



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE - UFRN
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA ELÉTRICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENERGIA ELÉTRICA**

**SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CONSUMO E QUALIDADE DA
ENERGIA ELÉTRICA COM ACESSO REMOTO**

GERFFESON ALMEIDA MOURA

Natal-RN
2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Moura, Gerffeson Almeida.

Sistema de medição de consumo e qualidade da energia elétrica com acesso remoto / Gerffeson Almeida Moura. - 2019.
104f.: il.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica, Natal, 2019.

Orientador: Dr. Jose Alberto Nicolau De Oliveira.

Coorientadora: Dra. Crisluci Karina Souza Santos Candido.

1. Medidor de energia elétrica - Dissertação. 2. Qualidade da energia elétrica - Dissertação. 3. Smart meters - Dissertação. 4. Smart grid - Dissertação. I. Oliveira, Jose Alberto Nicolau De. II. Candido, Crisluci Karina Souza Santos. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.3

Gerffeson Almeida Moura

**SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CONSUMO E QUALIDADE DA
ENERGIA ELÉTRICA COM ACESSO REMOTO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica, do Centro de Tecnologia, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Energia Elétrica.

Linha de pesquisa:
Sistemas Embarcados

Orientador

Prof. Dr. Jose Alberto Nicolau De Oliveira

Coorientadora

Prof. Dra. Crisluci Karina Souza Santos Candido

MPEE – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA ELÉTRICA
CT – CENTRO DE TECNOLOGIA
UFRN – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

Natal-RN

2019

Dissertação de mestrado sob o título *Sistema de Medição de Consumo e Qualidade da Energia Elétrica com Acesso Remoto* apresentada por Gerffeson Almeida Moura e aceita pelo Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, sendo aprovada por todos os membros da banca examinadora abaixo especificada:

Prof. Dr. Jose Alberto Nicolau De Oliveira
UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Orientador

Prof. Dra. Crisluci Karina Souza Santos Candido
UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Coorientadora

Prof. Dr. Jose Luiz da Silva Junior
Examinador interno
UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Érico Cadineli Braz
Examinador externo
IFRN – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Rio Grande do Norte

Natal-RN, 30 de agosto de 2019.

Agradeço a todos que estiveram presentes na construção do meu aprendizado durante a minha vida, que de todas as formas contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal e acadêmico. Aos Professores Dr. Jose Alberto Nicolau, Dra. Crisluci Karina e Dr. Max Chianca Pimentel Filho pela ajuda para conseguir orientação no mestrado e posteriormente ajuda com o desenvolvimento da dissertação. Aos alunos e colegas de trabalho aos quais de maneira mútua compartilharam conhecimento.

Aos meus familiares pela ajuda e incentivo.

Aos amigos pela amizade e compreensão.

A minha namorada pelo carinho, paciência e incentivo.

Agradecimentos

Agradeço a minha família, a minha namorada e aos meus amigos pelo carinho, compreensão, incentivo e dedicação em todos os momentos da minha vida.

Ao professor e orientador Dr. Jose Alberto Nicolau pelo incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho e a dedicação prestada no acompanhamento e desenvolvimento da minha carreira acadêmica.

A professora Dra. Crisluci Karina por todas as dúvidas solucionadas, sugestões propostas e ao grande incentivo prestado.

Ao professor Dr. Jose Luiz da Silva Junior por gentilmente realizar sugestões no desenvolvimento do trabalho e disponibilizar o equipamento de referência para realização dos testes.

Ao professor Dr. Max Chianca Pimentel Filho por várias vezes ser imensamente prestativo e paciente na solução de qualquer eventualidade durante o decorrer do curso.

A equipe do laboratório de eletrotécnica, que me apoiaram no preparo e realização dos ensaios de laboratório, em especial o Francisco Alan.

Ao amigo e companheiro de curso Thales Bruno por prontificar e disponibilizar o equipamento de referência para testes e comparação dos resultados da Superintendência de infraestrutura da UFRN.

Ao SENAI/CTGAS-ER por disponibilizar um ambiente de testes para o equipamento proposto neste trabalho.

A todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente e que me ajudaram a viabilizar a conclusão deste trabalho.

Ao Programa de pós-graduação em Energia Elétrica - PPEE, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, pela oportunidade de fazer parte deste time e por me proporcionar um ambiente criativo e amigável.

À República Federativa do Brasil, por nos proporcionar uma universidade pública de qualidade, tornando possível minha formação e transformação de vida.

Obrigado a todos!

"A diferença entre o possível e o impossível está na vontade humana".

Louis Pasteur

Sistema de Medição de Consumo e Qualidade da Energia Elétrica com Acesso Remoto

RESUMO

Atualmente existe um grande número de medidores eletrônicos de faturamento já instalados que não possuem função de registro de qualidade da energia elétrica, além disso não apresentam um sistema de monitoramento e gestão de consumo, ficando a critério da concessionária estabelecer ao consumidor um período de apresentação dos resultados, normalmente de maneira mensal na fatura da conta de energia elétrica. Para ajudar o consumidor a monitorar as suas despesas, foi desenvolvido um medidor eletrônico capaz de informar os parâmetros essenciais de consumo e qualidade da energia elétrica. Além disso, o medidor desenvolvido permite o registro, armazenamento e controle da informação de maneira remota, apresentando um simples e funcional método não intrusivo para se medir o consumo de energia elétrica. Adicionalmente, são realizados experimentos comparativos com equipamento de referência utilizado no mercado, através dos erros obtidos a precisão e confiabilidade das medições são avaliadas segundo critérios das normas vigentes. Através da análise dos resultados encontrados é possível perceber que o dispositivo desenvolvido é adequado para realizar o monitoramento dos parâmetros propostos.

Palavras-chave: medidor de energia elétrica, qualidade da energia elétrica, *smart grid*, *smart meters*, servidor web.

System of Measurement of Consumption and Quality of Electric Energy with Remote Access

ABSTRACT

Currently there are a large number of electronic billing meters already installed that do not have a function of recording quality of electricity, and also have a monitoring system and consumption management, being the criterion of the concessionaire establish a period of presentation of the consumer. results, usually on a monthly basis on the electricity bill. To help the consumer to monitor his expenses, an electronic meter has been developed that can inform the essential parameters of consumption and quality of electricity. In addition, the developed meter allows the remote recording, storage and control of information, presenting a simple and functional non-intrusive method for measuring electricity consumption. Additionally, comparative experiments are performed with reference equipment used in the market, through the errors obtained the accuracy and reliability of the measurements are evaluated according to current standards criteria. Through the analysis of the results found it is possible to realize that the developed device is suitable to perform the monitoring of the proposed parameters.

Keywords: electric power meter, electric power quality, smart grid, smart meters, web server.

Lista de figuras

1	Estrutura de subsistemas de uma <i>smart grid</i>	p. 23
2	Rede elétrica tradicional.	p. 24
3	Rede elétrica inteligente.	p. 24
4	Representação da REI.	p. 26
5	Arquitetura dos medidores convencionais e eletrônicos.	p. 28
6	Diagrama de fluxo de uma FFT de 8 pontos.	p. 35
7	Diagrama de blocos do filtro IIR.	p. 38
8	Diagrama de blocos do filtro FIR.	p. 39
9	Estrutura de blocos do medidor desenvolvido.	p. 42
10	Circuito de condicionamento de tensão.	p. 43
11	Sensor de corrente.	p. 44
12	Circuito de condicionamento do sensor de corrente.	p. 45
13	Corrente capturada pelo medidor nos três canais.	p. 45
14	Circuito de proteção.	p. 46
15	Filtro Butterworth utilizado.	p. 47
16	Resposta do filtro Butterworth utilizado.	p. 48
17	Placa do medidor.	p. 49
18	Medidor desenvolvido em sua montagem final.	p. 50
19	Variac trifásico.	p. 55
20	Estrutura interna do variac trifásico.	p. 56
21	Sensores de corrente e resistências utilizadas.	p. 56
22	Conexão dos sensores ao medidor.	p. 57

23	Formas de onda de tensão capturadas pelo medidor.	p. 58
24	Formas de onda de corrente capturadas pelo medidor.	p. 59
25	Analisador de energia Yokogawa CW500.	p. 60
26	Teste comparativo de tensão CW500 X NM1 no Canal 1.	p. 61
27	Teste comparativo de tensão CW500 X NM1 no Canal 2.	p. 61
28	Teste comparativo de tensão CW500 X NM1 no Canal 3.	p. 62
29	Teste comparativo de corrente CW500 X NM1 nos Canais 1,2 e 3.	p. 63
30	Método utilizado para avaliar o parâmetro de frequência.	p. 64
31	Frequência medida com CW500 e NM1.	p. 64
32	Motor utilizado como carga para avaliar o fator de potência.	p. 66
33	Medição realizada no motor através do medidor CW500.	p. 67
34	Medição realizada no motor através do medidor NM1.	p. 68
35	Espectro de frequência da corrente capturado através do medidor NM1 em uma instalação elétrica do tipo residencial.	p. 69
36	Teste comparativo dos harmônicos de tensão no laboratório de eletrônica do NTI da UFRN.	p. 70
37	Harmônicos de tensão criados através do gerador de funções.	p. 70
38	Harmônicos de tensão gerados pelo <i>Nobreak</i>	p. 71
39	Harmônicos de tensão gerados pelo <i>Nobreak</i> no espectro	p. 71
40	Esquema do medidor desenvolvido parte 1.	p. 78
41	Esquema do medidor desenvolvido parte 2.	p. 79
42	Leiaute do medidor desenvolvido.	p. 80

Lista de tabelas

1	Lista de domínio e respectivas descrições.	p. 25
2	Ordem de um fitro digital.	p. 37
3	Resultado do experimento para avaliação da medição de tensão e corrente.	p. 59
4	Avaliação do fator de potência em cargas conectadas a rede de energia elétrica.	p. 66

Lista de abreviaturas e siglas

QEE - Qualidade da Energia Elétrica

SG - *Smart Grid*

RI - Rede Inteligente

AMR - *Automatic Meter Reading*

AMI - *Advanced Metering Infrastructure*

HAN - *Home Area Network*

NAN - *Neighborhood Area Network*

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

REI - Rede Elétrica Inteligente

IEDs - *Intelligent Electronic Devices*

AMM - *Advanced Meter Management*

MDM - *Meter Data Management*

DEC - Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

FEC - Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

FAU - Fundação de Apoio Universitário

PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

VTCD - Variações de Tensão de Curta Duração

NEI - Norma Euclidiana Instantânea

TW - Transformada de Wavelet

DFT - *Discrete Fourier Transform*

IDFT - *Inverse Discrete Fourier Transform*

FFT - *Fast Fourier Transform*

DSP - *Digital Signal Processor*

DAC - *Digital-to-Analog Converter*

PDS - *Processamento Digital de Sinais*

IIR - *Infinite Impulse Response*

FIR - *Finite Impulse Response*

RMS - *Root Mean Square*

RTC - *Real-Time Clock*

LCD - *Liquid Crystal Display*

ARM - *Advanced RISC Machine*

DMA - *Direct Memory Access*

TP - *Transformador de Potencial*

TC - *Transformador de Corrente*

BIBO - *Bounded Input / Bounded Output*

Sumário

1	INTRODUÇÃO	p. 17
1.1	Contextualização do trabalho	p. 18
1.2	Objetivo geral	p. 19
1.2.1	Objetivos específicos	p. 19
1.2.2	Funcionalidades	p. 20
1.3	Justificativa	p. 20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	p. 22
2.1	Conceito de <i>Smart Grid</i>	p. 22
2.2	<i>Smart meters</i>	p. 27
2.3	Medição de tensão e corrente	p. 30
2.4	Qualidade da energia elétrica	p. 31
2.5	Técnicas de processamento digital de sinais	p. 33
2.5.1	Transformada discreta de Fourier	p. 33
2.5.2	Transformada rápida de Fourier	p. 34
2.6	Filtros digitais	p. 35
2.6.1	Filtro Digital IIR	p. 37
2.6.2	Filtro Digital FIR	p. 38
2.7	Conclusão	p. 39
3	DESENVOLVIMENTO DO MEDIDOR	p. 41
3.1	<i>Hardware</i>	p. 41

3.1.1	Condicionamento de tensão	p. 42
3.1.2	Condicionamento de corrente	p. 44
3.1.3	Proteção contra sobretensões	p. 46
3.1.4	Filtros	p. 47
3.1.5	Montagem do medidor	p. 48
3.2	O <i>firmware</i>	p. 50
4	VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL	p. 54
4.1	Experimento 1: Avaliação da precisão de medição	p. 54
4.1.1	Metodologia	p. 55
4.1.2	Resultados	p. 57
4.2	Experimento 2: Teste comparativo de tensão e corrente	p. 58
4.2.1	Metodologia	p. 59
4.2.2	Resultados	p. 60
4.3	Experimento 3: Teste comparativo de frequência	p. 62
4.3.1	Metodologia	p. 63
4.3.2	Resultados	p. 64
4.4	Experimento 4: Teste comparativo do fator de potência	p. 65
4.4.1	Metodologia	p. 65
4.4.2	Resultados	p. 65
4.5	Experimento 5: Teste comparativo de harmônicas	p. 67
4.5.1	Metodologia	p. 67
4.5.2	Resultados	p. 69
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	p. 73
5.1	Proposta de atividades futuras	p. 74
	Referências	p. 75

Apêndice A - Projeto do <i>hardware</i>	p. 78
Apêndice B - Projeto do <i>firmware</i>	p. 81
Apêndice C - Características do microcontrolador	p. 91
Apêndice D - Manual do medidor NM1	p. 92

1 INTRODUÇÃO

O sistema de distribuição de energia elétrica está em constante desenvolvimento, com o intuito de aperfeiçoar a qualidade do fornecimento de energia elétrica aos diversos tipos de consumidores, sejam eles industriais, comerciais ou residenciais e, a operação segura de um sistema elétrico de potência é garantida pelo fornecimento ininterrupto da energia com os padrões desejáveis de qualidade.

Devido a mudança do perfil dos consumidores industriais e a evolução constante de dispositivos mais eficientes inseridos na área da eletrônica de potência, o termo qualidade da energia elétrica (QEE) torna-se cada vez mais objeto de estudo e preocupação por parte das concessionárias e dos consumidores. Vale ressaltar que, ao mesmo tempo que tais dispositivos devem ser supridos por tensões senoidais para a garantia do seu funcionamento pleno, os mesmos são caracterizados pelo seu comportamento não linear e atuam, por conseguinte, como potenciais fontes de correntes e tensões harmônicas, as quais impactam fortemente nos padrões de qualidade da energia do sistema (DUGAN M. F. MCGANAGHAN; BEATY, 2004).

A energia elétrica é gerada e fornecida na forma alternada senoidal com frequência e amplitude de tensão dentro de limites definidos, estabelecidos através de portarias e/ou resoluções nacionais, com o objetivo de garantir a qualidade da energia entregue aos consumidores e o bom funcionamento das cargas e dos equipamentos do sistema elétrico (DRIESEN VAN CRAENENBROECK T., 1999).

A relevância do tema tratado encontra grande respaldo quando das considerações de seus efeitos negativos na forma de aquecimentos, sobretensões e operação imprópria de vários componentes das redes elétricas (GHORBANI., 2015).

1.1 Contextualização do trabalho

Em meados de 1970 surgiram os primeiros transdutores eletrônicos (EEI, 2014) utilizados pelas concessionárias para medição de energia e demanda. Apesar de apresentar um custo mais elevado se comparado com os medidores eletromecânicos, estes transdutores apresentavam uma maior estabilidade e precisão. Por estas razões eles começaram a ser usados em aplicações especiais, por exemplo, na medição de fronteiras¹, devido a necessidade de uma medição mais precisa. O medidor funcionava com uma saída analógica, de tensão ou corrente contínua, proporcional à potência medida. A energia também poderia ser medida através de uma saída de pulsos. A saída analógica podia ser conectada a instrumentos indicadores de painel ou através de registradores gráficos, já a saída de pulsos podia ser ligada a contadores eletromecânicos ou através de registradores eletrônicos.

Em 1980 registradores eletrônicos microprocessados começaram a fazer parte de alguns medidores eletromecânicos. Através de pulsos que eram emitidos pelo disco em rotação do medidor, o controle e armazenamento dos dados eram realizados nesses registradores. Sendo capazes de realizar funções complexas que não poderiam ser feitas pelos medidores eletromecânicos, como por exemplo, cálculo de demanda deslizante, tarifas horo-sazonais e detecção de fraudes. Os primeiros medidores totalmente eletrônicos utilizados para faturamento nesta época tinham assim como na década anterior, um custo ainda elevado, e só eram utilizados em aplicações especiais, onde era necessário uma medição de alta precisão.

Ná década seguinte, começaram a surgir medidores eletrônicos com preços competitivos e com recursos diferenciais que não poderiam ser oferecidos pelos medidores eletromecânicos. Entre estes recursos pode-se destacar: diagnóstico da instalação, capacidade de comunicação remota e registro de eventos que influenciam na qualidade da energia elétrica, como também outros recursos complementares de diagnóstico que reduzem erros de instalação e custo de implantação como a detecção de inversão de polaridade dos transformadores de medição ou inversão de sequência de fase.

Este trabalho propõe a possibilidade de incluir novos recursos aos medidores de faturamento, bem como a integração do consumidor ao controle da gestão do consumo e da qualidade da energia elétrica através de uma interface amigável e de fácil acesso a partir de uma rede de dados sem fio. Esse trabalho leva em conta as limitações dos medidores atuais

¹A fronteira de medição é como uma “fronteira imaginária desenhada em torno de equipamentos, sistemas ou instalações para segregar aqueles que são relevantes na determinação da economia de energia daqueles que não o são”. Entende-se que a fronteira é como uma fronteira geográfica, separando os equipamentos que interferem na ação da eficiência energética dos que não o fazem.

e procura soluções que possam ser aplicadas a medidores já instalados em consumidores.

1.2 Objetivo geral

De forma geral, a proposta deste trabalho é o desenvolvimento de um medidor eletrônico capaz de determinar o consumo e a qualidade da energia elétrica. Realizando o uso mais eficiente da rede elétrica através da integração a redes inteligentes (*smart grids*), uma das principais promessas de melhoria no que diz respeito ao uso racional do sistema elétrico como um todo. Com a implementação do medidor eletrônico será possível ao consumidor obter a qualquer momento o registro do consumo de potência, histórico de demanda e registro de anomalias identificadas pelo medidor.

1.2.1 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, este trabalho apresenta a seguinte estrutura:

- Realizar o controle de demanda elétrica, com o objetivo de evitar o pagamento de tarifas que ultrapassem a demanda mensal contratada, possibilitando ao consumidor o uso consciente da energia elétrica.
- Detectar e registrar anomalias e valores que qualificam e quantificam os valores nominais dos principais parâmetros da rede elétrica.
- Armazenar os dados coletados em um servidor web e disponibiliza-los através de um aplicativo integrado ao módulo de comunicação sem fio do medidor eletrônico.
- Implementar um sistema de backup de dados através de um cartão de memória, com o objetivo de evitar possíveis falhas de conexão no momento do envio dos dados para o servidor web.
- Proporcionar ao usuário do medidor eletrônico uma interface amigável para visualização e controle dos dados a partir de uma tela sensível ao toque.
- Realizar experimentos em bancada com medidores de energia comerciais e comparar os erros obtidos com o medidor eletrônico desenvolvido nesta dissertação.

Desse modo, o presente trabalho apresenta uma contribuição teórica e prática para a melhor compreensão dos fenômenos presentes na medição e armazenamento de dados que podem ser realizadas por medidores eletrônicos.

1.2.2 Funcionalidades

- Disponibilizar aos consumidores de energia elétrica um equipamento de monitoramento da qualidade e controle de consumo da rede elétrica com toda a facilidade e comodidade que a internet oferece.
- Registrar automaticamente anomalias detectadas na rede e armazená-las para futuras consultas.
- Permitir um controle de consumo por meio de interface local ou remota, permitindo um rateio do consumo de energia de forma eficiente e precisa.

1.3 Justificativa

As limitações existentes nos medidores utilizados pela concessionária fazem com que os consumidores não tenham como verificar se seus equipamentos estão expostos a um fornecimento de energia elétrica de baixa qualidade. Uma medição mais exata com garantia da qualidade de energia para os consumidores de baixa tensão é igualmente vantajosa para as concessionárias, evitando multas e sanções decorrentes de eventuais falhas nestes sistemas.

Seria extremamente útil a existência de um dispositivo capaz de medir com precisão o consumo e a qualidade da energia elétrica, apresentar os resultados em uma página web disponível na rede mundial de computadores, e informar ao usuário qual a previsão de consumo mensal do mesmo, caso ele mantenha o padrão atual de utilização da energia elétrica. Essa ferramenta se torna ainda mais importante quando se remete ao fato de que diferentes bandeiras tarifárias deveriam ser aplicadas para cada horário do dia, de acordo com demanda e oferta de eletricidade, dificultando o controle manual do consumo por parte do usuário.

O desenvolvimento de equipamentos e a evolução dos modelos de supervisão e monitoramento da qualidade da energia elétrica consumida é uma forma de contribuir para a redução de gastos e o uso eficiente dos recursos energéticos, de forma a otimizar o seu emprego.

Esta dissertação de mestrado está organizada na seguinte estrutura:

Na Introdução é apresentado um breve relato desta dissertação.

O capítulo 2 apresentará a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento

do medidor.

O capítulo 3 descreverá as etapas de desenvolvimento do dispositivo.

O capítulo 4 apresentará a validação experimental utilizada para realização de testes no medidor.

Finalizando, no capítulo 5 serão feitas a conclusão e as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Realizada a contextualização do desenvolvimento do trabalho, é agora explorado, o conceito de redes inteligentes, também conhecidas como *Smart Grids*, fazendo-se uma comparação com as redes elétricas tradicionais. Em seguida é explicado o conceito de medição inteligente, conceito este que será explorado também no desenvolvimento do medidor. Faz-se necessário o entendimento desses conceitos pois, neste trabalho, objetiva-se o desenvolvimento de um medidor eletrônico inteligente, que juntamente com outros dispositivos inteligentes, poderão integrar-se a uma *Smart Grid*.

Também são explorados no capítulo os conceitos de qualidade da energia elétrica, as técnicas de processamento de sinais e os filtros digitais.

2.1 Conceito de *Smart Grid*

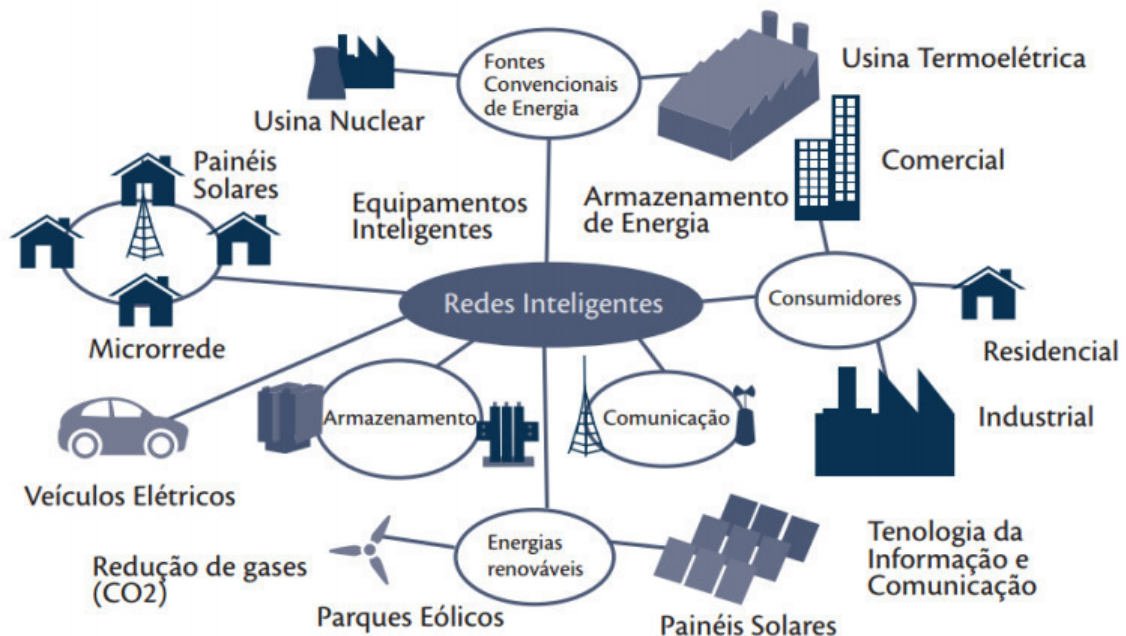
O termo *Smart Grid* (SG) é composto por um conjunto de características, contudo algumas delas são universais. Entre essas características estão um sistema mais confiável, seguro, econômico, eficiente e ambientalmente correto. As redes inteligentes têm como objetivo a otimização da geração, distribuição e consumo da energia elétrica, viabilizando a entrada de novos fornecedores e consumidores, trazendo grandes melhorias no monitoramento, na gestão, na automação e na qualidade da energia ofertada.

Essencialmente, o conceito de Rede Inteligente (RI) está relacionado à abordagem da rede de energia elétrica dotada de tecnologias digitais e recursos computacionais e de comunicação avançados, com o intuito de monitoramento e gerenciamento da eletricidade ao longo da estrutura de transporte e distribuição aos consumidores finais (IEA, 2011).

A evolução das redes tradicionais para as *smart grids*, redes inteligentes de energia elétrica, segue uma tendência mundial, como é o caso dos Estados Unidos, Japão e países da Europa. Em algumas dessas experiências internacionais cita-se como benefício, por exemplo, o adiamento de investimentos em geração de energia elétrica em até 3 anos,

devido à eficiência energética alcançada com as *smart grids* (AMCHAM, 2011). A Figura 1 ilustra uma estrutura de uma *smart grid*.

Figura 1: Estrutura de subsistemas de uma *smart grid*.



Fonte: (KAGAN, 2013)

No Brasil, se espera que o sistema permita o controle *online* do consumo de energia nos consumidores finais, além disso a execução de operações como cortes e religamento, por exemplo. Como incentivo, futuramente, a tarifação pré-paga e horosazonal poderão permitir ao cliente consumir energia fora dos horários de pico, o que levaria de fato a uma economia na distribuição de energia e conseqüentemente no redimensionamento da rede elétrica. Nas redes tradicionais o fluxo de informação é unidirecional como ilustrado na Figura 2, o que dificulta a implementação de sistemas de medição em quatro quadrantes, ou seja, em ambos os fluxos de potência.

Por outro lado a Figura 3 ilustra uma rede elétrica inteligente com os fluxos de energia e comunicação bidirecionais, incluindo a adição de novos conceitos.

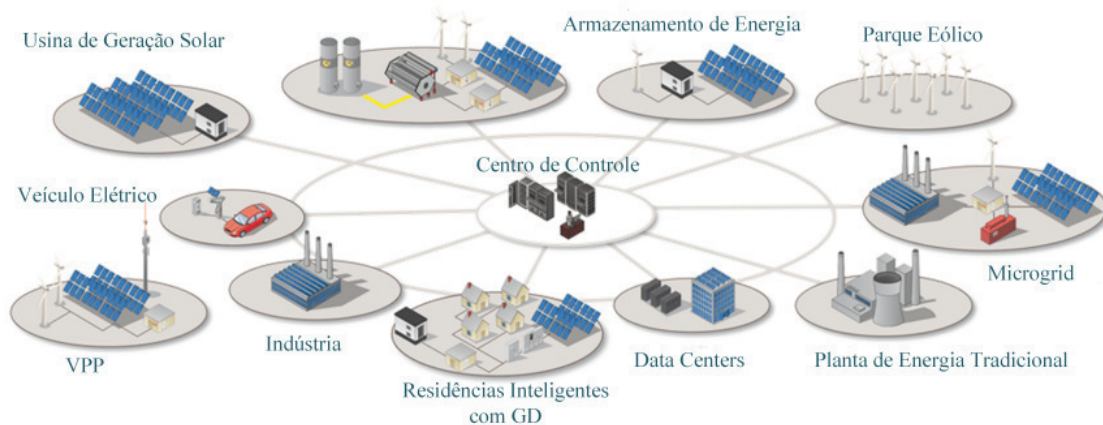
Os equipamentos de medição são divididos em modelos monofásicos, bifásicos e trifásicos, todos estes podendo ser utilizados para medições diretas ou indiretas, tipicamente utilizados para medições residenciais e comerciais. No que diz respeito à comunicação entre os diversos equipamentos neste modelo de rede inteligente, destacam-se as aplicações de AMR - *Automatic Meter Reading* e AMI - *Advanced Metering Infrastructure*, sistemas de gerenciamento remoto, que utilizam conceitos de *Home Area Network* - HAN e o

Figura 2: Rede elétrica tradicional.



Fonte: SBRC, 2015. Acesso em: abril 2019

Figura 3: Rede elétrica inteligente.



Fonte: SBRC, 2015. Acesso em: abril 2019

Neighborhood Area Network – NAN. Além de tecnologias de comunicação como o Zigbee, entre outras.

As redes HAN seriam responsáveis pela conexão entre eletrodomésticos e o medidor de energia, possibilitando ao consumidor gerenciar o seu consumo em tempo real, minimizando custos e programando o desligamento de eletrodomésticos nos horários de pico.

Outro benefício está relacionado à tarifação pré-paga, onde o consumidor pode gerenciar melhor sua despesa mensal com energia elétrica. Além disso, como há uma permanente conexão com a distribuidora os equipamentos poderão trocar informações gerenciando de forma individualizada cada consumidor, podendo ainda detectar falta de energia em cada

residência (KAGAN, 2013).

Segundo Nist (2009), as RI compreendem sete principais domínios interligados entre si: geração, transmissão, distribuição, consumo, mercados, operação de rede e provisão de serviço.

A Tabela 1 adaptada, encontrada na série de documentos técnicos do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) lista os domínios com as respectivas descrições.

Tabela 1: Lista de domínio e respectivas descrições.

Domínio	Atores do domínio
Geração	Relacionado às unidades geradoras de grandes parcelas de eletricidade.
Transmissão	Relacionado aos recursos de transporte de eletricidade a longas distâncias.
Distribuição	Relacionado a distribuição de eletricidade aos consumidores.
Consumidor	Relacionado aos usuários finais da eletricidade que assumem papel de produtor e consumidor – <i>prosumer</i> ou <i>prosumidor</i> .
Mercados	Relacionado aos operadores e participantes do mercado de energia.
Operações de Rede	Relacionado aos gerenciadores do fluxo de eletricidade.
Provisão de serviços	Relacionado aos fornecedores de utilidades e serviços aos consumidores finais.

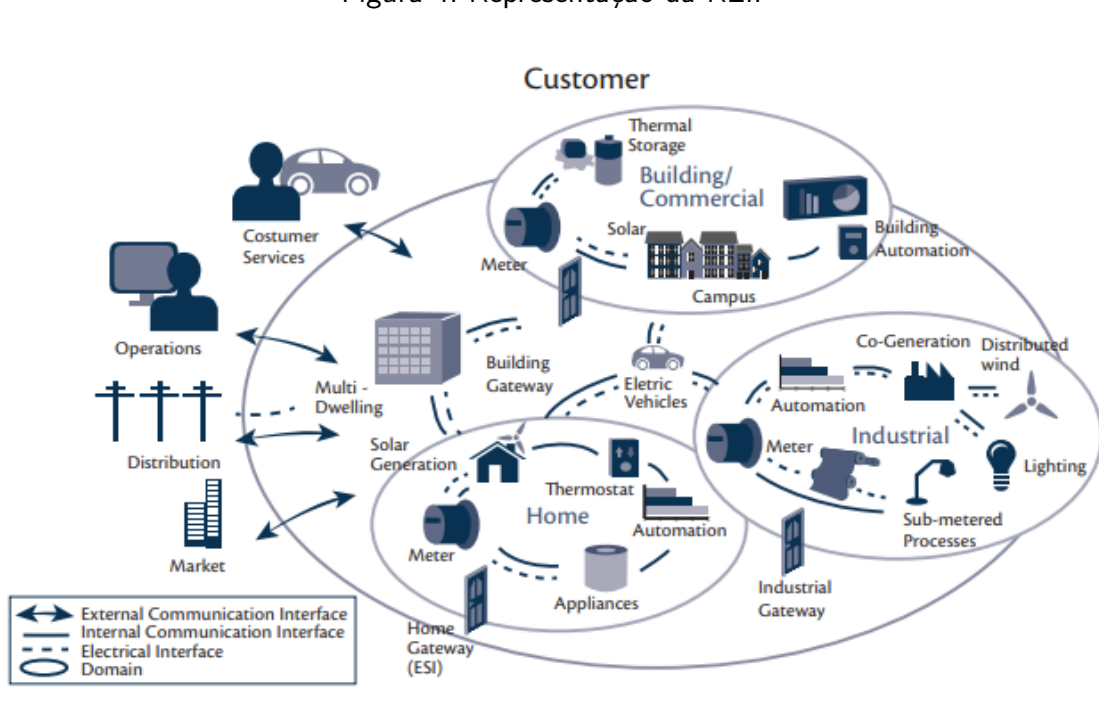
Fonte: Adaptado de (NIST, 2009).

As grandes mudanças, no entanto, devem ocorrer entre a distribuição e os pequenos consumidores, pois as grandes plantas de geração e o sistema de transmissão já possuem grande parte da automatização disponível, até como requisito para estabilidade alcançada atualmente. Além disso, consumidores e produtores de grande porte já participam do mercado de energia. Dessa forma, a rede de distribuição e a integração de geração nesse nível devem ser os grandes responsáveis pelas mudanças no sistema elétrico de potência, bem como a criação de diversos serviços como: gerenciamento de energia de edificações, gerenciamento de faturas de energia e instalação e manutenção de equipamentos de geração e comunicação.

Como informa Falcão (2010), a introdução do conceito de REI (Rede Elétrica Inteligente) produzirá uma convergência acentuada entre as infraestruturas de geração, transmissão e distribuição de energia e a infraestrutura de comunicações digitais e proces-

samento de dados. A Figura 4 apresenta uma ilustração desse conceito (NIST,2009). A infraestrutura de comunicações funcionará como no conceito de uma “Internet de Equipamentos²”, interligando os chamados *Intelligent Electronic Devices* (IEDs) e trocando informações e ações de controle entre os diversos segmentos da rede elétrica. Essa convergência de tecnologias exigirá o desenvolvimento de novos métodos de controle, automação e otimização da operação do sistema elétrico, com forte tendência para utilização de técnicas de resolução distribuída de problemas baseadas na utilização de multi-agentes (CGEE, 2012).

Figura 4: Representação da REI.



Fonte: (NIST, 2009).

Algumas das características geralmente atribuídas à REI são (IEA, 2011):

- Autorecuperação - capacidade de automaticamente detectar, analisar, responder e restaurar falhas na rede.
- Participação proativa dos consumidores - habilidade de incluir os equipamentos e comportamento dos consumidores nos processos de planejamento e operação da rede.
- Tolerância a ataques externos - capacidade de mitigar e resistir a ataques físicos e cyber-ataques.

²Internet das Coisas

- Qualidade da energia - prover energia com a qualidade exigida pela sociedade digital.
- Acomodação de uma grande variedade de fontes e demandas - capacidade de integrar de forma transparente (*plug and play*) uma variedade de fontes de energia de várias dimensões e tecnologias.
- Menor impacto ambiental do sistema produtor de eletricidade - redução de perdas e utilização de fontes renováveis de baixo impacto ambiental.
- Resposta da demanda - mediante a atuação remota em dispositivos dos consumidores.
- Viabiliza e beneficia-se de mercados competitivos de energia - favorece o mercado varejista e a microgeração.

Assim, as REI apresentam-se como uma alternativa inteligente aos altos investimentos exigidos para atender a demanda da forma tradicional, inserindo a possibilidade de geração distribuída, cogeração, veículos elétricos, automação residencial, predial, comercial e industrial, armazenamento de energia, medição *online*, com capacidade adaptativa e de autorecuperação (HEYDT, 2009).

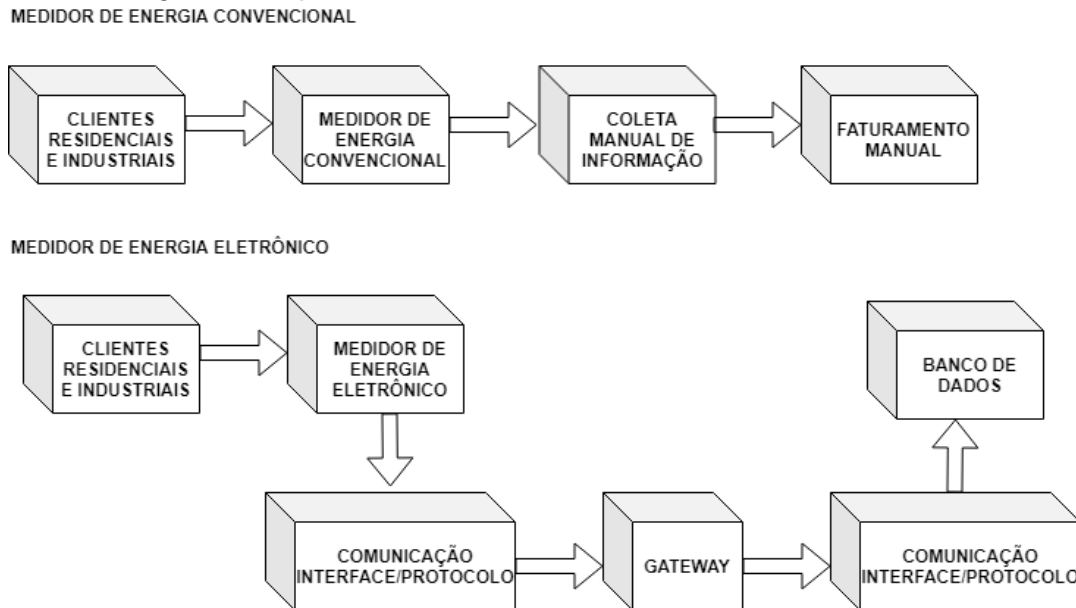
2.2 *Smart meters*

Com a evolução dos medidores eletromecânicos para os medidores eletrônicos houve uma mudança na forma de leitura e geração de faturas para o consumidor. Todavia apesar da mudança, o fluxo de energia e de dados não se modificou. Sendo a única vantagem no processo de faturamento de energia consumida, passando a ser automatizado. A Figura 5 ilustra ambos os processos de leitura, manual e automática.

Devido as características do medidor eletrônico representado na Figura 5, o dispositivo não pode ser considerado um *Smart Meter*, pois sua única característica é o envio de informações. Um *Smart Meter* possui algumas funções de análise, verificação de qualidade da energia e detecção de fraudes.

Segundo o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) (2012) “Medição inteligente refere-se a um sistema que compreende medidores digitais com capacidade de processamento, armazenamento e comunicação, infraestrutura para comunicação bidirecional e *software* de aplicação que permite a aquisição automática de dados em intervalos de tempo configurável, envio de dados (comando e controle) remotamente para o medidor

Figura 5: Arquitetura dos medidores convencionais e eletrônicos.



Fonte: adaptado de (FAU, 2013).

e sistema de gerenciamento, oferecendo recursos tais como gerenciamento de ativos, informação de segurança e análise de dados. Neste sentido, o medidor tornou-se um sistema computacional (entidade) e, portanto, inteligente”.

Com os significativos estímulos à geração distribuída e a utilização de painéis solares, as concessionárias investiram em medidores com novas funcionalidades, permitindo um melhor fluxo de energia pela rede. Dessa forma a geração deixa de ser, uma exclusividade, da concessionária para o consumidor, a energia passa a ser gerada também pelo consumidor. Com a mudança no fluxo de energia da rede convencional, houve a necessidade da evolução dos medidores de energia, além disso se iniciaram os estudos de novas formas de cobrança para o consumidor, por exemplo, a opção de consumo de energia "pré-paga". A integração de novas funcionalidades para o medidor, a mudança no fluxo de energia e a comunicação em um duplo sentido, ou seja, da central de distribuição para o medidor e vice-versa, surgiu uma nova categoria de medidores, a Infraestrutura de Medição Avançada (AMI).

Em diversos casos, a medição inteligente é considerada a própria *Smart Grid*, mas deve-se lembrar que a *smart meter* é apenas umas das etapas do conceito completo de REI. Assim, têm-se os seguintes aspectos que fazem parte da medição inteligente:

- Leitura automática do medidor (*Automated Meter Reading - AMR*) - procedimento

para a geração de fatura, através de comunicação unidirecional com um centro de controle e medição, trazendo maior exatidão nas medições e economia de custos com leituristas;

- Medidor inteligente (*smart meter*) - medidor digital que realiza as medições do consumo de energia, com registro dos dados em intervalos de tempo programáveis e comunicação bidirecional com o centro de controle e medição;
- Gerenciamento do medidor avançado (*Advanced Meter Management* - AMM) - plataforma integrada de gerenciamento dos medidores dispostos em uma rede de comunicação. Tem como funcionalidades o gerenciamento de dispositivo e gestão da plataforma de comunicação, garantindo comunicação confiável entre os medidores e o centro de controle e medição;
- Gerenciamento de dados do Medidor (*Meter Data Management* - MDM) - processa e gerencia os dados gerados pelos medidores, com informações de energia consumida, fator de potência, potência ativa e indicadores de qualidade de energia. Objetiva aperfeiçoar processos como faturamento, eficiência operacional, gestão de demanda de energia, e gestão de fraudes;
- Infraestrutura de medição avançada (*Advanced Metering Infrastructure* - AMI) - infraestrutura de meios de comunicação necessários para permitir as funcionalidades de medição inteligente.

Além da disponibilidade de informações de energia em tempo real, o usuário pode reduzir o consumo de energia elétrica durante os períodos de maior custo da geração. A junção dos medidores inteligentes com uma infraestrutura de comunicação forma uma plataforma que dispõe de dados de gestão de energia do sistema. As principais características dos medidores inteligentes são:

- medição das grandezas elétricas, energia e potência ativa, potência reativa, demanda de potência máxima, tensão, corrente e fator de potência;
- registro dos parâmetros de qualidade de energia, tensão, detecção de falta de longa duração, com cálculo de DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), presença de harmônicos e suas distorções;

- coleta remota de eventos como detecção de fraude, mudança de configuração de tarifação e mudança de potência contratada;
- controle de demanda e carga com capacidade de gerenciar cargas controláveis conectadas ao medidor, podendo limitar potência;
- taxa de amostragem configurável;
- armazenamento de dados em memória de massa;
- emissão automática de fatura;
- configuração bidirecional para leitura remota;
- registros de microgeração;
- imunização à inversão de fase;
- detecção automática de falta na baixa tensão;
- atualização remota de *firmware*.

2.3 Medição de tensão e corrente

O projeto de um medidor de energia, analógico ou digital, começa com o estudo das variáveis a serem analisadas, nesse caso a corrente e a tensão. Os dois principais fatores que caracterizam essas variáveis são a frequência e a amplitude do sinal. Contudo de forma mais detalhada os parâmetros de frequência e amplitude podem ainda ser subdivididos, a exemplo das harmônicas, que estão intrinsecamente ligadas a frequência do sinal. Outras variáveis como tensão de curta e longa duração estão classificadas dentro do grupo de amplitude do sinal. Assim, para medir a tensão e a corrente os parâmetros de frequência e amplitude devem ser monitorados.

Para desenvolver um medidor de consumo e qualidade da energia elétrica é necessário o conhecimento de conceitos de uma variedade de áreas, a exemplo da eletrônica analógica, eletrônica digital, eletrônica de potência, processamento de sinais, conceitos de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) e teoria de tarifação. Em sua dissertação, Ronimar Espindula cita que vários recursos avançados podem ser encontrados em (PARLE; MADRIGAL; ACHA, 2001) e em (DEOKAR; WAGHMARE, 2014). "As publicações recentes demonstram a importância que a área tem adquirido, com a implementação em *softwares* de simulação e dispositivos físicos de análise em tempo real. Em (SUNG; CHUNG,

2014), um sistema de monitoramento distribuído para gerenciamento de demanda utilizando redes ZigBee é implementado. Outro exemplo pode ser encontrado em (BUCCI; FIORUCCI; LANDI, 2003), em que vários computadores com um cartão de aquisição de dados estão ligados à rede através de um transdutor de tensão" (ESPINDULA, 2016).

Para determinar a especificação do equipamento em relação ao processamento, armazenamento e precisão é importante caracterizar as variáveis a serem monitoradas em termos de normas. As principais normas utilizadas como referência neste trabalho para definir quais medições, faixa de variação e erro máximo permitido são a IEC 61000-4-30 (IEC, 2002), a IEEE 519 (IEEE, 2014), a IEC 61000-4-15 (IEC, 2010) e o módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018) da ANEEL.

O relatório técnico realizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em conjunto com a Fundação de Apoio Universitário (FAU) sugere que os requisitos mínimos para os medidores de parâmetros da qualidade da energia elétrica sejam simplificados de forma a abranger a classe de exatidão necessária para a medição de cada fenômeno, conforme a seguir:

- precisão de até 1,0% da leitura para tensão em regime permanente;
- precisão de até 3,0% da leitura para distorções harmônicas;
- precisão de até 3,0% da leitura para desequilíbrios de tensão;
- precisão de até 5,0% da leitura para flutuações de tensão;
- precisão de até 3,0% da leitura para a amplitude e 1 ciclo para a duração das variações de tensão de curta duração.

Outrossim segundo as normas IEC 61000-4-30 e IEEE 519 para realizar a medição de transientes de tensão, faz-se necessário a caracterização do valor RMS a cada meio ciclo. Dessa forma, o medidor deve detectar um grande espectro de parâmetros tais como afundamentos, elevações, harmônicos, distorções, ruídos elétricos e transientes com uma taxa de amostragem extremamente elevada.

2.4 Qualidade da energia elétrica

Como consequência de falhas ou má operação de equipamentos, o sistema elétrico está sujeito a um conjunto de interferências, que se manifestam na corrente, tensão ou através

de variações da frequência. Estas alterações podem ocorrer nas etapas de consumo ou na distribuição, ou seja, nas instalações dos consumidores ou no sistema de distribuição da concessionária.

A depender da referência, qualidade da energia elétrica pode ter diferentes definições, por exemplo, uma concessionária pode utilizar como critério os parâmetros de confiabilidade do seu sistema para demonstrar dados estatísticos, assim como os órgãos regulatórios. Porém para uma indústria a qualidade da energia elétrica corresponde as características no fornecimento que garantam a operação adequada das suas cargas. Todavia de modo comum, a qualidade da energia está relacionada diretamente com as questões econômicas, ou seja, para a indústria é importante a manutenção e a garantia do desempenho e da competitividade.

Através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (ANEEL, 2018) elaborados pela ANEEL, as normas e padrões de distribuição e desempenho são classificadas em termos de qualidade segundo o módulo 8 da seguinte forma:

- Tensão em regime permanente - compreende o intervalo de tempo da leitura de tensão real, definido como sendo de dez minutos, onde não ocorrem distúrbios elétricos capazes de invalidar a leitura.
- Fator de potência - definido como a relação entre a potência ativa e a potência aparente. Esse indicador determina a eficácia com que a potência ativa está sendo transferida para a carga. O fator de potência só pode ser considerado igual ao cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente no caso de ambas as grandezas serem senóides puras, ou seja, não possuam componentes harmônicas.
- Harmônicos - fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental.
- Desequilíbrio de tensão - fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema.
- Flutuação de tensão - fenômeno caracterizado pela variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea.
- Variação de frequência - associado a desvios no valor da frequência fundamental da tensão.

Além dos parâmetros citados existe ainda as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD), que são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos. Podendo ser classificada em variação momentânea de tensão ou variação temporária de tensão.

2.5 Técnicas de processamento digital de sinais

Para a realização das medições de qualidade da energia é fundamental o uso do processamento digital de sinais, desta forma o medidor eletrônico pode ser desenvolvido utilizando principalmente a transformada de Fourier e a filtragem dos dados.

A transformada de Fourier é uma ferramenta importante na identificação das componentes de frequência presentes no sinal elétrico como é o caso dos harmônicos. Já a filtragem de dados é utilizada para eliminar distorções na medição normalmente causadas por etapas anteriores, como também pode ser útil na eliminação de sinais que não são interessantes para determinado algoritmo de medição. A eliminação de um sinal de corrente contínua gerado por um circuito analógico, por exemplo, ou no processo de integração de sinais obtidos por sensores.

2.5.1 Transformada discreta de Fourier

Em casos práticos, normalmente a avaliação da transformada de Fourier não é feita utilizando os procedimentos analíticos. Muitas vezes não se dispõe de uma expressão analítica para a função que se deseja analisar o espectro. Entretanto a *Discrete Fourier Transform* (DFT) - Transformada Discreta de Fourier, é muito usada no estudo do espectro de sinais e é determinada numericamente com o auxílio de computador digital.

Considerando-se N amostras do sinal no domínio do tempo, denotadas $f(k)$, $k=0,1,2,\dots,N-1$, a DFT é dada por um conjunto de N amostras do sinal no domínio da frequência, denotadas por $F(n)$, $n=0,1,2,\dots,N-1$ e definidas por:

$$F(n) \equiv \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) e^{-j2\pi nk/N} \quad (2.1)$$

Diz-se então que $f(k)$ com $F(n)$ formam um par transformada e a reobtenção do sinal no domínio do temporal pode ser feita usando a transformada inversa discreta de Fourier - *Inverse Discrete Fourier Transform* (IDFT):

$$f(k) = \sum_{n=0}^{N-1} F(n)e^{j2\pi kn/N} \quad (2.2)$$

Através das equações é possível ver que a computação direta da DFT e da IDFT possui N multiplicações complexas e $N-1$ somas complexas. Segundo artigo intitulado como Estudo comparativo entre algoritmos das transformadas discretas de Fourier e Wavelet (BARBON., 2015), é possível observar o custo computacional de ordem quadrática, ou seja, na ordem de $O(n^2)$.

2.5.2 Transformada rápida de Fourier

Em 1965 J.W.Cooley (IBM) e J.W.Tukey (Bell Labs) sugeriram um algoritmo para otimizar a transformada rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*) que por suas características de implementação fazem com que a complexidade caia de $O(n^2)$ para $O(n \log 2n)$ operações. A Equação da FFT divide o somatório em duas partes relacionadas aos índices pares e ímpares chamados de parte real e imaginária respectivamente.

O algoritmo matemático da FFT é a melhor forma de calcular a DFT e a sua inversa com menor esforço computacional que a DFT. A DFT de um sinal de tamanho n pode ser reescrita como a soma de duas TF's, cada uma com tamanho igual a $n/2$, uma originada dos elementos pares do sinal e outra dos elementos ímpares, considerando as seguintes formulações 2.3 a 2.6.

$$Fk = \sum_{j=0}^{n-1} e^{2\pi ijk/n} f_j \quad (2.3)$$

$$Fk = \sum_{j=0}^{n/2-1} e^{2\pi ik(2j)/n} f_{2j} + \sum_{j=0}^{n/2-1} e^{2\pi ik(2j+1)/n} f_{2j+1} \quad (2.4)$$

$$Fk = \sum_{j=0}^{n/2-1} e^{2\pi ik(n/2)j} f_{2j} + \sum_{j=0}^{n/2-1} e^{2\pi ik(2j+1)/n} f_{2j+1} \quad (2.5)$$

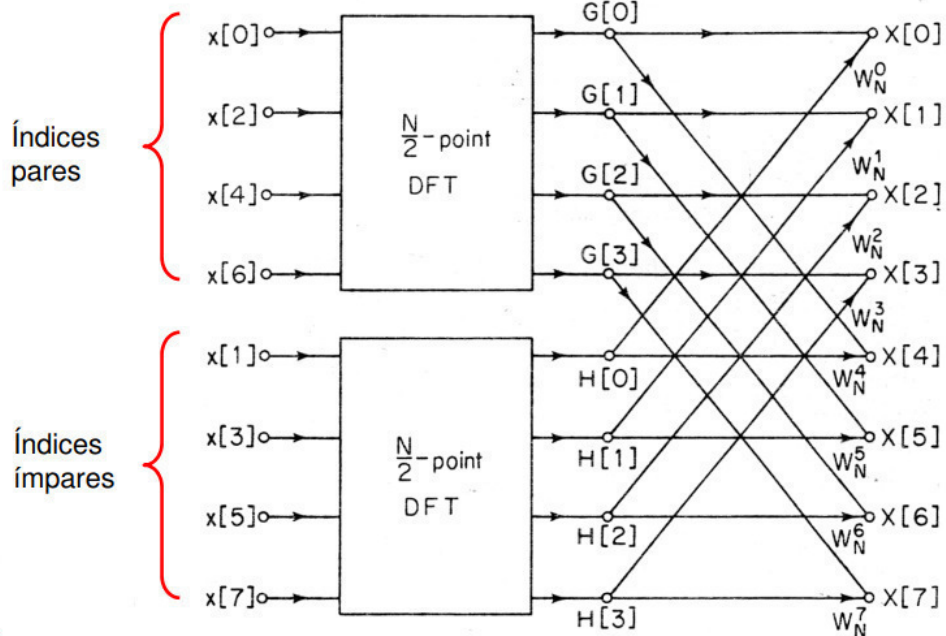
$$Fk = Fk^e + W^k Fk^o \quad (2.6)$$

Nessas formulações $W = e^{2\pi i/n}$ representa uma constante. Fk^e é o k -ésimo componente

da TF de tamanho $n/2$ formado pelos componentes pares (“e”) da fj original. Já Fk^0 , representa o k -ésimo componente da TF de tamanho $n/2$ formado pelos componentes ímpares (“o”) da fj original. A variação de k é de 0 até n , não restringindo-se somente até $n/2$. Por conseguinte, as transformadas Fk^e e Fk^o são periódicas em k com tamanho $n/2$. Portanto, cada transformada se repete a cada dois ciclos para obter Fk (PORFIRIO, 2009).

Cada parcela da Eq. 2.6 é uma DFT de $n/2$ pontos, no caso de uma DFT de 8 pontos, por exemplo, o resultado da decimação no tempo gera o seguinte diagrama de fluxo:

Figura 6: Diagrama de fluxo de uma FFT de 8 pontos.



Fonte: (BUCK, 1999)

O diagrama da Figura 6 mostra que a DFT, na sua entrada, deve ter a ordem trocada com o objetivo de se obter na saída o resultado correto e a ordem de saída ordenada.

2.6 Filtros digitais

A função de um filtro é remover partes não desejadas de um sinal, como o ruído, ou extrair partes úteis de um sinal, como determinadas componentes de frequência que estão dentro do gama de frequência desejada. Um filtro digital é uma implementação de um filtro através de operações matemáticas aplicadas em um sinal amostrado (e quantizado).

O filtro digital usa um processador digital para executar cálculos numéricos em valores

amostrados do sinal de entrada. O processador pode ser um microcontrolador ou um DSP (*Digital Signal Processor*). Em um processo de filtragem digital, o sinal analógico deve ser primeiramente digitalizado usando um conversor analógico-digital. Isto quer dizer que, a cada intervalo de tempo previamente definido é retirada uma amostra do sinal de entrada que vai ser codificada em forma binária e este procedimento é aplicado sucessivamente a cada novo intervalo de tempo. Esta amostragem é transferida ao processador que efetua os cálculos numéricos. Estes cálculos envolvem multiplicações e soma com constantes de seus termos - produtos. Os resultados desses cálculos produzidos pelo processador agora representam valores do sinal filtrado e podem ser reconstituídos através de um DAC (*Digital-to-Analogic Converter*), o qual irá converter o sinal filtrado em um sinal na forma analógica. Num filtro digital, o sinal é representado por uma sucessão de números, em lugar de uma tensão ou corrente. Os filtros digitais são parte importante do Processamento Digital de Sinais (PDS). Na realidade, o desempenho extraordinário deles é uma das razões fundamentais para a popularização do PDS (STEVEN, 1999).

Existem várias vantagens na utilização de filtros digitais, entre elas:

- Um filtro digital é programável, ou seja, a sua operação é determinada por um programa armazenado na memória do processador. Isto significa que o filtro digital pode ser mudado facilmente sem afetar seu circuito eletrônico (*hardware*). No caso de um filtro analógico ocorre somente se mudarmos o seu circuito eletrônico.
- Os filtros digitais são facilmente projetados, sendo os mesmos testados e implementados em um computador ou estação de trabalho de forma simples.
- As características funcionais dos circuitos de filtros analógicos (particularmente os circuitos elaborados com componentes) estão sujeitos a variação da temperatura, variação de valores devido à construção dos componentes utilizados nos circuitos, entre outros parâmetros que dependem do projeto e aplicação. Filtros digitais não sofrem estes problemas, logo são extremamente estáveis obtendo com isso resultados mais precisos.

A ordem de um filtro digital é o número de contribuições previamente armazenadas na memória do processador utilizadas para calcular a próxima componente. A Tabela 2 mostra a equação que relaciona a ordem de um filtro digital.

Filtros Digitais com ordens superiores a segunda podem ser desenvolvidos usando expressões semelhantes. As componentes $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ são chamadas de “Coeficientes

Tabela 2: Ordem de um fitro digital.

Ordem	Equação
Zero - ordem	$Y_n = a_0x_n$
Primeira - ordem	$Y_n = a_0x_n + a_1x_{n-1}$
Segunda - ordem	$Y_n = a_0x_n + a_1x_{n-1} + a_2x_{n-2}$

Fonte: TELECO,2019. Acesso: abril 2019

de Filtro”. Os valores desses coeficientes é que determinam as características do filtro em particular. Outra característica muito importante nos filtros digitais é a sua Função de Transferência. Esta função é obtida pela simetria da expressão do filtro, que permite descrever um filtro por meio de uma expressão conveniente e compacta. Pode-se usar a função de transferência de um filtro para trabalhar fora de sua resposta de frequência (TELECO,2019. Acesso: abril 2019).

2.6.1 Filtro Digital IIR

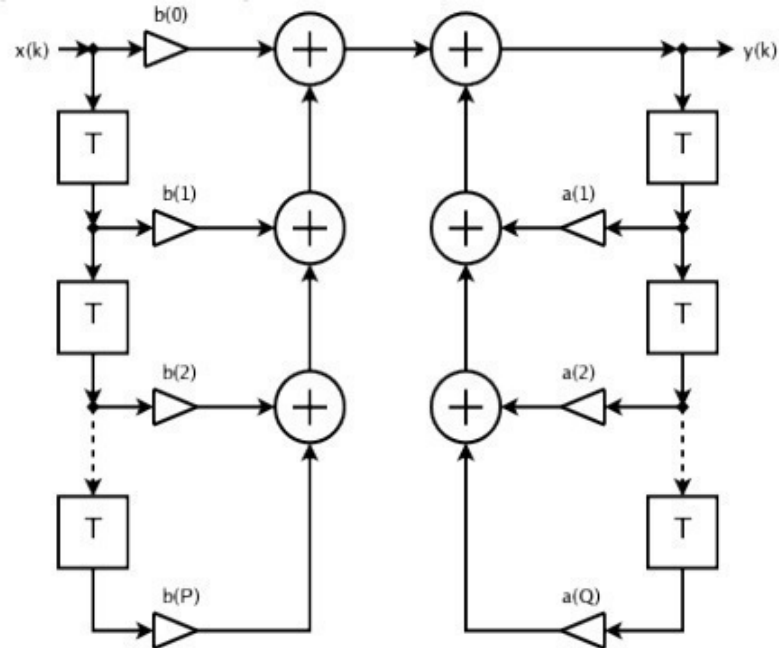
A resposta de um filtro de Resposta Infinita ao Impulso (IIR - *Infinite Impulse Response*) é função dos sinais de entrada presentes e passados, e dos sinais de saída passados (PROAKIS, 1995). A equação (2.7) representa um filtro IIR porque é uma função dos elementos de excitação e resposta. A dependência das saídas passadas (recursividade) faz com que a duração da resposta seja infinita, mesmo quando cessarem os sinais de entrada.

$$Y_n = \sum_{l=0}^L A_l X_{n-l} - \sum_{k=1}^k B_k Y_{n-k} \quad (2.7)$$

Filtros IIR possuem modelos de filtros homólogos aos analógicos (Butterworth, Chebyshev, Elíptico e Bessel) que podem ser analisados e sintetizados usando técnicas tradicionais para projeto de filtros analógicos.

A função de transferência de um filtro digital IIR é uma função racional em Z^{-1} . A Figura 7 ilustra a partir de um diagrama de blocos o filtro IIR.

Figura 7: Diagrama de blocos do filtro IIR.



Fonte: (PROAKIS, 1995).

2.6.2 Filtro Digital FIR

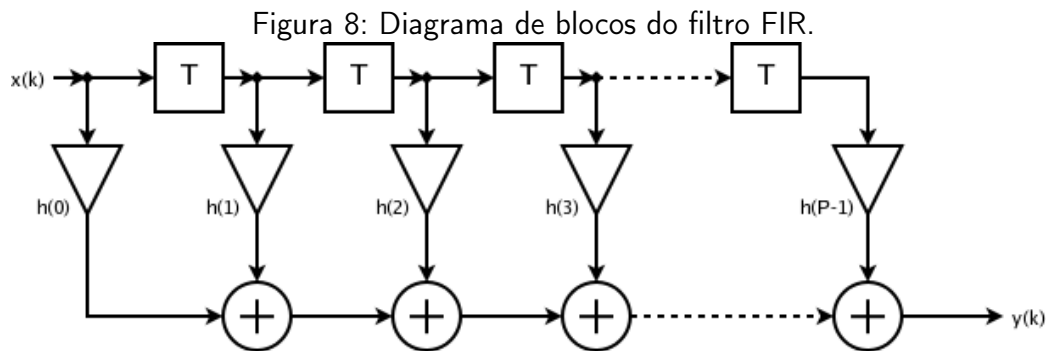
Se as saídas do sistema dependem somente da entrada presente e de um número finito de entradas passadas, então o filtro de Resposta Finita ao Impulso (FIR – *Finite Impulse Response*) tem uma resposta impulsiva finita (LIMA, 2013). Logo a representação de um filtro FIR, esquematizado na Figura 8, de duração L é expressa através da equação (2.8):

$$Y_n = \sum_{l=0}^L A_l X_{n-l} \quad (2.8)$$

Filtros FIR possuem uma resposta ao impulso limitada no tempo. Através do valor dos coeficientes e a ordem do filtro, virtualmente qualquer resposta em frequência pode ser obtida em um filtro FIR, inclusive níveis de performance não alcançáveis por filtros analógicos (KESTER, 2004), porém com enorme demanda de recursos computacionais. Para projetar o filtro FIR têm-se técnicas como, por exemplo, janela, frequência de amostragem e mínimos quadrados ponderados.

As vantagens dos filtros FIR são as seguintes:

- resposta de fase linear e, portanto sem distorção e com aritmética real;
- não tem problemas de estabilidade;
- implementação eficiente através da utilização da TFD.



Fonte: (PROAKIS, 1995).

A função de transferência de um filtro FIR é um polinômio em Z^{-1} . Estes filtros têm como característica diferencial depender apenas da entrada atual e, por definição, de um número finito de entradas passadas, tendo assim uma resposta ao impulso finita (BUCK, 1998).

Os filtros FIR têm três importantes propriedades, são elas:

- têm memória finita e, portanto, qualquer transitório tem duração limitada;
- são sempre BIBO (Bounded Input / Bounded Output) estáveis;
- podem implementar uma resposta em módulo desejada com resposta em fase exatamente linear (isto é, sem nenhuma distorção de fase).

Segundo a última propriedade, como uma resposta em fase linear corresponde a um retardo constante, o problema da aproximação no projeto de filtros digitais FIR torna-se então muito simplificado (HAYKIN, 2007).

2.7 Conclusão

Esse capítulo tratou dos aspectos e ferramentas teóricas utilizadas na elaboração do trabalho. Diversos conceitos sobre qualidade da energia elétrica, as principais técnicas

de processamento de sinais, os filtros digitais e suas características. Adicionalmente, é importante salientar que existem outras técnicas de análise e monitoramento, por exemplo, a Norma Euclidiana Instantânea (NEI) e a Transformada de Wavelet (TW). Todavia, não forneceram resultados satisfatórios, comparados às técnicas aqui abordadas.

3 DESENVOLVIMENTO DO MEDIDOR

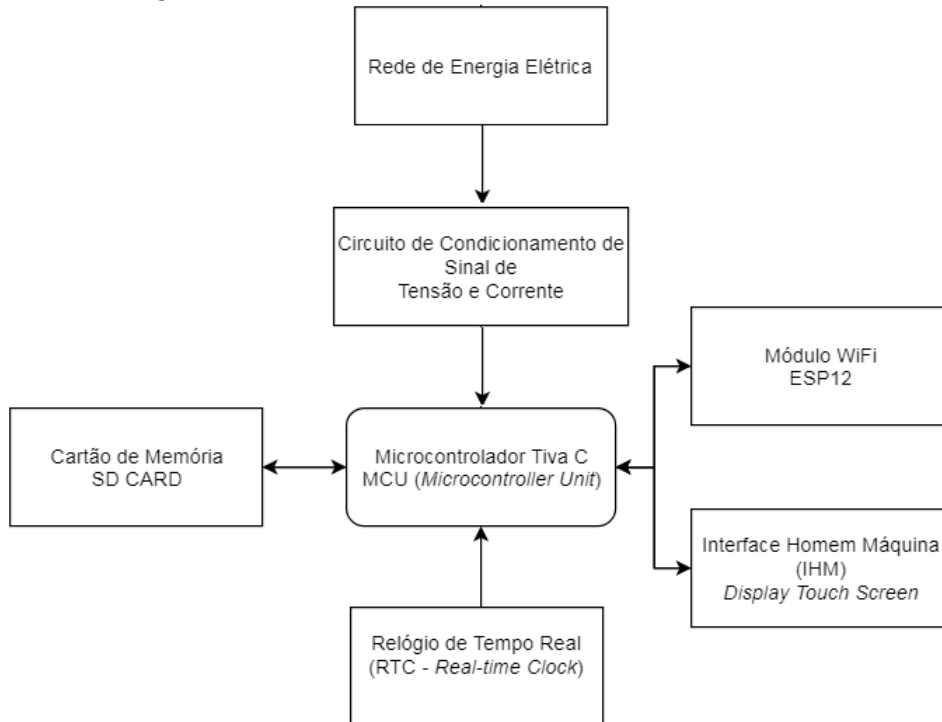
O medidor eletrônico desenvolvido realiza a medição do consumo de energia e registra a ocorrência de distúrbios elétricos, entre eles a variação de tensão, flutuação de tensão, variação de frequência, harmônicos e perturbações momentâneas. Além disso, o medidor também é capaz de determinar os valores instantâneos de tensão, corrente, potência e frequência. A amostragem é realizada de forma contínua segundo critérios de normatização, os dados são processados, em seguida são armazenados em uma memória não volátil, e por fim enviados a um servidor web. Este capítulo trata dos principais aspectos construtivos do dispositivo de medição. Contudo maiores detalhes sobre o *hardware* podem ser obtidos no Apêndice A, e mais informações sobre o modo de uso, peso, dimensões do medidor estão disponíveis no manual anexado ao Apêndice D desse trabalho.

3.1 *Hardware*

Utilizando como referência a maior parte das instalações residenciais e industriais, o medidor foi projetado para um sistema monofásico e trifásico, de baixa tensão, com centro estrela aterrado. O algoritmo implementado no medidor consegue detectar automaticamente se a rede elétrica a ser medida é monofásica ou trifásica, desta forma é possível habilitar ou desabilitar o processamento do desequilíbrio de tensão. A alimentação do medidor é projetada para um sistema monofásico ou bifásico de 220 V. As tensões de medição estão compreendidas no intervalo de -540 V a +540 V, com valor RMS nominal de 220 V.

O sistema utilizado para desenvolver o medidor pode ser dividido em circuito de condicionamento de tensão, condicionamento de corrente, filtro e circuito de proteção. O circuito de condicionamento de tensão tem a finalidade de colocar a disposição do medidor um nível de tensão compatível com o circuito eletrônico projetado, para que o conversor AD,

Figura 9: Estrutura de blocos do medidor desenvolvido.



Fonte: elaboração própria.

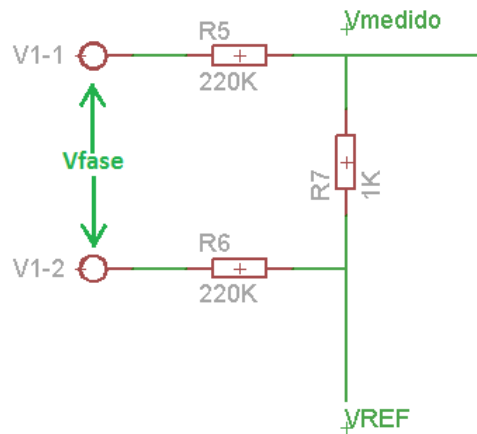
filtro e outras etapas do circuito funcionem com tensões compatíveis. A Figura 9 ilustra a estrutura geral do medidor desenvolvido através de um diagrama de blocos. O circuito de condicionamento de corrente transformará a corrente medida pelo sensor em um valor correspondente de tensão, tornando-a compatível para a leitura da amostra no conversor AD. Entretanto, normalmente a amostra do sinal é acompanhada de um ruído, por isso a necessidade do circuito filtro, que basicamente elimina o ruído e prepara o sinal amostrado para uma leitura mais precisa no conversor analógico-digital. Devido a problemas de sobretensão, o circuito do medidor deve ser protegido, para tal é necessário um circuito capaz de eliminar tensões que extrapolem os valores máximos compreendidos no intervalo do medidor.

3.1.1 Condicionamento de tensão

O circuito de condicionamento de tensão é responsável por conduzir e converter a tensão coletada da rede elétrica a partir de pontas de prova até o microcontrolador. No processo de conversão a tensão coletada é reduzida através de uma rede de resistores de forma a evitar que ultrapasse os valores limites do medidor. Uma grande vantagem da

utilização da rede de resistores é o custo e a linearidade obtida com o circuito, sensores do tipo indutivo e que utilizam como princípio o acoplamento óptico apresentam uma resposta não linear. Entretanto o circuito escolhido deve necessariamente dispor de uma proteção, ou seja, um circuito complementar de proteção deve atuar em caso de um surto na rede de energia elétrica.

Figura 10: Circuito de condicionamento de tensão.



Fonte: elaboração própria.

Para o correto funcionamento do circuito ilustrado na Figura 10, algumas condições devem ser atendidas:

- a tensão aplicada no ponto Vref deve ser igual a metade da tensão de referência utilizada no conversor AD;
- os resistores utilizados devem ser de precisão(1%), a fim de evitar diferença nas medições;
- o neutro da rede a ser monitorada não deve ser comum à referência do circuito de medição, ou seja, deve haver uma diferença de potencial nos resistores R5 e R6.

A equação que determina a tensão medida, ou seja V_{medido} , é dada pela equação 3.1:

$$V_{medido} = \frac{V_{fase}}{441} + V_{ref} \quad (3.1)$$

Para o circuito projetado a tensão de referência do conversor AD é 3,3 V, logo V_{ref} tem o valor de 1,65 V. Apensar do medidor determinar como especificação tensões compreen-

didadas entre os valores de -540 a +540 V como tensões recomendadas, é possível observar que o limite de tensão projetado é na verdade aproximadamente de 727 V de tensão de pico. Para os valores estabelecidos no projeto, foi levado em consideração uma margem de segurança em caso de sobretensão, todavia um circuito de proteção complementar será explorado posteriormente.

3.1.2 Condicionamento de corrente

Para realizar o monitoramento da corrente foi utilizado o sensor de corrente não invasivo de modelo SCT-013, da YHDC (YHDC, 2015). Na Figura 11 é possível visualizar o sensor de corrente.

Figura 11: Sensor de corrente.

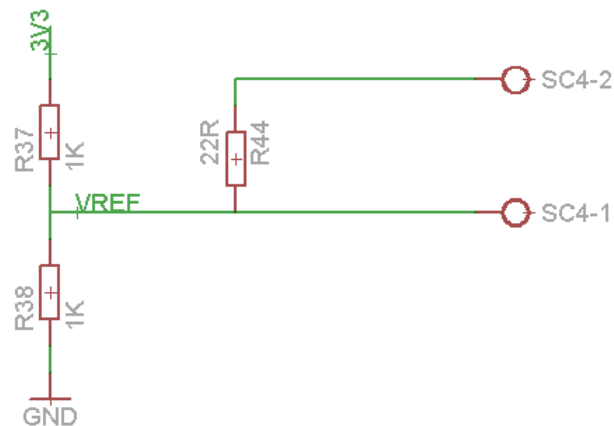


Fonte: elaboração própria.

Uma grande vantagem na utilização desse tipo de sensor é que não há necessidade de abrir o circuito para conecta-lo à rede, o que torna a sua conexão um processo bastante simples. Na Figura 12 é possível observar o circuito de condicionamento de sinal do sensor de corrente.

O sensor SCT-013 possui uma relação de transformação de 100:0,05, ou seja, uma corrente de 100 A no primário corresponde a uma corrente de 50 mA no secundário. O conversor AD captura variação de tensão, portanto é necessário que o circuito de condicionamento de corrente converta as variações de corrente em variações de tensão, dentro

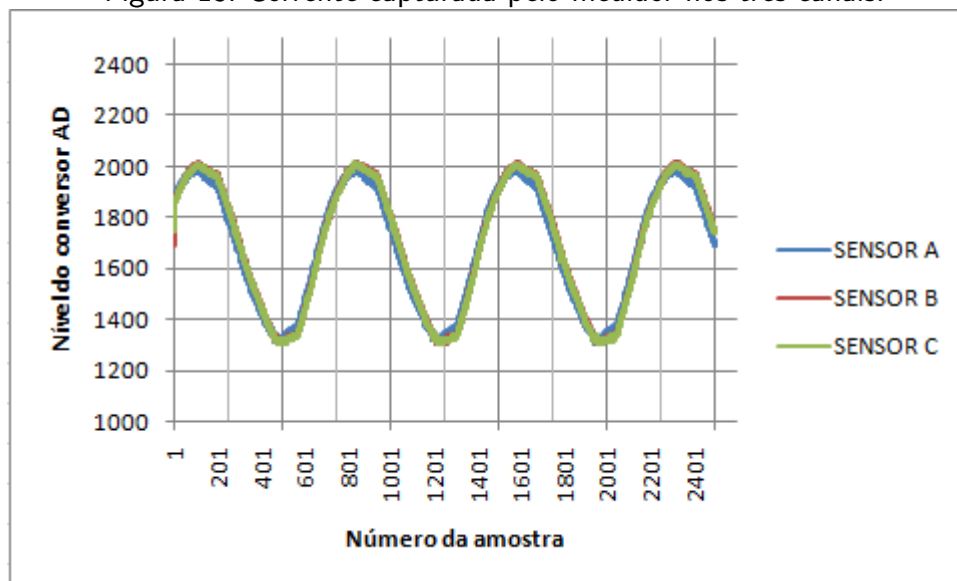
Figura 12: Circuito de condicionamento do sensor de corrente.



Fonte: elaboração própria.

dos limites predeterminados pelo microcontrolador. Para realizar a conversão de corrente em tensão é utilizado um resistor de carga (*burden resistor*), representado pelo resistor R44 na Figura 12. O resistor utilizado deverá ser de precisão, de forma a evitar que outros canais de corrente realizem erros de leitura para um mesmo valor medido, devido a tolerância do componente. A tensão Vref é utilizada para adicionar um nível de tensão contínua (CC) ao sinal.

Figura 13: Corrente capturada pelo medidor nos três canais.



Fonte: elaboração própria.

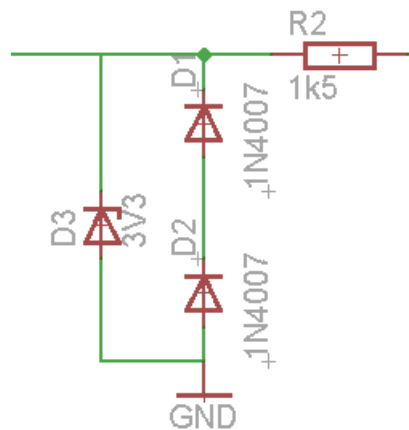
Através do gráfico da Figura 13 é possível observar o comportamento dos três senso-

res de corrente e do circuito de condicionamento desenvolvido. Para determinar o exato comportamento do circuito na realização desse teste o filtro digital não foi aplicado, o erro relativo médio obtido foi de 0,56%.

3.1.3 Proteção contra sobretensões

Os pontos de conexão utilizados para coletar os valores de tensão e corrente da rede de energia elétrica podem sofrer elevações repentinas nas grandezas analisadas. Por exemplo, uma descarga atmosférica na linha de distribuição ou um curto circuito em uma carga podem provocar um aumento substancial da tensão acima dos valores limite especificados na concepção do projeto do medidor eletrônico. Essas elevações provocariam danos aos componentes do circuito de condicionamento de sinal ou mesmo a queima do microcontrolador, o que seria um risco do ponto de vista funcional do dispositivo. A Figura 14 mostra o circuito de proteção desenvolvido, o circuito é implementado entre o circuito de condicionamento de sinais e o filtro do medidor. Todos os canais de tensão e corrente possuem o circuito de proteção.

Figura 14: Circuito de proteção.



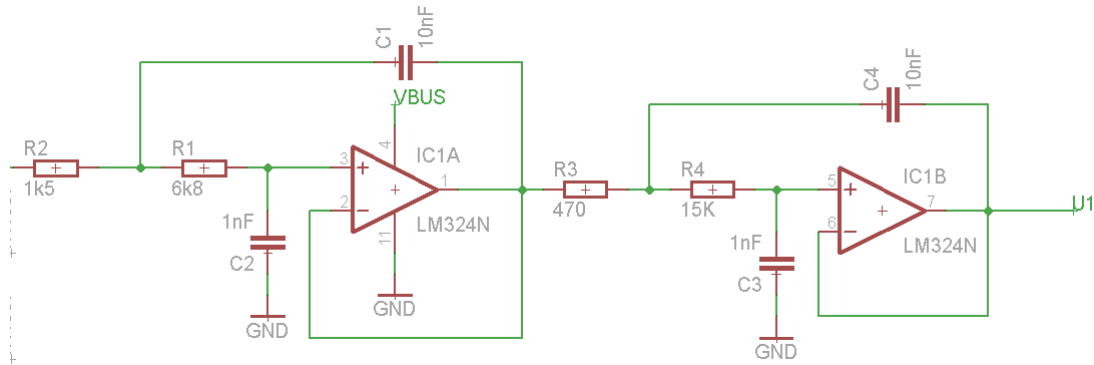
Fonte: elaboração própria.

Esse circuito tem um princípio de funcionamento simples, entretanto em relação a proteção é bastante eficiente. Os diodos D1 e D2 funcionam grampeando valores de tensão inferiores a $-0,7\text{ V}$ ou superiores a $0,7\text{ V}$ da tensão de referência do diodo *zener* D3. Dessa forma, caso ocorra um surto nos pontos de coleta de tensão e corrente, as variáveis medidas serão limitadas a valores máximos e mínimos especificados pelos componentes que compõem o medidor.

3.1.4 Filtros

Além das elevações dos valores nominais de tensão e corrente provenientes de surtos, os sinais dos circuitos de condicionamento podem estar sujeitos a componentes harmônicas de ordem diferente da fundamental, nesse caso, 60 Hz. Dessa forma, é necessário realizar o projeto de um filtro com a finalidade de limitar o número de harmônicas capturadas pelo medidor. Segundo o teorema de Nyquist–Shannon, um sinal pode ser perfeitamente recuperado, sem sofrer efeito de *aliasing*, desde que a frequência de amostragem esteja limitada a duas vezes a frequência do sinal. O filtro utilizado no projeto foi o *Butterworth* passa-baixa de quarta ordem, que atenua frequências acima de 9 kHz, a Figura 15 mostra o filtro desenvolvido. O PRODIST determina que os medidores devem analisar as frequência harmônicas até, no mínimo, a 25ª ordem, ou seja, 1.500 Hz.

Figura 15: Filtro Butterworth utilizado.

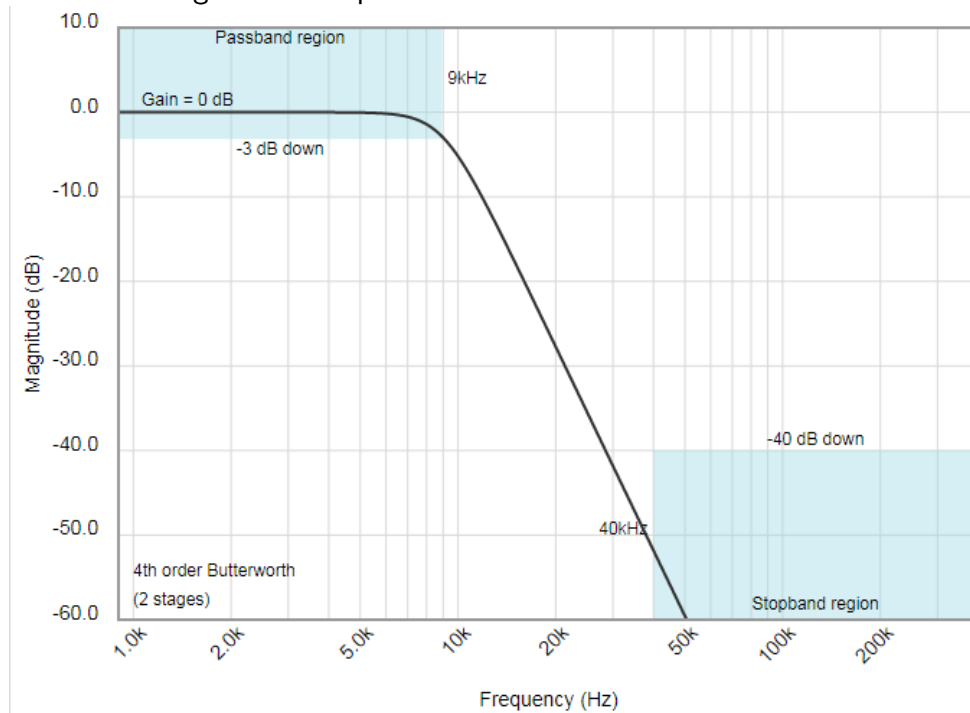


Fonte: elaboração própria.

Utilizando o critério de Nyquist é possível perceber que a frequência de amostragem deve ser superior a 3 kHz para atender a 25ª ordem, entretanto é possível utilizar frequências ainda maiores para oferecer maior precisão nas medidas.

Optou-se por uma frequência de corte de 9 kHz pois segundo Nyquist, a frequência de amostragem para o valor escolhido será de 18 kHz, podendo ser analisadas, nesse caso, harmônicas de até 150ª ordem. Na Figura 16 é possível observar a resposta do filtro utilizado. A quantidade exata de pontos capturados em cada ciclo de 60 Hz, é de 300 pontos.

Figura 16: Resposta do filtro Butterworth utilizado.



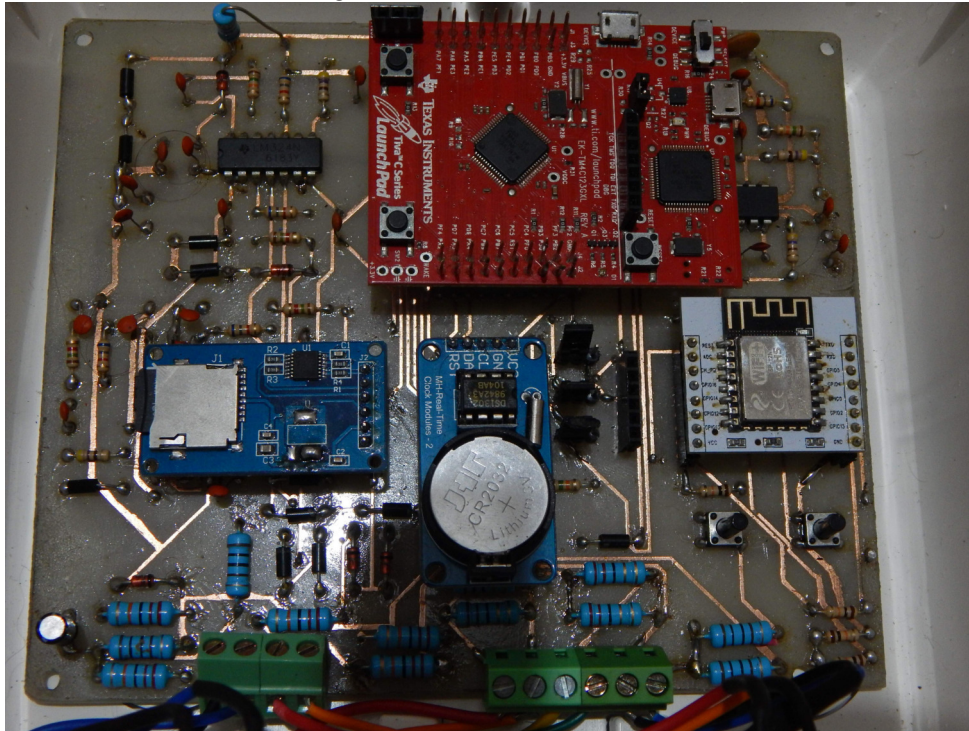
Fonte: Analog Devices, 2019. Acesso em: maio 2019

3.1.5 Montagem do medidor

Após o tratamento do sinal realizado pelos circuitos de condicionamento de sinais, proteção contra sobre tensão e filtro, é iniciada a etapa de digitalização através dos conversores AD's do microcontrolador. No primeiro momento os dados são capturados e processados, em seguida são realizadas as operações que caracterizam a forma de onda de tensão e corrente, tais como a tensão RMS, corrente RMS, frequência, potência instantânea e distorção harmônica de cada fase.

Cada resultado processado é registrado através de um marcador temporal com a data e hora exata da medição, através do RTC (*Real-Time Clock*), surtos e variações dos valores nominais das variáveis podem ser registradas pelo medidor. Os valores medidos são armazenados em uma memória não volátil, um cartão SD, nesse caso, e exibidos em um *display* de LCD (*liquid crystal display*) do tipo *touchscreen*. O procedimento é concluído quando as informações são enviadas para um servidor na Internet, onde o usuário pode acessar a qualquer momento. A Figura 17 mostra a placa do medidor, contendo os circuitos de condicionamento de tensão, corrente, filtros e os módulos de leitura de cartão de memória, RTC, Wi-Fi e microcontrolador.

Figura 17: Placa do medidor.



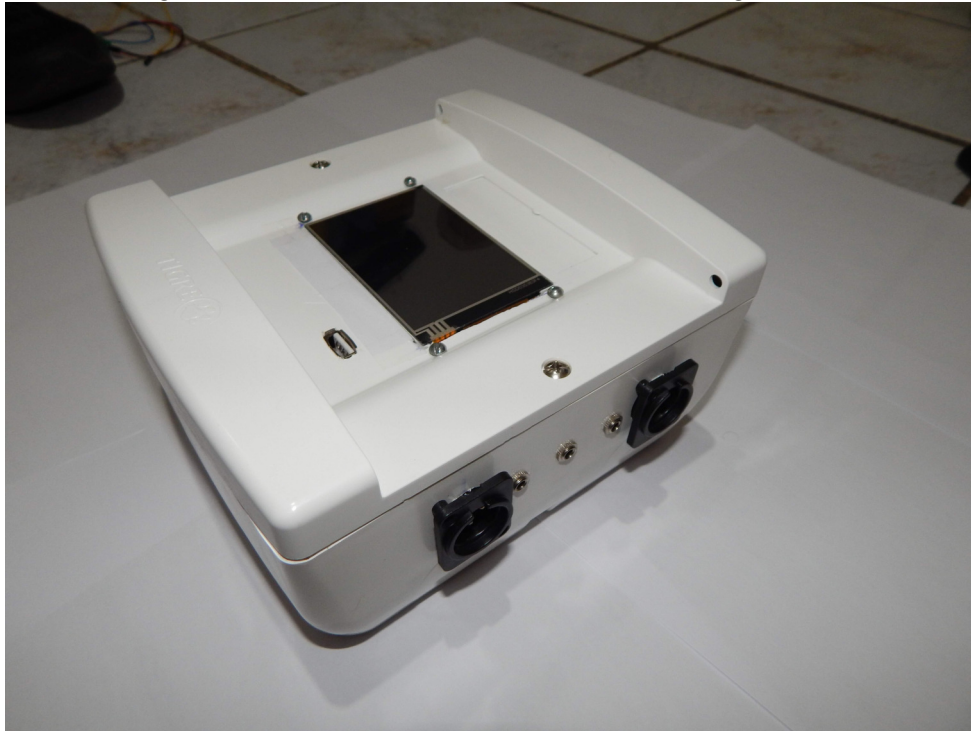
Fonte: elaboração própria.

O microcontrolador escolhido para realizar a captura e processamento dos dados é o TM4C123GH6PM (TI, 2019), baseado em uma arquitetura ARM *Cortex-M4* (ARM, 2014) RISC de 32 bits, operando com frequência de até 80 MHz e 100 DMIPS de performance.

O ARM TM4C123GH6PM possui uma unidade de ponto flutuante (FPU) dedicada, destinada a executar operações matemáticas de dados representados em ponto flutuante. Ele também possui 12 canais multiplexados com entrada analógica de 12 bit com taxa de amostragem de um milhão de amostras por segundo. Dispõe também de uma unidade de proteção de memória (MPU), que garante uma segurança do aplicativo através do controle de acesso a memória. Mais informações sobre o microcontrolador utilizado podem ser encontradas no Apêndice C desta dissertação.

Na Figura 18 é possível visualizar a montagem final do medidor. O dispositivo foi intitulado de NM1 e essa referência será utilizada nos testes de comparação com outros dispositivos.

Figura 18: Medidor desenvolvido em sua montagem final.



Fonte: elaboração própria.

3.2 *O firmware*

O *firmware* tem a função de processar as variáveis elétricas adquiridas através dos conversores AD's, filtrar os dados e apresentar os resultados de forma clara e objetiva ao usuário. Também faz parte do *firmware* coordenar a operação entre os dispositivos conectados a placa do medidor, RTC, leitor de cartão de memória, modulo Wi-Fi e *display* LCD. Todos os procedimentos se baseiam em processamento digital de sinais.

A metodologia aplicada é baseada na captura das informações digitais fornecidas pelo conversor AD nos canais de tensão e corrente. São realizados cálculos para determinar a potência instantânea e as variáveis indicadoras de qualidade da energia, esses resultados são armazenados em um cartão de memória, a fim de criar um arquivo *datalogger* com o registro das medições realizadas e informações de data e hora da coleta. Adicionalmente, variáveis como tensão e corrente eficaz, fator de potência, distorção harmônica total, frequência média, e potência média, são enviadas para um servidor a cada uma hora. Ao final do dia, todos esses dados são integralizados, compondo assim, um conjunto de indicadores diários da instalação analisada. Mais detalhes sobre o desenvolvimento do *firmware* podem ser encontrados no Apêndice B desse trabalho.

De outro modo, para realizar a consulta de valores de tensão e corrente RMS, potência instantânea, frequência e distorção harmônica e diversos indicadores sobre a qualidade da energia elétrica, o usuário pode utilizar o *display touchscreen* de 3,5 polegadas localizado na parte frontal do medidor ou coletar os dados obtidos através de uma conexão USB (*Universal Serial Bus*).

O funcionamento do *firmware* do medidor é baseado na seguinte metodologia: inicialmente o módulo ESP12 busca estabelecer uma conexão com a internet, em seguida todos os periféricos são configurados, tais como o LCD, RTC, cartão de memória e conversores AD. Após o processo de configuração é utilizada a interrupção por Acesso Direto à Memória, ou DMA. Esse método possibilita que o microcontrolador realize os cálculos em paralelo à aquisição de dados do conversor AD, aumentando assim a eficiência no processamento. Nesse método, os dados são diretamente convertidos e salvos em um vetor, sem que haja interferência no programa principal. Em conformidade com a norma do PRODIST, as tensões e correntes são amostradas simultaneamente.

Para realizar a correta captura dos dados é necessário que o conversor AD detecte o momento certo em que a onda de tensão cruze pelo zero. Esse procedimento de sincronismo é necessário para que se tenha sempre um ciclo completo.

A próxima etapa está relacionada com a metodologia de cálculo de cada variável relacionada na norma do PRODIST, conforme os itens seguintes:

- Tensão eficaz (RMS) - as tensões e correntes eficazes nas três fases são calculadas a partir da amostragem de 16 ciclos de 60 Hz da rede. Os valores são calculados segundo as equações 3.2 e 3.3.

$$V^2 = \frac{1}{kT} \int_T^{T+kT} v^2 dt = V_h^2 \quad (3.2)$$

$$I^2 = \frac{1}{kT} \int_T^{T+kT} i^2 dt = I_h^2 \quad (3.3)$$

Onde $[T, T + kT]$ é o intervalo de tempo de medição, T é o tempo inicial, k é um número inteiro, T é o tempo do ciclo da componente fundamental e V_h ou I_h é a tensão ou corrente harmônica de ordem h , para $h = 0, 1, 2 \dots n$, $n \in \mathbb{N}$.

- Fator de equilíbrio - é calculado segundo as tensões de linha da rede. O parâmetro é desabilitado caso o medidor não detecte a conexão trifásica. Também são utilizados

16 ciclos para determinar esse parâmetro. O cálculo é realizado, segundo o módulo 8 do PRODIST de acordo com equações 3.4 e 3.5.

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (3.4)$$

Onde,

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)} \quad (3.5)$$

- Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD) - a cada meio ciclo é realizada a análise de ocorrência de um VTCD, como trata-se de um distúrbio, o resultado deve ser registrado pelo medidor e armazenado no cartão de memória com o horário da medição.
- Flutuação de Tensão – o processamento da flutuação da tensão é feito a cada ciclo. É feita a análise do valor da tensão RMS e esse valor é salvo em um vetor. Caso seja identificado que a tensão RMS está oscilando, é indicada a frequência de oscilação e a amplitude da oscilação.
- Fator de Potência - o fator de potência é calculado para cada vetor amostrado de acordo com a equação 3.6, ao final do período de integralização, é apresentado o valor médio do fator de potência.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_H}{\sqrt{S_1^2 + S_N^2}} \quad (3.6)$$

Onde, P1 é a potência ativa fundamental:

$$P_1 = \frac{1}{kt} \int_T^{T+kT} v_1 i_1 dt = V_1 I_1 \cos(\varphi_1) \quad (3.7)$$

e P_H é a potência ativa de ordem H:

$$P_H = P - P_1 = V_0 I_0 + \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos(\varphi_n) \quad (3.8)$$

- Variação de Frequência - os valores são determinados a partir do cálculo de 16 ciclos de tensão da rede, para cada janela de amostragem, é salvo o valor da frequência

mínima, máxima e média de cada fase.

- Harmônicos - o cálculo das distorções harmônicas das tensões e correntes, é efetuado com uma amostra de 300 pontos, correspondente a um ciclo da rede, através da FFT. Dessa forma, harmônicas de 150^a podem ser processadas.
- Tensão em Regime Permanente - a tensão em regime permanente é processada em intervalos de integralização de 10 minutos cada, salvo quando ocorrerem VTCD, conforme descrito no PRODIST. As janelas de medições correspondem a 16 ciclos da tensão da rede, com uma taxa amostral de 128 amostras por ciclo.

O cálculo da potência consumida para um sistema monofásico é realizado segundo as equações 3.7 e 3.8. Entretanto, para um sistema trifásico as equações 3.9, 3.10 e 3.11 devem ser utilizadas.

$$S_e = 3V_e I_e = \sqrt{S_{e1}^2 + S_{eN}^2} \quad (3.9)$$

onde, S_{e1} é a potência aparente efetiva fundamental e S_{eN} é a potência aparente efetiva não-fundamental. A potência ativa em um sistema trifásico é definida pela soma das potências ativas de cada fase, a, b, c, como descrito em (3.10), onde P_a , P_b e P_c são descritos em (3.7).

$$P_{S\phi} = P_a + P_b + P_c \quad (3.10)$$

Finalmente, o fator de potência trifásico efetivo pode ser definido como sendo:

$$PF_e = \frac{P_{S\phi}}{S_e} \quad (3.11)$$

4 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Com o objetivo de avaliar o medidor desenvolvido (NM1), foram realizados experimentos em situações distintas. Os testes realizados determinaram a precisão do equipamento, confiabilidade no registro das medições e o comportamento do medidor em períodos prolongados de funcionamento. As especificações dessas experiências e os resultados são descritos nos itens seguintes.

4.1 Experimento 1: Avaliação da precisão de medição

Para realizar o desenvolvimento de um medidor de consumo e qualidade da energia diversas normas devem ser atendidas, conforme citado no item 2.3. Segundo o Módulo 5 do (PRODIST, 2019), que define os parâmetros e especificações dos medidores de energia, o valor máximo de incerteza na medição, é calculado conforme descrito na equação (4.1):

$$e(\%) = 0,05 \pm \sqrt{M^2 + T_c^2 + T_p^2} \quad (4.1)$$

onde:

- M - incerteza padrão do medidor;
- T_c - incerteza padrão do transformador de corrente (TC);
- T_p - incerteza padrão do transformador de tensão (TP);
- 0,05 = Erro sistemático, que é imposto pela resistência do cabo do TP.

A norma especifica que para realizar a medição de faturamento de energia devem ser utilizados T_p's e T_c's de classe 0,6. Dessa maneira, a precisão desses equipamentos deve ser de 0,6%. O medidor deve apresentar uma incerteza de 0,05%. Para os valores citados

a equação (4.1) fornece um desvio de aproximadamente 1,03%. Através dos valores de incerteza definidos, devem ser realizados testes no medidor de modo a comprovar a classe de exatidão do conjunto.

4.1.1 Metodologia

Para determinar a precisão do medidor na leitura dos valores RMS de tensão e corrente, foi utilizado um variac trifásico, o equipamento pode ser visto na Figura 19. Esse equipamento permite o ajuste de tensão nas três fases de forma gradual, além disso existe o ponto de conexão do condutor neutro que pode ser utilizado como referencial.

Figura 19: Variac trifásico.

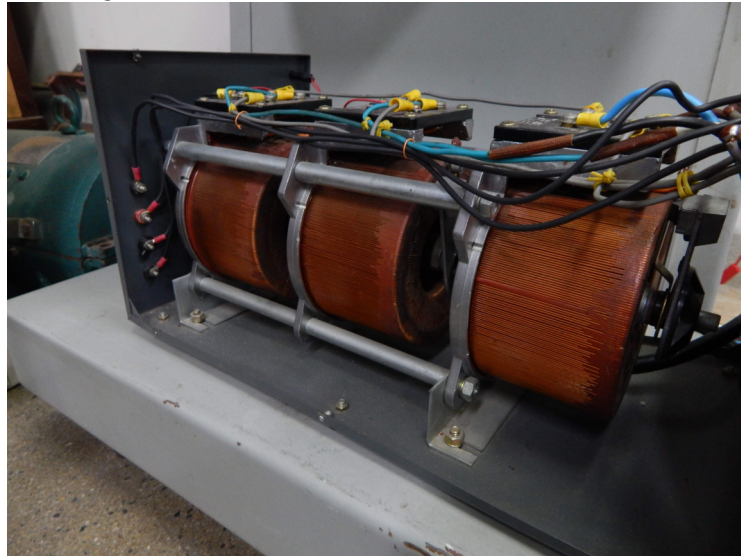


Fonte: elaboração própria.

Como é possível perceber na Figura 20, o variac possui três bobinas internas que realizam a defasagem de 120° entre as fases, basicamente a relação de transformação é alterada simultaneamente nas três bobinas quando há mudança no eixo que interliga os contatos de saída do equipamento. Uma carga resistiva foi inserida para avaliar a corrente simultaneamente à medição de tensão.

As três fases e os três sensores de corrente do medidor foram conectados à mesma fase da fonte, para avaliar quantitativamente o mesmo fenômeno elétrico. O valor máximo

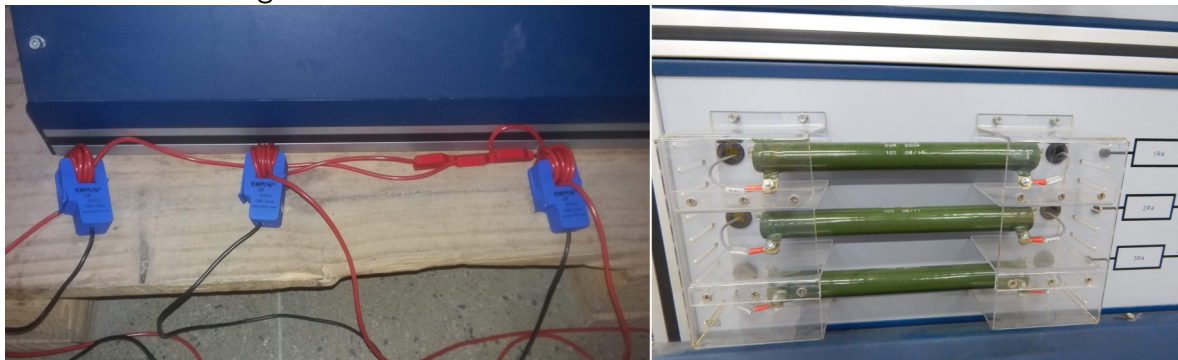
Figura 20: Estrutura interna do variac trifásico.



Fonte: Própria.

dos sensores de corrente, 100 A, para o modelo escolhido não poderiam ser atendidos com a conexão direta com as cargas devido ao limite de potência das resistências, e do limite de corrente de saída do variac, especificado como valor máximo de 10 A. Como solução foi necessário realizar um enrolamento do condutor medido, em torno do sensor de corrente, para que a corrente fornecida pelo variac fosse multiplicada proporcionalmente pelo número de voltas, ou seja, foram utilizadas 10 voltas para que os 10 A do variac atingissem o valor nominal de 100 A. A Figura 21 ilustra o procedimento, e as resistências utilizadas na medição.

Figura 21: Sensores de corrente e resistências utilizadas.



Fonte: elaboração própria.

Para garantir uma operação segura e eficiente, as ponteiros de tensão e os sensores

de corrente dispõem de conectores de fácil engate. Os conectores de tensão em especial possuem travas a fim de evitar contatos acidentais em partes energizadas nos pontos de monitoramento. A Figura 22 ilustra as conexões no dispositivo. Caso a medição ocorra em uma rede monofásica, apenas um conector de tensão deverá ser conectado, o *firmware* detectará a ausência de tensão no segundo conector e caracterizará a medição do tipo monofásica.

Adicionalmente, sabe-se que a corrente consumida pela grande maioria dos equipamentos atuais não é composta apenas pela componente fundamental de 60 Hz. Logo, um medidor de energia deve ser capaz de medir com precisão formas de onda com conteúdo harmônico variável.

Figura 22: Conexão dos sensores ao medidor.



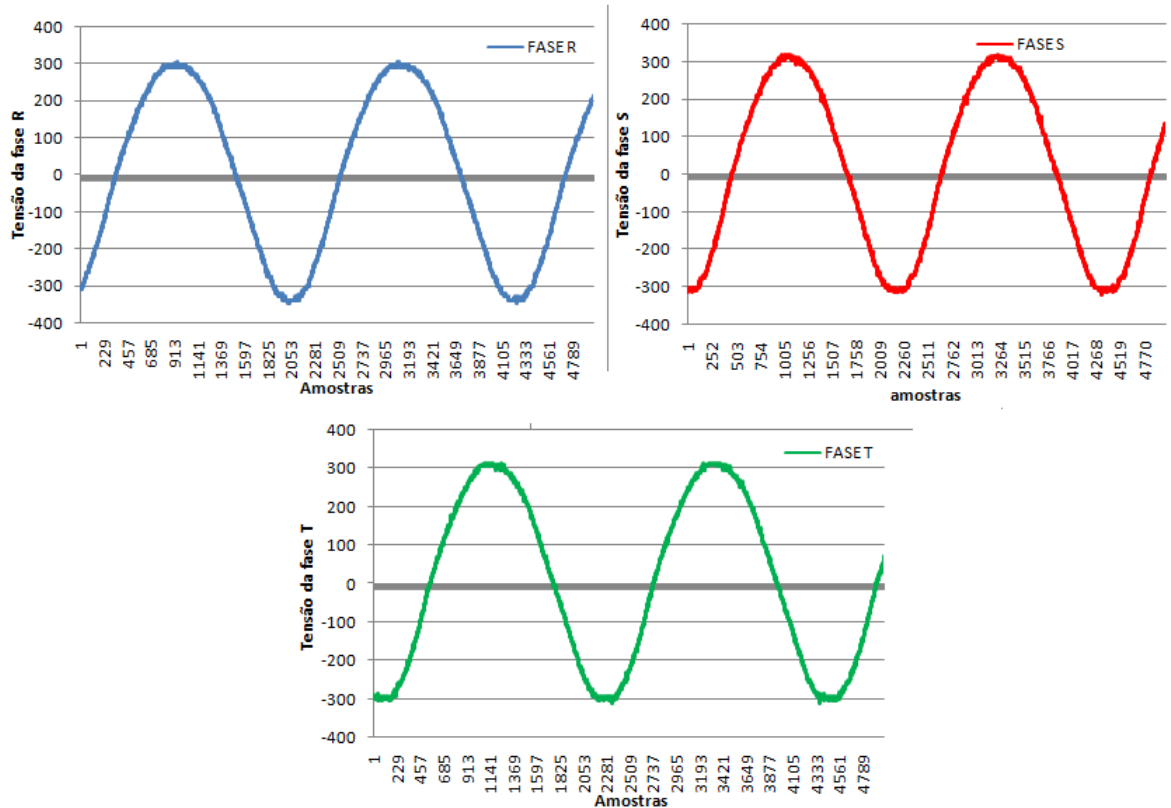
Fonte: elaboração própria.

4.1.2 Resultados

Para analisar os resultados foram utilizados basicamente três níveis de tensão padrão, 110 V, 220 V e 380 V. Os resultados alcançados foram bastante satisfatórios, as figuras 23 e 24 mostram o comportamento da forma de onda da tensão e corrente para esse experimento.

Com base nos dados apresentados na Tabela 3 é possível perceber que a diferença

Figura 23: Formas de onda de tensão capturadas pelo medidor.



Fonte: elaboração própria.

entre o valor ajustado, ou seja, o valor esperado e o valor medido por NM1 foi pequena, não ultrapassando os limites de erro preestabelecidos de 1%. Com o experimento realizado também foram comprovados os procedimentos realizados no teste, a exemplo do controle linear da tensão e leitura apropriada dos valores limite do sensor de corrente. O resultado foi de fato importante, não apenas para avaliar a precisão do medidor, como também para analisar o comportamento de alguns métodos que serão a base para outros experimentos.

4.2 Experimento 2: Teste comparativo de tensão e corrente

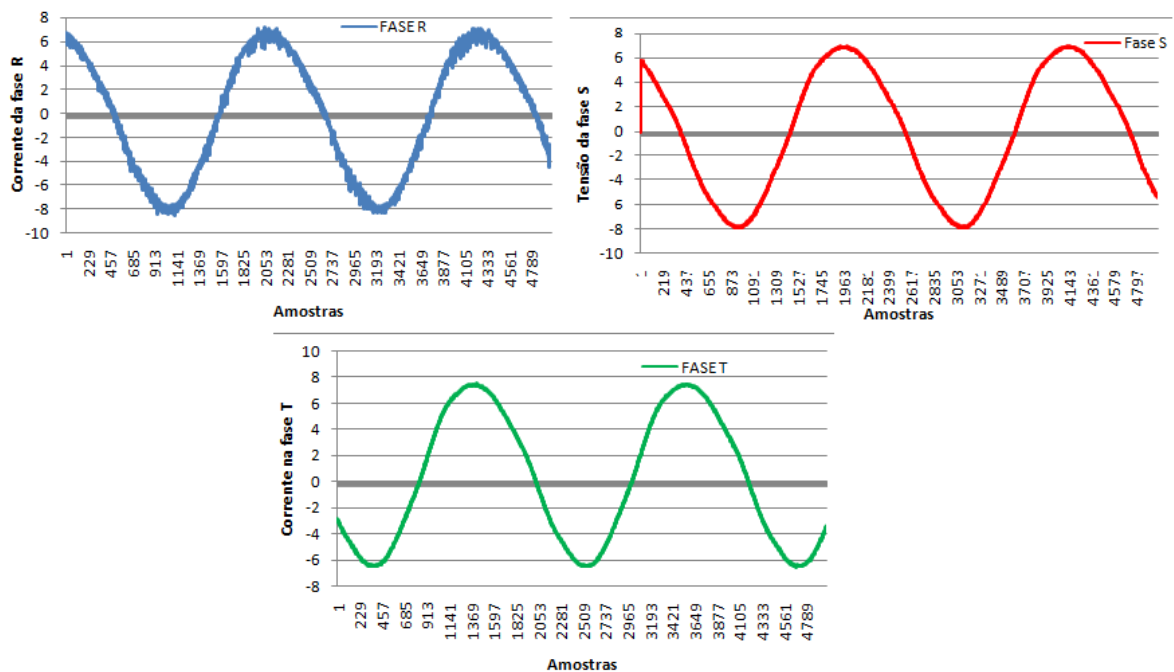
Para determinar a confiabilidade das medições realizadas pelo dispositivo desenvolvido, faz-se necessário um teste comparativo com um produto que apresente características semelhantes e que é utilizado como modelo no mercado. Desse modo, o analisador de qualidade de energia Yokogawa CW500, mostrado na Figura 25, foi utilizado como referência. O dispositivo é capaz de medir simultaneamente 3 canais de tensão e 4 de

Tabela 3: Resultado do experimento para avaliação da medição de tensão e corrente.

Variável (RMS)	Valor esperado	Valor medido	Erro absoluto (%)
Tensão R	220,3 V	220,35 V	0,2269
Tensão S	220,2	220,28 V	0,3633
Tensão T	220,7	220,76	0,2718
Corrente R	5,02	4,99 A	0,5976
Corrente S	5,04	5,0 A	0,7936
Corrente T	5,08	5,03 A	0,984

Fonte: elaboração própria.

Figura 24: Formas de onda de corrente capturadas pelo medidor.



Fonte: elaboração própria.

corrente, apresentando valores máximos, médios e mínimos de tensão, corrente, potência, fator de potência, harmônicas, ângulo de fase e função de monitoramento de demanda, segundo critérios em conformidade com a norma IEC61000-4-30.

4.2.1 Metodologia

O procedimento utilizado para realizar os testes entre ambos os medidores inicia com as duas principais variáveis que determinam a correlação entre os parâmetros subsequentes, sendo elas, tensão e corrente. O método utilizado para comparar os parâmetros é

Figura 25: Analisador de energia Yokogawa CW500.



Fonte: Yokogawa CW500 Datasheet.

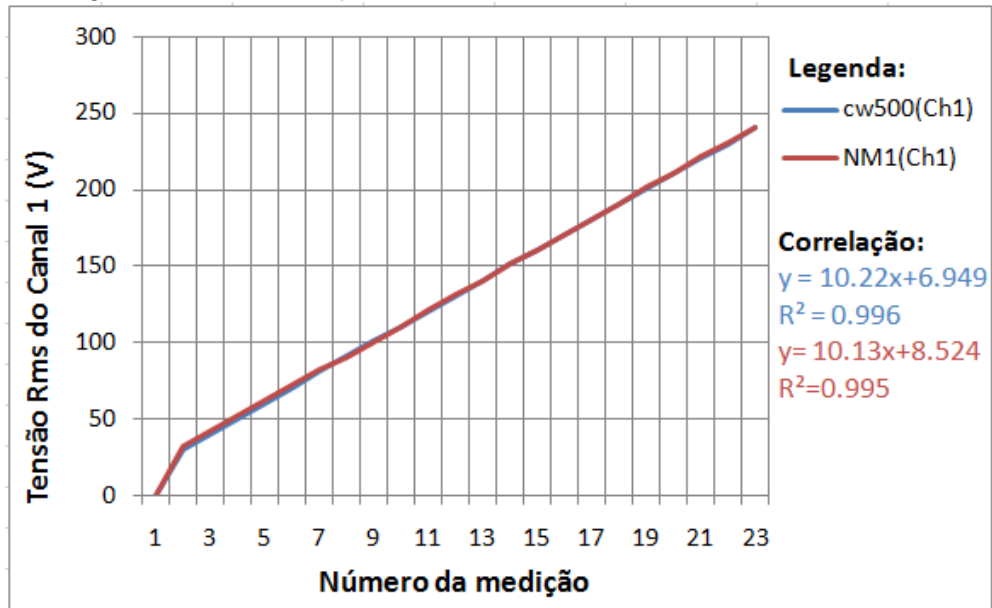
semelhante ao realizado no item 4.1.1, ou seja, uma fonte de tensão alternada variável é conectada a uma carga puramente resistiva, onde as pontas de prova de tensão e os TC's dos analisadores são fixados, em seguida o valor da tensão efetiva é aumentado gradualmente até atingir o máximo valor do medidor projetado. Cada incremento realizado na fonte é registrado através dos valores apresentados por ambos os medidores. O resultado pode ser visualizado na Figura 26.

4.2.2 Resultados

No experimento realizado foram coletadas 23 amostras para cada canal, a tensão da fonte foi incrementada a cada 10 V até atingir o valor limite de tensão por fase fornecida pelo variac, aproximadamente 240 V. É possível perceber, na Figura 26, que o comportamento de ambos os medidores em relação a tensão é praticamente linear. O erro relativo médio obtido com os dados coletados no canal 1 do medidor, foi de 0,68%, entretanto um erro maior foi encontrado nos canais 2 e 3, fato observado na Figura 27 e Figura 28.

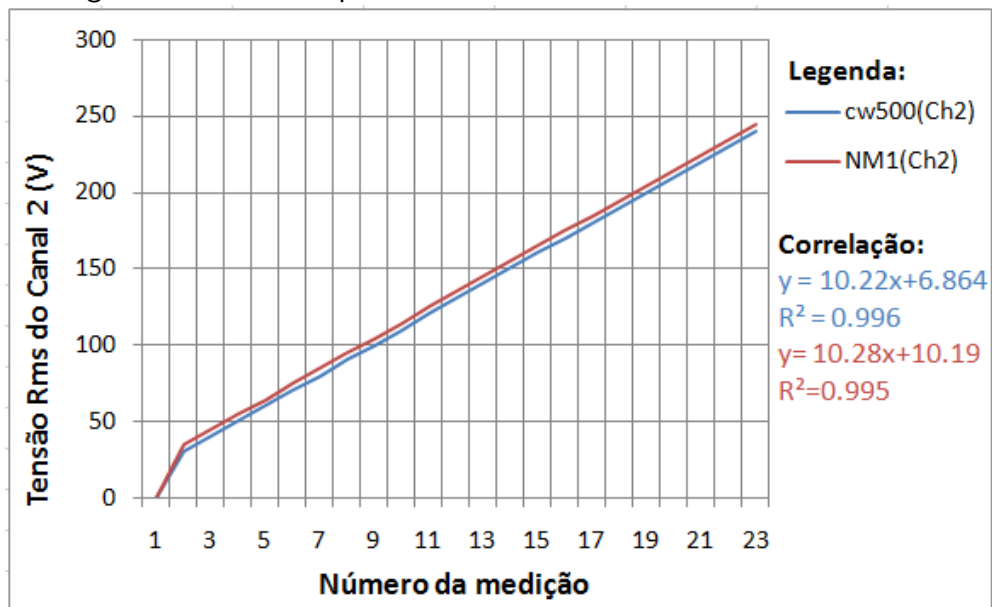
De acordo com os resultados encontrados, os erros correspondem a 3,32% e 2,90%,

Figura 26: Teste comparativo de tensão CW500 X NM1 no Canal 1.



Fonte: elaboração própria.

Figura 27: Teste comparativo de tensão CW500 X NM1 no Canal 2.

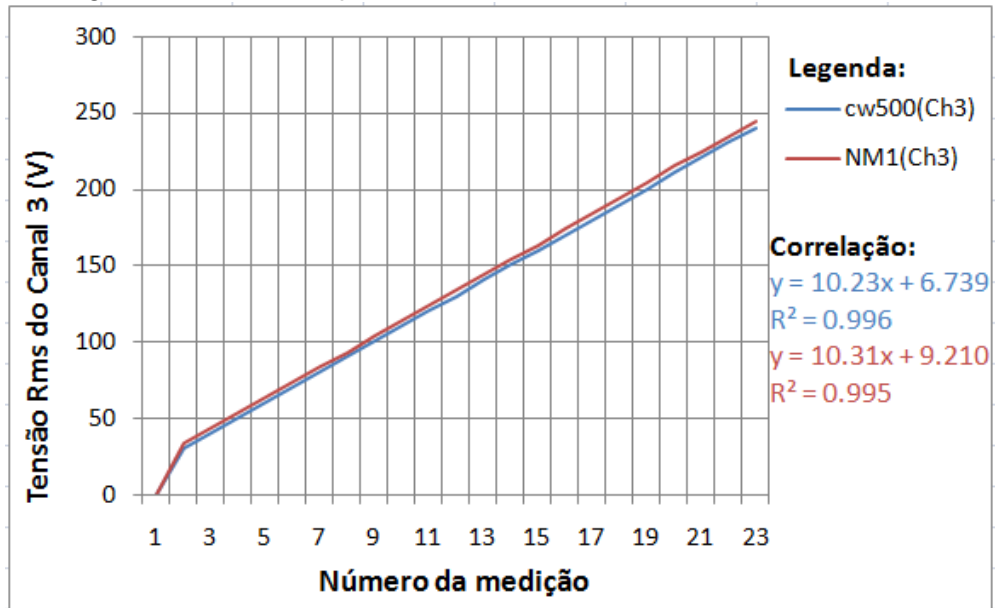


Fonte: elaboração própria.

nos canais 2 e 3, respectivamente. Os erros ocorreram devido a ausência de calibração dos canais 2 e 3. Em termos de consumo, os resultados estariam comprometendo a medição do consumidor, porém é importante observar a tendência do erro. Em uma análise mais criteriosa em relação ao comportamento do sinal, é possível notar diante do coeficiente

de correlação que os valores de tensão podem ser obtidos através de uma equação linear de primeiro grau. Comparando os coeficientes lineares notamos que o erro encontrado foi devido a um ajuste no *offset* do medidor. O erro pode ser facilmente solucionado no *firmware* com a adição de uma constante responsável por corrigir o *offset* na equação que realiza o cálculo da tensão.

Figura 28: Teste comparativo de tensão CW500 X NM1 no Canal 3.



Fonte: elaboração própria.

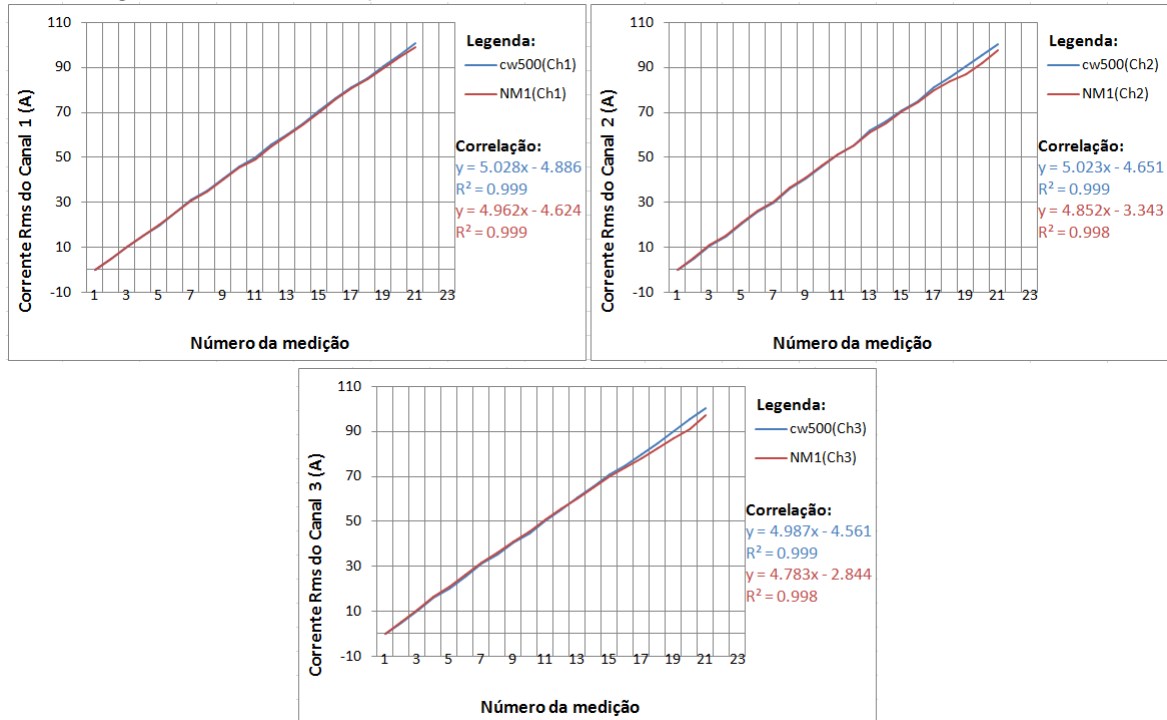
A Figura 29 ilustra o comportamento analisado pelos três canais de corrente dos medidores. É possível perceber nos canais 2 e 3 uma divergência dos valores da corrente monitorada no medidor NM1 em valores próximos ou acima de 90 A. Esse fato pode ser explicado devido a corrente de saturação do TC, o canal 1 não sofreu o efeito devido a correção implementada em *firmware*, aplicada para corrigir a deformação.

Os valores dos erros relativos médios encontrados nos canais de corrente 1, 2 e 3, foram respectivamente: 0,59%, 1,1% e 1,6%. No canal 1 já foi aplicada a correção do *offset* sugerida nos testes de tensão.

4.3 Experimento 3: Teste comparativo de frequência

A frequência é um dos parâmetros fundamentais, quando se trata de qualidade da energia elétrica. Valores situados fora da faixa aceitável de operação podem causar sérios danos a aparelhos eletroeletrônicos e prejuízos aos mais variados tipos de consumidores.

Figura 29: Teste comparativo de corrente CW500 X NM1 nos Canais 1,2 e 3.



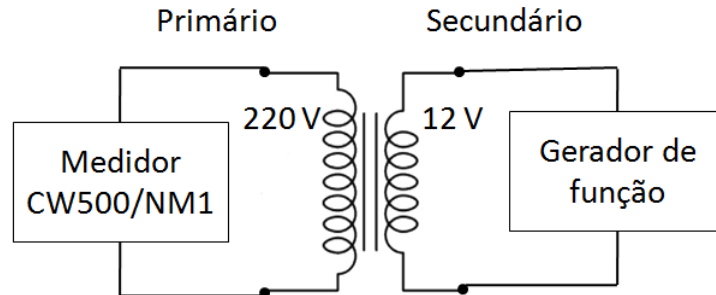
Fonte: elaboração própria.

Segundo o módulo 8 do Prodist, os limites aceitáveis de frequência se situam na faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz, havendo um prazo de 30 (trinta) segundos após sair desta faixa, quando de distúrbios no sistema de distribuição, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração.

4.3.1 Metodologia

Para realizar os testes de frequência entre os canais dos medidores foi necessário elaborar uma maneira de controlar a frequência de modo gradual, a fim de determinar a precisão e confiabilidade da medição. Dessa forma, um gerador de funções de modelo 33220A da Agilent, foi utilizado como fonte de frequência. Para que os parâmetros nominais do experimento apresentassem a maior aproximação possível da rede, um transformador de relação 220/12 V foi alimentado através do secundário, ou seja, o gerador de função foi conectado ao lado do secundário (12 V) do transformador, como mostra a Figura 30.

Figura 30: Método utilizado para avaliar o parâmetro de frequência.

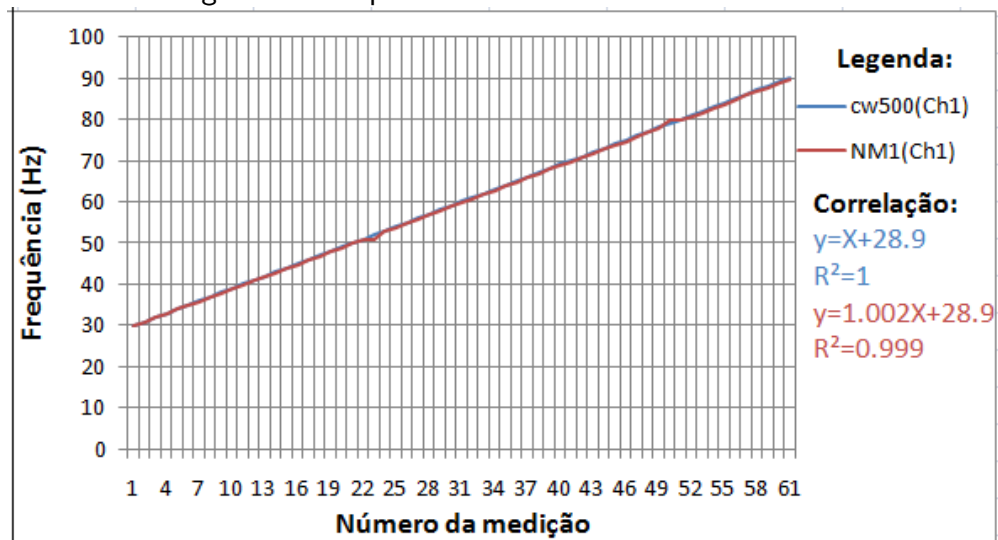


Fonte: elaboração própria.

4.3.2 Resultados

O teste realizado teve como base a faixa de frequência de 30 a 90 Hz, com intervalos regulares de incremento de 1 Hz. A resposta dos dois medidores foi registrada, e o erro entre as medições foi determinado. A Figura 31 demonstra os dados registrados. O erro encontrado em relação ao parâmetro de frequência foi relativamente pequeno, obtendo o valor de 0,06%.

Figura 31: Frequência medida com CW500 e NM1.



Fonte: elaboração própria.

Entretanto o método utilizado para calcular a frequência no *firmware* é mais custosa em relação ao processamento computacional. O cálculo da frequência encontrada não é baseado no cruzamento por zero do sinal da rede elétrica, o valor é obtido através da transformada discreta de Fourier, onde a frequência de maior energia é determinada como

sendo a frequência fundamental.

No modelo do medidor projetado já era previsto o processamento das harmônicas até a ordem 150, como discutido em 3.1.4. Contudo, foi observado uma maior precisão nos resultados obtidos utilizando a FFT em comparação ao método convencional, onde eram capturados os cruzamentos por zero e a diferença entre os intervalos determinaria o valor da frequência.

4.4 Experimento 4: Teste comparativo do fator de potência

O parâmetro do fator de potência tem uma importância fundamental no projeto, devido ao fato de que o seu resultado será utilizado para determinar a potência reativa e consequentemente a potência aparente. Além disso, também é um indicativo crítico dos valores que caracterizam a eficiência e a qualidade da energia elétrica.

Diferente dos parâmetros já avaliados, os testes em relação ao fator de potência são mais complexos, pois dependem exclusivamente das características internas da qual a carga foi desenvolvida. Através da coleta de 16 ciclos, com 256 pontos amostrados por ciclo, o microcontrolador tem 65,1 us entre cada ponto registrado. Dessa forma é possível determinar através da diferença do tempo registrado entre o cruzamento por zero da tensão e da corrente, o fator de potência. Deve se considerar no entanto, que sinais com uma taxa de distorção muito grande não podem ser calculados pelo método descrito, é necessário implementar outro modelo de cálculo para determinar o fator de potência com maior exatidão.

4.4.1 Metodologia

Uma solução para avaliar a medição do fator de potência é a utilização de cargas com valores nominais já determinados pelo fabricante, a exemplo de motores, reatores e transformadores.

4.4.2 Resultados

O motor de gaiola de esquilo do fabricante WEG de alto rendimento e fator de potência de 0,8 foi utilizado no teste, na Figura 32 é possível observar os parâmetros do motor especificados pelo fabricante.

Figura 32: Motor utilizado como carga para avaliar o fator de potência.



Fonte: elaboração própria.

Com a carga utilizada no teste o medidor CW500 apresentou os resultados exibidos na Figura 33, ou seja, um fator de potência de 0,746. Na Figura 34 é possível observar a forma de onda capturada pelo medidor NM1, o fator de potência encontrado pelo dispositivo foi 0,747.

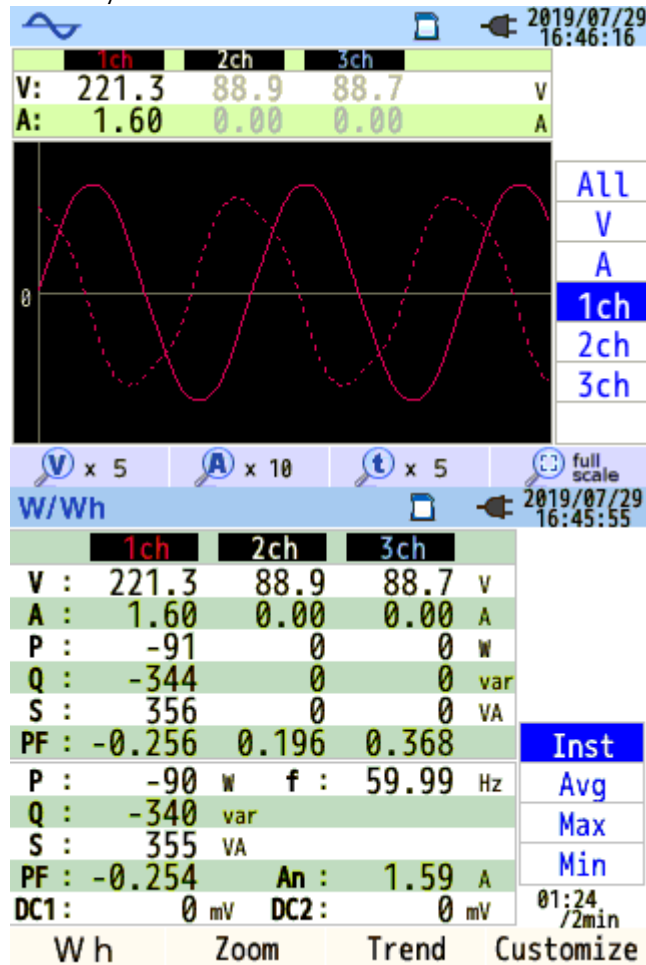
Na Tabela 4 é demonstrado o resultado da medição do fator de potência em uma linha contendo aparelhos de ar condicionado. Elementos indutivos foram associados a fim de criar variações na defasagem do ângulo entre a tensão e a corrente.

Tabela 4: Avaliação do fator de potência em cargas conectadas a rede de energia elétrica.

Cargas	Fabricante (Típico)	CW500	NM1	Erro Relativo (%)
Ar condicionados	0,5	0,51	0,508	0,39
Carga Indutiva 1	0,8	0,869	0,863	0,69
Carga Indutiva 2	0,11	0,128	0,125	2,34
Carga Indutiva 3	0,2	0,256	0,251	1,95
NoBreak	0,5	0,51	0,495	2,94

Fonte: elaboração própria.

Figura 33: Medição realizada no motor através do medidor CW500.



Fonte: Imagem gerada através do equipamento de marca Yokogawa de modelo CW500.

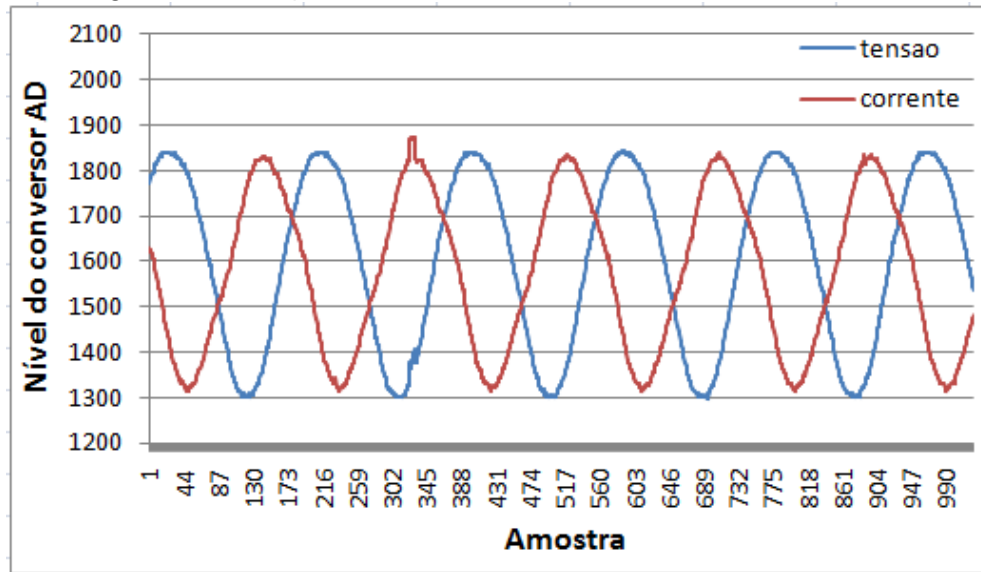
4.5 Experimento 5: Teste comparativo de harmônicas

O cálculo da taxa de distorção harmônica da tensão e da corrente é um fator muito importante a ser validado. Com ele é possível certificar que toda a metodologia de construção do medidor foi bem sucedida, pois qualquer anomalia inserida pelos circuitos de adequação de sinais e filtro afetaria a forma de onda da tensão lida e, conseqüentemente, o espectro do sinal não representaria os valores reais.

4.5.1 Metodologia

Nesse experimento, algumas cargas que funcionam com o princípio de chaveamento de semicondutores, assim como instalações elétricas prediais e residenciais foram avaliadas. O medidor CW500 é capaz de realizar medições de harmônicas até a ordem 50, já o

Figura 34: Medição realizada no motor através do medidor NM1.



Fonte: elaboração própria.

NM1 foi projetado para executar medições de harmônicas de ordem 150. Porém como demonstrado nos resultados, o NM1 só foi capaz de realizar medições de harmônicas até a ordem 92. Um fator limitante foi a tolerância dos componentes utilizados no projeto do filtro. Entretanto, em relação as normas, harmônicas até a ordem 25 já podem ser utilizadas para efetuar os cálculos, ou seja, o medidor NM1 atende a proposta inicial de realizar a medição dos harmônicos, e assim determinar a TDH.

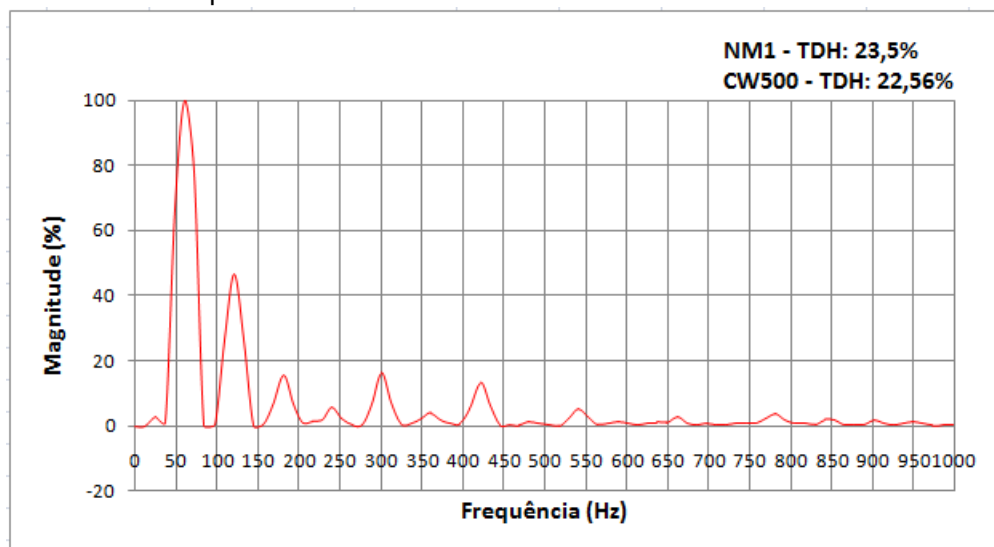
Assim como o fator de potência, o controle das variáveis responsáveis por gerar os harmônicos é de grande complexidade. Dessa forma, a única solução encontrada para realização dos testes foi a utilização de uma variedade de cargas. A coleta dos dados foi realizada simultaneamente com ambos os medidores conectados a mesma carga. Os valores de magnitude de cada múltiplo da fundamental são comparados e desse modo o erro é determinado.

Para viabilizar a comparação dos resultados, foram escolhidas as harmônicas que normalmente apresentam maior energia nas instalações e exercem uma capacidade de apresentar problemas com maior frequência aos mais variados tipos de consumidores, ou seja, as harmônicas de ordem ímpar.

4.5.2 Resultados

A Figura 35 demonstra um espectro de frequência capturado pelo medidor NM1 em uma instalação do tipo residencial. O gráfico é uma opção mais viável quando se deseja visualizar uma gama de valores no espectro de frequência. Para fins comparativos foi escolhido o gráfico do tipo barra vertical devido a facilidade da visualização dos dados e a compatibilidade com o medidor CW500 que já apresenta os dados neste formato.

Figura 35: Espectro de frequência da corrente capturado através do medidor NM1 em uma instalação elétrica do tipo residencial.



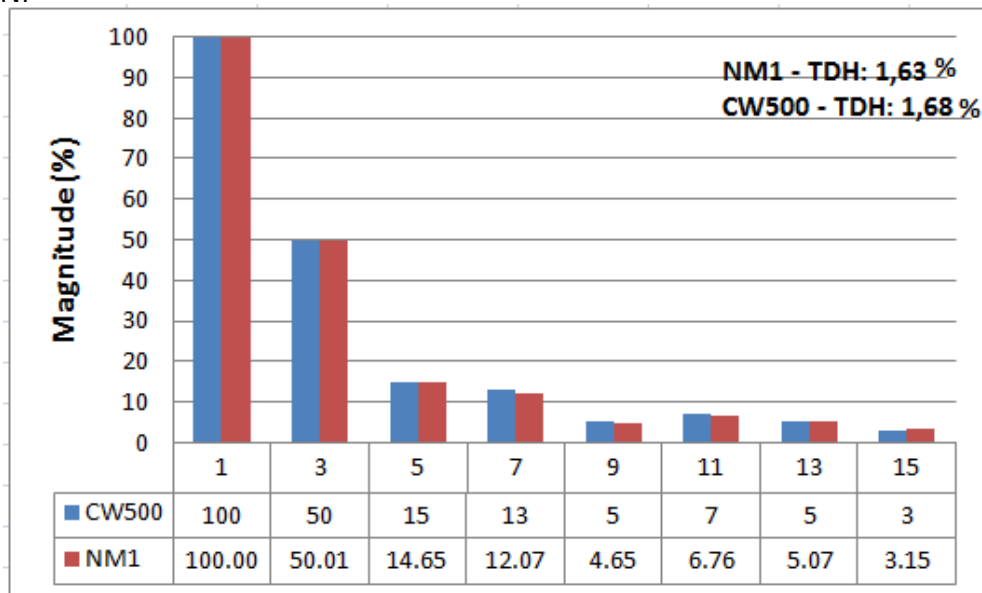
Fonte: elaboração própria.

A primeira etapa do teste foi realizada na instalação do laboratório de eletrônica situado no Núcleo de Tecnologia Industrial na UFRN. Os parâmetros medidos foram as harmônicas de tensão presentes na rede de energia elétrica do setor. O resultado pode ser encontrado na Figura 36.

A taxa de distorção harmônica encontrada no experimento por CW500 foi de 1,68%, em NM1 a taxa encontrada foi de 1,63%. O segundo experimento foi realizado através do gerador de funções descrito no item 4.3.1. Algumas harmônicas podem ser criadas devido a operação de chaveamento do aparelho, fato percebido no Experimento 3. Na Figura 37 é possível notar o efeito descrito.

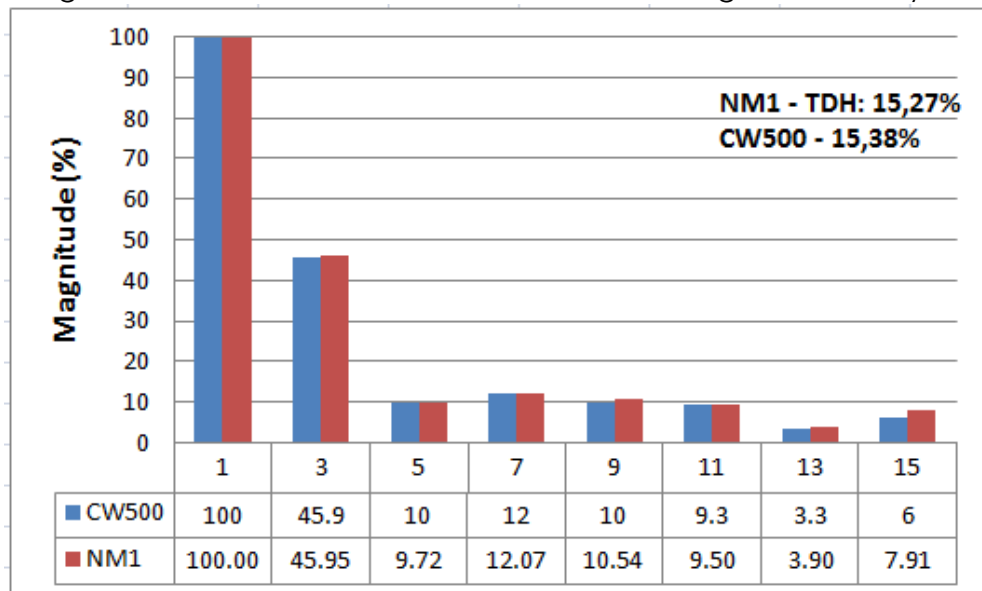
O terceiro teste envolve um equipamento de uso cotidiano, porém quando desconectado da rede de energia, ou seja, conectado a carga isoladamente, gera uma grande quantidade de harmônicos, o *nobreak*. A energia gerada por cada harmônica de ordem

Figura 36: Teste comparativo dos harmônicos de tensão no laboratório de eletrônica do NTI da UFRN.



Fonte: elaboração própria.

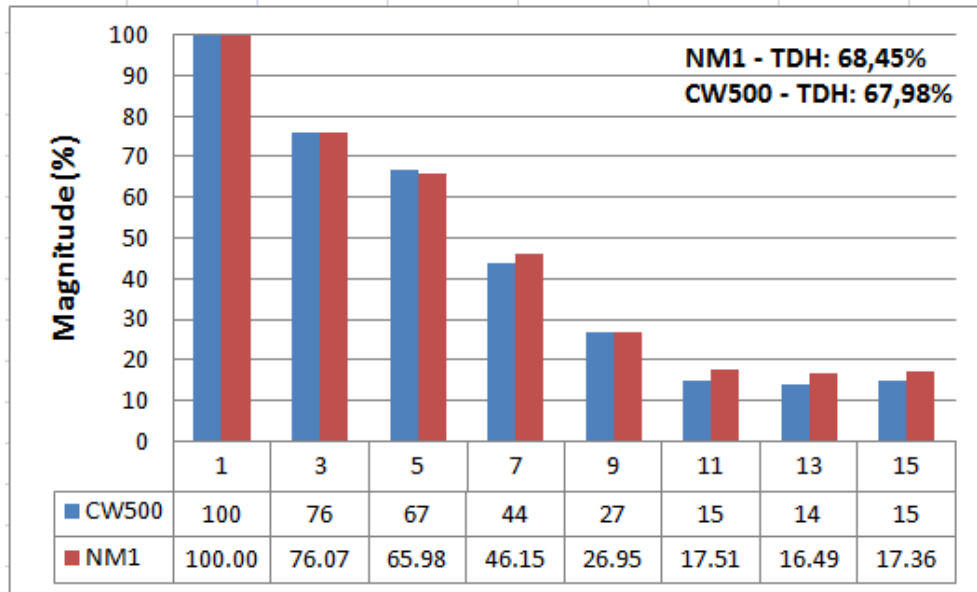
Figura 37: Harmônicos de tensão criados através do gerador de funções.



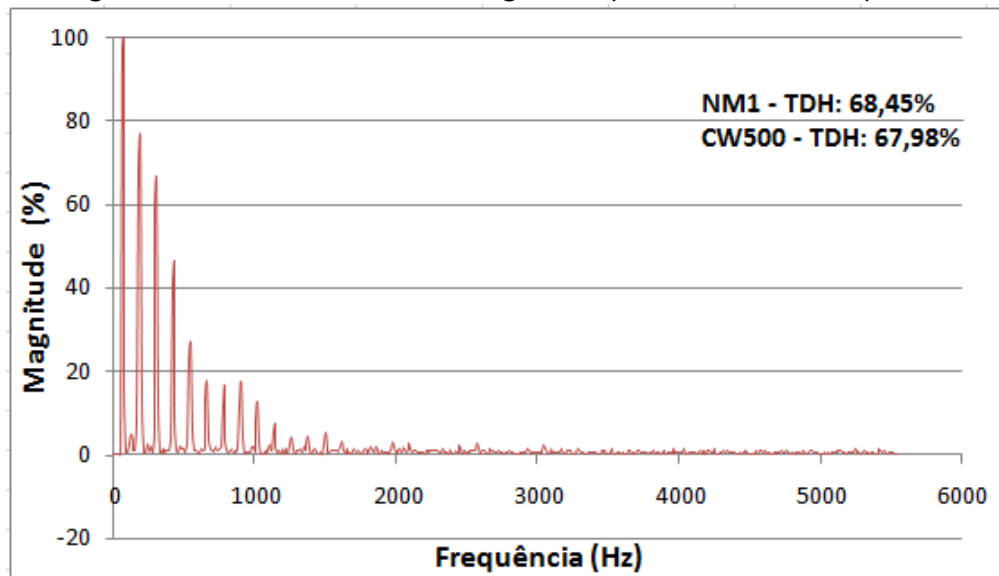
Fonte: elaboração própria.

ímpar é maior que nos experimentos anteriores. Nas figuras 38 e 39 o efeito é percebido.

Nesse experimento é possível observar que ambos os dispositivos apresentaram comportamento semelhante. Apesar do NM1 ser capaz de capturar inter harmônicas e uma

Figura 38: Harmônicos de tensão gerados pelo *Nobreak*.

Fonte: elaboração própria.

Figura 39: Harmônicos de tensão gerados pelo *Nobreak* no espectro .

Fonte: elaboração própria.

variedade de sinais no espectro de frequência, não é possível determinar com precisão a medição das inter harmônicas devido a limitação do CW500. Entretanto foi possível notar através da Figura 39 que o espectro capturado está em concordância com estudos realizados em aparelhos de *backup* e alimentação de carga por meio de *nobreak's*.

O cálculo da taxa de distorção harmônica é determinado segundo a energia referênte a cada harmônica no espectro, portanto um resultado confiável da energia medida implica em um bom resultado apresentado na TDH, e é esse resultado que o consumidor precisa para verificar se os valores encontrados estão em conformidade com a norma vigente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de desenvolvimento de um medidor de consumo e qualidade da energia elétrica, com interface e conexão a Internet não é uma tarefa simples, devido o envolvimento de diversos conceitos de diferentes áreas da engenharia elétrica e computação. Todavia, o constante aumento de demanda por eletricidade aliado aos conceitos inovadores como a Internet das Coisas e *smart grid*, tem direcionado projetos, pesquisas e produtos a fornecer comodidade no controle e o acesso as informações em tempo real ao usuário.

Com base nos dados apresentados no Capítulo 4, que discute os métodos de teste e resultados obtidos, os experimentos comprovaram a adequada operação do medidor, obtendo resultados com incertezas em torno de 1%. Analisando os resultados obtidos com diversas técnicas de detecção e monitoramento de eventos, pode-se concluir que eles são aplicáveis a alguns modelos de medidores eletrônicos de faturamento sem comprometer a capacidade de processamento dos mesmos. Os algoritmos de detecção não necessitam de recursos especiais de processamento, por exemplo, cálculo em ponto flutuante, e podem ser adaptados e compilados para a maioria dos processadores utilizados por estes medidores.

O trabalho mostrou uma arquitetura proposta para o medidor eletrônico que atende principalmente aos procedimentos e definições do PRODIST. Foram descritas as normas utilizadas, principais conceitos e o fluxo de projetos de desenvolvimento do dispositivo. O trabalho está inserido no âmbito de um projeto completo que possui blocos analógicos, em complemento ao processamento digital. A revisão bibliográfica detalhou todos os parâmetros de medição que foram aplicados pelo medidor. Também são explicados os métodos da FFT e filtros IIR que foram os principais utilizados durante o projeto das medições. Por fim, foi descrito como é o fluxo padrão de um projeto de hardware digital, descrevendo as etapas que foram utilizadas para desenvolver o projeto.

Foi desenvolvido no projeto um *firmware* robusto e preciso, nos quesitos de medição e extração dos indicadores de consumo e qualidade da energia elétrica, armazenamento e apresentação dos resultados e medição de consumo. Os resultados obtidos para as di-

ferentes técnicas de medição de consumo abordadas no item 3.2 foram, em sua maioria, bem sucedidos. No entanto, algumas ponderações ainda devem ser feitas, principalmente quanto ao compromisso entre precisão e esforço computacional, ainda que não tenham comprometido o resultado com o microcontrolador utilizado, outros dispositivos podem apresentar resultados mais eficientes com outros tipos de métodos.

Adicionalmente, considera-se que houve grande avanço no estabelecimento de um procedimento confiável para a implementação de hardware para sistemas de medição, podendo dessa forma, cooperar de forma ativa no desenvolvimento de trabalhos envolvendo sensores de medição e placas de acionamento de inversores dentro da própria Universidade.

5.1 Proposta de atividades futuras

Nesse projeto de pesquisa foram apresentadas as etapas do desenvolvimento de um medidor de consumo e qualidade da energia elétrica com acesso via web. Adicionalmente, foi proposta uma metodologia aplicável com o intuito de realizar a medição do consumo de energia elétrica e os parâmetros de qualidade. Entretanto, ainda há a necessidade da implementação de alguns métodos importantes para classificar os parâmetros de qualidade, entre eles: o fator de desequilíbrio e a implementação do cálculo do fator de potência para cargas com uma grande quantidade de distorção harmônica.

Adicionalmente, o sistema de medição deve garantir a entrega dos valores coletados da medição de forma íntegra, sem perda de dados e de maneira contínua. Dessa forma, é importante a realização de um teste de longo prazo a fim de determinar a integridade do envio e recepção das medições realizadas pelo equipamento. O método utilizado poderá ter duas etapas, sendo a primeira a medição de consumo de uma residência com o padrão de entrada do tipo monofásico. Os dados coletados durante uma semana serão enviados a cada uma hora para a Internet, onde poderão ser consultados a qualquer momento através de um computador ou *smartphone*. Portanto ao final do teste deverá compor o banco de dados do medidor um total de 168 medições. Problemas adicionais como falha na conexão com a Internet, por exemplo, deverão ser considerados. Nesse caso, o medidor deverá salvar os dados diretamente no cartão de memória. Na segunda etapa os testes poderão ser realizados em uma rede com padrão de entrada do tipo trifásico, nesse teste deverá ser utilizado como local de medição um consumidor do tipo industrial.

Referências

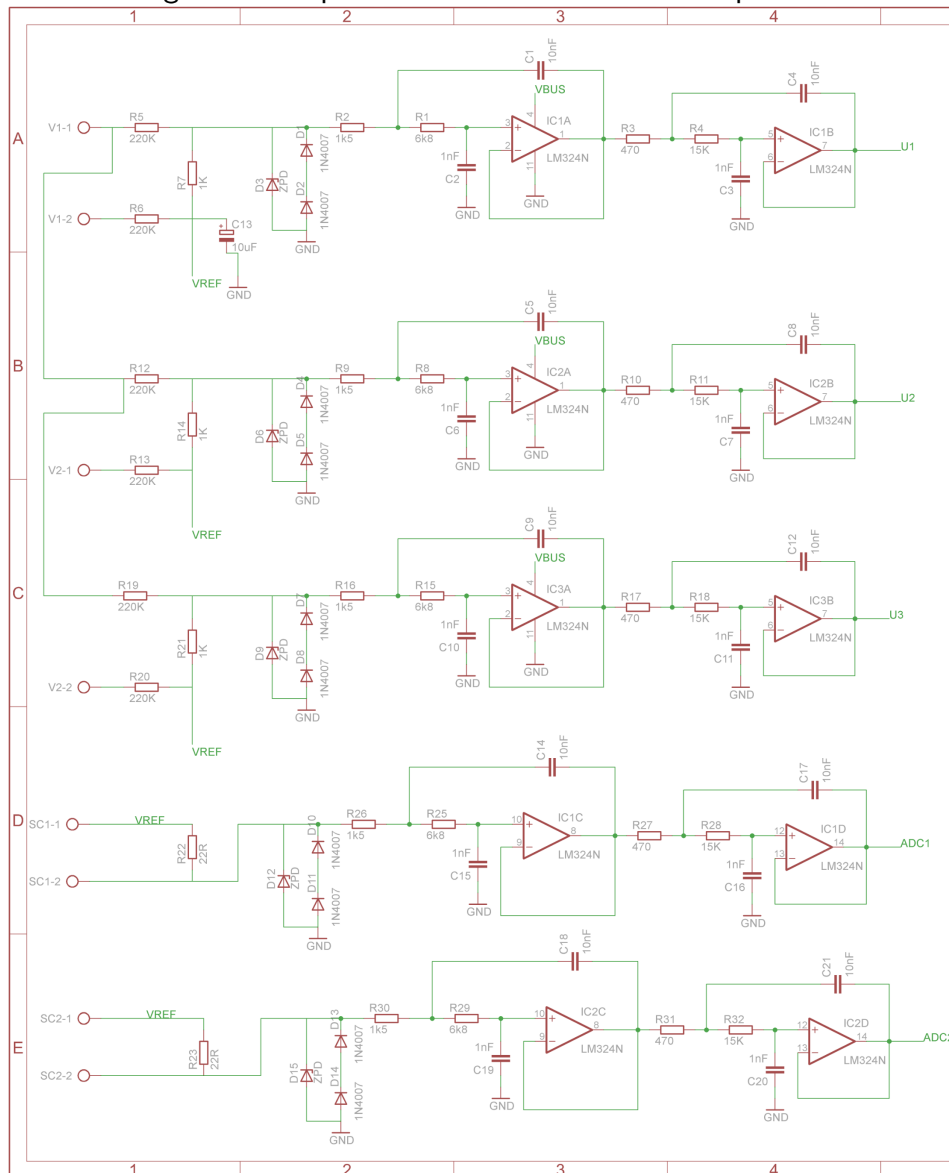
- AMCHAM, p. A. D. B. *Aneel: troca de medidores brasileiros custará R\$ 13,4 bi.* junho 2011. Out., 2001. Disponível em: <<https://www.amcham.com.br/noticias/competitividade/aneel-troca-de-medidoresbrasileiros-custara-r-13-4-bi>>. Acesso em 01 de junho de 2019.
- ANEEL. *Medidores Eletrônicos em Unidades Consumidoras do Grupo B.* 2010. Out., 2001. Disponível em: <www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2010/043/apresentacao/aneel_ap_043_2010.pdf>. Acesso em 01 de abril de 2019.
- ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), Qualidade da Energia Elétrica.* [S.l.], 2018.
- ARAUJO, P. Dissertação (Mestrado), *Development of a reconfigurable multi-protocol verification environment.* Porto, Portugal: [s.n.], mar. 2014.
- BARBON., W. H. M. A. J. G. S. Estudo comparativo entre algoritmos das transformadas discretas de fourier e wavelet. *Revista Brasileira de Computação Aplicada (ISSN 2176-6649)*, v. 7, n. 3, p. 97–107, out 2015.
- CALDEIRÃO, L. C. Dissertação (Mestrado), *Avaliação Experimental de Medidores Watt- Hora Operando em Condições não-senoidais.* Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, Brasil: [s.n.], maio 2005.
- COOLEY, J. W.; TUKEY, J. W. An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. *Digital VLSI Systems Design – A Design Manual for Implementation of Projects on FPGA and ASIC Using Verilog*, v. 19, n. 6, p. 297–301, 2007.
- DEPURU, L. W. S. S. R.; DEVABHAKTUNI, V. Smart meters for power grid: Challenges, issues, advantages and status. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 15, n. 6, p. 2736–2742, 2011.
- DEVICES, A. *Active Energy Metering IC with di/dt Sensor Interface.* 2002. Out., 2002. Disponível em: <[fromhttp://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7759.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7759.pdf)>. Acesso em 01 de abril de 2012.
- DRIESEN VAN CRAENENBROECK T., B. R. D. G. L. K. J. Electrical energy measurements in environments characterized by a deteriorated power quality. *IEE – Metering and Tariffs for Energy Supply*, v. 46, n. 462, p. 112–118, Maio 1999.
- DUGAN M. F. MCGANAGHAN, S. S. R. C.; BEATY, H. W. *Electrical Power Systems Quality.* Second edition, p. 167-171. Boston: McGraw-Hill, 2004.
- EI. *Handbook for Electricity Metering.* [S.l.], 2014.

- ESPINDULA, R. Dissertação (Mestrado), *Desenvolvimento de um sistema de medição de qualidade da energia elétrica e predição de consumo com interface de acesso via web*. Vitória, Espírito Santo, Brasil: [s.n.], maio 2016.
- EURELECTRIC. *Power Quality in European Electricity Supply Networks*. [S.l.], 2004.
- FAU, A. *Definição dos Procedimentos de Medição: Distorções Harmônicas, Desequilíbrios de Tensão, Flutuações de Tensão e Variações de Tensão de Curta Duração*. [S.l.], 2013.
- GHORBANI, H. M. M. J. "impact of harmonics on power quality and losses in power distribution systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, v. 5, n. 1, p. 166 – 174, out. 2015.
- HEYDT G.T.; BOSE, A. J. W. K. M. M. J. R. D. S. P. S. C. V. V. Professional resources to implement the smart grid. *Proceedings of the 2009 North American Power Symposium (NAPS)*, v. 1, n. 2, p. 1–8, out 2009.
- IEA. *Technology Roadmap Smart Grids*. [S.l.], 2011.
- IEC. Part 2-4: Environment - compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances. *International Electrotechnical Commission, IEC 61000-2-4 Electromagnetic compatibility (EMC)*, Edition 2, 2002.
- IEC. Iec 61000-4-30 electromagnetic compatibility (emc) part 4-30: Testing and measurement techniques - power quality measurement methods. *IEC 61000-4-30 Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-30*, p. 5 – 89, 2008.
- IEC. Testing and measurement techniques -flickermeter - functional and design specification. *IEC 61000-4-15*, 2010.
- IEEE. Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, p. 1–29, June 2014.
- INSTITUTE, E. E. *Handbook for Electricity Metering*. 2. ed. Washington D.C.: EEI, 2002.
- KAGAN, N. *Redes elétricas inteligentes no Brasil, análise de custos e benefícios de um plano nacional de implantação*. 1. ed. ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2013.
- KESTER. W. *Mixed-Signal and DSP Design Techniques, Capítulo 6*. Newnes Publisher. [S.l.], 2004.
- KUMAR, D. design of low pass butterworth filter. *International Journal of Research in IT*, v. 1, n. 2, p. 2249– 1619, nov 2012.
- LEÃO RUTH PASTORA SARAIVA; SAMPAIO, R. F. A. F. L. M. *Harmônicos em Sistemas Elétricos*. 1. ed. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- LIMA, F. de O. TCC (Graduação), *Desenvolvimento de filtros de sinais de micro-ondas utilizando linhas de microfita na banda L*. Universidade Federal de Uberlândia: [s.n.], dez. 2017.

- LOGIC, C. *Energy Measurement IC with Rogowski Coil Current Sensors*. mar 2012. Out., 2001. Disponível em: <<https://statics.cirrus.com/pubs/appNote/AN365REV1.pdf>>. Acesso em 01 de abril de 2019.
- MINGUEZ, A. TCC (Graduação), *Medidores de energia ativa: Funcionamento, Práticas Usuais, principais ensaios e análise das fraudes mais comuns*. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ): [s.n.], fev. 2007.
- NEVES GLEISON BALDUINO, E. C. D. Medição de potência ativa monofásica utilizando fpga. In: *CEEL - Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica*. [S.l.]: IEEE, 1994. p. 1098 – 1107.
- NIST. *NIST & The Smart Grid*. 2012. May., 2012. Disponível em: <<http://www.nist.gov/smartgrid/nistandsmartgrid.cfm>>. Acesso em 05 de maio de 2019.
- OPPENHEIM RONALD W. SCHAFFER, J. R. B. A. V. *Discrete-Time Signal Processing*. 2. ed. ed. New Jersey: Elsevier, 1998.
- PORFIRIO, R. P. e. a. Processamento de imagens multitemporais usando a transformada rápida de fourier (fft) na dimensão do tempo. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*. [S.l.]: Natal: Inpe, 2009. p. 7071–7078.
- RANDOLPH, L. T. . D. M. . D. H. . M. S. . J. Analysis of dc arc furnace operation and flicker caused by 187 hz voltage distortion. In: *IEEE Transactions on Power Delivery*. [S.l.]: IEEE, 1994. p. 1098 – 1107.
- SILVA, L. C. E. Dissertação (Mestrado), *Efeitos das Distorções Harmônicas (Tensões e Correntes) e Desequilíbrios (Tensões) em Medidores Eletrônicos Trifásicos de Energia Elétrica Ativa*. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira: [s.n.], nov. 2008.
- SMITH, S. *Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists*. 3. ed. ed. San Diego, California: Newnes, 2002.
- TELECO. *Filtros Digitais*. 2019. May., 2019. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialfiltrodig/pagina_3.asp>. Acesso em 05 de maio de 2019.
- TI. *Understanding Data Converters, Application Reports*. [S.l.], 1995.
- TI. *TM4C123GH6PM Microcontroller Datasheet*. 2014. Out., 2007-2014. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tm4c123gh6pm.pdf>>. Acesso em 05 de maio de 2019.
- WAKILEH, G. *Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design*. Springer: Springer Science & Business Media, 2001.
- XU WAYNE A. WOODWARD, H. L. G. M. Experimental wireless and the wireless engineer. *Journal of Signal and Information Processing*, v. 3, n. 4, p. 536–541, nov 2012.
- YHDC. *SCT-013*. May., 2019. Disponível em: <https://www.mcielectronics.cl/website_MCI/static/documents/Datasheet_SCT013.pdf>. Acesso em 05 de maio de 2019.

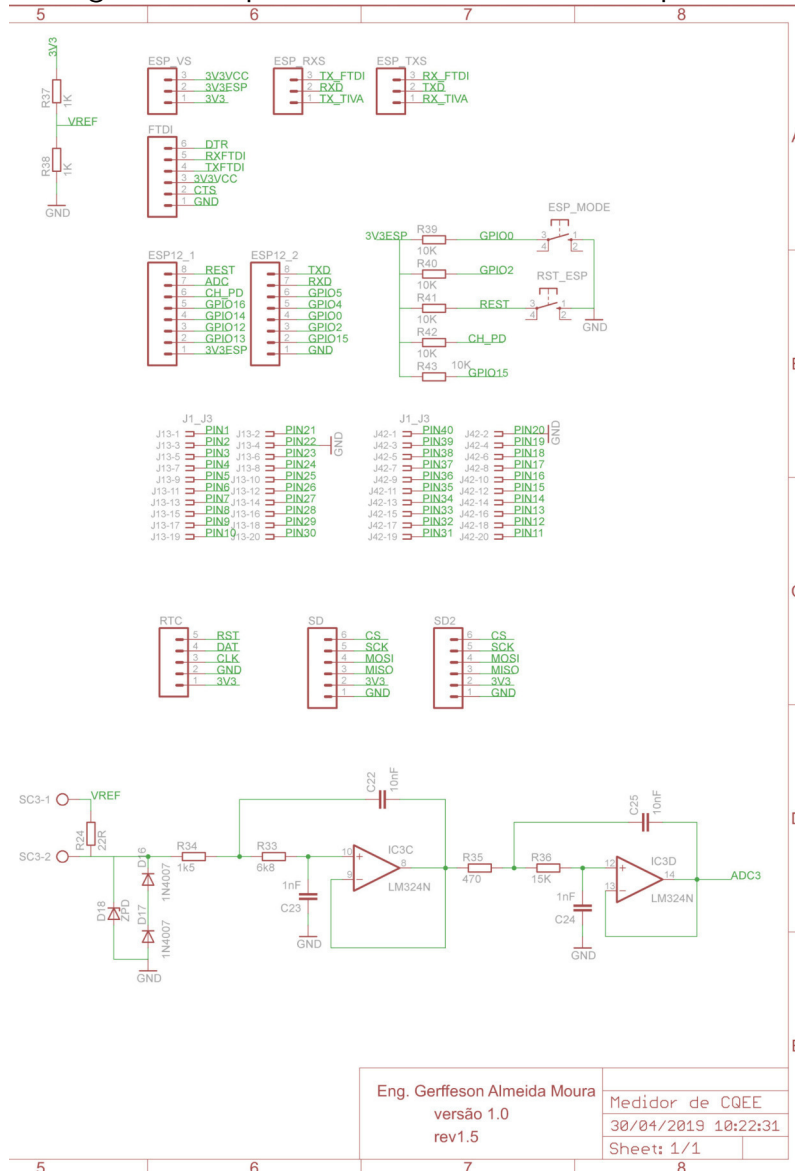
APÊNDICE A - Projeto do *hardware*

Figura 40: Esquema do medidor desenvolvido parte 1.



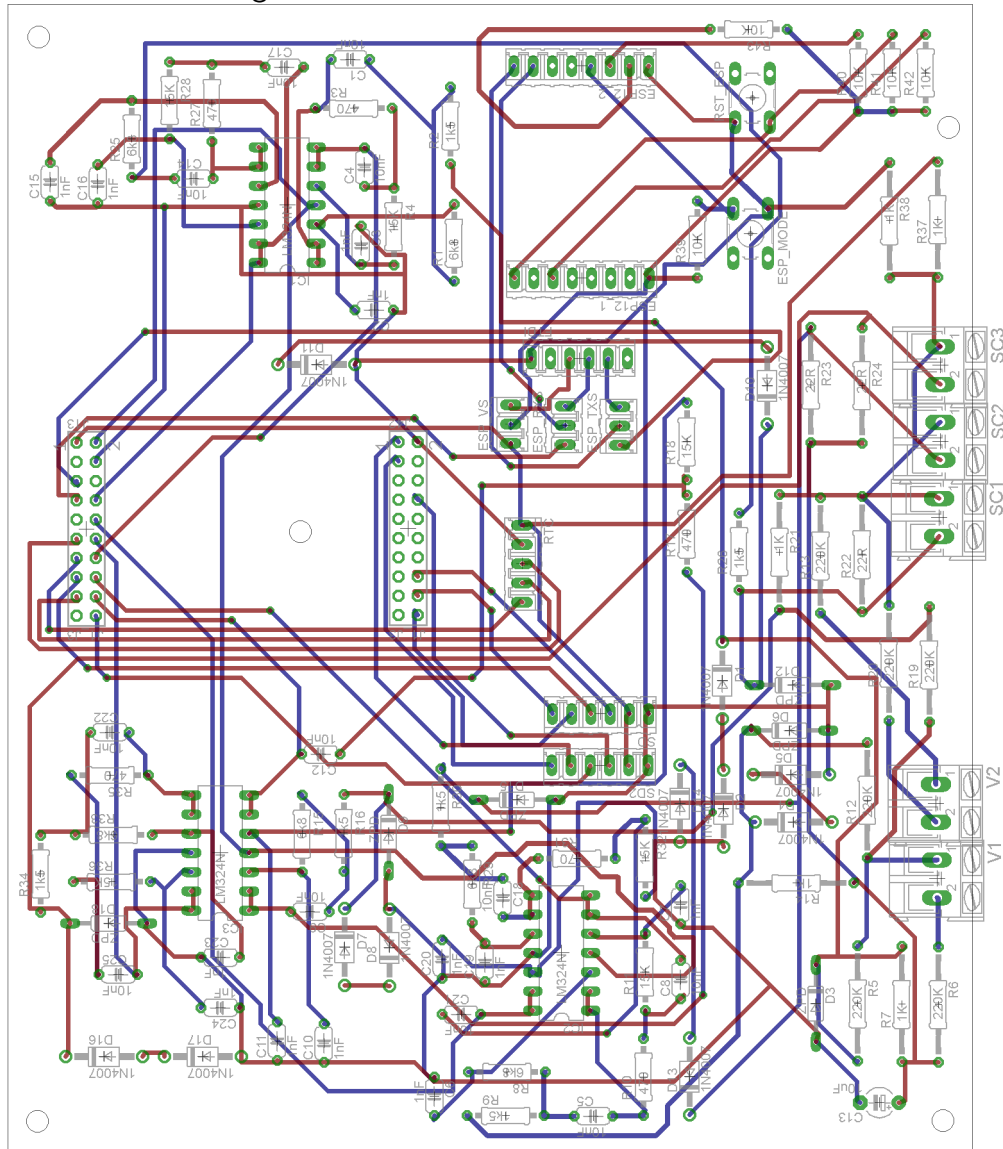
Fonte: elaboração própria.

Figura 41: Esquema do medidor desenvolvido parte 2.



Fonte: elaboração própria.

Figura 42: Leiaute do medidor desenvolvido.



Fonte: elaboração própria.

APÊNDICE B - Projeto do *firmware*

```

1 //-----BIBLIOTECAS-----
2 #include "OneMsTaskTimer.h"
3 #include "arduinoFFT.h"
4 #include "Nextion.h" //biblioteca Nextion
5 #include "floatToString.h"
6 //-----
7
8 #define custo 0.651
9 #define offsetfreq 0.42
10
11 //-----PARAMETRO DAS BIBLIOTECAS-----
12 OneMsTaskTimer_t myTask1 = {1000, flash1, 0, 0};
13 arduinoFFT FFT = arduinoFFT(); /* Create FFT object */
14 //-----
15
16
17
18
19 //-----PARAMETROS DO PROGRAMA-----
20 const uint16_t samples = 1024; //This value MUST ALWAYS be a power of 2
21 const double samplingFrequency = 11100;
22 unsigned int sampling_period_us;
23 unsigned long microseconds;
24 float TDH;
25 float fund;
26 double vReal1[samples];
27 double vImag1[samples];
28 //-----
29
30 //-----DEFINES-----
31 #define CHANNEL1 A2
32 #define SCL_INDEX 0x00
33 #define SCL_TIME 0x01

```

```

34 #define SCL_FREQUENCY 0x02
35 #define SCL_PLOT 0x03
36 //-----
37
38 //-----VARI VEIS-----
39 int cont=0;
40 char txt1[10]; //texto para convers o e exhibi o
41 char txt2[10]; //texto para convers o e exhibi o
42 char txt3[10]; //texto para convers o e exhibi o
43 char txt4[10]; //texto para convers o e exhibi o
44 char txt5[10]; //texto para convers o e exhibi o
45 char txt6[10]; //texto para convers o e exhibi o
46 char buffer[10];
47
48
49 float vrms1;
50 float irms1;
51 float potenciainst=0;
52 float potenciaconsu=0;
53 float potenciaconsureais=0;
54 float h1,h2,h3,h4,h5,h6,h7;
55 uint32_t ds_var = 0; //armazena o estado do bot o
56
57 //-----VARI VEIS LOCAIS-----
58
59
60
61
62 //-----
63
64 //-----DISPLAY-----
65 // --- Declara o de Objetos ---
66
67 NexWaveform graph1 = NexWaveform(0, 1, "graph1");
68 //page id:0, id componente:1, nome do componente: "bt0"
69 NexProgressBar br1 = NexProgressBar(0, 4, "br1");
70 NexProgressBar br2 = NexProgressBar(0, 4, "br2");
71 NexProgressBar br3 = NexProgressBar(0, 4, "br3");
72 NexProgressBar br4 = NexProgressBar(0, 4, "br4");
73 NexProgressBar br5 = NexProgressBar(0, 4, "br5");
74 NexProgressBar br6 = NexProgressBar(0, 4, "br6");
75 NexProgressBar br7 = NexProgressBar(0, 4, "br7");
76 NexText VRMS_A = NexText(0, 2, "t0");

```

```

77 NexText VRMS_B    = NexText(0, 6, "t4");
78 NexText VRMS_C    = NexText(0, 7, "t5");
79
80 NexText IRMS_A    = NexText(0, 2, "t6");
81 NexText IRMS_B    = NexText(0, 6, "t7");
82 NexText IRMS_C    = NexText(0, 7, "t8");
83
84 NexText POTATIVA  = NexText(0, 2, "t9");
85 NexText FRECUENCIA = NexText(0, 2, "t10");
86 NexText POTCONSU  = NexText(0, 2, "t11");
87 NexText POTCONSUREAIS = NexText(0, 2, "t12");
88 NexText DTH1     = NexText(0, 2, "t14");
89 NexDSButton b0   = NexDSButton(7, 11, "bt0");
90
91 //NexDSButton bt0 = NexDSButton(0, 5, "b1");
92 //-----
93
94 void setup()
95 {
96     OneMsTaskTimer::add(&myTask1); // 500ms period
97     OneMsTaskTimer::start();
98     nexInit(); // inicializa o tft
99     sampling_period_us = round(1000000*(1.0/samplingFrequency));
100
101
102     pinMode(40, OUTPUT);
103     pinMode(39, OUTPUT);
104     //Serial.println("Ready");
105
106 }
107
108 void loop()
109 {
110     cont++;
111     calcfft();
112
113 }
114
115 void PrintVector(double *vData, uint16_t bufferSize, uint8_t scaleType)
116 {
117
118     for (uint16_t i = 0; i < bufferSize; i++)
119     {

```

```

120     double abscissa;
121     /* Print abscissa value */
122     switch (scaleType)
123     {
124         case SCL_INDEX:
125             abscissa = (i * 1.0);
126             break;
127         case SCL_TIME:
128             abscissa = ((i * 1.0) / samplingFrequency);
129             break;
130         case SCL_FREQUENCY:
131             abscissa = ((i * 1.0 * samplingFrequency) / samples);
132             break;
133     }
134     // Serial.print(i);
135     // Serial.print("_");
136     // Serial.print(abscissa, 2);
137     //////////// // if(scaleType==SCL_FREQUENCY)
138     ////////////     Serial.print("Hz");
139     // Serial.print("_");
140     // Serial.println(vData[i], 2);
141     if(vData[12]>vData[11])
142         vData[11] = vData[12];
143     if(vData[18]>vData[17])
144         vData[17] = vData[18];
145     if(vData[23]>vData[22])
146         vData[22] = vData[23];
147     if(vData[28]>vData[27])
148         vData[27] = vData[28];
149     if(vData[34]>vData[33])
150         vData[33] = vData[34];
151     if(vData[40]>vData[39])
152         vData[39] = vData[40];
153     if(vData[46]>vData[45])
154         vData[45] = vData[46];
155
156
157
158     }
159     h1=vData[17]/10;
160     h2=vData[28]/10;
161     h3=vData[39]/10;
162     h4=vData[50]/10;

```

```

163     h5=vData[61]/10;
164     h6=vData[72]/10;
165     h7=vData[83]/10;
166     unsigned long int tdhtemp1;
167     for(int i=11;i<=128;i++)
168         tdhtemp1+=vData[i]*vData[i];
169     TDH=(sqrt(tdhtemp1)/500000)*100;
170
171 // Serial.println("INICIO");
172 // Serial.println(vData[11], 2);
173 // Serial.println(vData[17], 2);
174 // Serial.println(vData[22], 2);
175 // Serial.println(vData[27], 2);
176 // Serial.println(vData[33], 2);
177 // Serial.println(vData[39], 2);
178 // Serial.println(vData[45], 2);
179 // Serial.println("FIM");
180 // delay(5000);
181 //Serial.println();
182 }
183
184 void flash1(){
185
186
187     //}
188     potenciaconsu+=potenciainst/3600;
189     potenciaconsureais = (potenciaconsu*custo);
190 // Serial.println("FREQUENCIA:");
191 //Serial.println(fund, 2); //Print out what frequency is the most dominant.
192 // Serial.println("TDH:"); //Print out what frequency is the most dominant.
193 // Serial.println(TDH); //Print out what frequency is the most dominant.
194 // Serial.println("TENSAO_RMS:");
195 //     Serial.println(vrms1);
196 //     Serial.println("CORRENTE_RMS:");
197 //     Serial.println(irms1);
198 // Serial.println("POTENCIA_INSTANTANEA:");
199 // Serial.println(potenciaconsu);
200 //     Serial.println("VALOR_REAIS:");
201 //     Serial.println(potenciaconsureais);
202     digitalWrite(40, !digitalRead(40));
203 }
204
205

```

```

206 void calcfft(){
207
208     double tensao1[samples];
209     int tensao1temp[samples];
210     unsigned long int somatensao1=0;
211     float tensaomedial=0;
212     /*SAMPLING*/
213     unsigned long int somacorrente1=0;
214     int corrente1[samples];
215     int corrente1temp[samples];
216     float correntemedial=0;
217
218
219     microseconds = micros();
220     for(int i=0; i<samples; i++)
221     {
222         vReal1[i] = analogRead(CHANNEL1);
223         tensao1[i] = analogRead(CHANNEL1);
224         corrente1[i] = analogRead(A4);
225
226
227
228         vImag1[i] = 0;
229         delayMicroseconds (65.1);
230         //     for(int i; i<samples;i++)
231         //         Serial.println(tensao1[i]);
232         // microseconds += sampling_period_us;
233     }
234
235
236     for(int i=0; i<=samples;i++){
237         somatensao1 += tensao1[i];
238         //     somatensao2 += tensao2[i];
239         //     somatensao3 += tensao3[i];
240         somacorrente1 += corrente1[i];
241         //Serial.println(somacorrente1);
242         //     somacorrente2 += corrente2[i];
243         //     somacorrente3 += corrente3[i];
244     }
245
246     tensaomedial = (somatensao1/samples);
247     correntemedial = somacorrente1/samples;
248     somatensao1=0;

```



```

249 // somatensao2=0;
250 // somatensao3=0;
251 somacorrente1=0;
252 // somacorrente2=0;
253 // somacorrente3=0;
254
255 for (int i=0; i<samples;i++){
256 tensao1temp[i]= tensao1[i]-tensaomedial;
257 tensao1temp[i] *= tensao1temp[i];
258 somatensao1 += tensao1temp[i];
259
260 corrente1temp[i]= corrente1[i]-correntemedial;
261 corrente1temp[i] *= corrente1temp[i];
262 somacorrente1 += corrente1temp[i];
263 }
264
265
266
267 somatensao1=somatensao1/samples;
268 somacorrente1=somacorrente1/samples;
269 // Serial.println((int)somacorrente1);
270 vrms1 = sqrt((int)somatensao1);
271 vrms1 = 1.140*vrms1+1.5;
272 potenciainst = (vrms1 * irms1)/1000;
273 // Serial.println(correntemedial);
274
275 irms1 = sqrt(somacorrente1);
276 //CALIBRACAO COM O INSTRUMENTO NO CANAL 1:
277 //irms1 = 0.0105*irms1;
278 // //CALIBRACAO COM O INSTRUMENTO NO CANAL 2:
279 // irms1 = 0.0108*irms1;
280 // //CALIBRACAO COM O INSTRUMENTO NO CANAL 3:
281 // irms1 = 0.0108*irms1;
282
283 //irms1=100;
284
285 display_atualiza();
286
287 // for (int i; i<samples;i++)
288 // Serial.println(vReal1[i]);
289 /* Print the results of the sampling according to time */
290 // Serial.println("Data:");
291 // PrintVector(vReal1, samples, SCL_TIME);

```

```

292     FFT.Windowing(vReal1, samples, FFT_WIN_TYP_HAMMING, FFT_FORWARD);
293     // Serial.println("Weighed_data:");
294     // PrintVector(vReal1, samples, SCL_TIME);
295     FFT.Compute(vReal1, vImag1, samples, FFT_FORWARD); /* Compute FFT */
296     // Serial.println("Computed_Real_values:");
297     // PrintVector(vReal1, samples, SCL_INDEX);
298     // Serial.println("Computed_Imaginary_values:");
299     // PrintVector(vImag1, samples, SCL_INDEX);
300     FFT.ComplexToMagnitude(vReal1, vImag1, samples); /* Compute magnitudes */
301     // Serial.println("Computed_magnitudes:");
302     PrintVector(vReal1, (samples >> 1), SCL_FREQUENCY);
303     double x = FFT.MajorPeak(vReal1, samples, samplingFrequency);
304     fund=x-offsetfreq;
305     // if(x>50 && x<70)
306
307
308     // while(1); /* Run Once */
309     // delay(2000); /* Repeat after delay */
310 }
311
312 void display_atualiza(){
313
314
315     String s = floatToString(buffer, vrms1, 2, sizeof(vrms1));
316     buffer[ sizeof(vrms1)+1] = 'V';
317     if(vrms1<25)
318     VRMS_A.setText("DESC.");
319     else
320     VRMS_A.setText(buffer);
321
322     s = floatToString(buffer, irms1, 2, sizeof(irms1));
323     buffer[ sizeof(irms1)+1] = 'A';
324     //     if(vrms1<25)
325     //     IRMS_A.setText("DESC.");
326     //     else
327     IRMS_A.setText(buffer);
328
329     s = floatToString(buffer, fund, 2, sizeof(fund));
330     FREQUENCIA.setText(buffer);
331
332     s = floatToString(buffer, potenciainst, 2, sizeof(potenciainst));
333     POTATIVA.setText(buffer);
334     b0.getValue(&ds_var);

```

```

335     if(ds_var>0){
336         potenciaconsu =0.0;
337         potenciaconsureais=0.0;
338         digitalWrite(39,HIGH);
339     }
340     else{
341         digitalWrite(39,LOW);
342     }
343
344     s = floatToString(buffer , TDH, 2, sizeof(TDH));
345     DTH1.setText(buffer);
346 //     s = floatToString(buffer , h1, 2, sizeof(h1));
347
348     br1.setValue(h1);
349     br2.setValue(h2);
350     br3.setValue(h3);
351     br4.setValue(h4);
352     br5.setValue(h5);
353     br6.setValue(h6);
354     br7.setValue(h7);
355
356     Serial1.begin(115200);
357     Serial1.print(vrms1);
358     Serial1.println("V");
359     //Serial1.print("CORRENTE: ");
360     Serial1.print(irms1);
361     Serial1.println("A");
362     Serial1.print(fund);
363     Serial1.print("_Hz\n");
364 //     Serial1.print(potenciaconsu);
365 //     Serial1.print("_kW\n");
366
367     Serial1.end();
368
369     s = floatToString(buffer , potenciaconsu , 2,
370
371     sizeof(potenciaconsu));
372     POTCONSU.setText(buffer);
373     s = floatToString(buffer , potenciaconsureais , 2,
374
375     sizeof(potenciaconsureais));
376     POTCONSUREAIS.setText(buffer);
377     //String s = floatToString(buffer , tensaomedial , 2,

```

```
378  
379     sizeof(tensaomedia1));  
380     //Serial.println(s);  
381  
382     // graph1.addValue(0, (int)tensao1);  
383 }
```

APÊNDICE C – Características do microcontrolador

TM4C123GH6PM Microcontroller Overview

The TM4C123GH6PM microcontroller combines complex integration and high performance with the features shown in Table 1-1.

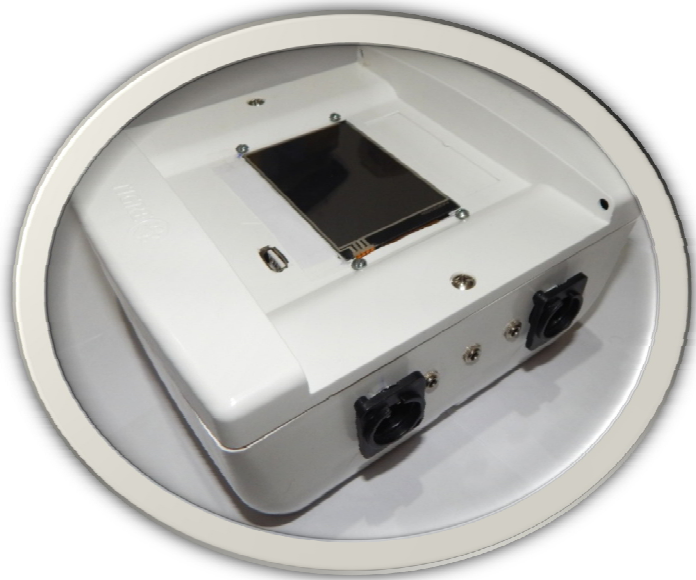
Table 1-1. TM4C123GH6PM Microcontroller Features

Feature	Description
Performance	
Core	ARM Cortex-M4F processor core
Performance	80-MHz operation; 100 DMIPS performance
Flash	256 KB single-cycle Flash memory
System SRAM	32 KB single-cycle SRAM
EEPROM	2KB of EEPROM
Internal ROM	Internal ROM loaded with TivaWare™ for C Series software
Security	
Communication Interfaces	
Universal Asynchronous Receivers/Transmitter (UART)	Eight UARTs
Synchronous Serial Interface (SSI)	Four SSI modules
Inter-Integrated Circuit (I ² C)	Four I ² C modules with four transmission speeds including high-speed mode
Controller Area Network (CAN)	Two CAN 2.0 A/B controllers
Universal Serial Bus (USB)	USB 2.0 OTG/Host/Device
System Integration	
Micro Direct Memory Access (μDMA)	ARM® PrimeCell® 32-channel configurable μDMA controller
General-Purpose Timer (GPTM)	Six 16/32-bit GPTM blocks and six 32/64-bit Wide GPTM blocks
Watchdog Timer (WDT)	Two watchdog timers
Hibernation Module (HIB)	Low-power battery-backed Hibernation module
General-Purpose Input/Output (GPIO)	Six physical GPIO blocks
Advanced Motion Control	
Pulse Width Modulator (PWM)	Two PWM modules, each with four PWM generator blocks and a control block, for a total of 16 PWM outputs.
Quadrature Encoder Interface (QEI)	Two QEI modules
Analog Support	
Analog-to-Digital Converter (ADC)	Two 12-bit ADC modules, each with a maximum sample rate of one million samples/second
Analog Comparator Controller	Two independent integrated analog comparators
Digital Comparator	16 digital comparators
JTAG and Serial Wire Debug (SWD)	One JTAG module with integrated ARM SWD
Package Information	
Package	64-pin LQFP
Operating Range (Ambient)	Industrial (-40°C to 85°C) temperature range Extended (-40°C to 105°C) temperature range

APÊNDICE D – Manual do medidor NM1

MEDIDOR DE CONSUMO E QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA **NM1**

MANUAL DO PRODUTO



new energy monitor

Este produto é parte de uma exclusiva e completa linha da New Energy Monitor que inova trazendo a sofisticação em um dispositivo capaz de informar o consumo e os parâmetros de qualidade da energia elétrica, garantindo ao consumidor um acesso simples e constante a informação. Através da conexão direta a Internet é possível monitorar o sistema a qualquer local do mundo. Siga corretamente as instruções contidas neste manual e aproveite ao máximo o seu novo produto. Estamos à disposição para te ouvir e esclarecer qualquer dúvida.

Sumário

1	Segurança	1
	Instruções importantes de segurança.....	1
2	Conhecendo o medidor	2
	O que é o NM1.....	2
	Realização da medição.....	2
	Leitura dos resultados.....	2
3	Instalando o medidor	3
	Fixação do medidor.....	4
	Transporte/Manuseio	4
	Embalagem/Estocagem.....	4
	Limpeza/Manutenção	4
4	Usando o seu medidor	5
	Conexões das ponteiros e sensores a rede elétrica	5
	Conexões das ponteiros e sensores ao medidor.....	5
	Leitura das medições através da tela sensível ao toque	6
	Leitura das medições através da internet	7
	Leitura das medições através da USB.....	8
	Leitura das medições através do cartão de memória	8
5	Dados técnicos	8
6	Avisos e alertas	9

7	Questões ambientais	9
8	Fale com a New Energy Monitor	9

1 Segurança

INSTRUÇÕES IMPORTANTES DE SEGURANÇA

A sua segurança e a de terceiros é muito importante. Este manual e o seu produto têm muitas mensagens importantes de segurança. Sempre leia e siga as mensagens de segurança.



Este é o símbolo de alerta de segurança. Este símbolo alerta sobre situações que podem trazer riscos à sua vida, ferimentos a você ou a terceiros.

Todas as mensagens de segurança virão após o símbolo de alerta de segurança e a palavra “PERIGO” ou “ADVERTÊNCIA”. Estas palavras significam:

PERIGO

Existe risco de você perder a vida ou de ocorrerem danos graves se as instruções não forem seguidas imediatamente.

ADVERTÊNCIA

Existe risco de você perder a vida ou de ocorrerem danos graves se as instruções não forem seguidas. Todas as mensagens de segurança mencionam qual é o risco em potencial, como reduzir a chance de se ferir e o que pode acontecer se as instruções não forem seguidas.

ITENS DE SEGURANÇA

As ponteiros de prova de tensão e sensores de corrente não invasivo (TC's) são fornecidos junto ao seu medidor NM1;

Instale o produto de acordo com as especificações descritas no manual de instruções;

ATENÇÃO: Nunca remova as pontas de prova do medidor quando estas estiverem conectadas a rede elétrica;

No processo de fixação do medidor deve ser previsto local isento de jatos de água, chuva e radiação solar;

Não realize o processo de atualização do software com o equipamento conectado a rede elétrica;

ATENÇÃO: Para evitar danos permanentes à tela sensível ao toque, não use:

canetas esferográficas ou equivalente;

objetos pontiagudos e abrasivos e;

limpadores multiuso e qualquer produto químico que contenha amônia, acetona, tolueno ou álcool.

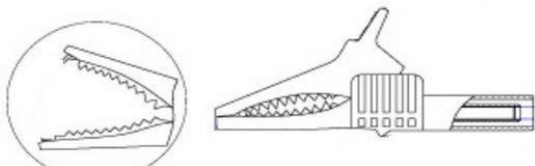
2 Conhecendo o medidor

O que é o medidor NM1?

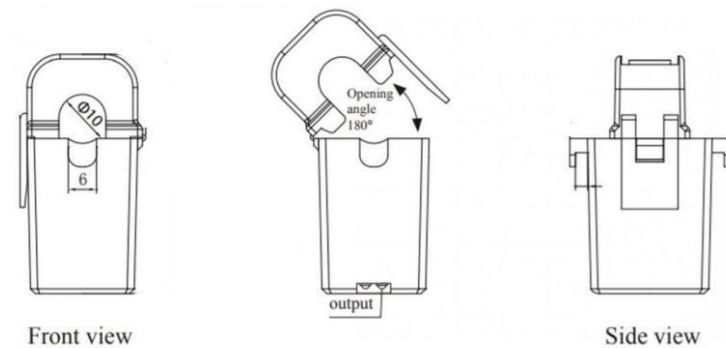
É um dispositivo eletrônico desenvolvido para realizar a medição do consumo e medir a qualidade da energia elétrica. Além disso, registrar a ocorrência de distúrbios elétricos, entre eles a variação de tensão, *flicker*, variação de frequência, harmônicos e perturbações momentâneas. Além disso, o medidor também é capaz de determinar os valores instantâneos de tensão, corrente, potência e frequência. A amostragem é realizada de forma contínua segundo critérios de normatização, os dados são processados, em seguida são armazenados em uma memória não volátil, e por fim enviados a um servidor web.

Realização da medição

O medidor monitora a tensão através de ponteiros de prova do tipo “garra de jacaré”. Para um sistema do tipo monofásico o par de ponteiros é conectado tomando como referência o **neutro**, ao potencial ao qual se deseja realizar a medição, a **fase**.



Já em um sistema com padrão de entrada a três fases devem ser conectadas as quatro ponteiros, tomando como referência o **neutro** e as três **fases** as quais se deseja realizar a medição. Para realizar a medição de corrente um transformado de corrente (TC), coleta os dados de forma não invasiva.



Com as ponteiros de tensão e sensores de corrente conectados o medidor é capaz de realizar cálculos de parâmetros de consumo e qualidade da energia elétrica.

Leitura dos resultados

Os resultados são mostrados conforme desejado pelo usuário através de três modos:

- a) Tela sensível ao toque: é possível visualizar os dados e navegar pela *interface* projetada para garantir uma melhor experiência.

b) Internet: os resultados podem ser visualizados através de um dispositivo conectado a Internet: smartphone, computador ou tablet. Bastando instalar o aplicativo **Blynk**, disponível na **Google Play Store** para android e **Bluestacks** para **Windows**.

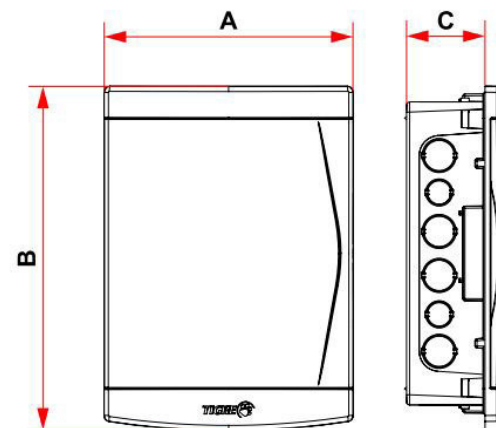
c) USB: através da entrada USB também é possível coletar os dados utilizando a ferramenta monitor serial, disponível no software **Energia IDE**, o software funciona nas plataformas **Windows, MAC OS e Linux**.

Existe ainda a possibilidade da leitura dos resultados diretamente através do cartão de memória. O dispositivo armazena os dados no cartão de memória assim que cada medição é realizada, o cartão pode ser removido e os dados analisados em qualquer dispositivo que possua a entrada para leitura de cartões SD.

IMPORTANTE

Se o medidor apresentar na tela ou através dos *softwares* mensagens constantes de alerta sobre os parâmetros críticos de qualidade, pode ser necessário realizar uma intervenção na instalação elétrica ou entrar em contato com a concessionária. Ao ignorar as mensagens de alerta, os aparelhos conectados a rede são passíveis a sofrerem riscos de danos. As mensagens críticas são destacadas de cor vermelha.

3 Instalando o medidor



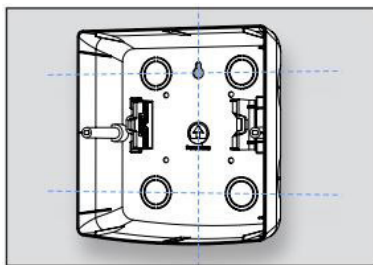
Dimensões (mm)			
COTAS	A	B	C
	186	173,3	78,7

Descrição do corpo:

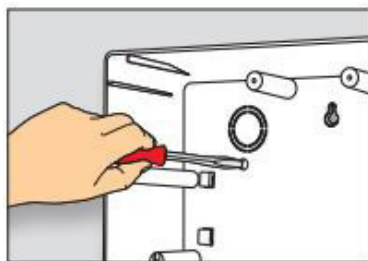
- Componente fabricado em PVC anti-chama na cor branca;
- Grau de proteção IP40 conforme NBR 6146;

3.1 Fixação do medidor:

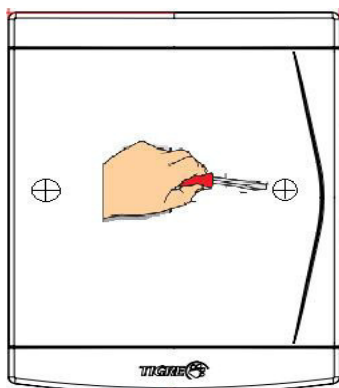
Passo 1: Marque a altura desejada para posicionamento do quadro na parede. Faça a marcação dos pontos de fixação com o auxílio das indicações no fundo do quadro. Cuide para que o quadro fique nivelado;



Passo 2: Fixe o quadro com os parafusos e buchas que o acompanham. prossiga com a instalação da tampa.



Passo 3: Fixe a tampa com os parafusos que o acompanham.



3.1 Transporte/Manuseio

- Transportar o produto em sua embalagem original.
- Retirar o produto da embalagem somente no momento da sua instalação.
- Evitar a queda do material.

3.2 Embalagem/Estocagem

- Armazenar o produto em sua embalagem original sobre superfície plana, isenta de irregularidades, em local coberto e ventilado.
- Até sua instalação, armazene as tampas e molduras em local seguro para evitar quebras ou perdas

3.3 Limpeza/Manutenção

- O medidor dispensa manutenção.
- Aconselha-se apenas a fazer uma limpeza periódica com um pano macio, água e sabão neutro.

IMPORTANTE

Não utilize nenhum produto químico corrosivo para limpeza.



ADVERTÊNCIA

Risco de Choque Elétrico

Não conecte as ponteiros de medição de tensão com a tampa do aparelho aberta, sem os parafusos. Assim o circuito eletrônico estará exposto e o risco de choque elétrico será eminente.

Primeiro realiza a etapa de fixação do aparelho, só então conecte as ponteiros de medição.



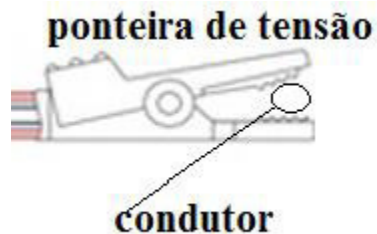
4 Usando o seu medidor

Para obter os melhores resultados com o uso do medidor, opere-o adequadamente segundo instruções do manual. Esta seção lhe dará informações importantes para o uso eficiente e seguro do mesmo.

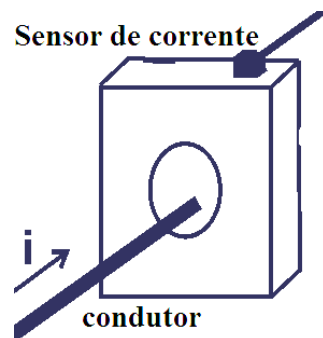
4.1 Conexões das ponteiros e sensores a rede elétrica

Assegure-se que as ponteiros de tensão e corrente estão devidamente conectadas conforme a ilustração seguinte:

Conexão do sensor de tensão

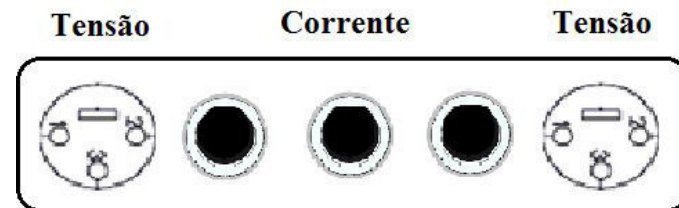


Conexão do sensor de corrente



4.2 Conexões das ponteiros e sensores ao medidor

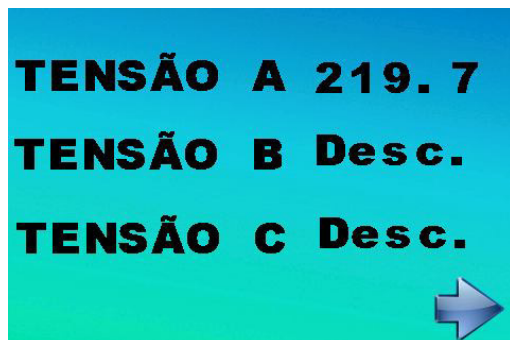
Para garantir uma operação segura e eficiente, as ponteiros de tensão e os sensores dispõem de conectores de fácil engate.



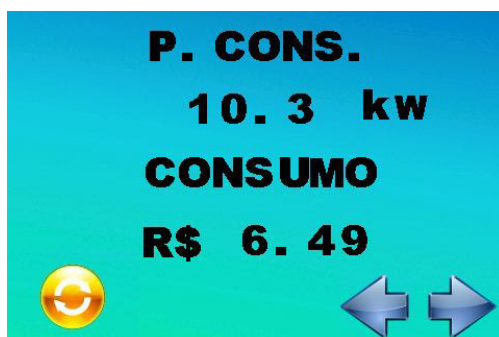
Os conectores de tensão em especial possuem travas a fim de evitar contatos acidentais em partes energizadas nos pontos de monitoramento. Caso a medição ocorra em uma rede monofásica, apenas um conector de tensão deverá ser conectado.

4.3 Leitura das medições através da tela sensível ao toque

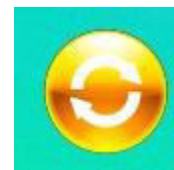
A leitura e navegação através da tela é simples e intuitiva devido a função *touchscreen*. A função permite a mudança rápida e dinâmica da tela para ajustar as necessidades do usuário.



Os valores de cada canal são mostrados individualmente, caso o valor “Desc.” seja exibido significa que a ponteira ou o sensor não foram conectados. Também pode significar que os valores de tensão e corrente estão próximos a zero. Através da seta de navegação o usuário pode alternar entre outras medições, entre eles: tensão, corrente, potência ativa, potência instantânea, frequência, consumo em “R\$”, potência reativa e aparente, fator de potência e taxa de distorção harmônica.



Na tela de consumo é possível reiniciar o registro do consumo em Kilowatts e reais, através da tecla especial de navegação:



A tela seguinte questionará se o usuário tem certeza:



Se confirmado os valores serão zerados e o medidor começará a registrar novamente os valores.

Os valores das harmônicas podem ser visualizados em forma de barra ou através de um valor único, a taxa de distorção harmônica (TDH).



O valor da TDH é calculado levando em consideração as 50 primeiras harmônicas presentes na tensão, o valor da TDH de corrente também pode ser determinado segundo escolha do usuário.



4.4 Leitura das medições através da Internet

Para efetuar a leitura dos dados a partir da internet o usuário precisa instalar no smartphone ou no computador o aplicativo **Blynk - IoT for Arduino**, oferecido pela **Blynk Inc.**

No celular o aplicativo pode ser encontrado em:

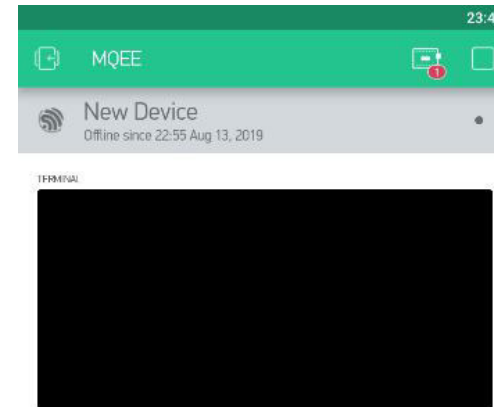
https://play.google.com/store/apps/details?id=cc.blynk&hl=pt_BR

Para instalar o aplicativo no computador é necessário instalar o bluestacks disponível em:

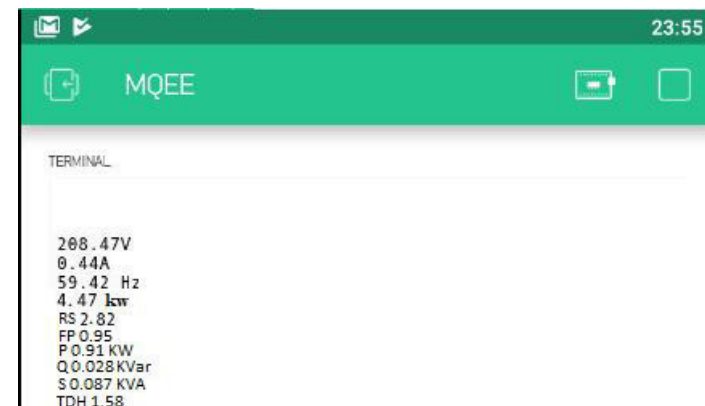
<https://www.bluestacks.com>

Em seguida o **Blynk - IoT for Arduino** pode ser instalado no bluestacks normalmente.

Ao abrir o **Blynk** o usuário precisa utilizar a chave de registro gerada no aplicativo, entre em contato com o fabricante para obter a chave de acesso (seção 8). Caso o medidor não esteja conectado a Internet a mensagem mostrada no aplicativo será:



Ou seja, a última vez que o medidor foi conectado a Internet. Entretanto caso o dispositivo encontre conexão com a Internet automaticamente os resultados serão enviados a cada segundo. A busca por conexão a Internet é constante, entretanto mesmo não existindo conexão o medidor continuará salvando os dados no cartão de memória e mostrando-os normalmente na tela. Se o dispositivo encontrar medição uma sequência de dados será mostrada:



Os resultados são enviados seguindo a ordem de tensão das fases A, B e C. Os dados seguem o padrão em sequência: [Tensão, corrente, frequência, potencia instantânea, consumo em reais, fator de potência, potência ativa, reativa, aparente e taxa de distorção harmônica].

4.5 Leitura das medições através da USB

A leitura das medições pode ser realizada através de uma conexão USB direta a um computador.



Contudo para a leitura das informações é necessário a utilização do software **Energia IDE**. O Software pode ser encontrado para download em:

<https://energia.nu/download/>

A ferramenta monitor serial exibe os resultados de forma sequencial, exatamente como na visualização dos dados na Internet.

```

22_07_copia | Energia 1.8.7E21
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda
[Ícones de Ferramentas]
22_07_copia
//-----E
#include "OneMsTas
#include "arduinoF
#include "Nextion
#include "floatTo
//-----E
#define custo 0.65
#define offsetfreq

//-----PARAMETRO DAS BIBLIOTECAS-----
OneMsTaskTimer_t myTask1 = {1000, flash1, 0, 0};
arduinoFFT FFT = arduinoFFT(); /* Create FFT object */
//-----

```

4.5 Leitura das medições através do cartão de memória

Para visualizar os resultados no cartão de memória o dispositivo deve ser desconectado de todas as fontes de energia e desconectado da bateria de backup, o processo é necessário para o cartão de memória não ser corrompido. Em seguida o cartão pode ser removido com segurança e inserido em qualquer dispositivo com suporte a entrada SD de cartão de memória. O cartão utilizado pelo medidor é o tipo microSD, e deve ser formatado em formato FAT32. Qualquer software com suporte a leitura de arquivos de texto pode ser utilizado, a exemplo do bloco de notas.

5 Dados técnicos

CÓDIGO DO PRODUTO	NM1
Dimensões	186x173,3x78,7mm
Peso com a bateria de backup	985 g
Peso sem a bateria de backup	720 g
Tensão de alimentação	100~240 V AC
Frequência	50~60 Hz
Consumo médio	0,91 W
Máximo valor de tensão nas ponteiros	-500~500 V
Máximo valor de corrente nos sensores	100 A
Autonomia da bateria (sem alimentação)	12 h

6 Avisos e alertas

Status	Aviso/Erro
Sobretensão	3% acima da tensão nominal
Subtensão	9% abaixo da tensão nominal
Sobrefrequencia	3% acima da frequencia nominal
Subfrequencia	3% abaixo da frequencia nominal
Baixo FP	Fator de potência abaixo de 0,92
TDH Alta	Taxa de distorção harmônica acima de 8%

7 Questões ambientais

EMBALAGEM

A New Energy Monitor procura, em seus novos projetos, usar embalagens feitas de materiais recicláveis, cujas partes sejam de fácil separação. Portanto, as peças das embalagens (calços de EPS, sacos plásticos e caixa de papelão) devem ter o seu descarte de maneira consciente, sendo destinadas, preferencialmente, a recicladores.

PRODUTO

Este produto foi construído com materiais que podem ser reciclados e/ou reutilizados. Então, ao se desfazer deste produto, procure companhias especializadas em desmontá-lo corretamente.

DESCARTE

Ao descartar este produto, no final de sua vida útil, solicitamos que seja observada a legislação existente e vigente em sua região, fazendo o descarte da forma mais correta possível.

8 Fale com a New Energy Monitor

Em caso de dúvidas ou de problemas no produto, entre em contato com a Central de Relacionamento New Energy Monitor. Ao ligar, tenha em mãos o número do modelo e o número de série do seu produto. Ambos os números podem ser encontrados na etiqueta, que está localizada na parte inferior do dispositivo, em uma etiqueta com o logotipo da New Energy Monitor. Entre em contato com a Rede de Serviços, através do email abaixo:

gerffeson Almeida@hotmail.com

A New Energy Monitor está à sua disposição para tirar qualquer dúvida, ouvir sua crítica ou sugestão.

new energy monitor