uma lâmpada incandescente de 25W e 127V pelo hardware por pouco mais de 1 minuto, assumindo a tensão de base igual a 110V, a tensão RMS encontrada na rede é 127.664V, portanto, ocorreu uma sobretensão e a interface expressou isso corretamente, como pode-se ver na Figura 37.

Figura 37 – Análise de sobretensão com uma base de tensão de 110V



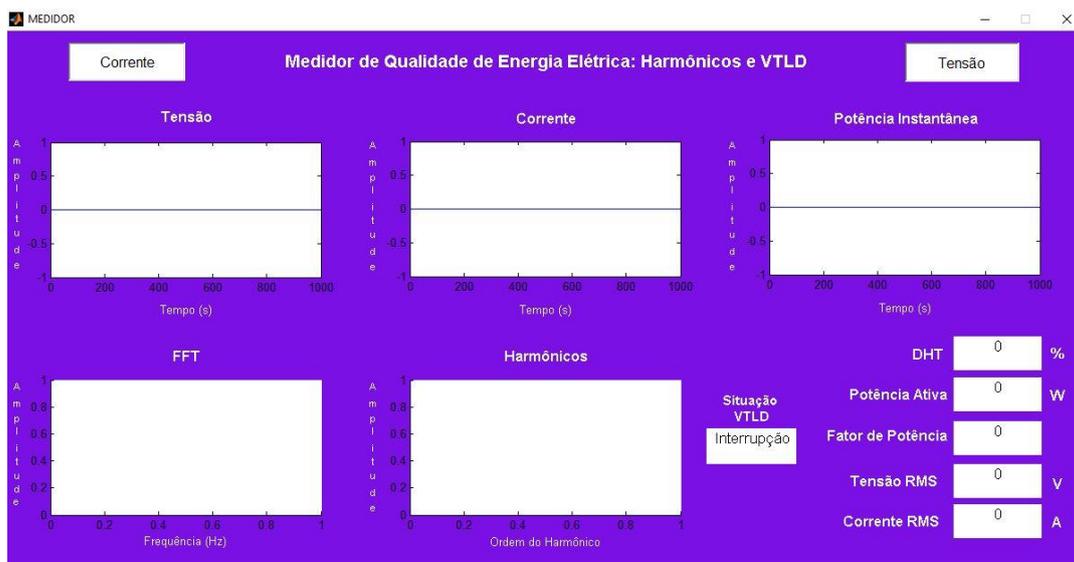
Para teste de subtensão, admitiu-se arbitrariamente uma base de tensão igual a 150V. Segundo a IEEE, uma subtensão é detectada quando a tensão máxima da rede está entre 0.8 pu e 0.9 pu. Para base igual a 150V, a tensão mínima permitida é 135V. Portanto, ao medir a tensão da rede em uma lâmpada incandescente de 25W e 127V pelo hardware, por pouco mais de 1 minuto, encontra-se uma tensão máxima de 127.664, o que caracteriza uma subtensão, por ser menor que a mínima permitida. O resultado pode ser visto na interface pela Figura 38.

Figura 38 – Análise de subtensão com uma base de tensão de 150V



Para analisar uma interrupção, o circuito é desconectado da rede. Ou seja, a placa de aquisição recebe 0V, e, conseqüentemente, uma corrente nula. Quando essa tensão conservar-se por mais de 1 minuto, a rede sofre uma interrupção permanente. Os resultados obtidos podem ser vistos na interface pela Figura 39.

Figura 39 - Análise de interrupção permanente



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o comportamento de algumas cargas elétricas comuns dentro de residências. Foram analisados os cálculos de potência ativa, FP, DHTi, DHTv, espectro de frequência e VTLD a fim de observar o comportamento dessas cargas perante a QEE.

Pelos resultados obtidos, pode-se concluir que grande parte das cargas não lineares encontradas nas residências não se adequam às referências propostas pela ANEEL e IEEE, pois apresentam valores muito distintos dos ideais ($DHTv \leq 10\%$ e $DHTi \leq 5\%$) para se classificarem como uma boa QEE. Entretanto, vê-se que os harmônicos de menor frequência são os mais prejudiciais à rede elétrica. Portanto, é possível implementar filtros que possam eliminá-los, garantindo uma boa QEE a alimentação de circuitos.

Pode-se ver que o medidor digital implementado é confiável, pois apresentou baixos erros percentuais, maior parte entre 1% e 2%, em relação às medições feitas por um multímetro *true* RMS. O maior erro percentual encontrado, foi de 11%, no ensaio da lâmpada fluorescente compacta, que pode se justificar pelo fato de utilizar o $FP=0,65$, fornecido pelo fabricante, para fator de comparação. O fabricante não garante a exatidão desse dado fornecido, portanto, não pode-se esperar uma exatidão nos cálculos matemáticos de potência ativa realizados com os dados oriundos de fábrica. Isso pode gerar uma margem de erro significativa em comparação aos cálculos de potência ativa realizados com dados reais.

Assim, chega-se à conclusão que é possível um consumidor residencial de BT ter acesso direto, com um custo relativamente baixo, a QEE da rede elétrica utilizada, o que ajudaria a julgar seus equipamentos eletroeletrônicos usados.

Por integrar diretamente com o MatLab, o hardware criado apresenta algumas vantagens:

- Pode ser usado para análises de faltas em SEP, tais como cálculos de curtos-circuitos temporários e permanentes, correntes desequilibradas, condições de pré-falta e contribuições das correntes de curto-circuito na rede elétrica;
- Pode analisar demais distúrbios presentes na rede elétrica e seus indicadores, tais como VTCD, transitórios, flutuação de tensão, *notches* e ruídos, verificando a

forma de onda da tensão e corrente em tempo real e realizando os cálculos de seus específicos indicadores quanto a QEE.

- Pode ser usado para cálculos de tarifação de energia elétrica, mostrando o consumo de energia instantâneo e acumulado diariamente ou mensalmente. Além disso, pode contabilizar tanto a venda quanto a compra de energia elétrica por fontes renováveis, fazendo cálculos perante à Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), que estabelece as tarifas do kWh de acordo com a bandeira, tensão aplicada e o uso do sistema de distribuição.
- Pode enviar alertas em tempo real por e-mail para os usuários da interface ou código implementado no MatLab, com assunto, mensagem especificada e anexos de resultados.

5.1 PROPOSTAS FUTURAS

Com o funcionamento adequado para medição de tensão e corrente da rede elétrica, é possível elaborar alguns trabalhos adicionais para incrementar o medidor de QEE digital. Assim, seguem algumas propostas futuras:

- Criar uma interface via módulo Bluetooth, a fim de analisar a QEE por smartphones, tablets, e demais dispositivos de menor porte;
- Realizar cálculos referentes à qualidade do serviço, tais como os indicadores de continuidade individual e coletivo dos consumidores de uma mesma rede de distribuição;
- Facilitar a amostragem dos fatores que compõe a QEE, podendo enviar automaticamente para a concessionária a condição da energia em determinado lugar, sem que o consumidor precise acionar o serviço por via telefônica, caso o problema seja na rede de distribuição.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO, João Luiz; MARTINS, Júlio S. Qualidade da Energia Elétrica. Revista O Eletricista, Portugal, ano 3, n.9, 3º trimestre, 2004.

ANEEL. Equipamentos para o sistema ANEEL de monitoração da qualidade da energia elétrica. 2008.

ANEEL. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional, módulo 8 - qualidade da energia elétrica. Resolução Normativa no 728/2016. Revisão 8, 2016.

BARBI, Ivo. Eletrônica de Potência. 6ª Ed. Florianópolis, 2006.

CALDEIRÃO, Luciana. Avaliação Experimental de medidores watt-hora operando em condições não-senoidais. Dissertação de mestrado, Engenharia Elétrica, UNESP, 2005.

CARVALHO, Flávio Gomes. Caracterização do conteúdo harmônico em ambientes residenciais: estudo de caso. Dissertação de Mestrado, Engenharia Elétrica. UFPB, João Pessoa, 2015.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. Electrical Power Systems Quality - McGraw-Hill, Second Edition, New York, 2002, page 1.

ENGINEERS GARAGE. PIC18F4550. Disponível em: <<http://www.engineersgarage.com/eletronic-components/pic18f4550-microcontroller>>. Acesso em 19 jun. 2015.

ESB. Manual do Usuário: Medidor eletrônico SAGA1000, 2005.

FABRI, Diego. Uma proposta de implementação de um analisador de harmônicos variantes no tempo. Dissertação de mestrado, Engenharia Elétrica, UFJF, 2011.

GONZALEZ, Manuel Losada; et al. Distorções harmônicas geradas por algumas cargas não lineares com tensões senoidais. Belo Horizonte, 2012.

HU INFINITO. Modulo Conversor USB 2.0 P/ RS232 TTL UART 6Pinos CP2102. Disponível em: < <http://www.huinfinito.com.br/modulos/951-modulo-conversor-usb-20-p-rs232-ttl-uart-6pinos-cp2102.html>>. Acesso em 29 jun. 2015.

IEEE Std 1159. Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. New York, 2009.

IEEE Std 406. Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications. New York, 1995.

IEEE Standard 519. "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", New York, 1992.

ISONI, Marcos. Distorções harmônicas: uma revisão de conceitos gerais. A moderna eficiência energética e seus possíveis efeitos sobre o desempenho operacional de equipamentos e instalações elétricas. São Paulo, 2005.

JOHNSON, David; et al. Fundamentos de análise de circuitos elétricos. 4ª Edição, Editora Prentice – Hall do Brasil LTDA. Rio de Janeiro, 1990

MARCHAND, Patrick; HOLLAND, O. Thomas. Graphics and GUIs with MATLAB. New York, 2003.

MATHWORKS. Fast Fourier Transform (FFT) Animation using Matlab. Disponível em <<http://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/53674-fast-fourier-transform--fft-animation-using-matlab>>. Acesso em 20 mai. 2017.

MICROCHIP. PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet, 2009.

NILSSON, James; RIEDEL, Susan. Circuitos Elétricos. 8ª Edição, Editora Prentice – Hall do Brasil LTDA. São Paulo, 2009.

OLIVEIRA, Benjamim et al. Aplicabilidade dos microcontroladores em inovações tecnológicas. VII CONNEPI. Palmas, 2012.

OPPENHEIM, Alan; et al. Sinais e Sistemas. 2ª Edição, Editora Pearson. São Paulo, 2010.

PAULINO, Gilson; TEIXEIRA, Mateus Duarte. Revista “O Setor Elétrico”. Qualidade de Energia, Cap. IV. Variações de tensão de longa duração. São Paulo, 2015.

POMILIO, J.A; DECKMANN, S.M. "Efeito Flicker produzido pela Modulação Harmônica". SBQEE'97 - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, Nov. 1997, São Lourenço, MG.

RODRIGUES, Augusto. Influência da distorção harmônica de desequilíbrios em medidores de energia elétrica ativa. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, 2009.

SANCHES, Thiago; et al. Análise de protocolos de medição de harmônicos em sistemas elétricos de potência. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Uberlândia, 2003.

SCHNEIDER ELECTRIC. Workshop – Instalações elétricas de baixa tensão: Qualidade de energia harmônica, 2003.

SEL. SEL-734 Portátil. Disponível em <http://www.selinc.com.br/Produtos/SEL-734_portatil.aspx>. Acesso em 1 jun. 2015.

TEIXEIRA, Douglas. Análise das distorções harmônicas: Estudo de caso de um sistema industrial. Dissertação de Mestrado, Engenharia Elétrica, UFMG, 2009.

ZHENG, Tongxin; et al. Evaluating power system unbalance in the presence of harmonic distortion. USA, 1993.

ANEXOS

- Código para implementação no MatLab

```
function [] = Analise_pelo_Matlab()
clc
clear all

s=serial('COM4');
s.InputBufferSize=10000;
fopen(s);
k=0;
sub=0;
sobre=0;

while true
    if (k<31)
        while true
            fwrite(s,1,'int8');
            pause(2);
            if s.BytesAvailable>=1998
                break;
            end
        end
        end

        %leitura dos dados

        medida=fread(s,1998);
        Medida=reshape(medida,2,999);
        tensao=1.3809*Medida(1,:);
        corrente=5*Medida(2,+)/255;

        %eliminação dos níveis DC's dos sinais de tensão e corrente

        Vmin=min(tensao);
        Vmax=max(tensao);

        c=Vmax-Vmin;
        Media1=c/2;

        V=(tensao-Media1)*1.3269; %ajuste tensão

        Imin=min(corrente);
        Imax=max(corrente);

        c2=Imax-Imin;
        Media2=c2/2;

        I=(corrente -1.5989)/3.5; %ajuste corrente

        %Valores RMS

        Vrms = sqrt(sum(V.*conj(V))/size(V,2))
        Irms = sqrt(sum(I.*conj(I))/size(I,2))
```

```

% Cálculo das Potências

Potencia=I.*V;
PotenciaMedia=mean(Potencia)*ones(1,999);
PotAtiva=max(PotenciaMedia)
PotenciaAparente=Vrms*Irms
FP=PotAtiva/PotenciaAparente

%definição dos eixos

maxV=max(V)+15;
maxI=max(I)+0.2;
minI=min(I)-0.2;
maxPot=max(Potencia)+2;
minPot=min(Potencia)-2;

%Plot das grandezas

figure(1)
subplot(3,1,1); plot(V); ylabel('Voltage (V)');
xlabel('Amostras'); axis([0 inf -maxV maxV]);
subplot(3,1,2); plot(I); ylabel('Current (A)');
xlabel('Amostras'); axis([0 inf minI maxI]);
subplot(3,1,3); plot(Potencia); ylabel('Power (W)');
xlabel('Amostras'); axis([0 inf minPot maxPot]);
hold on
subplot(3,1,3); plot(PotenciaMedia); axis([0 inf minPot
maxPot]);
hold off

% Subtensão e Sobretensão

Vbase=127;

aux=max(V)/Vbase;

if (aux>0.9 && aux<1.03)
    sub=0;
    sobre=0;
elseif (aux<=0.9)
    sub=sub+1;
elseif (aux>=1.03)
    sobre=sobre+1;
end

if (sub==30)
    fprintf('Subtensão');
    TensaoMaxima=max(V)
    sub=0;
elseif (sobre==30)
    fprintf('Sobretensão');
    TensaoMaxima=max(V)
    sobre=0;
end

% FFT da tensão

FFT=abs(fft(V));%Transformada de fourier do sinal

```

```

FFT1=FFT/max(FFT);
FFT1=FFT1(1:661);
f=(0:7.5:4950);

%Construindo o gráfico em barras das amplitudes das 11a
harmônicas

amplitude=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]; %criando um vetor de 12
posições
amplitude1=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];

freqharm=1;

for(i=1:12) %Percorre até a 11a harmônica
    amplitude(i)=abs(FFT(freqharm));
    freqharm=freqharm+8; %frequência da harmônica
end

harmax=max(amplitude); %recebe o valor da harmônica de maior
amplitude

%normalizando as amplitudes das 11a harmônicas

for(j=1:12) %Percorre os 12 valores de amplitudes das
harmônicas
    amplitude1(j)=amplitude(j)/harmax;
end

f3=(0:1:11);

% THD tensão

a=0;
for(p=3:12)
    a=(amplitude(p)*amplitude(p))+a;
end

THDv=((sqrt(a))/harmax)*100

% FFT da corrente

FFT2=abs(fft(I));%Transformada de fourier do sinal

FFT3=FFT2/max(FFT2);
FFT3=FFT3(1:661);
f2=(0:7.5:4950);

%Construindo o gráfico em barras das amplitudes das 11a
harmônicas

amplitude3=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]; %criando um vetor de 12
posições
amplitude4=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];

freqharm2=1;

for(i=1:12) %Percorre até a 11a harmônica
    amplitude3(i)=abs(FFT2(freqharm2));

```

```

        freqharm2=freqharm2+8; %frequência da harmônica
    end

    harmax2=max(amplitude3); %recebe o valor da harmônica de maior
amplitude

    %normalizando as amplitudes das 11a harmônicas

    for(j=1:12) %Percorre os 12 valores de amplitudes das
harmônicas
        amplitude4(j)=amplitude3(j)/harmax2;
    end

    f4=(0:1:11);

    % THD corrente

    b=0;
    for q=3:12
        b=(amplitude3(q)*amplitude3(q))+b;
    end

    THDi=((sqrt(b))/harmax2)*100;
    k=k+1;

    %Plot das FFTs e harmônicos

    figure(2)
    subplot(4,1,1); plot(f,FFT1); ylabel('FFT (V)');
xlabel('Frequência (Hz)'); axis([0 1000 0 inf]); grid;
    subplot(4,1,2); bar(f3, amplitudel); ylabel('Harmônicos (V)');
xlabel('Ordem Harmônica'); axis([-1 12 0 1]); grid;
    %subplot(4,2,2); bar(f3, amplitudel); ylabel('Harmônicos
(V)'); xlabel('Ordem Harmônica'); axis([-1 12 0 0.2]); grid;
    subplot(4,1,3); plot(f2,FFT3); ylabel('FFT (I)');
xlabel('Frequência (Hz)'); axis([0 1000 0 inf]); grid;
    subplot(4,1,4); bar(f4,amplitude4); ylabel('Harmônicos
(I)'); xlabel('Ordem Harmônica'); axis([-1 12 0 1]); grid;

    else
        k=0;
    end
end
end

```

- Código para implementação da interface gráfica

- Função Principal

```
function
[V,I,PotAtiva,Potencia,FFT1,FFT3,amplitude1,amplitude4,s,Irms,Vrms,FP,
THDv,THDi] = Analise_pelo_GUIDE

s=serial('COM4');
s.InputBufferSize=10000;
fopen(s);
k=0;
sub=0;
sobre=0;

while true
    fwrite(s,1,'int8');
    pause(2);
    if s.BytesAvailable>=1998
        break;
    end
end

%leitura dos dados

medida=fread(s,1998);
Medida=reshape(medida,2,999);
tensao=1.3809*Medida(1,:);
corrente=5*Medida(2,+)/255;

%eliminação dos níveis DC's dos sinais de tensão e corrente

Vmin=min(tensao);
Vmax=max(tensao);

c=Vmax-Vmin;
Media1=c/2;

V=(tensao-Media1)*1.3269;

Imin=min(corrente);
Imax=max(corrente);

c2=Imax-Imin;
Media2=c2/2;

I=(corrente -1.5989)/3.5; %Incandescente

% Cálculo da Potência instantanea e média

Potencia=I.*V;
PotenciaMedia=mean(Potencia)*ones(1,999);
PotAtiva=max(PotenciaMedia);
```

```

%% Valores RMS

Vrms = sqrt(sum(V.*conj(V))/size(V,2));
Irms = sqrt(sum(I.*conj(I))/size(I,2));

%% Potencia Aparente
PotenciaAparente=Vrms*Irms;

%% Fator de Potencia
FP=PotAtiva/PotenciaAparente;

%% Definição dos eixos

maxV=max(V)+15;
maxI=max(I)+0.2;
minI=min(I)-0.2;
maxPot=max(Potencia)+2;
minPot=min(Potencia)-2;

%% FFT da tensão

FFT=abs(fft(V));%Transformada de fourier do sinal

FFT1=FFT/max(FFT);
FFT1=FFT1(1:661);

%Construindo o gráfico em barras das amplitudes das 11a harmônicas

amplitude=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]; %criando um vetor de 12
posições
amplitude1=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];

freqharm=1;

for(i=1:12) %Percorre até a 11a harmônica
    amplitude(i)=abs(FFT(freqharm));
    freqharm=freqharm+8; %frequência da harmônica
end

harmax=max(amplitude); %recebe o valor da harmônica de maior
amplitude

%normalizando as amplitudes das 11a harmônicas

for(j=1:12) %Percorre os 12 valores de amplitudes das harmônicas
    amplitude1(j)=amplitude(j)/harmax;
end

f3=(0:1:11);

% THD tensão

```

```

a=0;
for (p=3:12)
    a=(amplitude(p)*amplitude(p))+a;
end

THDv=((sqrt(a))/harmax)*100;

% FFT da corrente

FFT2=abs(fft(I));%Transformada de fourier do sinal

FFT3=FFT2/max(FFT2);
FFT3=FFT3(1:661);
f2=(0:7.5:4950);

%Construindo o gráfico em barras das amplitudes das 11a harmônicas

amplitude3=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]; %criando um vetor de 12
posições
amplitude4=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];

freqharm2=1;

for (i=1:12) %Percorre até a 11a harmônica
    amplitude3(i)=abs(FFT2(freqharm2));
    freqharm2=freqharm2+8; %frequência da harmônica
end

harmax2=max(amplitude3); %recebe o valor da harmônica de maior
amplitude

%normalizando as amplitudes das 11a harmônicas

for (j=1:12) %Percorre os 12 valores de amplitudes das harmônicas
    amplitude4(j)=amplitude3(j)/harmax2;
end

% THD corrente

b=0;
for (q=3:12)
    b=(amplitude3(q)*amplitude3(q))+b;
end

THDi=((sqrt(b))/harmax2)*100;
k=k+1;

end

```

- Função da interface

```

function varargout = MEDIDOR(varargin)

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;

```

```

gui_State = struct('gui_Name',      mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @MEDIDOR_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @MEDIDOR_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before MEDIDOR is made visible.
function MEDIDOR_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to MEDIDOR (see VARARGIN)

% Choose default command line output for MEDIDOR
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes MEDIDOR wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = MEDIDOR_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

while true

delete(instrfindall);

%% Chamada da funcao principal

```

```
[V,I,PotAtiva,Potencia,FFT1,~,amplitudel,~,~,Irms,Vrms,FP,THDv,~] =
Analise_pelo_GUIDE;
```

```
%% Tensao da rede
tensao=V;
axes(handles.Voltage)
plot(tensao);
set(handles.Voltage, 'xgrid', 'on', 'ygrid', 'on', 'Xlim', [0 1000],
'Ylim', [-200 200]);
grid
```

```
%% Corrente da rede
corrente=I;
correntemax = max(corrente);
correntemin = min(corrente);
axes(handles.corrente)
plot(corrente);
set(handles.corrente, 'xgrid', 'on', 'ygrid', 'on', 'Xlim', [0 1000],
'Ylim', [(correntemin-0.2) (correntemax+0.2)]);
grid
```

```
%% Potencia Instantanea
potencia=Potencia;
potmax = max(potencia);
potmin = min(potencia);
axes(handles.potencia)
plot(potencia);
hold
plot(PotAtiva,'r');
hold off
set(handles.potencia, 'xgrid', 'on', 'ygrid', 'on', 'Xlim', [0 1000],
'Ylim', [(potmin-10) (potmax+10)]);
grid
```

```
%% Corrente Irms
vrms=Vrms;
set(handles.vrms, 'String',vrms);
```

```
%% Corrente Irms
irms=Irms;
set(handles.irms, 'String',irms);
```

```
%% FFT da tensao
f=(0:7.5:4950);
FFTv=FFT1;
axes(handles.fft)
plot(f,FFTv);
set(handles.fft, 'xgrid', 'on', 'ygrid', 'on', 'Xlim', [0 700],
'Ylim', [0 inf]);
grid
```

```
%% Grafico barras harmonicos de tensao
f3=(0:1:11);
harmonico_tensao=amplitudel;
axes(handles.harm)
bar(f3,harmonico_tensao);
```

```

axis([-1 12 0 1]);
grid

%% Potencia Ativa
Pativa=PotAtiva;
set(handles.potativa, 'String', Pativa);

%% Fator de potencia
set(handles.fp, 'String', FP);

%% Fator de potencia
set(handles.dht, 'String', THDv);

end

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

while true

delete(instrfindall);

%% Chamada da funcao principal
[V,I,PotAtiva,Potencia,~,FFT3,~,amplitude4,~,Irms,Vrms,FP,~,THDi] =
Analise_pelo_GUIDE;

%% Tensao da rede
tensao=V;
axes(handles.Voltage)
plot(tensao);
set(handles.Voltage, 'xgrid', 'on', 'ygrid', 'on', 'Xlim', [0 1000],
'Ylim', [-200 200]);
grid

%% Corrente da rede
corrente=I;
correntemax = max(corrente);
correntemin = min(corrente);
axes(handles.corrente)
plot(corrente);
set(handles.corrente, 'xgrid', 'on', 'ygrid', 'on', 'Xlim', [0 1000],
'Ylim', [(correntemin-0.2) (correntemax+0.2)]);
grid

%% Potencia Instantanea
potencia=Potencia;
potmax = max(potencia);
potmin = min(potencia);
axes(handles.potencia)
plot(potencia);
hold on
axes(handles.potencia)
plot(PotAtiva);
hold off

```

```
set(handles.potencia, 'xgrid', 'on', 'ygrid', 'on', 'Xlim', [0 1000],  
'Ylim', [(potmin-10) (potmax+10)]);  
grid  
  
%% Corrente Irms  
vrms=Vrms;  
set(handles.vrms, 'String',vrms);  
  
%% Corrente Irms  
irms=Irms;  
set(handles.irms, 'String',irms);  
  
%% FFT da corrente  
f=(0:7.5:4950);  
FFTi=FFT3;  
axes(handles.fft)  
plot(f,FFTi);  
set(handles.fft, 'xgrid', 'on', 'ygrid', 'on', 'Xlim', [0 700],  
'Ylim', [0 inf]);  
grid  
  
%% Grafico barras harmonicos de corrente  
f3=(0:1:11);  
harmonico_corrente=amplitude4;  
axes(handles.harm)  
bar(f3,harmonico_corrente); axis([-1 12 0 1]);  
grid  
  
%% Potencia Ativa  
Pativa=PotAtiva;  
set(handles.potativa, 'String',Pativa);  
  
%% Fator de potencia  
set(handles.fp, 'String',FP);  
  
%% Fator de potencia  
set(handles.dht, 'String',THDi);  
  
end
```