

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
COMPUTAÇÃO APLICADA

MEDIDOR DE ENERGIA ELÉTRICA
POR EVENTOS

Matheus Janio Mella

Passo Fundo
Ano 2019

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA

MEDIDOR DE ENERGIA ELÉTRICA
POR EVENTOS

Matheus Janio Mella

Dissertação apresentada como requisito parcial
à obtenção do grau de Mestre em Computação
Aplicada na Universidade de Passo Fundo.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Schardong Spalding
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Trindade Rebonatto

Passo Fundo
Ano 2019

CIP – Catalogação na Publicação

M524m Mella, Matheus Janio
Medidor de energia elétrica por eventos / Matheus Janio
Mella. – 2019.
83 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Schardong Spalding.
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Trindade Rebonatto.
Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) –
Universidade de Passo Fundo, 2019.


1. Sistemas embarcados (Computadores). 2. Correntes
elétricas. 3. Programas de computador. 4. Medição. I. Spalding,
Luiz Eduardo Schardong, orientador. II. Rebonatto, Marcelo
Trindade, coorientador. III. Título.

CDU: 004.438

**ATA DE DEFESA DO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DO ACADÊMICO**

MATHEUS JANIO MELLA

Aos vinte e oito dias do mês de março do ano de dois mil e dezenove, às 14 horas, realizou-se, no Instituto de Ciências Exatas e Geociências, prédio B5, da Universidade de Passo Fundo, a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso "Medidor de Energia Elétrica por Eventos", de autoria de Matheus Janio Mella, acadêmico do Curso de Mestrado em Computação Aplicada do Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada – PPGCA/UPF. Segundo as informações prestadas pelo Conselho de Pós-Graduação e constantes nos arquivos da Secretaria do PPGCA, o aluno preencheu os requisitos necessários para submeter seu trabalho à avaliação. A banca examinadora foi composta pelos doutores Luiz Eduardo Schardong Spalding, Marcelo Trindade Rebonatto, Ricardo de Oliveira Schmidt e Andréa Teresa Riccio Barbosa. Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, a banca examinadora considerou o candidato APROVADO. Foi concedido o prazo de até quarenta e cinco (45) dias, conforme Regimento do PPGCA, para o acadêmico apresentar ao Conselho de Pós-Graduação o trabalho em sua redação definitiva, a fim de que sejam feitos os encaminhamentos necessários à emissão do Diploma de Mestre em Computação Aplicada. Para constar, foi lavrada a presente ata, que vai assinada pelos membros da banca examinadora e pela Coordenação do PPGCA.




Prof. Dr. Marcelo Trindade Rebonatto - UPF
Presidente da Banca Examinadora
(Coorientador)



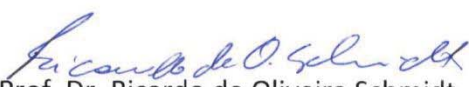
Prof. Dr.ª Andréa Teresa Riccio Barbosa, -
UFMS
(Avaliadora Externa)



Prof. Dr. Luiz Eduardo Schardong Spalding
(Orientador)



Prof. Dr. Rafael Rieder
Coordenador do PPGCA



Prof. Dr. Ricardo de Oliveira Schmidt - UPF
(Avaliador Interno)

MEDIDOR DE ENERGIA ELÉTRICA POR EVENTOS

RESUMO

Os sistemas embarcados realizam diversas funções em diferentes áreas. Entretanto, quando aliados com *software* de alto nível tornam as informações mais simples e fáceis de serem compreendidos e visualizados, seja em um programa de computador ou em um sistema web. A área da medição eletrônica de energia elétrica abre muitos caminhos dos quais não eram possíveis com os sistemas analógicos. No contexto de medição eletrônica embarcada aliada ao uso de *software*, este trabalho propõe desenvolver um medidor de energia elétrica capaz de medir e analisar eventos que são gerados pelo consumo de energia de aparelhos domésticos. A metodologia é baseada no projeto Protegemed, equipamento eletrônico composto de *hardware* e *software*, que detecta e analisa eventos gerados por correntes elétricas, de alimentação e diferencial, dos Equipamentos Eletromédicos. Foi desenvolvido um *software* com interface gráfica utilizando a linguagem de programação Python para receber os eventos de variação de tensão e corrente enviados por um sistema embarcado composto pela placa TM4C129 da *Texas Instrument*. O protótipo composto pelo sistema embarcado e o *software* Python foi validado com testes realizados com um medidor eletrônico de referência da marca ELO e modelo ELO2101L. Os resultados obtidos mostraram que é possível medir a energia elétrica a partir de eventos de variação de corrente, obtendo-se erros abaixo de 5,0% para cálculo da Energia Aparente e abaixo de 3,0% para cálculo da Energia Ativa.

Palavras-chave: Medição eletrônica de energia elétrica, Medição por eventos, Protegemed, TM4C129.

ELECTRONIC POWER METER BY EVENTS

ABSTRACT

Embedded systems are used in different areas, performing various functionalities, and when combined with the proper software, the whole solution makes it simpler to obtain, understand and visualize data. Electronic measurements of electrical energy enable new possibilities that were not possible with analog systems. Within the context of software-based embedded electronic measurements, this work introduces an electrical energy meter that is able to measure and analyze events generated by the energy consumption of domestic devices. Our methodology and start point is the Protegemed project: an electronic device that detects and analyze events from electric power and differential current of electromedical devices. One of our contributions is a software with graphical interface, in Python, that receives events of voltage and current variation captured by an embedded system consisting of a TM4C129 platform from Texas Instrument. We built a prototype of the embedded system and Python software, and validate it with an electrical reference meter of ELO brand and model ELO2101L. Our results show that it is possible to measure the electric energy from events of current variation, with errors as low as 5% for the calculation of Apparent Energy, and as low as 3% for Active Energy.

Keywords: Electronic Measurement of Electrical Energy, Measurement by events, Protegemed, TM4C129.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Protótipo do Protegemed da década de 1990.	14
Figura 2. Uma amostra de várias versões até 2015.	15
Figura 3. Painel Protegemed em 2012.	16
Figura 4. Tipos de medidores eletromecânicos. Adaptado de [8].	18
Figura 5. Tipos de medidores eletrônicos. Adaptado de [13] e [14].	19
Figura 6. Triângulo das Potências. Adaptado de [23]	26
Figura 7. Trecho do código Python da função que calcula valor médio e eficaz.	27
Figura 8. Trecho do código Python da função que calcula P, S, Q e Fator de Potência.	28
Figura 9. Proposta de esquema inicial do projeto.	31
Figura 10. Sensor de corrente [1].	32
Figura 11. Especificações de tensão AC ET-1649 [29].	33
Figura 12. Especificações de corrente AC ET-1649 [29].	33
Figura 13. Especificações de tensão e corrente de ET-3367c [30].	34
Figura 14. Equipamentos utilizados no trabalho. Adaptado de [29], [30] e [31].	35
Figura 15. Placa de desenvolvimento Texas TM4C1294 [32].	36
Figura 16. Parte 1 do fluxograma do FW.	37
Figura 17. Parte 2 do fluxograma do FW.	40
Figura 18. Fluxograma do SW.	41
Figura 19. Evento de transiente de corrente de alimentação.	43
Figura 20. Esquema para teste de comparação de FO entre TM4C129 e Osciloscópio.	45
Figura 21. Esquema de testes de comparação entre medidor de referência e protótipo.	46
Figura 22. Medidor Eletrônico ELO2101L.	47
Figura 23. Maleta de testes do protótipo e medidor de referência.	49
Figura 24. Diagramas dos exemplos simulados no SW PSIM.	50
Figura 25. Circuito do tipo não linear para teste de script Python e PSIM.	51
Figura 26. Captura de FO dos sensores de tensão e corrente pelo osciloscópio.	52
Figura 27. Comparação de FO da tensão e corrente entre TM4C129 e osciloscópio.	53
Figura 28. Esquema para teste dos sensores com amplificador de áudio.	56
Figura 29. FOs dos sensores capturadas por TM4C129 no teste com amplificador de áudio.	58
Figura 30. FOs capturadas por TM4C129 dos sinais predefinidos.	58
Figura 31. Sinais normalizado em amplitude.	61

Figura 32. Sinais de teste normalizados em amplitude e com correção da defasagem.	62
Figura 33. FO com artefato e sem correção da defasagem.....	63
Figura 34. FO com artefato e com correção da defasagem.	64
Figura 35. Estimativa teórica do teste prático.	67
Figura 36. Comparação de PMED e ELO da Tensão do teste 1.	69
Figura 37. Comparação de PMED e ELO da Corrente do teste 3.	70
Figura 38. Comparação de PMED e ELO da Potência Aparente do teste 2.....	70
Figura 39. Comparação de Potência Aparente nos três testes.	71
Figura 40. Comparativo de Energia Aparente Acumulada.....	72
Figura 41. Comparação de PMED e ELO da Potência Aparente do teste 4.....	73
Figura 42. Comparação de PMED e ELO da Potência Aparente do teste 5.....	73
Figura 43. Tabela das capturas do SW.	76
Figura 44. Tela dos detalhes sobre o evento.....	76
Figura 45. Tela dos gráficos de grandezas elétricas calculadas a partir dos eventos.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação dos medidores por tipo. Adaptado de [9].	17
Tabela 2. Comparação entre trabalhos relacionados.	23
Tabela 3. Trabalhos relacionados com Protegemed.	25
Tabela 4. Estrutura da tabela do banco de dados.	43
Tabela 5. Especificações do medidor ELO2101L. Adaptado de [13].	47
Tabela 6. Resultados dos testes: teórico, PSIM e Python.	51
Tabela 7. Resultados dos testes PSIM e Python para circuitos não lineares.	52
Tabela 8. Resultados dos testes osciloscópio e TM4C129.	54
Tabela 9. Comparação dos métodos de deslocamento.	59
Tabela 10. Resultados do teste de similaridade de FO.	62
Tabela 11. Escala de Similaridade entre FO. Adaptado de [4].	63
Tabela 12. Aparelhos utilizados nos testes com cargas definidas.	66
Tabela 13. Resultados dos testes com cargas definidas para PMED e ELO.	68
Tabela 14. Comparação de PMED com ELO dos testes com cargas definidas.	69
Tabela 15. Comparação de PMED com ELO dos testes cargas continuamente variáveis.	74

LISTA DE SIGLAS

A/D - analógico-digital

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANNEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica

CCS – *Code Composer Studio*

CI – Circuito Integrado

DMA – *Direct memory access*

EEM – Equipamento Eletromédico

FO – Forma de Onda

Fs – Frequência de Amostragem

GPS - *Global Positioning System*

GSM - *Global System for Mobile Communications*

HW - *Hardware*

Inmetro - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

IoT - *Internet of Things* (Internet das coisas)

LCD - *Liquid Crystal Display* (display de cristal líquido)

RTOS – *Real Time Operating System* (sistema operacional de tempo real)

SW - *Software*

TC – Transformador de Corrente

TI – *Texas Instrument*

TP – Transformado de Potencial

UART - *Universal Synchronous Receiver/Transmitter*

μC – Microcontrolador

LISTA DE SÍMBOLOS

A – ampere

Hz – hertz

t – tempo (segundos)

V – volt

VA – Potência em volt-ampere

W – Potência em watts

π – Constante com valor aproximado de 3.1415926

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. HISTÓRICO DO PROTEGEMED	14
1.2. MEDIDORES DE ENERGIA	17
1.2.1. Medidores Eletromecânicos	17
1.2.2. Medidores Eletrônicos.....	18
2. TRABALHOS RELACIONADOS	20
3. METODOLOGIA	25
3.1. MÉTODO PARA CÁLCULO DAS POTÊNCIAS	26
3.2. MATERIAIS PARA TESTE DE HARDWARE.....	31
3.3. DESCRIÇÃO DE FIRMWARE E SOFTWARE	35
3.3.1. Firmware utilizado na placa TM4C129.....	35
3.3.2. Software de recepção e análise dos dados.....	40
3.4. COMPARAÇÃO ENTRE OSCILOSCÓPIO E TM4C129	44
3.5. PROJETO DO MEDIDOR DE ENERGIA ELÉTRICA POR EVENTOS	45
4. RESULTADOS.....	50
4.1. COMPARAÇÃO ENTRE SIMULADOR PSIM E SCRIPT PYTHON	50
4.2. VALORES OBTIDOS COM TM4C129 VERSUS OSCILOSCÓPIO	52
4.3. CORREÇÃO DA DEFASAGEM DO SENSOR DE TENSÃO	55
4.4. TESTES DE AMPLIFICADOR DE ÁUDIO VERSUS TM4C129	56
4.4.1. Ajuste dos sensores com relação ao valor do ganho	60
4.4.2. Investigação da deformação do sinal no sensor de tensão.....	60
4.4.3. Discussão dos resultados dos testes entre amplificador de áudio e TM4C129	64
4.5. TESTES DO PMED VERSUS MEDIDOR ELO2101L	65
4.5.1. Testes com cargas definidas	66
4.5.2. Testes com cargas continuamente variáveis.....	72
4.5.3. Discussão dos resultados dos testes entre PMED e Medidor ELO2101L	74
4.6. APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE PMED PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE ENERGIA.....	75
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
5.1. CONTRIBUIÇÕES AO PROTEGEMED	79
5.2. TRABALHOS FUTUROS	80
REFERÊNCIAS	81

1. INTRODUÇÃO

A busca por tecnologias que permitam obter o máximo de informações do sistema elétrico tem como um dos objetivos, a eficiência energética. Já é uma realidade o uso dos chamados medidores inteligentes (*smart meters*) que proporcionam melhorias com alternativas por busca de melhores padrões de consumo de energia elétrica, contribuindo para conscientizar consumidores à utilização da energia de forma mais eficiente, segura e racional.

Um exemplo destes medidores inteligentes é o Protegemed, equipamento eletrônico composto de *hardware e software*, que busca medir e analisar eventos gerados por correntes elétricas, de alimentação e diferencial, dos Equipamentos Eletromédicos (EEM). Este trabalho visa utilizar a mesma metodologia aplicada no Protegemed, entretanto com a proposta de medir e analisar eventos que são gerados pelo consumo de energia de aparelhos domésticos, sendo também possível a aplicação para EEM.

Atualmente, o Protegemed não realiza a medição da potência dos EEM monitorados e tão pouco o consumo de energia. Na versão 2018 do Protegemed, foram inseridos sensores para o monitoramento da tensão da rede que alimenta os painéis elétricos de tomadas da sala de cirurgia, permitindo, assim, calcular a potência elétrica em funcionamento de um EEM e medir o consumo de energia de todos os EEM utilizados durante um procedimento cirúrgico.

De maneira indireta, uma solução ou aperfeiçoamento do Protegemed implicará em um outro produto que pode ser caracterizado como um medidor eletrônico de energia, que utiliza toda base já formalizada do Protegemed com a introdução das ferramentas para calcular a energia consumida.

O objetivo geral deste trabalho é avaliar uma adaptação do método e verificar se este é capaz de mensurar o consumo de energia elétrica a partir dos eventos gerados pelas grandezas monitoradas, como a tensão e a corrente.

Os objetivos específicos são: a) utilizar a plataforma do Protegemed definida no trabalho de [1] e ter como base o *hardware* utilizado no trabalho de [2]; b) utilizar a linguagem de programação Python para criação do *software* e banco de dados para armazenar os eventos; c) criar um protótipo para validar o estudo realizado na forma de medir o consumo de energia elétrica via *firmware e software* e comparar os resultados com um medidor eletrônico de referência.

O trabalho apresenta na seção 1.1 um histórico do Protegemed com o intuito de contextualizar de maneira geral as diversas versões e a trajetória até chegar na versão que utiliza

a plataforma TM4C129 da Texas Instrument, que também é utilizada nesse trabalho. Na seção 1.2 são contextualizados os tipos de medidores de energia elétrica. O capítulo 2 apresenta os trabalhos relacionados com foco em medidores de energia elétrica, realizando no final uma comparação entre os trabalhos pesquisados com o aqui proposto. O capítulo 3 descreve a metodologia desenvolvida, com base no Protegemed, para calcular a energia elétrica. No capítulo 4 são apresentados os resultados baseados na metodologia com uma série de teste de validação e comparações. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

1.1. HISTÓRICO DO PROTEGEMED

O Protegemed é uma plataforma computacional, composta de *hardware e software*, que tem o propósito de medir e analisar as correntes elétricas, de alimentação e diferencial, dos Equipamentos Eletromédicos. A primeira versão possuía somente *hardware* e foi desenvolvida na década de 1990. Pode-se ver na Figura 1 o protótipo que foi utilizado para fazer pesquisa e avaliar o mercado em hospitais do Rio Grande do Sul. Na época, os pesquisadores envolvidos decidiram continuar melhorar o produto, pois a pesquisa apontou que este produto não seria utilizado nos hospitais.



Figura 1. Protótipo do Protegemed da década de 1990.

A primeira versão possuía um LED vermelho que piscava, sinalizando que havia uma diferença de valor da corrente entre os dois condutores de alimentação. Também havia um pequeno sinalizador sonoro intermitente com a mesma finalidade. A pesquisa de mercado resultou na necessidade de evoluir para um produto mais complexo e capaz de produzir mais informações ao engenheiro clínico. A utilização prevista para esta versão era a detecção de problemas nos Equipamentos Eletromédicos que pudessem colocar em risco os pacientes durante um procedimento cirúrgico. Se alguma corrente diferencial fosse detectada, esta corrente poderia estar circulando pelo paciente, podendo provocar danos ao paciente podendo provocar até parada do coração. O trabalho [3] mostra com detalhes os experimentos que levaram à conclusão de que era possível ocorrer estes eventos de risco, embora muito raros. Para os testes de 2009, a inclusão de *software* de banco de dados e cálculos de transformada de Fourier foram fundamentais.

Nos anos que se seguiram, outras versões foram sendo desenvolvidas, fruto do investimento do Hospital São Vicente de Paulo de Passo Fundo, de uma empresa do setor e de várias agências de apoio ao empreendedor, como Sebrae, Instituto Euvaldo Lodi e Finep, assim como de fomento à pesquisa, como Fapergs, CNPq e Capes. A Figura 2 mostra as várias versões desenvolvidas até 2016.



Figura 2. Uma amostra de várias versões até 2015.

A versão de 2012, baseada na plataforma Mbed, Figura 3, já possuía *firmware* e *software* capazes de realizarem a detecção de periculosidade ao paciente, classificando o grau do risco em: Perigo, Atenção e Normal [4].

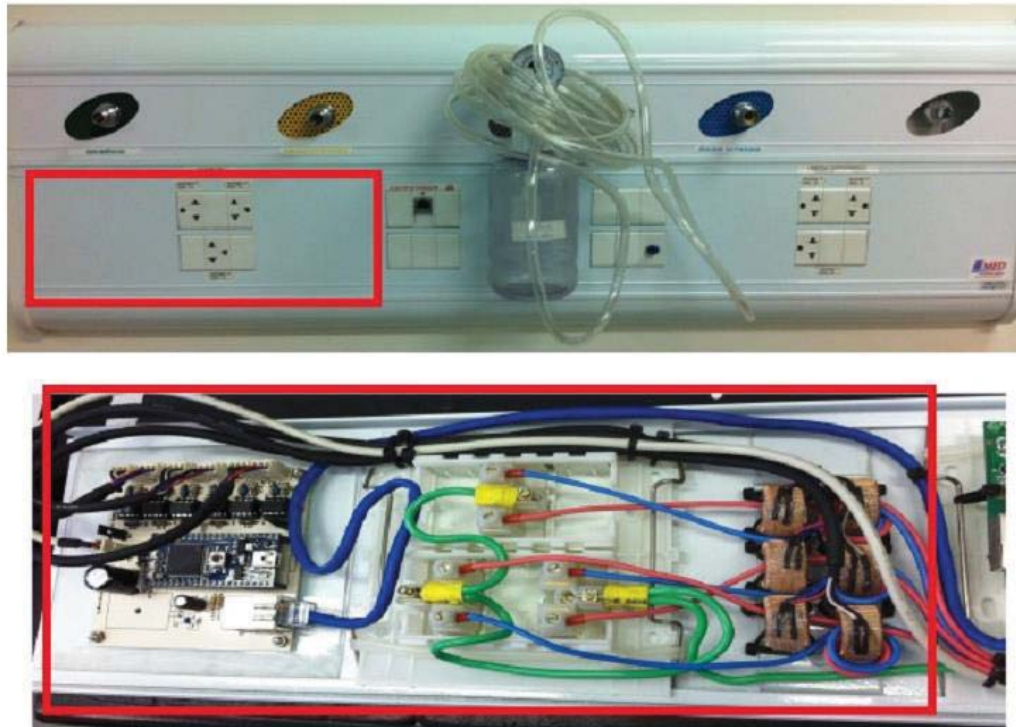


Figura 3. Painel Protegemed em 2012.

No ano de 2017, foi concluído o trabalho de [1]. Uma nova plataforma foi definida utilizando um microcontrolador da família ARM Cortex-M4F TM4C. Para os testes, foi utilizado um kit de desenvolvimento TM4C129 (EK-TM4C1294XL). Diversas foram as melhorias alcançadas com essa nova plataforma, entre elas: atualização remota de *firmware*, vinte canais analógicos, maior quantidade de memória RAM e FLASH, poder de processamento com ARM Cortex-M4F, entre outros [1].

No ano de 2018, foi concluído o trabalho de [2], sendo utilizada e modificada a plataforma do Protegemed de 2018 para ser possível a captura de dez ciclos das formas de onda da tensão, corrente de alimentação, diferencial e de aterramento. O propósito do trabalho foi desenvolver um método para capturas de Forma de Onda (FO) da corrente elétrica visando a detecção da degradação de isolamento em EEMs. Foi desenvolvido um protótipo baseado no Protegemed para o estudo do caso. Por fim, esse protótipo serviu como base para o desenvolvimento desse trabalho.

1.2. MEDIDORES DE ENERGIA

Durante as pesquisas sobre trabalhos relacionados, em que se focou no tema: medição de energia, verificou-se que muitos descrevem um histórico sobre os medidores de energia no Brasil [5], [6], [7] e [8]. Os medidores se dividem em dois tipos: eletromecânicos e eletrônicos. A Tabela 1, traz informações relevantes sobre o parque de medição nacional no Brasil levantado no ano de 2009.

Tabela 1. Classificação dos medidores por tipo. Adaptado de [9].

Região Geográfica	Tipo de medidor	
	Eletromecânico	Eletrônico
Norte	79,09%	20,91%
Nordeste	88,27%	11,73%
Centro-Oeste	96,11%	3,89%
Sudeste	94,60%	5,40%
Sul	97,38%	2,62%
BRASIL	92,61%	7,39%

Embora a referência da Tabela 1 seja do ano de 2009, nota-se a grande disparidade percentual no Brasil quanto ao uso de medidores eletrônicos. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [9] novos sistemas de medição estão sendo instalados, devido ao desenvolvimento de novas tecnologias de informação e meios de comunicação.

A seguir, foram brevemente descritos os dois tipos de medidores como forma de contextualização com o tema e indicativos de aproximação e relação com o protótipo que foi desenvolvido nesse trabalho.

1.2.1. Medidores Eletromecânicos

Esse tipo de medidor funciona pelo princípio da indução eletromagnética, através de bobinas que medem a tensão e corrente. É uma tecnologia consolidada, robusta e confiável. Para uso de consumidores residenciais, eles registram apenas a informação da energia ativa consumida na escala de quilowatt-hora (kWh) [5], [7]. Podem conter mostradores do tipo ponteiros, ciclométricos e alguns modelos contam com *displays* eletrônicos para mostrar a contagem de energia. Na Figura 4 são mostrados dois tipos de medidores eletromecânicos.



Figura 4. Tipos de medidores eletromecânicos. Adaptado de [8].

1.2.2. Medidores Eletrônicos

Esse tipo de medidor utiliza o princípio da amostragem digital. Transdutores e circuitos condicionadores de sinais realizam a medida da tensão e da corrente [10]. Após a digitalização das grandezas elétricas, um processamento de dados é realizado e diversas informações podem ser calculadas. Isso dependerá do propósito do medidor eletrônico. Em [11] foi comentado sobre a diferenciação de medidores eletrônicos e os chamados *smart meters*, medidores inteligentes, onde se ressalta que todo medidor inteligente é eletrônico, mas nem todo medidor eletrônico é inteligente.

Medidores inteligentes partem do princípio de estarem relacionados com redes inteligentes, as chamadas *smart grids*, onde diversas informações são gerenciadas em prol da eficiência energética e modernização dos processos que antes não eram possíveis com os medidores eletromecânicos. Sendo assim, não basta somente instalar medidores inteligentes se o sistema como um todo não está preparado para administrar todo potencial que um medidor inteligente oferece. O presente trabalho não visa adentrar no contexto de *smart grids* e *smart meters*, ficando como sugestão o primeiro relatório oficial publicado em 2010 sobre *smart grids* no cenário brasileiro [12].

Na Figura 5, são demonstrados dois modelos de medidores eletrônicos, sendo (a) um modelo simples eletrônico da marca ELO, modelo ELO2101L e (b) um do tipo medidor inteligente da marca WEG, modelo SMW 100.



Figura 5. Tipos de medidores eletrônicos. Adaptado de [13] e [14].

O medidor da Figura 5 (a) foi utilizado como referência para os testes comparativos neste trabalho. No capítulo três, são descritas suas características. Como fundamentação teórica sobre o modelo utilizado, pesquisou-se informações em âmbito geral sobre o tipo de classe do medidor, visto que nas informações visuais do produto consta que é Classe B. Conforme o manual do produto [13], a classe de exatidão para a energia ativa é classe B, de acordo com o Regulamento Técnico Mercosul - RTM (portaria 431 de 04/12/2007), do INMETRO. Este documento considera a necessidade de implementar o controle metrológico dos medidores de energia elétrica ativa e/ou reativa, monofásicos e polifásicos, baseados em tecnologia eletrônica. São apontados quatro classes, definidas por D (0,2%), C (0,5%), B (1,0%) e A (2,0%) que indicam a exatidão do medidor [15].

Outro fato interessante envolvendo os medidores eletrônicos é abordado no trabalho de [16]. Nesse trabalho, um estudo sobre a adesão à Tarifa Branca é realizado, sendo esta uma nova modalidade tarifária da ANEEL, na qual se faz uso dos medidores eletrônicos que realizam a medição por horários de consumo. No final do mês, os dados armazenados no medidor servem de base para cálculo da energia consumida, mostrando a importância e necessidade desse tipo de medidor.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

Se tratando do tema de medidores eletrônicos, foram analisadas pesquisas que proporcionam soluções para medição eletrônica. Considerando que protótipos foram construídos para fins de comparação e demonstração de metodologias adotadas para medição de energia, as referidas pesquisas subsidiam o presente trabalho, contribuindo com informações gerais e específicas. O trabalho compreende a análise de oito pesquisas. O trabalho de [8] utilizou dois microcontroladores (μC). O primeiro é um MSP430F2013, responsável pela amostragem dos sinais de tensão e corrente da rede elétrica a uma frequência de amostragem de 3.840 Hz por canal, totalizando 64 amostras com resolução de 16 bits do conversor analógico-digital (A/D). O segundo μC , MSP430G2955, recebe os dados do primeiro e realiza o armazenamento em uma memória do tipo FLASH SPI e exibe informações em um display *Liquid Crystal Display* (LCD). Um *software* foi desenvolvido para *download* dos dados armazenados e visualização do comportamento de consumo durante o período coletado. A medição da tensão é realizada através de um divisor resistivo e o sensor de corrente é do tipo *shunt*, via resistor em série com a carga. São realizados testes de comparação com um medidor de referência. O cálculo da energia é realizado no sistema embarcado e o usuário escolhe o intervalo de coleta e armazenamento dos dados.

O trabalho de [17] utilizou um circuito integrado (CI) específico para medição de energia, da marca Teridian de modelo 71M6515H. Esse CI possui conversor A/D de 21 bits de resolução com uma frequência de amostragem de 2.520 Hz. Através de uma conexão *Universal Synchronous Receiver/Transmitter* (UART) do CI, foi realizada a transferência dos dados calculados para um μC de modelo ATMEGA324P. Nesse microcontrolador, conectado também, através de outra conexão serial UART, um módulo WiFly RN-171 que enviou os dados para um computador. No computador, foi executado o *software* Phpmyadmin, sendo esse um cliente de Banco de dados com interface Web, onde os dados foram armazenados e visualizados. Uma comparação foi realizada com um analisador de potência Chauvin Arnoux C.A 8332B. O sensor de tensão foi do tipo transformador de potencial (TP) e o sensor de corrente foi do tipo transformador de corrente (TC). Nos testes de comparação o intervalo de coleta e armazenamento dos dados foi de 1 segundo.

O trabalho de [16] utilizou um CI específico para medição de energia de modelo ADE7753 da Analog Devices, composto por dois conversores A/D de 16 bits de resolução. A frequência de amostragem utilizada não foi encontrada, mas, segundo o *datasheet* do CI, pode

ser de até 27,9 kHz. Através de uma conexão serial UART, foi realizada a comunicação com um Arduino UNO que recebeu os dados e transmitiu, via Wi-Fi para uma placa de modelo ESP8266, comunicando-se assim com a plataforma de *Internet of Things* (IoT) de nome ThingSpeak sendo apresentadas as informações recebidas do CI. O sensor de tensão foi um divisor resistivo e o sensor de corrente foi do tipo TC. Um analisador de energia de modelo AE-200 foi utilizado para testes de calibração e verificação de precisão. O período de envio dos dados para a plataforma ThingSpeak ficou definido em 1 minuto.

No trabalho de [7], também foi utilizado o CI ADE7753 interligado com um Arduino UNO, comunicando-se com diversos módulos como Global Positioning System (GPS), Global System for Mobile Communications (GSM), e placa Wi-Fi. Os dados processados foram enviado para uma plataforma de IoT chamada de Xively, similar a ThingSpeak utilizada em [16]. O sensor de tensão foi do tipo TP e o sensor de corrente foi do tipo TC. Testes de calibração e medição foram feitos com multímetros e amperímetros de referência.

O trabalho de [18] utilizou um μC MSP430AFE253 que possui três conversores A/D sigma-delta independentes, de 24 bits de resolução. A frequência de amostragem utilizada foi de 3,84 kHz, resultando em 64 amostras por ciclo de 60 Hz. Esse μC faz parte de um kit de desenvolvimento da Texas Instrument, o MSP-EXP430G2, possuindo uma interface serial-usb para conexão com o computador. Os dados capturados pelo μC foram enviados para o computador, processados e visualizados em um programa construído com o ambiente LabVIEW. O sensor de tensão foi do tipo TP e o sensor de corrente foi do tipo TC. O objetivo foi a identificação de cargas a partir de assinatura de cargas. Foram coletados dados de diversas capturas de eventos de LIGA para definir padrões, assim chamadas de assinaturas, com base em diversas grandezas calculadas como, por exemplo, a potência ativa.

O trabalho de [19] realizou uma pesquisa sobre micromedidores inteligentes de energia, os chamados *smart plugs*, onde normalmente são ligados diretamente nas tomadas e monitoram um aparelho de interesse. Foi construído também um protótipo com o mesmo propósito. Dois μC MSP430F6736 da Texas Instruments foram utilizados. O primeiro μC para aquisição de dados com conversor A/D de 24 bits de resolução e frequência de amostragem de 4.096 Hz. O segundo μC recebeu os dados convertidos pelo primeiro através de uma comunicação infravermelho. Os dados foram armazenados em uma memória do tipo SD, onde posteriormente um computador com um *software* foi capaz de realizar as leituras e gerar os gráficos e relatórios de consumo. O *software* foi criado em ambiente LabVIEW. Foram realizadas comparações entre o protótipo construído e um medidor comercial HS110 da TP-

LINK. O sensor de tensão foi do tipo TP e o sensor de corrente foi do tipo TC. Nos testes foram utilizados intervalos de coleta e armazenamento dos dados de 15 minutos e 1 minuto.

O trabalho de [20], apresenta um protótipo de um medidor de energia utilizando um Arduino MEGA. O sensor utilizado para medir a corrente foi o mesmo utilizado no Protegemed, do tipo TC, tratando-se de um trabalho do grupo de pesquisa envolvido na plataforma Protegemed. Para medir a tensão, foi utilizado um sensor de corrente diferencial, que também do tipo TC. No entanto, esse sensor mediu a corrente que circulava por um resistor ligado entre os condutores de fase e neutro. Assim, a tensão foi proporcional a essa corrente. Os sinais de tensão e corrente foram convertidos pelo conversor A/D com 10 bits de resolução e frequência de amostragem de 3.840 Hz. Os dados foram processados, e os valores de tensão e corrente comparados com limites predefinidos e caso os valores passem desses limites, eventos eram gerados e enviados para um computador através de um *shield Ethernet*. No computador, foi criado um SW que recebeu os dados e armazenou em um banco de dados, exibindo as informações sobre o consumo com base nos eventos ocorridos. Não foram realizados testes de comparação como medidores de referência, apenas testes de cargas conhecidas e medidas por um multímetro como referência.

Por fim, o trabalho de [21] abordou o tema sobre variações de tensão para redes de baixa tensão. Foi criado um protótipo que também utilizou o CI ADE7753, entretanto não tinha o propósito de medir energia e sim as variações de tensão. O CI ADE7753 permite que sejam configurados parâmetros de limites máximos e mínimos para a detecção de eventos com base no valor nominal da tensão da rede. De forma similar a outros trabalhos, o CI se comunicou via conexão serial com um Arduino UNO. Uma plataforma Proxy IP que contém um roteador WIFI recebeu os dados e mandou para uma interface Web. Esse trabalho não teve relação com medidores de energia, mas foi escolhido uma vez que tem por objetivo registrar eventos. A Tabela 2 apresenta um levantamento com base nos trabalhos estudados, considerando algumas características, tais como: plataforma utilizada; resolução do conversor A/D em bits; frequência de amostragem em hertz (Hz); número de amostras por ciclo de 60 Hz; tipo de sensor utilizado para corrente (Sensor I); tipo de sensor utilizado para tensão (Sensor V); e se alguma comparação com um medidor eletrônico de energia ou analisador de energia foi realizada. A última linha da referida tabela diz respeito ao presente trabalho.

Tabela 2. Comparação entre trabalhos relacionados.

Trabalhos:	Plataforma	Bits ADC	Fs (Hz)	Amostras	Sensor I	Sensor V	Comparação
[20]	Arduino MEGA	10	3840	64	TC	TC	*
[8]	MSP430F2013 + MSP430G2955	16	3840	64	R	R	SIM
[17]	CI 71M6515H + ATMEGA324P	21	2520	42	TC	TP	SIM
[16]	CI ADE7753 + Arduino UNO	16	***	***	TC	R	SIM
[7]	CI ADE7753 + Arduino UNO	16	***	***	TC	TP	*
[18]	MSP430AFE253	24	3840	64	TC	TP	**
[19]	2x MSP430F6736	24	4096	68	TC	TP	SIM
Este trabalho	TM4C129	12	15360	256	TC	TC	SIM

Notas: * Realizado comparações com multímetros.

** Não foi o foco do trabalho.

*** Valores não encontrados.

OBS: TC = Transformador de corrente, TP = Transformador de potencial e R = resistivo. Fs = frequência de amostragem

Para fins complementares com relação as informações da Tabela 2, no documento da ANEEL em [9], encontraram-se informações nas quais as grandezas elétricas básicas, tensão e corrente, devem ser medidas através de conversor A/D, com, no mínimo, 6 entradas independentes, amostragem sincronizada a uma taxa de, pelo menos, 1kHz e resolução de 16 bits. As entradas devem ser convertidas por transdutores apropriados para a faixa de medição do conversor A/D e para a exatidão pretendida para o processo de medição. Em um outro documento da ANEEL [22] referente a qualidade de energia elétrica, relatou que os equipamentos de medição devem atender aos requisitos mínimos: frequência de amostragem de 16 amostras/ciclo (960 Hz), conversor A/D de sinal de tensão de 12 bits de resolução e precisão de até 1% da leitura.

A partir destas considerações, o presente trabalho parte da seguinte afirmação: quanto maior a frequência de amostragem e resolução do conversor A/D, melhor será a qualidade e precisão dos resultados calculados. No entanto, este fator irá depender do tipo de aplicação ou, então, se exige as regulamentações mínimas da norma e, por fim, se o uso será ou

não para tarifação. Contudo essa tabela não foi criada para definir quem é o melhor ou pior, mas para expor as inúmeras possibilidades que podem ser utilizadas no tema abordado.

Quanto aos tipos de sensores utilizados, nota-se que a maioria utilizou TC para corrente e TP para tensão, visto que são as melhores opções no quesito isolamento da rede, ou seja, são modelos não intrusivos.

Todos os trabalhos pesquisados e incluído o desta dissertação, utilizaram recursos de *software* para exibir informações o que confirma a ligação de um sistema embarcado com um computador, dispositivo móvel ou de modo geral um sistema web, ou seja, é uma tendência cada vez maior interligar o *hardware* com o *software*.

Nos trabalhos [8], [17], [16] e [19] é definido um intervalo de coleta e armazenamento dos dados para uma posterior análise, entretanto isto é o principal paradigma na qual se confronta com o tema desta dissertação, visto que se pretende realizar é a medição da energia a partir de eventos gerados e não com base em intervalos de tempo predefinidos. Deve-se levar em consideração que no trabalho de [20] é realizado a medição a partir de eventos, porém devem ser levadas em consideração algumas diferenças tanto de *hardware* e *software*, logo pode-se afirmar que o trabalho desta dissertação vem a ser uma evolução de [20].

3. METODOLOGIA

A metodologia da presente pesquisa tem como base o trabalho de [2], da qual foi realizada uma alteração no *hardware* (HW) e *firmware* (FW) do Protegemed para que fossem capturados 10 ciclos de 60 Hz da FO da corrente elétrica, ao invés de um ciclo da FO, que tem como referência o trabalho anterior [1]. A proposta de [2] foi detectar a degradação dos isolantes elétricos do EEM. Esta opção por coletar 10 FOs proporcionaram mais informações para a referida pesquisa. Estas degradações nos isolantes produzem alterações na FO das correntes de alimentação e diferencial que podem ser detectadas.

Embora o objetivo do presente trabalho seja distinto do trabalho de [2], optou-se por utilizar a mesma base do HW e do SW de [2], propondo as modificações convenientes. No que tange às modificações, o presente trabalho propõe a modificação no *software* (SW), implementado em Python. Esta decisão foi tomada para, no futuro, ser realizada uma comparação entre uma versão do Protegemed implementado em Python, com o atual em Javascript. Como o trabalho ora proposto faz parte de uma sequência de outras pesquisas, a Tabela 3 apresenta uma comparação entre as últimas pesquisas aplicadas ao gerenciamento do risco de uso dos EEM. Além disso, a tabela mostra as principais modificações que foram planejadas e executadas por cada pesquisador para atingir seus objetivos, conforme os dados a seguir:

Tabela 3. Trabalhos relacionados com Protegemed.

	2016/2017 [1]	2017/2018 [2]	2018/2019
Números de ciclos de 60 Hz capturados	1	10	10
Software	JavaScript	HTML+PHP	Python
Objetivos	Ampliar canais de aquisição e outras melhorias no Protegemed	Identificar falhas de isolamento de EEM	Medir consumo de energia dos EEM, por meio da detecção de eventos
Cálculos feitos do FW	Valores eficazes e FFT	Valores eficazes	Valores eficazes, potências e energias
Cálculos feitos do SW	Similaridade	FFT e similaridade	FFT, potências, energia

Com base nas informações apresentadas na Tabela 3, completa-se com as seguintes informações: os três trabalhos utilizaram a plataforma Texas TM4C e as grandezas analógicas

medidas e armazenadas no banco de dados foram: tensão, corrente de alimentação, corrente diferencial e corrente de aterramento. O período de 2018 a 2019 refere-se ao presente trabalho.

Para atingir os objetivos propostos neste trabalho, foram planejadas atividades em uma sequência de três etapas: testes no SW, no FW e HW. A seguir, é apresentado, como isto foi feito.

3.1. MÉTODO PARA CÁLCULO DAS POTÊNCIAS

Os três tipos básicos de cargas elétricas são denominadas: resistiva, onde a tensão e corrente estão em fase; capacitiva, onde a corrente está adiantada com relação a tensão e; indutiva, onde a corrente está atrasada com relação a tensão. Um EEM ou uma instalação elétrica possui uma mistura dessas três cargas, que têm potências e energias associadas a elas. Essas características definem o modo como o triângulo de potências é desenhado, para facilitar a visualização de tipo de potência. Na Figura 6, o triângulo das potências indica três grandezas de interesse da tarifação de energia elétrica: a Potência Ativa (P), Potência Aparente (S) e Potência Reativa (Q). Portanto, é necessário fazer com que o SW em Python seja capaz de calcular essas três potências com base nos dados capturados pelo HW.

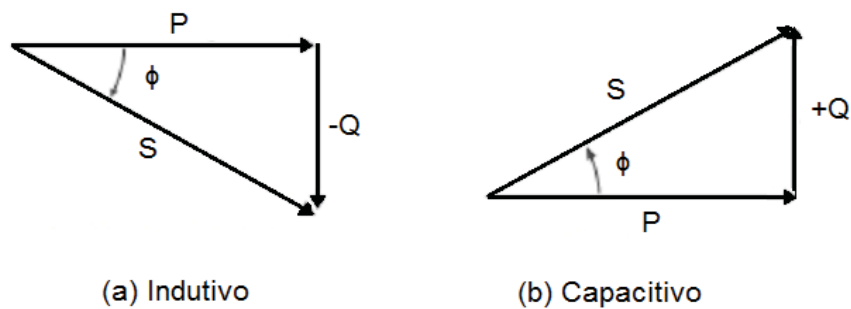


Figura 6. Triângulo das Potências. Adaptado de [23].

A partir de um conjunto de N amostras de um sinal de corrente e tensão, pode-se calcular as grandezas elétricas necessárias para se chegar aos valores das potências ativa, aparente e reativa. As principais informações calculadas foram: valor médio (V_m), valor eficaz (V_{rms}).

As Equações (1) e (2) descrevem o cálculo do valor médio e eficaz respectivamente de um sinal discretizado no tempo. E N é o número de amostras de um período coletado e ‘ v ’ é o vetor de N amostras.

$$V_m = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N v(n) \quad (1)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N v(n)^2} \quad (2)$$

A partir dos dados do vetor $v(n)$, que no código da Figura 7 é denominado “sinal (i)”, os valores médio e eficaz são calculados pelas linhas de código.

```

1. # VALOR MÉDIO
2. somatorio = 0.0
3. for i in range(N):
4.     somatorio += sinal[i]
5. v_m = somatorio/N
6. # VALOR EFICAZ
7. somatorio = 0.0
8. for i in range(N):
9.     somatorio += sinal[i]*sinal[i]
10. v_rms = math.sqrt(somatorio/N)

```

Figura 7. Trecho do código Python da função que calcula valor médio e eficaz.

O trecho do código, implementado em Python, evidenciado na Figura 7 realiza de forma intuitiva o passo a passo das Equações (1) e (2). Com a utilização de funções padrões do Python, pode-se calcular também os valores máximos, mínimos e a diferença entre eles que resulta no valor de pico a pico do sinal.

Na sequência, parte-se para o cálculo das potências, são elas: Potência Ativa (P), Potência Aparente (S) e Potência Reativa (Q), e o valor do Fator de Potência (FP), sendo essa a relação entre a Potência Ativa pela Potência Aparente. A potência, de forma geral, é calculada pela multiplicação da tensão pela corrente elétrica. Fazendo uso da referência [24], obtém-se as três potências expressas na forma discreta, conforme as Equações 3, 4 e 5.

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N V(n) * I(n) \quad (3)$$

$$S = V_{rms} * I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N V(n)^2} * \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N I(n)^2} \quad (4)$$

$$Q = (\sqrt{S^2 - P^2}) \quad (5)$$

$$FP = \frac{P}{S} \quad (6)$$

$$\hat{\text{Angulo}} (\Phi) = \cos^{-1} FP \quad (7)$$

Nas equações (3) e (4), $V(n)$ e $I(n)$ representam os vetores da tensão e da corrente. Da mesma forma, como foi colocado anteriormente, na Figura 8 é mostrado um trecho do código onde são transcritas as equações (3) a (6) para cálculo das Potências Ativa (P), Aparente (S) e Reativa (Q). O cálculo do Fator de Potência (FP) é a razão da Potência Ativa pela Aparente como descrita na equação (6).

Pode-se calcular o Ângulo entre o sinal de tensão e corrente, através da Equação (7) e representado por Φ na Figura 6, sendo válido apenas para sinais puramente senoidais, isto é, sem distorção da tensão e/ou corrente elétrica.

```

1. # VALOR INSTANTÂNEO POTÊNCIA
2. somatorio = 0.0
3. for i in range(N):
4.     somatorio += sinal1[i]*sinal2[i]
5. P = somatorio/N
6. # VALOR EFICAZ POTÊNCIA
7. somatorio1 = 0.0; somatorio2 = 0.0
8. for i in range(N):
9.     somatorio1 += sinal1[i]**2
10.    somatorio2 += sinal2[i]**2
11. S = math.sqrt(somatorio1*somatorio2/N**2)
12. Q = math.sqrt(S**2 - P**2)
13. FP = P/S

```

Figura 8. Trecho do código Python da função que calcula P, S, Q e Fator de Potência.

Com base na Figura 8 linha 4, define-se que ‘sinal1’ e ‘sinal2’ referem-se aos vetores da tensão e da corrente respectivamente. E conforme as nomenclaturas das Equações (3) a (6), onde tem-se P, S, Q e FP correspondem as linhas 5, 11, 12 e 13 respectivamente. Observa-se também que a Potência Ativa (P) é calculada pela multiplicação ponto a ponto dos vetores de tensão e corrente, chamada também de potência instantânea, ou seja, a Potência Ativa é a resultante do somatório de cada potência instantânea, obtidas das amostra de tensão e corrente.

Estas linhas de código em Python precisam ser testadas de alguma forma. Para a pesquisa, foram escolhidas duas, sendo estas: uma comparação com a literatura (cálculos com exemplos de livros didáticos de eletrônica [25]) e outra comparação com os simuladores de circuitos eletrônicos, como o PSIM [26], por exemplo.

O próximo passo, foi partir para uma série de testes e comparações de resultados. E para essa tarefa foi escolhido um *software* muito utilizado para fins de análise de circuitos de potência. O PSIM é um simulador de circuitos eletrônicos, desenvolvido pela Powersim. É uma ferramenta para análise e simulação de diversos tipos de circuitos e possui uma gama de módulos prontos para emulação de dispositivos reais. O PSIM utiliza uma análise nodal e aproximação de integração trapezoidal e fornece uma interface de captura esquemática e visualização gráfica chamado de Simview [27].

Sendo assim, o PSIM foi utilizado como referência para os diversos casos de teste que foram realizados. E o objetivo, foi comparar os resultados dos cálculos de tensão, corrente e potências, calculados pelo PSIM e os programas criados em linguagem Python.

O procedimento dos testes ocorreu a partir de algumas especificações já definidas pela plataforma do Proteged, onde no trabalho de [2] foram relatadas tais mudanças no FW. Dentre as mudanças, pode-se destacar no envio dos dados brutos das amostras dos sensores de corrente, isto é, são enviados dez ciclos de FO e cada ciclo com 256 valores digitalizados, sendo a frequência de amostragem definida em 15.360Hz. Com isso, assumiu-se que os testes realizados para comparação de resultados entre PSIM e scripts Python devem analisar sinais contendo dez ciclos de FO e frequência de amostragem igual ou o mais próxima da utilizada no FW, a fim de se aproximar aos resultados que são calculados no FW.

Os três primeiros testes foram baseados em três exemplos retirados de [25], onde tem-se um circuito resistivo, indutivo e capacitivo, sendo esses do tipo lineares. Os valores teóricos calculados nos exemplos foram anotados e passados para uma tabela, sendo eles Fator de Potência (FP), Potência Ativa (P), Potência Aparente (S) e Potência Reativa (Q) para cada exemplo.

O procedimento para comparação, foi realizado da seguinte forma: tendo o diagrama do circuito via exemplo do livro, esse é criado virtualmente no ambiente PSIM para então ser simulado. Na simulação foi analisado um período de 500ms com um período de amostragem de $6,51e-5s$. Foi gerado um gráfico pela ferramenta Simview e selecionado o período que corresponde aos últimos dez ciclos da simulação, desses dez ciclos foi realizado o cálculo de FP, P, S e Q onde os valores foram transferidos para uma tabela. Através do Simview foi possível extrair os dados da simulação e salvar em um arquivo de texto CSV. Com isso foi possível ler esse arquivo com o script Python para realização dos cálculos de FP, P, S e Q. E da mesma forma os resultados foram passados para uma tabela. Por fim, tem-se os resultados dos três testes: cálculo teórico, PSIM e script Python.

O quarto e quinto teste foram baseados em dois exemplos extraídos do PSIM para circuitos do tipo não lineares. O procedimento foi o mesmo realizado anteriormente para os três primeiros testes, com exceção dos valores teóricos para comparação, apenas resultados do PSIM e script Python.

Para esta primeira versão do SW e HW, o objetivo é avaliar a possibilidade de atingir uma meta de erro de até 5,0% do valor calculado e medido, considerando como padrão um medidor certificado pela ANEEL. Em uma versão posterior, o protótipo terá aperfeiçoamentos em HW e SW para não ultrapassar os erros máximos exigidos pelas normas da ABNT vigentes, considerando como padrões os equipamentos da rede de certificação do Inmetro no Brasil. Desta forma, a busca por medidas com menor erro fica dividida nestas duas etapas: uma realizada nesse trabalho, fixando um método e outra no segundo protótipo, fixando um erro máximo de acordo com a norma vigente. Esta escolha estratégica tem um risco, que não está sendo ignorado, de não ser atingido o erro desejado no segundo protótipo. Esse risco foi assumido conscientemente.

O cálculo do Erro relativo percentual é calculado pela Equação (8), que relaciona uma variável de interesse chamada de V_{medido} para com uma variável de referência, chamada de $V_{referência}$ [28].

$$Erro (\%) = 100 * \left(\frac{V_{medido}}{V_{referência}} - 1 \right) \quad (8)$$

Considerando que os resultados do SW foram satisfatórios, elaborou-se uma metodologia para verificar se o *hardware* está apto para realizar as medidas, com um erro aceitável estipulado.

3.2. MATERIAIS PARA TESTE DE HARDWARE

Com a pesquisa de [1], foi definida a nova plataforma do Protegemed, ganhando-se diversas melhorias em HW e FW em relação a plataforma vigente em 2015. Assim como no trabalho de [2], o trabalho descrito nesse texto também faz uso dessa nova plataforma. Os sensores de corrente também ganham uma nova versão, desenvolvidos pela empresa Elomed, são agora compactos e não dependem de um tipo de HW específico, como nas primeiras versões do Protegemed. Eles agora podem ser adaptados a diversas placas de desenvolvimento e/ou diversos microcontroladores como Arduino(AVR), STM32, ESP32, PIC entre outras.

Como princípio fundamental do Protegemed, os sensores de corrente são utilizados para medir correntes diferenciais e correntes de alimentação, sendo normalmente em escalas de miliamperes, isto é, nas faixas até 3,0 mArms para os diferenciais e correntes de alimentação até 5,0 Arms. Sendo essas faixas compatíveis com a maioria dos EEM. Neste trabalho, se manteve essas faixas de corrente. Para a medição da tensão de alimentação, foi utilizado um resistor, ligado entre fase e neutro e a corrente que passa por ele (na escala de miliamperes) é medida pelo sensor com corrente máxima de 3,0 mArms, igual ao usado para medir corrente diferencial. Na Figura 9 mostra o esquema simplificado do HW utilizado nesse projeto.

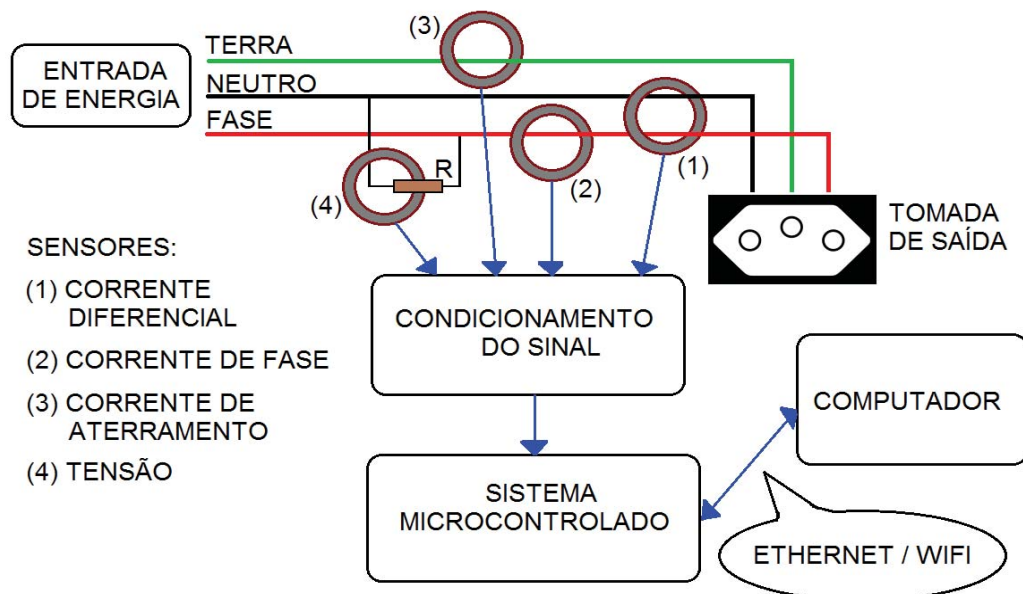


Figura 9. Proposta de esquema inicial do projeto.

Os quatro sensores de corrente são do tipo transformadores de corrente. Os sensores de corrente diferencial e tensão são iguais e a faixa de valores em que são utilizados está entre 1,0 mA e 3,0 mArms, o sensor de corrente de aterramento tem uma faixa de 1,0 até 700 mArms

e o sensor de corrente de alimentação uma faixa entre 1,0 mA até 5,0 Arms. Na Figura 10, em destaque um dos sensores utilizados.

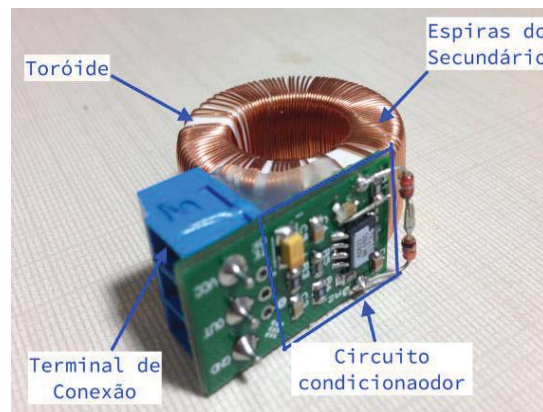


Figura 10. Sensor de corrente [1].

Esses sensores de corrente, fabricado pela empresa Elomed, já possuem um circuito de condicionamento de sinal integrado ao toroide e a tensão de saída está referenciada a tensão de alimentação do sensor, assim, se a alimentação for de 5,0 V a saída excursionará de 0 à 5,0 V (quando a alimentação é de 3,3V a saída irá variar de 0 a 3,3V). Além disso, a saída conta com um filtro analógico passa-baixa de primeira ordem do tipo RC de 4.800Hz. Esse filtro tem finalidade de atenuar ruídos elétricos e de atuar como filtro anti-aliasing [1].

Para realização dos testes com os sensores de corrente foram utilizados três aparelhos para referência, dois multímetros da marca Minipa de modelos ET-1649 e ET-3367c e um osciloscópio Agilent DSO1072B. Ambos os multímetros possuem leitura de valores em True RMS. O ET-3367c é um alicate amperímetro onde o sistema de medição é o mesmo utilizado pelos sensores que foram utilizados no projeto, isto é, ambos são transformadores de corrente. Nas Figuras 11 a 13 são mostradas as especificações relevantes dos multímetros para as medidas de comparação, ajuste e calibração dos sensores.

B. Tensão AC

Faixa	Resolução	Precisão
60mV	0,01mV	±(1%Leit.+3D)
600mV	0,1mV	
6V	1mV	±(0,8%Leit.+3D)
60V	0,01V	
750V	0,1V	
V.F.C 200V ~ 750V	0,1V/1V	±(4%Leit.+3D)

Observações:

- Impedância de entrada: Aprox. 10MΩ.
- Máxima tensão de entrada: 750V RMS.
- Frequência de resposta: 45 ~ 1kHz. V.F.C: 45 ~ 400Hz.
- Valores True RMS são aplicáveis de 5% a 100% da faixa com uma leitura residual de curto-circuito permitida de < 10 dígitos.
- O fator de crista em AC pode ser de até 3,0, exceto em 750V onde pode ser até 1,5.

Figura 11. Especificações de tensão AC ET-1649 [29].

D. Corrente AC

Faixa	Resolução	Precisão
600μA	0,1μA	±(1%Leit.+3D)
6000μA	1μA	
60mA	0,01mA	
600mA	0,1mA	
6A	0,001A	±(1,2%Leit.+3D)
10A	0,01A	

Observações:

- Proteção de Sobrecarga
Entrada para mA: Fusível 0,6A/600V φ6x32mm.
Entrada para 10A: Fusível 10A/250V φ6x25mm.
- Frequência de resposta: 45 ~ 1kHz.
- Exibe o valor em True RMS.
- Valores True RMS são aplicáveis de 5% a 100% da faixa com uma leitura residual de curto-circuito permitida de < 2 dígitos.
- O fator de crista em AC pode ser de até 3,0.

Figura 12. Especificações de corrente AC ET-1649 [29].

Tensão AC (True RMS)

Faixa	Resolução	Precisão
6V	0,001V	±(0,8%+5 dig)
60V	0,01V	
600V	0,1V	
1000V	1V	±(1,0%+5 dig)

Impedância de entrada: Aprox. 10MΩ.

Corrente AC (True RMS)

Faixa	Resolução	Precisão
60A	0,01A	±(2,5%+8 dig)
600A	0,1A	
1000A	1A	

Faixa da frequência para ACA e ACV: 45-65Hz.

Figura 13. Especificações de tensão e corrente de ET-3367c [30].

Observa-se que para a medição da tensão na escala até 600V para ambos os modelos a precisão é de $\pm 0,8\%$ sem levar em consideração o número de dígitos. Para a medição da corrente, leva-se em consideração os limites do sensor que utilizado no projeto que mede até 5,0 A. Para o ET-1649 tem-se a precisão entre $\pm 1,0\%$ e $\pm 1,2\%$, e a precisão do alicate amperímetro ET-3367c é menor, sendo $\pm 2,5\%$, contudo pode-se ler corrente até 1000A sendo que o ET1649 suporta até 10A.

Com o osciloscópio foi possível ver a FO dos sinais de saída dos sensores e realizar uma análise preliminar sobre o funcionamento deles e a realização de comparações com o HW proposto no trabalho. As especificações gerais do osciloscópio são: frequência de amostragem até 1GSa/s, largura de banda de 70MHz, possui dois canais de entrada e memória até 16 kpts [31]. Esse modelo também possui um recurso USB onde foi possível salvar capturas no formato de arquivo de texto CSV, para depois ser analisado nos scripts Python. Na Figura 14 são mostrados os três equipamentos descritos.



Figura 14. Equipamentos utilizados no trabalho. Adaptado de [29], [30] e [31].

3.3. DESCRIÇÃO DE FIRMWARE E SOFTWARE

A seguir na seção 3.3.1 é brevemente contextualizado o kit de desenvolvimento EK-TM4C1294XL e as ferramentas utilizadas para programação do mesmo. Depois é explicado via diagrama de blocos o fluxograma do FW utilizado no trabalho. E na seção 3.3.2 descreve-se sobre o SW criado em Python e todas as suas dependências e da mesma forma no FW, um fluxograma é apresentado para entendimento das etapas do SW.

3.3.1. Firmware utilizado na placa TM4C129

O sistema microcontrolado realiza a aquisição de dados, cálculos matemáticos e interfaceamento com a rede *Ethernet*. O kit de desenvolvimento TM4C1294 (EK-TM4C1294XL) é uma plataforma de avaliação de baixo custo para microcontroladores baseados no ARM Cortex-M4. O TM4C utiliza o μ C TM4C1294NCPDT que possui periféricos *Ethernet*, USB 2.0 (host/device/otg), RTC, PWM, conexões serial (I2C, UART, SPI, CAN), dois conversores analógico-digital (ADC) e módulo de hibernação. O TM4C possui ainda dois botões, quatro LEDs, botões de reset e saída de hibernação. Além disso, é possível a utilização do TM4C em *protoboards* para a rápida montagem de protótipos [32]. Na Figura 15 é apresentada a placa.

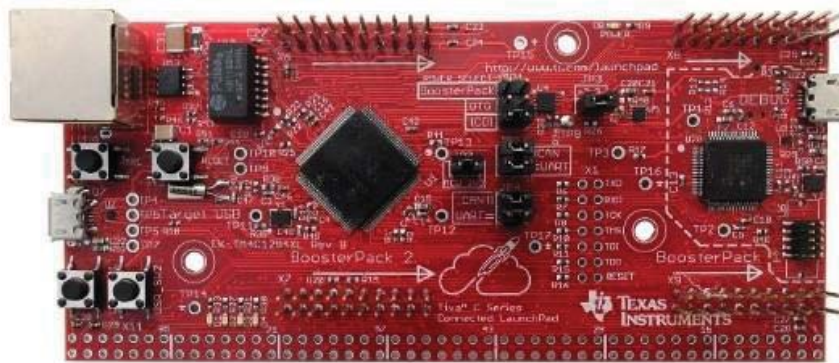


Figura 15. Placa de desenvolvimento Texas TM4C1294 [32].

A porta *Ethernet* integrada na TM4C, facilita sua conexão à *Internet* e a utilização em projetos que envolvem IoT. Através da porta *Ethernet* também é possível a atualização do *firmware* de forma remota, e essa foi uma das implementações na nova versão do Protegemed [1]. O número de canais dos dois ADCs totaliza em 20 entradas analógicas o que é suficiente para a aplicação do Protegemed atual que monitora seis tomadas gerando um total de 12 canais utilizados (seis para corrente de fase e seis para corrente diferencial). Além disso, nessa versão com a placa TM4C foram adicionados dois canais para medir tensão dos painéis e um canal para medida da corrente de aterramento.

Todavia, para o projeto do medidor de energia foram utilizados apenas quatro canais do ADC. Como o objetivo é realizar a medição da energia elétrica, onde essa está atrelada ao cálculo da potência que por sua vez está relacionada com a tensão e corrente, o foco principal foi em medir a tensão e corrente de alimentação. Então, a medição dos sensores de corrente diferencial e corrente de aterramento foram realizadas e salvas, mas para futuras análises.

A programação do FW neste uC pode ser realizada tanto em C quanto em C++, diversos compiladores e ambientes estão disponíveis para a criação do código, inclusive um serviço baseado em nuvem chamado CCS Cloud. Neste trabalho, foi utilizado o *software* disponibilizado pela Texas Instrument, Code Composer Studio (CCS) [33]. Com ele foi possível utilizar a interface de Debug que possibilitou a execução passo a passo do *firmware* desenvolvido. O CCS combina as vantagens da estrutura do *software* Eclipse com recursos de depuração da Texas Instruments, resultando em um ambiente de desenvolvimento convincente e rico em recursos para desenvolvedores incorporados.

Dois detalhes podem ser destacados como os principais recursos na composição do FW, são eles: o uso do recurso de DMA (Direct Memory Access) e sistema operacional de tempo real chamado de TI-RTOS, desenvolvido pela Texas Instrument e que está disponível no

software CCS. O diagrama de blocos mostrado nas Figuras 16 e 17 exibem as principais atividades do FW.

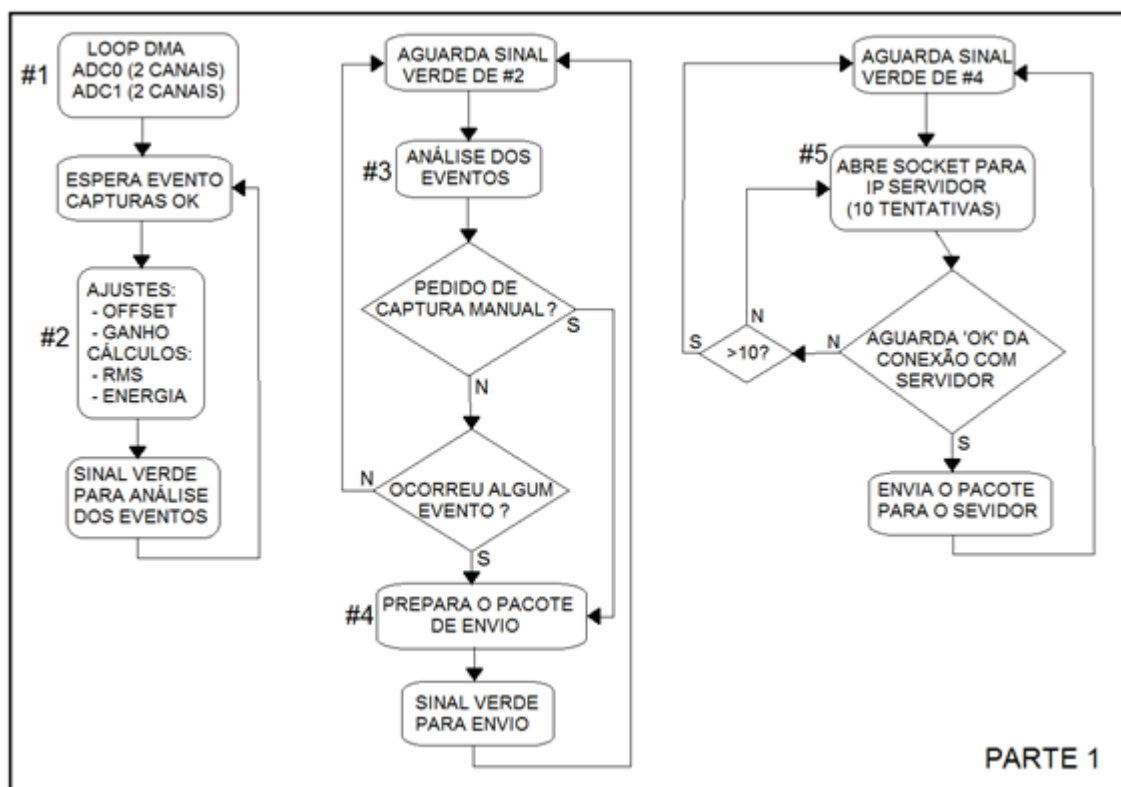


Figura 16. Parte 1 do fluxograma do FW.

Conforme Figura 16, observa-se os seguintes blocos denominados #1 como “LOOP DMA”, #2 como “AJUSTES e CÁLCULOS”, #3 como “ANÁLISE DOS EVENTOS”, #4 como “PREPARA PACOTE DE ENVIO” e #5 como “SOCKET ENVIO PARA SERVIDOR”. Todas essas denominações são referentes a tarefas do TI-RTOS que são executadas sincronizadamente pelo escalonador e a utilização de semáforos. Abaixo são descritas detalhadamente.

LOOP DMA (#1):

Essa parte é responsável por realizar as capturas dos quatro sensores, com a utilização de quatro periféricos da placa TM4C129, que são eles, os dois conversores Analógico para Digital (ADC0 e ADC1), Timer de 32 bits e o Acesso Direto a Memória (DMA). Com relação ao FW utilizado em [2], foram alterados somente a ordem e numeração dos pinos físicos que foram utilizados como entrada analógica. Um detalhe importante é o fato dos sensores que foram utilizados para medição da tensão e corrente de alimentação, estarem cada um em um

ADC, pois como as dois ADCs são ativados ao mesmo tempo¹, garante-se com uma maior aproximação, que ambos os sinais são capturados no mesmo instante e com isso é possível calcular a potência instantânea ativa corretamente.

Esses quatro periféricos se relacionam sincronizadamente com auxílio de interrupções de HW e SW, sendo as de SW manipuladas pelo TI-RTOS. O Timer seta o período de amostragem, isto é, o inverso da frequência de amostragem, já comentada no texto e definida em 15.360Hz. A cada interrupção do Timer quatro canais, dois para cada ADC, são convertidos e salvos em vetores. Os dados salvos nos vetores são passados para outros vetores auxiliares que são comandados automaticamente pelo DMA. Com a utilização de interrupções de *software*, via eventos do TI-RTOS, os dados são, disponibilizados para os cálculos na tarefa #2.

AJUSTES e CÁLCULOS (#2):

Depois dos dados serem disponibilizados nos vetores auxiliares, os mesmos agora podem ser processados. Nessa parte é realizado o ajuste de offset: deslocamento dos dados que antes estavam em uma faixa de 0 a 3,3V para -1,65 a 1,65V. O ajuste de ganho, é responsável por multiplicar o sinal e deixá-lo na faixa real de leitura em Volts, Amperes, miliamperes. Para calcular o valor do ganho é necessária realizar a calibração dos sensores com a utilização de aparelhos de referência, descritos na seção 3.2.

Após realizados os ajustes, calcula-se os valores eficazes (RMS) dos quatro sensores, e conhecendo os valores da tensão e da corrente de alimentação é possível calcular a Potência Aparente. O cálculo da Potência Ativa é realizado pela multiplicação ponto a ponto dos vetores de tensão e corrente de alimentação resultantes após os ajustes. Para cálculo da energia, é utilizada a variável de tempo, que é determinada com base na contagem do Timer, pois não foi utilizado o periférico de Real Time Clock (RTC). Após obter as potências, pode-se calcular as Energias Ativa e Aparente. As energias são salvas em variáveis que incrementam ciclo a ciclo da rede realizando assim a contagem da energia acumulada.

Depois de realizados os cálculos das potências e energias os valores RMS dos quatro sensores são salvos em um vetor global para serem analisados pela próxima tarefa (#3).

ANÁLISE DOS EVENTOS (#3):

Nessa parte é realizada a análise dos eventos. O antigo FW analisava eventos denominados de LIGA e DESLIGA, ou seja somente quando algum aparelho ligava ou

¹ Existe um pequeno intervalo de tempo em cada instrução do FW na função que ativa os ADCs, sendo esse desprezível nos cálculos realizados.

desligava. Um valor fixo era definido como limite, tanto para corrente de alimentação ou corrente diferencial e, caso ocorresse uma mudança e essa fosse maior ou menor que esse limite, um evento era gerado. Para esse trabalho, foi adotada a mesma metodologia, porém o valor limite não é mais fixo e muda conforme o valor atual da leitura dos sensores. Desta forma, é possível gerar eventos de mudança de carga. Quando ocorre esta mudança, um pacote com dados (#4) é preparado para ser enviado ao servidor.

PREPARA PACOTE DE ENVIO (#4):

Nessa parte, é preparado o pacote de dados para enviar ao servidor. Ao ser gerado um evento, é chamada uma função que realiza a montagem de um vetor que conterá os seguintes dados: tipo de evento, contagem de eventos, contagem das energias ativa, reativa e aparente, contagem do tempo e por fim os dez ciclos de cada sensor. Vários dados são de vários tipos, isto é, ponto fixo de 8, 16, 32 bits e ponto flutuante de 32 bits. Foi necessário codificar todo o pacote e organizá-lo em no vetor global do tipo inteiro de 8 bits de largura, compatível com a função que envia os dados via socket TCP. Após realizada a codificação, o vetor está pronto para ser enviado, e essa tarefa é realizada na próxima etapa (#5).

SOCKET ENVIO PARA SERVIDOR (#5):

O modo de envio, não foi modificado com relação ao FW antigo [2]. O envio do pacote codificado na tarefa #4 é enviado para o servidor. Esse servidor, no caso o computador, está ligado via cabo de rede (porta RJ45) na placa TM4C129 através da conexão *Ethernet*. Para este procedimento, é realizada a abertura de um socket no protocolo TCP e, caso haja sucesso na conexão, o pacote é enviado e retorna para esperar um novo sinal de envio.

Acima foram descritas as etapas que executam, tratam e enviam informações da placa para o computador, sendo que o computador é considerado o servidor e a placa um cliente. Entretanto há também a possibilidade contrária, isto é, a placa TM4C129 passa a ser um servidor e o computador um cliente e isso ocorre de modo simultâneo com as etapas descritas anteriormente devido o gerenciamento do sistema operacional TI-RTOS utilizado na programação do FW.

Esta nova etapa contém uma tarefa onde foi criado um servidor socket TCP que fica esperando um conexão, que nesse caso será do computador (cliente). Essa função já existia no FW antigo e as mudanças foram apenas no tipo de requisição que o computador pode fazer. Entre as requisições pode-se fazer: a leitura ou escrita de algum valor específico de ganho,

pedido de atualização de FW via rede e um pedido de captura manual, isto é, não depende da ocorrência de evento. Na Figura 17 é mostrado a PARTE 2 do FW.

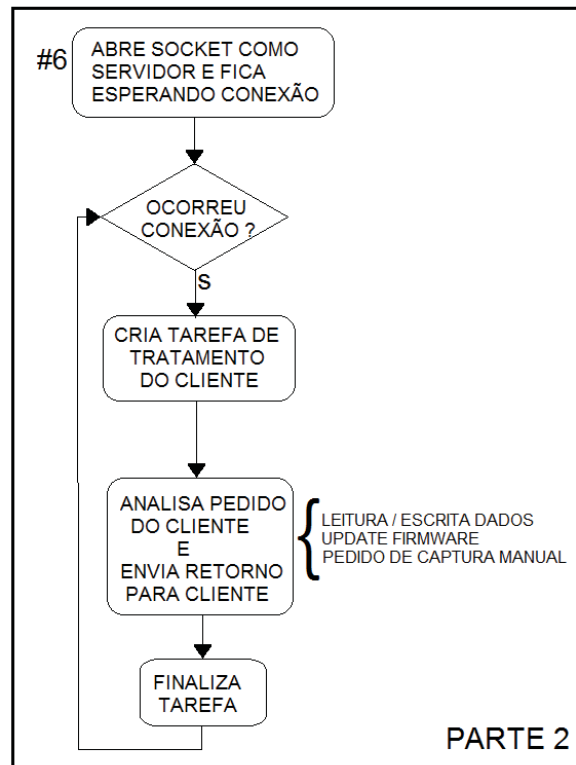


Figura 17. Parte 2 do fluxograma do FW.

Para cada pedido enviado do computador para placa TM4C129, é realizada a chamada de uma função no FW que tratará o pedido e ao final do tratamento há o retorno para o computador, para confirmar o recebimento ou enviar a requisição. Ao finalizar, é fechado o socket e retorna-se ao início da tarefa que fica esperando a próxima conexão com o computador.

3.3.2. Software de recepção e análise dos dados

A atual versão do Protegemed [2] conta com uma interface Web que utiliza os recursos de XAMPP que envolve linguagem PHP, banco de dados MySQL e servidor web Apache. Neste trabalho não foi utilizada a mesma interface. A linguagem de programação escolhida foi Python na versão 3. Na Figura 18 são mostradas as etapas do SW, apesar de visualmente ser mais simples que o FW, demonstrado nas Figuras 16 e 17, a complexidade é bem maior, no contexto de trabalhar com diversos dados para então transformar em informação real para entendimento do usuário.

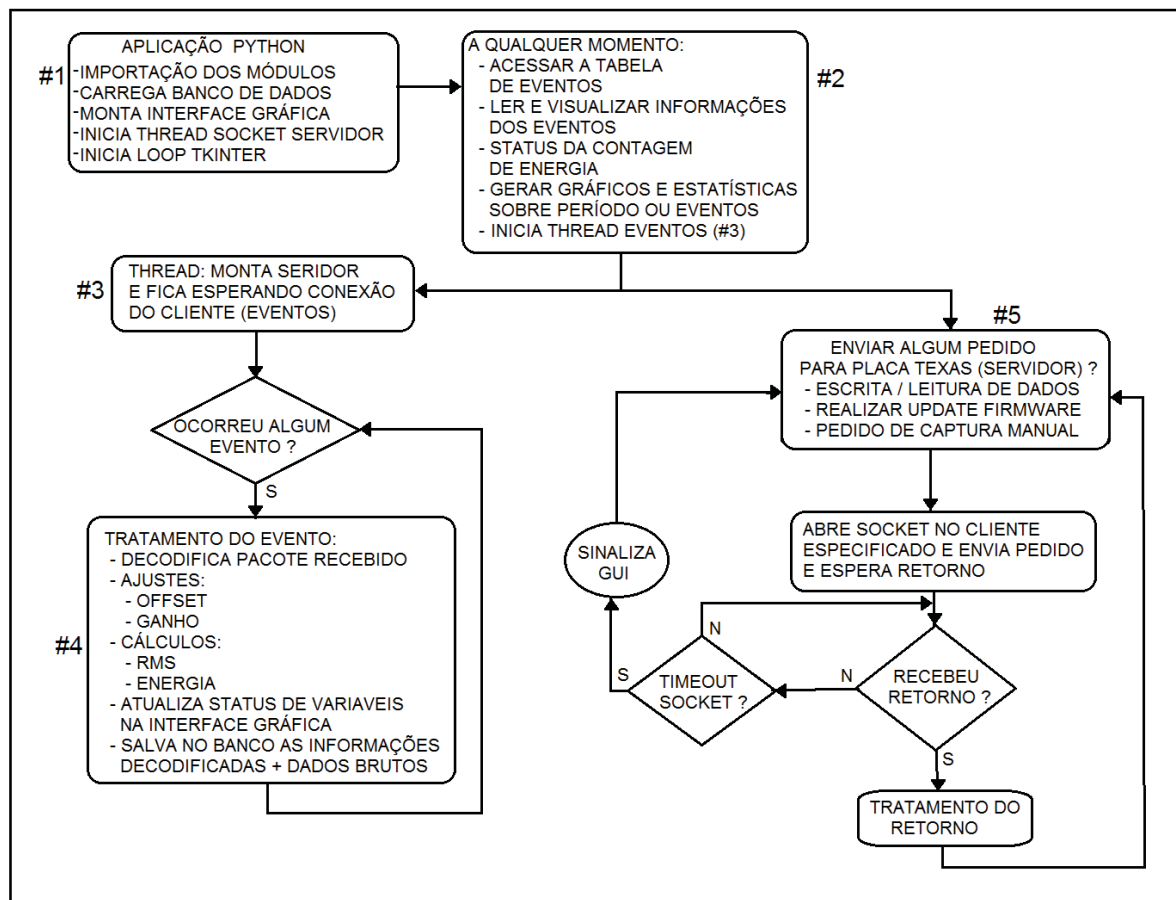


Figura 18. Fluxograma do SW.

Entre os motivos pela escolha da linguagem Python, deve-se ao fato da familiarização e contextualização dela no decorrer do mestrado. Outro motivo se deve ao fato da simplicidade de implementação dos algoritmos e a grande documentação encontrada em livros e na *Internet*. As bibliotecas (módulos na linguagem Python) como, por exemplo, NumPy, Scipy e Matplotlib agregaram eficiência e confiança nas funções e resultados desejados.

Assim como na versão do Protegemed, o uso de um banco de dados é importante pois é possível organizar de forma eficiente e rápida todos os dados. O Python possui nativamente o módulo SQLite3 que é um banco de dados leve e baseado em disco e não precisa de um processo de servidor separado e permite acessar o banco de dados usando uma variante não padrão da linguagem de consulta SQL [34].

A interface gráfica é criada pela biblioteca padrão do Python chamada de Tkinter, que é o pacote GUI (*Graphical User Interface*). É uma fina camada orientada a objetos em cima de Tcl/Tk [34].

Conforme a Figura 18, o bloco identificado por #1 realiza a inicialização de diversas funções como a importação de todos os módulos utilizados no SW, as bibliotecas criadas, o carregamento do banco de dados e a inicialização da interface gráfica.

O bloco identificado por #2 refere-se ao acesso a todas as informações que o SW exhibe, isto é, a interface gráfica cria os diversos elementos gráficos como, por exemplo, uma tabela na qual contém os eventos resgatados do banco de dados permitindo acesso direto a cada um deles além de conter os blocos de status sobre a contagem da energia e os últimos valores recebidos da placa TM4C129. Neste bloco o usuário decide quando iniciar a comunicação com a placa TM4C129 para receber os eventos. Caso essa ação seja tomada, uma *thread* é iniciada e o fluxo desloca-se para o bloco #3.

O bloco identificado por #3 realiza o processamento dos eventos recebidos. É utilizado uma *thread* pois outras funções acontecem em paralelo. Essa *thread* abre um socket em um endereço de IP definido e fica esperando alguma conexão, que no caso, será da placa TM4C129. Estabelecida a conexão o pacote de dados recebido, referente ao enviado na parte #5 do FW (Figura 16), passa para próxima etapa, o bloco #4. Em #4 o pacote é decodificado separando os dados da seguinte forma: tipo de evento, contagem de eventos, contagem das energias ativa, reativa e aparente, contagem do tempo e por fim os dez ciclos de cada sensor, assim como foi explicado em #4 do FW.

Como o vetor possui dez ciclos, pensando em futuras utilizações, foi preciso escolher quantos ciclos seriam utilizados neste trabalho. Optou-se por utilizar dois ciclos, no caso, o nono e o décimo. Esta escolha foi baseada nas observações visuais dos dez ciclos, que evidenciam que estes ciclos, em grande parte das medições, já tem valores estáveis, o que não ocorre nos primeiros ciclos, como mostrado na Figura 19.

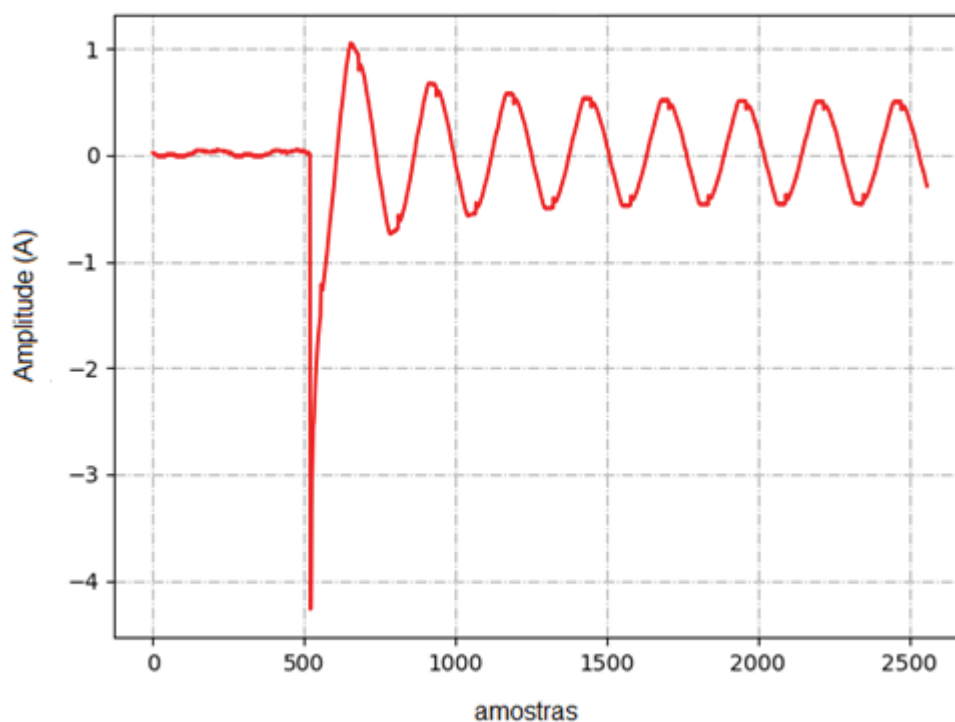


Figura 19. Evento de transiente de corrente de alimentação.

O cálculo dos valores eficazes (RMS) dos dois ciclos escolhidos é atualizado na interface gráfica para visualização do usuário. Após decodificar e realizar os ajustes e cálculos necessários é criado um novo registro que salva no banco de dados. O banco foi estruturado com apenas uma tabela. Na Tabela 4 é mostrado a estrutura da tabela no banco de dados SQLite.

Tabela 4. Estrutura da tabela do banco de dados.

CAPTURAS	(type)
n captura	INTEGER
time_	REAL
event	TEXT
v rms	REAL
i rms	REAL
di rms	REAL
gnd rms	REAL
raw header	BLOB
raw data	BLOB

Conforme a Tabela 4, a variável ‘n_capturas’ é incrementada automaticamente sempre que algum evento é capturado e adicionado no banco. A variável ‘time_’ do tipo REAL, salva o retorno do número float dado pela função time() que está presente no módulo time do

Python, esse número contém a informação do tipo UTC (Coordinated Universal Time -Tempo Universal Coordenado) sendo possível depois resgatar os valores de data, hora, minuto e segundo [35].

A variável ‘event_’ do tipo TEXT, isto é, texto ou string, armazena um curto texto que define se o evento foi de uma mudança de menos para mais, de mais para menos ou se foi um pedido de captura do computador para a placa TM4C129. Até o momento do trabalho foram criadas três mensagens, sendo elas: “EVENT_UP”, “EVENT_DOWN” e “MANDA CAPTURA”.

As variáveis ‘v_rms_’, ‘i_rms_’, ‘di_rms_’ e ‘gnd_rms_’ armazenam em variáveis do tipo REAL, isto é, floats os valores RMS do nono e décimo ciclo (entre os dez recebidos) da tensão da rede, corrente de alimentação, corrente diferencial e corrente de aterramento respectivamente.

As variáveis ‘raw_header’ e ‘raw_data’ armazenam em variáveis do tipo BLOB, que são vetores do tipo bytes, e armazenam os dados brutos codificados onde contém as informações de tipo de evento, contagem de eventos, contagem das energias ativa, reativa e aparente, contagem do tempo e por fim os dez ciclos de cada sensor, da forma “bruta” ou seja como foram enviados pela placa TM4C129 como descrito nas explicações do FW.

Por fim, tem-se a etapa de envio de dados do computador para placa TM4C129 (#5). Dentre as possibilidades estão: fazer a leitura ou escrita de algum valor específico de ajuste de ganho, por exemplo, ou pedido de atualização de FW via rede, um pedido captura manual, como já descrito na tarefa #6 do FW (Figura 17).

O que deve ficar claro depois das explicações do FW e SW é que em ambos os sistemas, a energia é calculada, sendo que no FW é realizada em tempo real, isto é, ciclo por ciclo da rede elétrica e no SW é com base nos eventos recebidos, ou seja, no fim pode-se dizer que SW realiza uma estimativa da medição da energia com base nos eventos.

3.4. COMPARAÇÃO ENTRE OSCILOSCÓPIO E TM4C129

Depois da primeira etapa realizada, que foram os testes com as simulações em PSIM e comparações com exemplos de livros e os scripts Python para cálculo das potências, se faz necessário realizar os testes com os sensores utilizados no trabalho. Seguindo o esquema da Figura 20, foi utilizado uma carga do tipo resistiva, nesse caso uma lâmpada incandescente de 70W. A corrente que circula na lâmpada foi medida pelo sensor de corrente de alimentação e a medição da tensão foi realizada através da corrente proporcional que passa pelo resistor de valor

220k Ω , onde nesse caso resulta em uma corrente de aproximadamente 1,0mA considerando a tensão da rede 220V. A fim de testar os outros dois sensores de corrente diferencial e corrente de aterramento, ambos foram ligados da mesma forma que o sensor que mede a tensão.

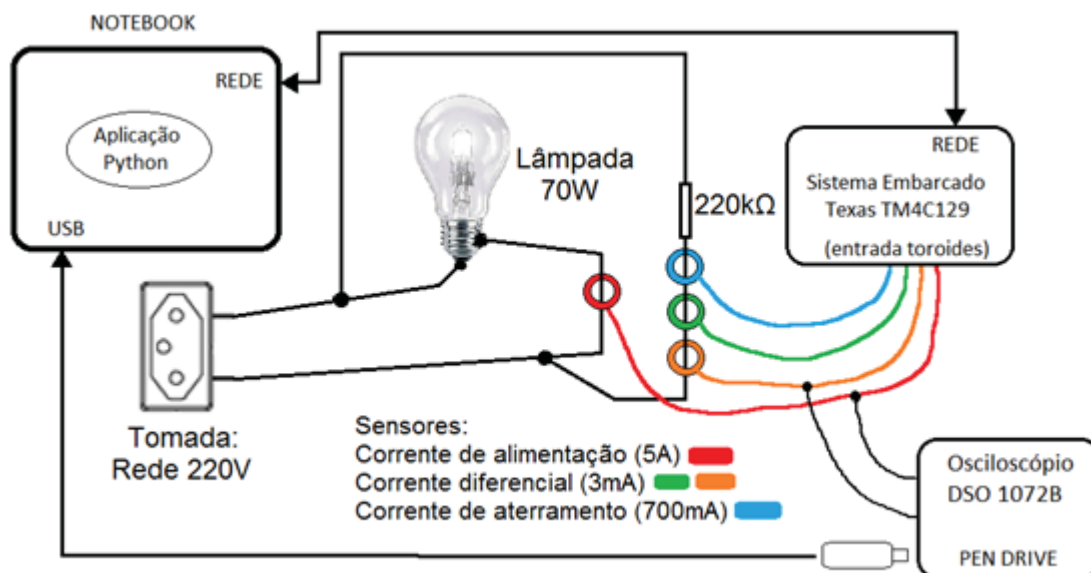


Figura 20. Esquema para teste de comparação de FO entre TM4C129 e Osciloscópio.

O objetivo do teste com o osciloscópio foi realizar uma comparação com as FO capturadas pelo sistema para os quatro sensores, visto que, tem-se uma carga conhecida na saída, isto é, a lâmpada de 70W e a tensão de alimentação é 220Vrms. O procedimento consistiu em: ligar a lâmpada e esperar um tempo até a lâmpada se estabilizar, e depois realizar uma captura dos dez ciclos de todos os sensores e no mesmo momento salvar em pen drive a FO registrada no osciloscópio para os sensores de corrente de alimentação e tensão e depois para os sensores de corrente diferencial e corrente de aterramento.

Com um script Python, criado especialmente para esse propósito, foi possível visualizar e comparar as FOs capturadas pelo osciloscópio com as capturadas pela placa TM4C129. Na comparação de resultados foi aplicado o mesmo teste descrito na seção 3.1.1, entretanto com os dados capturados pela placa TM4C129 e os dados do osciloscópio.

3.5. PROJETO DO MEDIDOR DE ENERGIA ELÉTRICA POR EVENTOS

Nesta seção é descrita a metodologia para comparação da medição de energia elétrica utilizando o protótipo proposto e um medidor eletrônico de energia elétrica, como

referência, para uso doméstico, em rede monofásica. Na Figura 21 é demonstrado o esquema geral do teste.

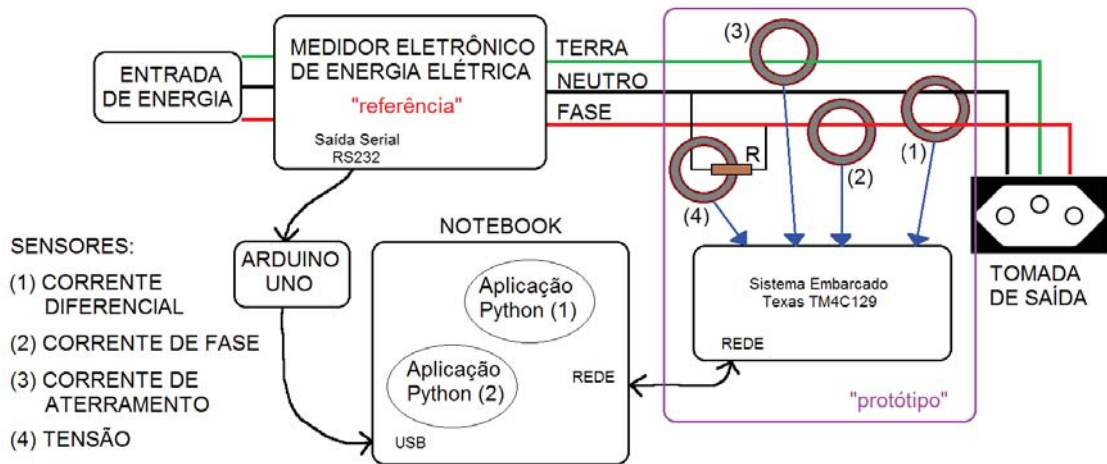


Figura 21. Esquema de testes de comparação entre medidor de referência e protótipo.

Com base na Figura 21, observa-se que o computador, na Figura 21 denominado como NOTEBOOK, realiza duas aplicações ao mesmo tempo. A Aplicação Python (1) refere-se ao SW explicado na seção 3.3.

A Aplicação Python (2) é um script que realiza a leitura de dados enviados pelo medidor de referência. Foi utilizado um Arduino UNO para realizar o interfaceamento entre o recebimento dos dados do medidor de referência e o envio para o computador, ambos via conexão serial. O Arduino recebe as informações do medidor de referência e então processa e envia um pacote de bytes para o computador. No computador esse pacote é decodificado e salvo em um arquivo de texto CSV. Após o período de análise esse arquivo é carregado em outro script que realiza a comparação dos dados do arquivo CSV com os eventos salvos no banco de dados do SW (Aplicação Python 1).

O medidor de referência utilizado no trabalho é do tipo eletrônico de modelo ELO2101L fabricado empresa ELO e distribuído, nesse caso, pela concessionária MUX Energia da cidade de Tapejara – RS. Na Figura 22 é mostrado o modelo utilizado no trabalho.



Figura 22. Medidor Eletrônico ELO2101L.

Uma das vantagens desse modelo é que ele possui uma saída serial, sendo assim possível obter as informações como tensão, corrente, frequência, entre outros. Na Tabela 5 é relacionado as especificações do modelo ELO2101L.

Tabela 5. Especificações do medidor ELO2101L. Adaptado de [13].

Tensão de alimentação:	90 a 280 Vac, 60 Hz
Tensão nominal:	240 Vac, 60 Hz
Corrente nominal (IN):	15A
Corrente máxima contínua:	100A
Frequência nominal:	60Hz
Corrente de partida:	<0,4% da corrente nominal
Classe de exatidão:	Energia ativa, classe B ($\pm 1,0\%$)
Limites exatidão ($\pm 1,0\%$):	0,75A até 100A
Saída Pulso (via led):	1Wh por pulso
Saída Serial RS232 (1seg):	V _{rms} , I _{rms} , freq., inc10Wh

Na Figura 22, nota-se que na parte inferior do medidor encontram-se as conexões da rede elétrica, chamadas de LINHA (entrada) e CARGA (saída) e próximo desses conectores há mais dois, responsáveis pela saída da conexão serial, denominados MTx(+) e Mc(-) como descreve o desenho impresso na caixa do medidor. Nota-se também que existe uma tampa de proteção (acrílico transparente) na qual é fixado o lacre da concessionária após a instalação do medidor. Então fica claro que o consumidor final não tem acesso a conexão serial. Portanto o procedimento realizado no trabalho foi possível pois trata-se um medidor que não está sendo utilizado para fins de tarifação da concessionária, logo não possui o lacre.

Por se tratar de acesso restrito a ações da concessionária e/ou fabricante do medidor, a utilização das informações disponibilizadas pela saída serial não são abertamente informadas, sendo assim, não foram encontradas informações a respeito, tanto no manual do modelo quanto no site do fabricante. Em documentos encontrados na *Internet* e nas próprias normas estabelecidas pela ANEEL, verificou-se que há mais de um padrão ou então protocolo de comunicação. Isso depende do tipo do medidor eletrônicos, e quais as funções ele contabiliza, isto é, existem medidores eletrônicos mais simples, dos quais não possuem conexão serial, somente uma saída de pulso via LED de sinalização até modelos que são chamados de medidores inteligentes, que possuem múltiplas conexões e contabilizam diversas informações.

Após não obter sucesso na busca de informações sobre saída serial do medidor, optou-se por realizar uma engenharia reversa. Com a ajuda do osciloscópio foi possível analisar os sinais e realizar algumas conclusões: os dados disponibilizados pela saída serial do medidor são atualizados a cada segundo, entre os dados, tem-se o número de série do medidor, contagem da energia ativa (a mesma mostrada no *display* digital do medidor), a tensão da rede, a corrente consumida no momento, a frequência da rede, uma variável de incremento que altera seu valor a cada 10Wh entre outras funções que não foram exploradas.

Na Figura 23 é mostrada uma imagem do protótipo construído para o trabalho. Observa-se a analogia com a Figura 21 onde tem-se o Medidor Eletrônico de referência, os quatro sensores, a placa TM4C129 e a tomada de saída da rede elétrica.

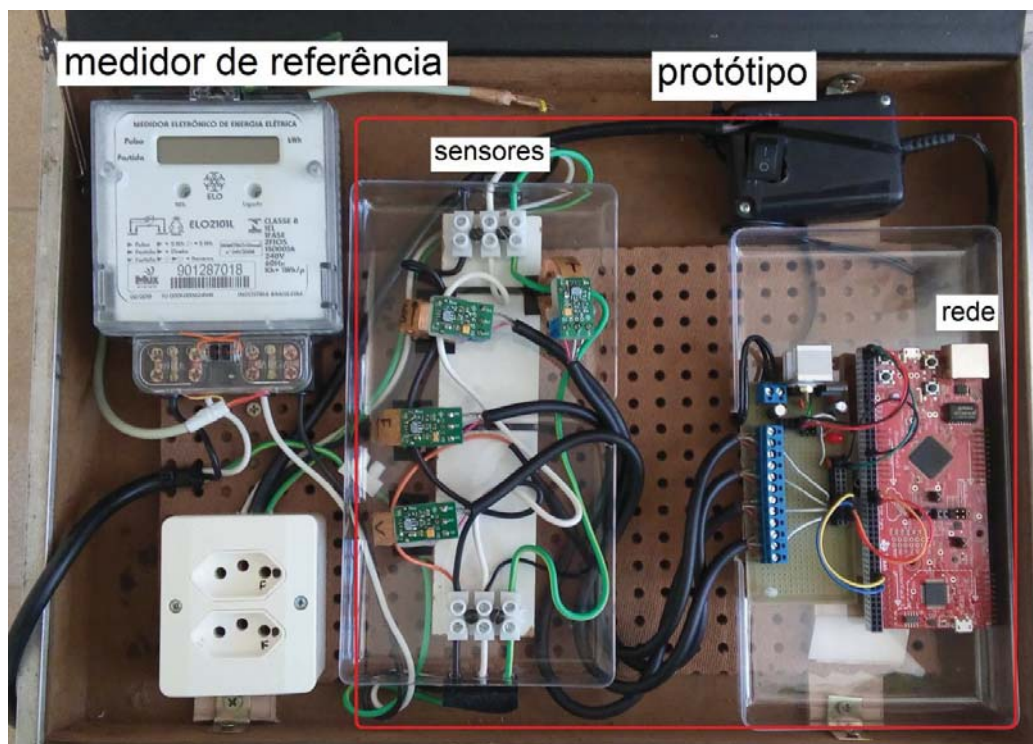


Figura 23. Maleta de testes do protótipo e medidor de referência.

Foram realizados três testes para comparações de resultados. Onde o objetivo é comparar os dados medidos pelo medidor de referência, pelo FW da placa TM4C129 e o SW descrito na seção 3.3. O primeiro teste utiliza quatro aparelhos conhecidos e que possuem características de cargas de modelo ON/OFF, como descrito em [36], são cargas que tem um único estado quando ligadas e elas representam uma grande parte das cargas presentes nas residências. O segundo teste é realizado com um computador desktop que representa cargas de modelo Continuamente Variáveis [36], isto é, podem apresentar durante o funcionamento mudanças significativas de consumo. O terceiro teste utiliza três aparelhos, são eles: um computador portátil (notebook), o computador desktop (utilizado no teste 2) e o ventilador (utilizado no teste 1). De modo geral pode-se dizer que os testes abordaram cargas estáveis e cargas instáveis ou oscilantes.

O foco maior foi no primeiro teste, pois esse foi realizado três vezes, por se tratar de cargas estáveis e conhecidas uma estimativa teórica foi realizada antes do teste acontecer. E por fim foi realizada uma comparação geral entre todos os meios de medição da energia abordados nesse trabalho. No próximo capítulo são relatados e discutidos os procedimentos e resultados obtidos.

4. RESULTADOS

4.1. COMPARAÇÃO ENTRE SIMULADOR PSIM E SCRIPT PYTHON

O objetivo desse teste foi validar a metodologia explicada na seção 3.1. Para isso foi utilizado inicialmente três exemplos extraído de [25]. Na Figura 24 é mostrado o diagrama de cada um dos circuitos que foram simulados pelo *software* PSIM.

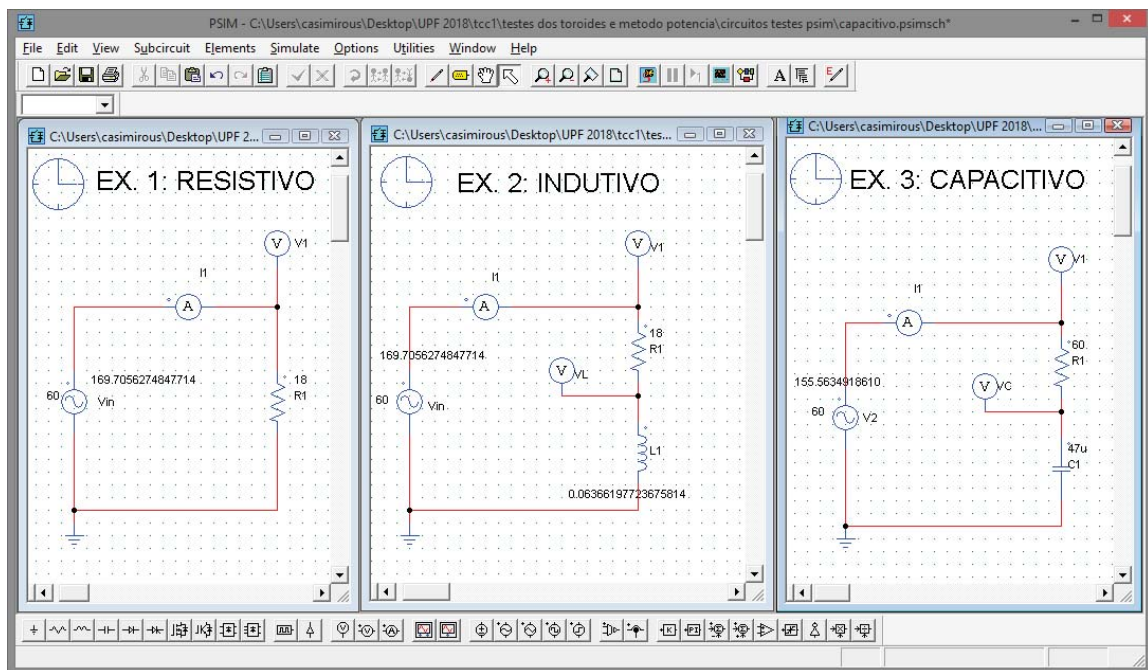


Figura 24. Diagramas dos exemplos simulados no SW PSIM.

Para cada um dos três circuitos foi gerado uma tabela de comparação dos valores de Potências Aparente (S), Potência Ativa (P), Potência Reativa (Q) e Fator de Potência (FP) dos resultados contidos nos exemplos do livro, os gerados pelo PSIM e os calculados pelo script criado em Python. Na Tabela 6 são apresentados os resultados de comparação juntamente com o cálculo de erro.

O objetivo do cálculo dos erros foi para investigar o quanto os resultados do script Python diferem dos resultados encontrados na teoria e no PSIM, Sendo assim, com base na Equação (8), o Erro 1 é a relação do valor calculado pelo Python (V_{medido}) com valor Teórico ($V_{referência}$). O Erro 2 é a relação do valor calculado pelo Python (V_{medido}) com valor calculado por PSIM ($V_{referência}$).

Tabela 6. Resultados dos testes: teórico, PSIM e Python.

TESTES		FP	P (W)	S (VA)	Q (VAr)
Ex. 1 (resistivo)	Teórico (livro)	1,000	800,000	800,000	0,000
	PSIM	1,000	799,739	799,739	0,000
	Python	1,000	800,051	800,051	0,000
	Erro 1 (%)	0,000	0,006	0,006	
	Erro 2 (%)	0,000	0,039	0,039	
Ex. 2 (indutivo)	Teórico (livro)	0,600	288,000	480,000	384,000
	PSIM	0,600	287,890	479,930	383,995
	Python	0,600	288,000	479,996	383,995
	Erro 1 (%)	0,000	0,000	-0,001	-0,001
	Erro 2 (%)	0,000	0,038	0,014	0,000
Ex. 3 (capacitivo)	Teórico (livro)	0,728	106,997	146,894	100,645
	PSIM	0,728	106,991	146,889	100,645
	Python	0,728	107,009	146,902	100,644
	Erro 1 (%)	0,000	0,011	0,006	-0,001
	Erro 2 (%)	0,000	0,017	0,009	-0,001

Os próximos resultados referem-se aos testes com circuitos do tipo não lineares, onde foram utilizados dois exemplos do SW PSIM. Na Figura 25 é mostrada uma tela do PSIM que contém o primeiro circuito de exemplo do tipo não linear e sua forma de onda.

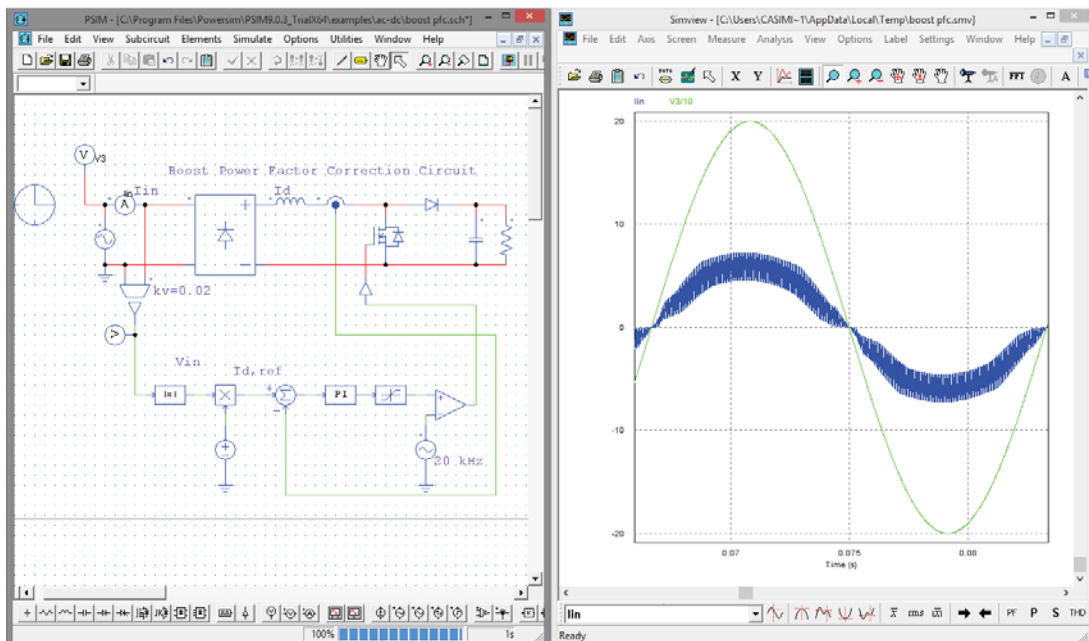


Figura 25. Circuito do tipo não linear para teste de script Python e PSIM.

Da mesma forma como realizado anteriormente, na Tabela 7 são apresentados os resultados e cálculo de erro relativo ao valor encontrado no script Python e o retornado pelo

PSIM. O Erro também é calculado via Equação (8) e é a relação do valor calculado por Python (V_{medido}) com valor PSIM ($V_{\text{referência}}$).

Tabela 7. Resultados dos testes PSIM e Python para circuitos não lineares.

TESTES		FP	P (W)	S (VA)	Q (VAr)
Ex.1 psim	PSIM	0,977	601,642	615,591	130,306
	Python	0,977	601,552	615,499	130,285
	Erro (%)	0,000	-0,015	-0,015	-0,016
Ex.2 psim	PSIM	0,850	97,764	114,959	60,479
	Python	0,850	97,764	114,959	60,480
	Erro (%)	0,000	0,000	0,000	0,001

O maior erro percentual encontrado nas tabelas 6 e 7 foi de 0,039% (Tabela 6 Ex.3) referente ao valor de FP e com relação ao valor Teórico. De modo geral, os resultados confirmam que a metodologia adotada para realizar o cálculo das potências pode ser utilizado no SW desejado e todos os erros ficaram bem abaixo do valor de 5,0% estipulado na metodologia.

4.2. VALORES OBTIDOS COM TM4C129 VERSUS OSCILOSCÓPIO

O objetivo desse teste foi validar a metodologia explicada na seção 3.4. Com base na Figura 20 (seção 3.4), o esquema foi montado em uma bancada de testes e realizadas análises iniciais dos sinais capturados pelo osciloscópio. Na Figura 26 é mostrada uma tela do osciloscópio, onde registra a existência de uma defasagem entre o sinal de tensão (CH1, sinal amarelo) e o de corrente (CH2, sinal verde).

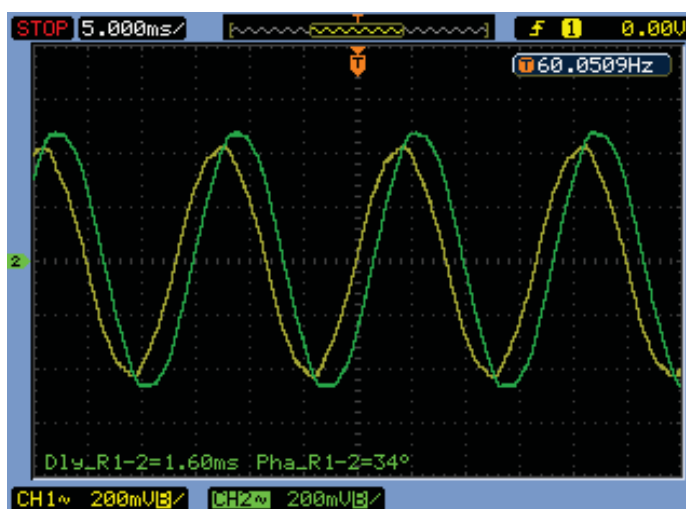


Figura 26. Captura de FO dos sensores de tensão e corrente pelo osciloscópio.

Com auxílio de ferramentas integradas do osciloscópio é possível medir essa defasagem, que foi cerca de 34° . O desfasamento representa o atraso entre dois sinais senoidais de mesma frequência. A cada instante de tempo pode corresponder a um ângulo que varia entre 0° a 360° .

Por se tratar de uma carga resistiva, essa defasagem não poderia existir, logo descobre-se que essa defasagem é uma característica do sensor de corrente, mais especificamente se forem comparados os sensores de correntes diferenciais (até $3,0\text{mA rms}$) com os de correntes de alimentação (até $5,0\text{A rms}$). Com isso, deve-se realizar a correção dessa defasagem, tornando-a o mais próximo do valor teórico que é 0° .

O primeiro método testado para realizar a correção foi de adicionar uma carga capacitiva na saída do sensor. Consiste em adicionar um capacitor com um valor que aproxime o ângulo da defasagem próximo de zero. Para o caso do sensor utilizado para tensão, o valor resultante do capacitor ficou próximo de $2,2\mu\text{F}$. Realizada a correção, novos testes foram feitos para três tipos de carga (resistiva, indutiva e capacitiva), como realizado nos testes de SW, porém agora com cargas reais. Não foi relevante nesse teste os valores de amplitudes dos sensores, pois o objetivo é somente comparar se as FOs entre os sinais do osciloscópio e da placa TM4C129 estão de acordo gráfica e matematicamente, via cálculo das potências.

Na Figura 27 é mostrado o gráfico gerado pelo script Python que plota quatro sinais, sendo eles, dois do osciloscópio e outros dois da placa TM4C129.

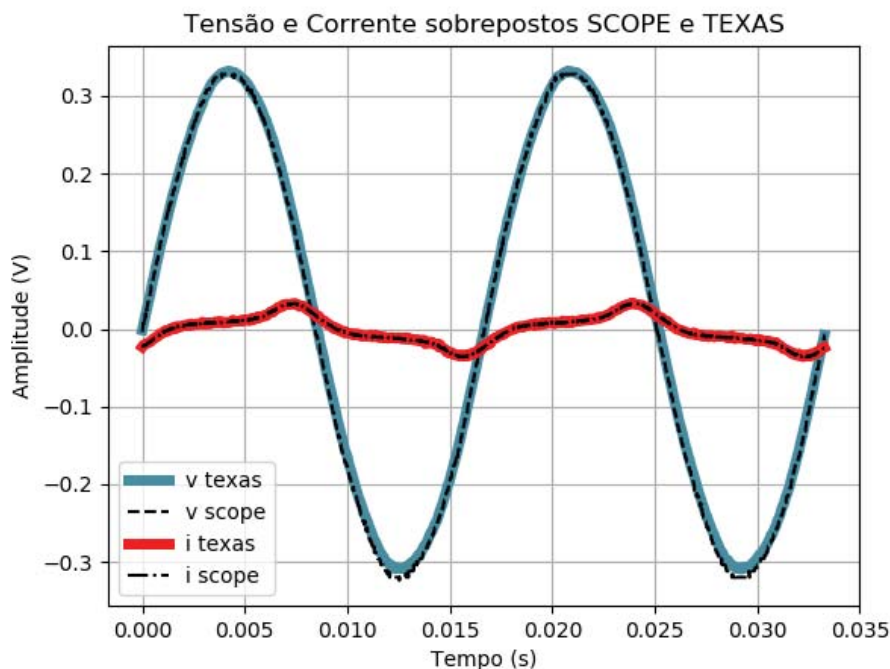


Figura 27. Comparação de FO da tensão e corrente entre TM4C129 e osciloscópio.

Observa-se conforme a legenda, que os sinais pontilhados referem-se aos sinais do osciloscópio, chamado de SCOPE e os sinais em azul e vermelho da placa TM4C129 chamada de TEXAS. Graficamente é possível ver a similaridade entre as FOs e isso indica que as capturas da placa TM4C129 são coerentes. Na Tabela 8 são demonstrados os resultados para os três tipos de cargas com o mesmo método utilizado na seção 4.1.

Tabela 8. Resultados dos testes osciloscópio e TM4C129.

TESTES		FP	P (W)	S (VA)	Q (VAr)
T1 (resistivo)	Osciloscópio	0,994	7,804	7,849	0,845
	TM4C129	0,994	7,812	7,860	0,864
	Erro (%)	-0,025	0,107	0,131	2,218
T2 (capacitivo)	Osciloscópio	0,914	6,893	7,542	3,060
	TM4C129	0,913	6,958	7,618	3,103
	Erro (%)	-0,076	0,935	1,012	1,399
T3 (indutivo)	Osciloscópio	0,648	2,694	4,158	3,167
	TM4C129	0,646	2,617	4,051	3,092
	Erro (%)	-0,303	-2,867	-2,572	-2,359

O Erro é calculado com base na Equação (8), é a relação dos valores da placa TM4C129 (V_{medido}) com os valores do osciloscópio ($V_{\text{referência}}$).

O maior erro encontrado nos três testes foi de -2,867%, para o erro relativo de P no teste T3. Algumas observações para esses três testes: o período analisado foi de 10 ciclos; se tratando de valores reais, por exemplo a tensão nominal da rede que é 220V pode oscilar de ciclo para ciclo; a frequência de amostragem do osciloscópio foi de 50 kHz enquanto a da placa TM4C129 é utilizado 15,36 kHz; a resolução do osciloscópio é de 8 bit enquanto a da TM4C129 é 12 bits; por fim, o instante de captura dos dez ciclos foi diferente, isto é, os dez ciclos do osciloscópio não são os mesmo dez ciclos da TM4C129.

De modo geral e considerando as observações, os testes foram satisfatórios tanto graficamente como matematicamente e quanto aos valores dos erros ambos foram menores que 5,0% como estipulado na metodologia. O método adotado para corrigir o ângulo de defasagem entre os sensores de tensão e corrente não será utilizado nas futuras medições. Esse método tem alguns pontos negativos, entre eles: atenuação da amplitude de saída e limitação da largura de banda devido um aumento no valor do capacitor do filtro RC (como comentado na seção 3.2), por esses motivos foi realizado um método de correção por SW, via deslocamento de amostras no tempo. Esse método é explicado a seguir.

4.3. CORREÇÃO DA DEFASAGEM DO SENSOR DE TENSÃO

Como explicado no início da seção 4.2, o ângulo da defasagem medido pelo osciloscópio foi de 34° . No entanto não foram realizados testes nos sinais capturados pela placa TM4C129 a fim de verificar se esse valor foi encontrado também, pois um novo método foi investigado. Foram avaliados três métodos para calcular o ângulo de defasagem, descritos a seguir

Método 1: Deslocamento no tempo

Uma das propriedades dos sinais discretizados no tempo é o deslocamento no tempo. Supondo um vetor $x[n]$, onde n são as amostras, e k uma constante inteira que pode ser positiva ou negativa, o vetor $y[n]$ resultante é dado por $y[n] = x[n-k]$, ou seja, $y[n]$ contém o vetor $x[n]$ deslocado k posições para a direita. Para realizar esse procedimento o sinal deve possuir mais de um ciclo para ser possível deslocar as amostras. O objetivo é calcular o valor de k , descrito anteriormente, a fim de zerar a defasagem entre os dois sinais.

O procedimento é baseado em detectar os cruzamentos por zero nos pontos de subida de cada sinal analisado e salvar os valores das respectivas posições e no final o valor do deslocamento é a diferença entre as duas posições encontradas. Esse método resulta em um valor inteiro baseado no número de contagem das amostras.

Método 2: Cálculo do ângulo do fator de potência

Esse método é o mesmo utilizado no cálculo das potências. O fator de potência é a relação da Potência Ativa (P) pela Potência Aparente (S) e o ângulo, que é o cosseno do FP representa a defasagem entre o sinal de tensão em relação ao de corrente. As Equações (6) e (7) no capítulo 3, demonstram esses cálculos. Uma obrigatoriedade é que ambos os sinais sejam do tipo senoidais puros, isto é, contenham somente uma componente harmônica, nesse caso a de 60Hz. Esse método resulta em um valor de ângulo no qual depois calcula-se o valor de deslocamento.

Método 3: Transformada de Fourier

Através da Transformada de Fourier é possível realizar uma análise de um sinal no domínio da frequência e isso traz grandes vantagens e nesse método utilizar-se a Transformada Discreta de Fourier para analisar os ângulos retornados dos sinais de tensão e corrente e calcular a defasagem da harmônica fundamental, nesse caso 60Hz, pela diferença do ângulo da tensão

pelo ângulo da corrente. Esse método resulta em um valor de ângulo no qual depois calcula-se o valor de deslocamento.

De posse dos valores de deslocamento ou ângulo calculados através dos três métodos descritos anteriormente, pode-se calcular o ângulo com base no deslocamento da mesma forma que o deslocamento com base no ângulo, ou seja, as Equações (13) e (14) realizam essa operação tendo como referência que o sinal de um ciclo equivale a 256 posições e 360 graus. Uma observação com relação a Equação (14) é que o resultado é do tipo real, entretanto para fins de utilização no procedimento de correção de defasagem esse número deve ser arredondado e transformado em um número inteiro.

$$\hat{\text{ângulo}} = \text{deslocamento} \cdot \frac{360}{256} \quad (13)$$

$$\text{deslocamento} = \hat{\text{ângulo}} \cdot \frac{256}{360} \quad (14)$$

4.4. TESTES DE AMPLIFICADOR DE ÁUDIO VERSUS TM4C129

Esse teste tem como objetivo verificar e calcular o valor do ângulo e do deslocamento que deve ser realizado para correção da defasagem via SW. Na Figura 28 é mostrado o esquema montado na bancada de testes para o procedimento realizado.

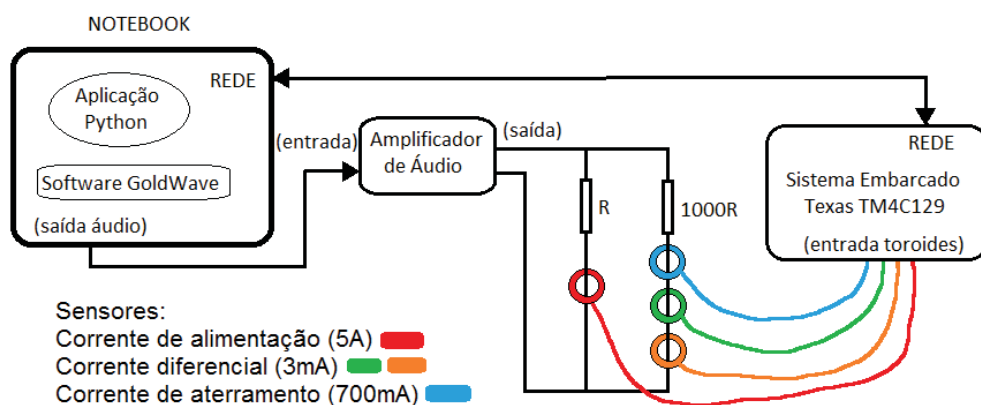


Figura 28. Esquema para teste dos sensores com amplificador de áudio.

Como descrito nos resultados da seção 4.2, que a tensão da rede oscila, assim como a carga pode apresentar variações, foi utilizado uma maneira que busca minimizar essas ações e tornar o teste mais preciso e seguro. Foi utilizado um *software* chamado GoldWave [37] que

trabalha com edição de áudio e permite gerar diversos sinais e executá-los diretamente na saída de áudio do computador ou então salvar em arquivo de áudio (WAV, MP3 entre outros). O Amplificador de Áudio, tem a função de amplificar a corrente para a carga R e 1000R descritas na Figura 28.

Sendo assim, o sinal gerado pelo *software* GoldWave é mandado para o amplificador e o amplificador transfere o sinal para a carga do tipo resistiva e a corrente que circula na carga é medida pelos quatro sensores. A carga, que está simbolizada pelos resistores R e 1000R, tem o propósito de criar um divisor de corrente, onde a corrente elétrica que circular pelo resistor R é 1000 vezes menor no resistor 1000R, devido a lei de Ohm. Com isso o sensor de corrente de alimentação que tem sua faixa até 5,0Arms foi instalado na malha do resistor R e os outros três sensores na malha do resistor 1000R, onde a faixa vai até 3,0mArms.

Para validar os resultados foram criadas quatro FOs conhecidas (com o SW GoldWave), cada uma com um propósito diferente. A primeira trata-se de um sinal senoidal puro de 60Hz, a segunda contém três harmônicos ímpares, a terceira contém três harmônicos pares e a última contém harmônico de 180Hz com amplitude mais elevada com relação aos outros sinais. Nas Equações a seguir observa-se as definições dos sinais criados para o teste.

$$s_1 = 1.0 \cdot \sin(2\pi \cdot 60 \cdot t) \quad (9)$$

$$s_2 = s_1 + 0.1 \cdot \sin(2\pi \cdot 180 \cdot t) + 0.05 * \sin(2\pi \cdot 300 \cdot t) + 0.01 \cdot \sin(2\pi \cdot 420 \cdot t) \quad (10)$$

$$s_3 = s_1 + 0.1 * \sin(2\pi \cdot 120 \cdot t) + 0.05 * \sin(2\pi \cdot 240 \cdot t) + 0.01 * \sin(2\pi \cdot 360 \cdot t) \quad (11)$$

$$s_4 = s_1 + 0.5 * \sin(2\pi \cdot 180 \cdot t) \quad (12)$$

Na Figura 29 são demonstradas as FOs capturadas dos quatro sensores para o sinal de teste 1, conforme Equação (9). Conforme a legenda, ‘IFASE’ refere-se ao sensor que mede a corrente de alimentação, ‘IDIFF’ do sensor que mede a corrente diferencial, ‘TENSÃO’ do sensor que mede tensão e ‘IGND’ o sensor que mede a corrente de aterramento. Os sensores de corrente diferencial e corrente de aterramento não foram avaliados nesse trabalho, o foco ficou nos sensores de tensão e corrente de alimentação, chamados de TENSÃO e IFASE respectivamente.

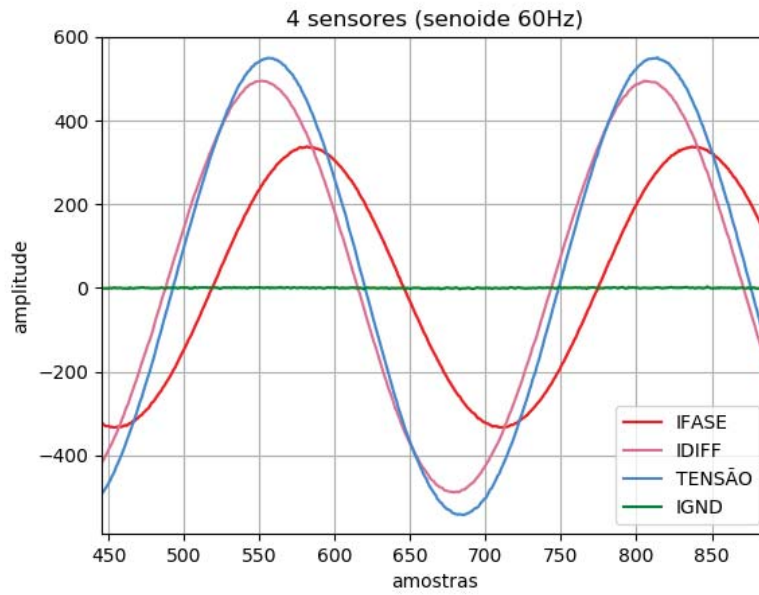


Figura 29. FOs dos sensores capturadas por TM4C129 no teste com amplificador de áudio.

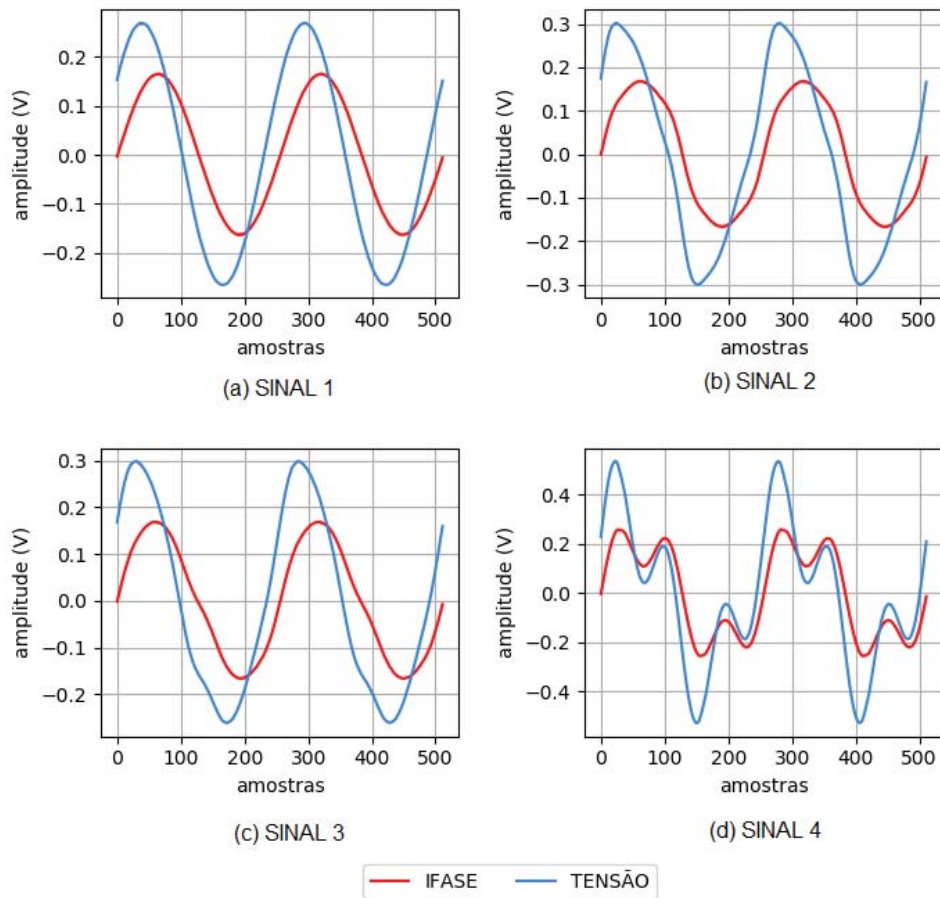


Figura 30. FOs capturadas por TM4C129 dos sinais predefinidos.

Na seção 4.3, foram apresentados três métodos para análise de dois sinais com objetivo de encontrar a defasagem entre eles. Esses três métodos foram aplicados nos resultados capturados com base nos quatro sinais predefinidos, Equações (9) a (12). Na Figura 30 são apresentados os quatro sinais de teste capturados pela placa TM4C129.

Para a plotagem dos dados capturados, mostrados na Figura 30, foram utilizados dois ciclos de FO e as amplitudes já ajustadas com relação ao offset e em escala analógica do ADC, isto é, valores na escala $\pm 1,65V$. Na Tabela 9 são apresentados os resultados de comparação entre os quatro sinais de teste e os valores encontrados de ângulo (valor em graus) e deslocamento para os três métodos.

Tabela 9. Comparação dos métodos de deslocamento.

Método		Ângulo (°)	Deslocamento
Método 1	SINAL 1	36,562	26
	SINAL 2	30,938	22
	SINAL 3	30,938	22
	SINAL 4	16,875	12
Método 2	SINAL 1	36,571	26
	SINAL 2	36,363	26
	SINAL 3	36,132	26
	SINAL 4	32,381	23
Método 3	SINAL 1	36,578	26
	SINAL 2	36,522	26
	SINAL 3	36,276	26
	SINAL 4	36,164	26

Com base na Tabela 9, observa-se que o Método 3 é o que resulta em uma maior aproximação dos valores de Ângulo e Deslocamento com relação aos quatro sinais de teste. Isso pode ser explicado pois como descrito na seção 4.3, o Método 2 somente é verdadeiro se os dois sinais forem do tipo senoidais puros, sem a presença de harmônicos. Com relação ao Método 1, com base nas FOs da Figura 30 (d), nota-se que o sinal de tensão sofre uma deformação maior com relação ao sinal e corrente (desconsiderando as amplitudes de ambos), e assumindo que o mesmo sinal é aplicado para os dois sensores. Conclui-se que ocorre uma deformação do sinal no sensor da tensão e isso é investigado na seção 4.4.2.

Foi definido com base nos relatos anteriores que o desfasamento é verdadeiro e o ângulo de defasagem fica em torno de $36,5^\circ$ e utilizando a Equação (14) encontra-se o valor de 25,955. Porém o valor deve ser inteiro, define-se 26 como o valor de deslocamento para correção da defasagem existente entre o sensor de tensão com relação ao de corrente de

alimentação. Nota-se também que o valor 26 de deslocamento é também resultante para todos os sinais testados no método 3, conforme Tabela 9.

4.4.1. Ajuste dos sensores com relação ao valor do ganho

O ajuste do ganho tem como objetivo adequar os valores medidos pelos sensores em valores de escala real, por exemplo uma lâmpada com potência de 70W ligada em uma rede de 220V espera-se que o sensor de tensão meça 220V e o sensor de corrente meça 0,318 A. No entanto sabe-se que os sensores utilizados operam na faixa de 0 a 3,3 V então é necessário ajustar um valor, chamado de ganho, para que o resultado final seja como o esperado.

O procedimento foi realizado com base no esquema demonstrado na seção 4.2, onde se utilizou uma lâmpada de 70W como carga conhecida. Para referência dos valores reais medidos foi utilizado o multímetro ET1649. As etapas a seguir foram realizadas para todos os sensores, mudando somente a escala e tipo de grandeza.

- 1) Captura de 10 ciclos
- 2) Ajuste de OFFSET e conversão para escala analógica
- 3) Cálculo do valor RMS dos ciclos 9 e 10 (Valor RMS do sensor)
- 4) Anotar Valor RMS do multímetro ET1649
- 5) $GANHO = (\text{Valor RMS do multímetro}) / (\text{Valor RMS do sensor})$
- 6) Anotar valor de GANHO

Abaixo são apresentados os valores encontrados no cálculo de ganho para cada sensor.

$$IFASE_GANHO = 5,33$$

$$IDIFF_GANHO = 0,00359$$

$$TENSAO_GANHO = 542$$

$$IGND_GANHO = 0,533$$

Esses valores são definidos como constantes e são utilizados no FW e no SW.

4.4.2. Investigação da deformação do sinal no sensor de tensão

Para um melhor entendimento do funcionamento dos sensores foi realizado uma comparação de similaridade entre a FO do sensor de corrente de alimentação e o sensor de tensão. Como relatado anteriormente e com base na Figura 30, nota-se que além da defasagem existente uma deformação, alteração na FO, entre os dois sinais plotados. O estudo apresentado

em [4] analisa diferentes métodos para calcular a similaridade entre FOs. Os três métodos utilizados também foram utilizados nesse trabalho para investigar o quão similar ou não são as FOs de interesse.

Os três métodos que foram utilizados são: Coeficiente de Spearman, Correlação de Pearson e Root Mean Square Deviation (RMSD), em português Desvio Quadrático Médio. Ambos os métodos são encontrados em bibliotecas para linguagem Python e podem ser acessadas por [38], [39] e [40].

Observa-se na Figura 29 e 30, que os sinais IFASE e TENSÃO têm diferentes amplitudes. Para fins de comparações, os ciclos analisados de TENSÃO e IFASE foram normalizado, isto é, um procedimento que modifica a amplitude, dividindo todo sinal pelo valor máximo absoluto encontrado, resultando em um sinal com escala de ± 1.0 . Na Figura 31 são mostrados os dois sinais de interesse normalizados para o sinal de teste 1 (Figura 30(a)). E na Figura 32 são apresentados os resultados pós correção da defasagem e normalização das amplitudes.

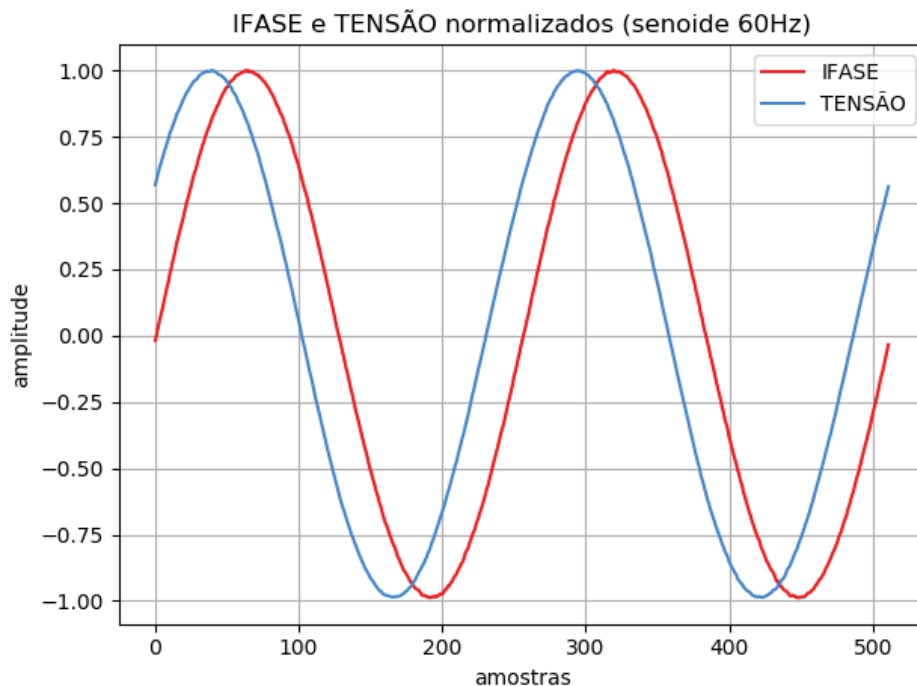


Figura 31. Sinais normalizado em amplitude.

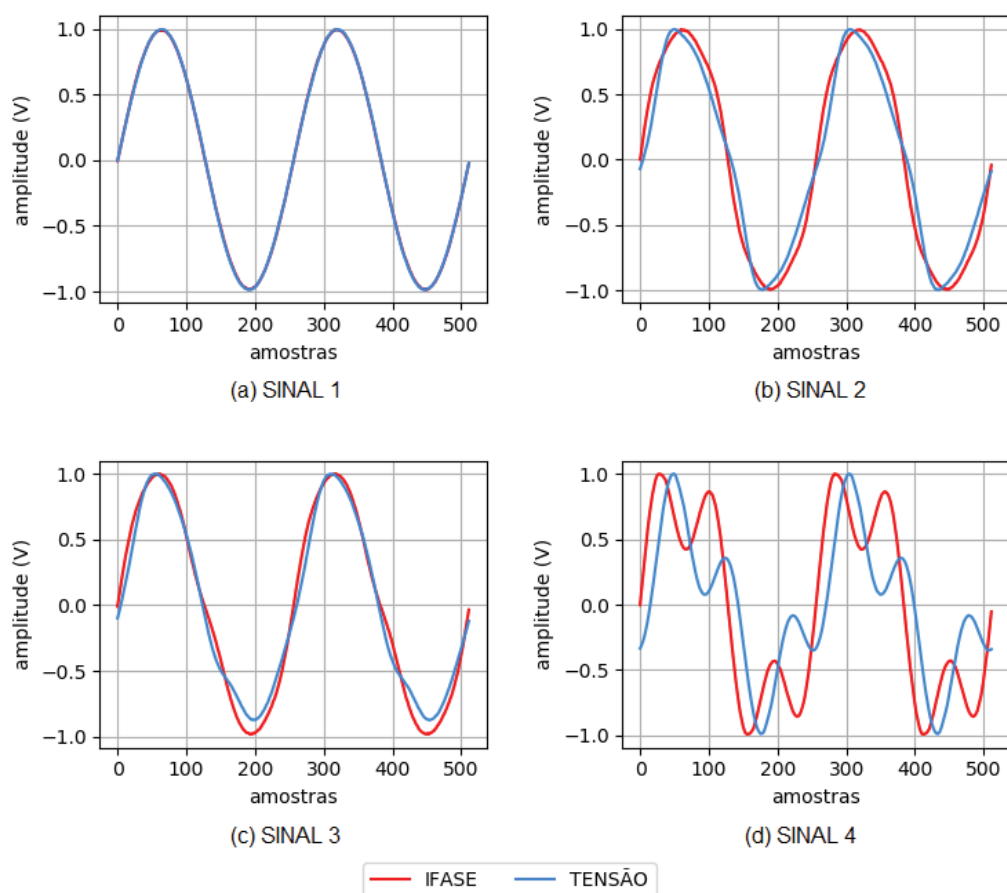


Figura 32. Sinais de teste normalizados em amplitude e com correção da defasagem.

Observando a Figura 32 (a), nota-se que os dois sinais estão sobrepostos, e isso se deve pois o sinal do teste 1 (SINAL 1) é do tipo senoidal puro, por outro lado é claramente visível as alterações das FO dos sinais na Figura (b), (c) e (d). Na Tabela 10 são apresentados os resultados dos três métodos de similaridade utilizados para comparação dos quatro sinais de teste, Figura 32.

Tabela 10. Resultados do teste de similaridade de FO.

TESTES:	Spearman	Pearson	RMSD
SINAL 1	1,000	1,000	0,006
SINAL 2	0,988	0,987	0,132
SINAL 3	0,996	0,993	0,099
SINAL 4	0,702	0,731	0,470

Em [4] é apresentada uma tabela como uma proposta de escala de similaridade para FO de corrente elétrica e com base nessa tabela e os resultados da Tabela 10 pode-se definir

que o SINAL 1 tem máxima similaridade, o SINAL 2 e SINAL 3 possui alta similaridade e o SINAL 4 resulta em baixa similaridade. Na Tabela 11 é apresentado uma adaptação de [4].

Tabela 11. Escala de Similaridade entre FO. Adaptado de [4].

Similaridade	Intervalo
Máxima	[1,000; 1,000]
Alta	[0,950; 0,999]
Média	[0,850; 0,949]
Baixa	[0,500; 0,849]
Mínima	[0,001; 0,499]

Com base nesses resultados surge um alerta que deve ser levado em consideração para futuras aplicações com esses sensores. A fim de finalizar essa investigação é realizado um último teste com base em capturas reais onde se identificou que caso a FO da tensão apresentasse artefatos (pequenos desvios ou deformações de amplitude em pontos da FO), a correção da defasagem via deslocamento de amostras pode apresentar um problema de dessincronização, que é exemplificado na Figura 33 e 34.

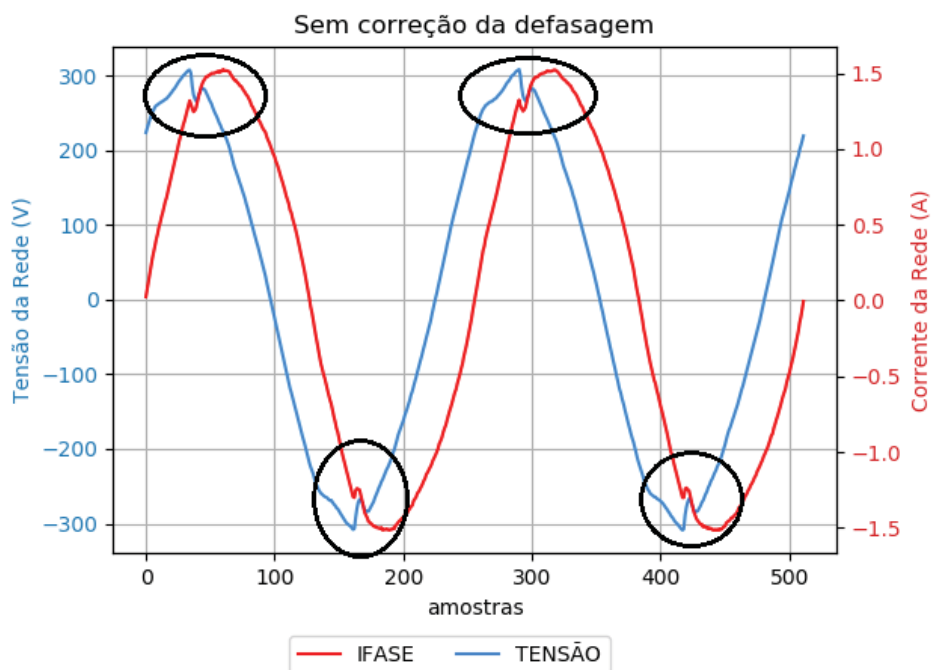


Figura 33. FO com artefato e sem correção da defasagem.

A Figura 33 apresenta o sinal de tensão (TENSÃO) e corrente (IFASE) em escala real, onde a direita temos a amplitude da corrente e a esquerda da tensão. Na Figura 34, será

realizado a análise com a correção da defasagem e para uma melhor visualização e entendimento, os sinais estão em escala do ADC e normalizados.

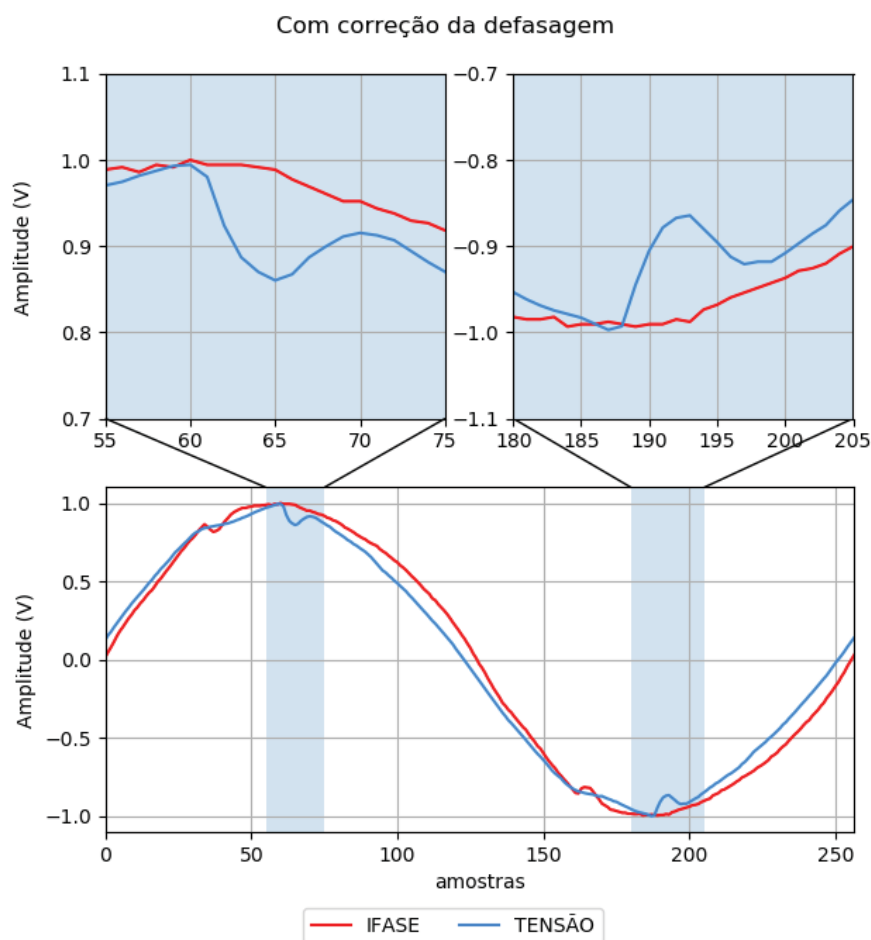


Figura 34. FO com artefato e com correção da defasagem.

Em comparação com as Figuras 33 e 34, nota-se que na Figura 33, sem a correção da defasagem, o artefato que ocorre na tensão da rede acontece em sincronia com o sinal da corrente, sendo essa uma verdade, pois a resposta da corrente conterà o artefato da tensão no mesmo instante que aconteceu na tensão. Quando se aplica a correção da defasagem, Figura 34, o deslocamento da FO da tensão para direita faz com que a sincronia do artefato não ocorra no mesmo instante. Se tratando do cálculo ponto a ponto da Potência Ativa haverá um erro devido essa dessincronia do instante onde ocorreu o artefato.

4.4.3. Discussão dos resultados dos testes entre amplificador de áudio e TM4C129

O teste realizado com o amplificador de áudio para análise das respostas dos sensores trouxe mais precisão e segurança, se comparado com os testes em escala real, isto é,

com a tensão da rede. A utilização do *software* GoldWave tornou rápida a modelagem dos quatro sinais de teste. Os três métodos utilizados para calcular o valor do deslocamento e ângulo foram satisfatórios pois os resultados comprovaram que o melhor método foi o terceiro, via Transformada de Fourier, sendo utilizado para qualquer um dos sinais de teste.

A investigação da deformação causada no sensor utilizado para medir a tensão levou a uma aplicação utilizada em [4] para fins de análise de similaridade de FO, e com base nos resultados constatou-se que o SINAL 4 apresentou uma baixa similaridade, sendo que esperava-se que fosse no mínimo de média similaridade. E por fim é demonstrado e explicado um problema que pode ocorrer quando o sinal da tensão apresentar artefatos na FO e com a correção da defasagem via deslocamento de amostras haverá uma dessincronização com relação ao instante que ocorre o artefato.

Outro problema desse tipo de sensor é que ele não responde a sinais com nível DC, isto é, uma das características dos transformadores de corrente, mas que nesse trabalho não foi investigado. De modo geral será mantido o uso dos sensores e a correção da defasagem como proposto. Para análises futuras ficará nesse texto o registro dos relatos encontrados.

Uma última observação é de que ao realizar o ajuste da defasagem na qual se desloca o vetor da tensão em 26 posições para direita conseqüentemente perde-se uma parte do vetor de 256 posições, logo dos dez ciclos que são recebidos, depois desse ajuste tem-se somente nove ciclos completos para calcular as grandezas desejadas.

4.5. TESTES DO PMED VERSUS MEDIDOR ELO2101L

Os resultados obtidos nessa etapa referem-se a metodologia apresentada na seção 3.5, onde foi realizado uma bateria de testes com diversas cargas reais. Por conveniência o SW projetado que realiza a medição da energia a partir dos eventos gerados pela placa TM4C129 foi chamado de PMED e o medidor eletrônico utilizado como referência foi chamado de ELO. Com relação aos resultados das potências e energias que foram calculados o foco se manteve na Potência Ativa (P) e Potência Aparente (S) assim como na Energia Ativa (EP) e Energia Aparente (ES). A Potência Reativa, assim como a Energia Reativa não foi utilizada pois o medidor ELO não realiza essa medição.

4.5.1. Testes com cargas definidas

O teste seguiu uma metodologia predefinida, ou seja, o procedimento teve quatro aparelhos conhecidos tanto na questão de tipo de carga como potência consumida. Inicialmente foram anotados os valores teóricos de potência, isto é, valores descritos nas especificações do aparelho e que normalmente vem na unidade de medida em watts (W) e depois anotados os valores medidos com PMED sendo possível obter as medidas tanto da potência na unidade de watts (W) e volt-ampere (VA) que referem-se as Potência Ativa e Potência Aparente respectivamente. Na Tabela 12 são apresentados os dados iniciais coletados dos quatro aparelhos.

Tabela 12. Aparelhos utilizados nos testes com cargas definidas.

APARELHOS	TIPO	Pot. teórica (W) Potência Ativa	Pot. medida (W) Potência Ativa	Pot. medida (VA) Potência Aparente
SEM CARGA	Sistema Embarcado	-	2,6	4,5
APARELHO 1	Transformador + resistência	200	207	210
APARELHO 2	Lâmpada Compacta	45	44	46
APARELHO 3	Ventilador simples	50	41,1	41,4
APARELHO 4	Resistência	400	405,2	405,6

Com base na Tabela 12 e sabendo que a máxima corrente elétrica medida pelo sensor utilizado é 5Arms e com uma tensão nominal da rede de 220V descobre-se, via lei de Ohm, que a potência máxima é de 1100VA. Sendo assim estipula-se um limite de segurança de 20% chegando a um valor aproximado de 880VA. No pior caso, onde todos os aparelhos são ligados a potência seria de 707,5VA, estando essa abaixo do limite estipulado.

Quanto aos aparelhos nota-se que foi adicionado propositalmente para fins de conhecimento o valor da potência do Sistema Embarcado denominado como SEM CARGA, pois como ele é ligado depois do medidor ELO passa a ser uma carga permanentemente ligada. O Aparelho 1 é uma resistência ligada na saída de um transformador (220V/110V). O Aparelho 2 é uma lâmpada do tipo fluorescente compacta de alta eficiência. O Aparelho 3 é um ventilador de chão. Por fim o Aparelho 4 é uma resistência de aquecedor.

Foi criado uma sequência de eventos de liga e desliga alternando entre os quatro aparelhos. O tempo do teste foi de uma hora onde os aparelhos foram ora ligados, ora desligados em períodos de cinco em cinco minutos. Essa sequência é programada em um script Python

onde é gerada uma estimativa teórica da energia consumida assim como um gráfico base. Na Figura 35 é demonstrada a estimativa teórica do teste prático, gerado pelo script Python, onde também é calculada a Energia Ativa com valor de 91,77Wh e Energia Aparente com valor de 93,46VAh.

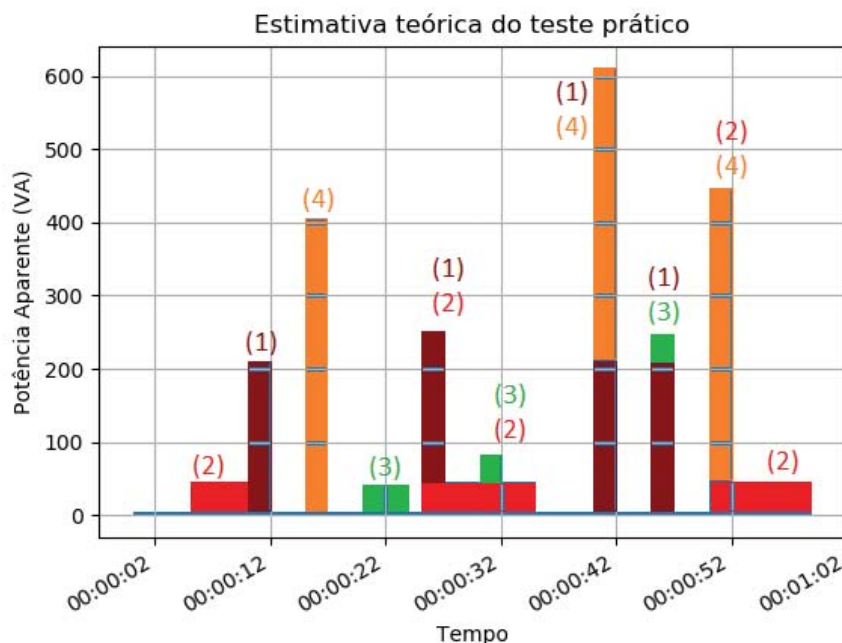


Figura 35. Estimativa teórica do teste prático.

Para o procedimento dos testes foi utilizado um módulo relé de quatro canais, controlado por um Arduino UNO no qual foi programado as sequências de liga e desliga conforme o script Python. Com base na Figura 35 os valores entre parênteses (1), (2), (3) e (4) representam os quatro aparelhos apresentados na Tabela 12. Quando há mais de um número, indica que dois aparelhos foram ligado no mesmo instante.

O teste foi repetido três vezes e os resultados das medições são apresentados a seguir. Embora a TM4C129 faça a contagem da energia ciclo por ciclo os resultados apresentados tem como foco a comparação do medidor de referência ELO e o SW PMED que realiza a medição da energia por eventos. Na Tabela 13 é realizada a comparação dos valores calculados por PMED e do medidor ELO. As grandezas de interesse são: Energia Aparente (ES) medida em VAh, Energia Ativa (EP) medida em Wh.

Tabela 13. Resultados dos testes com cargas definidas para PMED e ELO.

TESTES	ES (VAh)	EP (Wh)	inc10Wh	TEMPO (m)	EVENTOS	Eventos/m	
PMED	TESTE 1	94,272	92,463		59,101	48	0,812
	TESTE 2	92,790	91,117		56,856	47	0,827
	TESTE 3	93,920	91,981		65,211	38	0,583
ELO	TESTE 1	90,418	90	9	60,93		
	TESTE 2	89,816	90	9	62,05		
	TESTE 3	89,603	100	10	65,38		

A coluna de nome ‘inc10Wh’ refere-se exclusivamente ao medidor ELO, sendo uma variável de incremento, como descrita na seção 3.5, com um passo de 10Wh sendo assim os valores da coluna EP para o medidor ELO são inteiros. A coluna de ‘EVENTOS’ refere-se somente ao PMED, totalizando o número de eventos registrados e ao lado direito dessa coluna tem-se a média de eventos por minuto, baseado no tempo medido.

Com base na Figura 35, da estimativa teórica, um total de 20 eventos entre o início e fim do teste são necessários, assumindo que durante os períodos em que os aparelhos estejam ligados não ocorram mudanças de carga. Na prática isso é bem diferente pois, desde os testes realizados na seção 4.2 relatam-se sobre as oscilações no valor da tensão da rede, onde isso impacta na alteração da potência e então em uma possível geração de um evento. Além disso, na programação de ligação dos aparelhos foi fixado um período de dois segundos entre a ligação de um aparelho e outro nos momentos onde dois aparelhos são ligados, gerando assim, mais de um evento. E por fim, deve-se levar em consideração o período transitório, chamado também de regime transitório, que é um período de curta duração que dependendo do tipo de carga acontece nos momento de liga e desliga, gerando assim picos de potência e com isso maior número de eventos.

A Tabela 14 apresenta o erro relativo percentual. O Erro também é calculado via Equação (8) e é a relação do valor PMED (V_{medido}) com valor do medidor ELO ($V_{\text{referência}}$).

Tabela 14. Comparação de PMED com ELO dos testes com cargas definidas.

TESTES		ES (VAh)	EP (Wh)
TESTE 1	PMED	94,272	92,463
	ELO	90,418	90,000
	Erro (%)	4,262	2,737
TESTE 2	PMED	92,790	91,117
	ELO	89,816	90,000
	Erro (%)	3,311	1,241
TESTE 3	PMED	93,920	91,981
	ELO	89,603	100,000
	Erro (%)	4,818	-8,019

O maior valor de erro encontrado foi de -8,019% no TESTE 3 para EP, onde nesse caso pode-se tratar como uma exceção pois devido a variável de incremento do medidor ELO ter dado 10 ao invés de 9 (como nos TESTES 1 e 2), se supõem que a contagem interna do medidor ELO estava no limite da passagem de 9 para 10. O maior erro de ES foi de 4,818% no TESTE 3. Uma possível explicação é o desconhecimento sobre o modo de medição da tensão e corrente no medidor ELO, onde se supõem que possa ser realizado uma média de n amostras entre outras formas, além disso, o tempo de atualização e envio dos dados via serial é a cada segundo. Então, admitindo-se a possibilidade dessas observações os piores erros ficariam sendo 4,818% para ES (Teste 3) e 2,737% para EP (Teste 1).

As próximas três figuras demonstram graficamente a tensão, corrente e potência com base nos testes 1, 2 e 3 comparando os dados capturados por PMED e ELO. As figuras contem três sinais plotados, são eles: Referência, que é o medidor ELO, em linha pontilhada vermelha, PMED e Eventos de PMED, isto é, a linha em azul é a ligação dos pontos que representam os eventos. No eixo horizontal tem-se a escala de tempo, que registra o dia e hora.

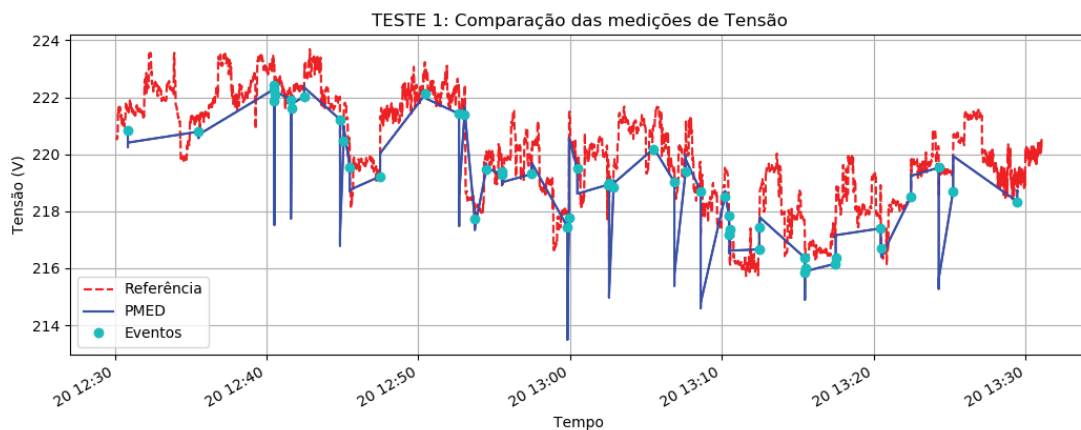


Figura 36. Comparação de PMED e ELO da Tensão do teste 1.

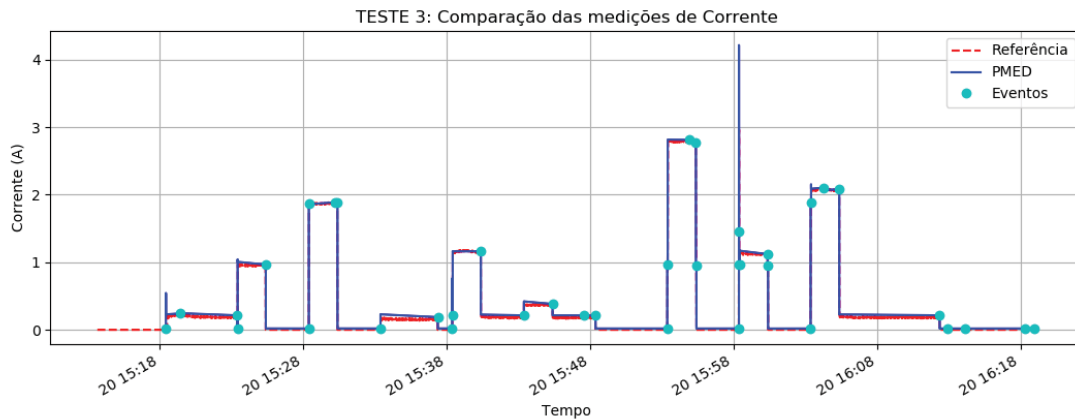


Figura 37. Comparação de PMED e ELO da Corrente do teste 3.

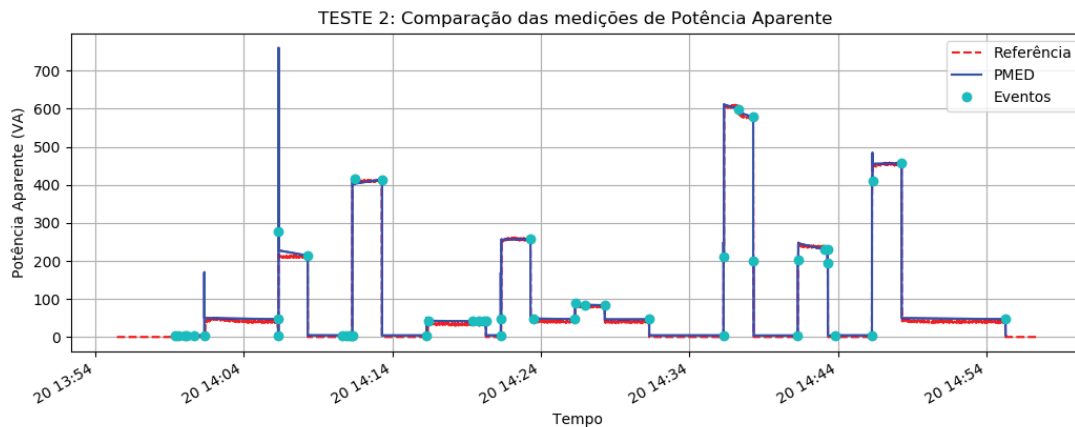


Figura 38. Comparação de PMED e ELO da Potência Aparente do teste 2.

Fica visualmente claro as mudanças na tensão da rede, com base na Figura 36, onde a tensão oscilou dentro de uma faixa de 224,0V a 213,0V onde em PMED é possível verificar a capturas dos picos ocorridos durante o teste. Na Figura 37 e 38, onde tem-se a corrente e potência respectivamente, nota-se as semelhanças dos valores dos gráficos de PMED com ELO no transcorrer do tempo onde na Tabela 14 dos TESTES 3 e 2 apresentaram erros de 4,818% e 3,311% respectivamente. Não é possível fazer comparações da Potência Ativa pois o medidor ELO apenas contabiliza a Energia Ativa e não fornece os dados instantâneos como na Potência Aparente.

Na Figura 39 é demonstrada uma comparação de similaridade entre os três testes com relação a Potência Aparente. Nota-se, assim como descrito sobre as figuras anteriores, a aproximação dos valores plotados de PMED e ELO, salvo sobre picos de diferentes tamanhos

em diferentes tempos que aconteceram durante cada um dos testes. A área sombreada de azul refere-se a PMED e as linhas tracejadas em vermelho refere-se a ELO. Da mesma forma como nas outras figuras o eixo horizontal representa o tempo. Na Figura 39 é possível verificar que os testes aconteceram todos no dia 20 e ambos levaram cerca de uma hora como era previsto.

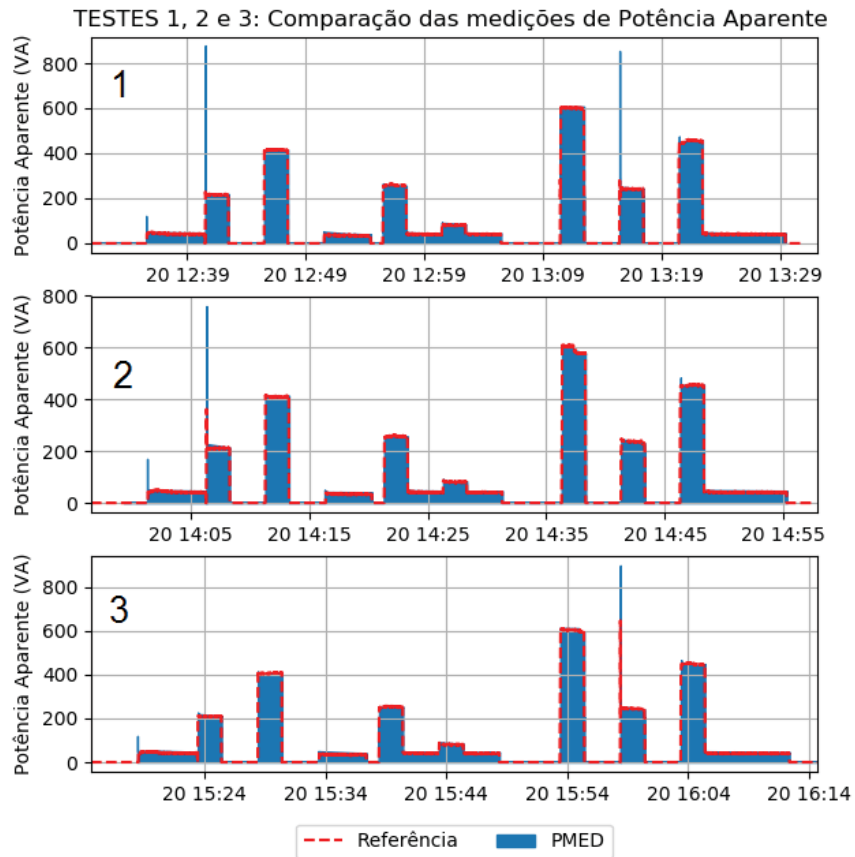


Figura 39. Comparação de Potência Aparente nos três testes.

Por fim é demonstrado na Figura 40 um gráfico, onde é abordada a Potência Aparente com a curva da energia acumulada durante cada evento capturado por PMED e os dados analisados por ELO. No lado esquerdo tem-se a escala de Potência Aparente, onde a área sombreada de azul refere-se a PMED e as linhas tracejadas em preto refere-se a ELO e no lado direito a escala de Energia Acumulada, onde a linha contínua em vermelho refere-se a PMED e a linha tracejada em preto refere-se a ELO.

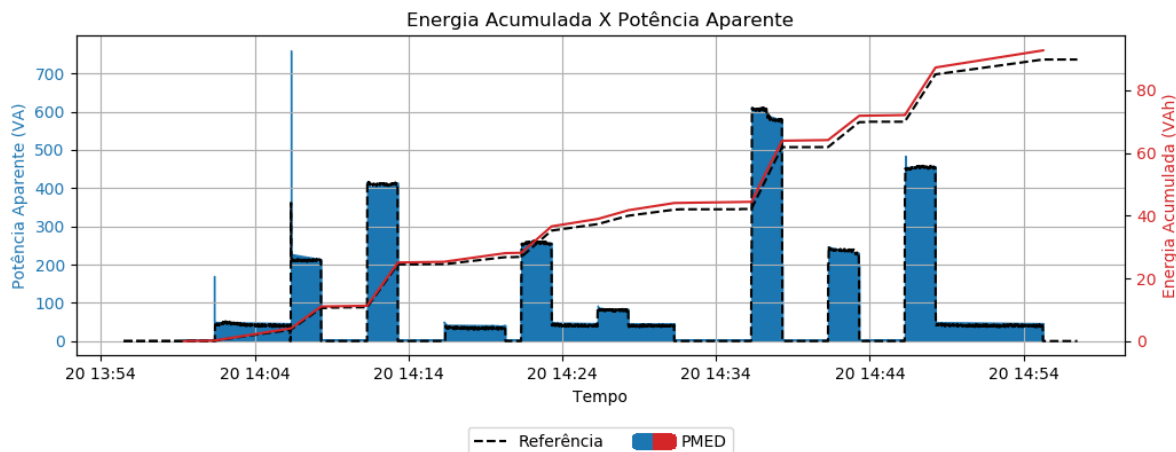


Figura 40. Comparativo de Energia Aparente Acumulada.

O gráfico apresentado na Figura 40 é referente ao TESTE 2, onde o erro relativo a Energia Aparente (ES) entre PMED e ELO foi de 3,311% sendo visível a semelhança das curvas levantadas por PMED e ELO. Esse tipo de gráfico pode ser muito útil para futuras aplicações onde a escala de tempo venha a ser dias, semanas, meses, anos entre outras possíveis possibilidades para geração de históricos de consumo de energia ou investigação de anomalias em aparelhos via eventos capturados.

4.5.2. Testes com cargas continuamente variáveis

Os próximos dois testes, chamados de TESTE 4 e TESTE 5, trataram de demonstrar a utilização de aparelhos que apresentam característica de consumo variado, como o computador por exemplo. Nesses dois testes não foi levado em consideração o tempo de execução. Em geral foram dois testes livres, onde ligaram-se e desligaram-se aparelhos sem uma predefinição, por isso, foram realizados somente uma vez cada um.

O TESTE 4, consistiu em medir o consumo de um computador do tipo *desktop* ou computador de mesa, onde possui além do gabinete, mouse, teclado e um monitor de 17 polegadas. Não foi medido o consumo, como na Tabela 12, para fins de estimar o cálculo da energia, pois não era esse o propósito. Na Figura 41 é demonstrado o gráfico de comparação entre Referência, que é o medidor ELO, plotado em linhas tracejadas na cor vermelha e PMED que corresponde a área sombreada em azul e os pontos em verde representando os eventos de PMED.

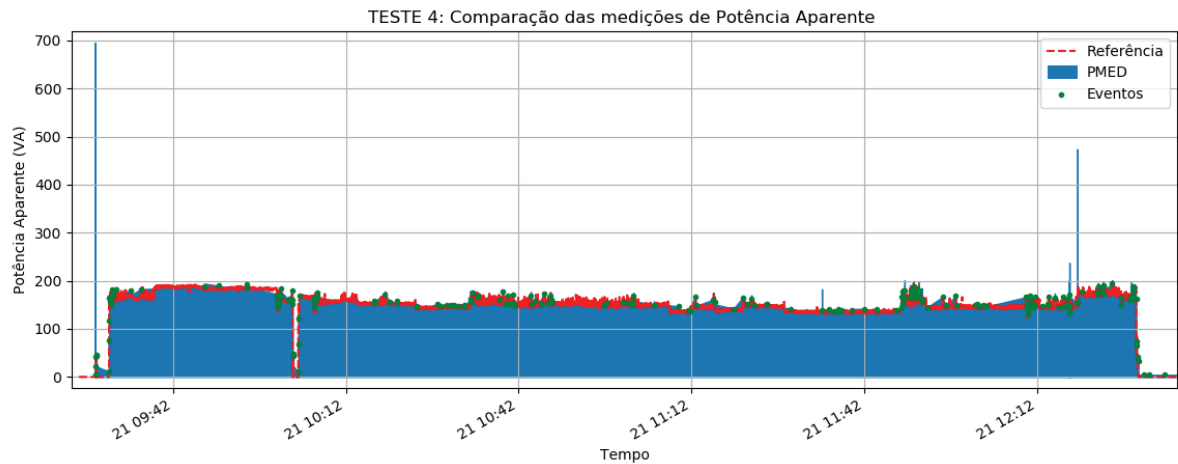


Figura 41. Comparação de PMED e ELO da Potência Aparente do teste 4.

O TESTE 5 utilizou um *notebook* da marca DELL da série VOSTRO, depois o computador desktop utilizado no TESTE 4 e por fim um terceiro aparelho, o ventilador (mesmo utilizado nos testes 1, 2 e 3). Na Figura 42 é demonstrado o gráfico de comparação entre Referência, plotado em linhas tracejadas na cor vermelha, PMED que corresponde a área sombreada em azul e os pontos em verde representando os eventos de PMED.

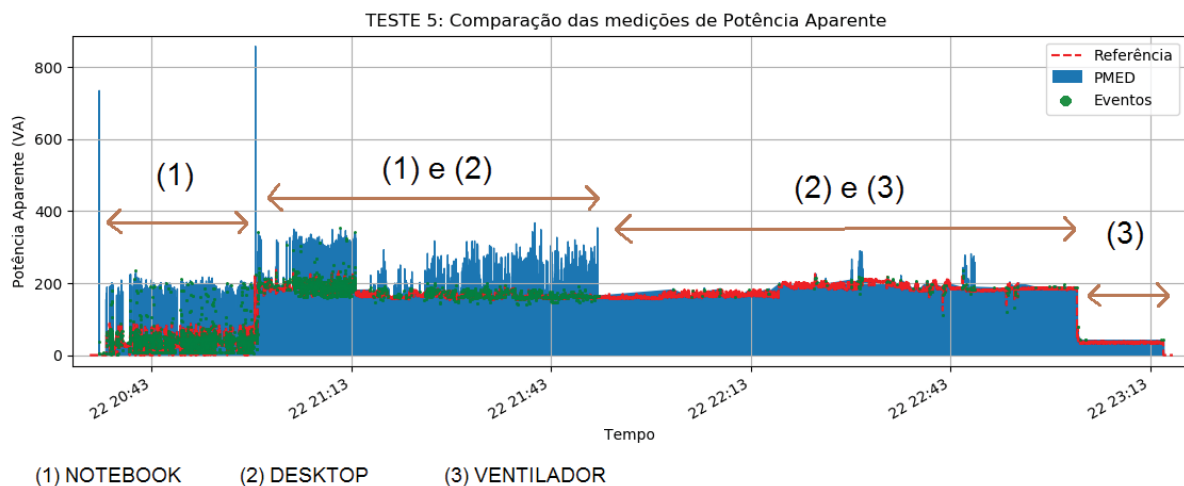


Figura 42. Comparação de PMED e ELO da Potência Aparente do teste 5.

Da mesma forma como realizado com os testes 1, 2 e 3, tabelas foram criadas para comparações e levantamento de erros relativos percentuais. Na Tabela 15 são demonstrados os resultados extraídos dos dados capturados pelo sistema PMED e ELO para os testes 4 e 5. O Erro também é calculado via Equação (8) e é a relação do valor calculado por PMED (V_{medido}) com valor medido por ELO ($V_{referência}$).

Tabela 15. Comparação de PMED com ELO dos testes cargas continuamente variáveis.

	TESTES	ES (VAh)	EP (Wh)	inc10Wh	TEMPO (m)	EVENTOS	Eventos/m
TESTE 4	PMED	473,011	305,717		193,295	226,000	1,169
	ELO	459,541	290,000	29,000	195,033		
	Erro (%)	2,931	5,420				
TESTE 5	PMED	401,391	276,022		160,761	4.278,000	26,611
	ELO	383,672	270,000	27,000	162,683		
	Erro (%)	4,618	2,230				

Para o TESTE 4 e com base na Figura 41 e Tabela 15 a diferença quanto ao número de eventos capturados se comparado com a média de eventos por minuto dos testes 1, 2 e 3, isto é, considerando 0,8 a média dos primeiros testes e 1,1 para o TESTE 4 cerca de 40% maior. Sendo esse aumento devido ao tipo de carga testada. O maior erro para o TESTE 4 foi de 5,42% para EP e da mesma forma como foi explicado para o TESTE 3 que apresentou um erro de -8,019% é provável que a contagem do incremento de 10Wh do medidor ELO esteve no limite entre 29 e 30 resultando em 290Wh ao invés de 300Wh.

Para o TESTE 5 e com base na Figura 42 e Tabela 15 é notável a diferença quanto ao número de eventos capturados se comparado com os demais testes realizados. Isso se deve a uma característica do consumo do notebook que foi descoberta durante esse teste. E fica visível na Figura 42 e via análise dos eventos que mais de 50% dos eventos foram gerados pelo notebook.

O maior erro no TESTE 5 foi de 4,618% para ES e vale recordar a mesma explicação relatada para o erro do TESTE 3 onde foi encontrado 4,818%. Uma nova hipótese sobre o desconhecimento da forma de medição do medidor ELO é que como ele é projetado para leitura somente de Energia Ativa (EP) e como as cargas dos TESTES 4 e 5 possuem muito conteúdo harmônico, resultando em uma energia não ativa, pode ser esse também um indicativo de aumento no erro geral das comparações de ES de ELO com PMED.

4.5.3. Discussão dos resultados dos testes entre PMED e Medidor ELO2101L

Os testes com o protótipo criado, que uniu tanto o HW que contou com o sistema embarcado com a placa TM4C129 junto dos sensores, como o SW projetado em Python foram muito satisfatórios. A utilização de um medidor eletrônico de modelo ELO2101L da concessionária MUX foi muito útil do ponto de vista comparativo da Energia Ativa medida além da validação do protótipo. As possíveis observações ou suposições sobre as diferenças

encontradas nos resultados foram relatadas, servindo de suporte ou investigação para futuros trabalhos.

Levando em consideração as observações levantadas pode-se dizer de maneira geral que nos cinco testes realizados o erro para Energia Aparente (ES) ficou abaixo de 5,0 % e o erro de Energia Ativa (EP) e abaixo de 3,0%. Testes com tempo de duração maior tendem a reduzir as margens de erro, visto que a precisão do medidor ELO quanto a Energia Ativa (EP) é de 10Wh.

4.6. APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE PMED PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE ENERGIA

Nesta seção é demonstrado e exemplificado via figuras o SW descrito na seção 3.3. Esse SW, chamado de PMED nos testes realizados na seção 4.5 foi amplamente utilizado e modificado durante o desenvolvimento do trabalho. Sendo assim diversas atualizações foram realizadas e diversas bibliotecas foram criadas possibilitando serem compartilhadas as mesmas funções utilizadas em PMED com os diversos scripts paralelos que foram criados. Na Figura 43 é demonstrado uma das telas do PMED.

Com base na Figura 43, observa-se uma tabela gerada com base em todos os eventos armazenados no banco de dados. Nessa tabela têm-se as informações de número da captura, data, hora, tipo do evento, os valores rms da tensão, corrente de alimentação, corrente diferencial e corrente de aterramento.

Ao clicar sobre um dos eventos selecionados (linhas da tabela) é acessado uma nova janela sendo possível verificar mais informações sobre o evento. Na Figura 44 é demonstrado essas informações sobre o evento 338 como exemplo.

Na Figura 44, observa-se diversas informações: do lado esquerdo, temos um botão de plotagem, UPDATE PLOT, das informações escolhidas em PLOT CANAIS (escolhe quais os canais à plotar), PLOT CICLOS (escolhe quais os ciclos à plotar), os *checkbox* AUTO OFFSET e SET DEFASAGEM servem para ativar ou desativar os cálculos do ajuste de offset e correção da defasagem tanto nos cálculos de Valor Médio, RMS, PP, P+, P- e Potências como nos gráficos gerados no lado direito da Figura 44. No *combobox*, que fica a direita do botão UPDATE PLOT, é possível alternar entre as formas de plotagem dos ciclos, sendo essas: escala do ADC (valores inteiros), escala do ADC (valores analógicos $\pm 1,65V$) e valores reais. E por fim é possível salvar uma imagem do gráfico desejado. Esse recurso, assim como a geração do gráfico faz parte da integração da interface gráfica com o módulo Matplotlib.

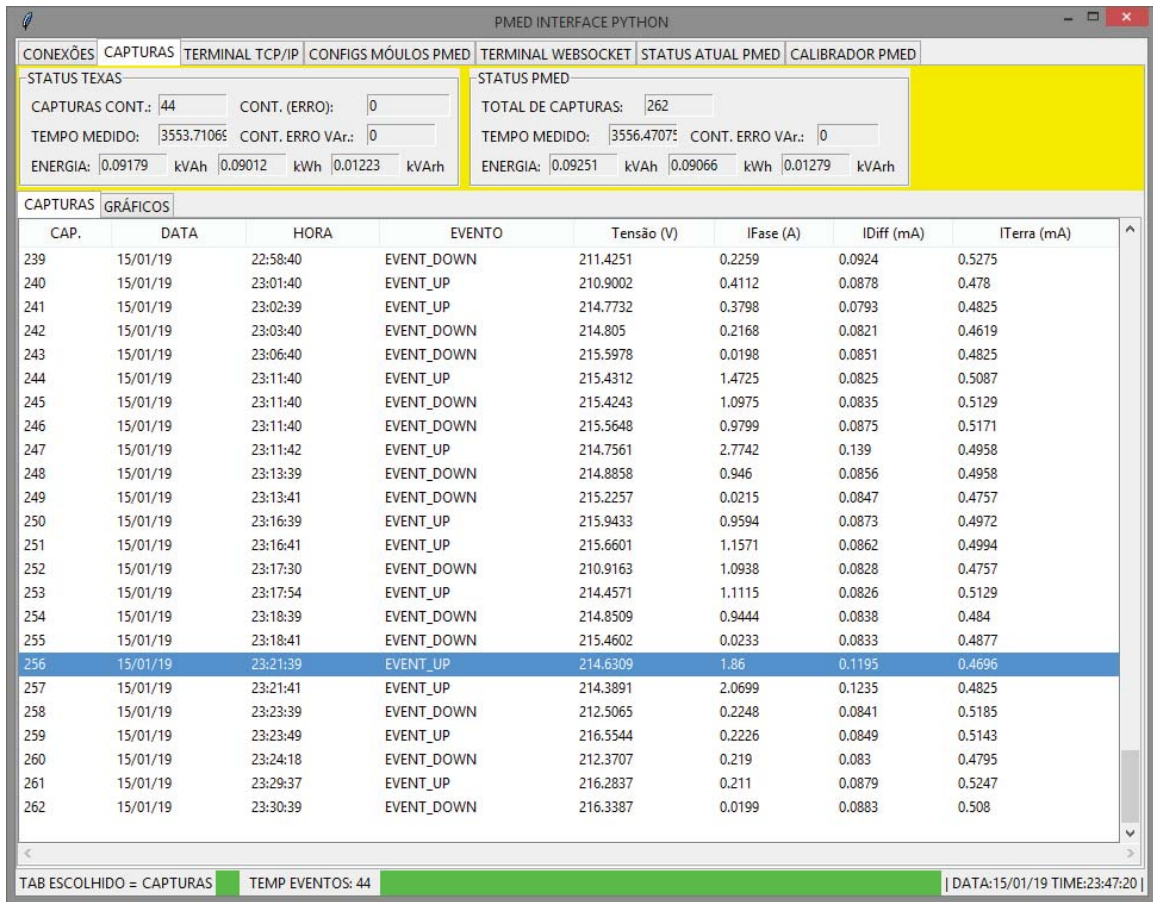


Figura 43. Tabela das capturas do SW.

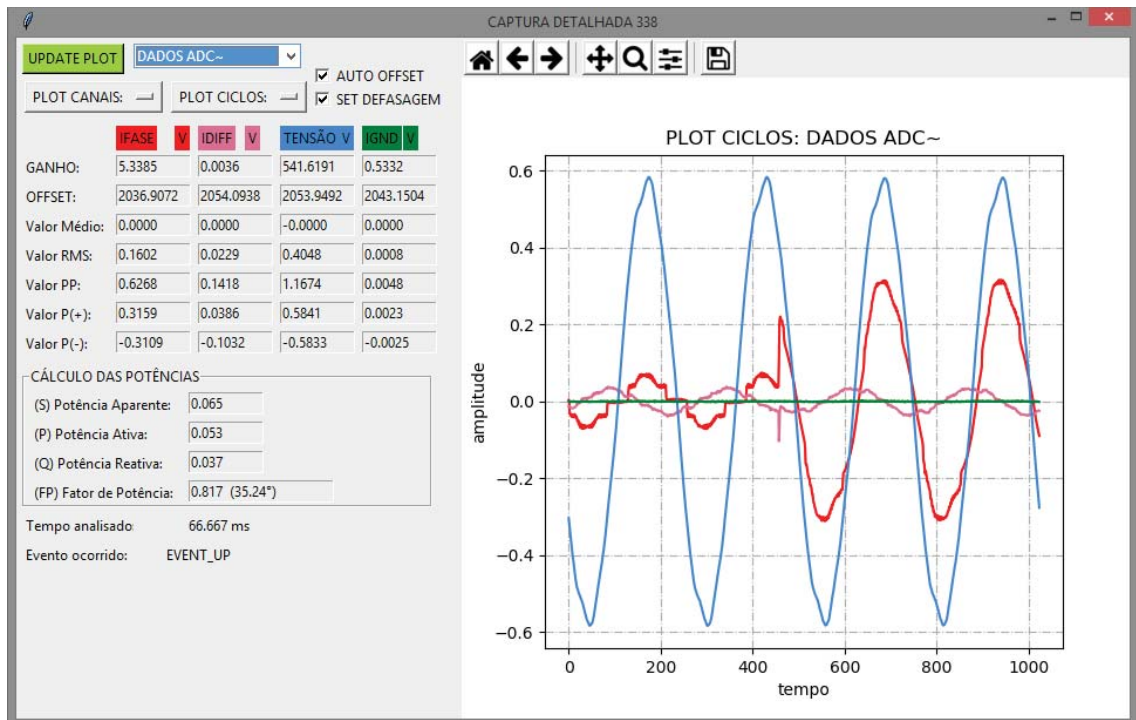


Figura 44. Tela dos detalhes sobre o evento.

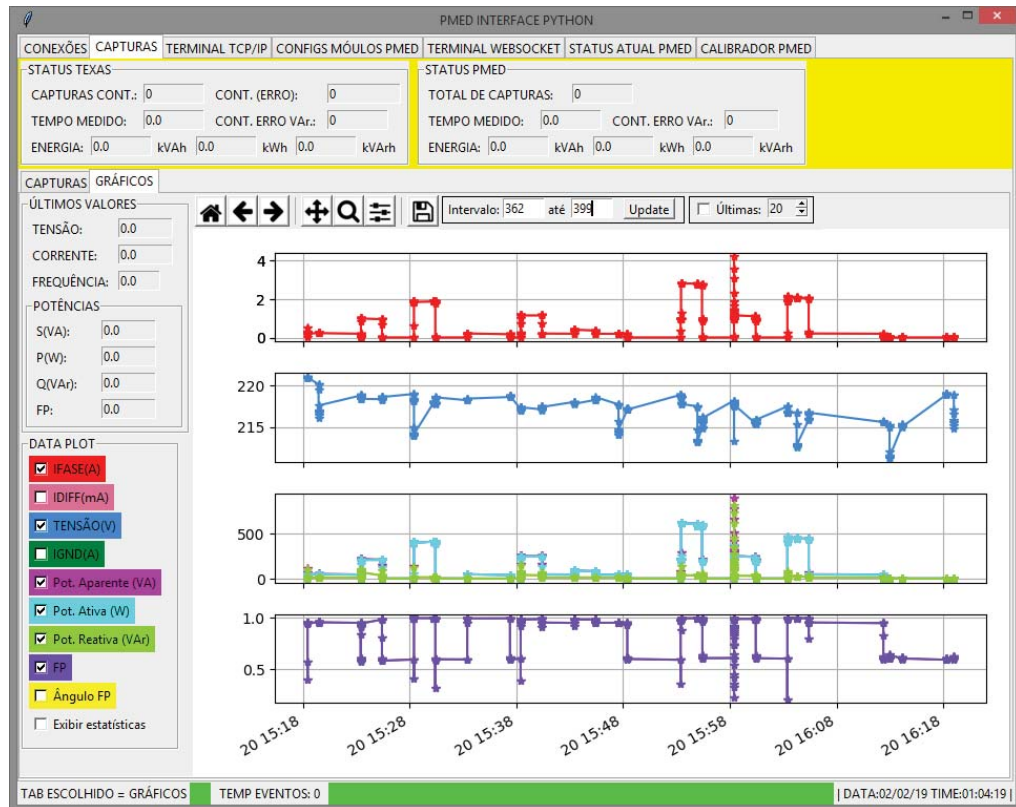


Figura 45. Tela dos gráficos de grandezas elétricas calculadas a partir dos eventos.

Na Figura 45 é demonstrado mais uma possibilidade de visualização das informações, foi utilizado o mesmo método para gerar os gráficos das Figuras 36 a 42. A única observação é que não se tem os dados capturados pelo medidor ELO, somente os dados armazenados no banco de dados sobre os eventos.

Na Figura 45 é demonstrado a opção de escolha de um intervalo de início e fim dos eventos a serem analisados. Os diversos *checkboxes* coloridos, a esquerda, servem de base para ativar ou desativar a plotagem dos gráficos na parte direita da figura. O eixo horizontal representa os horários e é compartilhado com todos os sinais selecionados nos *checkboxes*, pois ambos ocorreram no mesmo instante, logo ao aplicar por exemplo, uma ação de zoom ou deslocamento, todos os sinais se movem ao mesmo tempo.

De modo geral os scripts Python e o próprio SW PMED desenvolvidos, desde os algoritmos básicos para cálculo dos valores médios e eficazes até o cálculo das potências e energias bem como a criação dos gráficos e a incorporação dos módulos NumPy, SciPy e Matplotlib, entre outros, formaram uma grande documentação de aplicação da linguagem Python para fins de computação aplicada.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho descreveu uma plataforma de *hardware* e *software*, desenvolvida com base no Protegemed que é capaz de medir e calcular a energia utilizada por cada EEM. Com esta informação, obtida com o trabalho ora apresentado, é possível também medir e calcular o custo da energia de cada modelo de EEM, além de fazer a comparação de EEMs da mesma atividade, mas de marcas ou modelos diferentes. Esta plataforma desenvolvida pode ser adaptada para medir a energia não só de EEM, mas também de outros ambientes como residências ou indústrias, contribuindo para um maior conhecimento do consumo elétrico nesses ambientes. A plataforma é composta de um conjunto de sensores para aquisição dos sinais, um microcontrolador para tratar e enviar os dados a um computador. No computador, a plataforma conta com uma aplicação escrita na linguagem Python e um Banco de Dados.

Nas revisões de trabalhos relacionados, foram encontrados diversos assuntos abordando a medição de energia e detecção de tipo de cargas. Alguns dos trabalhos revisados realizam a detecção de eventos, analisam a qualidade de energia e também calculam o consumo da energia elétrica. No entanto, nenhum dos trabalhos apresenta a medição de energia e detecção do tipo de cargas por eventos, que é a forma como o Protegemed está estruturado. A partir destas constatações, foi possível perceber que o medidor de energia por eventos pode ser utilizado em outras áreas, não apenas vinculado ao Protegemed.

A plataforma trabalha com o sensoriamento de 10 ciclos completos das formas de onda analisadas (corrente e tensão), de forma similar ao trabalho iniciado em [2]. A captura e armazenamento dos dez ciclos também se justificam pela oportunidade de analisar o período transitório das capturas, quando o equipamento liga e desliga. Mesmo que nesta proposta, não foi realizada a análise do período transitório, o banco de dados está apto para esta tarefa. O mesmo ocorre com a captura da corrente diferencial e corrente de aterramento. Em ambos os dados, fica a disposição para trabalhos futuros, na medida em que o banco de dados já está armazenando estas informações.

A escolha da linguagem de programação Python 3 mostrou-se acertada e se deve ao fato da facilidade e rapidez de implementação dos algoritmos e a grande documentação encontrada em livros e na *Internet*. As bibliotecas (módulos na linguagem Python) como, por exemplo, NumPy, Scipy e Matplotlib são de grande importância para computação científica. Elas agregam um conjunto de funções prontas para aplicação de forma eficiente e amigável para lidar com vetores, gráficos, transformada de Fourier, entre outros.

O uso de um banco de dados foi importante, sendo possível organizar de forma eficiente e rápida os dados. A cada evento detectado pelo sistema embarcado, esse organiza um pacote (vetor) contendo dez ciclos (formas de onda) de cada um dos quatro canais digitalizados, isto é, dos quatro toroides que medem a tensão, corrente de alimentação, corrente diferencial e corrente de aterramento. Além disso, informações de tempo, contagem de energia Ativa, Aparente e Reativa, tipo de evento detectado entre outros, são agrupadas e enviadas a cada evento. O módulo SQLite3, que é um banco de dados leve e baseado em disco e não precisa de um processo de servidor separado. Permite também acessar o banco de dados usando uma variante não padrão da linguagem de consulta SQL. Sendo suficiente para os testes realizados no presente trabalho.

A plataforma é capaz de ajustar a defasagem da tensão em relação a corrente. Esta defasagem é função da baixa corrente (próxima de 1,0 mA) que circula pelo interior do toroide quando este é utilizado para medir a tensão entre os condutores fase e neutro. O cálculo do ajuste necessário foi realizado e validado com diferentes testes, chegando ao valor de deslocamento de 36 graus, usando parte de um dos 10 ciclos da captura.

Os testes práticos, realizados na seção 4.5, validaram o protótipo com base em um medidor eletrônico de referência ELO2101L. Os erros ficaram abaixo de 5% para cálculo da Energia Aparente e abaixo de 3% para cálculo da Energia Ativa, provando que é possível calcular as potências com base em eventos gerados pelas grandezas de tensão e corrente.

5.1. CONTRIBUIÇÕES AO PROTEGEMED

A partir do trabalho desenvolvido, percebe-se que a utilização do Protegemed no HSVP trouxe informações significativas para a equipe de engenheiros do hospital. Com o Protegemed, é possível saber se está ocorrendo uma fuga em algum EEM durante a cirurgia e o grau de risco de microchoque ao paciente. Também é possível obter o valor instantâneo das correntes de alimentação e diferencial de cada EEM, além de saber que dia, hora, minuto e segundo ele foi ligado e desligado, bem como somar o tempo que ficou ligado durante sua vida útil. Entretanto, o Protegemed não realiza o cálculo da energia utilizada por cada EEM. Outra mudança significativa em relação ao Protegemed de 2017/2018 foi a proposta de capturar 10 ciclos das formas de onda, ao invés de um ciclo das correntes de alimentação e diferencial.

Uma discussão à parte sobre o medidor de energia por eventos como uma nova função do Protegemed em ambiente hospitalar é sua utilização como fonte de informações sobre a energia entregue aos consumidores. Naturalmente, percebemos que o produto deste texto pode

ser utilizado em outras áreas e sua configuração de *hardware* já está adequada (ou quase) para uma delas: como gravador de dados sobre a tensão e correntes de uma instalação. Isto é relevante, principalmente, para a análise de consumidores com cargas não lineares, que também é o caso do consumidor hospital, mas não apenas ele.

O cálculo das potências e da energia de circuitos com cargas não lineares é atualmente estudado no Brasil (IEEE 1459-2010) para fins de tarifação e de qualidade de energia. Desta forma, o produto desta dissertação pode ser utilizado para obter informações dos consumidores e, assim, ajudar o grupo de estudo da ABNT/ANEEL a tomar decisões. Esta informação se justifica na medida em que a decisão sobre a tarifação (exceto pela multa), atualmente, não leva em conta a diferença entre consumidores que poluem a rede com harmônicos e consumidores que não poluem (ou poluem de forma insignificante). Desta forma, acredita-se que o produto gerado nesta dissertação pode ser útil tanto para a evolução do Protegemed, como para uma ferramenta adicional para estudar qualquer outra instalação elétrica, seja ela residencial, comercial ou industrial.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros ficará uma aplicação real da medição de energia elétrica de uma residência no período de um mês por exemplo, a fim de comparar resultados com a conta de energia elétrica da concessionária. Modificações nos sensores como capacidade de medir correntes maiores que 5,0 Arms devem ser consideradas também.

Quanto a geração dos eventos realizado pelo FW, novas possibilidades de eventos podem ser feitas, como mudanças de carga com relação ao triângulo de potências, onde envolve o uso do Fator de Potência e também uma análises de distorção harmônica da rede na qual servirá para fins de qualidade de energia entregue pela concessionária ou mesmo com relação aos tipos de aparelhos ligados na residência ou em um ambiente hospitalar.

Ainda com relação a geração de eventos, uma análise aprofundada deve ser realizada com relação ao uso da rede de comunicação, seja ela via cabo (*Ethernet*) ou redes sem fio (*wireless*), no quesito tráfego de dados pois como apresentado nos resultados do Teste 5 na seção 4.5 foram gerados 4.278 eventos em menos de três horas com uma média de 26,6 eventos por minuto. Assim, técnicas de filtragem de eventos com base no tipo de carga (especialmente as continuamente variáveis) devem ser estudadas e validadas a fim de manter os resultados corretos sem perder eventos significativos.

REFERÊNCIAS

- [1] SANTOS, J. C. *Atualização de hardware e firmware do Protegemed*. 2017. 74p. Dissertação Mestrado. PPGCA, UPF, Passo Fundo.
- [2] LUCAS, M. A. *MÉTODO PARA CAPTURA DE FORMAS DE ONDA DE CORRENTE ELÉTRICA VISANDO A DETECÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE ISOLAMENTO EM EQUIPAMENTOS ELETROMÉDICOS*. 2018. 45p. Dissertação Mestrado. PPGCA, UPF, Passo Fundo.
- [3] SPALDING, L. E. S. *Detecção de risco de microchoque através da corrente diferencial em equipamentos eletromédicos*. 2009. 115p. Tese Doutorado. PPGEE, UFSC, Florianópolis.
- [4] REBONATTO, M. T. *Métodos para Análise de Correntes Elétricas de Equipamentos Eletromédicos*. 2015. 115p. Tese Doutorado. PPGCC, PUC-RS, Porto Alegre.
- [5] VAZ, L. M. M. *Impactos e benefícios do sistema de medição centralizada. Estudo de caso numa concessionária brasileira de eletricidade*. 2012. 63p. Dissertação Mestrado. PósMQI, PUC-Rio, Rio de Janeiro.
- [6] LAMIN, H. *MEDIÇÃO ELETRÔNICA EM BAIXA TENSÃO: ASPECTOS REGULATÓRIOS E RECOMENDAÇÕES PARA IMPLANTAÇÃO*. 2009. 202p. Dissertação Mestrado. PPGEE, UnB, Brasília.
- [7] JÚNIOR, J. M. C. *UM MEDIDOR DE ENERGIA ELÉTRICA INTEGRADO EM REDES DE COMUNICAÇÕES*. 2014. 95p. Dissertação Mestrado. PPG-IC, UNICAMP, Limeira.
- [8] AMARAL, H. L. M. *DESENVOLVIMENTO DE UM SMART METER: um estudo sobre eficiência energética através das redes inteligentes*. 2014. 90p. Dissertação Mestrado. PPGEE, UNESP, Bauru.
- [9] *CONTRIBUIÇÕES TÉCNICAS – CONSULTA PÚBLICA ANEEL 015/2008*. Disponível em:
 <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/CONCERT%20CONTRIBUI%C3%87%C3%95ES%20Nota_T%C3%A9cnica_0013_2009.pdf>.
 Acesso em: 23 Nov. 2018.
- [10] NOGUEIRA, T. R. S. *UMA ANÁLISE DE PROTOCOLO PARA MEDIDORES DIGITAIS DE ENERGIA ELÉTRICA BT*. 2013. 85p. Dissertação Mestrado. PPG-E, UNIFEI, Itajubá.
- [11] RIGODANZO, J. *INSTALAÇÃO DE MEDIDORES INTELIGENTES NO BRASIL: UMA ANÁLISE ECONÔMICA*. 2015. 120p. Dissertação Mestrado. PPGEE, UFSM, Santa Maria.
- [12] *Relatório smart grid portaria 440-2010*. Disponível em:
 <<http://www.mme.gov.br/web/guest/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/acoes/energia-eletrica/relatorio-smart-grid>>. Acesso em: 22 Nov. 2018.
- [13] *ELO2101L*. Disponível em: <<http://www.elonet.com.br/wp-content/uploads/2017/12/Elo-2101L.pdf>>. Acesso em: 2 Ago 2018.
- [14] *WEG SMW 100*. Disponível em:
 <[https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Medidores-Inteligentes-de-](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Medidores-Inteligentes-de)

- Energia-El%C3%A9trica/Linha-SMW/Medidores-Inteligentes-de-Energia-El%C3%A9trica---Linha-SMW/p/MKT_WTD_SMART_METERS_SMW>. Acesso em: 12 Fev 2019.
- [15] RTAC001248. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001248.pdf>>. Acesso em: 22 Nov. 2018.
- [16] LEMOS, I. P. *MEDIDOR DE ENERGIA PARA AVALIAÇÃO À TARIFA BRANCA EM SMART GRIDS*. 2017. 79p. Dissertação Mestrado. CEATEC, PUC-Campinas, Campinas.
- [17] MORAES, P. M. *Sistema de medição de energia baseado no medidor de energia Teridian 71M6515H*. 2013. 129p. Dissertação Mestrado. , UMa, Funchal.
- [18] BACURAU, R. M. *MEDIDOR DE ENERGIA INTELIGENTE PARA DISCRIMINAÇÃO DE CONSUMO POR APARELHO ATRAVÉS DE ASSINATURA DE CARGAS*. 2014. 114p. Dissertação Mestrado. PPGEE, UNICAMP, Campinas.
- [19] ARAUJO, F. C. *SISTEMA DE MONITORAMENTO DO CONSUMO ELÉTRICO RESIDENCIAL COM UTILIZAÇÃO DE MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA COM COMUNICAÇÃO SEM FIO PARA MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO EM PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA*. 2018. 73p. Dissertação Mestrado. FEEC, UNICAMP, Campinas.
- [20] FIGUEIREDO, J. A. O. *AQUISIÇÃO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS Definição de arquitetura, método e validação em protótipo*. 2016. 102p. Dissertação Mestrado. PPGCA, UPF, Passo Fundo.
- [21] SANTOS, A. H. R. *SENSOR DE DETECÇÃO DE VARIAÇÃO DE TENSÃO PARA REDES DE BAIXA TENSÃO UTILIZANDO REDES SEM FIO IEEE 802.11*. 2016. 111p. Dissertação Mestrado. CEATEC, PUC-CAMPINAS, Campinas.
- [22] *Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 0*, 2008. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/modulo-8>>. Acesso em: 22 Nov. 2018.
- [23] CRUZ, E. C. A. *CIRCUITOS ELÉTRICOS: ANÁLISE EM CORRENTE CONTÍNUA E ALTERNADA*. RECURSO ONLINE ISBN 9788536518220. ed. SÃO PAULO: ERICA, 2014.
- [24] HART, D. W. *Eletrônica de Potência*. 1. ed. [S.l.]: AMGH, 2012.
- [25] ALBUQUERQUE, R. O. *Análise de circuitos em corrente alternada*. 11.ed. ed. São Paulo: Ética, 2002.
- [26] *POWERSIM*. Disponível em: <<https://powersimtech.com/products/psim/>>. Acesso em: 15 Jan 2018.
- [27] *PSIM User Manual book*. Disponível em: <<https://powersimtech.com/drive/uploads/2017/11/PSIM-User-Manual.pdf>>.
- [28] *Tipos de erros*. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/reamat/CalculoNumerico/livro-py/rdneadm-tipos_de_erros.html>. Acesso em: 23 Dez. 2018.
- [29] *Minipa ET1649*. Disponível em: <<http://www.minipa.com.br/multimetros/multimetros-digitais/45-et-1649>>. Acesso em: Jun nov. 2017.
- [30] *Minipa ET3367c*. Disponível em: <<http://www.minipa.com.br/alicates-produtos/alicates-digitais/357-et-3367c>>. Acesso em: 11 Jun 2017.
- [31] *DSO1072b manual*. Disponível em: <<https://www.tme.eu/fr/Document/8e37dc93653bcbd17ad4e5d2d194211b/54139-97004.pdf>>. Acesso em: 22 Set. 2017.

- [32] ARM® Cortex®-M4F-Based MCU TM4C1294 Connected LaunchPad™. Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/EK-TM4C1294XL>>. Acesso em: Outubro 2017.
- [33] CODE Composer Studio (CCS) Integrated Development Environment (IDE) for TM4x ARM MCUs, 2015. Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/ccstudio-tm4x>>. Acesso em: Outubro 2017.
- [34] SUMMERFIELD, M. *Programação em Python 3 Uma Introdução Completa à Linguagem Python*. 1. ed. [S.l.]: Alta Books, 2013.
- [35] *Módulo time*. Disponível em: <<https://docs.python.org/3/library/time.html>>. Acesso em: 4 Out. 2018.
- [36] AZZINI, H. A. D. *AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS PARA MONITORAMENTO NÃO INTRUSIVO DE CARGAS RESIDENCIAIS COM FINS DE AUDITORIA ENERGÉTICA*. 2012. 113p. Dissertação Mestrado. PPGEE, UFES, Vitória.
- [37] *GoldWave*. Disponível em: <<https://www.goldwave.com/>>. Acesso em: 22 Dez 2018.
- [38] *scipy spearmanr*. Disponível em: <<https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.spearmanr.html>>. Acesso em: 3 Jan 2019.
- [39] *scipy pearsonr*. Disponível em: <<https://docs.scipy.org/doc/scipy-0.14.0/reference/generated/scipy.stats.pearsonr.html>>. Acesso em: 2 Jan 2019.
- [40] *sklearn metrics*. Disponível em: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.mean_squared_error.html>. Acesso em: 2 Jan. 2019.