

**IGOR MENDES RIBEIRO ARBIZA**

**DISPOSITIVO MICROCONTROLADO PARA MEDIÇÃO DE QUALIDADE DA  
ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa.

Orientador: Alessandro G. Girardi

**Alegrete**



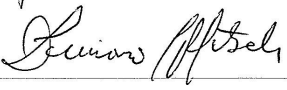
**2013**



**Autoria:** Igor Mendes Ribeiro Arbiza

**Título:** Dispositivo microcontrolado para medição de Qualidade da Energia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa.

<b>Os componentes da banca de avaliação, abaixo listados, consideram este trabalho aprovado.</b>				
	<b>Nome</b>	<b>Titulação</b>	<b>Assinatura</b>	<b>Instituição</b>
<b>1</b>	Alessandro Gonçalves Girardi	Dr.		Unipampa
<b>2</b>	Jumar Luis Russi	Dr		Unipampa
<b>3</b>	Luciano Lopes Pfitscher	Me.		Unipampa

**Data da aprovação:** 08 de março de 2013.

## RESUMO

Este trabalho consiste na implementação, teste e análise de viabilidade de um protótipo microcontrolado apto a realizar medições de qualidade da energia elétrica, no qual obterá os seguintes resultados: tensão e corrente RMS; potências ativa, reativa e aparente; fator de potência sobre a frequência fundamental; distorção harmônica total percentual presente no sinal de tensão da rede elétrica. O protótipo implementado neste projeto visa apresentar uma configuração de baixo custo, integrando as funcionalidades de aquisição, processamento e comunicação em um microcontrolador ARM Cortex-M3, de modo a otimizar os custos e facilitar a sua implementação em redes de distribuição de energia elétrica.

Após uma análise teórica sobre os conceitos base para a implementação deste projeto, apresenta-se os objetivos e motivações assim como o detalhamento e metodologia dos itens existentes neste projeto. Em seu desenvolvimento é descrita a implementação das partes de hardware e software deste projeto para então realizar uma sequência de testes, visando a eficiência do protótipo desenvolvido neste projeto. Através da análise dos resultados obtidos pelos testes, conclui-se o trabalho analisando-se a sua eficiência de acordo com as especificações da norma nacional.

Palavras-chave: Dispositivo Microcontrolado, Qualidade da Energia Elétrica, Medição de Energia Elétrica, PRODIST.

## **ABSTRACT**

This present work consists at the implementation, test and viability analysis of a micro-controlled device able to measure power quality, obtaining the measurement of: RMS values of voltage and current; real, reactive and apparent power; power factor based the fundamental frequency; proportional total harmonic distortion over the phase voltage at the electric network. The implemented prototype at this project aims to present a low-cost configuration, integrating the acquisition, processing and communication functionalities into the ARM Cortex-M3 microcontroller so that cost optimization and easiest implementation at the electric energy distribution network.

After a theoretical analysis over the base concepts for the project implementation, the objectives and motivation just like the detailing and methodology of the present items of this project. Under its development, the described and implementation over the hardware and software sections at this project so then a test sequence realization, aiming the developed prototype's efficiency over this project. Through the tests result analysis a conclusion is made based on the national standard specification.

Key-words: Electric Energy Measurement, Micro-controlled Device, Power Quality, PRODIST.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Faixas de tensão em relação à referência.....	17
Figura 2. Gráfico demonstrando o distúrbio de achatamento de tensão.....	18
Figura 3. Sinal de tensão distorcida por componentes harmônicas.....	20
Figura 4. Gráfico demonstrando o distúrbio de flutuação de tensão.....	21
Figura 5. Equipamento medidor de qualidade da energia elétrica modelo FST-3561. .....	28
Figura 6. Medidor de qualidade da energia elétrica sendo utilizado.....	29
Figura 7. Exemplo de estrutura de uma rede de distribuição de energia elétrica....	33
Figura 8: Protótipo desenvolvido junto ao kit de desenvolvimento.....	38
Figura 9. Estrutura de um medidor de qualidade da energia elétrica.....	41
Figura 10. Estrutura do protótipo desenvolvido.....	42
Figura 11. Kit de desenvolvimento EK-LM3S6965 utilizado neste projeto.....	44
Figura 12. Circuito implementado para aquisição de dados.....	49
Figura 13. Circuito elétrico presente no CI INA117.....	50
Figura 14. Circuito implementado para a regulação do sinal de tensão.....	51
Figura 15. Sinal regulado de tensão antes do ajuste (Amarelo) e após o ajuste (Verde).....	52
Figura 16. Circuito elétrico equivalente ao CI ACS712.....	53
Figura 17. Circuito de regulação do sinal de corrente.....	55
Figura 18. Sinal de corrente antes do ajuste (Amarelo) e após o ajuste (Verde)....	56
Figura 19. Circuito de filtragem passa baixo.....	57
Figura 20: Sinal de tensão antes e após a filtragem necessária.....	58
Figura 21. Fonte regulável utilizada na implementação do projeto.....	60
Figura 22. Circuito referente ao CI LM317 acima e CI 7805 abaixo.....	62
Figura 23. Fluxograma do software do microcontrolador.....	64
Figura 24: Modelo de Impressão realizado pelo software presente no microcontrolador.....	70
Figura 25: Exemplo de subgrupos a cada iteração do algoritmo.....	73
Figura 26: Demonstração do processamento de dados no algoritmo.....	76
Figura 27. Diagrama de funcionamento do software cliente.....	78
Figura 28. Diagrama de funcionamento do software servidor.....	79

Figura 29. Gerador de sinal utilizado durante os testes.....	81
Figura 30. Sinal aplicado durante o primeiro teste, sendo a tensão o sinal amarelo e corrente o sinal verde.....	82
Figura 31. Sinal aplicado durante o segundo teste, sendo a tensão o sinal amarelo e corrente o sinal verde.....	84
Figura 32. Sinal aplicado durante o terceiro teste, sendo a tensão o sinal amarelo e corrente o sinal verde.....	85
Figura 33. Sinal aplicado durante o quarto teste, sendo a tensão o sinal amarelo e corrente o sinal verde.....	87
Figura 34. Sinal aplicado durante o quinto teste, sendo a tensão o sinal amarelo e corrente o sinal verde.....	88
Figura 35. Sinal aplicado durante o sexto teste, sendo a tensão o sinal amarelo e corrente o sinal verde.....	90
Figura 36. Sinal aplicado durante o sétimo teste, sendo a tensão o sinal amarelo e corrente o sinal verde.....	91
Figura 37. Sinal de tensão obtido da rede elétrica, sendo a tensão da rede o sinal amarelo.....	93
Figura 38. Kit de desenvolvimento EKI-LM4F232.....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Requisitos mínimos quanto ao equipamento de medição.....	26
Tabela 2. Demonstração do funcionamento da função de bit reverso.....	72
Tabela 3. Medições obtidas durante o teste de circuito puramente resistivo.....	83
Tabela 4. Medições obtidas durante o teste de circuito predominantemente capacitivo sob defasagem de 30 graus.....	84
Tabela 5. Medições obtidas durante o teste de circuito predominantemente capacitivo sob defasagem de 45 graus.....	86
Tabela 6. Medições obtidas durante o teste de circuito predominantemente capacitivo sob defasagem de 80 graus.....	87
Tabela 7. Medições obtidas durante o teste de circuito predominantemente indutivo sob defasagem de 30 graus.....	89
Tabela 8. Medições obtidas durante o teste de circuito predominantemente indutivo sob defasagem de 40 graus.....	90
Tabela 9. Medições obtidas durante o teste de circuito predominantemente indutivo sob uma defasagem de 80 graus.....	92
Tabela 10. Medições obtidas do cálculo de distorção harmônica total do sinal de tensão e comparadas com o medidor de qualidade da energia elétrica MARH-21.	94



# SUMÁRIO

ERRATA.....	2
RESUMO.....	4
ABSTRACT.....	5
1.INTRODUÇÃO.....	12
2.REVISÃO TEÓRICA.....	14
2.1.Qualidade da energia elétrica.....	14
2.1.1.Aplicabilidade.....	14
2.1.2.Histórico.....	15
2.1.3.Grandezas presentes.....	16
2.1.3.1.Limites de tensão.....	16
2.1.3.2.Sag e Swell.....	18
2.1.3.3.Harmônicas.....	19
2.1.3.4.Cintilação.....	20
2.2.Normas e recomendações referentes à qualidade da energia elétrica.....	22
2.2.1.Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.....	23
2.2.1.1.Contexto histórico.....	24
2.2.1.2.Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica.....	24
2.3.Medidores de qualidade da energia elétrica.....	28
2.3.1.Aplicabilidade.....	30
2.3.2.Levantamento de dados.....	31
2.4.Redes de distribuição de energia elétrica.....	32
2.4.1.Visão geral.....	34
2.4.2.Componentes principais em redes de distribuição de energia elétrica. .	34
3.DISPOSITIVO MICROCONTROLADO PARA MEDIÇÃO DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA.....	36
3.1.Objetivo.....	36
3.2.Motivação.....	36
3.3.Visão geral do projeto.....	37
3.4.Trabalhos similares.....	38
3.5.Comparação entre um medidor de qualidade da energia elétrica e o projeto	

desenvolvido.....	40
3.6.Dispositivo microcontrolado.....	43
3.7.Software de registro de medições.....	45
3.8.Metodologia de desenvolvimento do projeto.....	47
4.DESENVOLVIMENTO.....	48
4.1.Circuito elétrico.....	48
4.1.1.Sinal de tensão.....	50
4.1.2.Sinal de corrente.....	53
4.1.3.Filtragem.....	56
4.1.4.Aquisição.....	58
4.1.5.Comunicação.....	60
4.1.6.Reguladores auxiliares.....	60
4.2.Software de cálculos presentes no microcontrolador.....	62
4.2.1.Ajustes do hardware utilizado pelo microcontrolador.....	64
4.2.2.Configuração dos contadores utilizados pelo microcontrolador.....	65
4.2.3.Primeira configuração de cálculos.....	66
4.2.3.1.Tensão e corrente RMS.....	66
4.2.3.2.Potência ativa.....	67
4.2.3.3.Potência reativa.....	68
4.2.3.4.Potência aparente e fator de deslocamento.....	69
4.2.3.5.Impressão dos valores RMS e potências obtidas.....	70
4.2.4.Segunda configuração de cálculos.....	70
4.2.4.1.Realocação dos dados.....	71
4.2.4.2.Tratamento das medições.....	72
4.2.4.3.Cálculo da distorção harmônica total.....	77
4.3.Software de registro de medições.....	77
4.3.1.Software cliente.....	78
4.3.2.Software Servidor.....	79
4.4.Testes Realizados.....	80
4.4.1.Testes de tensão e corrente RMS, potências ativa, reativa, aparente e fator de deslocamento.....	80
4.4.1.1.Teste sob um circuito puramente resistivo.....	82
4.4.1.2.Teste sob um circuito predominantemente capacitivo com	

defasagem de 30 graus. ....	83
4.4.1.3. Teste sob um circuito predominantemente capacitivo com defasagem de 45 graus. ....	85
4.4.1.4. Teste sob um circuito predominantemente capacitivo com defasagem de 80 graus. ....	86
4.4.1.5. Teste sob um circuito predominantemente indutivo com defasagem de 30 graus. ....	88
4.4.1.6. Teste sob um circuito predominantemente indutivo com defasagem de 45 graus.....	89
4.4.1.7. Teste sob um circuito predominantemente indutivo com defasagem de 80 graus. ....	91
4.4.2. Teste de distorção harmônica total presente na tensão da rede elétrica .....	92
4.4.3. Análise sobre os testes realizados.....	94
5. CONCLUSÃO.....	96
6. TRABALHOS FUTUROS.....	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

## 1. INTRODUÇÃO

A criação de novas tecnologias que visam substituir uma tecnologia já existente resulta em sua maior parte na criação de novos equipamentos eletrônicos. Estes equipamentos em geral fazem uso de sinais de corrente contínua internamente e não se baseiam em um sinal de entrada senoidal disponibilizado pela rede de distribuição de energia elétrica [1][2], necessitando que haja a conversão do sinal de entrada. Esta conversão necessária nestes equipamentos faz uso de conversores chaveados na maior parte, sendo que tais conversores apresentam a características de criar distorções harmônicas na rede elétrica sobre a qual está sendo utilizada.

A ciência aplicada no estudo e no desenvolvimento de novas tecnologias, acabou ocasionando ao longo do tempo, uma mudança no perfil dos equipamentos elétricos presentes nos mais diversos tipos de clientes como indústrias, comércios e residências [2]. Esta mudança cada vez mais evidente, decorreu do fato que as novas tecnologias propiciaram tanto na diversidade de equipamentos eletrônicos quanto ao acesso mais fácil aos equipamentos eletrônicos já presentes no mercado. O aumento da quantidade destes equipamentos eletrônicos nos mais diversos consumidores causa uma maior presença de distorção do sinal senoidal na rede elétrica consequentemente afetando a qualidade da energia elétrica.

Para poder realizar medições e análises de controle sobre a qualidade da energia elétrica presente na rede é necessário o uso de equipamentos especializados na medição das grandezas referentes à qualidade da energia elétrica, os quais são denominados medidores de qualidade da energia elétrica. Através de uso de medidores de qualidade da energia elétrica, é possível realizar o estudo da qualidade da rede elétrica presente tanto em uma pequena residência quanto em uma grande indústria, permitindo que através da medição de qualidade da energia elétrica se realize o levantamento de dados e relatórios de modo que se

possa traçar uma melhor alternativa para correção de erros, alteração da topologia da rede, controle de demanda ou ampliação da rede elétrica tanto por parte do cliente quanto pela concessionária de energia elétrica responsável pela rede.

O foco deste trabalho de conclusão de curso encontra-se na implementação de um dispositivo digital de medição de qualidade da energia elétrica, fazendo uso dos conceitos atuais sobre qualidade da energia elétrica, processamento digital de sinais e normas referentes às especificações requeridas no desenvolvimento do dispositivo. Tais conhecimentos são necessários para o projeto e desenvolvimento do dispositivo e análise de resultados obtidos. Sua estrutura consiste nas seguintes seções descritas logo abaixo: embasamento inicial sobre os fundamentos de qualidade da energia elétrica e seus principais conceitos, medidores de qualidade da energia elétrica, regulamentações presentes no âmbito nacional sobre medidores de qualidade da energia elétrica; topologia de redes de distribuição; apresentação e explanação sobre objetivos, motivação, trabalhos similares, estrutura funcional das seções presentes no desenvolvimento deste projeto assim como a metodologia abordada para implementação das seções deste projeto; desenvolvimento do projeto; análise dos resultados obtidos; conclusões sobre o projeto; sugestões para trabalhos futuros sobre o projeto;

## **2. REVISÃO TEÓRICA**

Nesta seção encontra-se a revisão teórica sobre os principais fundamentos presentes neste projeto.

### **2.1. Qualidade da energia elétrica**

O termo qualidade da energia elétrica é relacionado à ciência do estudo e análise de grandezas presentes na energia elétrica de modo a preservar a integridade de um sistema elétrico, sendo este sistema um simples circuito, um equipamento elétrico ou uma rede de distribuição de alta complexidade. A qualidade da energia elétrica pode receber diferentes definições de acordo com a sua perspectiva, podendo tornar-se um índice de confiabilidade de um sistema de acordo com agências regulamentadoras, limites máximos permitidos para o pleno funcionamento de certo equipamento na visão do operador ou simplesmente a continuidade do serviço de distribuição para um consumidor residencial [3]. De um modo mais simples, pode-se definir qualidade da energia elétrica como o estudo do impacto do sinal aplicado ao equipamento assim como a consequência no sinal aplicado ao equipamento, analisando-se performance, segurança, eficiência e durabilidade tanto do sistema quanto o equipamento do elétrico [4][5].

#### **2.1.1. Aplicabilidade**

A aplicação dos conceitos presentes em qualidade da energia elétrica abrange uma vasta gama de situações, dentre elas: quantificações de índices presentes em energia elétrica através de metodologias de medições; análise e identificação de defeitos em equipamentos ou circuitos elétricos; pesquisa e desenvolvimento na busca de melhor eficiência energética.

Segundo Sankaran (2000), os estudos provenientes de qualidade da energia elétrica possibilitaram a estipulação dos limites de diversas grandezas presentes na rede elétrica que influem no funcionamento dos equipamentos elétricos sem que haja perdas significativas de energia e/ou performance durante o seu funcionamento assim como ajudam a preservar ao máximo a vida útil do equipamento, afetada ao aplicar o mesmo fora de suas especificações de trabalho. As pesquisas desenvolvidas sobre qualidade da energia elétrica possibilitam também que haja um melhor controle da estabilidade e segurança em redes de distribuição, a qual está susceptível a distorção do sinal de tensão e ruídos elétricos resultantes das cargas elétricas presentes nos seus consumidores.

As redes de distribuição necessitam de um maior controle de qualidade da energia elétrica, pois seu serviço é entregue ininterruptamente ao consumidor e uma possível falha no seu serviço pode acarretar em um impacto financeiro significativo para as indústrias dependentes do seu serviço, afetando diretamente o seu consumidor final [5].

### **2.1.2. Histórico**

Desde a descoberta da utilização da eletricidade na sociedade, a qualidade da energia elétrica esteve presentes no estudo dos fenômenos por trás da eletricidade na busca por novos meios de geração, transmissão e aplicação da eletricidade em prol da melhor qualidade de vida para a sociedade [3].

Com o crescimento da presença de equipamentos eletrônicos, houve uma maior conscientização por parte da indústria sobre os conceitos de Qualidade da Energia Elétrica e sua área de aplicação, sendo os conceitos sobre Qualidade da Energia Elétrica atualmente alvo de um maior interesse visando uma melhor eficiência energética dos equipamentos elétricos a serem desenvolvido. A indústria necessitou maior domínio sobre os conceitos referentes a Qualidade da Energia Elétrica também devido ao crescimento e evolução dos equipamentos eletrônicos,

que cada vez mais fazem uso de processadores e outros circuitos integrados, que ao longo do tempo tornaram-se mais sensíveis à qualidade da energia elétrica da rede. Esta maior sensibilidade é uma consequência resultante da maior densidade de componentes nos circuitos integrados [5].

As redes de distribuição de energia elétrica ao ampliarem as suas redes elétricas, necessitaram ter um maior domínio sobre a causa e efeito da qualidade da energia elétrica de modo que se obtenha tanto uma melhor eficiência no serviço quanto estabilidade e segurança [4].

Os estudos referentes à qualidade da energia elétrica possibilitam que sejam implementadas normas referentes a índices de qualidade na energia elétrica gerada, distribuída e também na especificação de equipamentos elétricos. Tais normas podem ser internacionais (adotadas por diversos países) ou também podem existir normas nacionais com seus próprios índices e indicadores referentes à qualidade da energia elétrica. Atualmente no Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é a responsável pela normatização referente à qualidade da energia elétrica. As normas referentes a qualidade da energia elétrica serão abordadas ao longo deste capítulo.

### **2.1.3. Grandezas presentes**

Na qualidade da energia elétrica existem distúrbios de diversos tipos e diferentes durações que tratam da poluição existente no sinal, alteração de valores ao longo do tempo, entre outros.

#### **2.1.3.1. Limites de tensão**

Um sinal de tensão tende a sofrer oscilações na sua amplitude, porém tende a se manter dentro de uma tolerância projetada. Para preservar a estabilidade do



sistema e das mais diversas cargas elétricas dependentes da rede elétrica, o sinal de tensão obedecer limites de variação, sendo esta variação estipulada por nível de tensão de acordo com presente norma. A atual norma nacional estipulada pela ANEEL também cita os limites de variação de tensão de acordo com o seu respectivo nível. Observa-se na Figura 1 um gráfico demonstrando os níveis de tensão que a norma nacional classifica.

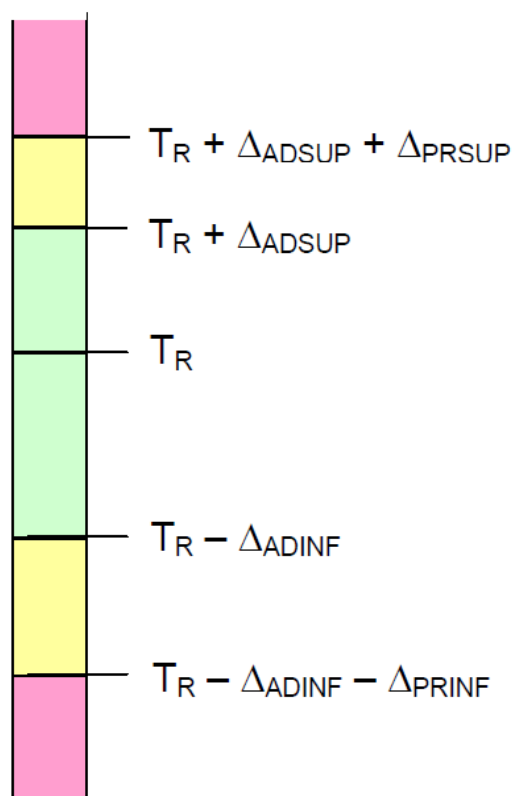


Figura 1. Faixas de tensão em relação à referência.

Através da Figura 1, observa-se a classificação do nível de tensão sob três níveis diferentes, sendo estes níveis classificados de acordo com a tensão de referência  $T_r$ , podendo resultar em níveis de tensão adequado, precários ou críticos. A classificação do nível de tensão é dado por medições em sequência e não são consideradas em pequenos intervalos de tempo. Em contrapartida, um distúrbio decorrente da variação abrupta na onda de tensão em uma das fases é

denominada cunha, sendo esta identificada por uma distorção do sinal de onda quando alguma fase realiza a transição por zero [2].

### 2.1.3.2. Sag e Swell

Os fenômenos Sag e Swell correspondem a uma variação de curta duração de tempo na amplitude da onda de tensão. Sag é o fenômeno atribuído ao achatamento da onda de tensão acima dos limites normais estipulados pela norma. Swell corresponde ao fenômeno que resulta no alongamento da onda de tensão acima dos limites estipulados pela norma. Pode-se observar uma imagem demonstrando o distúrbio de afundamento de tensão através da Figura 2.

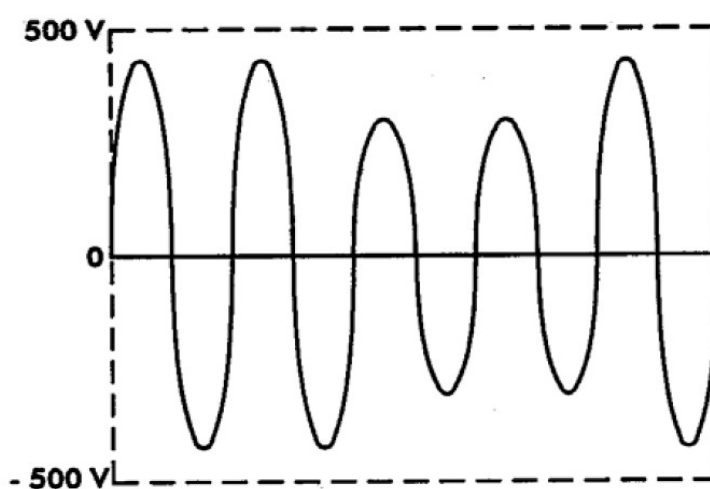


Figura 2. Gráfico demonstrando o distúrbio de achatamento de tensão.

A existência dos distúrbios Sag e Swell em redes de distribuição de energia elétrica ocorrem quando se modifica abruptamente a estrutura da rede elétrica, seja pelo chaveamento interno da rede, realocando grande quantidade de cargas elétricas, inserindo novas fontes geradoras, adicionando mais cargas elétricas ou devido a fenômenos externos que resultem em curto circuito em alguma seção da

rede de distribuição.

Os distúrbios Sag e Swell são considerados de baixa duração e definidos pela norma nacional quando a sua existência não se prolongue por mais de dois segundos. Caso contrário o distúrbio Sag ou Swell é classificado como Subtensão ou Sobretensão respectivamente. Existem também distúrbios de duração na ordem de micro a milissegundos na variação do sinal de tensão positivo ou negativo. Estes distúrbios são denominados surtos e resultam na criação de pontas na onda de tensão.

### **2.1.3.3. Harmônicas**

As distorções do sinal de tensão, decorrentes da presença de harmônicas na rede elétrica são os distúrbios mais frequentes atualmente. Sua existência decorre da presença de equipamentos eletrônicos que possuem carga não linear. Estes equipamentos se tornaram ao longo dos anos mais frequentes nas unidades consumidoras e acabam causando impacto cada vez mais significativo na rede de distribuição de energia elétrica. Pode-se observar através da Figura 3 um sinal distorcido por suas respectivas componentes harmônicas.

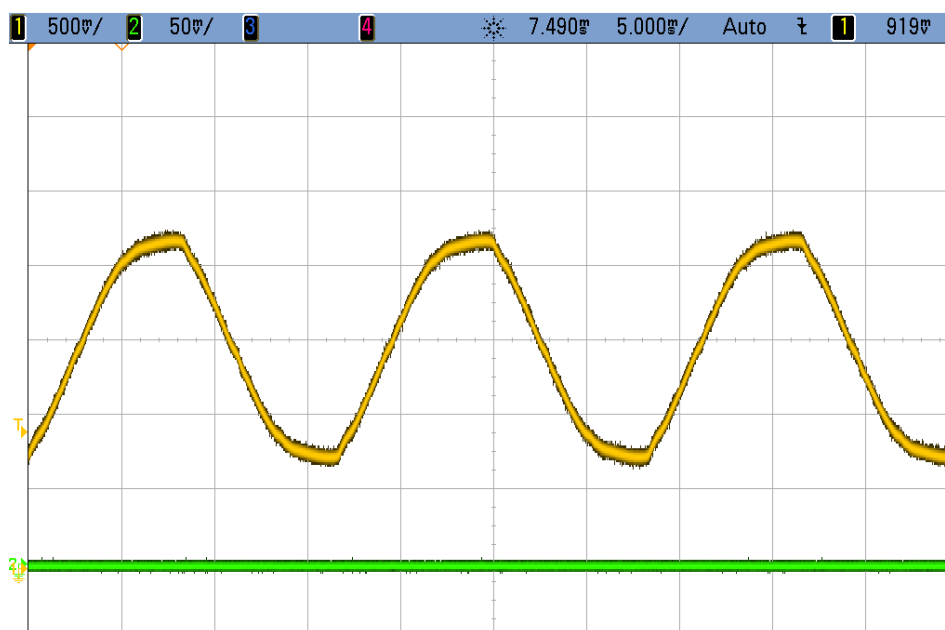


Figura 3. Sinal de tensão distorcida por componentes harmônicas.

As distorções harmônicas apresentam uma proporção decrescente ao longo dos maiores múltiplos da frequência fundamental e após a 25<sup>a</sup> harmônica não causam impacto significativo à rede elétrica de distribuição. A norma nacional especifica valores máximos da distorção harmônica total de acordo com a tensão no barramento. A distorção total baseia-se na proporção entre as amplitudes do sinal até a 25<sup>a</sup> harmônica em relação à frequência fundamental.

As distorções harmônicas causam danos aos equipamentos que se baseiam em sinais senoidais na alimentação, como transformadores e motores, que devido à sua presença acabam reduzindo a sua eficiência, aumentando as perdas e temperatura interna. Outro grande problema resultante da presença de harmônicas na rede elétrica ocorre na medição de tensão, corrente e potências elétricas na rede.

#### 2.1.3.4. Cintilação

Os distúrbios de cintilação afetam os equipamentos de iluminação e decorrem da oscilação de cargas elétricas presentes no circuito, resultando na variação da amplitude da tensão elétrica a uma baixa frequência, dentro de uma faixa perceptível ao olho humano. Inicialmente os estudos atribuíam o distúrbio de cintilação na iluminação a lâmpadas incandescentes, porém posteriormente foi constatada a existência deste distúrbio em lâmpadas fluorescentes [2]. Pode-se observar através da Figura 4 um gráfico demonstrando uma flutuação do sinal de tensão.

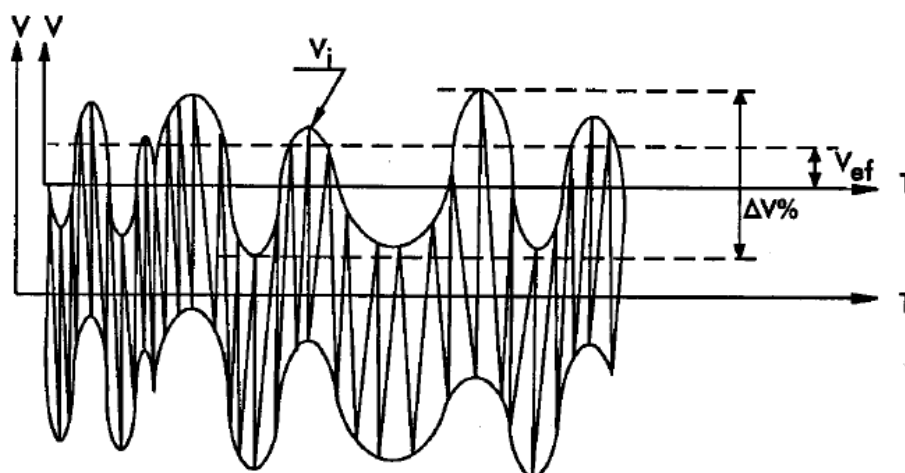


Figura 4. Gráfico demonstrando o distúrbio de flutuação de tensão.

A análise da existência do distúrbio de cintilação de tensão pode ocorrer através da variação do valor RMS do sinal de tensão na fase [3], porém existe a possibilidade do distúrbio ocorrer devido a influência da oscilação de uma componente harmônica da rede, já que o distúrbio de cintilação pode ocorrer sob uma variação baixa na potência elétrica dissipada pelo dispositivo de iluminação [2].

O distúrbio de cintilação de tensão apresenta a característica de causar desconforto em algumas pessoas, resultando no incômodo visual, perda de concentração e aumento no desgaste físico, o distúrbio de cintilação pode também causar um maior impacto, afetando o sistema nervoso central de modo a causar epilepsia.

## **2.2. Normas e recomendações referentes à qualidade da energia elétrica**

No âmbito da qualidade da energia elétrica, normatizações são conjuntos de regras que visam padronizar processos e índices de qualidade para dispositivos que trabalhem utilizando energia elétrica. Normatizações resultam do conjunto de estudos e pesquisas que possibilitam a estipulação destes índices dentro de certos limites de modo a preservar a integridade seja de um sistema elétrico ou um equipamento eletrônico.

Através do acesso das especificações descritas nas normas, as indústrias podem desenvolver projetos de equipamentos elétricos e eletrônicos baseados nestes índices descritos na norma que estipula limites de tensão a que o equipamento estará sujeito. Dentre as especificações descritas na norma constam limites tolerados nos distúrbios dos equipamentos quando conectado a rede elétrica.

As normatizações são desenvolvidas por grupos internacionais como a International Electrotechnical Commission (IEC), Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), entre outros. Além disso há normatizações válidas no território nacional desenvolvidas através de novos estudos e ajustes de índices presentes nas normas internacionais, modelando a norma internacional de modo que seja mais adequada ao cenário nacional.

Atualmente no Brasil, as normatizações são estipuladas por órgãos como a Agência Nacional de Normas Técnicas (ABNT), Operador Nacional do Sistema (ONS) e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O foco deste trabalho

consiste no âmbito de medidores de qualidade da energia elétrica aplicado às redes de distribuição, sendo descritos em sua maior parte através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST).

### **2.2.1. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**

O PRODIST foi desenvolvido pela ANEEL visando regulamentar, padronizar, responsabilizar e controlar a qualidade no processo de distribuição de energia elétrica no Brasil.

Como descrito em sua cartilha [6], estes procedimentos são conjuntos de normas, regras e especificações que disciplinarão formas, condições, responsabilidades e penalidades. Destaca-se na medição de energia elétrica o estabelecimento de critérios mínimos, procedimentos e indicadores referentes à qualidade da energia elétrica.

Atualmente o PRODIST é composto por nove módulos, os quais são descritos abaixo:

Módulo 1 – Introdução;

Módulo 2 – Planejamento;

Módulo 3 – Planejamento de Expansão de Sistemas de Distribuição;

Módulo 4 – Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição;

Módulo 5 – Sistemas de medição;

Módulo 6 – Informações Requeridas e Obrigatórias;

Módulo 7 – Cálculo nas Perdas de Distribuição;

Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica;

Módulo 9 – Ressarcimento de danos elétricos.

### **2.2.1.1. Contexto histórico**

Segundo Mattar (2010), a criação do PRODIST ocorreu inicialmente em 1998 durante o Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico (RESEB), que indicou a criação de um documento que possibilitasse uma regulamentação de modo a padronizar e controlar os procedimentos de distribuição no país. A partir desta recomendação, a ANEEL disponibilizou um documento base preliminar desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). A partir deste documento prévio, agentes do setor elétrico foram escolhidos para analisar e avaliar os itens contidos neste documento. A primeira versão base do PRODIST foi estruturada em oito módulos que correspondem aos módulos um a oito atualmente.

A ANEEL, ao obter em 2001 a sua primeira versão base do PRODIST, realizou através de licitação a contratação de um grupo especializado para estudo e implementação dos itens contidos neste documento base desenvolvido pelo CEPEL. Deste trabalho de pesquisa e estudo, a ANEEL obteve um documento que após os ajustes necessários pela legislação, foi apresentado em fevereiro de 2008 através de uma audiência pública. Esta audiência possibilitou a ANEEL receber contribuições para realizar os devidos ajustes e complementações. Em dezembro de 2008 foi regulamentada a primeira versão aprovada dos Procedimentos de distribuição de energia elétrica no setor elétrico nacional.

Desde a aprovação de sua primeira versão, a ANEEL realizou outras audiências públicas para obter novas contribuições e ajustes, modificando e atualizando os módulos presentes sob novas resoluções normativas. Atualmente o PRODIST encontra-se na sua resolução normativa 499/2012, a qual acresceu o módulo nove ao conjunto.



### 2.2.1.2. Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica

Uma das principais características do módulo oito do PRODIST, é regulamentar em seções distintas a qualidade do produto energia elétrica e a qualidade do serviço energia elétrica. O oitavo módulo do PRODSIT encontra-se em sua quarta revisão atualmente [7], validada após a resolução normativa 469/2011 e entrando em execução a partir de dezembro de 2012.

Dentre as especificações e regulamentações descritas na seção que aborda a qualidade do produto energia elétrica, encontram-se: a caracterização e discriminação de fenômenos decorrentes durante o processo de distribuição de energia; estabelecimento de parâmetros e quantização de níveis de tensão adequada, precária e crítica; padronização dos termos técnicos referentes tanto aos fenômenos decorrentes quanto aos parâmetros existentes no produto qualidade da energia elétrica. Quanto ao serviço de energia elétrica, as especificações apresentam metodologias para apuração dos indicadores de continuidade e dos prazos de atendimentos a situações emergenciais [7].

No quesito qualidade do produto energia elétrica, a ANEEL salienta que a abrangência destes índices referentes à qualidade da energia elétrica se aplica aos consumidores supridos sob qualquer nível de tensão, sendo considerados os aspectos seguintes:

- Tensão em regime permanente;
- Fator de potência;
- Desequilíbrio de tensão;
- Flutuação de tensão;
- Variações de tensão de curta duração;

- Variação de frequência.

Os itens acima citados são especificados sobre a sua definição e metodologia de obtenção sendo isto um fator de grande importância para equipamentos medidores de qualidade da energia elétrica. Neste documento também constam um conjunto de itens que discriminam as especificações mínimas para a instrumentação e metodologia de medição. Dentro destas especificações encontram-se taxa de amostragem, janela de aquisição e limites físicos da obtenção dos dados. Pode-se observar os itens citados através da Tabela 1.

Requisito	Quantidade
Taxa amostral	16 amostras ciclo
Intervalo de aquisição	12 a 16 ciclos
Resolução mínima do conversor AD	12 bits
Erro máximo de medição	1%

Tabela 1. Requisitos mínimos quanto ao equipamento de medição.

Através da aquisição dos sinais de tensão e corrente de acordo com a Tabela 1, torna-se possível obter os valores de tensão e corrente RMS, potência ativa, reativa e aparente. O módulo oito do PRODIST também especifica a metodologia de obtenção do fator de potência ou fator de deslocamento, o qual pode ser observado através das equações 1 e 2.

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (1)$$

Onde:

fp = Fator de potência.

P = Potência ativa.

Q = Potência reativa.

$$fp = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (2)$$

Onde:

fp = Fator de potência.

EA = Energia ativa.

ER = Energia reativa.

Observa-se que os métodos estipulados no PRODIST quanto à obtenção do fator de potência não especificam o cálculo sobre o sinal fundamental ou acrescentando a parcela existente nas harmônicas do sinal.

Dentro do módulo oito do PRODIST encontra-se a explanação e especificação sobre as harmônicas presentes no sinal de tensão. A distorção harmônica total é mostrada através da equação 3.

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

DHT = Distorção harmônica total.

V1 = Tensão na frequência fundamental.

$V_h$  = Tensão na frequência requerente.

O PRODIST especifica que os cálculos referentes aos harmônicos no sinal devem ser obtidos e computados no mínimo até a 25ª harmônicas do sinal fundamental. Dentro destas especificações do PRODIST, não consta qual metodologia deve ser utilizada para obter-se o espectro do sinal.

### 2.3. Medidores de qualidade da energia elétrica

O simples processo de transferir a energia elétrica resulta em perdas sob um cenário real além de a própria carga poder resultar na poluição da rede elétrica, pois os meios condutores podem ser considerados uma carga conectada em série. É necessário que haja controle da qualidade da rede de energia elétrica que cada vez mais requer a necessidade de suprir uma demanda maior, sendo este controle realizado com o auxílio de equipamentos voltados a esta atividade. Pode-se observar um modelo de medidores de qualidade da energia elétrica através da Figura 5.



Figura 5. Equipamento medidor de qualidade da energia elétrica modelo FST-3561.

Os equipamentos medidores de qualidade da energia elétrica baseiam-se no registro e análise do sinal de entrada de tensão e corrente elétrica, podendo ser utilizados nos mais diversos cenários como equipamentos de aplicação em redes de distribuição de energia elétrica, indústrias, cargas específicas tanto em indústrias, comércios e residências, entre outros. Tais equipamentos utilizam conceitos de processamento digital de sinais, quantificando seus registros através de métodos especificados por órgãos internacionais (IEC, IEEE) e nacional (ANEEL). Pode-se observar a aplicação dos medidores de qualidade da energia elétrica através da Figura 6.



Figura 6. Medidor de qualidade da energia elétrica sendo utilizado.

Este crescimento da proporção de equipamentos eletrônicos, aliado ao aumento da demanda de energia elétrica, resultou em um maior volume de perdas na transmissão além de criar a necessidade de que novas fontes de energia elétrica fossem criadas e interligadas ao sistema elétrico de potência no Brasil. Ao passo que o sistema elétrico amplia, necessita-se que haja um maior controle tanto da qualidade do serviço quanto da estrutura do sistema elétrico. Através do uso de

equipamentos medidores de qualidade da energia elétrica é possível realizar o registro de consumo, fenômenos indesejados no local da análise, levantamento e projeção de curvas típicas de carga e distorção presente devido a cargas elétricas locais. Tais dados auxiliam no desenvolvimento de projeto de correções ou ampliações na planta elétrica presente na indústria e conseqüentemente evitando multas e penalidades.

Os equipamentos medidores de qualidade da energia elétrica ganharam notoriedade e demanda no momento que se realizou a implementação dos conceitos de qualidade de produto e qualidade de serviço referente a energia elétrica, descritos no módulo oito do PRODIST, o qual estipulou os requisitos mínimos para a qualidade da distribuição de energia elétrica. Assim se tornou ainda mais necessária a ampliação de investimentos no desenvolvimento de pesquisas e levantamento de dados nas redes de distribuição de energia elétrica de modo a desenvolver novas soluções na distribuição, antecipação a eventuais ocorrências, redução das perdas existentes no processo de distribuição de energia elétrica e também no levantamento da demanda prevista ao longo do tempo.

### **2.3.1. Aplicabilidade**

A aplicabilidade dos equipamentos medidores de qualidade da energia elétrica consiste, na sua maior parte, na atuação como dispositivos de registro de tensão, corrente, harmônicas, demanda e outros fenômenos durante um longo intervalo de tempo, de modo que estes valores registrados possam ser analisados. Um exemplo de aplicação de medidores de qualidade da energia elétrica consiste no levantamento de curvas típicas de cargas em uma seção da rede de distribuição de energia elétrica, podendo ser utilizados os medidores realizando o registro de consumo presente em um transformador de distribuição durante dias ininterruptamente, resultando em um valor médio da demanda elétrica naquele segmento da rede elétrica e também nas oscilações da tensão entregue pela empresa responsável. Estes dados obtidos através do uso de medidores de

qualidade da energia elétrica permite que seja possível realizar modificações na rede de modo que haja redução nas perdas decorrentes da transmissão ou também devido a uma possível falha na transmissão de energia elétrica.

A maior parte dos casos a aplicação dos equipamentos medidores de qualidade da energia elétrica nas redes de distribuição é localizada próxima a transformadores de distribuição, resultando quase sempre em locais de difícil acesso. Atualmente, com a popularização das redes de telefonia móvel, uma alternativa viável usada pelas empresas distribuidoras de energia elétrica no país é a integração do equipamento medidores de qualidade da energia elétrica nas redes de telefonia celular utilizando a tecnologia GPRS. A aplicabilidade desta tecnologia junto aos equipamentos medidores viabiliza a importação de dados dos equipamentos através de uma conexão direta, economizando tempo e custos de logística das empresas distribuidoras de energia elétrica.

A aplicabilidade dos equipamentos de medição de qualidade da energia elétrica permite não somente que as companhias de distribuição realizem levantamento de dados da rede, mas também que as indústrias realizem levantamento sobre a qualidade da energia elétrica presente na sua rede interna. As especificações do PRODIST determinam índices máximos de harmônicas e fator de potência mínimo a serem preservados pela indústria, de modo que não afete drasticamente a rede de distribuição que fornece a energia elétrica.

Devido ao fato que uma empresa pode obter uma redução significativa da demanda através da melhora na qualidade da energia elétrica, criou-se uma área de mercado de consultoria de redes de energia elétrica, a qual através do uso de equipamentos de medição de qualidade da energia elétrica, a qual analisa possíveis intervenções de modo a melhorar a qualidade da energia elétrica.

### **2.3.2. Levantamento de dados**

Diversas pesquisas baseadas na análise do consumo dos clientes presentes nas redes de distribuição de energia elétrica, visando controle de qualidade na energia elétrica [9] quanto para reconfiguração otimizada da rede [10][11] requerem que os equipamentos medidores de qualidade realizem as medições durante longos intervalos de tempo interruptamente, sendo necessário então transferência da memória de massa presente no equipamento pois o tempo de análise dos equipamentos pode sobrecarregar a sua memória disponível, afetando a análise dos resultados.

Para a obtenção destes dados, usualmente são utilizadas equipes técnicas para realizar esta tarefa já que em sua maior parte os equipamentos medidores de qualidade da energia elétrica encontram-se em locais de difícil acesso na rede de distribuição, próximos a redes de média ou alta-tensão. Tais processos de aquisição de dados acabam tornando indisponível temporariamente equipes técnicas contratadas pelas empresas de distribuição de energia elétrica, ocasionando um maior custo operacional. Atualmente o processo de telemetria e importação de dados a distância tem facilitado este processo de aquisição de dados. A aquisição de dados e leitura em tempo real à distância tem se tornado cada vez mais comum durante o levantamento de dados, sendo possível atualmente pelo fácil acesso à telefonia utilizando tecnologia GPRS.

### **2.4. Redes de distribuição de energia elétrica**

Dentre os principais componentes presentes nos sistemas elétricos de potência, as redes de distribuição contribuem na possibilidade de disponibilizar em grandes áreas o acesso à energia elétrica. Localizam-se no extremo oposto à geração de energia elétrica, sendo interligadas na maioria dos casos por linhas de transmissão de energia elétrica. Pode-se observar um exemplo de uma rede de distribuição de energia elétrica através da Figura 7.



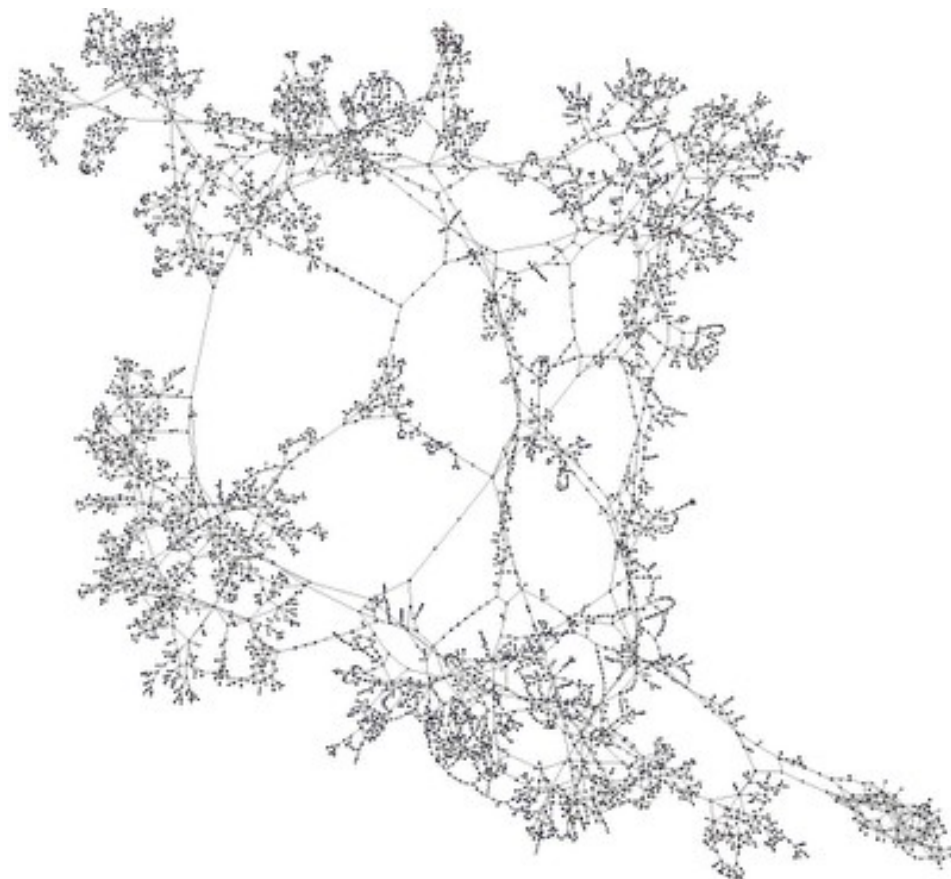


Figura 7. Exemplo de estrutura de uma rede de distribuição de energia elétrica.

As maiores unidades geradoras de energia elétrica, como as usinas hidroelétricas, se encontram em locais pontuais e o fato também de que se mostra inviável na maioria dos casos uma indústria ou consumidor doméstico obter a sua própria estrutura de geração de energia elétrica. Desta forma, as redes de distribuição viabilizam o acesso à energia elétrica para diversas unidades consumidoras, reduzindo custos e viabilizando uma melhor qualidade de serviço. Sua estrutura consiste basicamente no conjunto de diversos componentes elétricos interligados entre si, de modo a fornecer energia elétrica aos seus consumidores presentes nas seguintes áreas:

- Urbanas: Atendendo residências, comércios, pequenas indústrias e serviços

públicos;

- Industriais: Atendendo consumidores sob os mais diversos níveis de demanda;
- Rurais: Atendendo tanto aos clientes de perfil de consumo doméstico quanto os clientes que necessitam uma alta demanda de energia elétrica para uso na agricultura e pecuária.

#### **2.4.1. Visão geral**

A estrutura de uma rede de distribuição de energia elétrica, formada por um conjunto de seções principais, tende a apresentar uma forma geométrica radial, sendo que entre os extremos das suas seções principais encontram-se as subestações da rede de distribuição.

O conjunto de suas seções principais são denominadas trunca da rede de distribuição de energia elétrica e nestas seções encontram-se equipamentos utilizados para proteção, regulação, controle e automação da rede de distribuição. Uma seção da trunca da rede de distribuição tende a atuar sobre um nível de tensão média, situado entre 13,8kV e 23kV de tensão de linha, porém também pode transmitir a energia elétrica sob diferentes níveis de tensão, de modo a suprir altas demandas como no caso de indústrias de grande porte.

As seções secundárias presentes nas redes de distribuição de energia elétrica, denominadas ramais, visam ramificar e ampliar a cobertura dada pela seção da trunca. Seus níveis de tensão abrangem média e baixa tensão, devido ao fato que nos extremos do ramal encontram-se transformadores de distribuição que rebaixarão a tensão entregue ao consumidor.

### 2.4.2. Componentes principais em redes de distribuição de energia elétrica

Os componentes elétricos utilizados em redes de distribuição de energia elétrica apresentam diferentes funcionalidades, tais como:

- Rebaixar o alto nível de tensão proveniente das linhas de transmissão através de alimentadores, os quais ficam presentes nas subestações de energia elétrica;
- Rebaixar ou elevar o nível de tensão de acordo com a sua necessidade através dos transformadores de distribuição;
- Atuar na estabilização da tensão ou realizar uma interrupção temporária e restabelecimento da distribuição de energia elétrica caso haja algum fenômeno temporário, o qual possa ser considerado um curto circuito na rede de distribuição. Estas ações são realizadas pelo religador;
- Realizar através de chaves seccionadoras, manobras que causem a interrupção permanente em setores da rede de distribuição de energia elétrica. Tais setores podem ser ramais ou até mesmo nas seções da trunca da rede de distribuição;
- Interromper rapidamente a distribuição de energia elétrica em uma seção da rede de distribuição caso haja algum curto circuito permanente decorrente de algum fenômeno externo. Estas interrupções permanentes são realizadas através de chaves fusíveis;
- Atuando na regulação de tensão através da correção do fator de potência na rede de distribuição de energia elétrica, os bancos de capacitores são alternativas de menor custo para regulação de tensão.

### **3. DISPOSITIVO MICROCONTROLADO PARA MEDIÇÃO DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

Neste capítulo encontra-se a explanação sobre o projeto, descrevendo os objetivos presentes e a motivação para o desenvolvimento deste projeto. Posteriormente aborda-se a estrutura dos itens presentes e implementados, discriminando com maior detalhes cada item.

#### **3.1. Objetivo**

O objetivo principal deste projeto consiste em implementar e avaliar uma nova configuração de hardware para um medidor de qualidade da energia elétrica, visando um modelo de baixo custo através de uma menor complexidade de hardware. Esta configuração visa facilitar uma disseminação deste novo modelo de medidor de qualidade da energia elétrica nas redes de distribuição, com a sua instalação em transformadores de distribuição e registrando valores de fase de 127V, de modo que o levantamento de dados sobre os fenômenos presentes no âmbito de qualidade da energia elétrica seja facilitado pelo menor custo de implementação.

Como objetivo secundário consta a implementação de um software registrador das medições que possibilite a medição em tempo real à distância e o registro destas medições obtidas. Este software visa a possibilidade da telemetria do dispositivo microcontrolado implementado neste projeto, realizando uma tarefa similar aos módulos GPRS utilizados em equipamentos medidores de qualidade da energia elétrica.

#### **3.2. Motivação**

A motivação deste projeto consiste na análise do impacto das medições que

são obtidas e do desempenho do microcontrolador sob a configuração apresentada neste projeto. O microcontrolador utilizado neste projeto consta de um conversor AD interno que apresenta uma resolução abaixo do estipulado pela norma nacional, descrito no módulo oito do PRODIST, sendo então analisado o erro final na medição gerada pelo microcontrolador. Este microcontrolador consiste em um modelo de entrada da sua respectiva classe, trabalhando a uma menor frequência em comparação com outros modelos da mesma classe. Sobre o desempenho do microcontrolador, será avaliado o processamento dos dados dentro do seu ciclo de trabalho, sendo que este microcontrolador deverá realizar uma quantidade considerável de cálculos com valores em ponto flutuante sem que o mesmo disponha de uma unidade lógica aritmética com suporte em hardware a cálculos de ponto flutuante.

A utilização deste microcontrolador decorreu da disponibilidade atual para a implementação do protótipo, sendo que o mesmo apresenta o perfil de baixo custo e desempenho estimado dentro das necessidades do projeto. Ao utilizar o microcontrolador presente, optou-se por não cumprir o requisito da norma atual que delimita a resolução mínima de 12 bits para o conversor AD presente no projeto, porém esta opção permite a análise dos resultados obtidos em comparação com a proporção máxima de erro estipulada pela norma. Caso os resultados obtidos sob este perfil de projeto encontrarem-se dentro do erro aceitável, basta alterar o modelo de microcontrolador para uma versão com conversor AD de resolução compatível com a norma.

### **3.3. Visão geral do projeto**

Este projeto consiste nas seguintes etapas: implementação de um circuito elétrico de condicionamento do sinal de entrada; aquisição das medições; tratamento das medições por métodos matemáticos; determinação dos resultados; transferência dos resultados obtidos via internet. Pode-se observar o protótipo desenvolvido em conjunto ao kit de desenvolvimento utilizado no projeto através da

Figura 8.

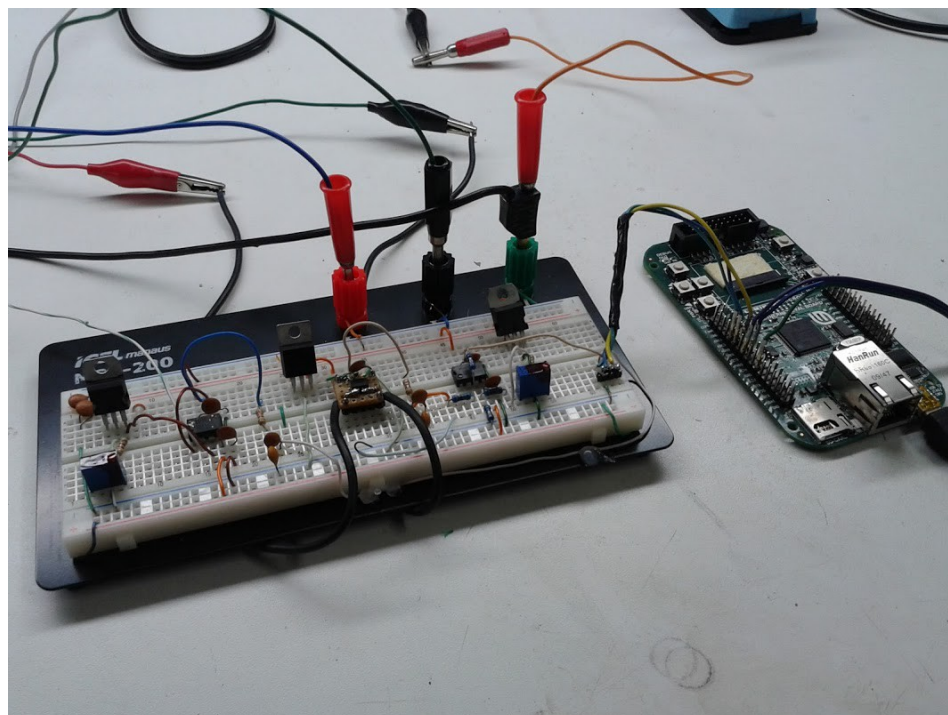


Figura 8: Protótipo desenvolvido junto ao kit de desenvolvimento.

O foco principal deste projeto encontra-se nas etapas de importação e tratamento dos sinais de entrada do dispositivo microcontrolado. Este tratamento deverá estar dentro das especificações da norma nacional, fazendo uso auxiliar dos conceitos presentes nas normas internacionais. Estas primeiras etapas serão implementadas no protótipo de um dispositivo microcontrolado para medição de qualidade da energia elétrica. Em uma segunda etapa, a transferência dos dados obtidos via internet para o software de registro de medições.

### 3.4. Trabalhos similares

Ao desenvolver uma solução para a medição de grandezas referentes a energia elétrica, tende-se a preservar requisitos mínimos referentes a medição

destas grandezas como tensão, corrente, potências ativas, reativas e aparentes, harmônicas, entre outras grandezas presentes neste escopo. Tais requisitos mínimos estão presentes no módulo oito do PRODIST, mostrados anteriormente. A adequação destes requisitos torna o medidor de qualidade da energia elétrica apto a ser homologado pela ANEEL. Os requisitos citados no módulo oito do PRODIST possibilitam o projeto e desenvolvimento de equipamentos de medição das grandezas presentes na energia elétrica através de diferentes soluções já que o PRODIST não especifica o modo de construção do equipamento.

As especificações presentes no módulo oito do PRODIST possibilitam diferentes perfis de projetos, disponibilizando ao mercado modelos diferentes de equipamentos, Entre estas soluções presentes encontram-se alternativas mais robustas a fim de permitir a qualificação do projeto como um equipamento de medição de qualidade da energia elétrica, através da adoção de processador de sinal digital (DSP) em conjunto com um microcontrolador [12]. O microcontrolador atua como um gerenciador de tarefas do equipamento, adquirindo os resultados das medições processadas pelo DSP. Estes modelos apresentam uma grande performance voltada a esta atividade, porém apresentam um custo maior na produção deste projeto. Tais equipamentos visam aplicações específicas que necessitam análise de transientes de curta duração ou configurações que exijam uma grande demanda de cálculos.

Abordando uma alternativa diferente, a qual adota o uso da tecnologia de programação lógica na estrutura do processador, através do uso de dispositivos lógicos programáveis [13], obtêm-se uma eficiência maior para o processamento das medições além de possibilitar uma estrutura de hardware específica para as situações previstas pelo equipamento. Tal modelo de equipamento possibilita uma boa performance e versatilidade para eventuais alterações no projeto, porém requer maior tempo de implementação deste tipo de medidor.

Uma configuração de menor complexidade baseia-se no uso do microcontrolador para processamento das aquisições dos sinais de entrada [14]. Tais modelos aplicam-se para situações nas quais não haja a necessidade de um

grande processamento de dados, como levantamento de dados durante um longo tempo.

Como mostrado acima, os projetos consistem em equipamentos similares porém sob soluções diferentes que resultam em diferentes aspectos técnicos e performance. Analisando sob um perfil comercial, avalia-se a complexidade do projeto e conseqüentemente o nicho de mercado que será explorado pela solução desenvolvida.

### **3.5. Comparação entre um medidor de qualidade da energia elétrica e o projeto desenvolvido**

No mercado de medidores de qualidade da energia elétrica, encontram-se modelos de alta performance capaz de calcular e registrar diversos distúrbios de curta duração assim como cálculos que requerem maior poder de processamento. Com isto, é possível a realização destas tarefas através do uso de processadores de sinal digital (DSPs) em conjunto com um conversor analógico digital que adquire os valores de tensão e corrente a serem processados. Pode-se observar um diagrama de blocos demonstrando uma estrutura de medidores de qualidade da energia elétrica através da Figura 9.



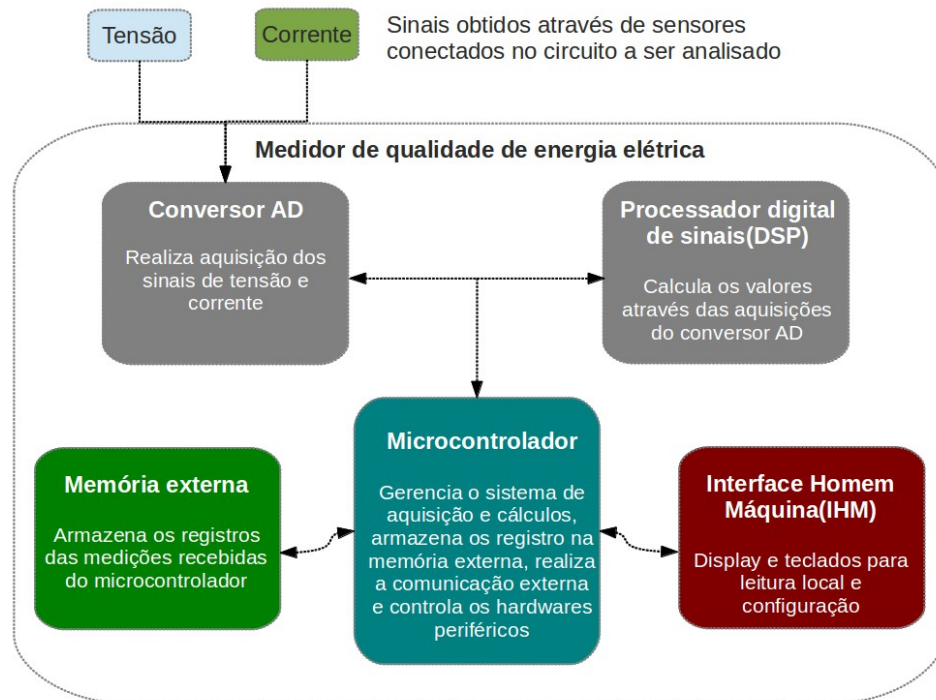


Figura 9. Estrutura de um medidor de qualidade da energia elétrica.

Através da Figura 9, observa-se que o microcontrolador está interligado aos blocos periféricos do equipamento, atuando como peça fundamental do medidor. Sua função é controlar o funcionamento do equipamento, possibilitar a intercomunicação dos blocos periféricos e intervir no funcionamento do equipamento caso seja alterada a sua configuração através de sua IHM.

O processamento de dados é realizado através do uso de um processador digital de sinal em conjunto com conversor AD dedicado. Pelo fato que o DSP apresenta uma estrutura otimizada ao processamento de dados, o equipamento consegue analisar diversas grandezas presentes na qualidade da energia elétrica, dentre as quais existem transientes de curta duração que requerem um sistema de aquisição de alta velocidade para serem registrados.

Por apresentar a característica de registrar um grande volume de dados, os equipamentos medidores de qualidade da energia elétrica fazem uso de memória externa ao seu microcontrolador. A transferência destes dados armazenados

ocorre de modo local ou a distância.

A estrutura do protótipo desenvolvido neste projeto consiste em uma complexidade menor, sendo o processo de aquisição e processamento de dados integrados ao microcontrolador utilizado. Pode-se observar um diagrama de blocos do protótipo desenvolvido neste projeto através da Figura 10.

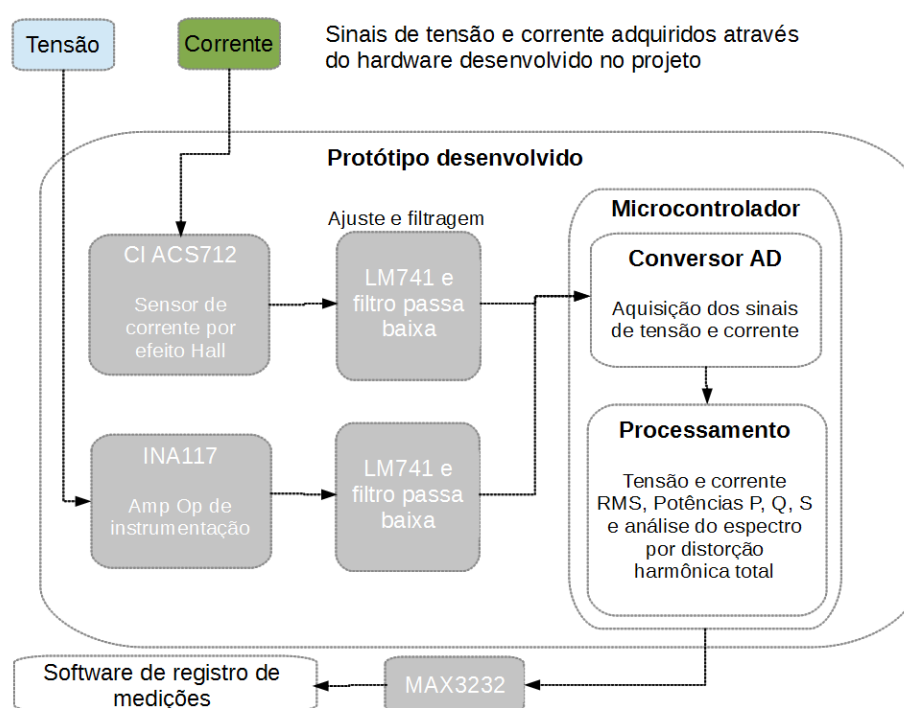


Figura 10. Estrutura do protótipo desenvolvido.

Comparando a estrutura presente entre as figuras 9 e 10, observa-se que a funcionalidade do microcontrolador no protótipo engloba as funcionalidades do DSP e conversor AD dedicado presentes na estrutura mostrada pela Figura 9. Observa-se também que no protótipo desenvolvido não há a presença dos blocos de memória de massa e IHM.

No protótipo desenvolvido, o microcontrolador realizará a tarefa de aquisição, processamento dos dados e comunicação externa com o software de

registro de medições. Ao integrar tais funcionalidades no microcontrolador, obtêm-se o perfil de hardware menos complexo e de menor custo, que este projeto visa implementar.

O protótipo desenvolvido baseia-se no processo de comunicação a distância, transferindo diretamente os dados para o software de registro de medições. Através desta metodologia de comunicação a distância, torna-se possível a simplificação do projeto sem memória de massa e interface homem-máquina, simplificando e reduzindo os custos do projeto.

### **3.6. Dispositivo microcontrolado**

O desenvolvimento deste protótipo baseia-se na utilização de um kit de desenvolvimento EKI-LM3S6965, o qual faz uso de um microcontrolador ARM Cortex-M3 modelo LM3S6965 desenvolvido pela empresa Texas Instruments. Este protótipo atua coletando as amostras do sinal de entrada de tensão e corrente no circuito sendo previamente ajustados à faixa de aquisição do conversor AD presente no microcontrolador através do uso do circuito de condicionamento de sinal, reguladores de tensão e filtros. Pode-se observar uma imagem do kit de desenvolvimento utilizado neste projeto através da Figura 11.



Figura 11. Kit de desenvolvimento EK-LM3S6965 utilizado neste projeto.

O protótipo desenvolvido visa através do uso do microcontrolador ARM Cortex-M3, realizar a aquisição dos registros de tensão e corrente sob a carga elétrica e através destes registros obter os seguintes grandezas elétricas:

- Tensão RMS;
- Corrente RMS;
- Potência ativa, reativa e aparente;
- Fator de deslocamento sobre a frequência fundamental;
- Distorção Harmônica Total (DHT) do sinal de tensão;

Ao utilizar o conversor AD presente na estrutura do próprio microcontrolador para realizar as medições de tensão e corrente, acredita-se que seja possível obter precisão nas medições sem a necessidade de hardware adicional, como no caso de utilizar um conversor AD externo para obter as medições de tensão e corrente

de fase, resultando em processos separados.

Como característica principal, o projeto visa realizar o processo de aquisição e tratamento das medições utilizando a estrutura disponível internamente no microcontrolador. Porém, será necessário também o ajuste do sinal de tensão e corrente dentro da faixa de aquisição do conversor AD interno ao microcontrolador, sendo então implementado neste projeto um circuito elétrico de ajuste e filtragem dos sinais de tensão e corrente, permitindo que seja analisado um sinal até 3kHz.

### **3.7. Software de registro de medições**

O software desenvolvido neste projeto consiste em um serviço de comunicação entre um servidor e cliente através do uso de protocolos TCP/IP, permitindo que seja possível a comunicação a distância entre o protótipo desenvolvido e o servidor, armazenando os registros em tempo real.

O software de telemetria foi desenvolvido com o auxílio do pacote Boost [22], que consiste em um conjunto de diversas bibliotecas desenvolvidas em linguagem C++, como:

- Asio = Biblioteca para desenvolvimento de aplicações que necessitam de interface de rede e acesso de baixo nível de I/O, baseada em modelo de acesso assíncrono [21].
- Date Time = Biblioteca baseada em conjunto de instruções de acesso às datas, horários e tempo [22].

A decisão de utilizar a biblioteca Boost no desenvolvimento do software de telemetria decorreu pelos seguintes fatores: o software desenvolvido fazendo uso das funções presentes nas bibliotecas gera um código-fonte multiplataforma, flexibilizando a implementação do software nos sistemas operacionais Windows ou Linux; a biblioteca apresenta inúmeras funções que facilitam o desenvolvimento

das funcionalidades projetadas; presença de uma vasta comunidade de usuários e documentação técnica sobre as bibliotecas presentes; conhecimento prévio relacionado a algumas das bibliotecas presentes no desenvolvimento do software de telemetria.

O software visa substituir primeiramente a implementação do bloco de comunicação através do uso de um módulo GPRS, presentes em certos equipamentos medidores de qualidade da energia elétrica. Esta substituição se demonstra viável em um primeiro momento porque enquanto não há um protótipo apto a realizar testes em campo, utiliza-se a estrutura da rede local presente no laboratório de testes utilizado neste projeto, possibilitando o uso de apenas um computador, através de um servidor LAN via conexão de Loopback ou também fazendo uso de uma rede WAN, armazenando os registros em outro computador através do uso de serviços de IP estático ou redirecionador de DNS.

O software de telemetria é dividido entre servidor e cliente, sendo este software cliente executado no computador que está se comunicando com o protótipo desenvolvido, recebendo os registros já processados pelo protótipo desenvolvido através da porta serial e retransmitindo ao servidor via LAN ou WAN, de acordo com melhor viabilidade da transmissão dos dados durante a realização dos testes de funcionamento. Outra funcionalidade do software cliente encontra-se em iniciar a conexão com o software servidor após a configuração da porta serial presente no computador.

O software servidor realiza inicialmente a tarefa de receber as solicitações de conexão vinda através do software cliente. A cada conexão válida entre servidor e cliente, é criado um arquivo de registro para armazenamento das medições realizadas pelo protótipo desenvolvido e repassadas através do software cliente de modo que seja possível analisar posteriormente as medições obtidas durante os testes.

### 3.8. Metodologia de desenvolvimento do projeto

A metodologia de desenvolvimento deste projeto iniciou pela pesquisa sobre os conceitos:

- Fundamentos presentes na área de qualidade da energia elétrica, nos quais constam como de maior importância para este projeto os distúrbios que ocorrem no sinal de tensão elétrica;
- Pesquisa e análise sobre projetos de medidores de qualidade da energia elétrica similares ao projeto proposto;
- Normas presentes na área de medidores de qualidade da energia elétrica que especifiquem metodologias de cálculos e requisitos técnicos para realizar a análise do sinal de tensão e corrente;
- Estudo da norma nacional vigente PRODIST – Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica, que especifica e trata sobre os requisitos de Instrumentação e metodologia de medição;
- Estudo das bibliotecas necessárias para implementação do software de processamento de dados no microcontrolador e software de registro de medições;

Após o estudo sobre fundamentos necessários, realizou-se a implementação do software para processamento de dados no microcontrolador e software de registro de medições. Em paralelo à implementação do software foi projetado e implementado o circuito necessário para aquisição dos dados pois o projeto visa realizar medições de valores de tensão a 127V na rede elétrica presente na cidade de Porto Alegre.

O processo de implementação do circuito elétrico e do software presentes neste projeto, assim como os testes realizados e a análise dos resultados obtidos são descritos detalhadamente nos capítulos posteriores deste trabalho.

## **4. DESENVOLVIMENTO**

Neste capítulo encontra-se a explanação sobre o desenvolvimento do protótipo e software propostos neste trabalho, abordando o circuito elétrico desenvolvido, a metodologia dos cálculos presentes no microcontrolador e funcionamento do software de registro de medições.

### **4.1. Circuito elétrico**

A estrutura do protótipo desenvolvido neste projeto consiste em seis blocos: sinal de tensão; sinal de corrente; filtragem dos sinais; comunicação, aquisição e sinais auxiliares. Nestes blocos estão distribuídas as funcionalidades de regulagem, ajuste e filtragem dos sinais de entrada, interface de comunicação externa, importação dos sinais a serem processados e sinais de tensão auxiliares. O circuito elétrico desenvolvido pode ser observado através do Figura 12.



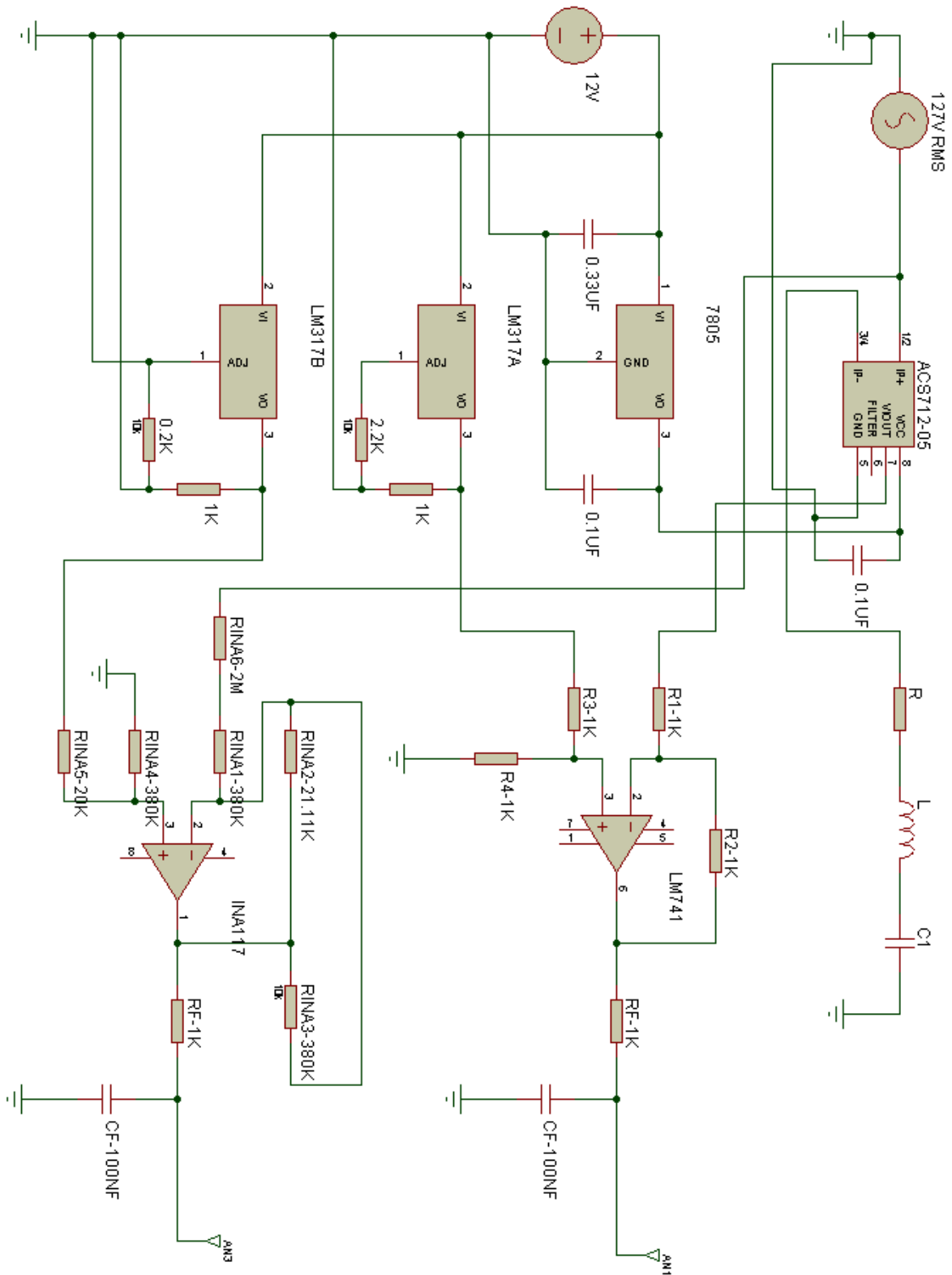


Figura 12: Circuito implementado para aquisição de dados.

#### 4.1.1. Sinal de tensão

A necessidade neste projeto de obter a medição do valor de fase presente na rede elétrica situada a 127V conflita com a limitação dos valores de entrada no microcontrolador entre 0 a 3V [16], sendo necessária a regulação do sinal de tensão entre esta faixa de entrada. Uma solução encontrada para realizar este ajuste consiste na utilização de um amplificador diferencial de alto ganho comum, desenvolvido pela Texas Instruments. O modelo utilizado no projeto foi o circuito integrado INA117p.

Dentre as características descritas na documentação oficial [17], observa-se que o CI INA127p apresenta um erro de ganho máximo muito baixo e também uma razão de rejeição de modo comum com um valor considerável. Tais características tornam o circuito integrado uma alternativa válida para o projeto do dispositivo microcontrolado. Pode-se observar o circuito elétrico presente no CI INA127p através da Figura 13.

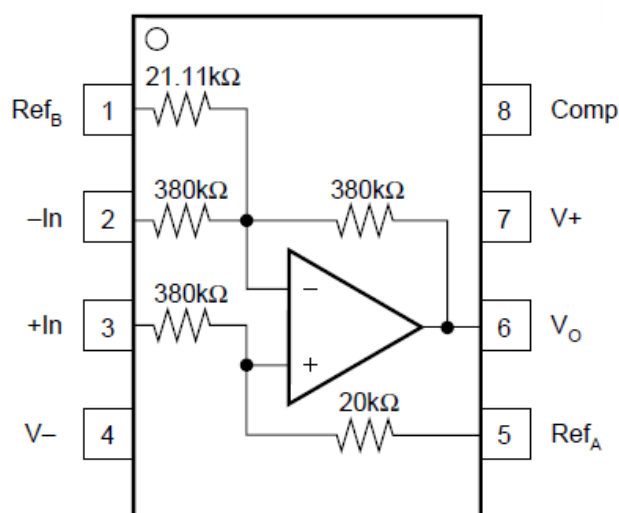


Figura 13. Circuito elétrico presente no CI INA117.

Consultando o datasheet disponibilizado pela Texas (2000), observa-se que o pino 5, referente a função de offset permite que seja injetado um sinal a ser somado com o sinal de saída, realizando o deslocamento da amplitude de sinal de entrada. Isto será necessário pois o sinal de tensão de entrada apresenta valores negativos durante metade do ciclo.

A regulação do sinal de entrada referente a tensão de fase para o conversor AD do microcontrolador deverá ser ajustada pois em sua entrada haverá nível de tensão RMS de 127V, que resulta em uma onda com valor de pico de aproximadamente 180V. A sua saída foi projetada para se preservar dentro da faixa de entrada do conversor AD, mesmo que na tensão de 127V RMS ocorra uma oscilação. Pode-se observar o circuito desenvolvido para regulação do sinal de tensão de entrada através da Figura 14.

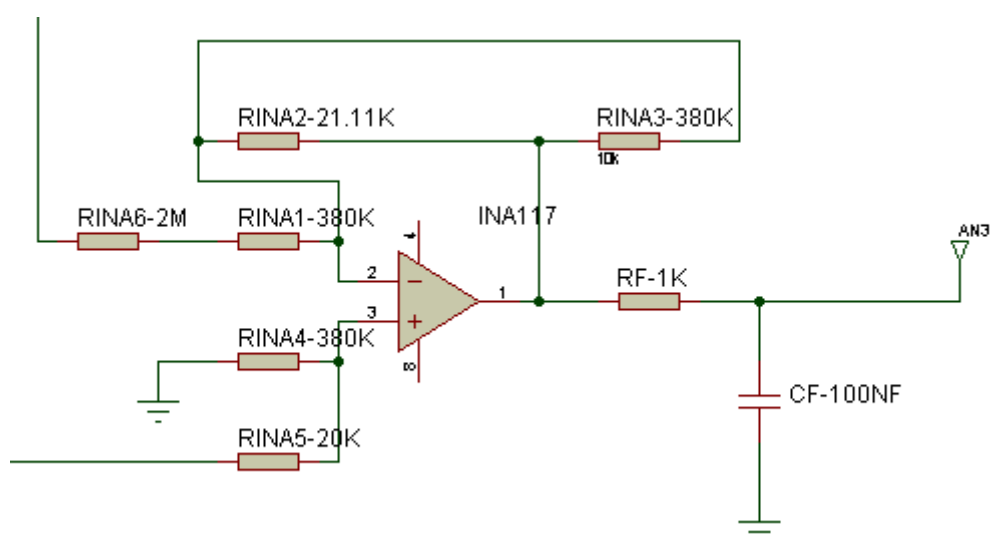


Figura 14: Circuito implementado para a regulação do sinal de tensão.

Através do circuito acima, ao adicionar o resistor Rina6 obteve-se uma resistência total de 2,380M $\Omega$ , resultando em uma queda de tensão maior de modo que o sinal de tensão de entrada a 127V RMS oscilará entre aproximadamente sob 30V de pico, que será amplificado de acordo com o circuito

paralelo resultante ao interligar diretamente os resistores Rina2 e Rina3, sendo esta resistência total no valor aproximado de 20kOhm. O circuito total da regulação do sinal de tensão de entrada apresenta o funcionamento de um circuito amplificador operacional com um ganho de  $8,4e-3$  em relação ao sinal de entrada.

Devido a presente limitação do conversor A/D do microcontrolador não suportar a conversão de sinais negativos [16], faz-se uso do pino de offset no CI INA127p aplicando um sinal auxiliar de 1,5V em corrente contínua que preservará o sinal de tensão de entrada entre os valores de 0 a 3V. Observa-se os sinais de tensão de entrada e saída no CI através da Figura 15.

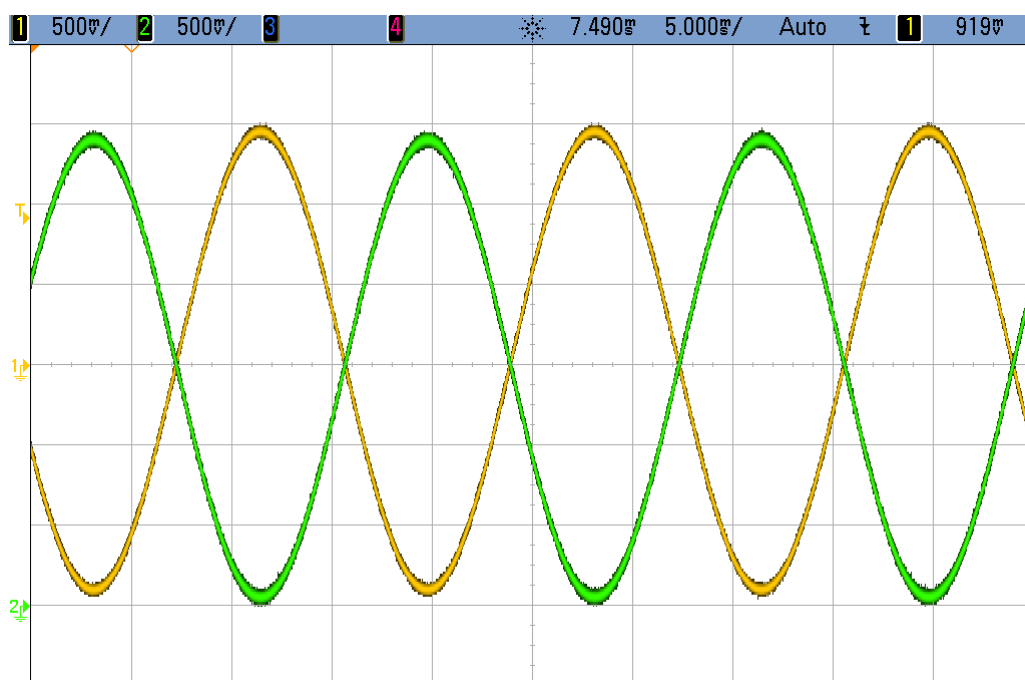


Figura 15. Sinal regulado de tensão antes do ajuste (Amarelo) e após o ajuste (Verde).

Observa-se que ao utilizar o sinal de offset de 1,5V, o sinal de tensão de saída acabou resultando em uma onda senoidal de sinal positivo fazendo uso de quase toda a faixa de conversão disponível.

#### 4.1.2. Sinal de corrente

O sinal de corrente obtém-se através da conversão proporcional da corrente em valor de tensão. Este processo é obtido com o auxílio de um circuito integrado que atua como um sensor de efeito hall. O circuito integrado escolhido para realizar a conversão de corrente de fase em uma tensão equivalente foi o modelo ACS712-05, desenvolvido pela Allegro Micro systems. Pode-se observar o circuito elétrico presente no CI ACS712-05 através da Figura 16.

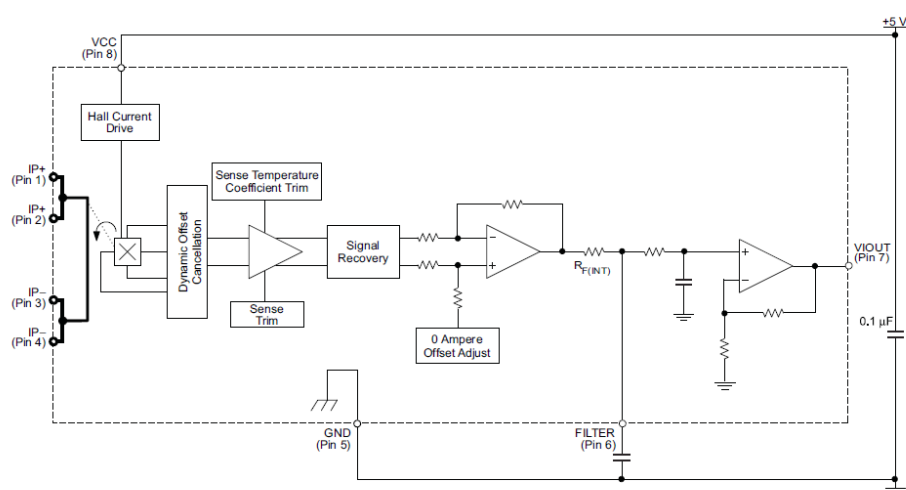


Figura 16. Circuito elétrico equivalente ao CI ACS712.

A utilização do CI ACS712-05 permite acoplamento em série sobre uma tensão muito acima do valor de alimentação nominal (VCC) de 5V já que o mesmo apresenta isolamento galvânica [18], permitindo que seja aplicada uma tensão acima dos 127V utilizados neste projeto.

A utilização do CI ACS712-05 requer apenas um sinal de alimentação e um capacitor para estabilização de 0,1mF entre o pino VCC e GND. A conexão em série para a passagem de corrente encontra-se entre os pinos IN+ e IN-,

possibilitando também a utilização de um filtro passa baixa presente internamente ao circuito integrado, presente no pino FILTER. Para o desenvolvimento deste projeto, foi estipulado que a filtragem seria realizada após o bloco de regulação de tensão, de modo que o pino de filtragem do CI ACS712-05 permanecerá em aberto, permanecendo sem atenuação em nenhuma frequência do sinal de entrada.

O sinal de tensão de saída do CI resulta em uma tensão mesmo quando não há corrente elétrica no circuito, sendo este valor dado pela metade do valor de alimentação VCC, resultando em uma tensão de 2,5V. Aplicando uma corrente elétrica no circuito, criará uma variação positiva ou negativa no sinal de saída, sendo o sentido da variação de acordo com o fluxo da corrente sobre os pinos IN+ e IN-. A proporção de tensão sobre a corrente no circuito, de acordo com o fabricante Allegro (2005), consiste em 185mV/Ampère, resultando em um sinal de 925mV de pico sob um offset de 2,5V quando houver uma corrente elétrica de 5A de pico.

Assim como no bloco do sinal de tensão, fez-se necessário o ajuste do sinal de saída para preservar o mesmo dentro da faixa de entrada do conversor AD, sendo então utilizado um circuito amplificador subtrator para realizar o deslocamento do sinal de corrente. Neste projeto, utilizou-se um amplificador operacional modelo LM741 para implementação do circuito de ajuste do sinal de corrente. Observa-se o circuito desenvolvido para ajuste do sinal de corrente de entrada através da Figura 17.

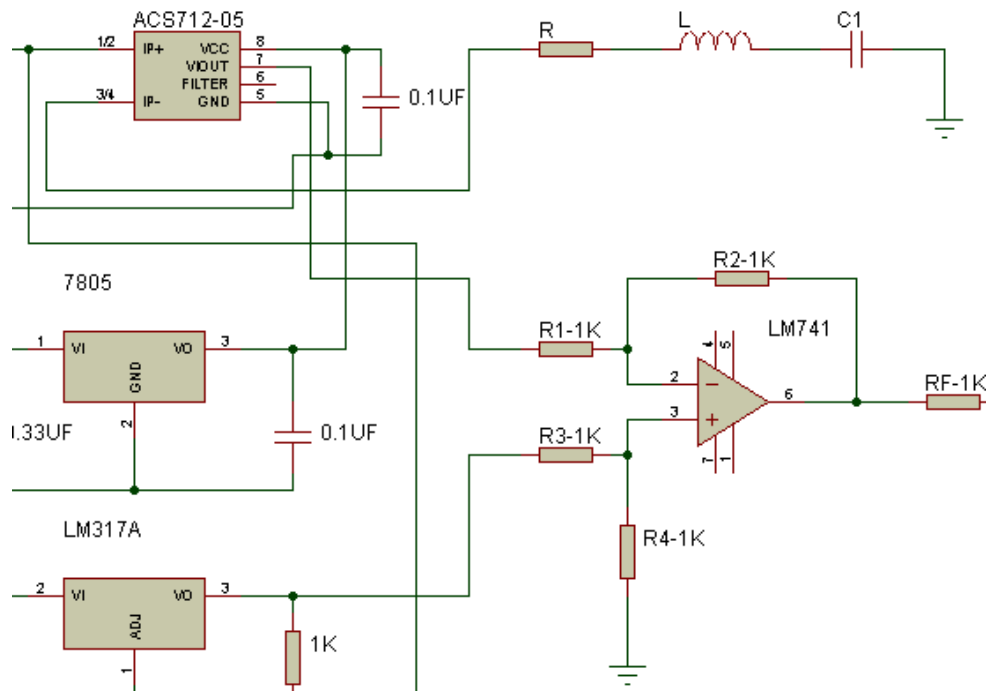


Figura 17: Circuito de regulação do sinal de corrente.

Através da Figura 17, observa-se que o circuito amplificador subtrator apresenta ganho unitário já que os resistores R1, R2, R3 e R4 apresentam o mesmo valor. Seu funcionamento baseia-se em subtrair o sinal de entrada dado pelo CI ASC712-05 com um sinal de 4V, resultando em um sinal de entrada no conversor AD do microcontrolador com os valores máximos de 0,575 a 2,425V. Através da Figura 18, observam-se os sinais de corrente de entrada antes e após o circuito amplificador subtrator.

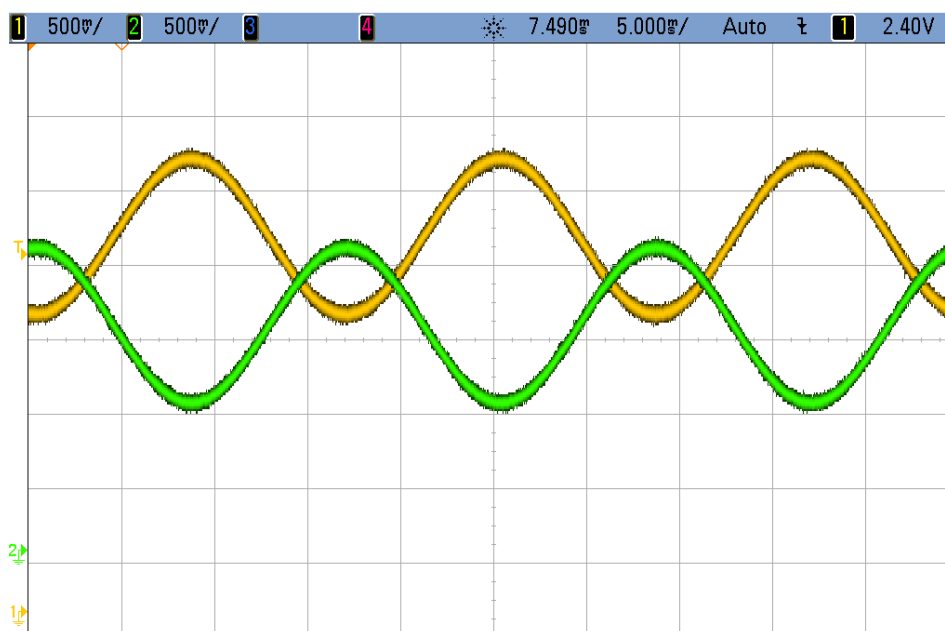


Figura 18. Sinal de corrente antes do ajuste (Amarelo) e após o ajuste (Verde).

Observa-se que o sinal de tensão resultante do sensor de corrente oscilou sobre o valor de 2,5V e ao aplicar o sinal no subtrator obteve-se mesmo sinal oscilando entre 0,5 e 3V, de acordo com o projetado para a aquisição do conversor AD.

#### 4.1.3. Filtragem

Antes que as amostras dos sinais de entrada sejam coletadas pelo conversor AD presente no microcontrolador, recomenda-se que os mesmos sejam filtrados para atenuar ruídos presentes na rede elétrica. É necessário que seja implementado um filtro para atenuação das frequências fora do escopo da medição do sinal de entrada.

O filtro projetado e implementado para este projeto consiste em um modelo de filtro passivo de primeira ordem com sua frequência de corte estipulada em aproximadamente 1,5kHz. Esta frequência foi estipulada de acordo com a recomendação presente no PRODIST [7], que determina que seja feita aquisição do sinal sem atenuação até a 25ª harmônica da frequência sobre a fundamental. O



circuito responsável pelo filtro passivo implementado neste projeto pode se observado através da Figura 19.

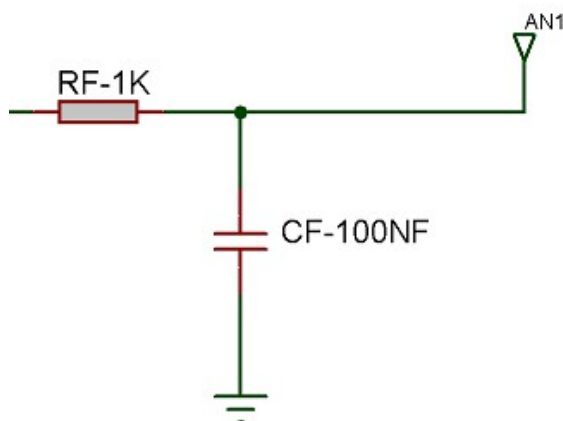


Figura 19. Circuito de filtragem passa baixo.

O cálculo dos valores de resistores e capacitor presente no circuito pode ser realizado de acordo com seguinte equação 4.

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4)$$

Onde:

$F_c$  = frequência de corte em Hertz.

$R$  = Valor do resistor em Ohms.

$C$  = valor do capacitor em Farads.

No caso deste projeto, a frequência fundamental do sinal de entrada encontra-se à 60Hz, logo a sua 25ª Harmônica e desejada frequência de corte encontra-se acima de 1,5kHz. Com a frequência de corte estipulada, obteve-se para um circuito com resistor de 1kOhm o valor de capacitância resultante em

106nF. Utilizando neste projeto um capacitor de 100nF, obtém-se uma frequência de corte à 1,591kHz, que se encontra dentro do estipulado pela norma [7]. Observa-se o sinal de tensão da rede à 60Hz antes e após a filtragem do circuito através da Figura 20.

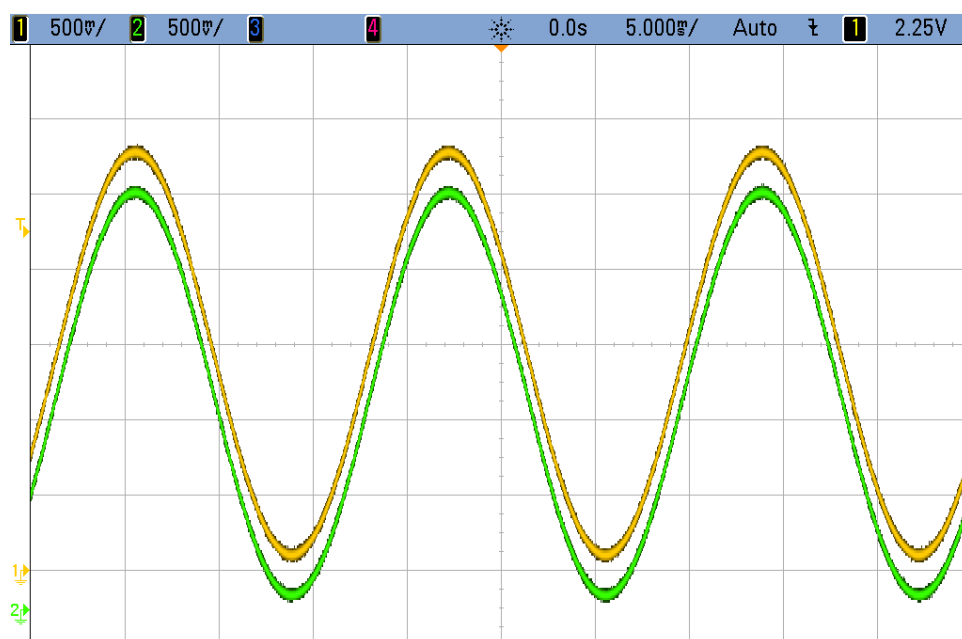


Figura 20: Sinal de tensão antes (amarelo) e após (verde) a filtragem necessária.

Como mostrado na Figura 20, após o filtro passa baixa, não houve distorção do sinal de entrada.

#### 4.1.4. Aquisição

O processo de aquisição de dados consiste no registro de inúmeras vezes por segundo dos sinais de tensão e de corrente após a filtragem, sendo este registro realizado a partir do uso do conversor AD presente internamente no microcontrolador utilizado neste projeto.

Um dos desafios principais do projeto do dispositivo microcontrolado para medição de qualidade da energia elétrica é obter uma medição resultante dentro

do erro estipulado descrito no módulo oito do PRODIST, que cita os seguintes requisitos: resolução mínima de 12 bits no conversor AD; 16 Amostras por ciclo da onda; 1% de erro máximo na medição.

Como o microcontrolador LM3S6965 utilizado neste projeto consiste em um modelo genérico, sem ênfase em aplicações de medição. De acordo com a documentação adicional disponibilizada pela fabricante [17], o microcontrolador LM3S6965, classificado como classe Fury, pode apresentar um erro de até 20 níveis de medição, onde o nível de medição pode ser obtido de acordo com a equação 5.

$$V_n = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2^n} \quad (5)$$

Onde:

$V_n$  = Tensão por nível do conversor AD.

$V_{\max}$  = tensão máxima de entrada do conversor.

$V_{\min}$  = tensão mínima de entrada do conversor.

$n$  = resolução do conversor AD em bits.

Devido ao fato que o microcontrolador apresenta uma faixa de entrada do conversor AD entre 0 e 3V sob uma resolução de 10 bits, obtêm-se um nível de medição a cada 2,9296mV. De acordo com a documentação adicional do microcontrolador [17], poderá ocorrer uma erro na medição de até 58,592mV.

A influência do desempenho do conversor AD presente no microcontrolador poderá ser observada nas respostas obtidas através de tensão RMS de fase, corrente RMS de fase e cálculo da distorção harmônica total do sinal de tensão presente na rede elétrica.

#### **4.1.5. Comunicação**

A interconexão entre a máquina UART do microcontrolador e a porta serial do computador responsável pela execução do software cliente necessita que seja utilizado um bloco de hardware para realizar uma conversão de nível digital entre 0 e 3,3V disponibilizados pelos pinos Tx e Rx do microcontrolador e um nível de Lógica Transistor-Transistor (TTL) entre +5 e -5V disponibilizados pelos pinos Tx e Rx da porta serial. A solução adotada para este projeto consiste em utilizar um circuito integrado modelo MAX3232, desenvolvido pela empresa MAXIM. O CI MAX3232 realiza a conversão de nível entre a máquina UART do microcontrolador e a porta serial do computador que executará o software cliente.

#### **4.1.6. Reguladores auxiliares**

Como o desenvolvimento deste projeto foi realizado em bancada de eletrônica, não foi necessário em um primeiro momento a implementação de fonte de alimentação que suprisse os circuitos elétricos presentes no circuito. Neste projeto utilizou-se uma fonte regulada, mostrada através da Figura 21.



Figura 21. Fonte regulável utilizada na implementação do projeto.

Através do uso da fonte mostrada acima foi possível suprir os circuitos integrados INA127p e LM741, porém foi necessário também aplicar sobre os circuitos outros valores de tensão para realizar o ajuste da tensão de entrada no conversor AD presente no microcontrolador. Os valores de tensões auxiliares necessários no projeto foram obtidos através do uso de reguladores lineares de tensão (LDO) 7805 e LM317.

O CI 7805 consiste em um LDO com saída de tensão fixa em 5V, sendo necessários apenas capacitores de filtragem e um sinal de tensão na faixa de 5 a 18V como descrito pela ON semicondutores (2008). De acordo com a fabricante ST (2012), o uso do CI LM317 consiste em regular a tensão entre os pinos 1 e 3 em 1,25V, sendo usado um resistor auxiliar para obter uma tensão desejada acima de 1,25V. Pode-se observar os circuitos referentes ao CI 7805 e LM317 através da Figura 22.

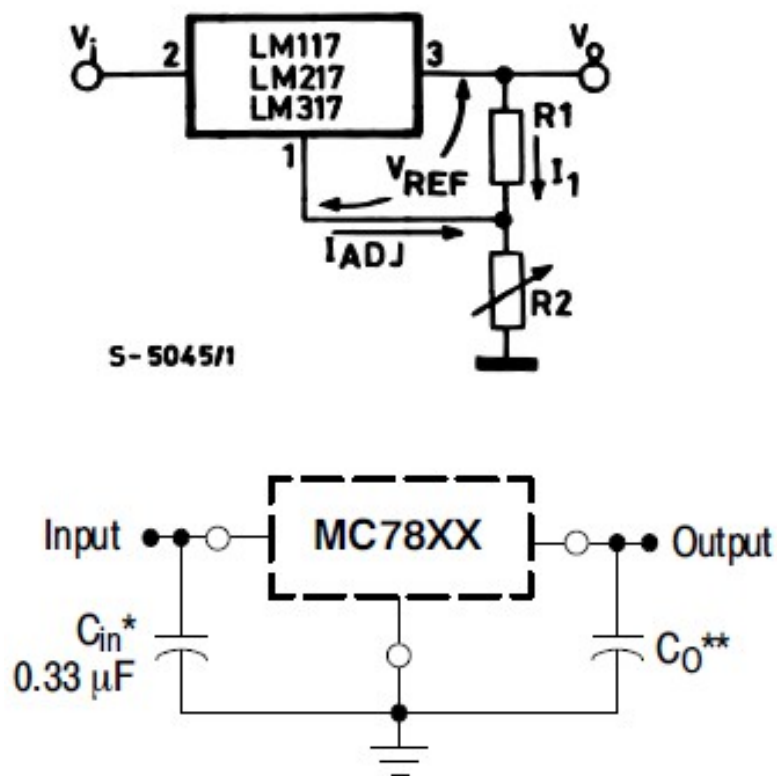


Figura 22. Circuito referente ao CI LM317 acima e CI 7805 abaixo.

Através do uso dos circuitos mostrados acima, foi possível obter os sinais de 1,5, 4 e 5V utilizados no circuito deste projeto. Não foi necessário a aplicação de dissipadores de calor nos reguladores pois não houve aquecimento significativo neste circuito.

#### 4.2. Software de cálculos presentes no microcontrolador.

O software desenvolvido para o microcontrolador neste projeto são implementados em linguagem C, fazendo uso da biblioteca desenvolvida para certos modelos de microcontroladores da Texas Instruments, denominada Stellaris. O uso desta biblioteca abstrai parcialmente os códigos referentes a configuração do microcontrolador, porém é necessário que haja conhecimento sobre as

características e modo de funcionamento do microcontrolador utilizado. Foi necessário criar duas configurações de cálculos pois a plataforma de desenvolvimento apresenta a limitação do tamanho de código nesta versão utilizada para implementação do software, logo foi implementada uma primeira configuração para calcular os valores RMS de tensão e corrente, potências e fator de potência sobre a frequência fundamental. Na segunda configuração foi implementado o cálculo da distorção harmônicas total do sinal de tensão.

O processamento dos dados adquiridos pelo conversor AD do microcontrolador, ocorrerão na pela própria unidade lógica aritmética (ULA) presente no microcontrolador, realizando em sua primeira configuração o cálculo dos valores RMS de tensão e corrente de fase, valor médio da potência ativa, potência reativa e aparente. Através da obtenção das potências, realiza-se o cálculo fator de potência sobre a frequência fundamental.

Na segunda configuração do software do microcontrolador, através dos valores adquiridos no sinal de tensão de fase, irá ser realizar o calculo da distorção harmônica total presente na rede elétrica através da transformada rápida de Fourier implementada através do método computacional de transformada discreta de Fourier. Pode-se observar o fluxograma de funcionamento do software de calculo das medições através da Figura 23.

A configuração dos dados consiste no processo de quais grandezas serão calculadas pelo microcontrolador, resultando em diferentes código-fonte a cada configuração assim como os resultados obtidos. O fato de haver duas configurações neste projeto resultou da limitação de código-fonte gerado pelo software de desenvolvimento utilizado neste projeto.



Figura 23. Fluxograma do software do microcontrolador.

O algoritmo desenvolvido para o microcontrolador visa executar um ciclo a cada segundo de modo que realize as aquisições pelo conversor AD durante 16 ciclos sequenciais, acima dos 12 ciclos mínimos requisitados pelo módulo oito do PRODIST [7] para então realizar os cálculos necessários.

#### 4.2.1. Ajustes do hardware utilizado pelo microcontrolador.

O microcontrolador irá inicialmente realizar as configurações de hardware necessárias, dentre as quais estão o controle das portas utilizadas pelo microcontrolador, ajuste de frequência, configuração dos contadores internos, conversor AD e máquina UART.

O ajuste do clock principal do microcontrolador está configurado para utilizar o oscilador interno, que apresenta um valor de 8MHz [16]. A máquina UART é configurada para trabalhar sem controle de fluxo sob uma baud rate de 115200



pulsos por segundo. O conversor AD é ajustado para trabalhar utilizando os canais 1 e 3, sendo coletados os sinais de tensão e corrente respectivamente.

O software de medições necessita que sejam realizadas ações durante intervalos de tempo sem que haja atraso significativo, logo é necessário a configuração de interrupções por contadores internos presentes no próprio microcontrolador.

#### **4.2.2. Configuração dos contadores utilizados pelo microcontrolador.**

O contador 1 do microcontrolador é ajustado de modo que executará uma interrupção de maior prioridade a cada segundo, logo requer que seja ajustado para realizar a contagem até o valor igual ao clock de funcionamento do microcontrolador, neste caso setado a 8MHz.

Ao ocorrer a interrupção pelo contador 1, o software realizará a impressão dos valores obtidos através da máquina UART. Após a execução da interrupção do contador 1, o software retornará a coleta das amostras pelo conversor AD até que seja possível realizar os cálculos novamente.

O contador 2 executará também uma interrupção, porém sob uma prioridade menor que a interrupção do contador 1. A funcionalidade do contador 2 consiste em controlar a taxa de amostragem do conversor AD, executando 256 e 128 vezes a cada ciclo da onda senoidal presente na rede elétrica para a primeira e segunda configuração respectivamente. Estas configurações resultam em uma taxa amostral total de 15360 amostras por segundo na primeira configuração e 7680 amostras por segundo em sua segunda configuração, um valor acima do mínimo requisitado pela norma que estipula uma amostragem de 16 vezes a cada ciclo de onda [7].

Ao executar a interrupção gerada pelo contador 2, o software de medições realizará a coleta dos valores de tensão e corrente através do conversor AD, incrementará os contadores internos para o controle de fluxo do software e retornará ao funcionamento do bloco principal.

### 4.2.3. Primeira configuração de cálculos

Nesta primeira configuração, o microcontrolador realizará a tarefa de obter os valores RMS através do cálculo discreto de uma sequência de valores obtidos pelo conversor AD. O microcontrolador armazenará os valores obtidos pelo conversor AD em dois vetores, separando os valores referentes à tensão de fase e corrente de fase. As amostras armazenadas referentes aos sinais de tensão e corrente, consistem em 13 ciclos em sequência, sendo 256 amostras por ciclo e resultando em um total de 3328 amostras coletadas por sinal de entrada.

#### 4.2.3.1. Tensão e corrente RMS.

Para a realização dos cálculos de tensão e corrente RMS, utilizam-se dois vetores isolados. A obtenção dos valores RMS de tensão e corrente de fase podem ser realizados com o auxílio da equação de cálculo RMS de valores discretos sobre uma sequência de amostras, que pode ser observado através da equação 6.

$$Y_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} X_n^2}{N}} \quad (6)$$

Onde:

Yrms = Valor RMS resultante.

Xn = Amostra discreta de índice n.

N = Total de amostras discretas.

Os valores de tensão e corrente RMS são obtidos utilizando um total de 3072 amostras sequenciais para cada sinal, sendo este valor o produto de número de amostras por ciclo (256) pelos 12 ciclos necessários de acordo com a norma [7].

Através da equação descrita acima, observa-se que não há uma faixa delimitando quantas amostras são necessárias para obter-se um valor RMS com amostras discretas, possibilitando que neste projeto seja realizado com um número elevado de amostras e observado o desempenho da utilização do conversor AD presente no microcontrolador, com o intuito de obter-se uma medição dentro do erro de 1% estipulado no PRODIST [7].

#### 4.2.3.2. Potência ativa

O processo de cálculo de potência ativa é obtido através da média dos valores instantâneos de potência ativa, sendo estes valores instantâneos calculados com as mesmas amostras utilizadas durante os cálculos de tensão e corrente RMS, isto é, através da média de 3072 amostras de potência ativa instantânea. O cálculo da potência ativa média é obtido através da equação 7.

$$P_{med} = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} V_n I_n}{N} \quad (7)$$

Onde:

$P_{med}$  = Potência ativa média resultante.

$V_n$  = Amostra discreta de tensão de índice  $n$ .

$I_n$  = Amostra discreta de corrente de índice  $n$ .

$N$  = Total de amostras discretas.

Apesar de não haver restrição do uso das amostras por parte do módulo 8 do PRODIST[ANEEL, 2011], preservou-se o uso destas mesmas amostras

necessárias para obtenção de potência instantânea de modo a minimizar o uso de processamento e memória do microcontrolador utilizado no projeto.

#### 4.2.3.3. Potência reativa

A potência reativa média é calculada de modo similar ao processo de cálculo da potência ativa média, porém é obtida sob a recomendação da norma internacional, descrita e demonstrada por Suhett (2008), que consta o método de cálculo de potência reativa por deslocamento em tempo. Para realização deste processo de cálculo é necessário realizar o produto entre tensão e corrente sobre uma defasagem de 90°. Como é realizado o cálculo de modo discreto, é necessário um deslocamento de 64 amostras na corrente de fase, que corresponde aos 90° de defasagem sob uma taxa de amostragem de 256 amostras por ciclo. A equação utilizada para os cálculos pode ser conferida através da equação 8.

$$Q_{med} = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} V_n I_{(n-64)}}{N} \quad (8)$$

Onde:

$Q_{med}$  = Potência reativa média resultante.

$V_n$  = Amostra discreta de tensão de índice  $n$ .

$I_n$  = Amostra discreta de corrente de índice  $n$ .

$N$  = Total de amostras discretas.

Esta metodologia de cálculo de potência reativa foi utilizada pois não há regulamentação deste método de cálculo na norma nacional, então se adotou a metodologia documentada pela norma internacional [15].

#### 4.2.3.4. Potência aparente e fator de deslocamento

Para obter-se o valor da potência aparente, é necessário que sejam obtidos anteriormente os valores médios de potência ativa e reativa, então através da estipulação da norma [7] faz-se uso dos conceitos de triângulo de potências de modo que o valor referente a potência ativa é obtido através da equação 9.

$$S_{med} = \sqrt{P_{med}^2 + Q_{med}^2} \quad (9)$$

Onde:

$S_{med}$  = Potência aparente média resultante.

$P_{med}$  = Potência ativa média calculada.

$Q_{med}$  = Potência reativa média calculada.

Com os valores de potência ativa e aparente já calculados, realiza-se o cálculo do fator de potência, sendo este o último cálculo na primeira configuração do software de medições desenvolvido pelo microcontrolador. O valor correspondente ao fator de deslocamento é obtido através da equação 10.

$$F_p = \frac{P_{med}}{S_{med}} \quad (10)$$

Onde:

$F_p$  = fator de potência resultante.

$P_{med}$  = Potência ativa média calculada.

$S_{med}$  = Potência aparente média calculada.

O fator de potência é obtido através dos cálculos realizados sobre a frequência fundamental do sinal, resultando no fator de deslocamento entre o sinal

de tensão e corrente. De acordo com Mello (2006), normas internacionais abordam metodologias de cálculo de fator de potência através da avaliação das potências presentes nas frequências harmônicas do sinal de tensão, porém foi utilizado neste projeto a metodologia especificada pela norma nacional.

#### 4.2.3.5. Impressão dos valores RMS e potências obtidas.

A impressão dos resultados obtidos baseia-se em escrever pelo pino Tx da máquina UART os valores de tensão, corrente, potências e fator de deslocamento. Pode-se observar a estrutura da impressão através da Figura 24.

```
V: <1.234>\t I: <1.234> \tP: <1.234> \t Q: <1.234>\t S: <1.234>\t fp: <1.234>\n
```

Figura 24: Modelo de Impressão realizado pelo software presente no microcontrolador.

A cada valor impresso, a impressão é separada por um caractere de tabulação (\t) de modo a ficarem visualmente legível os valores. A impressão dos valores é dada por um número flutuante de 3 dígitos de precisão (1.234). A cada impressão dos valores é enviado um caractere de quebra de linha para indicar o fim da impressão (\n).

#### 4.2.4. Segunda configuração de cálculos

Durante a segunda configuração de cálculos, o microcontrolador realizará a tarefa de calcular o valor de distorção harmônica total presente na rede de distribuição sob análise. Este processo será realizado através do algoritmo de transformada rápida de Fourier através de amostras discretas. Este algoritmo

realiza uma iteração matemática sobre o conjunto de amostras sequenciais do sinal de tensão.

A configuração deste algoritmo foi baseada nas recomendações da norma internacional abordada por Mello (2006) que cita a necessidade de uma sequência de amostras referentes durante 12 a 16 ciclos do sinal senoidal, sendo neste algoritmo utilizado 128 amostras por 16 ciclos, resultando em 2048 amostras a serem processadas. O software deste algoritmo foi implementado na maior parte em linguagem C, sendo usado também funções Assembly diretamente no código-fonte.

#### **4.2.4.1. Realocação dos dados**

Inicialmente o algoritmo requer que sejam coletadas as amostras do sinal de tensão e armazenadas em um vetor, assim como realizado durante a primeira configuração de cálculos. As amostras coletadas devem ser reorganizadas de acordo com o seu índice de posição no vetor, resultando em duas ênuplas compostas somente pelos índices positivos e negativos respectivamente.

A reorganização das amostras do sinal de tensão é realizada através da função de bit reverso, que realiza a inversão dos bits do valor decimal repassados como argumento da função. Esta função é aplicada a todos os itens presentes no vetor de amostras, invertendo o valor binário de cada índice e resultando em um novo vetor de amostras já reorganizado e composto pelas duas ênuplas necessárias para os cálculos posteriores. Na Tabela 2 consta uma demonstração da aplicação da função de bit reverso durante a segunda configuração de cálculos.

Contador em decimal	Contador em binário	Valor revertido em binário	Valor revertido em decimal
0	000 0000 0000	000 0000 0000	0
1	000 0000 0001	100 0000 0000	1024
2	000 0000 0010	010 0000 0000	512
3	000 0000 0011	110 0000 0000	1536
...	...	...	...
...	...	...	...
2044	111 1111 1100	001 1111 1111	511
2045	111 1111 1101	101 1111 1111	1535
2046	111 1111 1110	011 1111 1111	1023
2047	111 1111 1111	111 1111 1111	2047

Tabela 2. Demonstração do funcionamento da função de bit reverso.

Através da Tabela 2, pode-se observar que os valores pares preservaram-se na primeira ênupla, que consiste nas posições entre 0 e 1023, sendo o último índice par do vetor também a última amostra par presente na ênupla compostas por índices pares. O mesmo comportamento decorreu durante as amostras de índices ímpares.

#### 4.2.4.2. Tratamento das medições

Após o processo de realocação das amostras, é realizado o cálculo iterativo sobre as ênuplas, sendo subdivididas de acordo com a interação do algoritmo. O número de iterações realizadas no ciclo de processamento de dados é equivalente a equação mostrada abaixo.

$$I = \log_2(n) - 1 \quad (11)$$

Onde:

I = Iterações do algoritmo.



$n$  = Tamanho do vetor de amostras.

Como no algoritmo realizado neste projeto utiliza-se um vetor de 2048 amostras para cálculo da distorção harmônica total do sinal de tensão, resultou em 10 iterações do ciclo de processamento de dados. Através da Figura 25 observa-se um exemplo de reestruturação de subgrupos ao longo da aplicação do algoritmo usando 16 amostras.

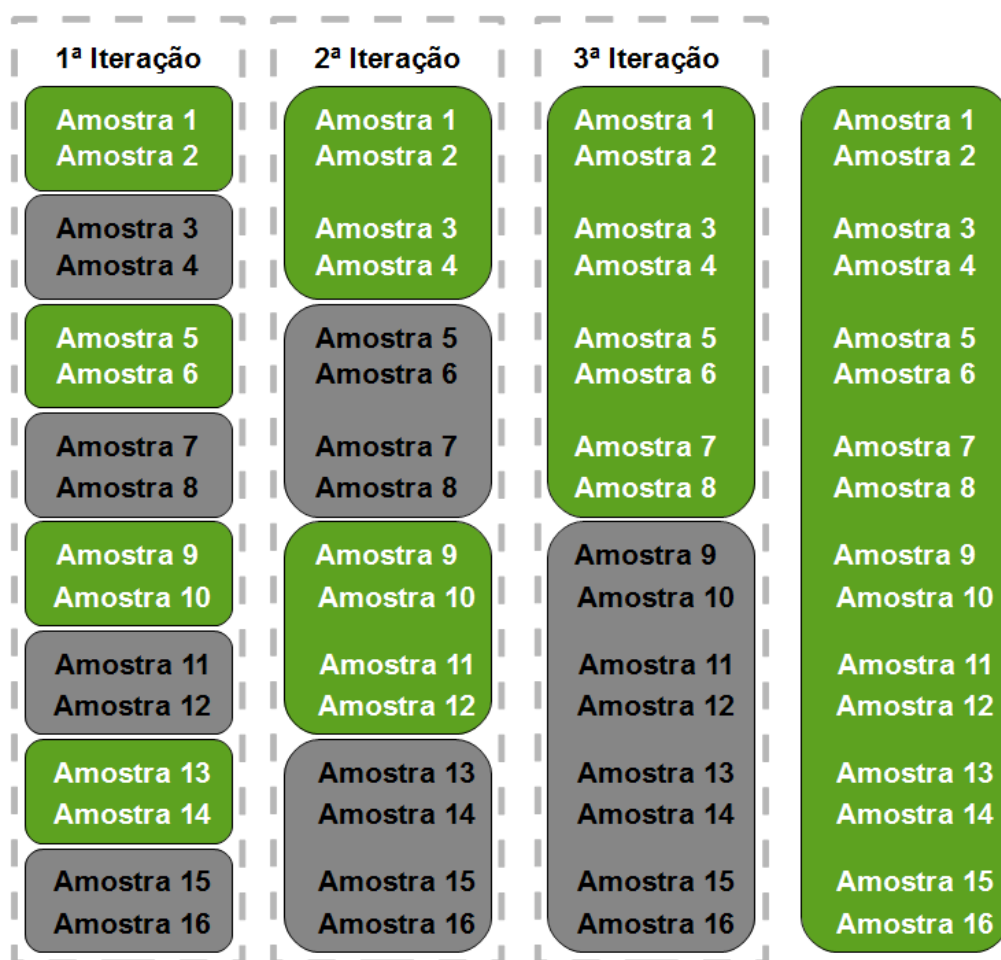


Figura 25: Exemplo de subgrupos a cada iteração do algoritmo.

Observa-se através da Figura 25 que a subdivisão dos grupos internos em

ênuplas foi dado por grupos no tamanho de 2 na potência  $n$  sendo  $n$  a iteração atual.

O processamento de dados realizado a todos os itens do vetor de amostras em cada iteração consiste em aplicar sequencialmente as duas equações mostradas abaixo.

$$v[G_n \cdot E_n + SG_n] = v[G_n \cdot E_n + SG_n] + v[G_n \cdot E_n + SG_n + \frac{E_n}{2}] \cdot e^{-j2\pi \frac{G_n \cdot E_n + SG_n}{E_n}} \quad (12)$$

$$v[G_n \cdot E_n + SG_n + \frac{E_n}{2}] = v[G_n \cdot E_n + SG_n] + v[G_n \cdot E_n + SG_n + \frac{E_n}{2}] \cdot e^{-j2\pi \frac{G_n \cdot E_n + SG_n + \frac{E_n}{2}}{E_n}} \quad (13)$$

Onde:

$G_n$  = Grupo atual.

$E_n$  = Ênupla atual.

$SG_n$  = Subgrupo atual.

Através das equações acima, observa-se que a única diferença consiste nos índices  $(G_n \cdot E_n + SG_n)$  e  $(G_n \cdot E_n + Sgn + E_n/2)$  aplicados nas equações, pois a equação 12 calcula o novo valor referente ao índice atual enquanto a equação 13 altera o valor presente na posição  $(G_n \cdot E_n + Sgn + E_n/2)$  que está a uma distância equivalente a metade dos itens do subgrupo.

O algoritmo utiliza as equações 12 e 13 durante a varredura de todos os subgrupos presentes em cada iteração, sendo que o algoritmo percorre somente a metade de cada subgrupo presente devido a equação 13 já realizar os cálculos referentes a segunda metade do subgrupo. O algoritmo foi implementado utilizando

esta metodologia de duas equações por etapa visando a otimização do processamento de dados no microcontrolador. Observa-se através da Figura 26 um exemplo da aplicação do processamento de dados no algoritmo sobre um vetor de 8 amostras.

Após o processamento de dados da última iteração, o vetor de amostras resulta em um vetor de números complexos resultantes da aplicação das equações 12 e 13. Para obter o valor de tensão de pico referente a frequência, utiliza-se a seguinte equação 14.

$$Vf(n) = \sqrt{Vr_n^2 + Vi_n^2} \quad (14)$$

Onde:

$Vf(n)$  = Valor de tensão correspondente a  $n$ .

$Vr_n$  = Parte real do valor calculado em  $n$ .

$Vi_n$  = Parte imaginária do valor calculado em  $n$ .

$n$  = Posição do vetor.

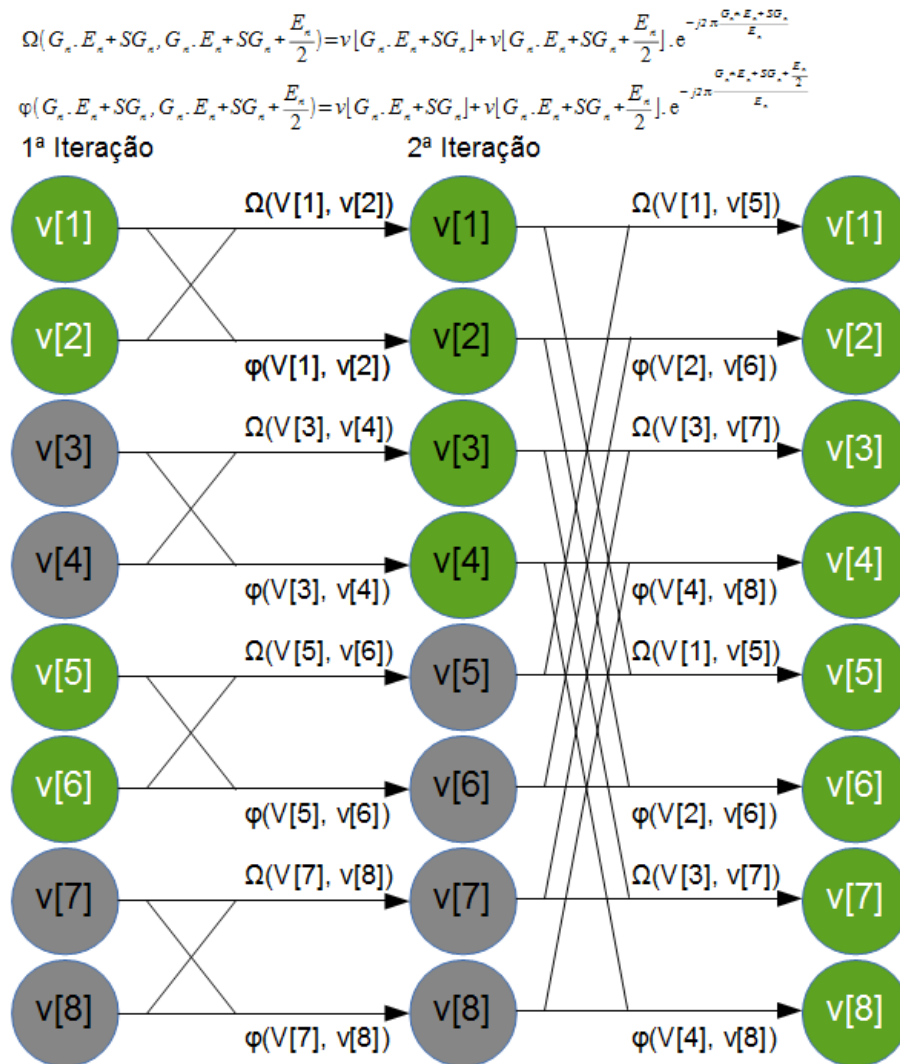


Figura 26: Demonstração do processamento de dados no algoritmo.

Ao aplicar a equação 14, obtêm-se o módulo referente ao valor complexo sendo este valor o equivalente a tensão de pico na respectiva frequência. A aplicação da equação acima é realizada somente na primeira metade do vetor de amostras, pois este método de transformada rápida de Fourier resulta no espelhamento do espectro de frequência.

Após a obtenção dos valores referentes a tensão de pico no espectro, realiza-se a varredura sobre todos os valores do espectro de frequência,

buscando-se o maior valor presente, que resulta no valor de pico do sinal em sua frequência fundamental. Ao obter-se a posição referente a frequência fundamental torna-se possível realizar o cálculo da distorção harmônica total do sinal de tensão.

#### 4.2.4.3. Cálculo da distorção harmônica total

Para obter-se o valor proporcional da distorção harmônica total no sinal de tensão, o algoritmo realiza o cálculo baseado na norma nacional [7] utilizando a equação 3, sendo mostrada novamente abaixo:

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

DHT = Distorção harmônica total.

V1= Tensão na frequência fundamental.

Vh= Tensão na frequência requerente.

A equação 3 consiste no somatório das componentes harmônicas presentes no espectro, sendo este somatório executado até a posição referente a 25ª harmônica do sinal como descrito na norma nacional [7]. O resultado final deste algoritmo retorna o valor percentual sobre a componente do sinal em sua frequência fundamental.

### 4.3. Software de registro de medições.

O software de registro de medições consiste em um software servidor cliente no qual possibilita que sejam registradas as medições em um servidor, sendo este qualquer computador com acesso à rede local ou externa.

#### 4.3.1. Software cliente

A principal parte correspondente ao software cliente realiza a tarefa de transferir os dados recebidos pela porta serial do computador conectado ao dispositivo microcontrolado para medição de qualidade da energia elétrica e transferir via socket sob o protocolo TCP/IP para o servidor. Pode-se observar o fluxograma do software cliente através da Figura 27.

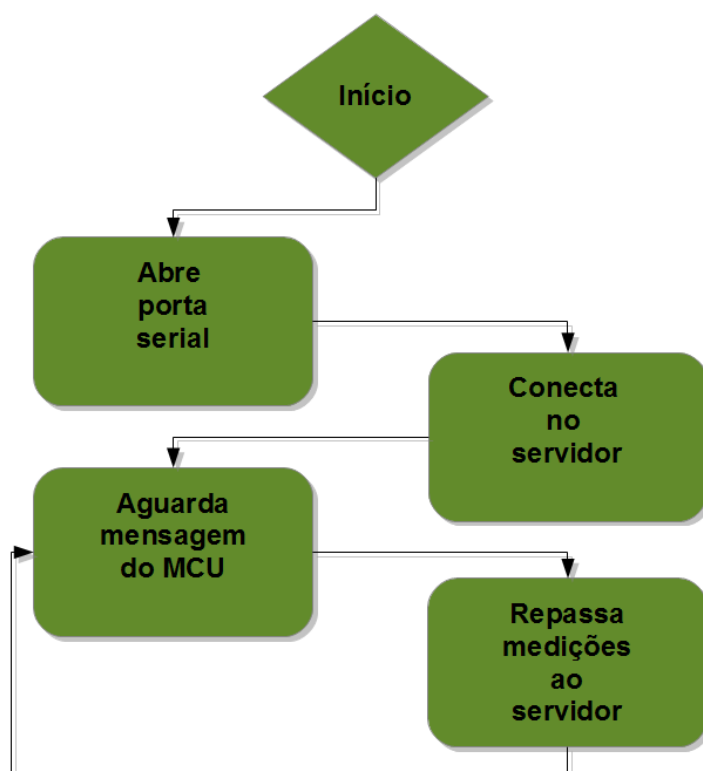


Figura 27: Diagrama de funcionamento do software cliente.

Através da Figura 27, observa-se que funcionamento do software cliente consiste em um loop de leitura e escrita, simplesmente repassando os dados recebidos ao servidor. Inicialmente o software cliente realiza a abertura da porta serial necessária para receber os dados do dispositivo microcontrolado para posteriormente realizar a conexão ao lado servidor do software de registro de medições. As especificações de porta serial e parâmetros do endereço do lado servidor estão preestabelecidas no código-fonte do software.

#### **4.3.2. Software Servidor**

O software servidor visa realizar o armazenamento dos dados recebidos pelo lado cliente e também que seja possível a telemetria dos dados obtidos pelo dispositivo microcontrolado para medição de qualidade da energia elétrica. Pode-se observar o fluxograma do software servidor através da Figura 28.

O software servidor ao ser inicializado, aguarda ininterruptamente a requisição do lado cliente e ao receber a requisição, cria uma conexão assíncrona com o lado cliente, de modo que caso haja a falha na conexão, o software cliente poderá conectar-se novamente ao servidor. Após a conexão realizada, o software cliente realiza um loop de leitura e escrita das mensagens recebidas pelo lado cliente, sendo que a cada mensagem recebida é realizado a leitura da hora atual do sistema e armazenado no arquivo de registros junto com os dados recebidos pelo cliente.



Figura 28: Diagrama de funcionamento do software servidor.

#### 4.4. Testes Realizados

Nesta seção encontram-se os resultados obtidos durante a realização dos testes de precisão nas medições do protótipo desenvolvido, abordando sobre cada configuração de teste e resultados obtidos durante a mesma.

##### 4.4.1. Testes de tensão e corrente RMS, potências ativa, reativa, aparente e fator de deslocamento

A metodologia dos testes realizados consiste em aplicar um sinal de tensão e corrente sobre as entradas correspondentes no protótipo desenvolvido neste



projeto, sendo estes sinais gerados através de um gerador de sinal de precisão modelo 5080A Calibrador, fabricado pela empresa Fluke. Pode-se observar o equipamento utilizado para realização dos testes através da Figura 29.



Figura 29. Gerador de sinal utilizado durante os testes.

Observa-se através da Figura 29 no lado superior direito que mostra um certificado de calibração aferido pelo INMETRO, no qual certifica que o equipamento utilizado durante os testes encontra-se calibrado e ocasionando um erro desprezível, na ordem de 0.001% ao ser adicionado no erro total das medições realizadas pelo protótipo desenvolvido.

Os testes foram realizados sobre as seguintes configurações de circuito: puramente resistivo, no qual não há defasagem entre tensão e corrente; sob 30 graus de defasagem tanto de predominância indutiva e capacitiva; sob 45 graus de defasagem tanto de predominância indutiva e capacitiva e também sob 80 graus de defasagem tanto de predominância indutiva e capacitiva.

#### 4.4.1.1. Teste sob um circuito puramente resistivo

O primeiro teste consiste em aplicar um sinal sobre uma carga puramente resistiva, sem defasagem entre tensão e corrente. Observa-se o sinal aplicado ao protótipo através da Figura 30.

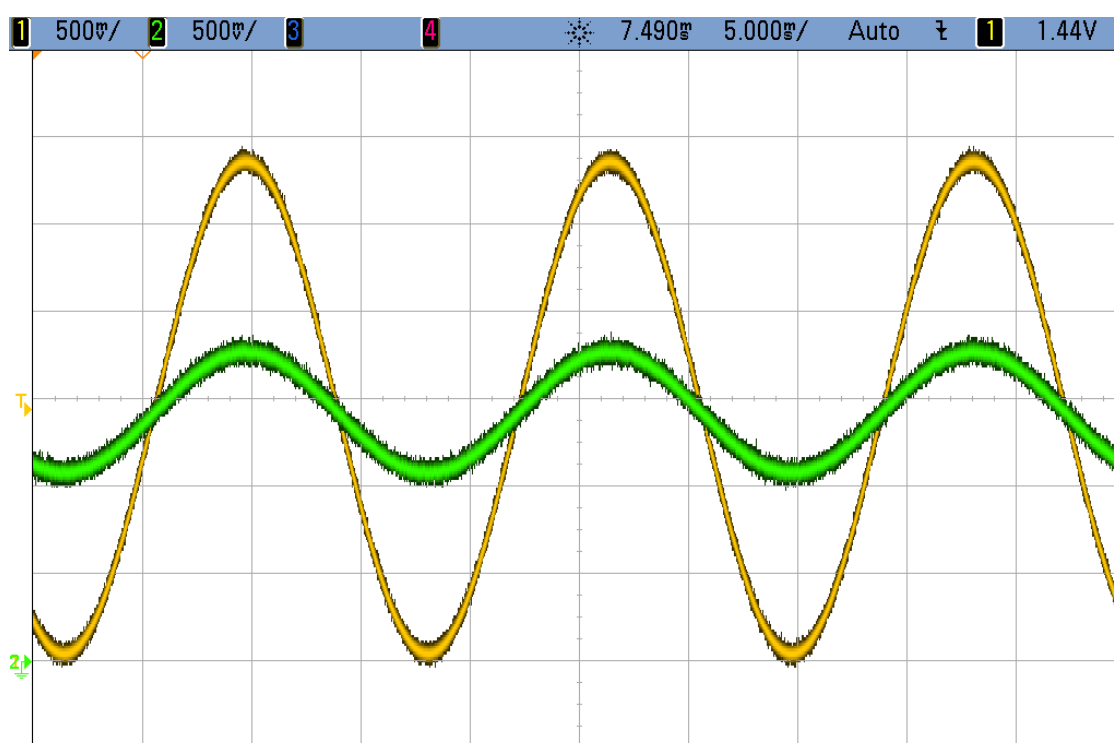


Figura 30. Sinal aplicado durante o primeiro teste, sendo a tensão o sinal amarelo e corrente o sinal verde.

Através do sinal mostrando na Figura 30, realizou-se uma sequência de medições e cálculos das potências presentes no circuito, que podem ser observados através da Tabela 3.

Valor base	127.000	1.333	169.921	0.000	169.921	1.000
<b>Amostra</b>	<b>V RMS</b>	<b>A RMS</b>	<b>P (W)</b>	<b>Q (Var)</b>	<b>S (VA)</b>	<b>Fd</b>
1	127.320	1.358	167.368	0.772	167.370	0.999
2	127.335	1.360	167.584	0.911	167.586	0.999
3	127.398	1.359	167.598	1.051	167.601	0.999
4	127.365	1.357	167.347	0.365	167.347	0.999
5	127.411	1.359	167.587	0.698	167.588	0.999
6	127.400	1.359	167.497	1.031	167.500	0.999
7	127.404	1.360	167.558	0.957	167.561	0.999
8	127.473	1.359	167.540	0.776	167.542	0.999
9	127.485	1.360	167.763	0.786	167.765	0.999
10	127.507	1.359	167.756	0.460	167.757	0.999
<b>Valor médio</b>	<b>127.410</b>	<b>1.359</b>	<b>167.560</b>	<b>0.781</b>	<b>167.562</b>	<b>0.999</b>
<b>Erro (%)</b>	<b>0.322</b>	<b>1.913</b>	<b>1.409</b>	<b>x</b>	<b>1.408</b>	<b>0.100</b>

Tabela 3. Medições obtidas durante o teste de circuito puramente resistivo.

Observa-se através das medições realizadas que apenas o sinal de tensão RMS apresentou um erro médio abaixo de 1% e não foi possível obter uma proporção de erro da potência reativa, somente uma diferença de 0.781 Var entre o valor de referência e valor médio obtido durante as medições.

#### 4.4.1.2. Teste sob um circuito predominantemente capacitivo com defasagem de 30 graus.

O segundo teste consiste em aplicar um sinal sobre uma carga predominantemente capacitiva, apresentando uma defasagem entre tensão e corrente. Observa-se o sinal aplicado ao protótipo através da Figura 31.

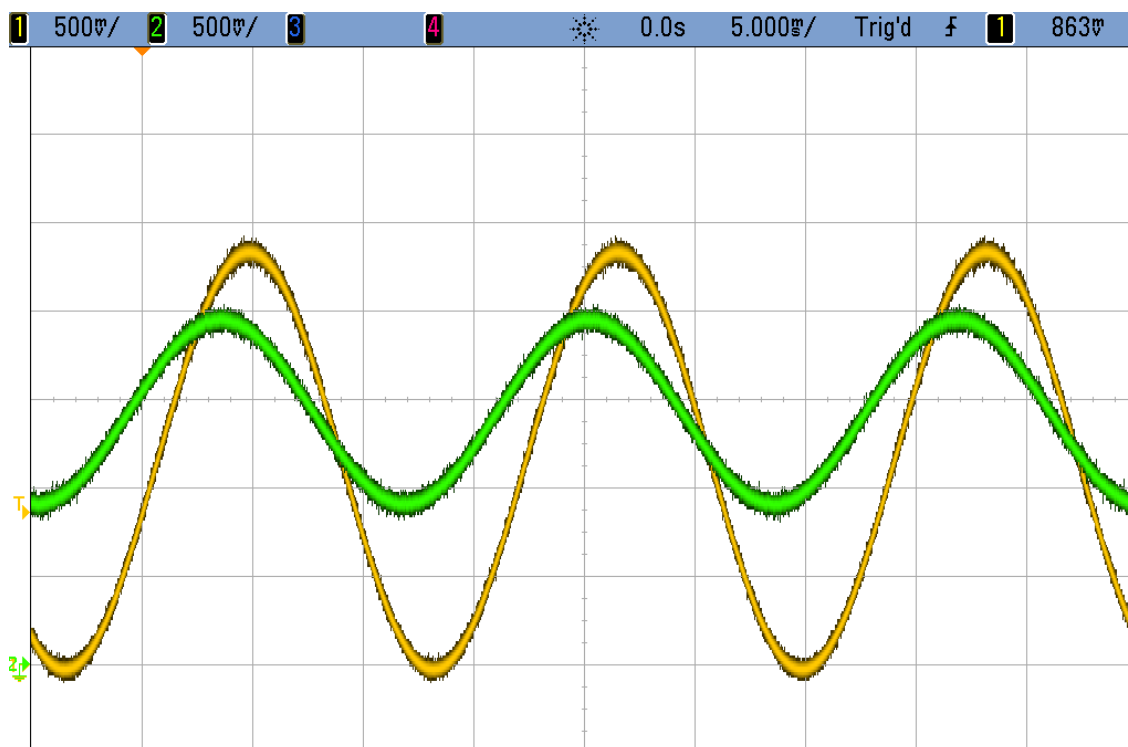


Figura 31. Sinal aplicado durante o segundo teste, sendo a tensão o sinal amarelo e corrente o sinal verde.

Através do sinal mostrando na Figura 31, realizou-se uma sequência de medições e cálculos das potências presentes no circuito, que podem ser observados através da Tabela 4.

Valor base	127.000	2.000	219.970	-127.000	254.000	0.866
<b>Amostra</b>	<b>V RMS</b>	<b>A RMS</b>	<b>P (W)</b>	<b>Q (Var)</b>	<b>S (VA)</b>	<b>Fd</b>
1	127.886	1.981	222.382	-128.279	256.728	0.866
2	127.737	1.979	220.985	-131.110	256.952	0.860
3	127.907	1.978	221.539	-129.334	256.528	0.864
4	127.767	1.979	221.526	-129.406	256.553	0.863
5	127.853	1.977	221.376	-128.469	255.952	0.865
6	127.743	1.976	220.958	-130.112	256.421	0.862
7	127.802	1.976	221.007	-130.566	256.694	0.861
8	127.847	1.977	220.841	-130.794	256.667	0.860
9	127.869	1.975	220.723	-130.906	256.622	0.860
10	127.808	1.977	220.810	-129.944	256.208	0.862
<b>Valor médio</b>	<b>127.822</b>	<b>1.978</b>	<b>221.215</b>	<b>-129.892</b>	<b>256.533</b>	<b>0.862</b>
<b>Erro (%)</b>	<b>0.643</b>	<b>1.138</b>	<b>0.563</b>	<b>2.226</b>	<b>0.987</b>	<b>0.426</b>

Tabela 4. Medições obtidas durante o teste de circuito predominantemente capacitivo sob defasagem de 30 graus.

Observa-se através das medições realizadas que apenas o sinal de tensão RMS apresentou um erro médio abaixo de 1% e também um erro próximo a 1% no valor médio de corrente RMS. Dentre as potências medidas somente a potência reativa apresentou erro médio maior que 1%.

#### 4.4.1.3. Teste sob um circuito predominantemente capacitivo com defasagem de 45 graus.

O terceiro teste consiste em aplicar um sinal sobre uma carga predominantemente capacitiva, apresentando uma defasagem entre tensão e corrente. Observa-se o sinal aplicado ao protótipo através da Figura 32.

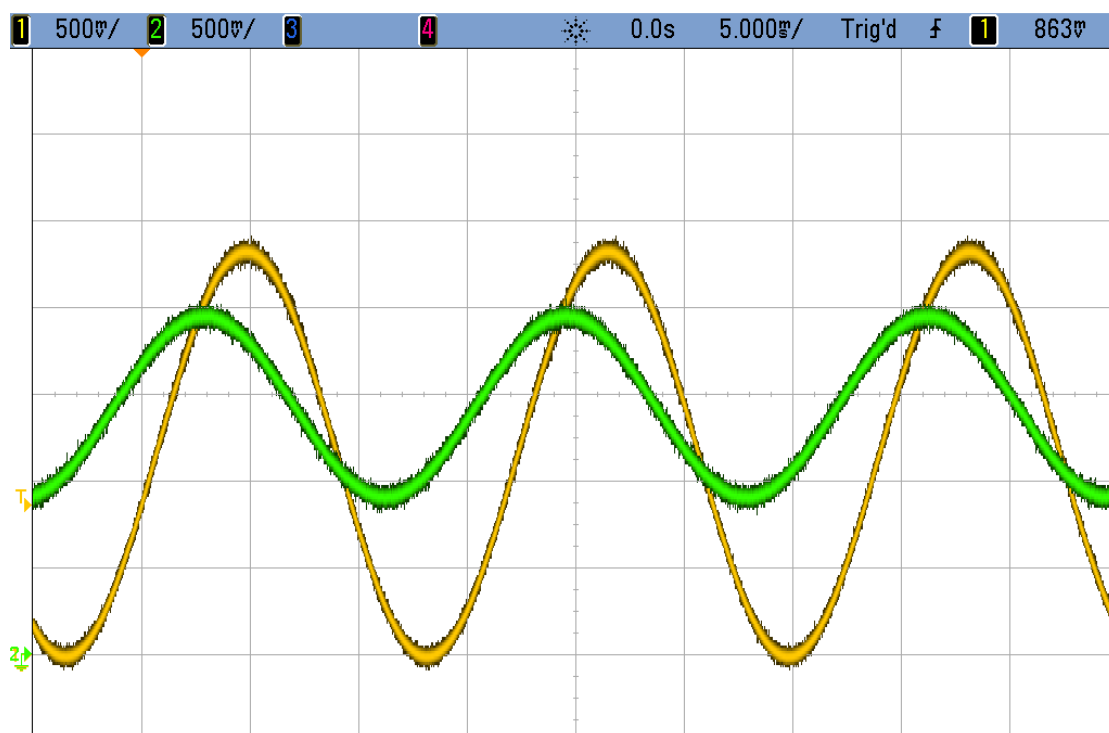


Figura 32. Sinal aplicado durante o terceiro teste, sendo a tensão o sinal amarelo e corrente o sinal verde.

Através do sinal mostrando na Figura 32, realizou-se uma sequência de medições e cálculos das potências presentes no circuito, que podem ser

observados através da Tabela 5.

Valor base	127.000	2.000	179.605	-179.605	254.000	0.707
<b>Amostra</b>	<b>V RMS</b>	<b>A RMS</b>	<b>P (W)</b>	<b>Q (Var)</b>	<b>S (VA)</b>	<b>Fd</b>
1	128.299	1.999	179.458	-179.611	253.900	0.707
2	128.257	2.003	179.881	-178.891	253.691	0.709
3	129.199	2.005	179.995	-177.821	253.019	0.711
4	128.233	2.000	179.635	-178.433	253.194	0.709
5	128.705	2.004	179.943	-177.204	252.548	0.713
6	127.848	2.001	179.858	-177.963	253.021	0.711
7	128.316	1.999	179.590	-180.117	254.352	0.706
8	128.275	1.997	179.130	-180.385	254.217	0.705
9	127.889	1.998	179.357	-180.413	254.397	0.705
10	128.278	1.998	179.110	-180.898	254.567	0.704
<b>Valor médio</b>	<b>128.330</b>	<b>2.000</b>	<b>179.596</b>	<b>-179.174</b>	<b>253.691</b>	<b>0.708</b>
<b>Erro (%)</b>	<b>1.036</b>	<b>0.020</b>	<b>0.005</b>	<b>0.241</b>	<b>0.122</b>	<b>0.133</b>

Tabela 5. Medições obtidas durante o teste de circuito predominantemente capacitivo sob defasagem de 45 graus.

Observa-se através das medições realizadas que apenas o sinal de corrente RMS apresentou um erro médio abaixo de 1% e também um erro próximo a 1% no valor médio de tensão RMS. Dentre as potências medidas todas as potências apresentaram erro médio menor que 1%.

#### 4.4.1.4. Teste sob um circuito predominantemente capacitivo com defasagem de 80 graus.

O quarto teste consiste em aplicar um sinal sobre uma carga predominantemente capacitiva, apresentando uma defasagem entre tensão e corrente. Observa-se o sinal aplicado ao protótipo através da Figura 33.

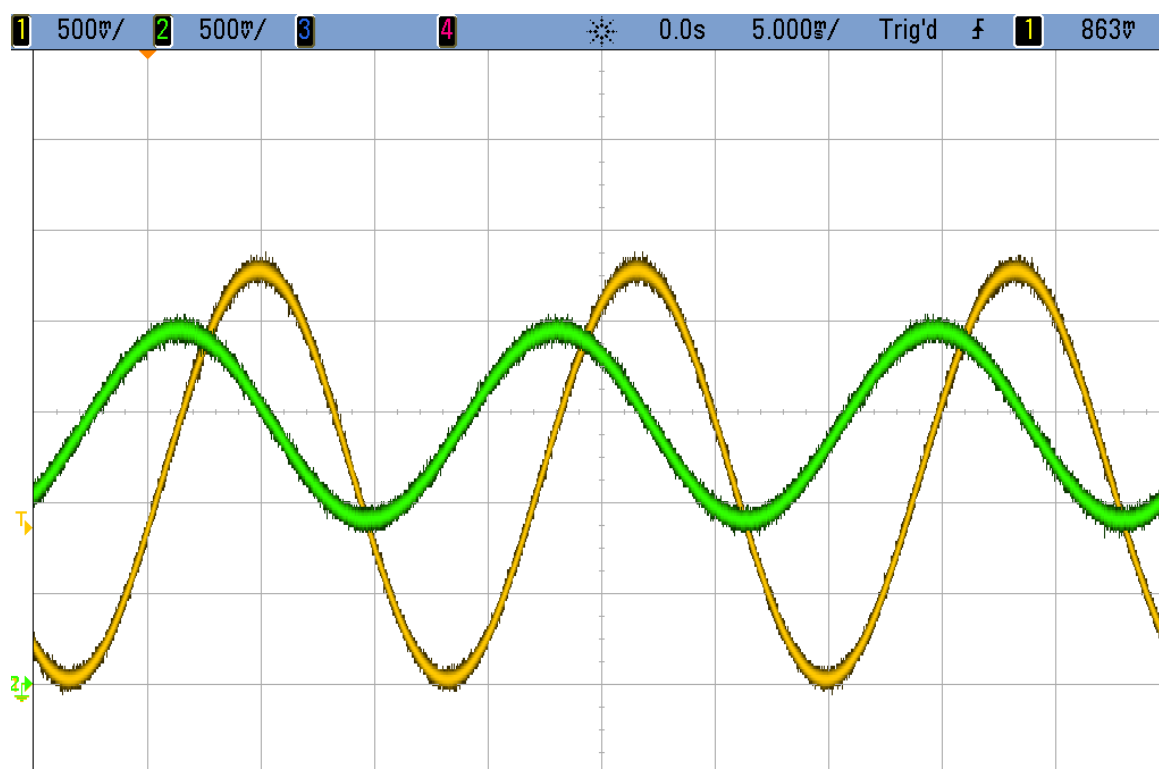


Figura 33. Sinal aplicado durante o quarto teste, sendo a tensão o sinal amarelo e corrente o sinal verde.

Através do sinal mostrando na Figura 33, realizou-se uma sequência de medições e cálculos das potências presentes no circuito, que podem ser observados através da Tabela 6.

Valor base	127.000	2.000	44.106	-250.141	254.000	0.173
<b>Amostra</b>	<b>V RMS</b>	<b>A RMS</b>	<b>P (W)</b>	<b>Q (Var)</b>	<b>S (VA)</b>	<b>Fd</b>
1	126.579	2.006	44.882	-255.262	259.178	0.173
2	127.200	2.011	44.795	-254.165	258.082	0.174
3	127.343	2.008	45.167	-252.015	256.031	0.176
4	126.330	2.007	45.193	-252.295	256.311	0.176
5	126.936	1.998	46.193	-256.555	260.680	0.177
6	125.902	1.998	45.963	-256.174	260.265	0.177
7	126.418	2.006	44.654	-254.548	258.435	0.173
8	126.447	2.009	45.122	-253.600	257.583	0.175
9	125.629	2.004	44.926	-254.604	258.537	0.174
10	126.409	2.008	44.975	-253.744	257.699	0.175
<b>Valor médio</b>	<b>126.519</b>	<b>2.006</b>	<b>45.187</b>	<b>-254.296</b>	<b>258.280</b>	<b>0.175</b>
<b>Erro (%)</b>	<b>0.380</b>	<b>0.274</b>	<b>2.392</b>	<b>1.634</b>	<b>1.657</b>	<b>1.116</b>

Tabela 6. Medições obtidas durante o teste de circuito predominantemente capacitivo sob defasagem de 80 graus.

Observa-se através das medições realizadas que ambos sinais de tensão e corrente RMS apresentaram erro médio menor que 1%. Dentre as potências medidas todas as apresentaram maior que 1%.

#### 4.4.1.5. Teste sob um circuito predominantemente indutivo com defasagem de 30 graus.

O quinto teste consiste em aplicar um sinal sobre uma carga predominantemente indutiva, apresentando uma defasagem entre tensão e corrente. Observa-se o sinal aplicado ao protótipo através da Figura 34.

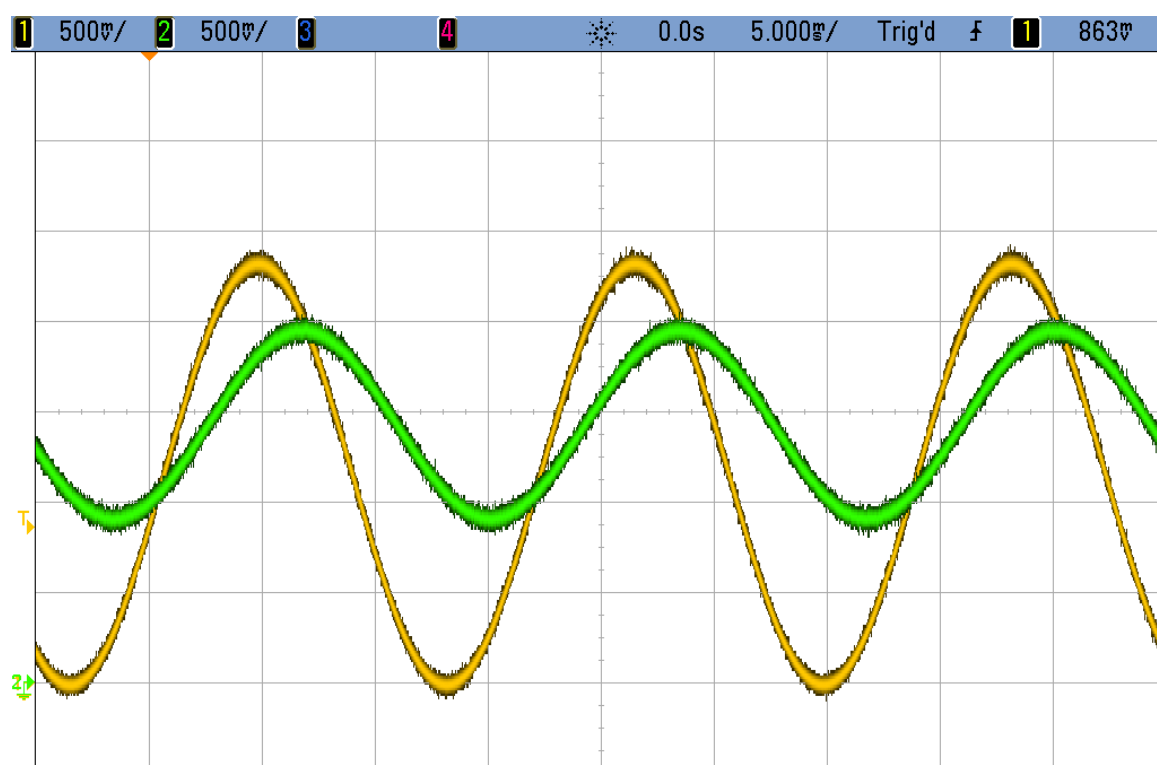


Figura 34. Sinal aplicado durante o quinto teste, sendo a tensão o sinal amarelo e corrente o sinal verde.



Através do sinal mostrando na Figura 34, realizou-se uma sequência de medições e cálculos das potências presentes no circuito, que podem ser observados através da Tabela 7.

Valor base	127.000	2.000	219.970	127.000	254.000	0.866
<b>Amostra</b>	<b>V RMS</b>	<b>A RMS</b>	<b>P (W)</b>	<b>Q (Var)</b>	<b>S (VA)</b>	<b>Fd</b>
1	127.467	1.993	222.613	126.633	256.110	0.869
2	127.433	1.996	222.771	127.044	256.451	0.869
3	127.518	1.995	222.468	126.856	256.095	0.869
4	126.353	1.996	222.376	126.647	255.911	0.869
5	126.806	1.996	222.564	126.390	255.948	0.870
6	127.508	1.997	222.473	126.625	255.985	0.869
7	126.553	1.996	222.704	126.726	256.235	0.869
8	127.794	1.991	222.433	127.838	256.552	0.867
9	128.093	1.996	222.464	127.966	256.643	0.867
10	127.782	1.989	222.590	128.304	256.921	0.866
<b>Valor médio</b>	<b>127.331</b>	<b>1.995</b>	<b>222.546</b>	<b>127.103</b>	<b>256.285</b>	<b>0.868</b>
<b>Erro (%)</b>	<b>0.260</b>	<b>0.276</b>	<b>1.157</b>	<b>0.081</b>	<b>0.892</b>	<b>0.271</b>

Tabela 7. Medições obtidas durante o teste de circuito predominantemente indutivo sob defasagem de 30 graus.

Observa-se através das medições realizadas que ambos sinais de tensão e corrente RMS apresentaram erro médio menor que 1%. Dentre as potências medidas somente a potência ativa apresentou erro maior que 1%.

#### 4.4.1.6. Teste sob um circuito predominantemente indutivo com defasagem de 45 graus

O sexto teste consiste em aplicar um sinal sobre uma carga predominantemente indutiva, apresentando uma defasagem entre tensão e corrente. Observa-se o sinal aplicado ao protótipo através da Figura 35.

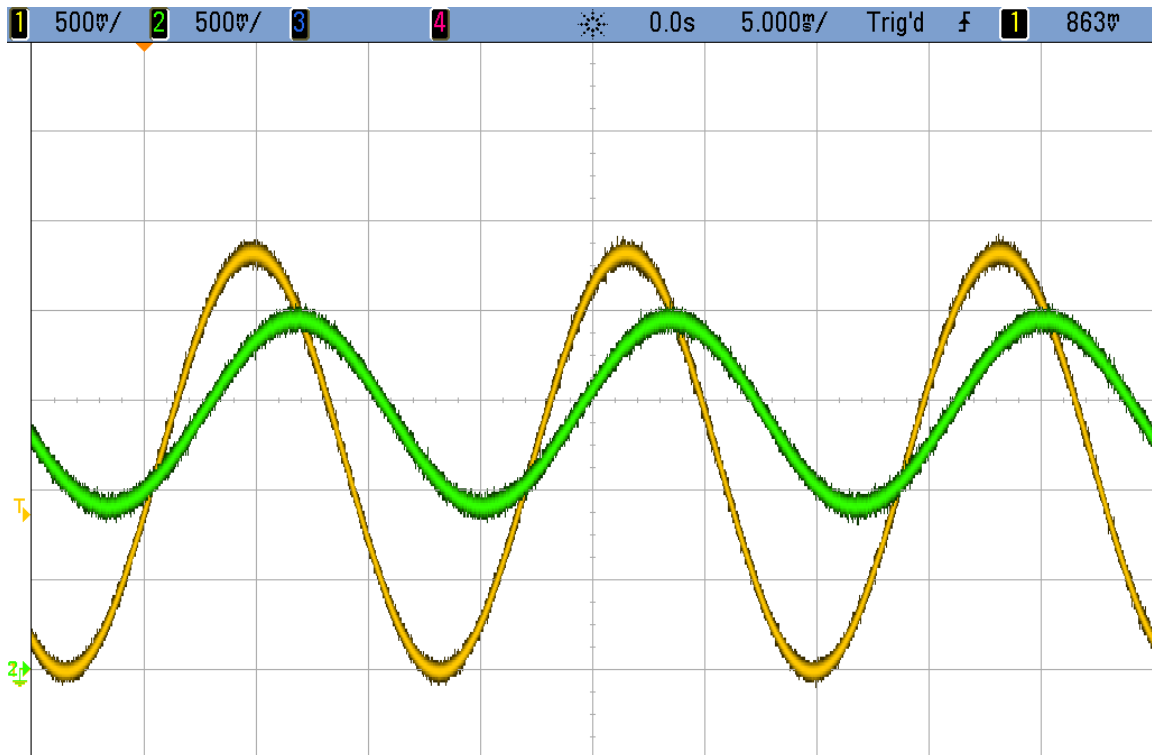


Figura 35. Sinal aplicado durante o sexto teste, sendo a tensão o sinal amarelo e corrente o sinal verde.

Através do sinal mostrando na Figura 35, realizou-se uma sequência de medições e cálculos das potências presentes no circuito, que podem ser observados através da Tabela 8.

Valor base	127.000	2.000	179.605	179.605	254.000	0.707
Amostra	V RMS	A RMS	P (W)	Q (Var)	S (VA)	Fd
1	127.506	1.976	175.023	176.275	248.407	0.705
2	127.587	1.976	175.401	177.665	249.660	0.703
3	127.615	1.978	176.129	178.666	250.884	0.702
4	127.630	1.979	176.101	178.882	251.019	0.702
5	127.639	1.979	176.229	179.229	251.356	0.701
6	127.709	1.979	177.736	179.862	252.864	0.703
7	127.707	1.979	178.135	180.557	253.639	0.702
8	127.904	1.975	178.432	180.464	253.782	0.703
9	127.952	1.980	179.103	180.037	253.951	0.705
10	127.950	1.981	179.640	179.699	254.091	0.707
Valor médio	127.720	1.978	177.193	179.134	251.965	0.703
Erro (%)	0.564	1.102	1.361	0.263	0.807	0.535

Tabela 8. Medições obtidas durante o teste de circuito predominantemente indutivo sob defasagem de 40 graus.

Observa-se através das medições realizadas que apenas o sinal de tensão RMS apresentou um erro médio menor que 1% e também que o erro médio apresentado no sinal de corrente RMS ficou próximo a 1%. Dentre as potências medidas somente a potência ativa apresentou erro maior que 1%.

#### 4.4.1.7. Teste sob um circuito predominantemente indutivo com defasagem de 80 graus.

O oitavo teste consiste em aplicar um sinal sobre uma carga predominantemente indutiva, apresentando uma defasagem entre tensão e corrente. Observa-se o sinal aplicado ao protótipo através da Figura 36.

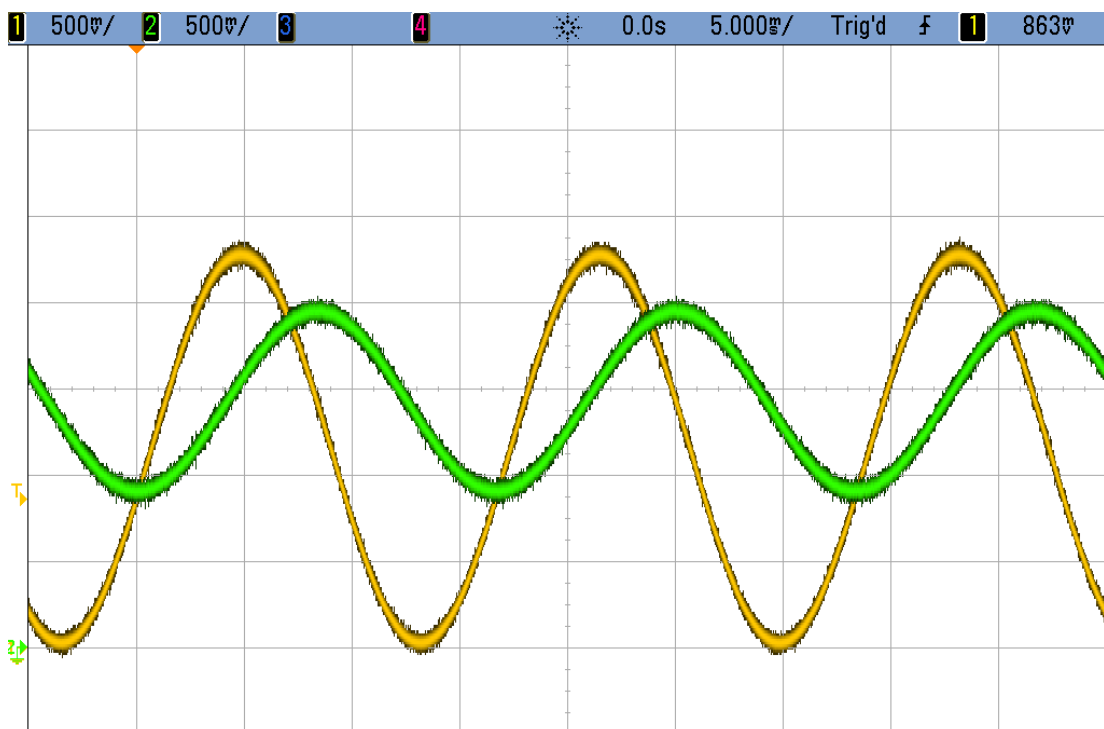


Figura 36. Sinal aplicado durante o sétimo teste, sendo a tensão o sinal amarelo e corrente o sinal verde.

Através do sinal mostrando na Figura 36, realizou-se uma sequência de medições e cálculos das potências presentes no circuito, que podem ser observados através da Tabela 9.

Valor base	127.000	2.000	44.106	250.141	254.000	0.173
<b>Amostra</b>	<b>V RMS</b>	<b>A RMS</b>	<b>P (W)</b>	<b>Q (Var)</b>	<b>S (VA)</b>	<b>Fd</b>
1	127.301	2.002	42.588	251.345	254.928	0.167
2	127.288	2.003	42.739	251.511	255.116	0.168
3	123.527	2.001	43.427	252.972	256.672	0.169
4	126.439	2.004	44.332	251.239	255.120	0.174
5	126.305	2.003	46.520	250.731	255.010	0.182
6	127.305	2.001	45.509	251.544	255.628	0.178
7	127.227	2.001	43.881	251.264	255.067	0.172
8	127.425	2.002	41.856	250.703	254.173	0.165
9	128.144	2.002	41.578	252.182	255.587	0.163
10	128.293	2.000	42.198	252.787	256.285	0.165
<b>Valor médio</b>	<b>126.925</b>	<b>2.002</b>	<b>43.463</b>	<b>251.628</b>	<b>255.359</b>	<b>0.170</b>
<b>Erro (%)</b>	<b>0.059</b>	<b>0.095</b>	<b>1.480</b>	<b>0.591</b>	<b>0.532</b>	<b>1.643</b>

Tabela 9. Medições obtidas durante o teste de circuito predominantemente indutivo sob uma defasagem de 80 graus

Observa-se através das medições realizadas que ambos os sinais de tensão e corrente RMS apresentaram erro menor que 1%. Dentre as potências medidas somente a potência ativa apresentou erro maior que 1%.

#### 4.4.2. Teste de distorção harmônica total presente na tensão da rede elétrica

A metodologia deste teste consiste em aplicar a tensão de entrada na rede, que está sujeita a uma distorção harmônica devido ao uso de outras cargas não lineares, possibilitando que seja realizado o cálculo da distorção harmônica total (DHT) presente na tensão elétrica e calculada tanto pelo protótipo desenvolvido quanto pelo equipamento medidor de qualidade da energia elétrica MARH-21. Pode-se observar o sinal de tensão obtido da rede elétrica através da Figura 36.

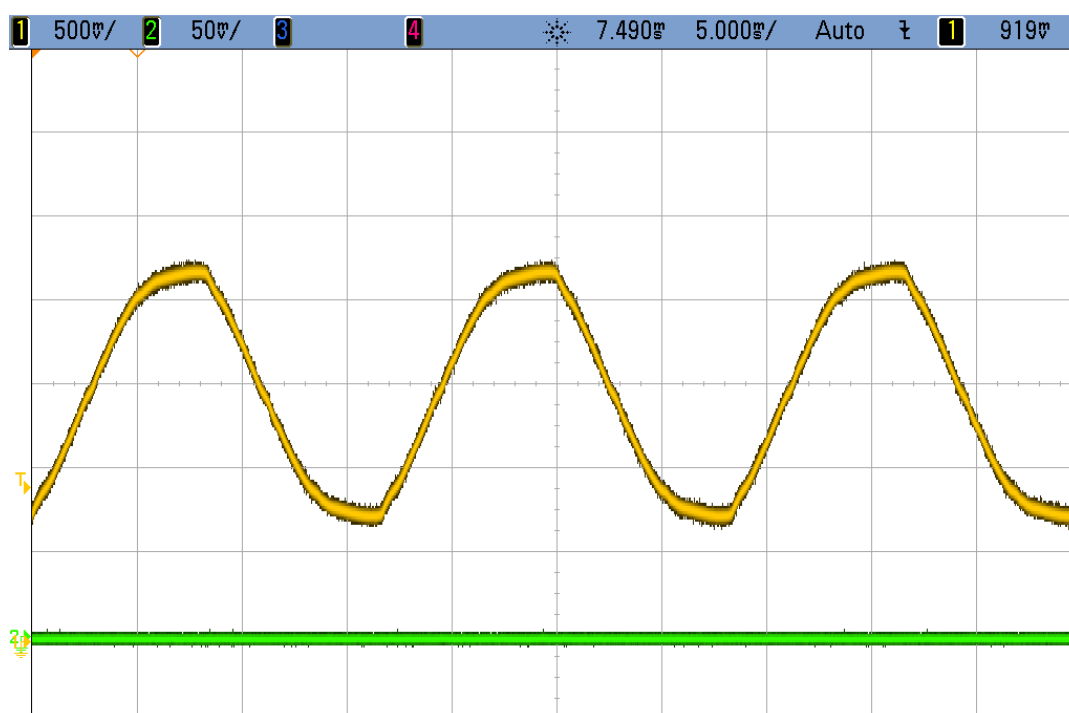


Figura 37. Sinal de tensão obtido da rede elétrica, sendo a tensão da rede o sinal amarelo.

Através da Figura 37 mostrada, observa-se que o sinal de tensão obtido da rede elétrica não apresenta uma forma puramente senoidal, devido ao fato que existem componentes harmônicas na rede elétrica. As medições obtidas da distorção harmônica total através do protótipo desenvolvido e o equipamento MARH-21 podem ser observadas através da Tabela 10.

<b>Amostra</b>	<b>Protótipo</b>	<b>MARH-21</b>	<b>Erro (%)</b>
1	5.6	5.6	0.0
2	5.6	5.7	1.754
3	5.7	5.7	0.0
4	5.6	5.7	1.754
5	5.8	5.8	0.0
6	5.8	5.8	0.0
7	5.7	5.8	1.754
8	5.8	5.8	0.0
9	5.8	5.9	1.754
10	5.8	5.8	0.0
<b>Valor médio</b>	<b>5.72</b>	<b>5.760</b>	<b>0.701</b>

Tabela 10. Medições obtidas do cálculo de distorção harmônica total do sinal de tensão e comparadas com o medidor de qualidade da energia elétrica MARH-21.

Observa-se que dentre os 10 cálculos realizados da distorção harmônica total, apenas 2 resultados apresentaram uma discrepância maior que 1%, sendo que os valores base obtidos pelo equipamento MARH-21 apresentam apenas 1 casa decimal resultando em um valor mais difícil de ser comparado.

#### 4.4.3. Análise sobre os testes realizados

Através dos resultados obtidos durante os testes pode-se observar que ambas as medições de tensão e corrente RMS apresentaram oscilação, ocorrendo uma variação maior na corrente RMS calculada pelo protótipo. Durante os testes observou-se que o sinal de tensão fornecido pelo circuito de efeito Hall utilizado no protótipo apresentou uma proporção não linear como descrito em sua documentação oficial [19], que aborda que sob a tensão de entrada do CI a 5V, resultará em um sinal de 130,814mV RMS por Ampère, porém durante os testes observou-se que ocorreu uma flutuação na tensão de saída, oscilando em até 3mV RMS em relação ao valor projetado. Durante o primeiro teste realizado sob uma corrente de 1,33A ocorreu o maior erro na corrente RMS medida, sendo quase o dobro do maior erro obtido durante os testes seguintes, demonstrando uma

oscilação acima do esperado pelo protótipo.

As medições de tensão RMS obtidas apresentaram um resultado satisfatório onde o maior erro obtido foi de 1.036%, de modo que os resultados da distorção harmônica total do sinal de tensão apresentou um erro médio de apenas 0.701% sobre o equipamento medidor MARH-21.

O cálculo das potências presentes no circuito apresentaram um erro significativo, conseqüente da oscilação presente do sensor de efeito Hall tratada anteriormente. Devido à metodologia de cálculos entre os valores RMS e a média das potências instantâneas medidas serem diferentes, resultou em um erro não proporcional ao acumulo dos erros de tensão e corrente RMS e também não houve proporção de erro entre potência ativa e reativa já que são baseadas no produto de valores em instantes de tempo conforme tratado por Suhett (2008) e ANEEL (2011).

Comparando os resultados obtidos com outros trabalhos disponíveis para consulta, observa-se que utilizando esta metodologia de medição sem o uso de transformadores e com um conversor AD de 10 bits interno no MCU, houve um erro médio total de 0.466% na tensão RMS contra 0.07% no protótipo com conversor AD externo de 12 bits [12], porém ambos apresentaram erros abaixo do limite proposto pela norma nacional [7]. Em comparação ao protótipo com conversor AD de 12 bits e transformadores de tensão e corrente [14] apresentou um erro entre o protótipo e o equipamento MARH-21 na média de 0.1% na tensão RMS onde o valor de referência encontra-se no equipamento medidor de qualidade da energia elétrica, resultando em um resultado impreciso já que se baseia em uma medição com erro acumulado.

## 5. CONCLUSÃO

Através da pesquisa e desenvolvimento deste projeto foi possível a compreensão sobre Qualidade da Energia Elétrica, sendo abordada sobre a sua importância no mercado atual como produto e serviço de modo a preservar a integridade dos equipamentos elétricos assim como preservar a sua eficiência dentro de sua projeção.

A qualidade da energia elétrica tornou-se uma área da engenharia elétrica que ganhou maior destaque ao longo dos anos com a ampliação da presença dos equipamentos eletrônicos na rede elétrica. Necessitando que fosse analisado o comportamento da rede elétrica e a poluição resultante no sinal na presença destes equipamentos eletrônicos

Através dos estudos sobre a qualidade da energia elétrica, iniciou-se através de órgãos internacionais o processo de regulamentação de índices relacionados a qualidade da energia elétrica, que servem como parâmetros para avaliação de qualidade da energia elétrica, auxiliando tanto na produção de equipamentos eletrônicos quanto a preservação da integridade das redes elétricas.

Após a criação de normas internacionais de qualidade da energia elétrica, foi iniciado o processo de regulamentação dos procedimentos de distribuição de energia elétrica no Brasil. Após estudos de adequação as normas internacionais assim como na implementação de novas normas referentes ao processo de distribuição de energia elétrica o PRODIST entrou em vigor no território nacional. O PRODIST especifica em suas normas os requisitos referentes à qualidade da energia elétrica englobando tanto a qualidade do serviço de distribuição quanto a qualidade da energia elétrica presente da rede de distribuição.

Os medidores de qualidade da energia elétrica receberam especificações técnicas dentro da implementação do PRODIST, sendo descritos requisitos mínimos e metodologias de cálculos de certas grandezas elétricas. Dessa forma o



PRODIST implementou estes requisitos e possibilitou que diferentes configurações e modelos de medidores de qualidade de energia fossem desenvolvidos, de modo a suprir diferentes nichos de mercado.

Apesar do projeto de dispositivo microcontrolado para medição de qualidade da energia elétrica ter apresentados durante algum dos testes resultados acima do limite de erro estipulado pela norma devido às oscilações ocasionadas pelo circuito sensor de corrente por efeito Hall, os resultados podem ser considerados positivos neste projeto pois os erros decorreram do hardware externo ao microcontrolador. Em contrapartida, as aquisições e resultados obtidos através do circuito responsável pelo ajuste e filtragem do sinal de tensão mostraram-se em sua maior parte dentro das expectativas de erro menor que 1%, sendo destacados os resultados obtidos durante o cálculo de distorção harmônica total do sinal de tensão.

A proposta de desenvolvimento de um medidor de qualidade da energia elétrica de baixo custo visando a medição de grandezas elétricas em transformadores de distribuição pode auxiliar no planejamento e controle de carga em tempo real já que o projeto proporciona a medição das grandezas elétricas em tempo real a distância.

## 6. TRABALHOS FUTUROS

Nesta seção são tratadas as modificações e implementações adicionais para a continuidade do projeto, visando uma melhor eficiência e implementação de novas funcionalidades

Como visto através dos resultados obtidos durante os testes com o protótipo de dispositivo microcontrolado para medição de qualidade da energia elétrica, observou-se que a eficiência da execução das tarefas e cálculos obtidos através das amostras coletadas encontram-se próxima à margem de erro estipulada pela norma nacional. O objetivo final do projeto baseia-se em desenvolver um dispositivo que esteja apto a ser homologado pelo órgão regulamentador, neste caso a ANEEL, e também ser classificado como um equipamento de medição de qualidade da energia elétrica, visando ao máximo estar de acordo com as especificações das normas internacionais propostas pela IEC e IEEE.

Por ser necessário um grande uso processamento de dados e uso de memória RAM para a obtenção de espectro de frequência através da FFT dos sinais de entrada e também que haja disponibilidade de processamento para cálculos de outras grandezas referentes à qualidade da energia elétrica como Flicker, Sag e Swell, necessita-se que seja alterado o microcontrolador utilizado no projeto, ou então fazer uso de um processador digital de sinal em conjunto com o microcontrolador presente, de modo a realizar os cálculos necessários para o dispositivo.

Com o intuito de suprir a ineficiência nos cálculos do microcontrolador atualmente utilizado no projeto e analisando as alternativas presentes no mercado atual, almeja-se substituir o microcontrolador atual, que consiste em um modelo da classe Cortex-M3 por um modelo de classe superior, neste caso um microcontrolador ARM Cortex-M4 com suporte em hardware a operações de ponto flutuante. A escolha da substituição por microcontrolador mais robusto em um

primeiro momento, preterindo o uso de um processador digital de sinal em conjunto com o microcontrolador atual, deve-se ao fato que o projeto visa uma complexidade de hardware menor e também desenvolver um dispositivo de menor custo de fabricação visando uma implementação em larga escala.

O microcontrolador candidato a substituir o modelo atual LM3S695, consiste no modelo LM4F232, também disponibilizado pela empresa Texas Instruments, podendo ser realizado o desenvolvimento através do kit EKI-LM4F232 que pode ser observado na Figura 38 mostrada abaixo.

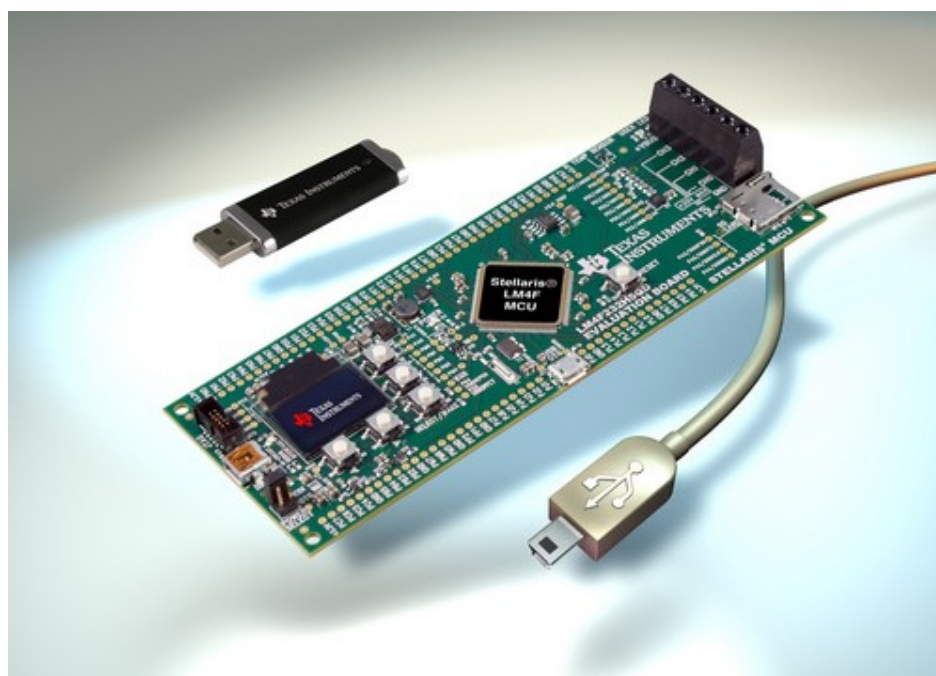


Figura 38. Kit de desenvolvimento EKI-LM4F232.

O microcontrolador apresenta 12 canais de conversor AD de resolução mínima de 12 bits requeridas pela ANEEL no módulo 8 do PRODIST. A possibilidade de o microcontrolador trabalhar em uma velocidade de 80kHz com o suporte em hardware para cálculos de ponto flutuante possibilita que seja realizada uma quantidade maior de cálculos durante um ciclo de trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLOGRÁFICAS

- 1 MELLO, Wagner G., **Estudo e aplicação da Norma IEEE 1459-2000 para Medidores Digitais de Energia Elétrica**, PUC-RS, 2006.
- 2 Mehl, Eduardo L. M., **Qualidade da energia elétrica**, UFPR – 2002.
- 3 Dugan, Roger C., **Electrical power system quality**, MacGraw-Hill, Segunda edição, 2002.
- 4 Sankaran, C., **Power quality**, CRC Press, 2002.
- 5 Kennedy, Barry W., **Power quality primer**, MacGraw-Hill, 2000.
- 6 ANEEL, **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional: Módulo 1 - Cartilha**, 2012.
- 7 ANEEL, **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional: Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica**, 2012.
- 8 Mattar, Alberto. C., **Da gênese e implementação dos procedimentos de distribuição – PRODIST: Desafio e oportunidades**, UNIFEI, 2010.
- 9 Godoi, Adelino. A., **Alocação de bancos de capacitores em redes primárias e secundárias de energia elétrica**, UFPR, 2009.

10 Barreto, Lucio A., Gasperin, Leonardo V., Haffner, Sérgio, Pereira, Luís. A., **Alocação de bancos de capacitores em redes de distribuição de energia visando eliminar violações de tensão**, 2009.

11 Suziki, M., Cavelluci, C., Camargo, J., Filho, N. R. B.; Marcelino, D. S., Borges, W. M.; **Compensação de Potência Reativa por meio de instalação de bancos de capacitores realocáveis em sistemas de distribuição**, SBQEE, 2007.

12 Colnago, G., Vieira, J. L. F., Sousa, G. C. D., Trarbach, E., Macedo, J. R. E., Macieira, L. B. B.; **Desenvolvimento e implementação de um sistema de monitoramento em tempo real da tensão da rede com acesso remoto**, UFSC, 2010.

13 Hafner, A.; Lima, C. R. E. e Lopes, H. S.; **Implementação de um medidor de qualidade de energia usando computação reconfigurável por hardware**, UTFPR, 2005.

14 Guadagnin, V., Lima, J.C.M., **Projeto e implementação de um protótipo de registrador de grandezas elétricas**, PUC-RS, 2011.

15 Suhett, Marcos, S., **Análise de técnicas de medição de potência reativa em medidores eletrônicos**, UFRJ, 2008.

16 Texas Instruments, **Datasheet: LM3S6965**, 2011.

17 Texas Instruments, **User's guide: Stellaris**, 2011.

18 Texas Instruments, **Datasheet: INA117p**, 2011.

19 Allegro Microsystems, **Datasheet: ACS712**, 2005.

20 ST Eletronics, **Datasheet: LM317**, 2012.

21 ON Semiconductors, **Datasheet: 7805**, 2008.

22 Boost, **Homepage Boost library**, <[www.boost.org](http://www.boost.org)>, acessado em 13 de março de 2011.

23 Boost, **Manual Boost: Asio library**, <[www.boost.org](http://www.boost.org)>, acessado em 13 de março de 2011.

24 Boost, **Manual Boost: Date-Time library**, <[www.boost.org](http://www.boost.org)>, acessado em 13 de março de 2011.