

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

AISLAN GALDINO DOS SANTOS

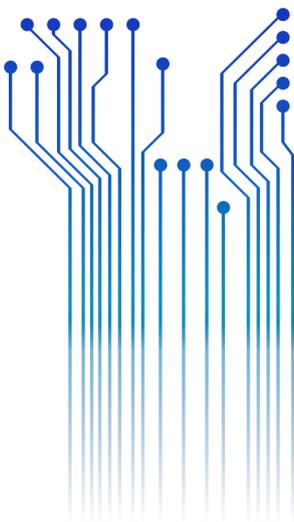


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
PROJETO DE UM ANALISADOR DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA
MONOFÁSICO DE BAIXO CUSTO



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2017

AISLAN GALDINO DOS SANTOS

PROJETO DE UM ANALISADOR DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA
MONOFÁSICO DE BAIXO CUSTO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Professor Célio Anésio da Silva, D.Sc.
Orientador

Campina Grande
2017

AISLAN GALDINO DOS SANTOS

PROJETO DE UM ANALISADOR DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA
MONOFÁSICO DE BAIXO CUSTO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Jalberth Fernandes de Araújo
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador, UFCG

Professor Célio Anésio da Silva, D.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho a minha mãe, Graciedja, que torceu por mim a cada dia, e foi meu maior exemplo de dedicação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Graciedja, por se esforçar tanto para me proporcionar uma boa educação, por ser um exemplo de dedicação e resiliência e por me incentivar a perseverar em todas as dificuldades. Ao meu pai, Ailton, pelo exemplo de caráter e por me proporcionar a realização desse sonho. As minhas irmãs Aisla e Arísia por estarem sempre na torcida e acreditando em mim mesmo quando nem mesmo eu acreditava. Agradeço também a minha namorada Wítalla, que me acompanhou diariamente nessa fase, sempre me aconselhando e repetindo que vai dar tudo certo.

Agradeço também a toda minha família, que com todo carinho e apoio, não mediu esforços para eu chegar a esta etapa da minha vida.

Agradeço ao Professor Célio Anésio pela oportunidade de estagiar no LSP e pelas orientações prestadas não só durante o estágio, mas também durante o trabalho de conclusão de curso e ao longo da graduação.

Agradeço aos meus colegas de graduação que com certeza sem o apoio deles não conseguiria ter chegado até aqui.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

*“É preciso força,
pra sonhar
e perceber
que a estrada vai
além do que se vê.”*

Marcelo Camelo.

RESUMO

A busca por reduções de custos eleva a cada dia as exigências sobre a quantidade e mais ainda sobre a qualidade daquilo que é consumido. Em especial na avaliação da energia elétrica, seus parâmetros de qualidade além de serem exigências legais são pontos determinantes na economia de energia, que no mercado competitivo que se instaura pode ser um parâmetro decisivo. Sendo assim um dispositivo de análise da qualidade da energia elétrica é tão importante, sendo uma ferramenta crucial para o profissional responsável em corrigir e/ou projetar um sistema imune a essas condições desfavoráveis. O objetivo geral desse trabalho é idealizar e construir um analisador da qualidade da energia de baixo custo microprocessado, utilizando componentes de fácil acesso. O protótipo desenvolvido permitiu a aquisição da tensão, corrente, potências, harmônicos dentre outros parâmetros que são utilizados para a análise da qualidade da energia elétrica. Em geral os erros foram baixos, justificando sua aplicação em sistemas didáticos ou na investigação inicial de pequenas cargas.

Palavras-chave: Qualidade de energia elétrica, Qualímetro, Harmônicos, Baixa tensão.

ABSTRACT

The quest for cost reductions increases the demands on quantity each day and more on the quality of what is consumed. In particular in the evaluation of electric energy, its quality parameters besides being legal requirements are decisive points in energy saving, which in the competitive market that is established can be a decisive parameter. Thus, a device for the analysis of the quality of electrical energy is so important, being a crucial tool for the professional responsible for correcting and/or designing a system immune to these unfavorable conditions. The general objective of this work is to idealize and construct a microprocessed low cost energy quality analyzer using easily accessible components. The developed prototype allowed the acquisition of voltage, current, power, harmonics among other parameters that are used to analyze the quality of electric energy. In general the errors were low, justifying their application in didactic systems or in the initial investigation of small loads.

Keywords: Power quality, Power meter, Harmonics, Low voltage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Potência instantânea com defasagem entre tensão e corrente.	7
Figura 2 - Triângulo de potências.	8
Figura 3 - Analisador da qualidade da energia Fluke 435 II.	13
Figura 4 - Analisador da qualidade da energia Nexus 1500+.	13
Figura 5 - Analisadores da qualidade da energia a) Fluke VR1750 e b) Fluke VR1710.	13
Figura 6 - Esquemático do projeto utilizando o Proteus 8.	16
Figura 7 - Arduino Uno.	17
Figura 8 - Cartão micro SD e adaptador SD.	18
Figura 9 - Sensor de corrente SCT013 000.	19
Figura 10 - Circuito condicionador para corrente.	19
Figura 11 - Circuito condicionador para tensão.	20
Figura 12 - Circuito condicionador para frequência.	21
Figura 13 - Circuito montado na <i>protoboard</i>	22
Figura 14 - <i>Shield Ethernet</i>	22
Figura 15 - Protótipo montado em uma placa de circuito impresso (a).	23
Figura 16 - Arranjo dos testes com sinais simulados.	26
Figura 17 - Leitura osciloscópio teste 1.	26
Figura 18 - Leitura protótipo teste 1.	27
Figura 19 - Leitura osciloscópio teste 2.	27
Figura 20 - Leitura protótipo teste 2.	27
Figura 21 - Leitura osciloscópio teste 3.	28
Figura 22 - Leitura protótipo teste 3.	28
Figura 23 - Leitura osciloscópio teste 4.	28
Figura 24 - Leitura protótipo teste 4.	29
Figura 25 - Arranjo do teste comparativo com o Nexus 1500+.	30
Figura 26 - Medição no QDG.	31
Figura 27 - Tensões de fase medidas pelo Nexus 1500+.	31
Figura 28 - Correntes de linha medidas pelo Nexus 1500+.	32
Figura 29 - Tensão e corrente RMS medidas pelo protótipo.	32
Figura 30 - Frequência medida pelo Nexus 1500+.	33
Figura 31 - Frequência medida pelo protótipo.	33
Figura 32 - Potências aparentes medidas pelo Nexus 1500+.	34
Figura 33 - Potências ativas medidas pelo Nexus 1500+.	34
Figura 34 - Potências reativas medidas pelo Nexus 1500+.	34
Figura 35 - Potência aparente, ativa, reativa e fator de potência medido pelo protótipo.	35
Figura 36 - Medição das potências e fator de potência em eletrodomésticos diversos.	36
Figura 37 - Medição das harmônicas de um liquidificador com sua chave na posição 1.	36
Figura 38 - Medição das harmônicas de um liquidificador com sua chave na posição 2.	37
Figura 39 - Medição das potências e do fator de potências de um chuveiro elétrico em seus dois ajustes de temperatura.	37
Figura 40 - Tensão e corrente RMS de um chuveiro elétrico, em seus dois ajustes de temperatura.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros ajustados para os testes.....	26
Tabela 2 - Resultados do teste 1.....	29
Tabela 3 - Resultados do teste 2.....	29
Tabela 4 - Resultados do teste 3.....	29
Tabela 5 - Resultados do teste 4.....	30
Tabela 6 - Resultados do teste do quadro de distribuição no LSP.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CIGRÉ	<i>Concil on Large Electric Systems</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LSP	Laboratório de Sistemas de Potência
MMC	<i>Multi Media Card</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SD	<i>Secure Disk</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Organização do Trabalho.....	3
2	Fundamentação Teórica.....	4
2.1	Qualidade da Energia Elétrica.....	4
2.2	Grandezas Físicas Utilizadas	6
2.2.1	Valores Eficazes	6
2.2.2	Potência Instantânea	6
2.2.3	Potência Ativa	7
2.2.4	Potência Reativa	8
2.2.5	Potência Aparente.....	8
2.2.6	Harmônicas.....	9
2.3	Distúrbios Associados à Qualidade de Energia.....	9
2.3.1	Sobretensões	10
2.3.2	Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD).....	10
2.3.3	Flutuações de Tensão.....	10
2.3.4	Transitórios.....	11
2.3.5	Desequilíbrios	11
2.3.6	Fator de Potência	11
2.3.7	Distorções da Forma de Onda.....	11
2.3.8	Variações da Frequência.....	12
2.4	Qualímetro	12
3	Projeto do Equipamento	15
3.1	Recursos Utilizados	16
3.1.1	Arduino.....	16
3.1.2	Dataloggers.....	17
3.2	Circuitos Condicionadores.....	18
3.2.1	Medição de Corrente	19
3.2.2	Medição de Tensão.....	20
3.2.3	Medição de Frequência.....	21
3.3	Montagem.....	21
3.4	Análise dos Dados.....	23
4	Discursão Experimental.....	25
4.1	Teste com Sinais Simulados	25
4.2	Teste com Cargas Reais	30
4.3	Teste em Aparelhos Eletrodomésticos	35

4.4	Avaliação dos Resultados	38
5	Conclusão	40
	Referências	41
	APÊNDICE A – Código Arduino	43
	APÊNDICE B – Rotina Matlab.....	47

1 INTRODUÇÃO

A escassez de recursos energéticos, além da busca por reduções de custos eleva a cada dia as exigências sobre a quantidade e mais ainda sobre qualidade daquilo que consumimos. Em especial na avaliação da energia elétrica, seus parâmetros de qualidade além de serem exigências legais são pontos determinantes na economia de energia, que no mercado competitivo que se instaura pode ser um parâmetro decisivo.

Os fabricantes de equipamentos elétricos, tanto residenciais como industriais, tentam a cada dia apresentar melhores produtos que agreguem mais funções, com menor volume e com um menor consumo de energia. Isso vem ocorrendo devido a evolução dos dispositivos microprocessados e da eletrônica de potência que permitem o controle mais preciso e eficiente da eletricidade e dos diversos processos aplicados. Porém, o emprego dessas tecnologias está correlacionado a componentes como diodos, transistores, triacs dentre outros. Esses componentes em geral apresentam comportamentos não lineares, gerando diversas harmônicas na rede além da fundamental, o que aumenta as perdas e compromete a qualidade da energia do sistema elétrico.

1.1 MOTIVAÇÃO

Alterações da qualidade de energia afetam os consumidores de energia elétrica de diversas formas, sendo os consumidores de porte industrial os mais afetados, pois uma falta de energia durante poucos segundos, obriga a fábrica a reiniciar todo o processo, causando grandes prejuízos financeiros e perda de parte da produção.

Por isso, um dispositivo de análise da qualidade da energia é tão importante, sendo uma ferramenta crucial para o profissional responsável em corrigir e/ou projetar um sistema imune a essas condições desfavoráveis. É importante ressaltar que o problema de qualidade da energia elétrica é resolvido por análise e não por uma simples medição. Os dados obtidos pelo analisador de qualidade da energia são somados a diversos outros dados como relatórios da concessionária de energia e pode levar em conta até relatórios meteorológicos que apresentam a quantidade de descargas atmosféricas ou a presença de ventos fortes na região. Por fim cabe ao profissional a tomada da melhor decisão para resolver esse problema.

Estabelecida a importância da utilização do qualímetro, deve-se alertar que o custo de aquisição de um equipamento é alto, principalmente para os modelos com mais recursos e que tem certificação para serem utilizados para medição de grandes potências. Em alguns casos esse custo alto inviabiliza o estudo da qualidade de energia, como em instalações de pequena demanda energética. Constituindo assim mais um motivo para o projeto de sistema de baixo custo.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho de conclusão de curso é construir um sistema de baixo custo que faça a leitura de parâmetros relacionados à qualidade da energia elétrica. Em seguida deve realizar o armazenamento das medições para que venha ser feita uma análise posterior levando em conta os parâmetros da qualidade de energia.

O equipamento deverá ser aplicado a rede elétrica monofásica, com tensões de até 230 VRMS, em cargas de até 15 kVA. O mesmo é constituído de duas partes, uma composta por um aparelho que será instalado em uma rede monofásica de baixa tensão, que irá monitorar a tensão e a corrente e então após realizar alguns cálculos armazenará os dados em um cartão do tipo SD (*Secure Disk*). A segunda parte é constituída por um *software* que funcionará em outro equipamento como um computador pessoal que possui maior poder computacional, para que ele então possa ler esses dados e por meio de rotinas realizam cálculos mais complexos, e enfim apresente os dados e resultados para o usuário.

As funções propostas que o sistema irá realizar são as seguintes:

- Medição de tensão instantânea e RMS (*Root Mean Square*);
- Medição de corrente instantânea e RMS;
- Medição de defasagem entre os sinais de tensão e corrente;
- Medição de potência ativa, reativa e aparente;
- Medição de Frequência e período;
- Medição de fator de potência e sugestão da aplicação de banco de capacitores para normalizar a valores aceitáveis;
- Representação em Série de Fourier, Cálculo da THD (*Total Harmonic Distortion*) e algumas componentes da série de Fourier;
- *Datalogger* armazenar todos esses dados em um cartão de memória SD (*Secure Digital*).

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho será dividido em cinco capítulos. O primeiro é a parte introdutória, apresentando a justificativa e a importância do estudo e pesquisa sobre esse tema. No segundo capítulo é apresentada uma breve fundamentação teórica a cerca dos assuntos explanados no trabalho, podendo citar os conceitos básicos de tensão e corrente eficazes, os diferentes tipos de potências além de uma introdução sobre harmônicos e distorção harmônica. São apresentadas algumas informações sobre qualidade de energia, os principais distúrbios referentes a qualidade da energia elétrica, quais as normas aplicadas e os parâmetros avaliados. No quarto capítulo são mostrados os arranjos utilizados para realização dos testes além de alguns comentários sobre os resultados. O quinto capítulo é dedicado para as considerações finais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo serão abordados alguns assuntos referentes à qualidade da energia elétrica, desde sua definição até os métodos que são utilizados para que possa ser realizado esse estudo. Também são apresentadas as grandezas físicas necessárias para o bom entendimento do conteúdo, e por fim, apresentando também alguns exemplos comerciais de aparelhos para avaliação da qualidade da energia elétrica.

2.1 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

A qualidade da energia elétrica está relacionada a qualquer problema da tensão, corrente ou frequência que resulta em uma falha ou má operação nos equipamentos dos consumidores. O termo qualidade da energia elétrica (QEE) ou *Power Quality* como também é conhecido, que foi popularizado no setor elétrico nos últimos anos, tem sido utilizado amplamente para expressar as mais variadas características da energia elétrica entregue pelas concessionárias de energia (DECKMANN; POMÍLIO, 2016). É sabido que a transmissão de um sinal senoidal perfeito sem qualquer distorção associada a ele é irrealizável, sempre existe alguma flutuação de tensão, frequência ou até mesmo a adição de harmônicas. Na prática essas características indesejadas do sinal são aceitáveis e esperadas, porém com seus valores limitados segundo os procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST), que são documentos elaborados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (PRODIST, 2017).

Os elementos mais utilizados nesse trabalho são encontrados especificamente no Módulo 8 referente à qualidade de energia, que exige valores limites de funcionamento para não comprometer a estabilidade do sistema. Os documentos definem que uma energia de qualidade tem todas essas exigências atendidas, no entanto a qualidade de energia não está apenas relacionada aos valores limites das normas devendo também levar em conta as exigências dos aparelhos que serão atendidos pelo alimentador.

Alguns dos itens que compõem os aspectos avaliados na qualidade de energia são:

- i. Tensão em regime permanente;
- ii. Fator de potência;
- iii. Harmônicos;
- iv. Desequilíbrio de tensão entre fases;
- v. Flutuação de tensão;
- vi. Variação de frequência.

A atenção que a QEE vem recebendo é em termos ligado à remodelação que o setor elétrico vem vivenciando, para poder instalar um mercado consumidor, no qual o produto é a própria energia elétrica (DECKMANN; POMÍLIO, 2016). O consumidor então pode escolher a energia que apresenta os parâmetros de qualidade desejados ao custo mais baixo possível. Sendo assim, as operadoras de sistemas elétricos são encorajadas, pelo mercado e pelas agências reguladoras, a informar sobre os detalhes referentes a qualidade de energia que afetam de alguma forma os consumidores. Sendo essa uma das justificativas para o monitoramento e análise da qualidade da energia elétrica.

O estudo sobre a qualidade da energia não está associado apenas a uma medição. É uma completa investigação que leva em conta diversos fatores, sendo necessário um conhecimento ou estudo específico sobre cada fator. Conhecer os problemas associados a qualidade da energia é uma das principais tarefas de um profissional, por isso um diagnóstico correto só é alcançado quando se domina as causas os efeitos e as soluções usuais. A interpretação dos dados recolhidos também exige conhecimento sobre as técnicas de medição e sobre os equipamentos utilizados. O conhecimento sobre as condições locais é de suma importância para construir hipóteses que levam às causas do problema (DECKMANN; POMÍLIO, 2016).

Pesquisadores do mundo inteiro têm discutido a fim de se chegar a um consenso com relação às normas de âmbito nacional. Os órgãos que suportam a maior parte da documentação normativa, como o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) nos Estados Unidos e, *International Electrotechnical Commission* (IEC) e *Concil on Large Electric Systems* (CIGRÉ) na Europa, estavam à frente dessas discussões. Em longo prazo as ideias convergirão, porém enquanto isso, o que se instaura são normas nacionais ou recomendações internacionais (DECKMANN; POMÍLIO, 2016).

Aqui no Brasil a ANEEL elaborou uma série de documentos relacionados a normas de distribuição elétrica, o PRODIST. “Para a qualidade do fornecimento de energia elétrica, este módulo estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos

de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades” (PRODIST-Módulo 8, 2017).

Para a qualidade do produto, este módulo define a terminologia e os indicadores, caracteriza os fenômenos, estabelecem os limites ou valores de referência, a metodologia de medição, a gestão das reclamações relativas à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão e os estudos específicos de qualidade da energia elétrica para fins de acesso aos sistemas de distribuição. (PRODIST-Módulo 8, 2017).

2.2 GRANDEZAS FÍSICAS UTILIZADAS

2.2.1 VALORES EFICAZES

Um valor eficaz ou RMS (*Root Mean Square*) é uma característica que pode ser extraída de um sinal de tensão ou corrente senoidal. O valor eficaz de uma função periódica é definido como a raiz quadrada do valor médio da função ao quadrado (NILSSON & RIEDEL, 2009).

Para uma função cossenoidal $v = V_m \cos(\omega t + \phi)$, seu valor RMS é dado por:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V_m^2 \cos^2(\omega t + \phi) dt}. \quad (1)$$

2.2.2 POTÊNCIA INSTANTÂNEA

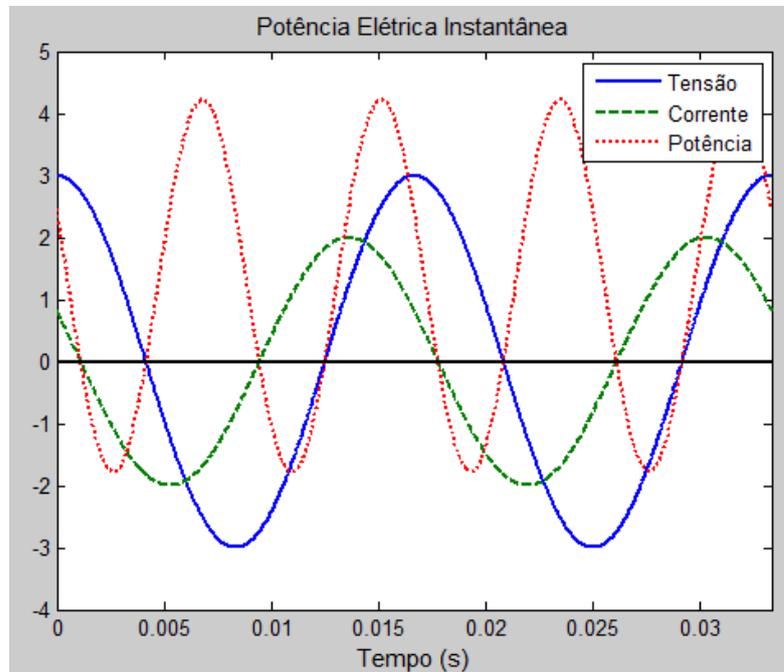
Potência instantânea, em um regime permanente senoidal pode ser definida como o produto entre tensão e corrente a cada instante no tempo (NILSSON & RIEDEL, 2009). Isto é,

$$p(t) = v(t) \cdot i(t). \quad (2)$$

Quando não existe defasagem entre a tensão e a corrente, a potência elétrica resultante tem somente valores positivos. Porém, quando existe uma defasagem entre os sinais de tensão e corrente parte da energia realiza trabalho e a outra parte fica circulando pelo circuito sem realizar nenhum trabalho. Na Figura 1 pode ser notado esse fenômeno em que a potência

instantânea, com a linha pontilhada, tem majoritariamente valores positivos, porém uma parte desse sinal assume valores negativos.

Figura 1 - Potência instantânea com defasagem entre tensão e corrente.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Sendo $v(t) = V_m \cos(\omega t)$ e $i(t) = I_m \cos(\omega t + \phi)$ a potência instantânea pode ser escrita como $p(t) = v(t) \cdot i(t)$, ou ainda:

$$p(t) = \frac{V_m I_m}{2} \cos(\phi) + \frac{V_m I_m}{2} \cos(2\omega t + \phi). \quad (3)$$

Na equação 3 é possível notar que a potência instantânea possui dois termos: um constante que representa a potência ativa e outro que é dado em função do tempo.

2.2.3 POTÊNCIA ATIVA

Também conhecida como potência média é a potência que efetivamente executa trabalho, sua unidade é o W (Watt). Ela é a média da potencia instantânea no decorrer de um período, como apresentado na equação abaixo.

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{T+t_0} p(t) dt. \quad (4)$$

2.2.4 POTÊNCIA REATIVA

Para essa potência não existe a transformação da energia elétrica em nenhum outro tipo de energia, sua unidade é o var (Volt-ampère reativo). Essa potência é referente às relações intercambiais de energia entre capacitores e indutores no sistema. Tendo sua equação representada a seguir:

$$Q = \frac{V_m I_m}{2} \text{sen}(\varnothing). \quad (5)$$

2.2.5 POTÊNCIA APARENTE

É a potencia total que circula nos condutores, sua unidade é o VA (Volt-ampère). Ela pode ser calculada pelo produto da tensão RMS com a corrente RMS, O módulo da potência aparente pode então ser calculado pela relação abaixo:

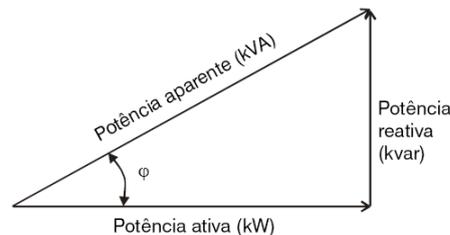
$$|S| = V_{rms} I_{rms}. \quad (6)$$

No domínio fasorial, podemos representar a potência aparente como uma potência do tipo complexa em que a parte real representa a potência ativa e a parte imaginaria é a potência reativa como mostrado abaixo.

$$S = P + jQ. \quad (7)$$

A partir disso pode ser montado um triângulo de potências que por meio de relações trigonométricas, como o teorema de Pitágoras, facilitam os cálculos das relações entre as potências. Como pode ser visualizado na figura a seguir.

Figura 2 - Triângulo de potências.



Fonte: Ebah.

2.2.6 HARMÔNICAS

De acordo com o teorema de Fourier todo sinal periódico não senoidal pode ser representado por uma expressão composta por uma soma de senóides, cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental (harmônicas), levando em conta também uma eventual componente contínua. Como mostrado a seguir, a_o representa a componente contínua seguida pelo somatório das funções senoidais, com os coeficientes da série representados por a_m e b_m sendo m o índice das componentes da série e L o período:

$$f(x) = \frac{a_o}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} \left(a_m \cos \frac{m\pi x}{L} + b_m \sin \frac{m\pi x}{L} \right). \quad (8)$$

A expressão acima mostra a representação contínua, porém o que é utilizado em praticamente todos os casos é a representação discreta do sinal. Por conseguinte, em posse do sinal na forma discreta o meio mais usual de fazer essas decomposições é por meio da FFT (*Fast Fourier Transform*), que é um algoritmo eficiente para calcular a transformada discreta de Fourier e sua inversa. Ela é de grande valia para todos os sistemas de processamento digital de sinais. Com a transformada feita é possível indicar uma grande faixa de harmônicos presentes no sinal, e a partir dessas informações realizar diversos estudos.

A presença de harmônicas é sinônimo de uma onda de tensão ou corrente deformada. A deformação da onda por sua vez, sendo ela de tensão ou corrente, significa que a distribuição da energia elétrica está perturbada e que a qualidade da energia foi comprometida (SCHNEIDER ELECTRIC, 2003).

As correntes harmônicas são geradas por cargas não lineares conectadas a rede. A passagem das correntes harmônicas geram tensões harmônicas sobre as impedâncias da rede, como resultado disso ocorre deformação também da tensão de alimentação. (SCHNEIDER ELECTRIC, 2003).

2.3 DISTÚRBIOS ASSOCIADOS À QUALIDADE DE ENERGIA

O PRODIST avalia alguns parâmetros gerais sobre a qualidade de energia. Podendo ser classificados em fenômenos em regime permanente ou transitórios. Para regime permanente é avaliado tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos,

desequilíbrios de tensão, flutuações de tensão e variações de frequência. Enquanto que para o regime transitório são avaliadas as variações de tensão de curta duração (VTCD).

Alguns problemas bem conhecidos na literatura que podem a vir deixar em desconformidade alguns dos pontos avaliados pelos PRODIST, estes serão apresentados a baixo.

2.3.1 SOBRETENSÕES

A sobretensão é definida como toda tensão maior que o valor da tensão nominal em certo ponto do sistema elétrico. Podendo produzir fortes solicitações nos isolamentos, podendo danificar equipamentos e até mesmo interromper o fornecimento de energia.

2.3.2 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO (VTCD)

As variações de tensão de curta duração podem ser caracterizadas por alterações instantâneas, momentâneas ou temporárias. Elas são as principais causas de paradas de processos industriais ou comerciais.

As mais severas são as interrupções de energia, em que a tensão é nula ou inferior que 0,10 pu (devido a tensão residual nos motores) e podem ter como causas o clima, mau funcionamento de equipamento, operação de religamento ou interrupção no sistema de transmissão.

2.3.3 FLUTUAÇÕES DE TENSÃO

A flutuação de tensão é uma mudança aleatória, que pode ser repetitiva ou esporádica da tensão. Essa variação tem pequena amplitude, geralmente com valores na faixa de 90% a 110% da tensão nominal, e com a frequência da instabilidade ficando abaixo de 25 Hz (ROCHA, 2016).

A existência dessas oscilações no sistema elétrico tem como consequência, oscilações na potência e no torque das máquinas elétricas, redução do rendimento dos equipamentos elétricos, mau funcionamento nos sistemas de proteção, e o efeito *flicker* ou cintilação luminosa.

2.3.4 TRANSITÓRIOS

Os transitórios são perturbações de curta duração, da ordem de milissegundos porém, eles têm um valor alto na amplitude. Aparecem dos efeitos das descargas atmosféricas (transitórios impulsivos) ou também podem se originar devido o chaveamento de grandes cargas ou cargas muito reativas (transitórios oscilatórios).

Os transitórios impulsivos se originam das descargas atmosféricas e das descargas eletrostáticas. Um transitório é dito oscilatório na ocorrência de uma mudança na condição de regime permanente da tensão e/ou corrente oscilando na frequência natural do sistema. Eles ocorrem devido a energização de linhas, supressão de faltas, chaveamento de bancos de capacitores e transformadores (ROCHA, 2016).

2.3.5 DESEQUILÍBRIOS

Os sistemas trifásicos são compostos por senóides, de mesma magnitude e defasamento de 120 graus entre fases. Porém, no sistema de distribuição e nas instalações de baixa tensão as tensões e fases podem estar desequilibradas por diversos motivos (GUERRA, 2016). A natureza do desequilíbrio pode incluir desigualdade na magnitude das tensões e desvios nos ângulos de fase.

2.3.6 FATOR DE POTÊNCIA

É definido como a relação entre a potência aparente e a potência ativa. Indicando quanto de potência ativa está sendo fornecida à carga. O fator de potência apenas será calculado pelo o cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente no caso em que tanto a tensão como a corrente forem senóides apenas com a frequência fundamental, ou seja, não tenham componentes harmônicas (ROCHA, 2016).

2.3.7 DISTORÇÕES DA FORMA DE ONDA

A distorção da forma de onda é definida como um desvio, em regime permanente, da forma de onda puramente senoidal, na frequência fundamental, e é caracterizada principalmente pelo seu conteúdo espectral (SCHNEIDER ELECTRIC, 2003).

2.3.8 VARIAÇÕES DA FREQUÊNCIA

O sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. (PRODIST, 2017).

A frequência deve ser a igual em todo o Sistema Interligado Nacional (SIN), já que ela está diretamente ligada com a velocidade de rotação dos geradores de energia síncronos. Para garantir que ela se mantenha constante é preciso que exista um controle centralizado garantindo o equilíbrio entre geração e consumo de energia.

2.4 QUALÍMETRO

Um analisador de qualidade de energia ou qualímetro é um instrumento completo para registro e análise da qualidade da energia elétrica podendo realizar também funções de oscilografia. Com base nos dados armazenados pelo analisador o profissional pode fazer qualquer análise cabível, os dados armazenados variam de acordo com o fabricante e o modelo, mas em geral os analisadores de qualidade de energia apresentam informações da tensão, corrente, potência ativa, reativa e aparente e fator de potência ao longo do tempo, podendo apresentar valores instantâneos ou RMS. Além disso, o qualímetro pode apresentar certo número de componentes da representação em série de Fourier ou apenas a THD (*Total Harmonic Distortion*).

Serão apresentados alguns modelos comerciais de qualímetros abaixo. Os dois primeiros modelos são aparelhos de alto desempenho, com diversos recursos que vão além apenas das medições como: uma tela para apresentação das leituras, comunicações USB, ethernet, acionamento se relés, e leitura de sinais digitais e sistemas auxiliares de fornecimento de energia. Enquanto que os dois últimos são equipamentos simplificados, apenas realizam as medições para que possam ser analisadas posteriormente.

Figura 3 - Analisador da qualidade da energia Fluke 435 II.



Fonte: Fluke.

Figura 4 - Analisador da qualidade da energia Nexus 1500+.



Fonte: Electro Industries/Gauge Tech.

Tanto o Fluke 435 II como o Nexus 1500+ são aparelhos de alta precisão com diversos certificados de qualidade além de variados recursos como, tela *touch screen*, grande quantidade de meios de comunicação, *software* para avaliação dos dados além dos diversos parâmetros medidos com grande confiabilidade.

Figura 5 - Analisadores da qualidade da energia a) Fluke VR1750 e b) Fluke VR1710.



Fonte: Fluke.

O Fluke VR1750 e o Fluke 1710 podem ser utilizados como analisadores da qualidade da energia, desde que seus recursos um pouco limitados sejam suficientes para as aplicações desejadas. O Fluke VR1750 se encaixa na categoria registrador ou *data logger*, pois sua principal função é armazenar medições para uma análise futura. Suas entradas podem ser configuradas para medir diversos parâmetros como tensão, corrente e até mesmo temperatura ou luminosidade, desde que sejam feitos os devidos ajustes. O fluke 1710 é um dos modelos mais simples medindo apenas tensão e armazenando os dados para um estudo posterior.

3 PROJETO DO EQUIPAMENTO

Nesse capítulo é apresentada a proposição inicial do que será feito e os meios utilizados para chegar ao equipamento proposto, que é constituído de duas partes, uma composta por um aparelho que será instalado em uma rede monofásica de baixa tensão, que irá monitorar o sistema e então após realizar alguns cálculos enviará os dados para um sistema de *software* com maior poder computacional, para que ele possa realizar os cálculos mais complexos, e enfim apresentar os dados e resultados para o usuário.

As funções propostas que o sistema irá realizar são as seguintes:

- Medição de tensão instantânea, RMS, afundamento de tensão, aumentos de tensão temporários e interrupção de fornecimento;
- Medição de corrente instantânea, RMS e sobrecarga;
- Medição de potência ativa, reativa e aparente;
- Medição de Frequência;
- Medição de fator de potência, com sugestão da aplicação de banco de capacitores para normalizar a valores aceitáveis;
- Representação em série de Fourier, cálculo da THD, e algumas componentes da série de Fourier;
- *Datalogger* para armazenar todos esses dados em um cartão de memória SD.

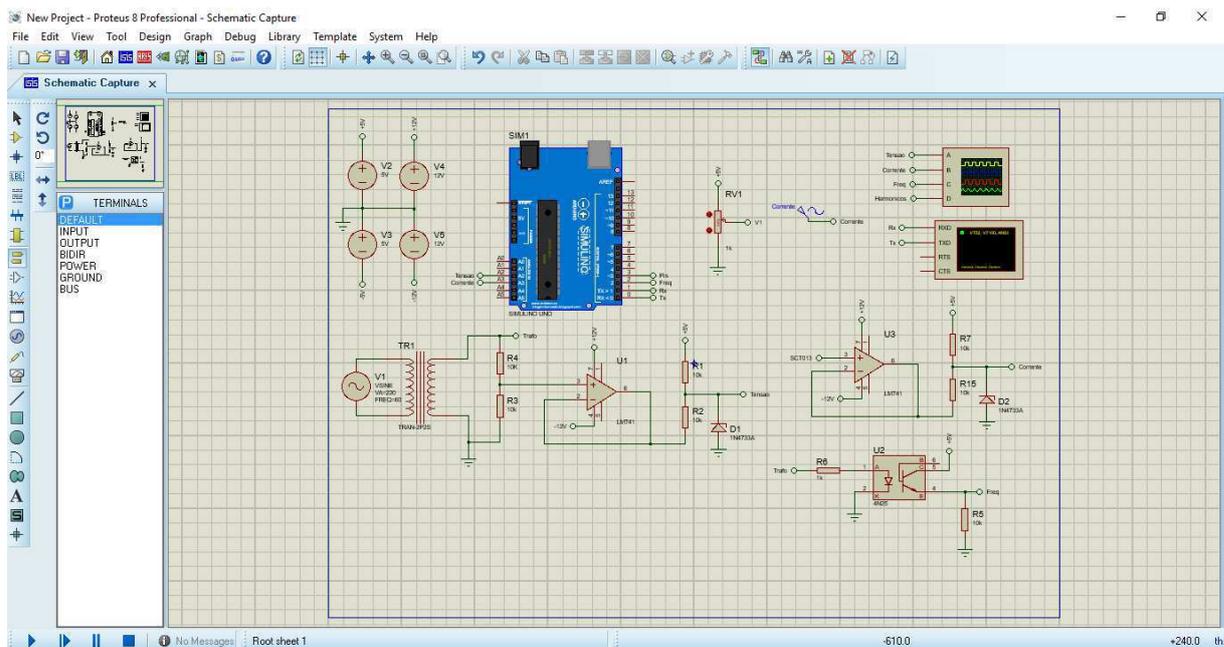
A proposta do equipamento tem como meta ter o menor custo possível, utilizando componentes encontrados facilmente no mercado, facilitando assim a reposição em caso de algum eventual defeito. Mesmo que não seja possível alcançar todas as exigências de qualidade feitas pelo PRODIST ou outras normas, o projeto alcançará seus objetivos, caso apresente uma boa aproximação do valor real. O equipamento pretende viabilizar a medição de pequenas cargas que antes não seriam avaliadas, além de ser um ótimo recurso didático como ferramenta de aprendizagem para os alunos do curso de graduação em engenharia elétrica, cursos de nível superior afins ou do ensino técnico.

3.1 RECURSOS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento do projeto foram utilizados diversos equipamentos, componentes eletrônicos e sensores que foram escolhidos segundo as diretrizes do projeto. Eles serão apresentados adiante, justificando a escolha de aquisição de cada um.

Inicialmente, para a simulação do circuito eletrônico em conjunto com o a placa de prototipagem foi utilizado o *software* Proteus 8, que oferece diversos dispositivos para a simulação além de ser possível também a construção de placas para circuito impresso. Essa etapa foi muito importante para a construção do projeto visto que, erros e ajustes de componentes constantes tomam muito mais tempo quando um circuito físico é montado. A ilustração a seguir mostra o ambiente de desenvolvimento do *software*.

Figura 6 - Esquemático do projeto utilizando o Proteus 8.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.1 ARDUINO

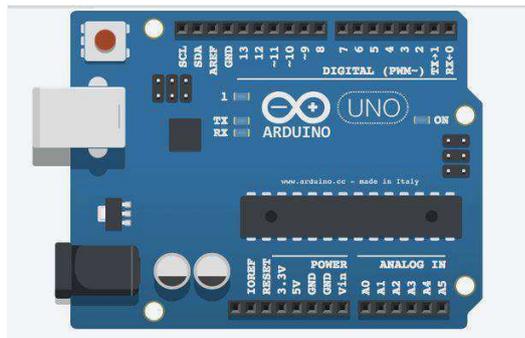
Microcontroladores são pequenos computadores em um único circuito integrado, eles em geral têm um núcleo processador, memória e periféricos programáveis de entrada e saída, que podem ser saídas e entradas digitais ou analógicas e terminais para comunicação. Eles são utilizados em tecnologias embarcadas por serem de pequeno porte, ao contrário dos computadores pessoais bem mais difundidos pela sociedade em geral.

O Arduino é uma plataforma de prototipagem criada na Itália em meados de 2005, com base na filosofia de *software e hardware* livre. O projeto iniciou-se na cidade de Ivrea, com o intuito de interagir em projetos escolares de forma a ter um orçamento menor que outros sistemas de prototipagem disponíveis naquela época. O sistema utiliza um microcontrolador Atmel AVR com suporte de entrada/saída embutido, uma linguagem de programação padrão que é essencialmente C/C++ (MATSUKI, 2012).

A placa Arduino pode ser montada pelo próprio usuário, porém os idealizadores do projeto tem posse de um serviço de venda do produto pré-montado, o que gera receita para o projeto continuar crescendo.

Existem vários modelos da placa de prototipagem, a escolhida para esse trabalho foi a Uno, por ser uma das placas de entrada além de possuir o microcontrolador (Atmega328P) da placa na forma discreta (*through-hole*), facilitando uma possível mudança da placa de prototipagem para uma placa de circuito definitiva. Outra vantagem em escolher esse tipo de recurso é a enorme comunidade de *makers* formada em torno do projeto, existem diversos fóruns e materiais para estudo, além de várias bibliotecas disponíveis para *download* que facilitam a construção inicial do projeto. A seguir uma imagem do modelo de placa Arduino utilizada.

Figura 7 - Arduino Uno.



Fonte: Pixabay.com.

3.1.2 DATALOGGERS

Um *datalogger* nada mais é do que um registrador, que recebe dados que são obtidos de qualquer forma, e armazena eles em uma memória do tipo não volátil para que seja feita uma análise posterior. *Dataloggers* são aplicados em diversos sistemas, são utilizados em centrais meteorológicas, em diversas criações de animais e principalmente no ambiente industrial.

Cartões *Secure Digital* (SD) são pequenos cartões de memória não voláteis desenvolvidos pela *SD Association* que são usados principalmente em dispositivos eletrônicos portáteis como celulares, câmeras e GPS (do inglês *global positioning system*), para fornecer ou aumentar o armazenamento desses dispositivos.

Os cartões de memória SD são uma evolução da tecnologia *Multi Media Card* (MMC). Adicionam capacidades de criptografia e gestão de direitos digitais (daí o *Secure*), para atender às exigências da indústria da música e uma trava para impedir alterações ou a exclusão do conteúdo do cartão.

Existem muitas versões, mas a mais conhecida, sem dúvida é o micro-SD, o cartão de memória que funciona na maioria dos celulares. Tornou-se o padrão de cartão de memória com melhor custo/benefício do mercado. A seguir o modelo de cartão utilizado.

Figura 8 - Cartão micro SD e adaptador SD.



Fonte: Techtudo.com.

3.2 CIRCUITOS CONDICIONADORES

O Arduino Uno possui um conversor analógico digital que trabalha em uma faixa que vai de 0 a 5 V, e na aplicação em questão realiza uma aquisição a cada 200 μ s. Porém o sinal de tensão medido tem valores muito mais altos que a faixa permitida, e o sinal de corrente deve primeiramente ser convertido para um sinal de tensão. Por isso se faz necessário à utilização de circuitos que possam fazer essas adequações do sinal, para a correta leitura do Arduino.

O sistema de monitoramento é constituído por uma placa onde foram instalados componentes necessários para o condicionamento do sinal e sensores, que mandam as informações para o Arduino.

3.2.1 MEDIÇÃO DE CORRENTE

Para medição de corrente é utilizado o sensor SCT-013-000, que é um transformador de corrente com núcleo partido. Esse sensor mede corrente alternada (AC), podendo medir até 100 A RMS de forma linear. Ele tem uma relação de espira com um valor aproximado de 2000:1, sendo protegido contra circuito aberto devido a utilização de diodos zener internos. Essa proteção é importante, pois é uma causa recorrente de queima em transformadores. A seguir uma imagem do sensor utilizado.

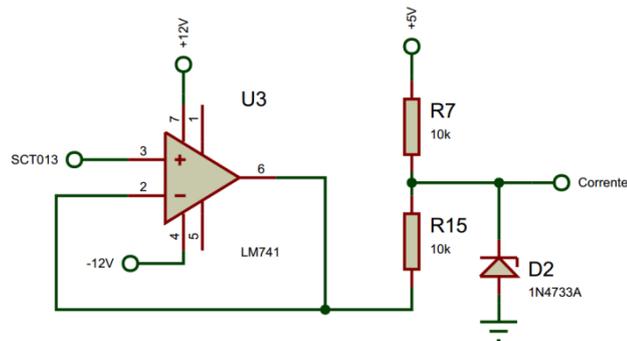
Figura 9 - Sensor de corrente SCT013 000.



Fonte: felipeflop.com.

Para conversão em tensão é utilizado um resistor *shunt*, que são calculados com base nos valores esperados de leitura de corrente e frequência. Além do resistor de *shunt* é utilizado uma topologia para ajustar o sinal em uma faixa de 0 a 5 V a qual está apresentada a seguir.

Figura 10 - Circuito condicionador para corrente.



Fonte: Elaborada pelo autor.

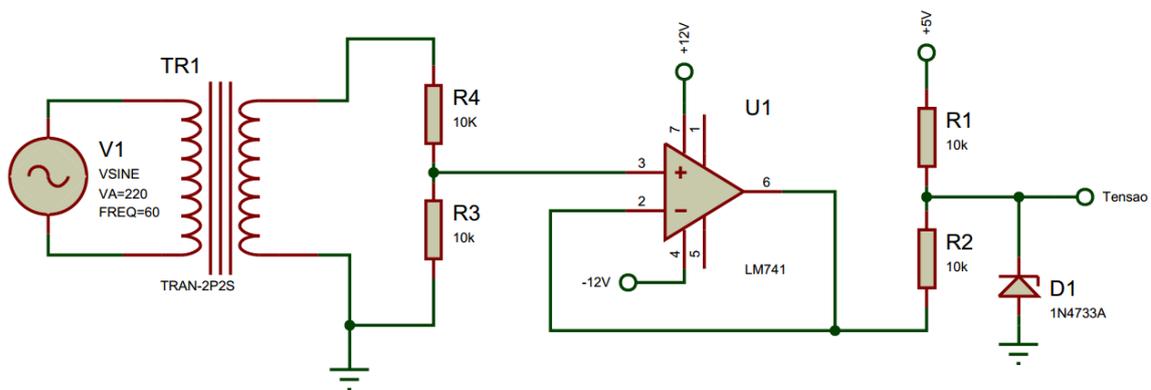
O LM741 funciona com a topologia de *buffer*, isolando o transformador de corrente do resto do circuito. Em seguida o sinal entra em um arranjo que adiciona um nível DC ao sinal para que assim ele não assuma valores negativos que danificam o conversor analógico digital do Arduino Uno. Por fim é colocado um 1N4733A que é um diodo zener que limita a tensão de saída a 5,1 V protegendo o Arduino de qualquer nível de tensão que possa danificá-lo.

Para medir com maior precisão, são utilizados quatro resistores *shunt* que servem como um ajuste de escala para o SCT013-000, cada valor de resistor é associado a uma corrente máxima medida, sendo assim é preciso informar ao *software* de análise qual o resistor utilizado, as escalas vão até 5,15, 60 e 100 A. O sensor só pode ser utilizado em fios de até 25 mm², devido suas limitações físicas.

3.2.2 MEDIÇÃO DE TENSÃO

Na realização da medição de tensão é utilizado primeiramente um transformador de pequena potência, que além de isolar o sistema da rede eletricamente também é utilizado como fonte de alimentação para o restante do circuito. O transformador tem uma relação de transformação de 220:10, e corrente nominal de 1 A. Após a primeira etapa de redução na tensão com o transformador o sinal passa por um divisor de tensão, que reduz o sinal a metade sem deslocamento de fase, em seguida é utilizada a mesma topologia presente no sensor de corrente para adequar o sinal a entrada do conversor AD (*Analog to Digital*) do Arduino. O esquemático do condicionador de sinal para a tensão é mostrado abaixo.

Figura 11 - Circuito condicionador para tensão.

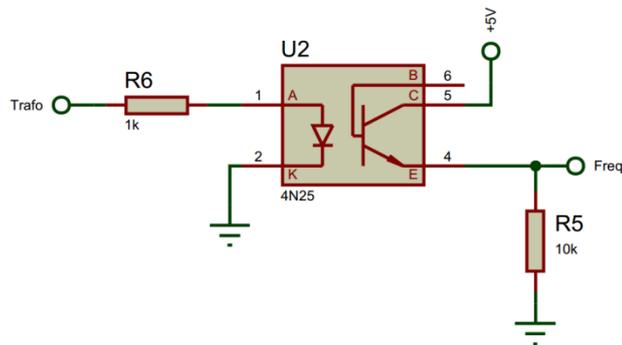


Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.3 MEDIÇÃO DE FREQUÊNCIA

O circuito de medição de frequência nada mais é do que um indicador de tensão, ou seja, sempre que o sinal tiver seu valor acima de aproximadamente 0,7 V sua saída tem nível lógico alto, indicando a presença de um pulso positivo. O Arduino então recebe um pulso de tensão a cada ciclo, sendo que a diferença de tempo entre os pulsos é corresponde ao período do sinal, e o inverso do período corresponde à frequência. A seguir uma imagem da montagem do circuito responsável pela medição da frequência.

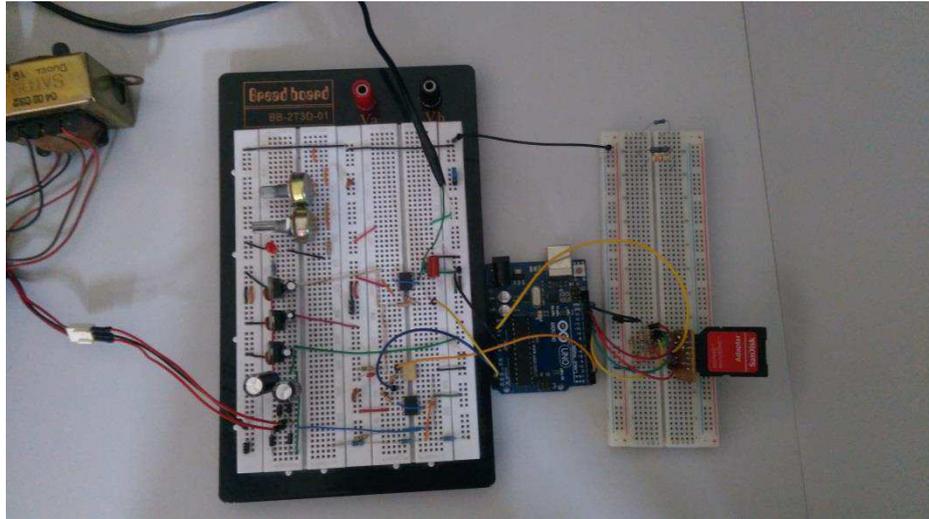
Figura 12 - Circuito condicionador para frequência.



Fonte: Elaborada pelo autor.

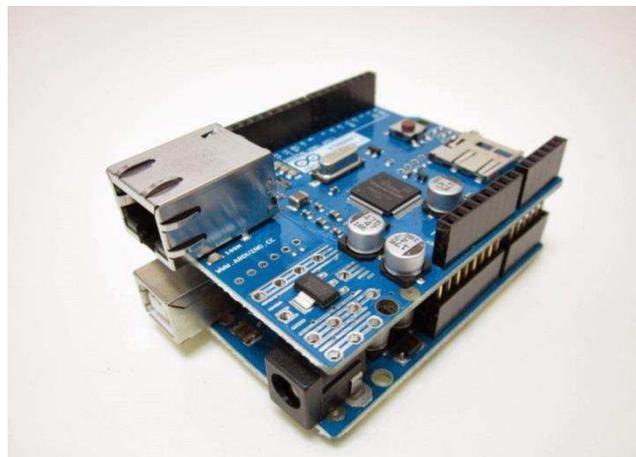
3.3 MONTAGEM

Após o projeto inicial utilizando o simulador Proteus 8 ter sido concluído, o circuito foi montado em uma *proto-board* ou placa de prototipagem. A partir disto foram realizados diversos testes, correções de erros, troca de componentes e melhorias no equipamento até o circuito apresentar padrões aceitáveis de comportamento. A seguir é apresentada uma foto tirada do circuito montado na *proto-board*.

Figura 13 - Circuito montado na *protoboard*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

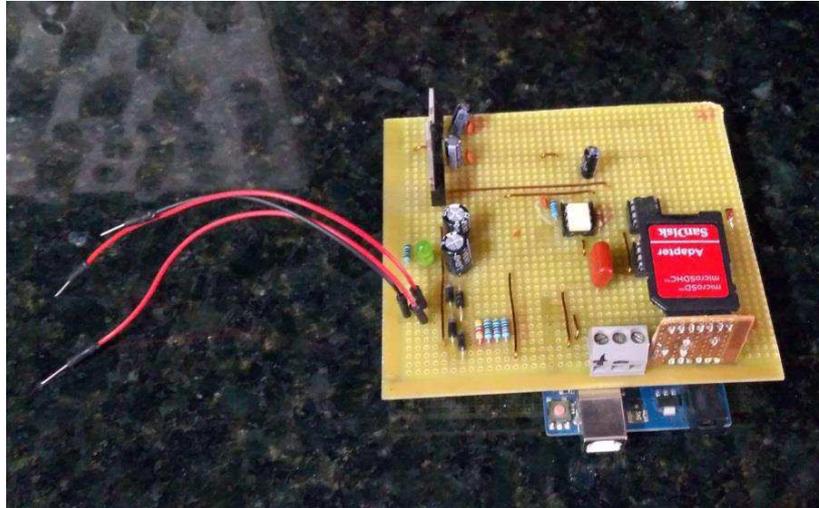
Depois de finalizada a etapa de testes do circuito, o projeto foi montado em uma placa de circuito impresso universal para evitar problemas de mau contato entre componentes, reduzir o espaço utilizado e com isso obter um ganho em robustez no equipamento. Além disso, a placa seguiu a tendência de *shields* para Arduino, que são placas de expansão que se encaixam aos módulos do Arduino a fim de fornecer um meio rápido de agregar funções às placas de prototipagem. Existem diversos modelos de *shields* entre eles pode-se citar *shields ethernet*, *wifi*, relê, RFID (do inglês *Radio Frequency Identification*) dentre outros. A seguir é apresentado um exemplo de um *shield ethernet* conectado a um Arduino Uno, facilmente encontrado no mercado.

Figura 14 - *Shield Ethernet*.

Fonte: <http://facacomarduino.info>.

A imagem a seguir corresponde ao circuito do protótipo montado na placa de circuito impresso universal conectada ao Arduino Uno.

Figura 15 - Protótipo montado em uma placa de circuito impresso (a).



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4 ANÁLISE DOS DADOS

Como o microcontrolador utilizado pelo Arduino Uno não tem um poder de processamento alto, principalmente para realizar a análise espectral, foi decidido apenas colher os dados medidos utilizando o Arduino, e então salvar esses dados em um cartão SD para realizar toda a parte de cálculo assim como apresentação dos resultados no Matlab.

O *software* Matlab foi escolhido por ser utilizado largamente em diversas áreas da engenharia além de atender todos os recursos necessários para este projeto. O MATLAB (*MATrix LABORatory*) é um *software* de alto desempenho indicado para o cálculo numérico. Com ele pode ser feita análise numérica, cálculo matricial, processamento de sinais e construção de gráficos. O ambiente é de fácil utilização, em que os problemas e soluções podem ser apresentados somente como eles são escritos matematicamente, ao contrário da programação tradicional.

Foi então desenvolvida uma rotina que está no apêndice A deste trabalho. A rotina carrega o dados armazenados no cartão SD em formato .txt, e transforma em um matriz. Em seguida são identificados os grupos de informação presentes nos dados como o valor do período, o número de amostras, os valores referentes a tensão e os referentes a corrente. Após a identificação dos dados contidos no cartão SD, o sinais de tensão e corrente passam por

ajustes para converter os números em base binária gerados pelo conversor AD do Arduino, para valores de tensão e corrente. É necessário também levar em conta fatores como as relações de transformação dos transformadores de tensão e corrente e dos circuitos condicionadores. Além disso, é necessário retirar o nível DC inserido inicialmente no circuito condicionador. Após esses ajustes os sinais de tensão e corrente estão prontos para serem utilizados para os cálculos dos diversos parâmetros referentes a qualidade de energia. Então são calculados os valores RMS, as potências e todos os outros parâmetros já citados.

Estando em posse dos valores calculados é necessário apresentá-los para o usuário de forma útil, sendo assim, uma série de telas informam diferentes características, sendo possível visualizar estas características ao longo do tempo mostrando várias amostras, podendo escolher apenas uma amostra em específico para uma análise mais detalhada ou ainda para os parâmetros que utilizam a transformada de Fourier, os resultados ao longo da frequência. Cada tela será apresentada com mais detalhes no capítulo seguinte.

4 DISCURSÃO EXPERIMENTAL

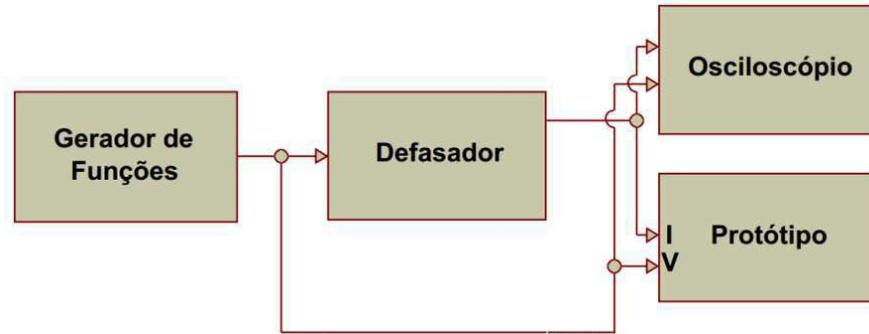
Nesse capítulo é apresentado como cada teste será realizado, desde o arranjo utilizado até a discursão dos resultados medidos. Serão realizados dois testes que abrangem diversos fatores necessários na avaliação do sistema. Cada teste tem uma montagem diferente que avaliará pontos distintos e comuns entre os ensaios. Após os dois testes utilizados para validação do protótipo, serão apresentadas algumas medições feitas em aparelhos domésticos com o objetivo de aumentar ainda mais a exposição do aparelho a diferentes situações.

4.1 TESTE COM SINAIS SIMULADOS

Nesse teste o sinal lido pelo equipamento é fornecido por um gerador de funções 33210A da Agilent juntamente com um circuito defasador. Esse teste não utiliza o sensor de corrente nem utiliza o arranjo para medir a tensão. O objetivo deste teste é ter um grande controle sobre os parâmetros do sinal de entrada, como frequência, amplitude e fase e assim poder testar o equipamento funcionando nas mais diversas situações. Para averiguar a veracidade dos resultados apresentados pelo equipamento é instalado um osciloscópio DSO1014A da Agilent. Então os resultados apresentados pelo equipamento proposto no trabalho serão comparados com os apresentados pelo osciloscópio.

O gerador de funções será ajustado para quatro condições distintas, que serão apresentadas na Tabela 1 e nas Tabelas 2, 3, 4 e 5 os resultados dos experimentos. O protótipo do qualímetro precisa de um sinal de tensão e um de corrente, porém o gerador de função só tem uma saída de sinal. Então para emular dois sinais que por ventura estão fora de fase é inserido um defasador. O arranjo então fica da seguinte forma: o sinal que sai do gerador de funções vai direto para entrada correspondente a leitura de tensão do equipamento e o sinal que sai do defasador será então ligado a entrada corresponde a leitura da corrente, por fim será instalado o osciloscópio em paralelo com o equipamento. O diagrama em blocos abaixo ilustra essa ligação.

Figura 16 - Diagram dos testes com sinais simulados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O diagrama apresentado na Figura 16 é ajustado com os valores presentes na Tabela 1, somando um total de 4 testes. Após ajustar o arranjo de acordo com os seguintes testes, eles foram medidos com o osciloscópio e com o protótipo do qualímetro.

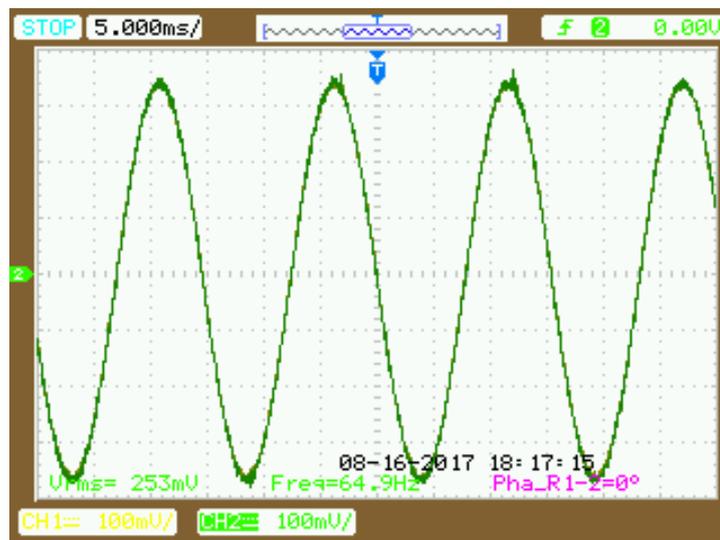
Tabela 1 - Parâmetros ajustados para os testes.

Parâmetros	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Tensão RMS (V)	0,25	0,5	1	1,5
Corrente RMS (A)	0,25	0,5	1	1,5
Frequência (Hz)	65	60	60	55
Fase (°)	0	30	0	30

Fonte: Elaborada pelo autor.

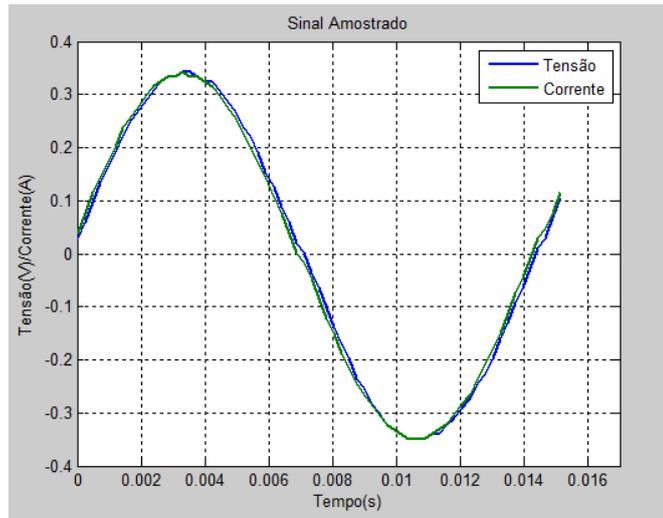
A seguir serão apresentados os sinais no tempo referente aos testes utilizando os sinais simulados.

Figura 17 - Leitura osciloscópio teste 1.



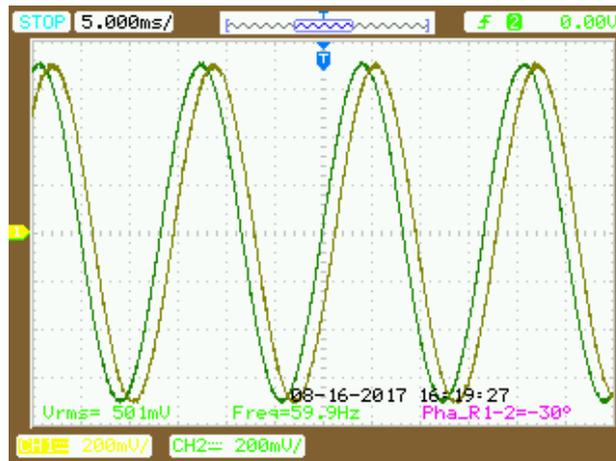
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18 - Leitura protótipo teste 1.



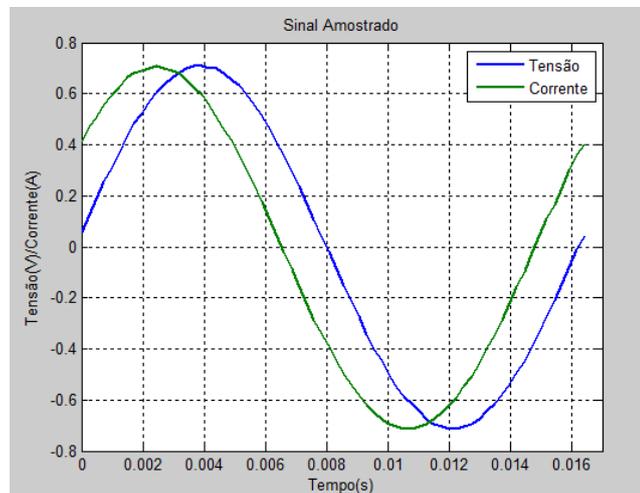
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 19 - Leitura osciloscópio teste 2.



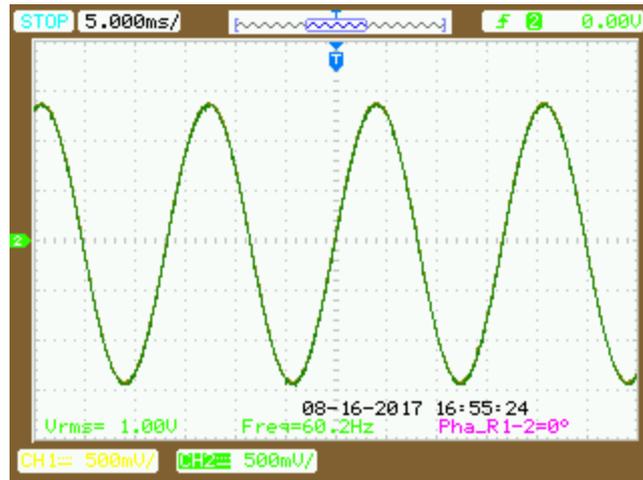
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 20 - Leitura protótipo teste 2.



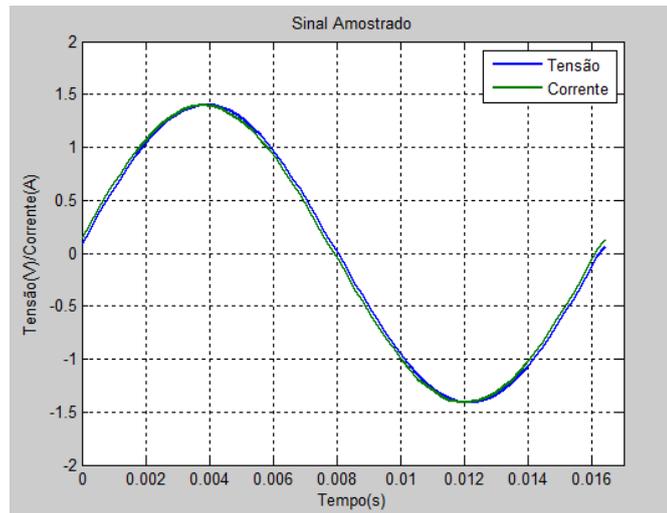
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 21 - Leitura osciloscópio teste 3.



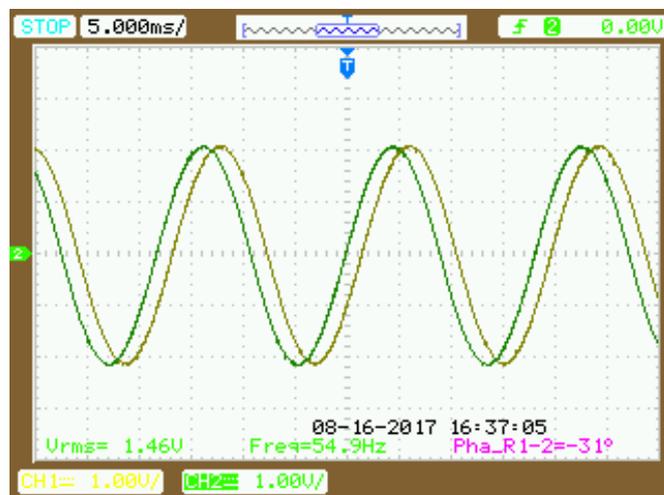
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 22 - Leitura protótipo teste 3.



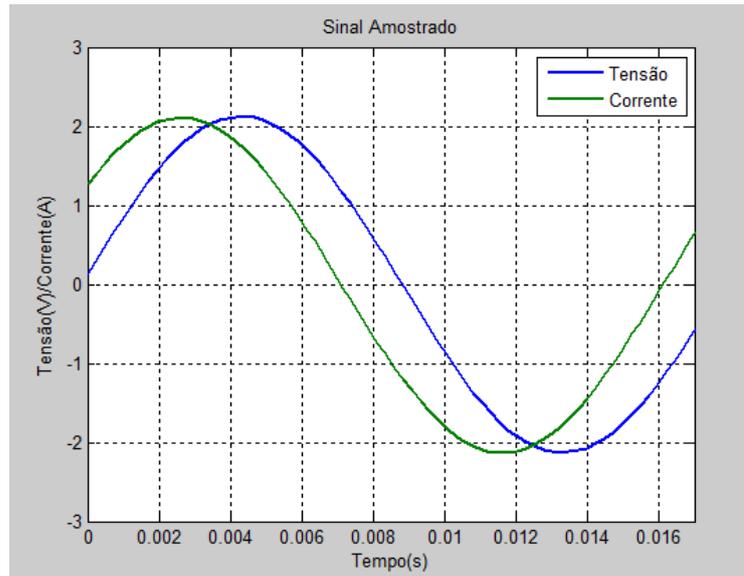
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 23 - Leitura osciloscópio teste 4.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24 - Leitura protótipo teste 4.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados do osciloscópio e do qualímetro proposto, juntamente com o erro entre eles, estão apresentados nas tabelas seguintes.

Tabela 2 - Resultados do teste 1.

Teste 1	Medição osciloscópio	Medição protótipo	Erro
Tensão RMS (V)	0,25	0,2374	5,04%
Corrente RMS (A)	0,25	0,2370	5,2%
Frequência (Hz)	64,9	65,0338	0,2061%
Fase (°)	0	2,9851	2,9851°

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 3 - Resultados do teste 2.

Teste 2	Medição osciloscópio	Medição protótipo	Erro
Tensão RMS (V)	0,5	0,4986	0,28%
Corrente RMS (A)	0,5	0,4982	0,36%
Frequência (Hz)	59,9	60,0306	0,218%
Fase (°)	30	31,8069	1,8069°

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 4 - Resultados do teste 3.

Teste 3	Medição osciloscópio	Medição protótipo	Erro
Tensão RMS (V)	1	0,9859	1,41%
Corrente RMS (A)	1	0,9841	1,59%
Frequência (Hz)	60,2	60,0297	0,2828%
Fase (°)	0	2,4903	2,4903°

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5 - Resultados do teste 4.

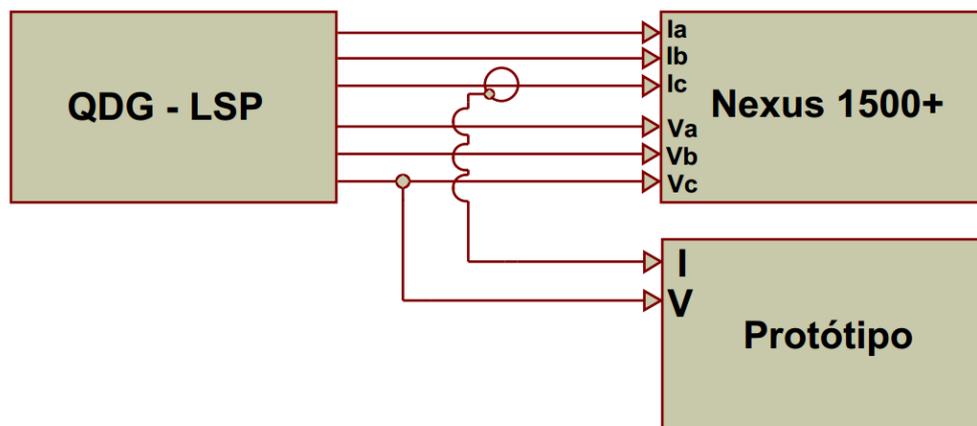
Teste 4	Medição osciloscópio	Medição protótipo	Erro
Tensão RMS (V)	1,46	1,4989	2,6643%
Corrente RMS (A)	1,46	1,4981	2,6095%
Frequência (Hz)	54,9	55,0240	0,2258%
Fase (°)	31	33,8567	2,8567°

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 TESTE COM CARGAS REAIS

O segundo teste utiliza cargas reais que terão sua tensão e corrente medidas pelos sensores já apresentados. A comparação será feita entre o sistema proposto no trabalho e o Nexus 1500+ que é um analisador de qualidade de energia de alto desempenho. Será analisado o comportamento do Laboratório de Sistemas de Potência (LSP), por cerca de duas horas. Após isso os dois sistemas terão seus resultados comparados. A seguir é apresentado um diagrama de blocos do arranjo utilizado.

Figura 25 - Arranjo do teste comparativo com o Nexus 1500+.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A medição foi feita no quadro de distribuição geral (QDG) do prédio do LSP, o Nexus 1500+ fez as medições nas três fases enquanto que o protótipo fez apenas em uma fase. A foto da montagem é apresentada a seguir.

Figura 26 - Medição no QDG.

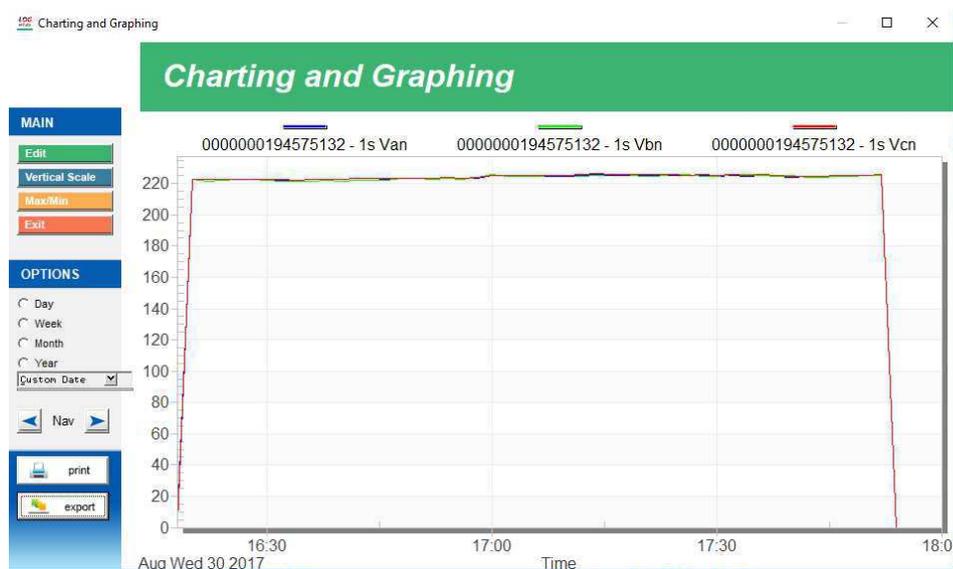


Fonte: Elaborada pelo autor.

Após o período de medição os dados armazenados tanto no Nexus 1500+ como no protótipo foram carregados em seus respectivos *softwares* de análise. Apresentação de seus resultados na forma gráfica e por valores médios serão encontradas a seguir.

Iniciando com a tensão RMS de fase, abaixo é encontrado o gráfico com as três tensões medidas pelo Nexus 1500+.

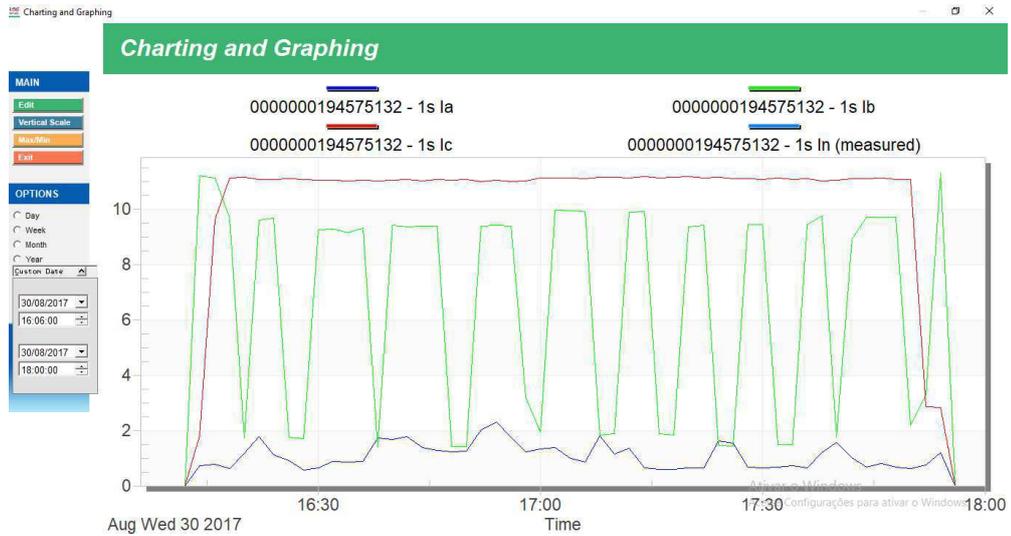
Figura 27 - Tensões de fase medidas pelo Nexus 1500+.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em relação a corrente RMS, abaixo é encontrado o gráfico com as três correntes medidas pelo Nexus 1500+.

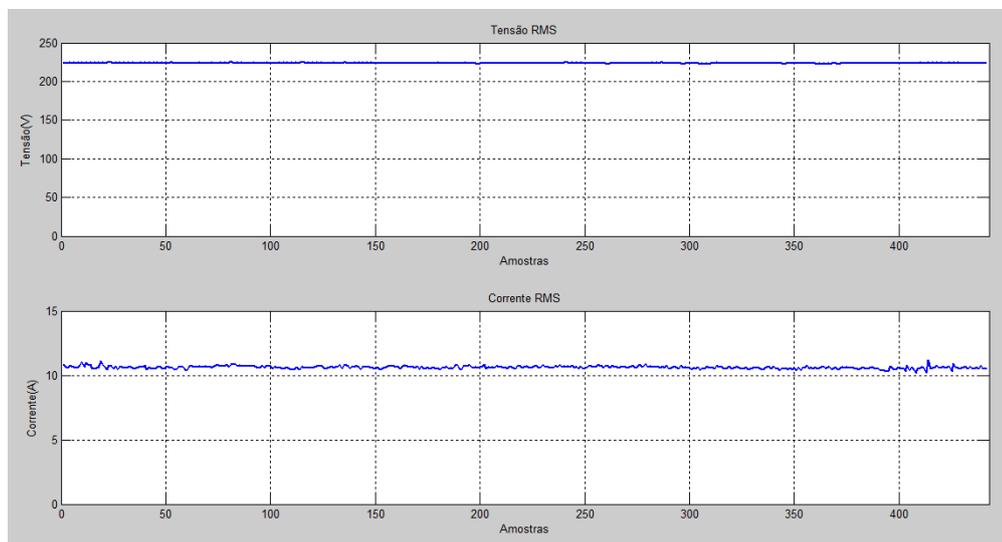
Figura 28 - Correntes de linha medidas pelo Nexus 1500+.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida é apresentada a tensão medida pelo protótipo que corresponde à tensão V_{cn} do Nexus 1500+ e a corrente medida pelo protótipo que corresponde à corrente I_c do Nexus 1500+.

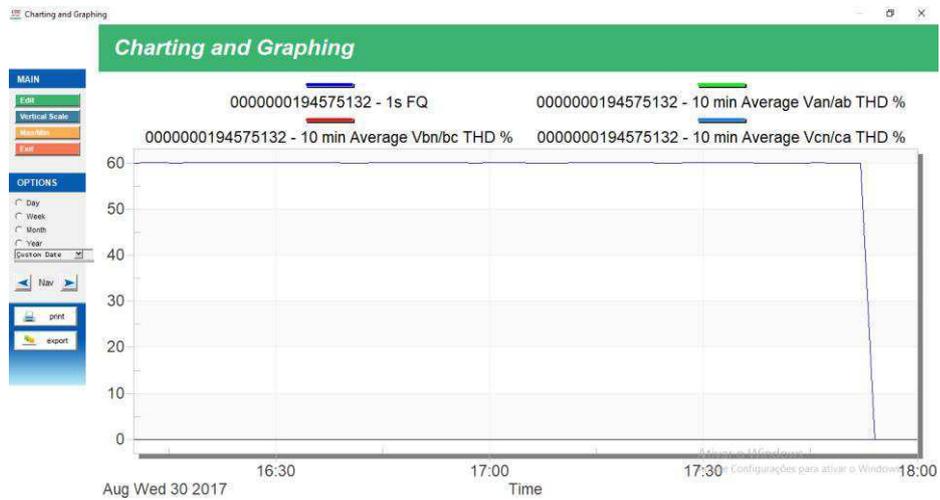
Figura 29 - Tensão e corrente RMS medidas pelo protótipo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

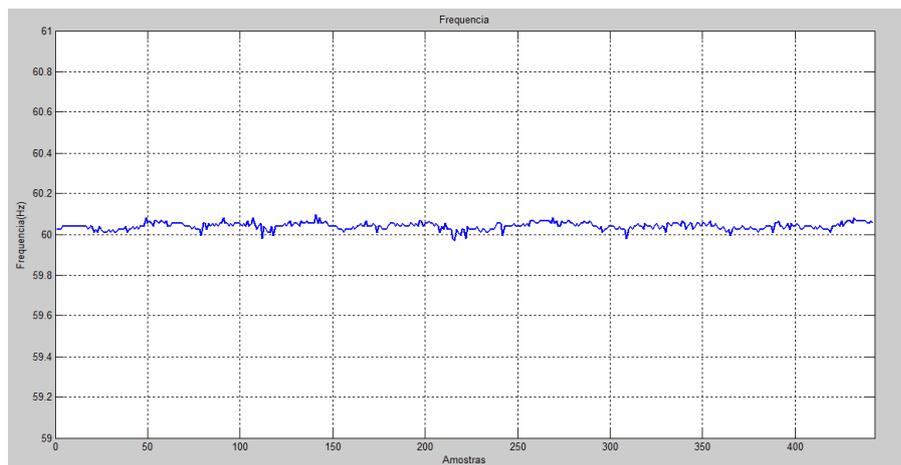
Dando continuidade às comparações o próximo parâmetro avaliado é a frequência, abaixo é encontrado o gráfico com a frequência medida pelo Nexus 1500+ e em seguida a frequência medida pelo protótipo.

Figura 30 - Frequência medida pelo Nexus 1500+.



Fonte: Elaborada pelo autor.

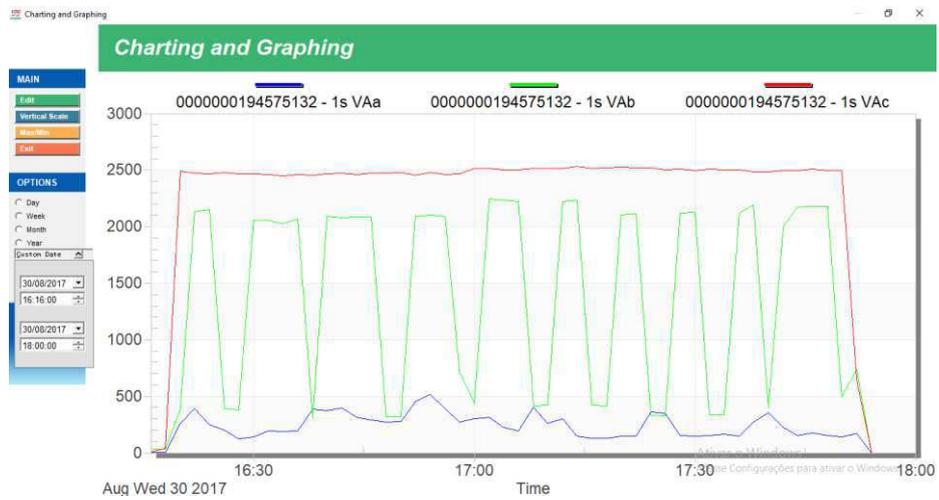
Figura 31- Frequência medida pelo protótipo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

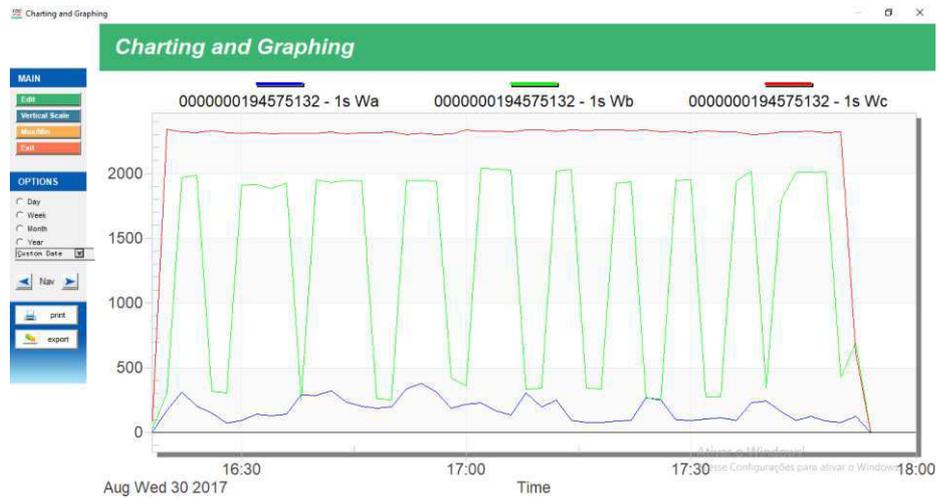
A seguir serão apresentados os valores para o trio de potências em cada fase medida pelo Nexus 1500+ e logo em seguida uma figura que contempla as três potências mais o fator de potência medido pelo protótipo.

Figura 32 - Potências aparentes medidas pelo Nexus 1500+.



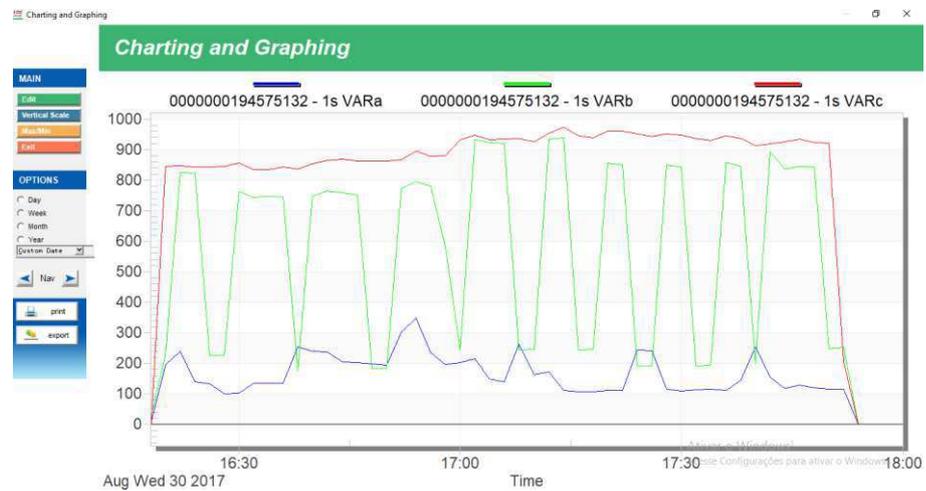
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 33 - Potências ativas medidas pelo Nexus 1500+.



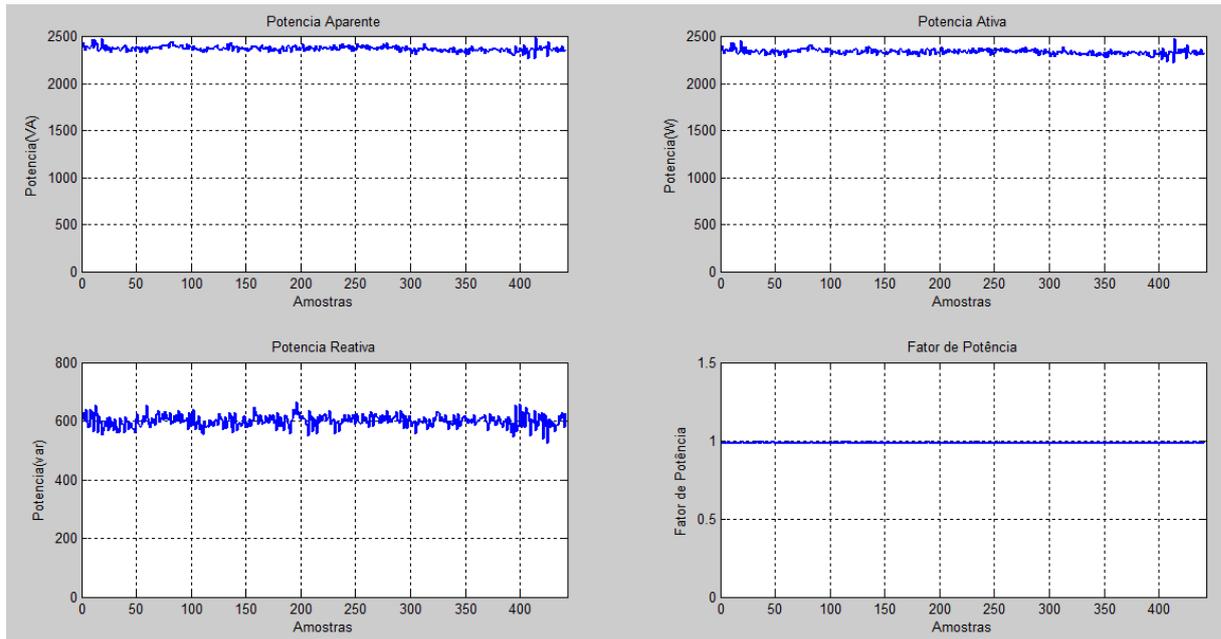
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 34 - Potências reativas medidas pelo Nexus 1500+.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 35 - Potência aparente, ativa, reativa e fator de potência medido pelo protótipo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores médios dos parâmetros medidos pelos dois sistemas são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 6 - Resultados do teste do quadro de distribuição no LSP.

Teste 2	Nexus 1500+	Protótipo	Erro (%)
Tensão RMS (V)	224,67	223,72	0,42
Corrente RMS (A)	11,01	10,61	3,67
Frequência (Hz)	60,01	60,03	0,033
Potência Aparente (VA)	2464,51	2375,90	4,32
Potência Ativa (W)	2322,65	2298,80	1,02
Potência Reativa (var)	834,08	600,72	27,97

Fonte: Elaborada pelo autor.

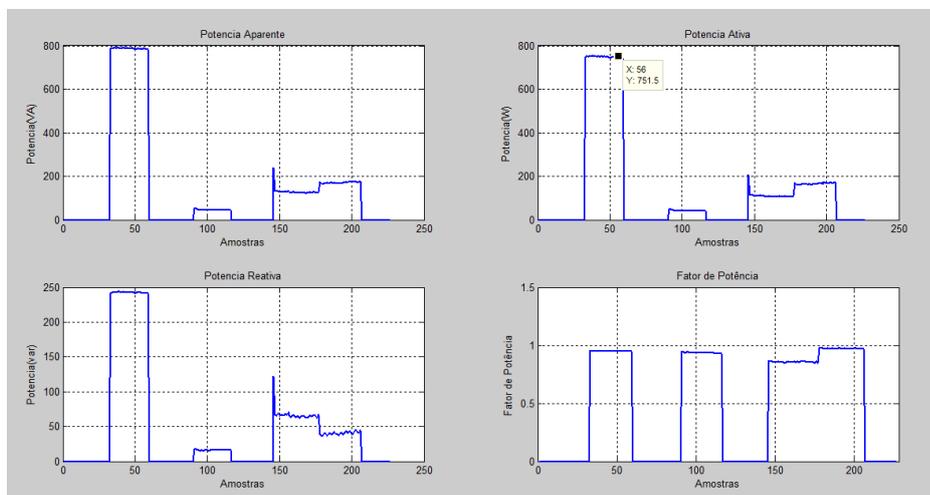
4.3 TESTE EM APARELHOS ELETRODOMÉSTICOS

Para completar os testes realizados com o equipamento, foram feitas medições em alguns eletrodomésticos isoladamente, foram eles: sanduicheira, ventilador, liquidificador e um chuveiro elétrico. Então foi avaliado seu comportamento e foi realizada uma comparação com seus valores de placa.

A Figura 36 apresenta a medição de três eletrodomésticos medidos sequencialmente. O primeiro corresponde a uma sanduicheira, o segundo a um ventilador e o terceiro é um liquidificador em duas posições de velocidade.

No gráfico da potência ativa é indicado um valor de 751,5 W enquanto que o aparelho indica um consumo de 750 W, o que é indica um resultado aceitável. A segunda curva correspondente ao ventilador com um torque de partida extremamente baixo, correspondendo ao esperado para esse tipo de motor que só precisa vencer a inércia das hélices para funcionar. A última curva representa um liquidificador que já apresenta um torque de partida mais proeminente e em seguida é acionado a sua chave de velocidade para a segunda posição que resulta na diminuição de reativos, o aumento do fator de potência e consequentemente o aumento do torque no eixo.

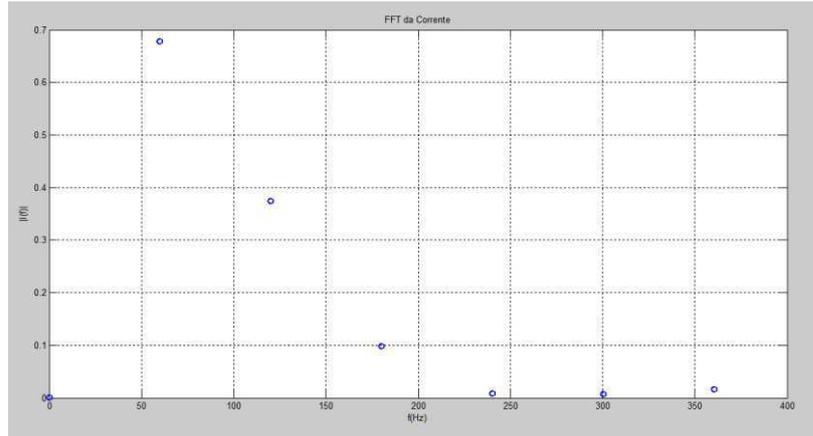
Figura 36 - Medição das potências e fator de potência em eletrodomésticos diversos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

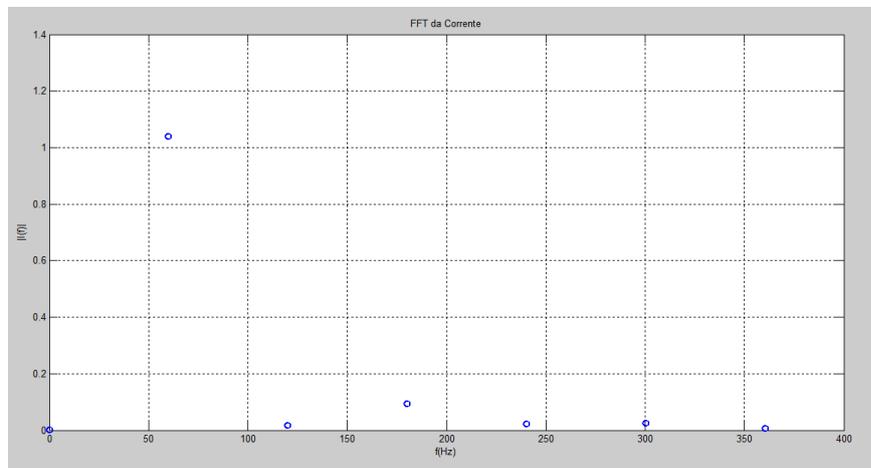
Foram avaliadas as componentes harmônicas nos instantes em que a chave está na posição 1 e em seguida na posição 2. É possível notar que a posição 1 apresenta harmônicos de terceira e quinta ordem de forma exagerada enquanto que na posição dois essas componentes harmônicas estão bem atenuadas com um ganho de amplitude na componente fundamental.

Figura 37 - Medição das harmônicas de um liquidificador com sua chave na posição 1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

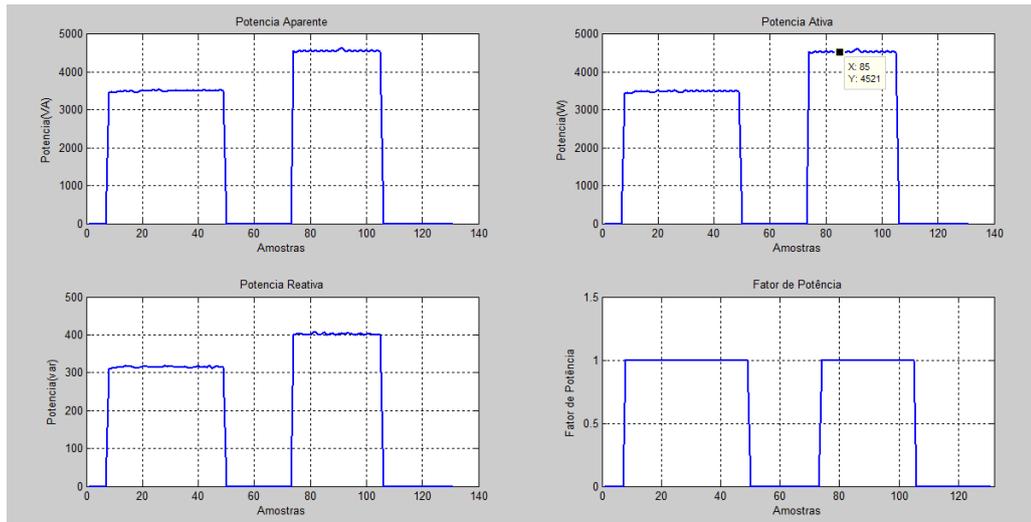
Figura 38 - Medição das harmônicas de um liquidificador com sua chave na posição 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O próximo teste foi feito em um chuveiro elétrico que tem dois ajustes para temperatura. É possível avaliar no gráfico da potência ativa uma indicação da potência consumida com o valor de 4521 W, enquanto que a resistência utilizada pelo chuveiro é de 4500 W, sendo assim uma boa aproximação. É possível notar o fator de potência com valor quase unitário por se tratar de uma resistência com uma pequena característica indutiva.

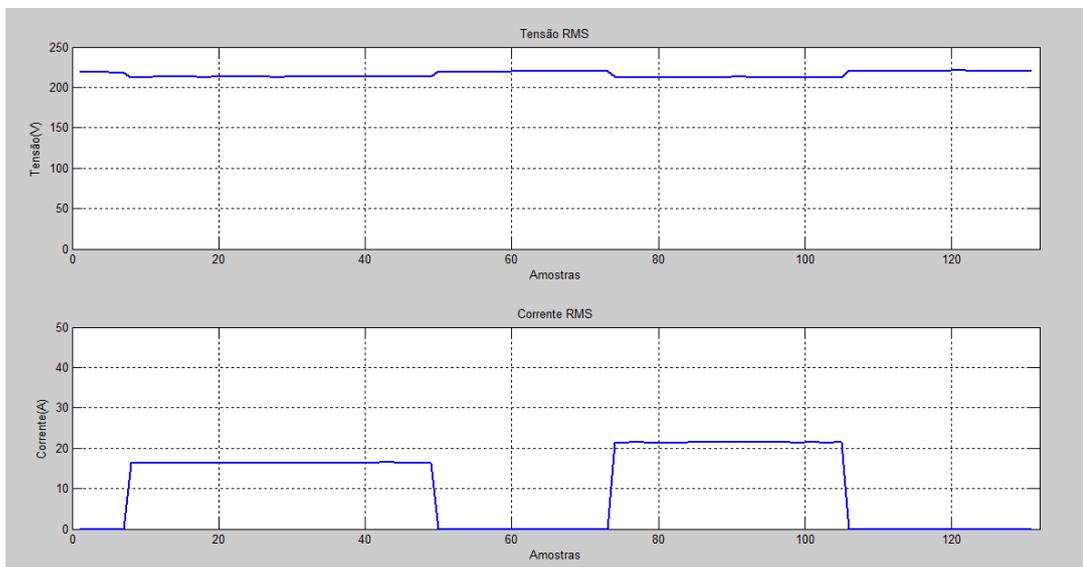
Figura 39 - Medição das potências e do fator de potências de um chuveiro elétrico em seus dois ajustes de temperatura.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na figura a seguir são apresentados a corrente e tensão RMS durante os acionamentos em cada ajuste de temperatura. É importante notar que pelo chuveiro elétrico ser uma carga de alto consumo durante o período de utilização ocorre um afundamento na tensão.

Figura 40 - Tensão e corrente RMS de um chuveiro elétrico, em seus dois ajustes de temperatura.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

A grande maioria dos testes obteve resultados bem próximos na comparação com outros instrumentos de medida, isso pode ser observado nas tabelas 2, 3, 4, 5 e 6. A potência reativa na comparação com o Nexus 1500+ foi o pior resultado com 27,97% de erro, e a

frequência em comparação com o Nexus foi o melhor resultado com 0,033% de erro. As demais medidas apresentaram erros aceitáveis.

Além dos valores médios expostos, os gráficos se apresentaram como uma boa alternativa para avaliação do comportamento das cargas, como foi o caso dos testes com os eletrodomésticos.

Os resultados em geral se apresentaram favoráveis, principalmente levando o quesito de custo benefício. O equipamento proposto neste trabalho custou para ser construído em torno de R\$ 120,00, enquanto que um qualímetro de alto desempenho como o Nexus 1500+ custa cerca de R\$ 50.000,00.

5 CONCLUSÃO

Com a realização desse trabalho foi possível se idealizar e construir um analisador da qualidade da energia de baixo custo para redes monofásicas. O protótipo apresenta baixo custo, manutenção fácil e barata devido a facilidade de acesso dos componentes, sendo uma boa opção para aplicações em ensaios didáticos ou na investigação inicial de pequenas cargas.

O protótipo do qualímetro foi testado em diferentes situações podendo assim fazer uma boa caracterização do seu comportamento. De forma geral os erros percentuais medidos foram muito baixos, considerando os erros inerentes dos próprios componentes utilizados na construção, além do baixo custo do equipamento.

O nível de interdisciplinaridade desse projeto foi alto, englobando as áreas de sistemas elétricos, eletrônica, sistemas digitais, técnicas de programação, análise de sinais e da qualidade de energia elétrica. Isso é uma boa forma de apresentar como as mais diversas áreas da engenharia elétrica estão interligadas, e são necessárias para a criação de um produto.

Embora os objetivos tenham sido alcançados o projeto ainda pode melhorar. A adição de outros recursos a ele pode vir a ocorrer em trabalhos futuros. Algumas sugestões de recursos que poderiam ser integrados a ele são: uma interface gráfica para o usuário, comunicação *Bluetooth* com um *Smartphone*, o desenvolvimento de um gabinete que suporte intempéries, a medição de redes trifásicas, a criação de um banco de distúrbios e a identificação de cada um entre outras opções.

REFERÊNCIAS

4N25. Data Sheet. *6-Pin DIP Optoisolators Transistor Output*. Acesso em 23 de agosto de 2017, disponível em: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/2846/MOTOROLA/4N25.html>.

ANEEL. (2017). *Módulo8 Prodist Revisão 8*. Acesso em 23 de 08 de 2017, disponível em ANEEL: http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo8_Revisao_8/9c78cfab-a7d7-4066-b6ba-cfba3058d19.

ATmega328. Data Sheet. Acesso em: 23 de outubro de 2017. Disponível em: <http://www.atmel.com/pt/br/devices/ATMEGA328.aspx>.

BARBOSA, L.A. (2016). *Wattímetro Microprocessado*. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

DECKMANN, S.M. ;POMILIO, J.A. (2016). *Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica*. Curso, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas.

ELECTRO INDUSTRIES/GAUGE TECH. (2015). *Communicator EXT and MeterManager EXT Software User Manual V.2.04_E107707*. Manual do usuário.

ELECTRO INDUSTRIES/GAUGE TECH (2015). *Nexus 1500+ New Generation Power Quality Meter User Manual V.1.01_E154713*. Manual do usuário.

FAST FOURIER TRANSFORM. Acesso em 23 de agosto de 2017, disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html>

GUERRA, F.C.F. (2016). *Distúrbios de Tensão em Redes Elétricas*. Apostila, Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Elétrica, Campina Grande.

GUERRA, F.C.F. (2016). *Distúrbios de Corrente em Redes Elétricas*. Apostila, Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Elétrica, Campina Grande.

GUERRA, F.C.F. (2016). *Transformadores para Instrumentos*. Apostila, Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Elétrica, Campina Grande.

LM741. Data Sheet. *Single Operational Amplifier*. Acesso em 23 de agosto de 2017, disponível em: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/53589/FAIRCHILD/LM741.html>.

LM324. Data Sheet. *Quad- Operational Amplifiers*. Acesso em 23 de agosto de 2017, disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm124-n.pdf>.

MEDEIROS, E.L. (2016). *Sistema Flexível de Aquisição de Sinais de Grandezas Elétricas Aplicado à Qualidade de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Elétrica, Campina Grande.

NILSON, J.W; RIEDEL, S.A. (2009). *Circuitos Elétricos 8º edição*.

OPEN ENERGY MONITOR. *Open Source Monitoring for Understanding Energy*. Acesso em 23 de agosto de 2017, disponível em: <https://openenergymonitor.org/>.

PONCHET, P.B. (2016). *Avaliação do Sensor de Corrente SCT-013 Aplicado em Medidor Eletrônico de Potência*. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

Registador De Qualidade de Tensao Fluke VR1710. Acesso em 23 de agosto de 2017, disponível em: <http://www.fluke.com/Fluke/brpt/Testadores-Eletricos/Qualidade-de-energia/Fluke-VR1710.htm?PID=56202>.

ROCHA, J.E. (2016). *Qualidade da Energia Elétrica*. Apostila, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Eletrotécnica, Curitiba.

SCT013. Data Sheet. *Split Core Transformer*. Acesso em 23 do agosto de 2017, disponível em: <https://nicegear.co.nz/obj/pdf/SCT-013-datasheet.pdf>.

SCHNEIDER ELECTRIC. (2003). *Workshop Qualidade da Energia – Harmônicas*. Apostila.

SD LIBRARY. *Biblioteca SD Arduino*. Acesso em 23 do agosto de 2017, disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Reference/SD>.

APÊNDICE A – CÓDIGO ARDUINO

```

//MEDIDOR DE ENERGIA v4.5
//AISLAN GALDINO DOS SANTOS

#define sensorV A2
#define sensorI A3
#define detectorF 2
#define N 100
#define CS_pin 10

byte N1 = 65;

int Valor_SensorV[N];
int Valor_SensorI[N];

unsigned long inicio = 0;
byte estado = 1;
byte cont2 = 0;
unsigned int Tempo_amostragem = 300;
unsigned int Tempo_amostragemT = 0;
int aux = 0;
unsigned long ultimo_micros2 = 0;

unsigned long ultimo_micros1 = 0;
byte cont = 0;
bool Valor_Pulso_Anterior = 0;
unsigned long Periodo = 0;

void Medicao_Frequncia();
void Calcula_Tempo_amostragem();
void Amostragem();
void Data_Logger();

void setup() {

  Serial.begin(115200);

  Serial.println(F("Iniciando SD Card"));
  pinMode(CS_pin, OUTPUT);

  if(!SD.begin(CS_pin))
  {
    Serial.println(F("SDOpenFail"));
    return;
  }

  Serial.println(F("SDStart"));

}

void loop() {

```

```

switch(estado){
  case 1:{

    Medicao_Freqencia();

  }
  break;
  case 2:{
    Calcula_Tempo_amostragem();
    estado = 3;

  }
  break;
  case 3:{

    Amostragem();

    if(cont2 >= N1){
      estado = 4;
      cont2 = 0;
    }
  }
  break;

  break;
  case 4:{
    Data_Logger();
    estado = 1;
  }
  break;

}

}

void Medicao_Freqencia(){

  bool Pico_sen = 0;

  Pico_sen = digitalRead(detectorF);

  switch(Pico_sen){

    case 0:
      if(Valor_Pulso_Anterior == 1){
        Valor_Pulso_Anterior = 0;

      }

      break;

    case 1:
      if(Valor_Pulso_Anterior == 0){
        Valor_Pulso_Anterior = 1;

        if (micros() < ultimo_micros1) {
          ultimo_micros1 = 0;
        }

      }

    }
  }
}

```

```

else{

    cont++;

    if(cont > 1){
        cont = 0;
        estado = 2;
        Periodo = micros()- ultimo_micros1;

        }
        ultimo_micros1 = micros();
    }
}
break;

}

void Calcula_Tempo_amostragem(){
    unsigned int
    Tempo_amostragemT = Periodo/N1;
    aux = Tempo_amostragemT - Tempo_amostragem;
    if(aux < 0){
        N1--;
    }
    if(aux > 0){
        N1++;
    }
}

void Amostragem(){

    if (micros() < ultimo_micros2) {
        ultimo_micros2 = micros();
    }

    if (micros() - ultimo_micros2 >= Tempo_amostragem) {
        inicio = micros();
        ultimo_micros2 = inicio;

        Valor_SensorV[cont2] = analogRead(sensorV);
        Valor_SensorI[cont2] = analogRead(sensorI);

        cont2++;

        if (micros() < inicio) {
            inicio = 0;
        }
        Tempo_amostragem = micros()-inicio;

    }
}

void Data_Logger(){

    byte i = 0;
    String dataString;

```

```
File logFile = SD.open("DATA.txt", FILE_WRITE);
dataString = String(Periodo) + ", " + String(N1);

if(logFile)
{

  logFile.println(dataString);
  logFile.close();
  Serial.println(dataString);
}
else
{
  Serial.println(F("ErroEscritaFinal"));
}

for(i=0;i<N1;i++){

  File logFile = SD.open("DATA.txt", FILE_WRITE);
  dataString = String(Valor_SensorV[i]) + ", " + String(Valor_SensorI[i]);

  if(logFile)
  {

    logFile.println(dataString);
    logFile.close();
    Serial.println(dataString);
  }
  else
  {
    Serial.println(F("ErroEscritaFinal"));
  }

}

}
```

APÊNDICE B – ROTINA MATLAB

```

% =====
% ===== ANALISADOR DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA =====
%
% AISLAN GALDINO DOS SANTOS
%
% =====

close all
clear all
clc
% Carrega os dados do cartão SD
% =====

load D:\DATA.TXT
cont = 1;
Np1 = DATA(1,2);
x = Np1+2;
qnt_dados = length(DATA)-x;
N = 0;
while x < (qnt_dados - N)
    Período = DATA(x,1);
    N = DATA(x,2);
    V = 1:N;
    I = 1:N;
    for n = 1:N
        V(n) = DATA(n+x,1);
        I(n) = DATA(n+x,2);
    end
    x = x + N + 1;
% Ajuste do nível DC
% =====
% Cálculo do offset V

```

```

Vmed = 0;
for n = 1:N
    Vmed = Vmed + V(n);
end
Vmed = Vmed/N;
for n = 1:N
    V(n) = V(n) - Vmed;
end
Imed = 0;
for n = 1:N
    Imed = Imed + I(n);
end
Imed = Imed/N;
for n = 1:N
    I(n) = I(n) - Imed;
end
V = V*146.4;
%R = 80, Imáx 60A, AjusteCorrente = 50
%R = 330, Imáx 15A, AjusteCorrente = 12,12121212
%R = 1k, Imáx = 5A, AjusteCorrente = 4
AjusteCorrente = 4;
I = I*AjusteCorrente*1.06;
V = V*4.85/1023;
I = I*4.85/1023;
% Variáveis de tempo
% =====
Periodo = Periodo/1000000;
Frequencia = 1/Periodo;
Ts = Periodo/N;
Fs = 1/Ts;
t = [0:1/Fs:Periodo-Ts];
% Variáveis para cálculo das potências
% =====
Potencia_Acumulada = 0;

```

```

Potencia_Ativa = 0;
Potencia_Aparente = 0;
Potencia_Reativa = 0;
fp = 0;
% Tensão RMS total
% =====
Vrms = 0;
for n = 1:N
    Vrms = Vrms + V(n)*V(n);
end
Vrms = sqrt(Vrms/N);
% Corrente RMS total
% =====
Irms = 0;
for n = 1:N
    Irms = Irms + I(n)*I(n);
end
Irms = sqrt(Irms/N);
% Correção corrente nula
% =====
switch AjusteCorrente
    case 50
        Icorte = 0.24;
    case 12.12121212
        Icorte = 0.058;
    case 4
        Icorte = 0.02;
end
if Irms < Icorte
    Irms = 0;
    for n = 1:N
        I(n) = 0;
    end
end
end

```

```

% Valores de Pico
% =====
Vpico = abs(max(V));
Ipico = abs(max(I));
% Potencia Aparente
% =====
Potencia_Aparente = Vrms*Irms;
% Potencia Ativa
% =====
for n = 1:N
Potencia_Acumulada = Potencia_Acumulada + V(n)*I(n);
end
Potencia_Ativa = Potencia_Acumulada/N;
% Potencia Reativa
% =====
Potencia_Reativa      =      sqrt(Potencia_Aparente*Potencia_Aparente-
Potencia_Ativa*Potencia_Ativa);
% Fator de Potencia
% =====
fp = Potencia_Ativa/Potencia_Aparente;
if Potencia_Aparente == 0
    fp = 0;
end
% Capacitor para corrigir fator de potencia
% =====
if fp < 0.92
    Potencia_Reativa_Nova = Potencia_Aparente*0.391918;
    tan1 = Potencia_Reativa/Potencia_Ativa;
    tan2 = Potencia_Reativa_Nova/Potencia_Ativa;
    C = (Potencia_Ativa*1000000*(tan1-tan2))/(Vrms*Vrms*2*pi*Frequencia);
    fprintf('O capacitor indicado em uF é: %f',C)
    fprintf('\n')
end
% Fast Fourier Transform (FFT)

```

```

% =====
L = length(V);
aux = 0:L-1;
T = L/Fs;
f = aux/T;
FFTV = fftn(V)*(2/L);
FFTI = fftn(I)*(2/L);
fc = ceil(L/10);
FFTV = FFTV(1:fc);
FFTI = FFTI(1:fc);
f = f(1:fc);
% Total Harmonic Distortion (DHT)
% =====
Vp60 = abs(max(FFTV));
Ip60 = abs(max(FFTI));
V60 = Vp60*sin(2*pi*Frequencia*t);
I60 = Ip60*sin(2*pi*Frequencia*t);
% Tensão RMS da fundamental
Vrms60 = 0;
for n = 1:N
    Vrms60 = Vrms60 + V60(n)*V60(n);
end
Vrms60 = sqrt(Vrms60/N);
% Corrente RMS da fundamental
Irms60 = 0;
for n = 1:N
    Irms60 = Irms60 + I60(n)*I60(n);
end
Irms60 = sqrt(Irms60/N);
%Calculando a THD em porcentagem
%Distorção de V
Thdv = sqrt((Vrms/Vrms60)^2-1)*100;
%Distorção de I
Thdi = sqrt((Irms/Irms60)^2-1)*100-8;

```

```

% Fase
% =====
fase = acos(fp*sqrt(1+(Thdi/100)^2))*180/pi;
% Atualiza os vetores com os resultados
% =====
FREQUENCIA(cont) = Frequencia;
VRMS(cont) = Vrms;
IRMS(cont) = Irms;
POTENCIA_APARENTE(cont) = Potencia_Aparente;
POTENCIA_ATIVA(cont) = Potencia_Ativa;
POTENCIA_REATIVA(cont) = Potencia_Reativa;
FP(cont) = fp;
FASE(cont) = fase;
THDV(cont) = Thdv;
THDI(cont) = Thdi;
% Salva o valor instantâneo para plotagens referentes a apenas um período
% =====
if cont == 150
    Vplot = V;
    Iplot = I;
    tplot = t;
    fplot = f;
    FFTVplot = FFTV;
    FFTIplot = FFTI;
end
cont = cont + 1;
end
% Média dos resultados das amostras
% =====
FrequenciaMEDIA = 0;
VrmsMEDIA = 0;
IrmsMEDIA = 0;
Potencia_AparenteMEDIA = 0;
Potencia_AtivaMEDIA = 0;

```

```

Potencia_ReativaMEDIA = 0;
fpMEDIA = 0;
faseMEDIA = 0;
ThdvMEDIA = 0;
ThdiMEDIA = 0;
for n = 1:cont-1
    FrequenciaMEDIA = FREQUENCIA(n) + FrequenciaMEDIA;
    VrmsMEDIA = VRMS(n) + VrmsMEDIA;
    IrmsMEDIA = IRMS(n) + IrmsMEDIA;
    Potencia_AparenteMEDIA      =      POTENCIA_APARENTE(n)      +
Potencia_AparenteMEDIA;
    Potencia_AtivaMEDIA = POTENCIA_ATIVA(n) + Potencia_AtivaMEDIA;
    Potencia_ReativaMEDIA      =      POTENCIA_REATIVA(n)      +
Potencia_ReativaMEDIA;
    fpMEDIA = FP(n) + fpMEDIA;
    faseMEDIA = FASE(n) + faseMEDIA;
    ThdvMEDIA = THDV(n) + ThdvMEDIA;
    ThdiMEDIA = THDI(n) + ThdiMEDIA;
end
FrequenciaMEDIA = FrequenciaMEDIA/(cont-1)
VrmsMEDIA = VrmsMEDIA/(cont-1)
IrmsMEDIA = IrmsMEDIA/(cont-1)
Potencia_AparenteMEDIA = Potencia_AparenteMEDIA/(cont-1)
Potencia_AtivaMEDIA = Potencia_AtivaMEDIA/(cont-1)
Potencia_ReativaMEDIA = Potencia_ReativaMEDIA/(cont-1)
fpMEDIA = fpMEDIA/(cont-1)
faseMEDIA = faseMEDIA/(cont-1)
ThdvMEDIA = ThdvMEDIA/(cont-1)
ThdiMEDIA = ThdiMEDIA/(cont-1)
% Plota o sinal amostrado
% =====
switch AjusteCorrente
    case 50
        Ganho = 5;

```

```

        EixoCorrente = 50;
    case 12.12121212
        Ganho = 20;
        EixoCorrente = 15;
    case 4
        Ganho = 10;
        Ganho = 30;
        %EixoCorrente = 20;
        EixoCorrente = 2;
    end
figure
plot(tplot,Vplot,tplot,Iplot*Ganho,'LineWidth',[2]);
axis([0,0.017,-330,330])
title('Sinal Amostrado')
legend('Tensão','Corrente X10')
xlabel('Tempo(s)', 'FontSize',10)
ylabel('Tensão(V)/Corrente(A)', 'FontSize', 10)
grid ON;
% Tensão e corrente RMS
figure
subplot(2,1,1);
plot(VRMS,'LineWidth',[2]);
axis([0,cont,0,250])
title('Tensão RMS')
xlabel('Amostras', 'FontSize',10)
ylabel('Tensão(V)', 'FontSize', 10)
grid ON;
subplot(2,1,2);
plot(IRMS,'LineWidth',[2]);
axis([0,cont,0,EixoCorrente])
title('Corrente RMS')
xlabel('Amostras', 'FontSize',10)
ylabel('Corrente(A)', 'FontSize', 10)
grid ON;

```

```

% Fase
figure
plot(FASE);
axis([0,cont,0,40])
title('Fase')
xlabel('Amostras', 'FontSize',10)
ylabel('Fase(°)', 'FontSize', 10)
grid ON;

% Potência Aparente, Ativa, Reativa e o Fator de Potência
figure
subplot(2,2,1);
plot(POTENCIA_APARENTE,'LineWidth',[2]);
axis([0,cont,0,2500])
title('Potencia Aparente')
xlabel('Amostras', 'FontSize',10)
ylabel('Potencia(VA)', 'FontSize', 10)
grid ON;
subplot(2,2,2);
plot(POTENCIA_ATIVA,'LineWidth',[2]);
axis([0,cont,0,2500])
title('Potencia Ativa')
xlabel('Amostras', 'FontSize',10)
ylabel('Potencia(W)', 'FontSize', 10)
grid ON;
POTENCIA_REATIVA = POTENCIA_REATIVA+200;
subplot(2,2,3);
plot(POTENCIA_REATIVA,'LineWidth',[2]);
axis([0,cont,0,800])
title('Potencia Reativa')
xlabel('Amostras', 'FontSize',10)
ylabel('Potencia(var)', 'FontSize', 10)
grid ON;
subplot(2,2,4);
plot(FP,'LineWidth',[2]);

```

```

axis([0,cont,0,1.5])
title('Fator de Potência')
xlabel('Amostras', 'FontSize',10)
ylabel('Fator de Potência', 'FontSize', 10)
grid ON;
% Frequência
figure
plot(FREQUENCIA,'LineWidth',[2]);
axis([0,cont,59,61])
title('Frequencia')
xlabel('Amostras', 'FontSize',10)
ylabel('Frequencia(Hz)', 'FontSize', 10)
grid ON;
% Plota as componentes de Fourier
% =====
figure
plot(fplot, abs(FFTVplot),'o','LineWidth',[2])
title('FFT da Tensão')
xlabel('f(Hz)')
ylabel('|V(f)|')
grid ON
figure
plot(fplot, abs(FFTIplot),'o','LineWidth',[2])
title('FFT da Corrente')
xlabel('f(Hz)')
ylabel('|I(f)|')
grid ON
% Distorção harmônica total de tensão e corrente
figure
subplot(2,1,1);
plot(THDV);
axis([0,cont,0,50])
title('Distorção Harmônica de Tensão')
xlabel('Amostras', 'FontSize',10)

```

```
ylabel('THDV(%)', 'FontSize', 10)
grid ON;
subplot(2,1,2);
plot(THDI);
axis([0,cont,0,50])
title('Distorção Harmônica de Corrente')
xlabel('Amostras', 'FontSize',10)
ylabel('THDI(%)', 'FontSize', 10)
grid ON;
```