

CAIO LUIZ JODAS NOGUEIRA

**AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO MECÂNICO DE
UM MEDIDOR ELETRÔNICO DE ENERGIA ELÉTRICA POLIFÁSICO
UTILIZANDO TÉCNICAS COMPUTACIONAIS**

**MANAUS – AM
2022**

CAIO LUIZ JODAS NOGUEIRA

**AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO MECÂNICO DE UM
MEDIDOR ELETRÔNICO DE ENERGIA ELÉTRICA POLIFÁSICO UTILIZANDO
TÉCNICAS COMPUTACIONAIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental - PPG.EGPSA, do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia- ITEGAM, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

Orientador: Dr. Jandecy Cabral Leite

**MANAUS – AM
2022**

CAIO LUIZ JODAS NOGUEIRA

**AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO MECÂNICO DE
UM MEDIDOR ELETRÔNICO DE ENERGIA ELÉTRICA POLIFÁSICO
UTILIZANDO TÉCNICAS COMPUTACIONAIS**

Esta dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do título de Mestre do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia – ITEGAM.

Manaus-AM, 24 de agosto de 2022.



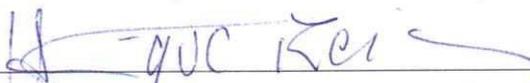
Prof. Dr. Jandecy Cabral Leite

Coordenador do PPG.EGPSA - ITEGAM

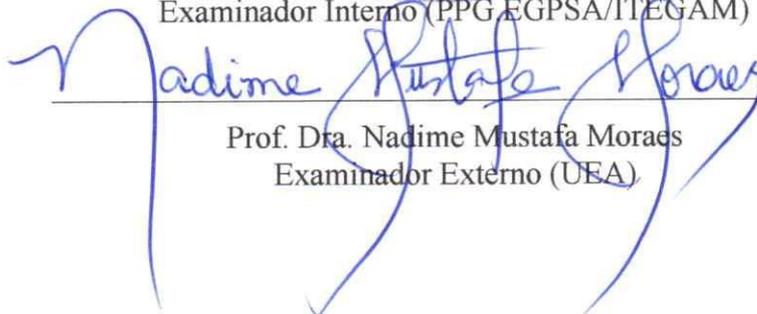
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Jandecy Cabral Leite
Orientador (PPG.EGPSA/ITEGAM)



Prof. Dr. Manoel Henrique Reis Nascimento
Examinador Interno (PPG.EGPSA/ITEGAM)



Prof. Dra. Nadime Mustafa Moraes
Examinador Externo (UEA)

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Biblioteca do ITEGAM**

Nogueira, Caio Luiz Jodas, 2022 - AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO MECÂNICO DE UM MEDIDOR ELETRÔNICO DE ENERGIA ELÉTRICA POLIFÁSICO UTILIZANDO TÉCNICAS COMPUTACIONAIS / Caio Luiz Jodas Nogueira - 2022. 122 f., il: Colorido

Orientador: Dr. Jandecy Cabral Leite

Dissertação: Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia, Programa de Pós Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental (PPG-EGPSA), Manaus - AM, 2022.

1. Medidor Eletrônico 2. Rede LoRa 3. Consumo de Energia 4. Modelagem
5. Técnicas computacionais

CDD - 1002.ed.2022.19

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus, por ser bom o tempo todo.

A minha família que sempre incentivou os estudos.

Aos meus professores, em especial Dr. Jandecy Cabral Leite que aceitou ser meu orientador e me conduziu nessa jornada.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental do ITEGAM na qual foi solícito e atendeu as expectativas de aprendizado em aulas.

A empresa Wasion da Amazônia Indústria de Instrumentos Eletrônicos LTDA pelo apoio financeiro por meio da lei 6.008/1991 para projeto de PD&I (SUFRAMA/CAPDA).

Ao ITEGAM e a coordenação acadêmica por disponibilizar toda a infraestrutura e equipamentos para estudo e análises laboratoriais em aulas.

Agradeço à Instituição, que permitiu que esta obra fosse realizada.

Epígrafe

”A vitalidade é demonstrada não apenas pela persistência, mas pela capacidade de começar de novo.”

F. Scott Fitzgerald

Dedicatória

Dedico esta pesquisa a todos aqueles que contribuíram para a sua realização: ao Altíssimo, à minha família, aos colegas de trabalho e todos da comunidade científica.

RESUMO

NOGUEIRA, Caio Luiz Jodas, 2022 - Avaliação do desenvolvimento de protótipo mecânico de um medidor eletrônico de energia elétrica polifásico utilizando técnicas de computacionais 2022. p. 122. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental (EGPSA), Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (ITEGAM), Manaus, 2022.

Com desenvolvimento do protótipo da eletrônica e mecânica com proposta para de um novo medidor eletrônico polifásico de energia elétrica visando fabricação posteriori, de acordo com suas especificações de fabricação como produto no meio industrial. O objetivo do artigo foi desenvolver um protótipo de um novo medidor eletrônico polifásico de energia elétrica utilizando rede LoRa, para medição remota do consumo de energia, o protótipo foi desenvolvido para uma empresa do Polo Industrial de Manaus (PIM). Foi utilizado uma Metodologia Experimental, apresentando a proposta do modelo, base mecânica, Bloco de terminais, Tampa do medidor, Os Terminais, A Eletrônica, Interface LoRa de Transmissão e a Interface LoRa de Recepção. A coleta de dados foi realizada através de reuniões com profissionais da empresa, visitas técnicas, e investigação sobre a importância do tema. Os resultados mostraram que as principais fases do desenvolvimento foram validadas, e que a comunicação entre medidores à longa distância mostrou-se eficaz para o registro do consumo de energia, tendo potencial condição de fabricação.

Palavras chave: Medidor eletrônico, Rede LoRa, Consumo de Energia, Modelagem, Técnicas computacionais.

ABSTRACT

NOGUEIRA, Caio Luiz Jodas, 2022 - Evaluation of the development of a mechanical prototype of a polyphase electronic energy meter using computational techniques 2022. p. 122. Dissertation from the Post-Graduate Program in Engineering, Management Process, Systems and Environmental (PPG.EMPSE), Institute of Technology and Education Galileo in the Amazon (ITEGAM), Manaus, 2022.

With the development of the electronics and mechanics prototype with a proposal for a new polyphase electronic electric energy meter aiming at subsequent manufacture, according to its manufacturing specifications as a product in the industrial environment. The objective of the article was to develop a prototype of a new polyphase electronic electric energy meter using LoRa network, for remote measurement of energy consumption. The prototype was developed for a company from the Industrial Pole of Manaus (PIM). An Experimental Methodology was used, presenting the model proposal, mechanical base, Terminal Block, Meter Cover, The Terminals, The Electronics, Transmission LoRa Interface, and the Reception LoRa Interface. Data collection was carried out through meetings with company professionals, technical visits, and research on the importance of the topic. The results showed that the main development phases were validated, and that the long-distance meter communication proved to be effective for energy consumption recording, and has potential manufacturing condition.

Key Words: Electronic Meter, LoRa Network, Energy Consumption, modeling and computational techniques.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Fluxo de envio e recebimento de dados via LoRa.....	38
Figura 2.1	Diagrama de um medidor eletrônico.....	41
Figura 2.2	Diagrama de blocos medidor trifásico.....	43
Figura 2.3	Banca de aferição/ajuste de medidores eletrônicos.....	45
Figura 2.4	Conexão de medição via shunt.....	48
Figura 2.5	Modelo de rede elétrica em uso no Brasil.....	50
Figura 2.6	Topologia da rede LoRa.....	52
Figura 3.2	Quadro Trello.....	55
Figura 3.3	Dimensões máximas externas de medidores polifásicos.....	58
Figura 3.4	Dimensões externas utilizadas no medidor LoRa Polifásico.....	58
Figura 3.5	Arduino Nano.....	59
Figura 3.6	Display LCD.....	59
Figura 3.7	LoRa Esp32.....	59
Figura 3.8	Mapa mental das atividades de software.....	61
Figura 4.1	Componentes de um medidor eletromecânico.....	63
Figura 4.2	Princípio de funcionamento medidor eletrônico.....	64
Figura 4.3	Display Nextion LCD.....	67
Figura 4.4	Idealização de um protótipo no Fritzing.....	68
Figura 4.5	Circuito Eletrônico Display Nextion 2.4’’.....	68
Figura 4.6	Nextion Editor.....	69
Figura 4.7	Display em funcionamento.....	69
Figura 4.8	Comunicação UART.....	70
Figura 4.9	Módulo sensor de corrente ACS712.....	71
Figura 4.10	Diagrama esquemática do Módulo sensor de corrente ACS712.....	71

Figura 4.11	Pinos do sensor de corrente ACS712.....	71
Figura 4.12	Ligação do ACS712 com o Arduino Nano.....	72
Figura 4.13	Ligação do ACS712 com o Arduino Nano.....	72
Figura 4.14	Circuito completo de medição de corrente.....	73
Figura 4.15	Circuito de medição e controle de corrente testado em protoboard....	73
Figura 4.16	Diagrama das funções do Arduino Nano.....	74
Figura 4.17	Arduino Nano.....	75
Figura 4.18	Arduino IDE.....	75
Figura 4.19	ESP32 LoRa.....	76
Figura 4.20	Teste de transmissão de dados com LoRa.....	77
Figura 4.21	Informações sendo enviadas via LoRa.....	77
Figura 4.22	Teste de recepção de dados com LoRa.....	77
Figura 4.23	Evidência de emissão e recepção via LoRa.....	78
Figura 4.24	Comunicação entre Arduino e LoRa.....	78
Figura 4.25	Diagrama completo medidor LoRa Polifásico.....	79
Figura 4.26	Medidor completo.....	79
Figura 4.27	Envio de dados do medidor via LoRa 1.....	80
Figura 4.28	Envio de dados do medidor via LoRa 2.....	80
Figura 4.29	Transmissão e Recepção via LoRa.....	80
Figura 4.30	Transmissão e Recepção via LoRa.....	81
Figura 4.31	Medidor eletrônico polifásico LoRa.....	81
Figura 5.1	Esquema de comunicação ESP32 LoRa.....	82
Figura 5.2	CS2672B	87
Figura 5.3	Medidas de altura e largura do medidor protótipo.....	87
Figura 5.4	Base do dispositivo de Tensão Aplicada.....	89
Figura 5.5	Torres.....	89

Figura 5.6	Bases de agulhas.....	90
Figura 5.7	Agulhas de contato.....	90
Figura 5.8	Modelagem do dispositivo de tensão aplicada.....	91
Figura 5.9	Torres.....	92
Figura 5.10	Desenho técnico 2D - Base de agulhas.....	93
Figura 5.11	Desenho técnico 2D - Agulha de contato.....	94
Figura 5.12	Processo de transformação do relevo em escala de cinza.....	95
Figura 5.13	Geração de arquivo G-Code.....	96
Figura 5.14	Interface da máquina RMC 3000.....	96
Figura 5.15	Confecção da base inferior.....	97
Figura 5.16	Confecção das bases de agulha.....	97
Figura 5.17	Confecção das torres.....	97
Figura 5.18	Montagem do sistema de tensão aplicada. Parte 1.....	98
Figura 5.19	Montagem do sistema de tensão aplicada. Parte 2.....	98
Figura 5.20	Montagem do sistema de tensão Aplicada. Parte 3.....	98
Figura 5.21	Montagem do sistema de tensão aplicada. Parte 4.....	98
Figura 5.22	Base de agulhas de comunicação.....	100
Figura 5.23	Berço.....	100
Figura 5.24	Montagem base de agulhas.....	101
Figura 5.25	Montagem completa dispositivo de parametrização.....	101
Figura 5.26	Desenho técnico base de agulhas.....	103
Figura 5.27	Lista de peças Dispositivo de parametrização.....	104
Figura 5.28	Peça importada para o ArtCam.....	105
Figura 5.29	Diagrama elétrico do dispositivo de parametrização.....	107
Figura 5.30	Circuito eletrônico do sistema de parametrização.....	108
Figura 5.31	Transformador toroidal.....	109

Figura 5.32	Hub USB 2.0 com 7 portas.....	109
Figura 5.33	Raspberry Pi 3.....	109
Figura 5.34	Diagrama elétrico do dispositivo de parametrização (software proteus; 1/2)	110
Figura 5.35	Conversor USB para serial TTL RS232 - PL2303.....	110
Figura 5.36	Esquema elétrico do PC817.....	110
Figura 5.37	Diagrama elétrico da placa isoladora SIMPLEX.....	111
Figura 5.38	Projeto de PCB da placa isoladora SIMPLEX.....	111
Figura 5.39	Comparação entre projeto e modelo final.....	111
Figura 5.40	Projeto de PCB da placa isoladora DUPLEX.....	111
Figura 5.41	Diagrama elétrico do dispositivo de parametrização (software proteus; 2/2)	112
Figura 5.42	Display LCD 16x2 backlight verde com I2C soldado.....	112
Figura 5.43	Diagrama elétrico do dispositivo de tensão aplicada.....	112
Figura 5.44	Diagrama elétrico do dispositivo de tensão aplicada.....	113
Figura 5.45	Diagrama elétrico no software Proteus.....	114
Figura 5.46	Contactora CNU-32R.....	114
Figura 5.47	Conector (wago) de emenda 5 vias mola altronic.....	114
Figura 5.48	Diagrama elétrico do dispositivo de gravação de firmware.....	115
Figura 5.49	Diagrama do dispositivo de gravação de firmware (Software Proteus)	116
Figura 5.50	Gravadores de firmware.....	116
Figura 5.51	Triângulo das potências.....	117
Figura 5.52	Quadrante do Fluxo de Potência.....	118
Figura 5.53	Vista perspectiva do Dispositivo de Ajuste.....	120
Figura 5.54	Vista frontal do Dispositivo de Ajuste.....	120

Figura 5.55	Cria a percepção ao desenvolvedor da ideia geral do equipamento, facilitando a montagem do dispositivo.....	121
Figura 5.56	IHM para setar parâmetros da CNC.....	122
Figura 5.57	Confecção da base inferior.....	122
Figura 5.58	Confecção do berço.....	122
Figura 5.59	Confecção de peças em poliacetal.....	122
Figura 5.60	Usinagem da base frontal.....	123
Figura 5.61	Usinagem do suporte dos cilindros.....	123
Figura 5.62	Peças confeccionadas na CNC.....	123
Figura 5.63	Base do dispositivo de ajuste.....	124
Figura 5.64	Montagem do suporte da base de agulhas.....	124
Figura 5.65	Montagem do berço.....	124
Figura 5.66	Montagem de peças em alumínio.....	125
Figura 5.67	Dispositivo de ajuste do medidor LoRa Polifásico.....	125
Figura 5.68	Raspberry Pi Pico (RP2040)	126
Figura 5.69	Representação do protocolo I2S.....	127
Figura 5.70	Comparação do erro de resolução.....	128
Figura 5.71	DAC UDA1334A.....	128
Figura 5.72	Ligação elétrica UDA1334A.....	128
Figura 5.73	Sensor de Corrente CR8459-2000N.....	129
Figura 5.74	Circuito de Acoplamento do Sensor de Corrente.....	129
Figura 5.75	Mecanismo de leitura de amostras.....	129
Figura 5.76	Comparação da medição do ADC com o osciloscópio.....	129
Figura 5.77	Circuito de Controle de Tensão e Corrente.....	130
Figura 5.78	Teste de Controle de tensão e corrente da Fase A.....	130
Figura 5.79	Diagrama de funcionamento do circuito de potência.....	131

Figura 5.80	Ligação do circuito de potência.....	131
Figura 5.81	Arquitetura do software.....	132
Figura 5.82	Buffer de recepção do ADC.....	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Cenário anterior e pós pesquisa	35
Tabela 2.1	Limites de erro percentuais para medição de energia ativa	45
Tabela 2.2	Limites de erro percentuais para medição de energia reativa	46
Tabela 2.3	Modelos de redes TCP/IP e Protocolos IoT.....	51
Tabela 2.4	Principais características da tecnologia LoRa.....	53
Tabela 3.1	Fluxo do projeto.....	54
Tabela 4.1	Conexão entre Display e Arduino.....	67
Tabela 4.2	Modelos do chip ACS712.....	71
Tabela 4.3	Conexão entre módulo relé e Arduino.....	72
Tabela 5.1	Sentido do Fluxo por Quadrante.....	118
Tabela 5.2	Tipo de Potência por Quadrante	118
Tabela 5.3	Limites de erro percentual para medidores de energia ativa.....	119
Tabela 5.4	Limites de erro percentual para medidores de energia reativa.....	119
Tabela 5.5	Especificação técnica do processador RP2040.....	126

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1	Ferramentas e softwares utilizados no projeto.	55
Quadro 3.2	Tecnologia utilizadas no projeto.	57

LISTA DE SIGLAS

EGPSA	Engenharia, Gestão de Processos, Sistema e Ambiental
ITEGAM	Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia
PIM	Polo Industrial de Manaus
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LCD	Display de Cristal Líquido
LORA	Long Range
SMD	Surface Mounting Devices
SMT	Surface Mounting Technology
LORAWAN	Long Range Wide Area
NETWORKIOT	Internet das Coisas
IP	Internet Protocol
CNC	Controle Numérico Computadorizado
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
NBR	Norma técnica
CA	Corrente Alternada
V	Tensão
I	Corrente
W	Velocidade angular
N	Neutro
DFS	Direct Field Sensor
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
RTM	Regulamento Técnico Metrológico
SG	Smart Grid
REI	Rede de Energia Inteligente
TO	Tecnologia Operacional
TI	Tecnologia da Informação
LPWAN	Low Power Wide Area Network
EAP	Estrutura Analítica do Projeto
Z	Impedância

R Resistência

CAD Desenho Assistido por Computador

CAM Manufatura assistida por computador

CSS Chirp Spread Spectrum

HMI Human Machine Interface

RTP Resistive Touch Panel

CTP Capacitive Touch Panel

UART Universal Asynchronous Receiver and Transmitter

RMS Root Mean Square

OLED Diodo Orgânico Que Emite Luz

ADC Analog-to-Digital-Converter

A Amperes

DMA Direct Memory Access

MATLAB MATrix LABoratory

PID Proportional, Integrative and Derivativa

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	23
1. INTRODUÇÃO	23
1.1 Justificativa do problema da pesquisa	24
1.2 OBJETIVOS	26
1.2.1 Geral	26
1.2.2 Objetivos específicos	26
1.3 Contribuições e Relevância do Estudo	26
1.4 Organização dos capítulos	28
CAPÍTULO II	30
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
2.1 Medidores eletrônicos	30
2.2 Diagrama de blocos	32
2.3 Aferição de medidores	33
2.4 Partes do medidor eletrônico	36
2.5 Aquisição de dados	36
2.6 Sensor de corrente – resistor shunt	37
2.7 Avanços tecnológicos	38
2.8 Arquitetura de redes de comunicação	40
2.9 Long Range Wide Area Network (LoRaWAN)	41
2.10 Principais características da tecnologia LoRa	42
CAPÍTULO III	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 Materiais	43
3.1.2 Arquitetura da Solução	48
3.2 Métodos do Software	51
CAPÍTULO IV	53

4. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE E A CONSTRUÇÃO DO MEDIDOR POLIFÁSICO	53
4.1 Desenvolvimento do Software.....	53
4.1.1 Software embarcado.....	53
4.1.2 Interface LoRa de Transmissão	54
4.1.3 Arduino Nano.....	55
4.1.4 Interface LoRa de Recepção	56
4.2 Desenvolvimento mecânico do protótipo medidor LoRa	56
4.2.1 Desenvolvimento de dispositivos para validação do protótipo	56
4.2.1.2 Tensão Aplicada.....	57
4.2.1.3 Metodologia do ensaio	57
4.2.1.4 Equipamento utilizado para gerar a tensão	58
4.3 Desenvolvimento 3D	58
4.4 Criação de desenhos 2D.....	63
4.5 Confecção de peças em CNC e ferramentaria.....	67
4.6 Montagem do dispositivo	70
4.7 Dispositivo de parametrização	71
4.7.1 Desenvolvimento de modelagem 3D.....	72
4.7.2 Montagem.....	73
4.7.3 Desenho técnico 2D	75
4.7.4 Usinagem	78
4.8 Elaboração dos diagramas	79
4.9 Dispositivo de parametrização	80
4.10 Dispositivo de ensaio de tensão aplicada.....	87
4.11 Dispositivo de gravação de firmware.....	90
4.12 Dispositivo de ajuste	92
4.12.1 Modelagem 3D	95

4.12.2	Desenhos 2D	96
4.12.3	Usinagem	97
4.12.4	Montagem	100
4.12.5	Elétrico e Eletrônico.....	102
4.12.6	Firmware Embarcado.....	109
CAPÍTULO VI.....		110
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	110
5.1	CONCLUSÕES.....	110
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	111
REFERÊNCIAS.....		112
APÊNDICES.....		119

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Medidores de energia elétrica são equipamentos capazes de mensurar o consumo de energia elétrica de uma unidade consumidora. Os aparelhos de medição de energia elétrica, estão presentes na maioria das casas e habitações no mundo, desde uma pequena sala comercial a uma grande indústria. O uso deles é de extrema importância para a verificação e cálculo do consumo de energia elétrica do circuito elétrico que está interligado junto a ele. Dentre os medidores de energia elétrica convencionais, vem se destacando medidores eletrônicos, onde através da eletrônica, consegue-se obter maiores facilidades e inovação na maneira usual de se medir energia elétrica. O emprego de medidores de energia elétrica associados com redes de comunicação de dados vem com o intuito não só de diminuir o número de ocorrências de falhas, mas principalmente para fornecer mais informações em tempo real do usuário da rede elétrica e a busca da inovação do sistema elétrico no mundo.

Existem basicamente dois tipos de medidores de energia elétrica, o medidor eletromecânico e o medidor eletrônico. Podendo variar entre medidores monofásicos, bifásicos e trifásicos, apresentando outras diversas características.

Com o avanço na tecnologia, em especial, no sistema de distribuição de energia elétrica, percebemos uma modernização na aferição de consumo de energia elétrica, que antes, eram feitas através de leituras manuais por medidores eletromecânicos. Os medidores eletrônicos, por sua vez, conseguem garantir uma leitura mais precisa dos consumos e em tempo real, o que o torna mais eficaz na aferição. Outro ponto de bastante importância, é o fato de quando interligado a uma rede, é possível acompanhar o consumo remotamente, evitando prejuízos de mão de obra e deslocamento para fazer as leituras.

Com isso, o consumidor final pode ter uma energia de melhor qualidade, reduzindo problemas com interrupção e variações no sistema de energia. Com o uso dos medidores do tipo eletrônico, é possível obter vantagens significantes em comparação com os medidores de energia eletromecânicos, sendo elas:

- Automatização do processo de aferição de energia elétrica;
- Redução do tempo do funcionário em realizar as medições manuais;
- Acompanhamento em tempo real;
- Confiabilidade nas medições aferidas.

A empresa pesquisa é o fornecedor líder de medição inteligente chinesa, distribuição e utilização de energia inteligente e solução integrada de gerenciamento de economia de energia, com a missão de se comprometer a ser o “Especialista em Medição de Energia e Economia de Energia”. Em 2005 iniciou o desenvolvimento de soluções energéticas fora de seu país origem, em 2019 iniciou suas atividades em Manaus, buscando fornecer soluções em medidores eletrônicos de energia para todo território nacional.

Com o foco no desenvolvimento de medidores com mostrador de cristal líquido, observando a maior demanda do mercado os quais tiveram uma grande aceitação junto a seus clientes, criou uma grande expectativa por outros produtos e a consequente necessidade de ampliação de sua linha de produtos. Este projeto visou desenvolver um novo medidor polifásico aplicando a tecnologia de rede LoRa. Os cenários são apresentados na Tabela 1.1, o comparativo das características entre um modelo de medidor polifásico comercializado atualmente e o novo modelo desenvolvido.

Tabela 1.1 - Cenário anterior e pós pesquisa

Medidor polifásico	Novo medidor polifásico com rede LoRa
Não possui acesso remoto	Acesso remoto via aplicativo
Medidor com mostrador eletromecânico	Medidor com mostrador digital com controlador ST7920
Componentes oriundos do exterior com a necessidade de montagem em SMD e SMT	Sistema embarcado com placas de fácil aquisição no mercado local

1.1 Justificativa do problema da pesquisa

Os medidores de energia elétrica da empresa estudado possuem como mostrador de quantidade de Kilowatts consumido, um “registrador ciclométrico”. Esse registrador não possui uma precisão bem acurada mesmo estando dentro das normas técnicas do INMETRO. Para garantir uma melhor precisão do consumo real e uma melhor aferição desse consumo pelos profissionais da concessionária de energia elétrica. A empresa opta por desenvolver medidores com mostrador digital, display de cristal líquido – LCD, com objetivo de tornar mais preciso a aferição do consumo de energia elétrica pelos “leituristas” da concessionária de energia. Com o objetivo de aumentar o leque de produtos da empresa e aumentar o número de clientes a

empresa almeja desenvolver os medidores para medir o consumo de energia elétrica dos consumidores.

O investimento baseia-se no desenvolvimento de novas tecnologias a serem implementadas nos medidores eletrônicos, por se tratar de um avanço tecnológico de rede LoRa em medidores, fez-se necessário buscar equipes de desenvolvimento para este projeto.

A estratégia da empresa, de forma a se destacar dos concorrentes, é fazer um design voltado para a manufatura e de alto desempenho em campo e se diferenciar em custos produtivos e excelência operacional. Os medidores produzidos pela empresa utilizam sistema de visual de aferição pelo operador o sistema ciclométrico, esse sistema possui incerteza de medição realizada pelos profissionais das concessionárias de energia elétrica, uma vez que, quando os números estavam entre um dígito e outro, o pessoal responsável pela medição do Kwatts/horas do consumidor atribui o maior valor, não sendo, portanto, o valor correto medido. Com o desenvolvimento do medidor de energia utilizando o display LCD fica muito mais fácil e prático a medição de consumo pelos profissionais das concessionárias, evitando assim erros de medição. Trazendo assim uma possível economia para os consumidores de energia elétrica. A empresa se especializou no desenvolvimento de medidores eletrônicos polifásicos – Mede fase A e C ou A, B e C da rede elétrica, com a evolução tecnológica, pretende-se implementar LoRa no medidor DOW1310L OE2.

A implementação de redes inteligentes possibilita otimizar e tornar mais seguro o fornecimento de energia, recompor rapidamente o sistema elétrico em caso de interrupções, possibilitar a geração distribuída por fontes renováveis, estimular o uso de veículos elétricos, medir o consumo de energia, água e gás à distância, monitorar o consumo de energia pelos usuários, identificar pontos de perda de energia, testar aplicações e serviços para cidades inteligentes.

A medição inteligente poderá auxiliar na redução de desperdícios de energia no setor residencial. Para que isso seja possível, é necessário que os consumidores tenham fácil acesso às tecnologias disponíveis, com o monitoramento do consumo individual de cada dispositivo elétrico em sua residência mostrando de forma monetária quanto cada elemento do sistema elétrico residencial consome em um determinado intervalo de tempo.

Atualmente, os sistemas de medição são limitados em relação a quantidade e qualidade de informação que pode ser medida em um determinado ponto da residência. Além disto, a

integração entre diferentes sistemas dentro da residência também é complexa tornando o trabalho desafiador.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Avaliar o desenvolvimento do protótipo mecânico de medidor eletrônico polifásico com implantação da rede LoRa utilizando tecnologias computacionais.

1.2.2 Objetivos específicos

- Projetar desenhos mecânicos capaz de satisfazer as demandas de construção do protótipo com placas e circuitos eletrônicos do medidor;
- Desenvolver partes mecânicas do protótipo do medidor polifásico;
- Elaborar os procedimentos mecânicos do protótipo medidor LoRa;
- Construir peças em CNC e ferramentaria, baseado em modelagem 2D e 3D;
- Criar modelo matemático capaz de satisfazer as ferramentas computacionais para a implantação da rede LoRa, e;
- Validar dispositivos do protótipo mecânico para implementação na empresa.

1.3 Contribuições e Relevância do Estudo

Esse novo modelo de medidor eletrônico de energia elétrica foi projetado por meio de investimento de projeto de PD&I pela Lei de Informática/CAPDA-SUFRAMA, o protótipo da estrutura mecânica, software e hardware foi disponibilizado para empresa estudada, para homologação pelas organizações legais responsáveis pela validação do produto (INMETRO). A equipe de desenvolvimento precisou criar o produto, testar e disponibilizar para empresa submeter a homologação dos medidores visando atender as normas técnicas vigentes do mercado de energia elétrica:

- Anterior ao projeto: Mostrador com registrador eletromecânico e não possuía tecnologia para concessionária acessar os dados de consumo remotamente.
- Pós projeto: Mostrador com registrador digital e implementação de rede LoRa para acesso remoto a dados como consumo da energia.

A tecnologia do projeto foi a implementação da rede LoRa em um novo modelo de medidor eletrônico e com mostrador digital, que nos atuais não possuem ambas as

tecnologias. LoRa consiste em uma tecnologia de envio de dados sem fio (via rádio frequência), para habilitar a transmissão de longa distância e conta com baixo consumo de energia.

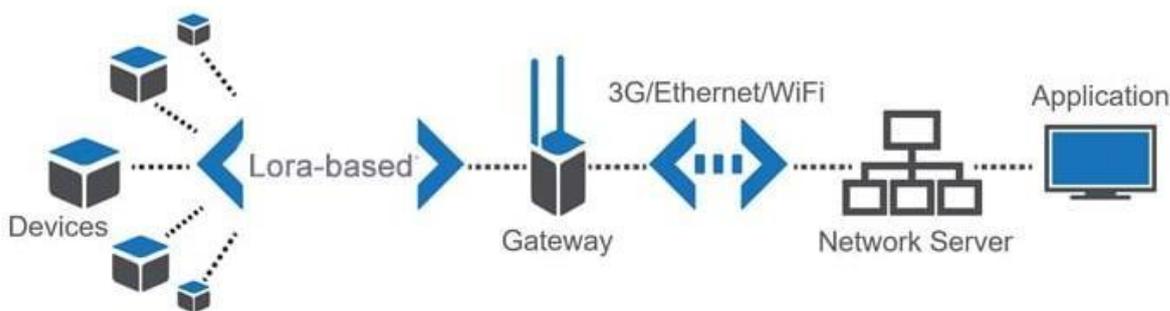
A arquitetura da rede do LoRaWAN funciona em formato de estrela. Assim, ela permite preservar a vida útil da bateria e a conectividade de longo alcance. No geral, a topologia é composta basicamente por dispositivos finais, gateways, servidores de rede e servidores de aplicação.

LoRaWAN define a arquitetura do sistema e o protocolo de comunicação para a rede LoRa. Permite um link de comunicação de longo alcance seguro e confiável. LoRaWAN também gerencia taxas de dados, frequências de comunicação, e otimização de energia para todos os dispositivos LoRa.

Nós LoRa em uma rede LoRa são baseados em comunicação assíncrona, e eles começam a transmitir quando têm dados disponíveis para enviar. Isso permite que uma rede LoRa troque a sensibilidade pela taxa de dados com uma largura de banda de canal fixo. Envolve principalmente selecionar a quantidade de propagação usada (que é um parâmetro selecionável entre 7 and 12). Esse fator de espalhamento determina a sensibilidade de um nó LoRa e determina sua taxa de dados.

Os dados transmitidos por um nó LoRa são recebidos por vários gateways LoRa, que encaminham os pacotes de dados recebidos para um servidor de rede centralizado (Servidor IoT). O servidor IoT filtra os pacotes duplicados, gerencia a rede e executa verificações de segurança. O servidor envia esses dados para os módulos de aplicativos, painéis de controle, ou dispositivos inteligentes conectados. Dessa forma, o protocolo LoRaWAN mostra alta confiabilidade e precisão para cargas moderadas, a Figura 1 mostra o fluxo de envio e recebimento de dados via LoRa.

Figura 1.1 - Fluxo de envio e recebimento de dados via LoRa.



Conforme figura 1, o sensor LoRa, quando incorporado com conectividade sem fio e protocolo LoRa, forma um nó LoRa. Um nó LoRa coleta os dados necessários do sensor e os envia para o LoRa Gateway. Um gateway é um dispositivo utilizado para conectar vários tipos de rede. LG01 é um Gateway LoRa que serve para conectar a rede sem fio e a rede IP LoRa, recebe dados do dispositivo LoRa (Nó) na rede LoRa via LoRa sem fio e envia para o servidor IoT na rede IP via. Um servidor IoT é basicamente um servidor em nuvem que permite conectividade entre vários dispositivos. Ele recebe e armazena dados de vários dispositivos e permite o acesso em várias plataformas. No caso de uma rede LoRa, o servidor IoT recebe dados do LoRa Gateway e os armazena em conformidade. Esses dados podem ser acessados em qualquer dispositivo inteligente (Um computador, computador portátil, celular, ou tablet, o que for conveniente).

É possível escalar o desempenho dos sensores LoRa para cima ou para baixo ou diminuir o alcance de suas medições, então o servidor IoT também permite isso. Nesse caso, é necessário enviar os comandos do painel de controle (qualquer dispositivo inteligente) para o servidor IoT. O servidor IoT envia o comando ao gateway LoRa, que por sua vez envia para o nó Lora (dispositivo). O comando é interpretado no nó LoRa, e os sensores LoRa seguem em conformidade.

1.4 Organização dos capítulos

No **Capítulo 2**, analisam-se a revisão bibliográfica com aspectos relacionados aos medidores eletrônicos, Aferição de medidores, Partes do medidor eletrônico, Aquisição de dados, Sensor de corrente – resistor shunt, Avanços tecnológicos, Arquitetura de redes de comunicação, Long Range Wide Area Network (LoRaWAN), principais características da tecnologia LoRa.

O **Capítulo 3** está orientado ao estudo dos materiais e métodos apresentando as Ferramentas e Tecnologias, as Tecnologia, Arquitetura da Solução (Mecânica), Eletrônica, Métodos do Software.

O **Capítulo 4** aborda a aplicação do desenvolvimento de software e a construção do medidor polifásico, Desenvolvimento do Software (Software embarcado, Interface LoRa de Transmissão, Arduino Nano, Interface LoRa de Recepção), Desenvolvimento mecânico do protótipo medidor LoRa (Desenvolvimento de dispositivos para validação do protótipo, Tensão Aplicada, Metodologia do ensaio, Equipamento utilizado para gerar a tensão, Desenvolvimento 3D, Criação de desenhos 2D, Confecção de peças em CNC e ferramentaria, Montagem do

dispositivo, Dispositivo de parametrização, Desenvolvimento de modelagem 3D, Montagem, Desenho técnico 2D, Usinagem, Dispositivo de ensaio de tensão aplicada, Dispositivo de gravação de firmware, Dispositivo de ajuste, Firmware Embarcado).

Finalmente, no **capítulo 5**, apresentam-se as conclusões proporcionadas pelos resultados da pesquisa e as recomendações para possíveis desdobramentos e aplicações futuras. Ainda fazem parte deste trabalho alguns anexos e a relação de artigo publicado durante o desenvolvimento desta pesquisa.

CAPÍTULO II

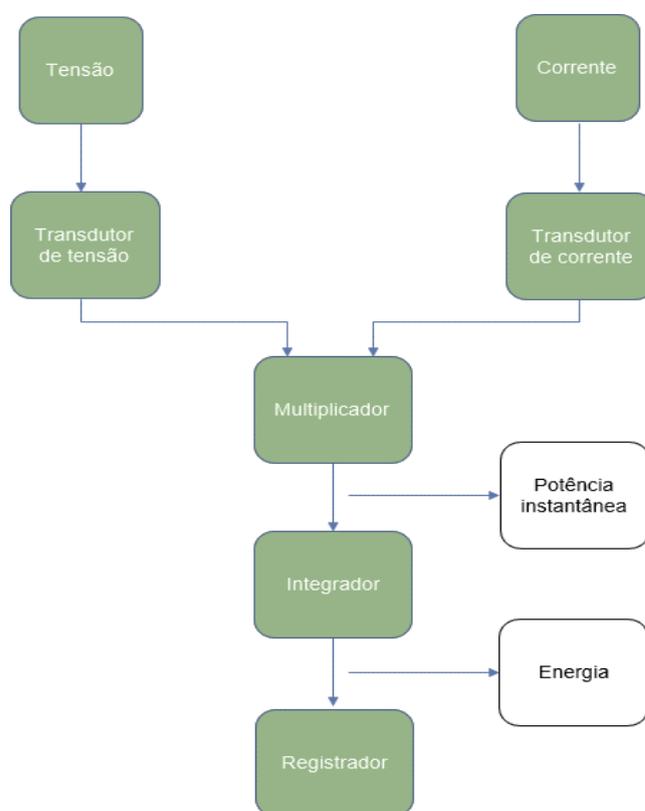
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Medidores eletrônicos

Conforme NBR 14519 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000) os medidores eletrônicos de energia elétrica, são medidores estáticos no qual a corrente e a tensão agem sobre elementos de estado sólido (Componentes eletrônicos) para produzir uma informação de saída proporcional à quantidade de energia elétrica medida (FOIATTO, Noara et al., 2009; OLIVEIRA, et al., 2016; CORREIA, 2019).

Estes medidores são compostos basicamente por transdutores, multiplicadores, integradores e registradores (VALLE, 2018), o fluxograma da Figura 2.1.

Figura 2.1 - Diagrama de um medidor eletrônico.



Exemplificado na Figura 2.1, transdutores de tensão e de corrente fazer a aquisição e adequação dos sinais de entrada a serem multiplicados. O multiplicador por sua vez, determina a potência instantânea através da multiplicação dos sinais de tensão e de corrente vindos dos transdutores. A energia é obtida pela integração da potência instantânea que é realizada pelo integrador. Por fim, o resultado é mostrado no registrador (DE PAULA, 2013; WERANG; KUMARAWADU; CHANDIMA, 2014; AMMAR; BDIRI; DERBEL, 2015). A potência pode ser observada por meio da equação (1).

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (1)$$

Para análise em circuitos de corrente alternada (CA), as equações (2) e (3) fornecem a tensão (V) e a corrente (A) instantânea, respectivamente:

$$v(t) = V_m \text{sen}(wt + \alpha) \quad (2)$$

$$i(t) = I_m \text{sen}(wt + \beta) \quad (3)$$

Sendo:

V_m e I_m os valores de pico da tensão (V) e corrente (A), respectivamente;

w a velocidade angular, medida em (rad/s);

α e β os ângulos (rad) de deslocamento da tensão e corrente, respectivamente.

Resultando na equação (4), da potência instantânea (W):

$$p(t) = V_m I_m \text{sen}(wt + \alpha) \text{sen}(wt + \beta) \quad (4)$$

Em seguida, o integrador soma todas as potências instantâneas, que é apresentada pela equação a seguir, (5), fornecendo a energia consumida e que será apresentada pelo registrador.

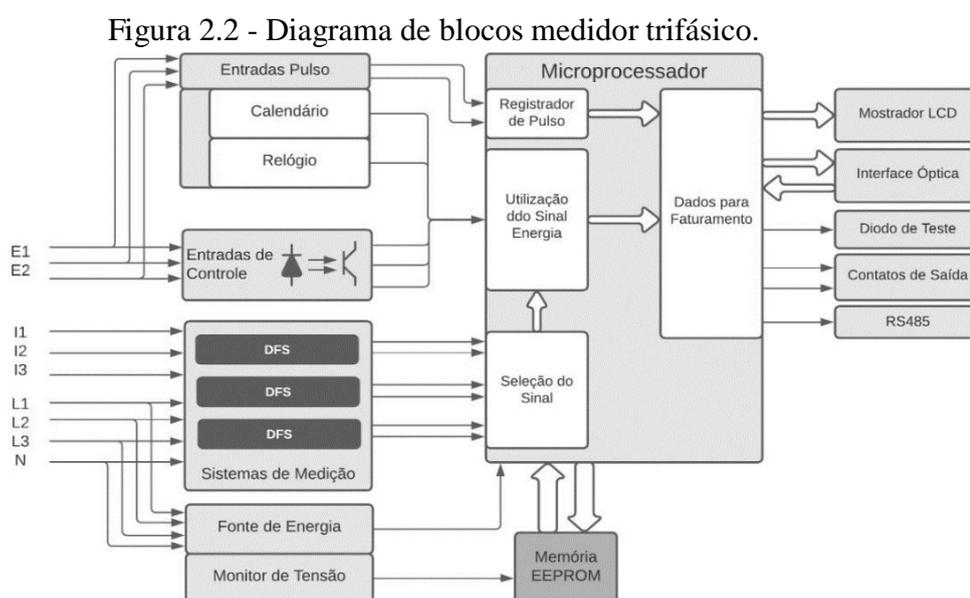
$$e(t) = \int_0^t p(t) dt = \int_t^t v(t) \cdot i(t) dt \quad (5)$$

Os medidores eletromecânicos e eletrônicos foram projetados para operar em sistemas lineares, ou seja, em condições puramente senoidais dos sinais de tensão e corrente (SILVA, 2008; SANKARAN, 2017; RAZA; AHMAD; PERVEIZ, 2014). Medições feitas por um medidor eletromecânico e por um eletrônico deram resultados similares, mostrando bom funcionamento de ambos. Todavia, segundo (FERREIRA, 2013), quando em presença de cargas não lineares, houve um erro maior na medição devido, principalmente, ao baixo fator de potência. Isto se deve ao fato de cada vez mais ter-se o uso de cargas não lineares conectados à rede como condicionadores de ar, computadores, motores de indução (elevadores, bombas, compressores dentre outros) que ocasionam distorções harmônicas nos sinais de tensão e corrente (CIVIDINO, 1992; MARJOVSKY, 2011).

2.2 Diagrama de blocos

O princípio de medição é brevemente descrito por meio de um diagrama em blocos como mostra a Figura, a seguir. Os blocos são descritos a seguir com mais detalhes, quando necessário, para uma melhor compreensão do princípio de funcionamento.

As entradas principais para o medidor são mostradas à esquerda, na Figura 2.2, identificadas as conexões de fase (L1, L2, L3) e neutro (N) para medição de energia e para a alimentação da fonte de energia do medidor, bem como, as entradas de controle (E1, E2) para chaveamento da tarifa de energia.



A saída principal do medidor é mostrada à direita (assim como a entrada da interface óptica), na Figura 2.2, o display de identificação (LCD - display) é usado para ler o valor da energia medida (geralmente com 8 dígitos, informações adicionais são usadas para direção de energia, presença de fase, sequência de fase, energia aplicada e tarifas atuais), diodos de teste, constantes de interface óptica lidas automaticamente em campo via leitor (terminal portátil) e PC's com porta óptica e contatos de saída para seleção de transmissão da constante de pulsos (WILMSHURST, 2006; REINHARD, , 2010; ALCIATORE, 2014; DERTIEN; REGTIEN, 2018).

A fonte de alimentação do instrumento eletrônico vem de um circuito de tensão trifásico. O circuito de monitoramento de tensão garante operação eficiente e armazenamento de dados em caso de falha de energia, bem como uma reinicialização adequada quando a energia é restaurada (IRYODA, 2005).

O sistema de medição é baseado na tecnologia DFS integrada (Direct Field Sensor, baseado no efeito "Hall") e gera um sinal proporcional à potência por fase com base na tensão aplicada e na corrente circulante. Este sinal é convertido em um sinal digital para processamento adicional pelo microprocessador. A corrente é geralmente detectada por um sensor de efeito "Hall" e a tensão é detectada por um divisor de tensão resistivo (TEIXEIRA, 2009).

O processamento do sinal é realizado por um microcontrolador que soma os sinais digitais das diversas fases e forma pulsos de energia fixa. Ele divide esses pulsos em positivos e negativos com base na direção do fluxo de energia (CAVALHEIRO, 2011). Em seguida, processa-os de acordo com as constantes de medição e fornece informações aos registros correspondentes de acordo com as tarifas determinadas pelo controlador tarifário. O microcontrolador também controla a comunicação de dados com o mostrador (display), a interface óptica e ainda garante uma operação segura mesmo em evento de falta de energia.

Uma memória não volátil (EEPROM) contém os parâmetros configurados no medidor e assegura os dados de faturamento - dados de energia - contra perda quando de uma falta de energia.

2.3 Aferição de medidores

A aferição é a determinação dos erros do medidor, através da comparação com medidores padrões de serviço, e sua conformidade com as condições de operação estabelecidas na legislação metrológica (HOWARTH, et al., 2008; NAKUTIS, et al., 2021).

A aferição do medidor pode ser realizada pela Rede de Laboratórios Acreditados, conforme estabelece NBR ISO/IEC 17025 INMETRO. Os ensaios são realizados através da utilização de bancadas de aferição de medidores. As bancadas possuem um medidor padrão, o qual é calibrado por laboratório credenciado e periodicamente é rastreado pelo INMETRO RAMOS; PEIXOTO e LOPES, 2007).

A Figura 2.3, mostra o exemplo de uma banca de aferição, observa-se que este modelo dispõe 24 posições para acomodação dos medidores e ao lado possui amplificadores, dispositivos simulando os medidores padrões.

Figura 2.3 - Banca de aferição/ajuste de medidores eletrônicos.



Além da estrutura física, mostrado na Figura 2.3, internamente da banca de ajuste e aferição, têm-se bancos de baterias, hardwares para comunicação serial por barramento via RS485 e outros elementos. Ao longo do processo de fabricação de medidores, faz-se necessário a utilização para verificar e ajustar os erros dos medidores.

Os medidores eletrônicos de energia elétrica em uso, possuem as classes de exatidão conforme apresentado na Tabela 2.1, regulamentadas através do Regulamento Técnico Metrológico (RTM) de acordo com a Portaria Inmetro nº 587, de 05 de janeiro de 2012.

Tabela 2.1 - Limites de erro percentuais para medição de energia ativa.

%In	Cos	Limites de erro percentuais para medidores			
		com índice de classe			
		D	C	B	A
10	1	+/- 0,2	+/- 0,5	+/- 1,0	+/- 2,0
100	1				
100	0,5 ind	+/- 0,3	+/- 0,6		
100	0,8 cap				

Conforme apresentado na Tabela 2.1, o ensaio de exatidão (Variação da corrente) para medidores de energia ativa deve ser realizado na corrente nominal para $\cos = 1$, $\cos = 0,5$ indutivo, $\cos = 0,8$ capacitivo e corrente de $0,1 I_n$ com $\cos = 1$, utilizando-se a tensão nominal ou de fornecimento, conforme o caso. Os medidores polifásicos devem ser verificados polifasicamente. Quando medidores tiverem a função de medição de energia reativa, os limites de erros devem ser seguidos conforme apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Limites de erro percentuais para medição de energia reativa.

%In	Cos	Limites de erro percentuais para medidores com índice de classe			
		D	C	B	A
10	1	+/- 0,4	+/- 1,0	+/- 2,0	+/- 4,0
100	1				
100	0,5 ind	+/- 0,6	+/- 1,2		
100	0,8 cap				

$\square =$

O ensaio de exatidão para medidores de energia reativa deve ser realizado na corrente nominal conforme mostrado na Tabela 2.2, para $\cos = 1$ indutivo, $\cos = 0,5$ indutivo, $\cos = 0,8$ capacitivo (se aplicável) e corrente de $0,1 I_n$ com $\cos = 1$ indutivo, utilizando-se a tensão nominal ou de fornecimento, conforme o caso.

2.4 Partes do medidor eletrônico

Segundo (HENRIQUES, 2002), os medidores eletrônicos de energia elétrica, de uma forma geral, são constituídos pelos seguintes módulos:

- **Módulo de conexão:** É composto pelo bloco de conexões dos transformadores de medição, dos divisores resistivos e dos sinais auxiliares. Os transformadores de corrente e os divisores resistivos funcionam como sensores das grandezas de interesse e como proteção aos circuitos eletrônicos do medidor contra distúrbios elétricos externos.
- **Módulo de medição:** É composto pelos circuitos de medição e pela fonte de

alimentação. A função primordial deste módulo é transformar os sinais de entrada da forma analógica ou contínua para a forma digital ou discreta, através de conversores A/D (Analógico/digital), bem como fazer o processamento destes sinais. Para isso, é utilizado um microprocessador eletrônico.

- **Módulo de registro:** É composto pelo circuito eletrônico de registro de grandezas processadas no módulo de medição, memória de massa, interfaces de comunicação, interfaces com o usuário (Mostrador e teclas de operação e comando e relógio de tempo real.
- **Carcaça:** É um módulo destinado a prover sustentação mecânica e proteção, tanto mecânica como contra intempéries, aos demais componentes do medidor.

2.5 Aquisição de dados

Em medidores eletrônicos, a coleta de dados é realizada por sensores. As características de um elemento sensor são: função de transferência, saturação, impedância de saída, excitação e resposta em frequência.

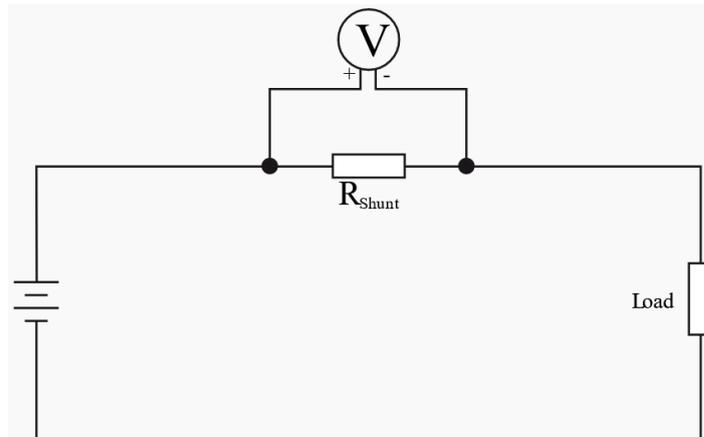
A principal característica do elemento sensor é a função de transferência, que estabelece a relação entre o sinal de entrada e o sinal de saída, determinando sempre a função de transferência ideal do sensor. A saturação também deve ser considerada, pois todos os sensores possuem limites operacionais além dos quais a linearidade pode ser perdida (PINHEIRO, 2011). A impedância de saída do sensor é importante para projetar e medir o circuito de interface do sistema. Para saída de tensão, a impedância de saída deve ser baixa e a impedância de entrada deve ser alta. Por outro lado, para saída de corrente, a impedância de saída deve ser alta e a impedância de entrada deve ser baixa. A característica de excitação especifica a quantidade necessária para o sensor operar (CHAVES, 2008).

O processamento do sinal é realizado por um microcontrolador, que soma os sinais digitais das fases individuais e forma pulsos de energia fixa. Ele divide esses pulsos em positivos e negativos com base na direção do fluxo de energia. Em seguida, processa-os de acordo com as constantes de medição e alimenta os registros correspondentes com as tarifas determinadas pelo controlador tarifário. O microcontrolador também controla a comunicação de dados com o display (display), a interface óptica, que garante uma operação segura mesmo em caso de falta de energia (SILVA, 2008).

2.6 Sensor de corrente – resistor shunt

O processo mais utilizado de medida de corrente elétrica em um circuito é feito introduzindo-se uma resistência shunt em série com o mesmo. Quando se conecta um resistor de baixo ohm em série com um circuito, a corrente flui através do resistor shunt -R- e gera uma queda de tensão (ZIEGLER et al., 2009; ZHANG; LEGGATE; MATSUO, 2016). A Figura 2.4, mostra o exemplo de conexão de medição de shunt típica em um circuito simples.

Figura 2.4 - Conexão de medição via shunt.



A queda de tensão pode ser medida ao aplicar a lei de Ohm para calcular a corrente, conforme segue as equações (6), (7) e (8).

$$I = V/R \quad (6)$$

$$V = IxR \quad (7)$$

$$R = V/I \quad (8)$$

Onde:

V: Tensão

I: Corrente

R: Resistência

A lei de Ohm descreve a relação entre tensão (V), corrente (I) e resistência (R). Se for conhecido dois desses três, é possível calcular facilmente o terceiro por meio da aritmética simples. Portanto, se houver dados da tensão (queda) e a resistência, pode-se calcular a corrente usando a equação (6).

O resistor shunt deve ser escolhido para a faixa de tensão e corrente apropriada, porque uma resistência muito alta afetará a medição e desperdiçará energia e distorcerá a medição conforme o resistor aquece (GIORDANO, Domenico et al., 2020; WAHLBERG, 2022).

2.7 Avanços tecnológicos

Para (PONTES, 2017), a evolução do medidor analógico trouxe ao mercado nacional os medidores eletrônicos, com consideráveis melhorias para as concessionárias, facilidade de instalação, operação, leituras podendo incorporar novas funcionalidades, como a medição de energia elétrica reativa, medição bidirecional, tarifação horossazonal, comunicação via saídas periféricas etc.

O Smart Grid é uma inovação tecnológica, uma alternativa para suprir necessidades de distribuição de energia elétrica. Tem adquirido espaço em outros países assim como no Brasil, tendo em vista eventos do setor elétrico com constantes falhas e surtos (BUCHHOLZ; STYCZYNSKI, 2014; PANTELI; MANCARELLA, 2015; STIMMEL, 2015). O termo Smart Grid (do inglês) refere-se a um sistema de energia elétrica que se utiliza da tecnologia da informação para fazer com que o sistema seja mais eficiente (econômica e energeticamente) confiável e sustentável (SANTOS, 2018).

Pode-se considerar que Smart Grid (SG) ou Rede de Energia Inteligente (REI) é a aplicação da tecnologia de informação para o sistema elétrico de potência, integrada aos sistemas de comunicação e infraestrutura de rede automatizada (ILÁRIO, 2020).

Como objetivo das REI, busca-se a produção, o transporte, a distribuição e o uso final de energia elétrica de modo eficiente, ambientalmente sustentável, economicamente viável, e de forma confiável, segura e resiliente. (VIJAPRIYA; KOTHARI, 2011).

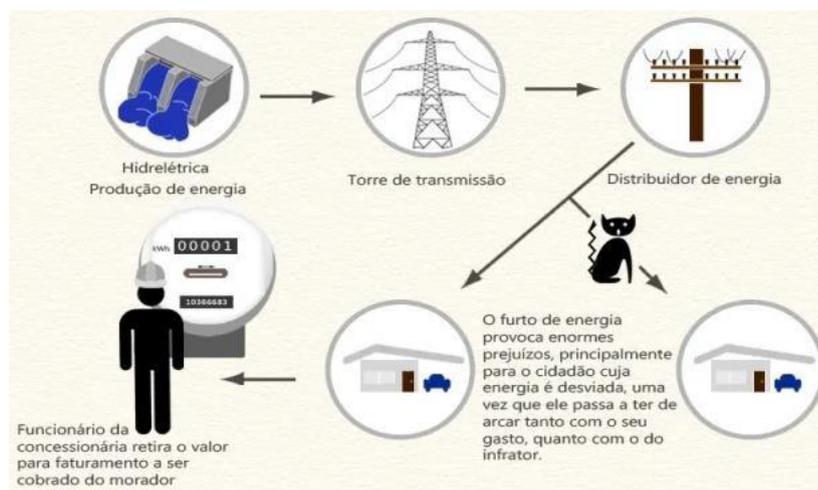
No Brasil, muitas concessionárias de energia tendem para adesão do sistema do Smart Grid, pois se trata de um sistema que automatiza não só o monitoramento, mas também toda a

gestão do uso de eletricidade. Essa implementação interna necessita de adoção de um sistema que integre o funcionamento da Tecnologia Operacional (TO) com a TI (RODRIGUES, 2020).

O Smart Grid é um novo modelo, interativo tanto para as fontes de geração de energia quanto para as cargas. O modelo central e vertical antigo é substituído por um distribuído e desagregado em que diferentes clientes enfatizam diferentes aspectos da nova rede elétrica de acordo com a sua perspectiva (SANTOS, 2018).

A Figura 2.5, mostra o modelo de rede elétrica adota no Brasil. Trata-se de um sistema central e vertical.

Figura 2.5 - Modelo de rede elétrica em uso no Brasil.



Conforme 2.5, inicialmente a energia é gerada por meio de usinas hidrelétricas, é transmitida por torres de distribuição até o distribuidor. O percurso entre o distribuidor e o cliente, comumente ocorre desvios de energia, ocasionando irreparáveis prejuízos. Por fim, um funcionário da concessionária mede o consumo para o futuramente diretamente na unidade consumidora. SG possui potencial para modernizar a RE, com utilização da IoT. A Figura 2.5, mostra o diagrama do sistema Smart Grid no Brasil. Neste sistema, envolve a aplicação de processadores, com a finalidade de executar tarefas na escala de microssegundos, aplicativos inteligentes, gerenciamento de demanda, para otimizar custos de geração e utilização da energia, sensores, para identificação de anormalidades no sistema. Em suma, trata-se de um sistema moderno e interligado entre si (HILL, 2003; NAGAYAMA; SPENCER JR, 2007).

Segundo (MENEZES, 2020), nesse novo modelo, há alta velocidade com tecnologias de medição avançada e controle, uma infraestrutura de comunicação bidirecional suporta as redes. Através de interconexão entre a estrutura de transmissão e distribuição, consumidores e geradores ficam interligados com novos componentes da rede de natureza intermitente – unidades de armazenamento de energia e fontes renováveis. Nos medidores inteligentes, os

dados são fornecidos para a concessionária através da coleta remota em tempo real, em intervalos de tempo pré-determinados, sem a necessidade do deslocamento de um funcionário até as residências (RIBEIRO, 2019).

2.8 Arquitetura de redes de comunicação

Segundo (SONG, 2015), uma arquitetura de redes de comunicação IoT pode ser dividida em três etapas: percepção, rede e aplicação. Na etapa de percepção, ficam os dispositivos como os sensores e atuadores. Na etapa de rede, onde os dados e informações obtidos na etapa de percepção são transmitidos por todo o sistema. Por sua vez, na etapa de aplicação é onde os dados obtidos por todo o sistema. Por sua vez, na etapa de aplicação é onde os dados obtidos nas etapas anteriores são processados e tratados por algoritmos de inteligência computacional. Este é um ponto relevante, visto que as etapas baseadas no conceito de IoT também podem ser aplicadas às REI e à Indústria 4.0, tendo em vista que as etapas de obtenção e comunicação de dados são realizadas de maneira similar, como pode ser compreendido nos exemplos a seguir:

- **Rede de distribuição inteligente:** A concessionária de energia pode instalar um medidor inteligente em uma subestação de distribuição para realizar a percepção das informações sobre a energia elétrica consumida naquele ponto de conexão e mandar pela rede de comunicação conectada para que sejam realizadas operações e controles mais eficientes (EFTHYMIU; KALOGRIDIS, 2010; KUZLU; PIPATTANASOMPORN; RAHMAN, 2014; RUIZ-ROMERO et al., 2014; BAHMANYAR et al., 2016; GHASEMPOUR, 2019).

- **Casa/indústria inteligente:** O consumidor pode instalar um medidor inteligente para realizar a percepção de informações sobre o seu consumo (Em tempo real, diário, mensal, horários de pico, ambientes e dispositivos diferentes etc.) e enviar as informações pela rede de comunicação conectada para aplicar métodos de eficiência energética por meio de inteligência computacional e sistemas de controle e automação, ou enviar para própria RDI e disponibilizar essas informações para a concessionária, tornando-se parte da RDI como um componente ativo, ou seja, que passa a se comunicar diretamente com a REI (GUNGOR et al., 2012; ILÁRIO, 2020).

As etapas de percepção, de rede e de aplicação dessas redes IoT podem ser divididas em camadas de funções. Essa segregação é também utilizada pelo modelo em tecnologias IoT. A Tabela 2.3, apresentam os principais protocolos utilizados nas cinco camadas do modelo TCP/IP para redes IoT (DO ESPIRÍTO SANTO; ORDONEZ; RIBEIRO, 2018).

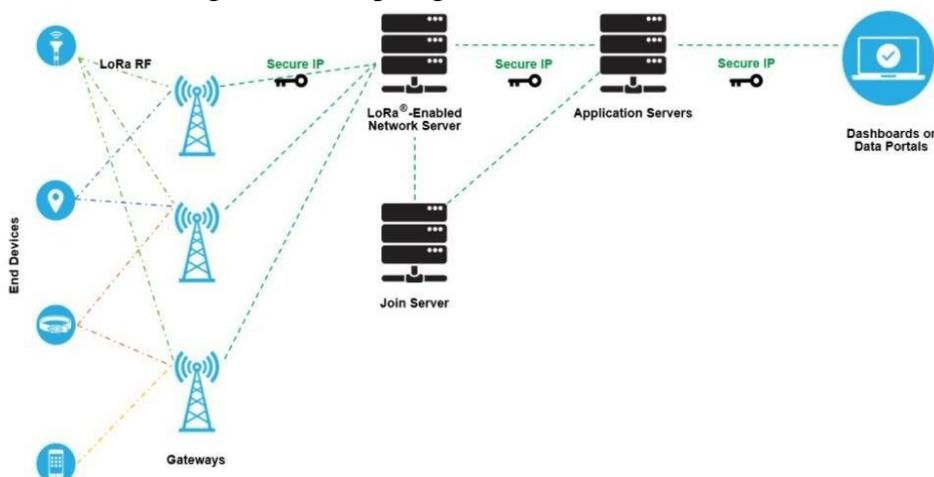
Tabela 2.3 - Modelos de redes TCP/IP e Protocolos IoT.

Camadas	Protocolos
Aplicação	CoAP e MQTT
Transporte	TCP e UDP
Rede	IPv6 e 6LowPAN
Física e Enlace	IEEE 802.15.4, IEEE 802.11 e IEEE 802.15.1
Todas as camadas	Z-Wave, Zigbee, LoRaWAN , NB-IoT

2.9 Long Range Wide Area Network (LoRaWAN)

Dentre os protocolos descritos na Tabela 2.3, neste projeto foi utilizado o LoRaWAN. A arquitetura LoRaWAN, desenvolvida pela LoRa Alliance, utiliza a tecnologia LoRa na camada física para comunicar os dispositivos via gateway LoRaWAN (LORA ALLIANCE, 2015; ZYRIANOFF, 2019). O LoRa é um protocolo de comunicação para redes LPWAN (Low Power Wide Area Network), com baixo custo, segurança e comunicação bidirecional (ZYRIANOFF, 2019). Tem alcance de comunicação de até 20 Km em áreas rurais e 4 Km em áreas urbanas e suporte para tecnologias redundantes de operação, localização livre, baixo consumo de energia e coleta de energia para suportar as necessidades futuras da rede, permitindo recursos de mobilidade de uso (SALMAN, 2015). Uma rede LoRaWAN utiliza bandas não licenciadas e protocolos abertos e gratuitos, facilitando a sua implementação (BARRO; ZENNARO; PIETROSEMOLI, 2019) O LoRaWAN tem sido usado em aplicações de REI principalmente para infraestrutura de medição remota. A Figura 2.6, mostra a topologia da rede LoRaWAN.

Figura 2.6 - Topologia da rede LoRa.



Na Figura 2.6, a arquitetura da rede do LoRaWAN funciona em formato de estrela. Assim, ela permite preservar a vida útil da bateria e a conectividade de longo alcance. No geral,

a topologia é composta basicamente por dispositivos finais, gateways, servidores de rede e servidores de aplicação.

Para (ILÁRIO, 2020), os Dispositivos Finais (End Devices) se comunicam em longas distâncias por meio do protocolo LoRa com os Gateways LoRaWAN, que por sua vez concentram as informações e as encaminham para os servidores, caso disponham ou quando dispuserem de conectividade com a internet. Os servidores recebem essas informações e encaminham para as suas respectivas aplicações:

- **Dispositivos finais:** São os elementos básicos de redes como sensores de temperatura, sensores de umidade, **leitores de consumo de energia**, água, gás. Os dispositivos finais não têm a capacidade de roteamento de pacote. Desta forma todas as mensagens que são trocadas são enviadas diretamente para o gateway em questão;
- **Gateways:** São estações rádio base que fazem o intermédio, a retransmissão das mensagens, entre os dispositivos finais e os servidores de rede;
- **Servidores de rede:** São os responsáveis por receber as informações enviadas pelos gateways, processá-las e enviá-las para aplicação;
- **Servidores de aplicação:** A aplicação ao receber as informações do servidor, irá tomar algumas ações específicas. Essas aplicações podem ser acessadas tanto via Web, como em um aplicativo no celular.

2.10 Principais características da tecnologia LoRa

A tecnologia LoRa revolucionou a IoT, ao permitir que os dispositivos acomodem uma vasta gama de aplicativos. Assim, ela transmite vários pacotes com informações importantes. A Tabela 2.4, mostra as características e benefícios da utilização desta tecnologia.

Tabela 2.4 - Principais características da tecnologia LoRa.

Características	Benefícios
Baixo custo de implementação e operação	Reduz o investimento em infraestrutura, despesas de substituição de bateria e, em última instância, despesas operacionais.
Baixo consumo de potência	Necessita de pouca energia. Assim a vida útil da bateria é prolongada até 10 anos, o que reduz custos de compra.
Longo alcance	Conecta dispositivos em grandes distâncias nas áreas rurais e infiltra em densos ambientes internos ou urbanos.
Mobilidade	Mantém a comunicação com dispositivos em movimento sem sobrecarregar o consumo de energia.
Padronizado	Os sinais emitidos são robustos, não propagam ruídos e não sofrem interferência na sua faixa de frequência. Logo, a implementação de aplicativos IoT é rápida em qualquer lugar.

CAPÍTULO III

3. MATERIAIS E MÉTODOS

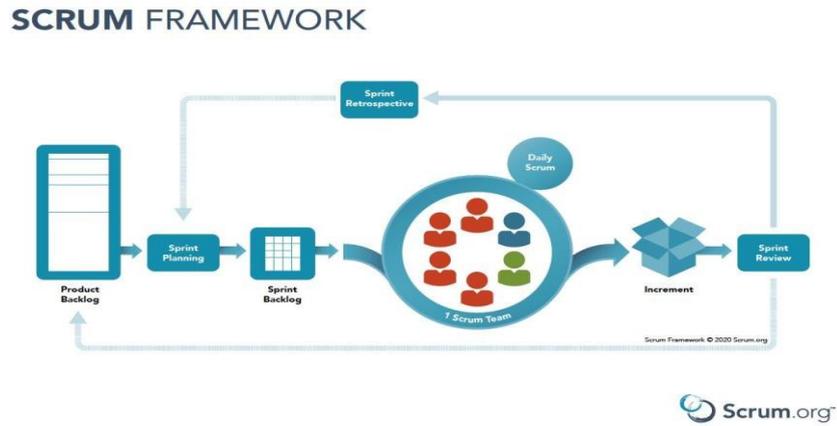
3.1 Materiais

A pesquisa de desenvolvimento do protótipo, foi desenvolvido voltadas para áreas de engenharia. Para planejar, executar e gerenciar este projeto, foi adotado princípios do SCRUM. Com essa modalidade os projetos foram divididos em ciclos, chamados de *Sprints*. O *Sprint* representou um *Time Box* dentro do qual um conjunto de atividades pôde ser executado. Metodologias ágeis de desenvolvimento de *software* e aplicados a outros projetos, foram iterativas, ou seja, o trabalho foi dividido em iterações, que são chamadas de *Sprints* no caso do *Scrum*.

As funcionalidades a serem implementadas no projeto foram mantidas em uma lista, denominada *Product Backlog*. No início de cada *Sprint*, fez-se um *Sprint Planning Meeting*, ou seja, uma reunião de planejamento na qual o *Product Owner* priorizou os itens do *Product Backlog* e a equipe selecionou as atividades que eram capazes de implementar durante o *Sprint* que se inicia. As tarefas alocadas em um *Sprint* foram transferidas do *Product Backlog* para o *Sprint Backlog*. A cada dia de uma *Sprint*, a equipe fez breves reuniões, chamada *Daily Scrum*. O objetivo era disseminar conhecimento sobre o que foi feito no dia anterior, identificar impedimentos e priorizar o trabalho do dia que se inicia.

Ao final de um *Sprint*, a equipe apresentou as funcionalidades implementadas em uma *Sprint Review Meeting*. Finalmente, fez-se uma *Sprint Retrospective* e a equipe partiu para o planejamento do próximo *Sprint*. Assim reiniciava-se o ciclo. A Figura 3.1, apresenta o fluxo adotado durante o desenvolvimento do projeto.

Figura 3.1 -Fluxo do projeto.



O Fluxo do Scrum serviu para as principais entregas de forma incremental, para gerir de uma forma mais completa, neste projeto foi utilizado a ferramenta Trello conforme mostra a Figura 3.2.

Figura 3.2 - Quadro Trello.



A Figura 3.2 mostra, a EAP do projeto foi dividida em três principais atividades, dentro de cada cartão, existe algumas principais atividades e dentro de cada uma a lista de tarefas, distribuídas ao longo do período. No item 3.1.5 está descrito detalhadamente as atividades.

3.1.1 Ferramentas e Tecnologias

a) Ferramentas:

Para o desenvolvimento do projeto foi utilizado as seguintes ferramentas, conforme mostra o Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Ferramentas e softwares utilizados no projeto.

Ferramenta	Conceito	Aplicação no projeto
SolidWorks	<i>Software</i> destinado a criação de protótipos mecânicos virtuais tridimensionais. Nele é possível também simular funcionamento de peças, conjuntos.	No projeto, o <i>software</i> foi utilizado para modelar todas as peças e dispositivos mecânicos. A partir de protótipos tridimensionais, foi gerado desenhos 2D e encaminhado para processo de confecção.
Proteus VSM	<i>Software</i> que permite a criação de circuitos, simular e elaborar <i>layouts</i> de aplicações analógicas e digitais, inclusive microcontroladores.	Foi aplicado para o desenvolvimento de placas e ligações eletrônicas.
Scrum	É um <i>framework</i> com estrutura para desenvolver, entregar e sustentar produtos em um ambiente complexo, com ênfase inicial no desenvolvimento de software.	Foi aplicado durante as iterações e avanços incrementais em soluções tecnológicas, sempre com base nas necessidades da necessidade do cliente e evolução do projeto.
Trello	Trata-se de uma ferramenta criada para organizar projetos pessoais e corporativos. Ele funciona como um painel de gerenciamento de projetos e permite personalizar os fluxos de trabalho para uso pessoal ou de uma equipe	Foi aplicado para o monitoramento, controle e gestão do projeto. Auxiliado pelo <i>framework Scrum</i> .
Nextion Editor	É um software de desenvolvimento GUI de interface homem máquina (IHM). Fornece controle e	Foi utilizado no projeto para criação de diagramas de blocos para

	visualização dos processos do sistema, sua função é de display, com a diferença de ser mais sofisticado e com tela semelhante à de um celular touch.	representar o fluxo de funcionamento dos medidores eletrônicos.
ArtCAM	É um pacote <i>CAD/CAM</i> multifuncional para o design de produtos e manufatura através de máquinas ferramenta CNC ou máquinas de gravação a laser	Foi utilizado no projeto para fabricação de peças dos equipamentos de testes e do protótipo.
IDE Arduino	Arduino Integrated Development Environment trata-se de uma aplicação de plataforma cruzada, escrito em funções de C e C ++. É usado para escrever e fazer upload de programas em placas compatíveis com o microcontrolador Arduino, mas também, com a ajuda de núcleos de terceiros, outras placas de desenvolvimento de fornecedores.	O software foi utilizado para desenvolver os algoritmos dos dispositivos desenvolvidos e o produto responsável pelo sistema LoRa. Os programas foram escritos no IDE do software e compilado no microcontrolador Arduino.
PyCharm	É um ambiente de desenvolvimento integrado usado em programação de computadores, especificamente para a linguagem de programação Python.	O ambiente foi utilizado para desenvolver as linguagens de programação de alto nível responsável pela comunicação entre banco de dados e sistema embarcados.
FluidSIM	É um software de simulação, instrução e estudo da Eletropneumática, Eletrohidráulica e circuitos digitais.	O software foi utilizado para desenvolver os circuitos eletropneumáticos e pequenos circuitos digitais responsáveis pelos comandos elétricos de cada sistema.

Lucidchart	É uma plataforma proprietária baseada na web que permite aos usuários colaborar no desenho, revisão e compartilhamento de gráficos e diagramas.	Foi utilizado para a elaboração de fluxogramas, diagramas e gráficos, no qual foram evidenciados em relatórios desenvolvidos pela equipe após cada atividade concluída.
Visual Studio Code	É um editor de código-fonte, ele inclui suporte para depuração, controle de versionamento Git incorporado, realce de sintaxe, complementação inteligente de código, snippets e refatoração de código.	Foi utilizado para desenvolver e editar código-fonte, o mesmo foi utilizado para gerar evidências dos algoritmos desenvolvidos, pois a plataforma tem fundo de edição mais intuitivo dos demais, destacando assim detalhes dos algoritmos.
Fritzing	É uma iniciativa de código aberto para desenvolver um software tipo CAD amador para design de hardware eletrônico, para apoiar designers e artistas prontos para deixar de experimentar um protótipo e construir um circuito mais permanente com uma Placa de Circuito Impresso.	A plataforma foi utilizada para desenvolver diagramas eletrônicos mais intuitivos para o leitor. Além disso, ele foi utilizado para que a equipe consiga efetuar alterações em tempo real simultaneamente.
GitHub	É uma plataforma de hospedagem de código-fonte e arquivos com controle de versão usando o Git. Ele permite que programadores, utilitários ou qualquer usuário cadastrado na plataforma contribuam em projetos privados e/ou Open Source de qualquer lugar do mundo.	Utilizamos a plataforma para armazenar os códigos-fontes dos dispositivos desenvolvidos, além disso, o mesmo foi de suma importância para que os programadores pudessem alterar e compartilhar com a equipe em tempo real alguma alteração realizada nos códigos-fontes.

b) Tecnologia:

As tecnologias aplicadas no projeto foram a linguagem de programação, aplicado para o desenvolvimento dos softwares, o pilar *Internet of Things - Iot* da Indústria 4.0, utilizado para coleta de dados em tempo real por meio de sensores, alertas e LoRa, principal inovação no projeto, com implementação no protótipo. No Quadro 3.2, está descrito as tecnologias com explicação de conceitos e aplicabilidade no projeto.

Quadro 3.2 - Tecnologia utilizadas no projeto.

Tecnologia	Conceito	Aplicação no projeto
Linguagem C	É uma linguagem de programação compilada de propósito geral, estruturada, imperativa, procedural.	Neste projeto, foi utilizada para o desenvolvimento do módulo firmware e sistema.
Internet das Coisas	Refere-se a integração de objetos físicos e virtuais em redes conectadas à internet, permitindo que objetos colem, troquem e armazenem dados que serão processados e analisados, gerando informações e serviços em grande escala.	A implementação da internet das coisas neste projeto, foi para a coleta de dados em tempo real, dados de estado de sensores, alertas, erros. Situações que ocorreram no protótipo foram informados ao usuário por meio do display.
Rede LoRa	Sensores LoRa têm capacidade para geolocalização, permite baixo consumo de energia e transmissões de longo alcance. Os sensores LoRa permitem conectividade entre dispositivos para permitir uma implementação eficaz da Internet das Coisas (IoT).	No projeto, teve aplicabilidade para implementação no protótipo do medidor. Foi responsável pela leitura de dados do medidor, atuou como nó, disponibilizando os dados para coletar de forma remota.

3.1.2 Arquitetura da Solução

a) Mecânica

Mecanicamente, as peças foram projetadas conforme parâmetros de medidas máximas definidas pelo INMETRO. A Figura 3.3, mostra as medidas máximas para fabricação de medidores polifásicos e na Figura 3.4 as dimensões finais do protótipo.

Além de desenvolver o protótipo com dimensões dentro da tolerância, outros aspectos foram relevantes para solução dada, como por exemplo, o tipo de plástico e suas especificações. Além de partes plásticas, elementos metálicos também fizeram parte da solução, bornes, estribos, parafusos, cada componente com suas especificidades.

Figura 3.3 - Dimensões máximas externas de medidores polifásicos.

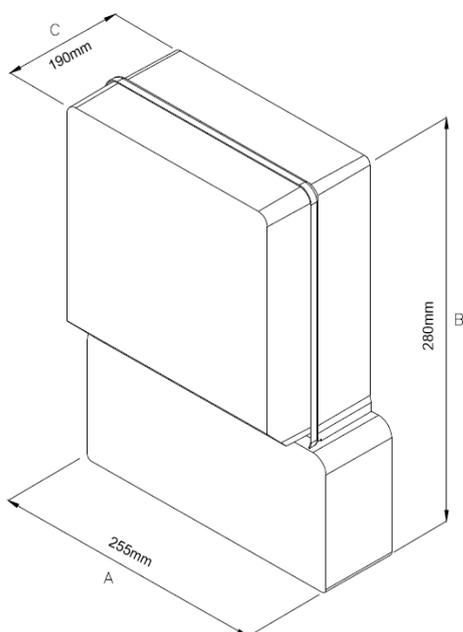


Figura 3.4 - Dimensões externas utilizadas no medidor LoRa Polifásico.



Conforme mostrado na Figura 3.4, as dimensões externas ficaram dentro dos padrões definidos pelo INMETRO. O conjunto mecânico precisou ser modelado e confeccionado conforme especificações da NBR 14519 – Medidores Eletrônicos de Energia Elétrica (Estáticos) – Especificação, a modelagem se deu em quatro principais peças, conforme descrito abaixo:

- **Base:** Parte do medidor destinado à sua instalação e sobre a qual são fixadas a estrutura, a tampa do medidor, o bloco de terminais e a tampa do bloco de terminais.
- **Bloco de terminais:** Suporte em material isolante agrupando os terminais do medidor.

- **Tampa do bloco de terminais:** Peça destinada a cobrir e proteger o bloco de terminais, os furos inferiores de fixação do medidor e o compartimento do bloco, quando existir.
- **Tampa do medidor:** Peça sobreposta à base para cobrir e proteger as partes internas do medidor.

As peças foram devidamente projetadas para serem encaixadas evitando o acesso interno e violação para desvios de energia após o processo de solidarização.

b) Eletrônica

A solução eletrônica, teve a utilização do software Proteus, nele o sistema foi projetado, simulado e desenvolvido o funcionamento do protótipo. A placa Arduino Nano foi utilizada associada à Placa LoRa ESP32 Display OLED Wifi Bluetooth 868-915MHz IoT. As ligações foram realizadas também nos circuitos das fases A, B, C e no circuito neutro. As figuras 3.5, 3.6 e 3.7 mostram algumas placas utilizadas para montagem. No item 4, deste relatório, está a descrição de todo o desenvolvimento desta etapa (SU; WANG, 2010; MELO et al., 2016; VAN VELTHOVEN; CORDON; CHALLAGALLA, 2019).

Figura 3.5 - Arduino Nano.



Figura 3.6-Display LCD.



Figura 3.7 - LoRa Esp32.



O Arduino Nano, Figura 3.5, foi escolhido pela característica da disposição de pinos que funciona bem tanto com o Mini ou com o Basic Stamp (TX, RX, ATN, GND em uma face e a alimentação e o terra na outra). Trata-se de uma placa de quatro camadas com planos para a alimentação e para a terra para auxiliar a fornecer energia suficiente para os CIs durante o chaveamento e reduzir o ruído (EMC) durante o chaveamento de alta velocidade dos pinos de entrada e saída.

O plano da terra auxilia na redução de radiação (EMI). O plano de alimentação é de baixa indutância e assim quaisquer transientes que possam surgir na linha de alimentação serão de baixo nível (TESCHE; IANOZ; KARLSSON, 1996; MONTROSE, 1996; MONTROSE 2004). Na Figura 3.6, foi utilizado um display gráfico que possui um mecanismo diferente para programação com tela touch, de modo que é possível criar os menus pelo programa no computador e salvar em um cartão de memória SD, deixando o código do microcontrolador mais enxuto e mais simplificado. Além disso requer apenas dois pinos para a comunicação externa. A tela LCD Nextion foi utilizada em módulo paralelo e interfaceado com placas Arduino Nano e LoRa Esp32. A placa LoRa Esp32, Figura 3.7, trata-se de um módulo de alta performance que se conectou em redes Wifi 802.11 b/g/n, caracterizando-se como um módulo com baixo consumo de energia ideal para aplicações IoT. O módulo também possibilitou conexão bluetooth. Foi possível, programar o ESP32 usando a IDE do Arduino utilizando um cabo micro-usb. Possui ainda, comunicação LoRa, que é uma das mais novas tecnologias de rádio frequência, caracterizando-se por um baixo consumo de energia e comunicação à longas distâncias, sendo assim indicado para os mais variados projetos envolvendo redes WiFi e IoT (DE PAULA, 2021).

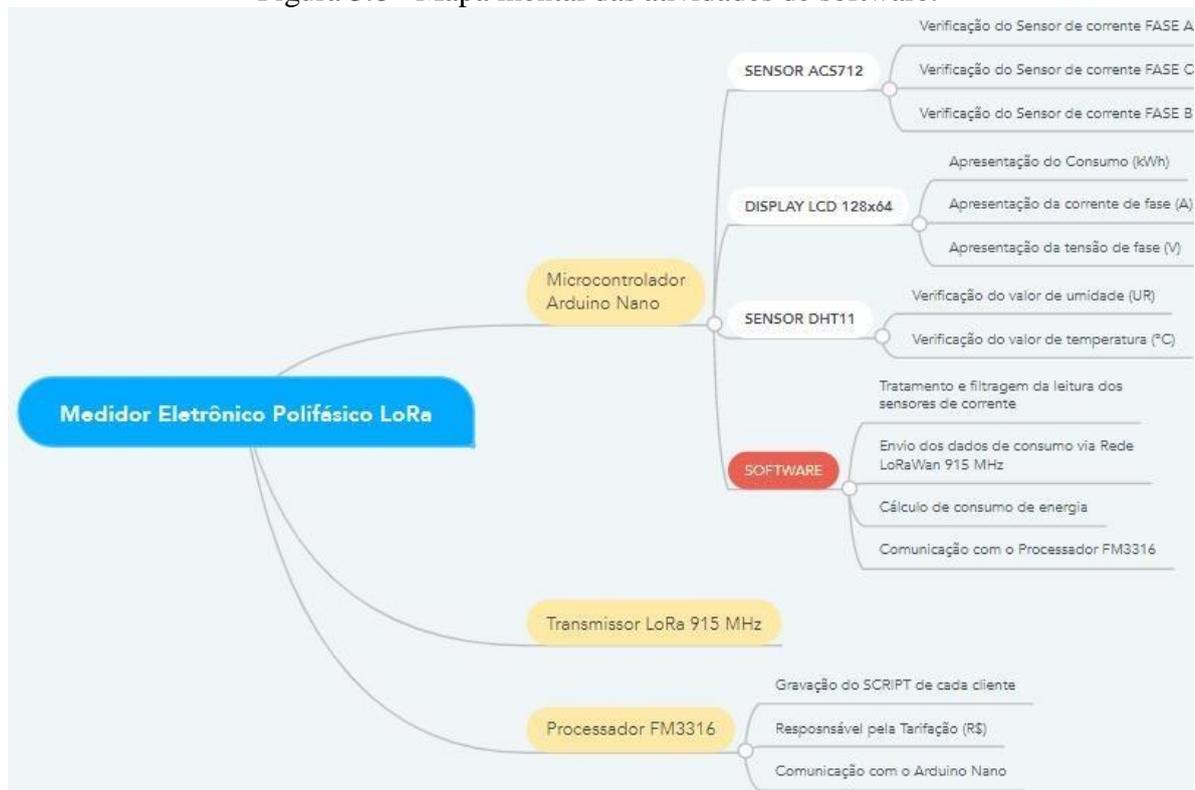
3.2 Métodos do Software

Diversos softwares foram utilizados neste projeto. Houve o desenvolvimento de código fonte para o funcionamento propriamente do medidor, associado com os desenvolvimentos mecânico e eletrônico e houve a etapa de desenvolvimento de softwares para implementação em dispositivos para testes e validações do protótipo. Ambas as linhas de pesquisa e desenvolvimento utilizaram a Linguagem C, em comum, também foi utilizado a IDE do Arduino como ambiente de desenvolvimento integrado.

Na abordagem para o software do protótipo, o código fonte estabeleceu ordens de medição, ou seja, foi parametrizado como cada variável deveria agir em certos pontos, como por exemplo, a leitura da potência. Houve o desenvolvimento da interface gráfica, aquilo que fora informado no Display LCD, variáveis como: consumo, corrente, temperatura, data, dentre outras.

Para melhor desenvolvimento, foi feito o mapa mental para melhor das principais atividades da área de software. A Figura 3.8 mostra essas atividades.

Figura 3.8 - Mapa mental das atividades de software.



As funcionalidades do medidor foram mapeadas conforme mostrado na Figura 3.8, a Arduino Nano recebeu códigos para leitura das correntes nas fases A, B e C, por meio do sensor ACS712, para apresentação dos dados de consumo (Medido em kWh), corrente e o tipo de tensão em cada fase utilizou-se o mostrador digital. Outro aspecto relevante incluído na programação do Arduino Nano foi o sensor DHT11, responsável pela leitura de temperatura e umidade. Houve o desenvolvimento de software para realização da filtragem da leitura dos sensores de corrente, envio de dados via rede LoRa, o cálculo do consumo de energia e uma interface para comunicação com o microprocessador FM3316.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE E A CONSTRUÇÃO DO MEDIDOR POLIFÁSICO

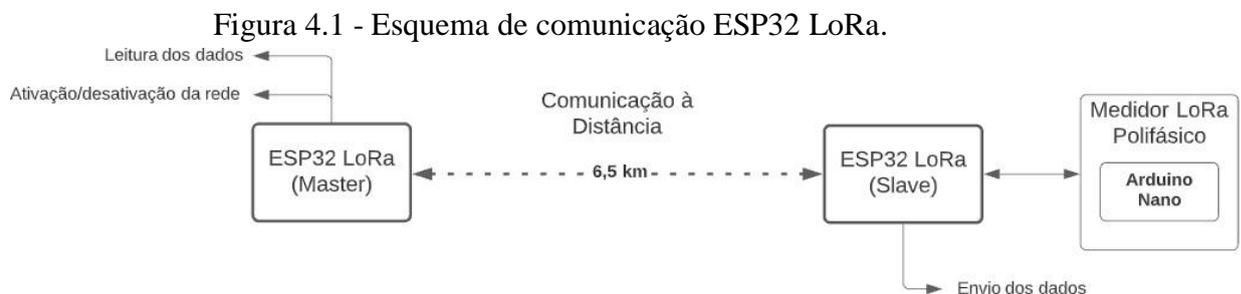
4.1 Desenvolvimento do Software

4.1.1 Software embarcado

Para o processo de desenvolvimento do medidor LoRa polifásico, separou-se o software embarcado em 3 partes distintas, as quais atuam em diferentes microcontroladores e plataformas diferentes:

- Interface LoRa de Transmissão;
- Arduino Nano;
- Interface LoRa de Recepção.

Cada uma dessas partes possui uma função específica para não sobrecarregar o processamento, e para melhorar o desempenho da medição do consumo em (kWh) pelo protótipo do medidor. Esta divisão de funcionalidades pode ser observada na Figura 4.1.



4.1.2 Interface LoRa de Transmissão

Dentro do medidor, para o envio das informações a longa distância através da rede LoRa, utilizou-se o ESP32 LoRa, o qual atuou como um Slave, onde em seu código fonte aguarda uma requisição do ESP32 Master para o envio do pacote de informações solicitadas, sendo estes o consumo, corrente da fase A, corrente da fase B e corrente da fase C.

Esta rede é programada a partir da biblioteca “heltec.h”, a qual possui os objetos, classes e métodos necessários para utilizar a rede LoRa, bem como o display OLED, e possui como configurações as seguintes variáveis:

- displayEstado - Habilita o display
- loraEstado - Habilita a rede LoRa
- serialEstado - Habilita a transmissão de informações da rede via Serial
- bandaDeTransmissao - Define qual a banda de transmissão da rede 868/915 MHz
- amplificadorDePotencia - Habilita o amplificador de potência

Com a configuração inicial da biblioteca Heltec, partiu-se para configuração da rede LoRa em si, uma vez que diversos fatores podem ser alterados para melhorar o desempenho, velocidade de transmissão, distância da transmissão, bem como a encriptação desses dados para que houvesse segurança nesse transporte de dados confidenciais.

Para isso utilizou-se a função “setupLoRa()”, a qual altera configurações como o spreadingFactor que altera a quantidade de dados codificados por segundo, aumentando ou diminuindo a velocidade da transmissão, SignalBandwidthn que altera o espaço de banda ao redor da banda de transmissão, e SyncWord, a qual define uma palavra em hexadecimal que indica o início e o fim da mensagem transmitida, tornando cada transmissão única. Outras configurações como TxPower indicam a potência do sinal transmitido, algo que impacta diretamente na energia gasta e raio do alcance da transmissão.

Além disso, este sistema possui uma verificação em tempo real, pois, a medição do consumo e das outras variáveis é feita a cada segundo, e o ESP32 LoRa apenas irá enviar os dados após esse tempo, portanto, a função “Received()” verifica a cada tempo se houve uma requisição de envio dos dados, e apenas continua o programa caso houver.

Por fim, esses dados são recebidos do Arduino Nano e enviado através da rede LoRa com o uso da biblioteca Heltec, com a função Write, semelhante ao uso da comunicação Serial UART. Esta transmissão foi feita através da função “enviarPacote()”.

4.1.3 Arduino Nano

O Arduino Uno foi responsável por tratar o sinal medido pelo sensor de corrente, bem como atuar nos relés para controlar a passagem de corrente nas três fases, isto através das portas digitais do Arduino. Porém além dessas funcionalidades, este foi responsável por enviar e receber os comandos do display Nextion através da biblioteca de mesmo nome “Nextion.h”, a qual foi realizada de forma serial.

Como o Arduino Nano possui apenas um par de portas UART (RX/TX), e esta é utilizada para comunicar o microcontrolador com o Display Nextion, necessitou-se o utilizar uma biblioteca denominada “SoftwareSerial.h”, a qual emula mais pares de portas UART através das portas digitais do Arduino, para desta forma comunicar com o ESP32 LoRa e enviar as informações coletadas.

A medição da corrente feita pelos sensores é retornada ao microcontrolador através de uma tensão proporcional a corrente medida, e esta é interpretada pelas entradas analógicas do Arduino, através de um ADC (Analog-to-Digital-Converter) de 10 bits, sendo essa, tratada para eliminar ruídos através de um filtro digital na função “filtroDaMedia()”, e é realizado um cálculo da relação do ADC de 0 a 1024 para corrente de -30 a 30 Amperes, através da função “calculaCorrente()”.

O consumo de energia foi calculado através da corrente e tensão medidas conforme a NBR 5410 que aborda as “Instalações Elétricas de Baixa Tensão”, calculando a potência que é a relação entre tensão e corrente, $P = V \times I$, e o consumo que é o cálculo da potência ao decorrer do tempo.

Porém, esta corrente medida está na forma de senoide, em 60Hz, e para calcular o consumo foi utilizado a corrente em RMS (Root-Mean-Square). Com intuito de realizar esse cálculo utilizou-se a biblioteca Emonlib (biblioteca de medição de energia), a qual é uma biblioteca Open Source que recebe os valores do ADC e calcula a partir de várias amostras o valor RMS da corrente através da função “emon1.calcIrms(número de amostras)”.

4.1.4 Interface LoRa de Recepção

Semelhante ao ESP32 LoRa de transmissão, o de recepção possui a mesma forma de configuração, pois os dois devem ter as mesmas especificações para que a comunicação seja estabelecida. A diferença entre estes é a leitura dos dados da rede LoRa.

Esta leitura foi feita através da função “receberPacote()”, a qual verificou a todo ciclo o “parsePacket()”, o qual nada mais é do que uma função que verifica o tamanho do pacote, se houver, e caso haja, inicia a atribuição dos valores recebidos às variáveis que serão mostradas no display OLED.

4.2 Desenvolvimento mecânico do protótipo medidor LoRa

4.2.1 Desenvolvimento de dispositivos para validação do protótipo

Segundo o Regulamento Técnico Metrológico – RTM, descrito na Portaria Inmetro nº 587 de 05 de novembro de 2012, em novos medidores, faz-se necessário que seja executado testes seguindo a metodologia de ensaios para verificação inicial ou após reparos, conforme procedimentos descritos no Anexo B. Tendo em vista essa regulamentação, além do desenvolvimento do protótipo medidor LoRa, fez-se necessário o desenvolvimento de dispositivos para validar a funcionalidade do novo medidor:

- Inspeção visual de correspondência ao modelo aprovado;
- Inspeção geral do medidor;
- Ensaio de tensão aplicada;
- Ensaio de exatidão;
- Ensaio da corrente de partida;
- Ensaio de controle das funções e grandezas com elevação de temperatura;
- Ensaio das saídas periféricas
- Ensaio de verificação do limite inferior da tensão de alimentação;
- Ensaio do mostrador.

Pelas características do projeto e definições por meio de reunião entre a coordenação do projeto e time da empresa o objetivo principal foi desenvolver o protótipo do medidor LoRa,

optou-se então pelo desenvolvimento de dois dispositivos de testes, sendo: Dispositivo para ensaio de tensão aplicada e Sistema de Parametrização. A seguir, é apresentado a descrição das atividades desenvolvidas para se obter os dispositivos e posterior testes.

4.2.1.2 Tensão Aplicada

Conforme Anexo B, do RTM, este ensaio tem como principal finalidade verificar se o isolamento do medidor é satisfatório, foi necessárias horas de estudos dos bolsistas para interpretar as condições deste ensaio. O medidor desenvolvido, teve sua estrutura mecânica externa em material plástico, ou seja, por essa característica o próprio protótipo se tornou material isolante, para isto foi necessário a inclusão de uma chapa condutora no dispositivo para tornar a superfície em condutora.

A tensão utilizada para realizar este ensaio precisou ser alternada, senoidal e na frequência nominal, conforme regulamento. A impedância da fonte de tensão de ensaio não pôde exceder o limite da corrente de 5mA com tolerância de +/-10%. Importante destacar que, aplica-se tensão de 2kV nos bornes principais e 1kV em saídas auxiliares.

Após as definições das especificidades do ensaio, será descrito a seguir a metodologia adotada para execução.

4.2.1.3 Metodologia do ensaio

Para que o teste de tensão aplicada tenha correta aplicação, é necessário que seja aplicada tensão nos bornes, separadamente quando aplicável, por pelo menos 3 segundos. O medidor precisa ser posicionado no dispositivo de teste, por ter material plástico em sua estrutura externa, inclusive na base, é necessário que esteja apoiado sobre a chapa de alumínio, que terá a função de aterramento. Os bornes principais têm natureza de circuitos acima de 40V, neste caso deve-se aplicar tensão de 2kV e os bornes auxiliares, possuem circuitos de até 40V, sendo necessário aplicar até 1kV. É necessário ajustar o gerador de tensão com os parâmetros de tensão, corrente e tempo de teste. Existem cabos saindo deste equipamento e são conectados ao dispositivo, para tensão chegar ao medidor, os cabos devem ser ligados às agulhas que por sua vez mantém contato com os parafusos dos bornes principais e o cabo terra, é ligado à chapa condutora de aterramento.

Para que os ensaios sejam considerados aprovados, é necessário que não ocorra nenhuma carga disruptiva nem centelhamento durante o tempo do teste.

4.2.1.4 Equipamento utilizado para gerar a tensão

O equipamento utilizado para gerar tensão durante esta fase, foi o modelo CS2672BX, conforme sua especificação, possui características que atende as necessidades do ensaio. A seguir é mostrado a figura 4.2 do equipamento.

Figura 4.2 - CS2672BX.



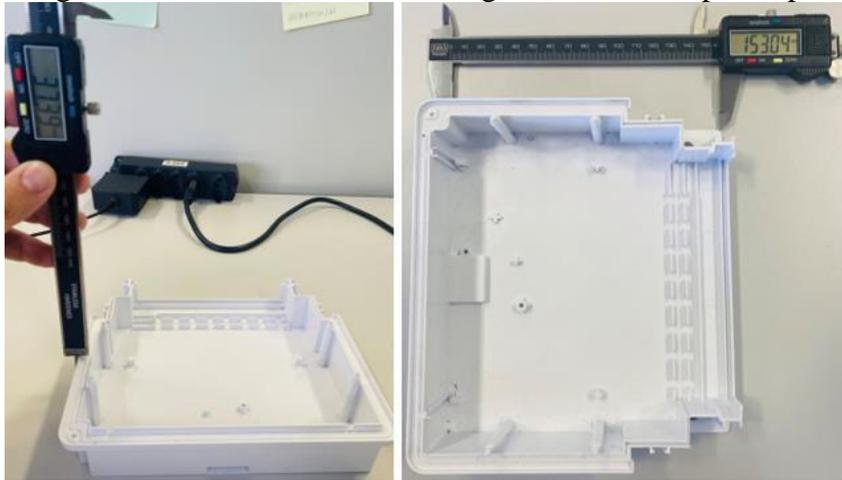
Conforme mostrado na Figura 5.2, o modelo foi calibrado com tempo de 4,0 segundos e 1,0mA, dentro dos parâmetros exigidos para execução dos testes.

4.3 Desenvolvimento 3D

A modelagem 3D é a criação de objetos sólidos através da representação matemática de uma superfície ou de um objeto volumétrico, vivo ou inanimado. Trata-se da criação do modelo de um objeto tridimensional através de um software de processamento 3D.

Nesta pesquisa, foi utilizado o software SolidWorks para realizar as modelagens 3D e desenhos técnicos em 2D. Inicialmente, o projetista precisou avaliar principalmente as dimensões do medidor protótipo e em quais pontos seria necessário o contato para transmitir a tensão de 2kV. Com auxílio de um paquímetro digital, as medidas foram tiradas para iniciar o esboço do modelo.

Figura 4.3 - Medidas de altura e largura do medidor protótipo.



Conforme mostrado na Figura 4.3, as medidas serviram para auxiliar o desenvolvimento de alguns componentes como por exemplo, chapa de aterramento, berços, base de agulhas dentre outras. A medida de referência para a criação deste modelo foi o medidor LoRa.

Tendo as informações pertinentes ao novo produto, fez-se necessário a definição dos materiais a serem utilizados neste dispositivo, que se dividiu em base, torre, base de agulhas e agulhas:

- Base, contou com dois tipos de materiais: Fenolite e Nitacetal;
- Torre: Nitacetal;
- Base de agulhas: Fenolite;
- Agulhas: Aço inox.

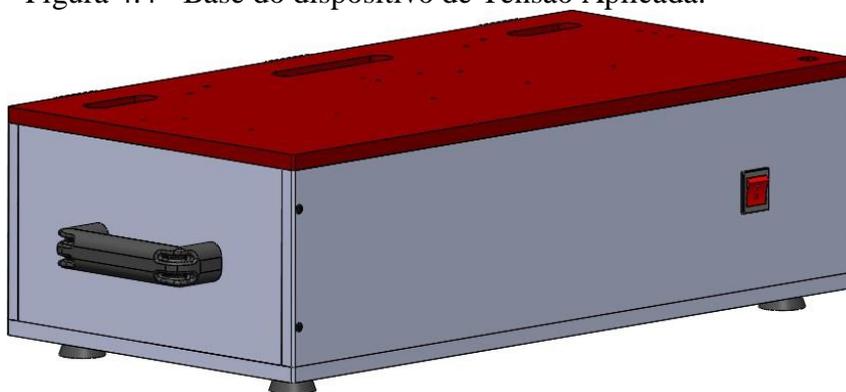
Os materiais foram escolhidos levando em consideração aspectos como usinabilidade, rigidez dielétrica, leveza e resistência. Em termos de usinabilidade o fenolite e poliacetil apresentam características de fácil usinagem, sendo possível usiná-las em tornos, fresas e máquinas CNC. Em contrapartida, o aço inox requer um pouco mais de esforço para ser usinado, isso devido a sua característica da liga de cromo de pelo menos 10,5% e da formação da camada passiva, que é gerada pela combinação do oxigênio do ar com o cromo do aço. Para aplicação no dispositivo, por possuir densidade relativamente baixa, se comparado com alumínio, aços e outros materiais, os componentes são leves. O fenolite possui alta rigidez dielétrica, este termo trata-se de um valor limite de campo elétrico aplicado sobre a espessura do material, sendo que, a partir deste valor, os átomos que compõem o material se ionizam e o

material dielétrico deixa de funcionar como um isolante, característica fundamental para aplicação em dispositivos de tensão aplicada, que recebe tensões de até 2kV.

Definido os materiais do dispositivo, foi dado início a modelagem propriamente dita. O software SolidWorks foi utilizado para essa atividade e para criação de desenhos 2D. A primeira etapa desenvolvida foi o conjunto das bases, nela é contemplado partes laterais, inferior e superior, além de alguns acessórios como alças para apoio do transporte, botão liga/desliga, conector AC e pés para sustentá-lo no chão.

Para modelar as peças, foi utilizado o ambiente de Esboço para criação, a seguir algumas evidências do desenvolvimento desta etapa, conforme Figura 4.4.

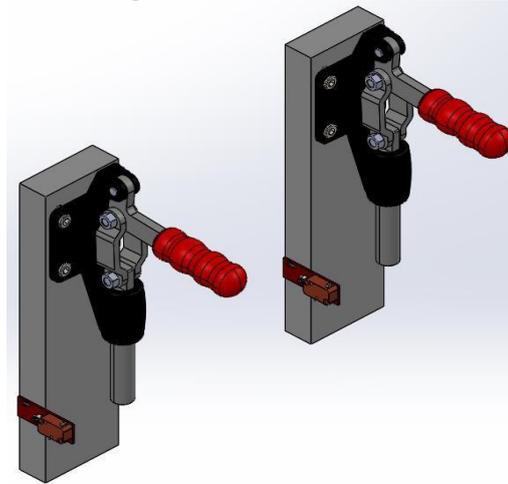
Figura 4.4 - Base do dispositivo de Tensão Aplicada.



Conforme mostrado na Figura 4.4, é possível visualizar a montagem da base, a peça com tonalidade vermelha, é de material fenolite e os componentes na cor cinza, refere-se ao nitacetal.

Seguindo o desenvolvimento, foi realizado a modelam da torre. Este elemento foi responsável pela fixação do grampo, que quando montado à base de agulhas, realiza movimentos de subida e descida para que pudesse existir o contato das agulhas com o medidor.

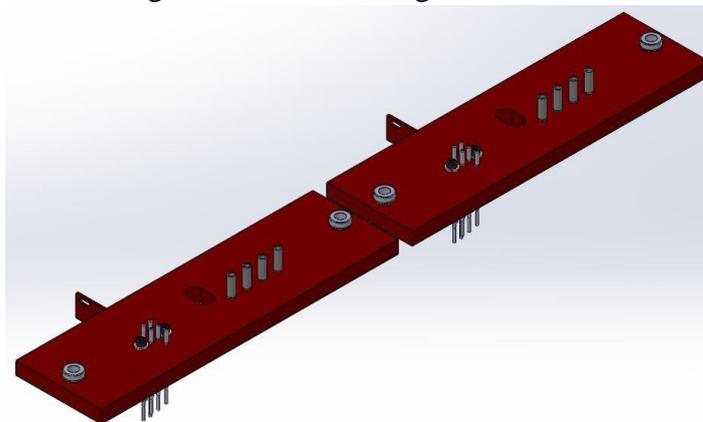
Figura 4.5 - Torres.



A Figura 4.5, mostra a montagem de duas torres com os grampos e chaves fim de curso fixados à elas. As torres foram modeladas com 300,0mm de altura, 80,0mm de largura e espessura de 28,4mm, essas medidas foram suficientes para que o medidor pudesse ser posicionado no berço e as bases de agulhas mantivessem o contato com medidor.

A base de agulhas, foi projetada em material fenolite, por manter o contato direto com agulhas de alta tensão, o fenolite possui alta resistência dielétrica, evitando condutibilidade na peça. Como dito no próprio nome, a base de agulhas recebe as agulhas, que por meio de ligações elétricas transmite a tensão para o medidor. A seguir, é mostrado a montagem dessas peças (Figura 4.6).

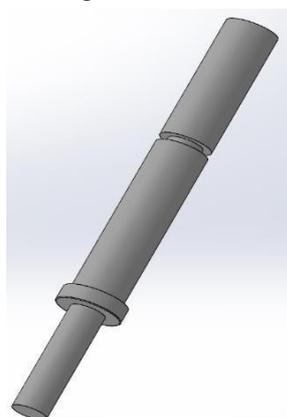
Figura 4.6 - Bases de agulhas.



As bases de agulhas, apresentadas na Figura 4.6, recebem as agulhas, rolamentos lineares para guiar eixos durante a subida e descida deste conjunto. As agulhas, foram projetadas para receber a fixação do tipo anilhas e sofrer a compressão por molas.

As agulhas, tiveram grande relevância durante a modelagem, pois elas foram responsáveis por transferir a tensão enviada pelo equipamento CS2672BX. A escolha do material para sua confecção foi levada em consideração principalmente características da região amazônica, alto percentual de umidade. Atualmente, é conhecido vários tipos de condutores, com variados preços, densidades dentre outros. Optou-se pelo aço inox para que pudesse ser evitado o processo de oxidação das agulhas. A seguir é mostrado na Figura 4.7 modelo das agulhas.

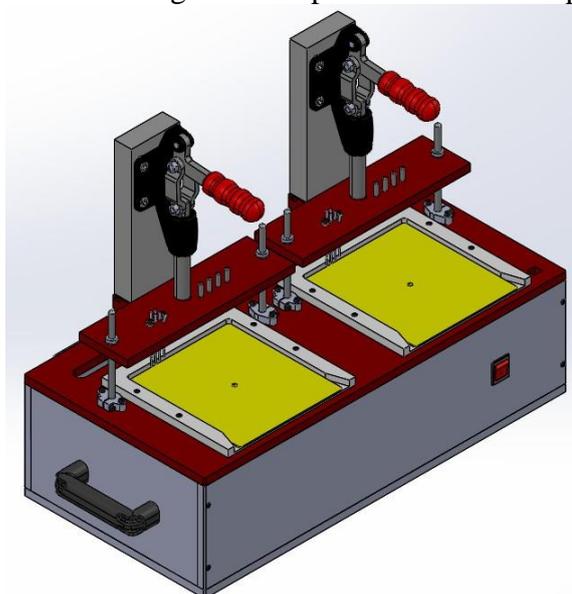
Figura 4.7 - Agulhas de contato.



Na Figura 4.7, está a representação da agulha de contato, basicamente foi projetada em três partes, sendo a parte inferior a responsável pelo contato direto com o medidor, um corpo para acomodação da mola (Responsável pela compressão da agulha quando a base de agulhas descer) e um rebaixo para fixação da anilha.

Ao término de cada componente, houve a etapa de montagem, no qual consiste em modelar todos os elementos e transformá-los em um único objeto. A Figura 4.8 ilustra o resultado destas modelagens.

Figura 4.8 - Modelagem do dispositivo de tensão aplicada.

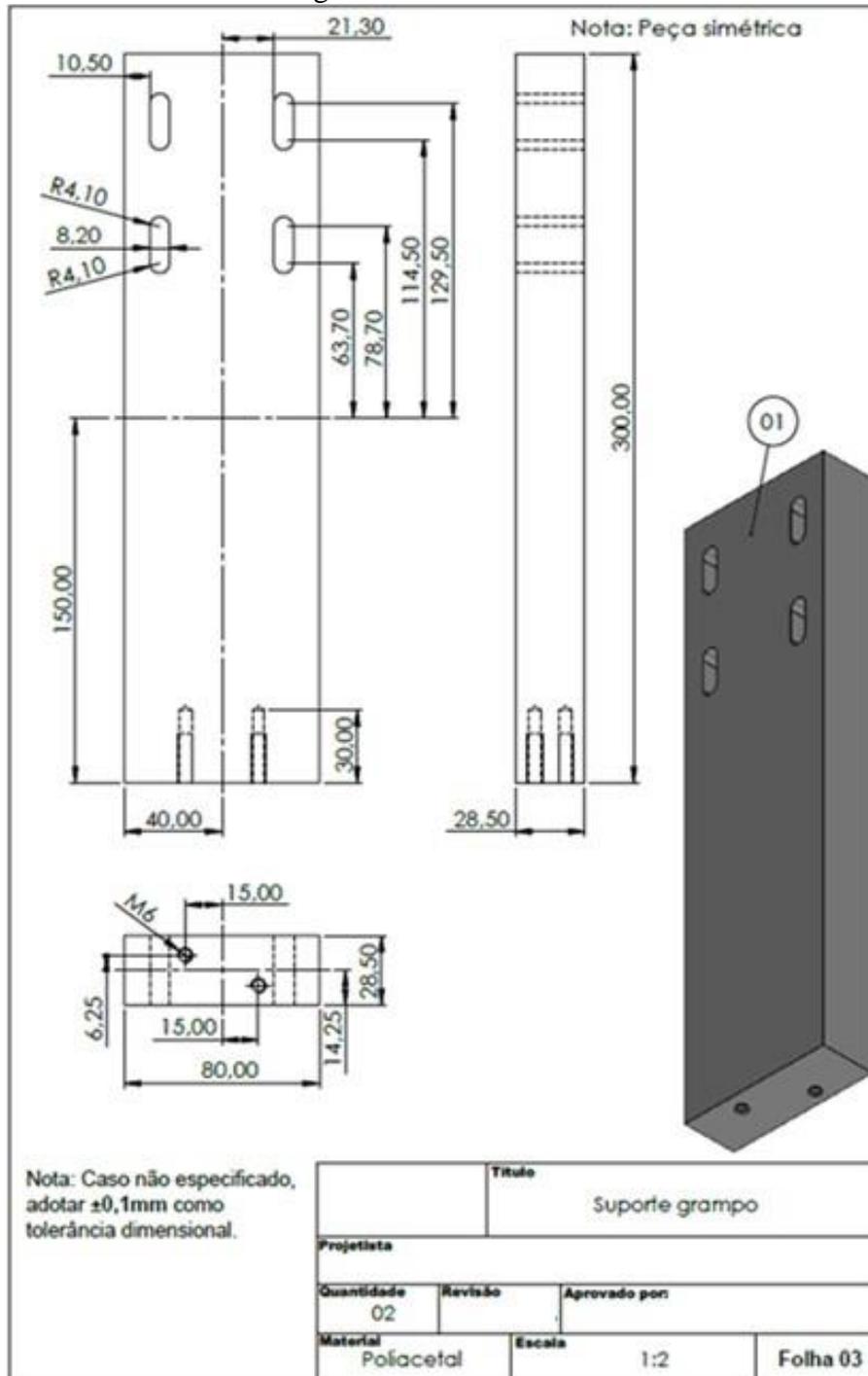


Na Figura 4.8, é apresentada a ilustração da modelagem do dispositivo de tensão aplicada, é possível identificar algumas características que não haviam sido mencionadas anteriormente, como por exemplo os berços (Para acomodação do novo medidor), das chapas que serviram de aterramento (Representado pela cor amarela) e dos quatro eixos, posicionados em cada lado das bases de agulhas. Após a conclusão da modelagem, foi dado início a etapa de criação de desenhos técnicos 2D.

4.4 Criação de desenhos 2D

Os desenhos técnicos 2D são responsáveis por representar diversas informações mais específicas do projeto, assim como: dimensões, ajustes, materiais, tolerâncias e acabamentos. Dessa forma, para cada peça que precisou ser confeccionada, foi criado o desenho 2D, utilizando o ambiente Desenho, do SolidWorks. A Figura 4.9 mostra alguns exemplos de peças que tiveram a criação de desenhos técnicos.

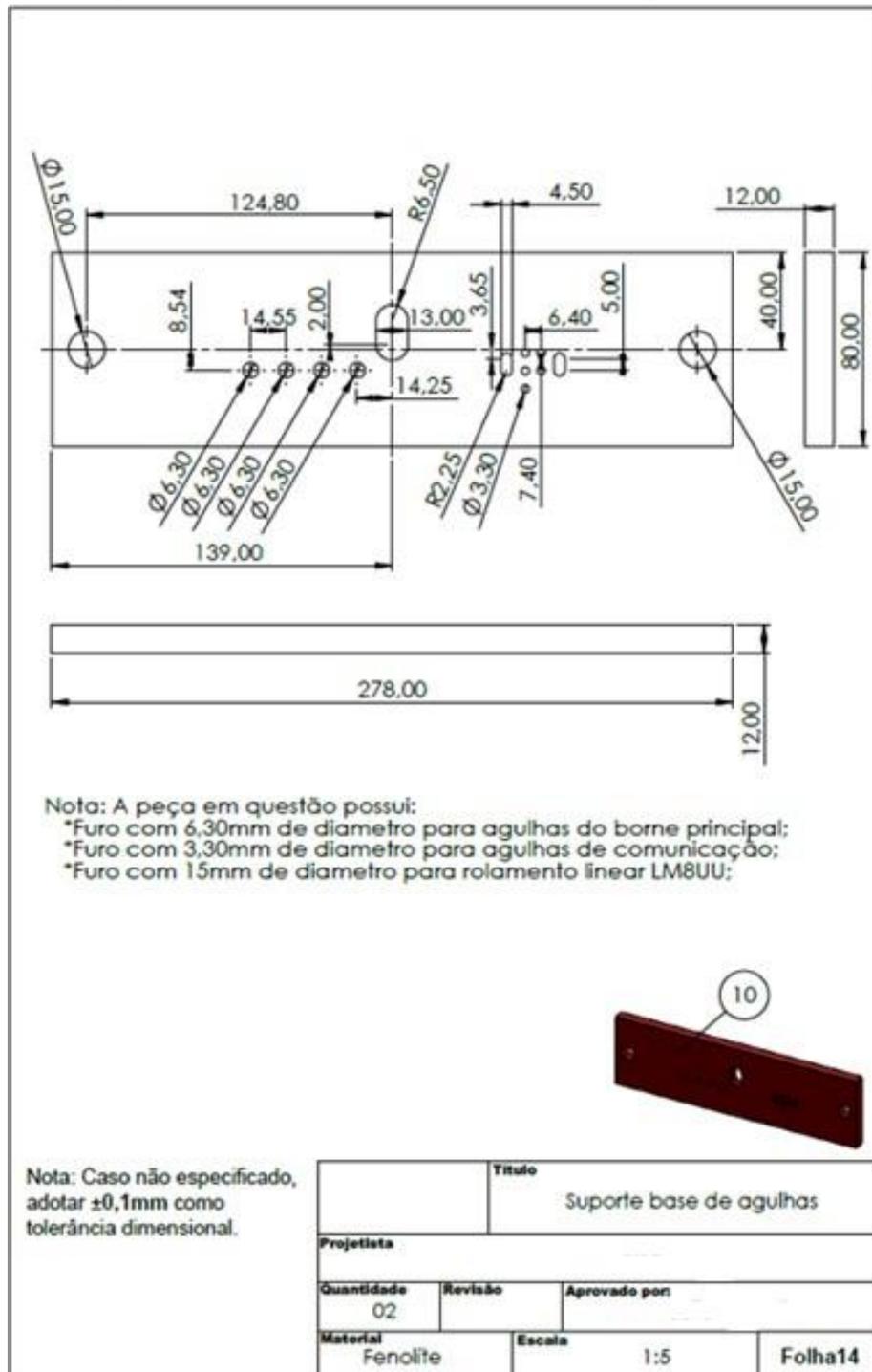
Figura 4.9 - Torres.



No desenho técnico, foi especificado as dimensões de cada operação a ser realizada, foi adotado um ponto de referência no centro da peça, a partir dessa posição, as cotas foram puxadas, dessa forma a usinagem torna-se mais otimizada, reduzindo tempo de operação. A Figura 4.10, mostra o desenho 2D da peça suporte base de agulhas, como padrão adotado em

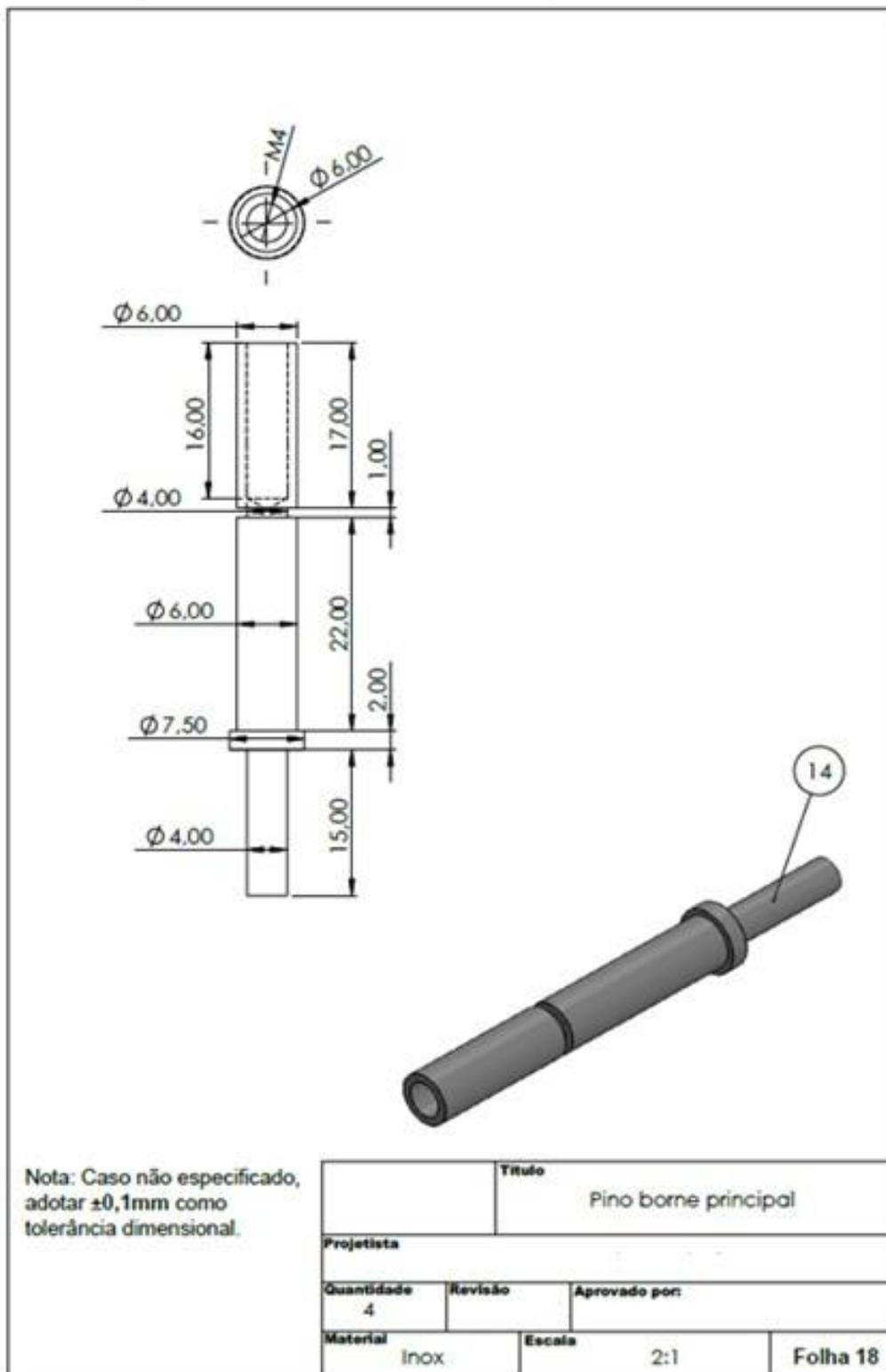
todos os desenhos técnicos, foi especificado todas as dimensões para que as peças pudessem ser confeccionadas, em especial, neste desenho, foi inserido notas de observações, são informações adicionais para alertar o responsável pela usinagem que não foi possível ou não ficou claro nas cotas.

Figura 4.10 - Desenho técnico 2D - Base de agulhas.



Conforme mostrado na Figura 4.11, está exemplificado o desenho técnico das agulhas, observa-se que no desenho está descrito as dimensões, tipo de material, quantidade dentre outras informações pertinentes à confecção.

Figura 4.11 - Desenho técnico 2D - Agulha de contato.



Após a criação dos desenhos 2D, foi realizado o processo de vetorização dos arquivos salvos no SolidWorks, em formato IGS. Para vetorizar cada desenho, foi utilizado o software ArtCAM.

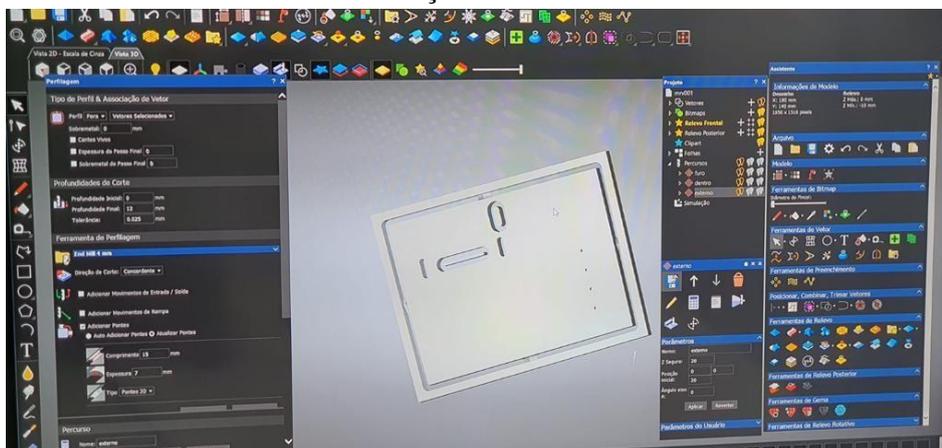
4.5 Confecção de peças em CNC e ferramentaria

O ArtCAM é um software CAD/CAM multifuncional projetado para design de produtos e manufatura de peças utilizando máquinas CNC, máquinas de gravação a laser e/ou impressora 3D. O conjunto de recursos do software combina variedades de ferramentas de modelagem e tecnologias de usinagem em uma solução completa.

A criação do design 3D foi feita a partir da importação de relevos, que é uma ferramenta utilizada para importar arquivos feitos em softwares específicos. Por exemplo, projetar peça no software SolidWorks, que é especialista em modelagem 3D, e em seguida importar para o ArtCAM.

Após a importação do arquivo, foi necessário transformar o relevo em escala de cinza, pois em escala de cinza é possível observar áreas nas quais é necessário adicionar texturas, assim que o relevo foi importado, ele foi visto em uma cor padrão do software. Seguindo o procedimento, após a realização da transformação para escala de cinza, e manipular todos os percursos necessários visando uma usinagem com êxito, foi necessário gerar o arquivo G-Code, pois ele é a linguagem utilizada pela maioria das máquinas CNC. A Figura 4.12 evidencia esta atividade. A Figura 4.12, mostra a interface do ArtCAM com aplicação da transformação do relevo em escala de cinza. A seguir é apresentado o processo de geração do arquivo do tipo G-Code.

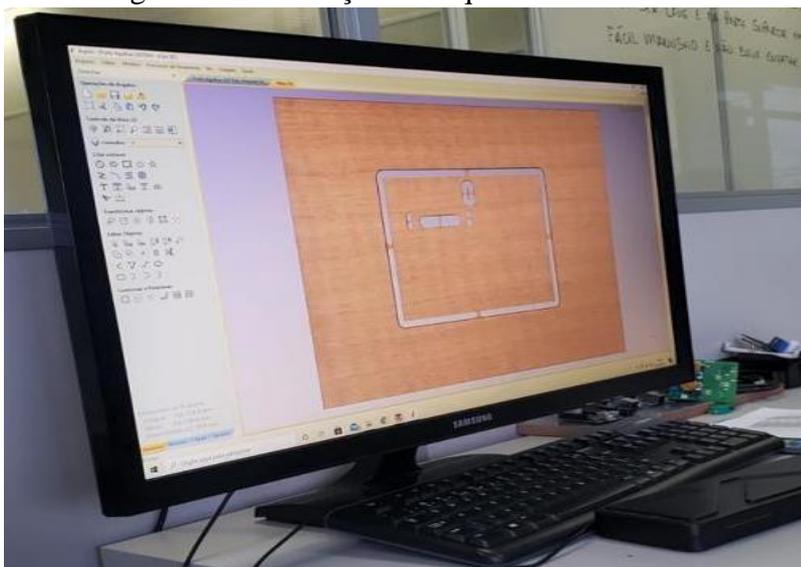
Figura 4.12 - Processo de transformação do relevo em escala de cinza.



A geração de arquivos G-Code, mostrado na Figura 4.13, exemplifica a utilização da interface do ArtCAM para esta operação. Após esta operação foi possível iniciar o processo de usinagem das peças. O primeiro, e mais importante passo na confecção de uma peça na CNC é a modelagem com as devidas dimensões: comprimento, largura e espessura adequados, conforme modelagem 3D. Peças mal modeladas podem criar sérios problemas de projeto 2D no ArtCAM e sua fabricação. Além disso, conhecer a espessura da peça é fundamental, pois isso define a profundidade do material a ser usinado, o caminho necessário para realizar a usinagem e qual a altura mínima para criar um limite no ArtCAM.

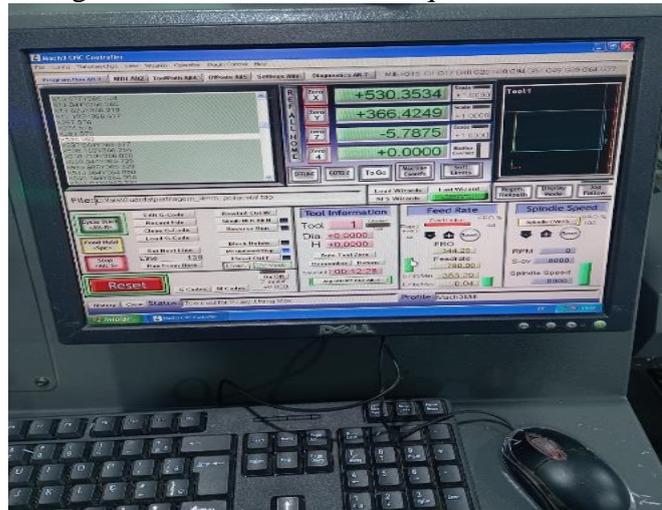
A usinagem foi realizada utilizando a máquina CNC modelo RMC 3000, após as vetorizações, foi dado início ao processo de confecção das peças, a seguir algumas figuras evidenciam esta fase do desenvolvimento.

Figura 4.13 - Geração de arquivo G-Code.



É possível acompanhar todo o percurso de usinagem das peças por meio da tela da CNC, como mostrado na Figura 4.14, o avanço do cabeçote e fresa pode ser monitorado nos três eixos, X, Y e Z. Nele é possível também realizar configuração de velocidade do splind, de avanço dentre outros. A seguir, é ilustrado a confecção da base inferior do dispositivo. Feito em nitacetal branco, trata-se de uma peça em formato retangular e serve como base para sustentar os demais elementos da base, como peças laterais, frontal e posterior, além dos pés de apoio.

Figura 4.14 - Interface da máquina RMC 3000.



A Figura 4.15, mostra a confecção da base inferior, a CNC executa movimentos e vai desbastando a peça até a conclusão de todas as operações. A seguir é apresentado a confecção das bases de agulha.

Figura 4.15 - Confecção da base inferior.

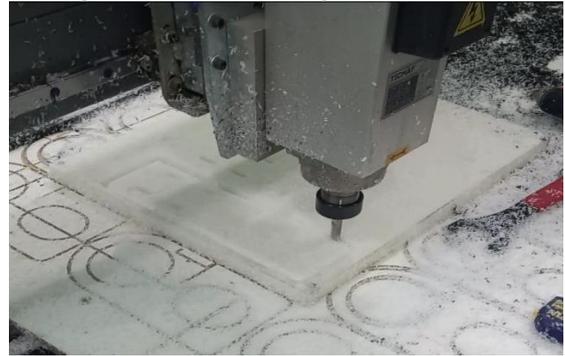


A Figura 4.16 mostra a confecção da base inferior, a CNC executa movimentos e vai desbastando a peça até a conclusão de todas as operações. A seguir é apresentado a confecção das bases de agulha. A base de agulhas, foi confeccionada em material fenolite, conforme especificado durante a modelagem 3D. A Figura 4.17, expressa essa usinagem.

Figura 4.16 - Confeção das bases de agulhas.



Figura 4.17 - Confeção das torres.



Na Figura 4.17, segue a evidência da confecção das torres, o poliacetal foi fixado sobre a mesa da CNC e o programa foi desenvolvido para usinar as duas torres. Neste dispositivo, somente as agulhas não foram confeccionadas na CNC, as demais todas foram usinadas na máquina. Após o período de confecção, entrou o processo de montagem do dispositivo, esta montagem foi realizada pelo projetista e desenvolvedor mecânico, ocorreu no laboratório do instituto.

4.6 Montagem do dispositivo

Para realizar a montagem, foi utilizado ferramentas como chaves allen, arco de serra, chave fenda e parafusos de diversos tamanhos e diâmetros. As figuras a seguir mostram a etapa de montagem até a conclusão do dispositivo. Até chegar a fase conforme mostrado na Figura 4.18, a montagem teve a fixação da base, com o aperto dos parafusos entre a base inferior, laterais esquerda e direita, frontal e posterior. Foi fixado dobradiças para abertura e fechamento da base superior, as torres foram instaladas neste momento, além das alças, pés de apoio e suporte dos eixos. Na Figura 4.19, é mostrado a continuação da montagem, já é possível observar os grampos fixados às torres, os berços instalados e um lado da base de agulhas posicionado. Nesta fase, foi dado início às ligações elétricas, responsáveis pelos acionamentos das tensões e aterramento.

Figura 4.18 - Montagem do sistema de tensão aplicada. Parte 1.

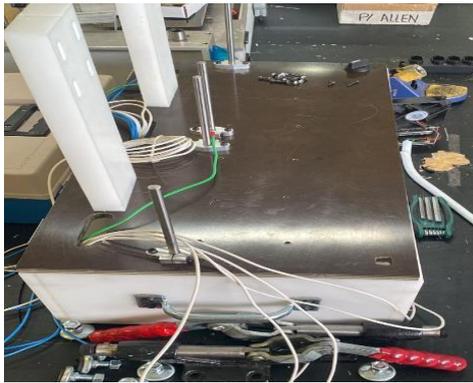


Figura 4.19 - Montagem do sistema de tensão aplicada. Parte 2.

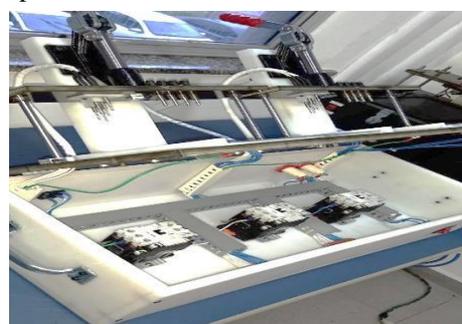


O sistema recebeu contactoras, conforme Figura 4.20, foram responsáveis pelos acionamentos das tensões em cada etapa do teste. As ligações elétricas foram realizadas seguindo diagramas desenvolvidos. Após a fase de montagem do dispositivo, foi obtivo o resultado conforme mostrado na Figura 4.21, dispositivo mecanicamente montado e com as devidas ligações elétricas, pronta para ser executado a validação.

Figura 4.20 - Montagem do sistema de tensão Aplicada. Parte 3.



Figura 4.21 - Montagem do sistema de tensão aplicada. Parte 4.



De forma resumida, o dispositivo contou com duas posições, sendo possível testar o novo produto simultaneamente.

4.7 Dispositivo de parametrização

O dispositivo de parametrização tem a finalidade de parametrizar o firmware na placa do medidor projetado, isto é feito através de um sistema embarcado em uma Raspberry Pi 4 baseado na linguagem de programação Python, o qual coordena a atuação dos elementos mecânicos e gravação dos dados de parametrização utilizando uma biblioteca para

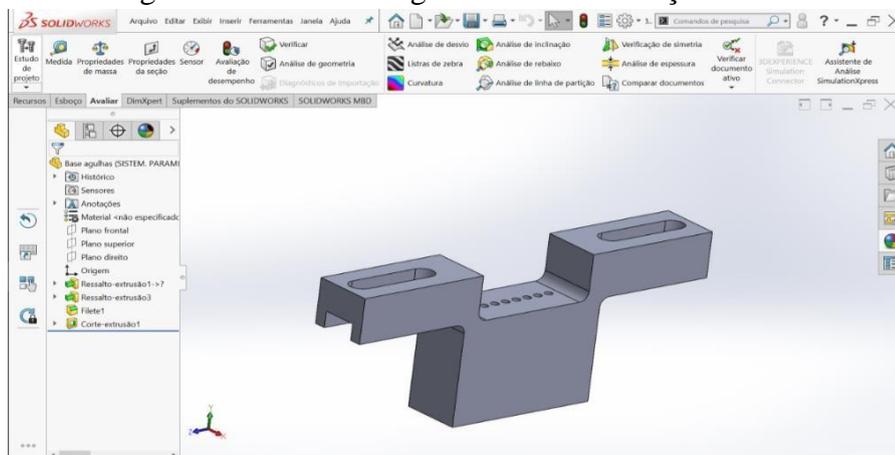
gerenciamento da comunicação Serial RX/TX com o medidor protótipo. Estes dados são intrínsecos ao medidor como a tarifação horo sazonal, e calibração para a correta aferição das grandezas medidas.

Este dispositivo não está incluso dentre os nove ensaios descritos no Anexo B do RTM, mas para o processo da empresa estudada é de grande relevância, tendo em vista esta importância, foi desenvolvido este equipamento para parametrizar o firmware na placa do medidor protótipo. Para se obter o sistema de parametrização, foi utilizado a mesma metodologia do desenvolvimento do sistema de tensão aplicada. O projetista mecânico, junto ao desenvolvedor mecânico reuniram-se para esboçar peças em modelagem 3D, seguidamente foi criado desenhos técnicos 2D, confecção das peças utilizando a CNC e montagens. A seguir é apresentado o detalhamento das atividades.

4.7.1 Desenvolvimento de modelagem 3D

Durante o desenvolvimento do projeto, foi utilizada a ferramenta SolidWorks, as peças inicialmente foram projetadas individualmente e todas tiveram como referência o projeto mecânico do medidor LoRa. As peças precisaram ser bem dimensionadas, para que pudessem encaixar-se de maneira adequada às peças comerciais. A Figura 4.22 é mostrada a evidência de modelagem de algumas peças. A peça Base de agulhas de comunicação, Figura 4.22, por exemplo, foi desenvolvida com o objetivo de direcionar as agulhas de comunicação, para que as mesmas pudessem entrar em contato com a placa do medidor LoRa, e assim estabelecessem a troca de dados.

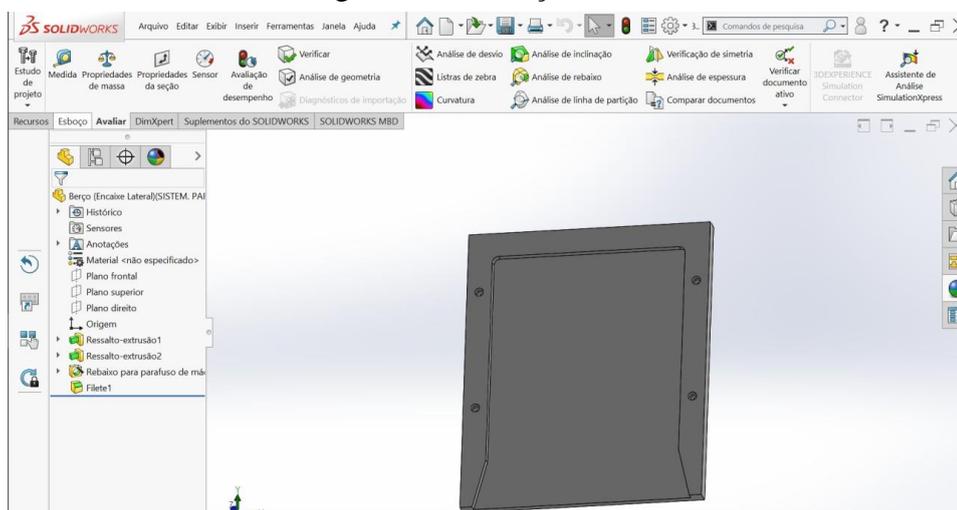
Figura 4.22 - Base de agulhas de comunicação.



Como mostrado na 4.22, a peça possui furos pelos quais podem ser inseridas até 8 agulhas de comunicação, porém, essa etapa de teste só necessita inicialmente de 3 agulhas. As 3 agulhas citadas precisam tocar exatamente dentro de uma região de contato localizada na placa do medidor, para que a operação de teste ocorra sem problemas. Para tal, é necessário que o medidor seja inserido na máquina de teste e fique posicionado exatamente no local projetado para contato.

Diante da necessidade de manter o medidor LoRa em uma posição específica, para que o mesmo não se movesse, desenvolveu-se a peça Berço, a qual foi projetada de acordo com o dimensionamento externo do medidor, para que o mesmo pudesse ser encaixado sem folgas, como descrito na Figura 4.23.

Figura 4.23 – Berço.

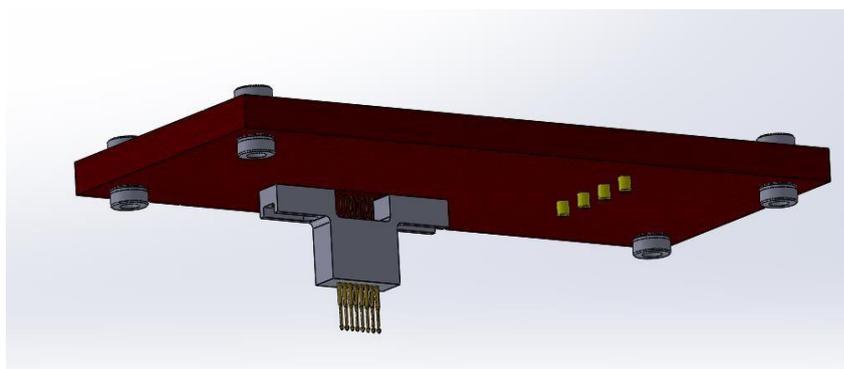


O berço possui limitadores, laterais e em sua posterior, servindo como guia para acomodar o medidor LoRa em uma posição que permita a conexão das agulhas de teste, aumentando assim a precisão no momento de contato. Na parte frontal do berço foram inseridos chanfros de convite, buscando facilitar a entrada do medidor e guia-lo.

4.7.2 Montagem

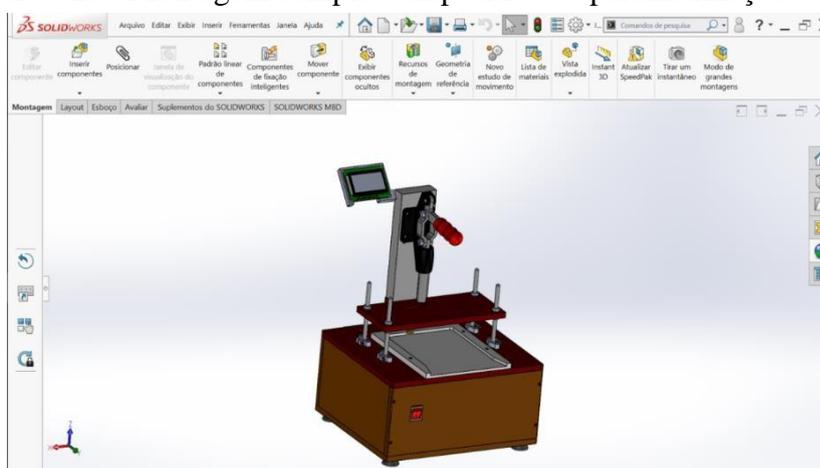
Os softwares de desenho possuíram grande importância, tendo em vista a facilidade de modelagem virtual que os mesmos proporcionaram. Dentro do ramo da modelagem, utilizou-se da ferramenta: montagem. A montagem como o próprio nome diz, permite a união de uma ou mais peças, formando um conjunto visual conforme a 5.24, descrita abaixo.

Figura 4.24 - Montagem base de agulhas.



A montagem base de agulhas, descreve um conjunto formado por peças comerciais e usináveis. Através da análise visual dimensional, pode-se concluir diversos pontos como: eixos compatíveis com o rolamento, a peça que comportou as agulhas possui altura o suficiente para fornecer o contato necessário com a placa. Todos esses pontos foram resolvidos com o auxílio da montagem correta. A montagem ideal permitiu entender o dispositivo de uma maneira ampla, a Figura 4.25, descreve a montagem do dispositivo de parametrização em sua forma completa.

Figura 4.25 - Montagem completa dispositivo de parametrização.



Através da montagem completa do dispositivo de parametrização, conseguiu-se:

- Reduzir erros referentes a colisões de peças;
- Realizar testes virtuais;
- Melhora na visualização do produto e comunicação entre a equipe.

4.7.3 Desenho técnico 2D

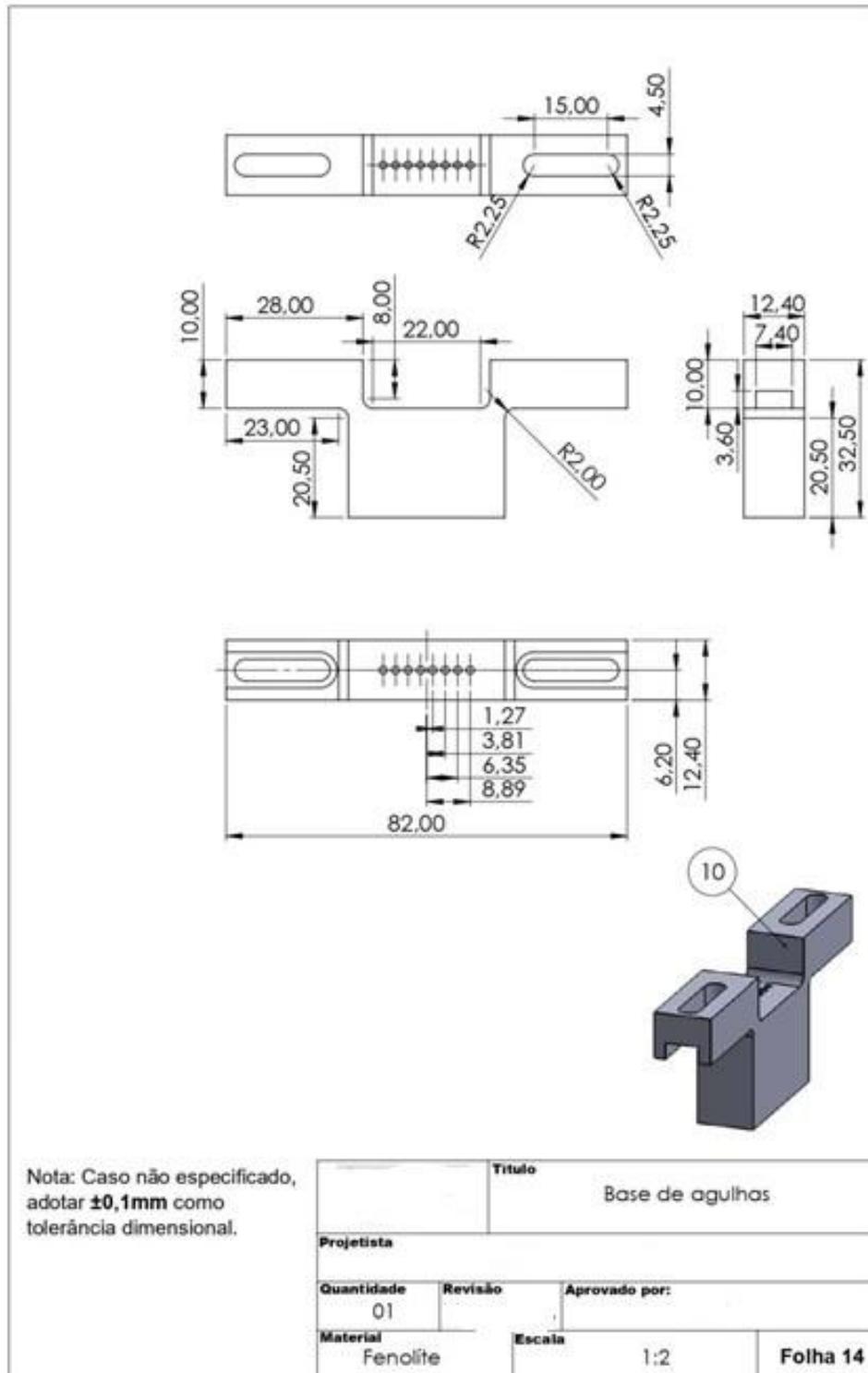
O desenho em duas dimensões (2D), fornece detalhes importantes para o entendimento de um determinado objeto/peça a partir de suas vistas. No projeto em questão, o desenho técnico atuou fortemente em conjunto com a modelagem, montagem e usinagem, tendo em vista que na fase de modelagem a peça foi gerada visualmente, na montagem a peça foi unida a um conjunto com outras peças e para a usinagem, é necessário fornecer dados dessa peça.

Uma das principais funções do desenho técnico, é a de fornecer dados específicos da peça trabalhada, como:

- Dimensões, foi gerada uma folha contendo as medidas reais da peça, dependendo do tamanho do objeto trabalhado, atuando juntamente com as escalas, que são ferramentas pelas quais o software informa ao leitor que o objeto foi diminuído ou aumentado. Dentre as dimensões fornecidas, é comum que as medidas sejam expostas na unidade de milímetros (mm).
- Materiais, toda peça precisou ser bem definida quanto ao seu material, pois dependendo da forma/local onde ele foi inserido/aplicado, o material poderia influenciar em sua atuação, haja vista que a peça pode ser feita de metal, madeira, plástico e outros.
- Tolerância, fator de suma importância, responsável por estipular uma margem de erro no dimensionamento fornecido, comumente usada com $\pm 0,1\text{mm}$.

Baseado nos princípios citados, foram realizados desenhos técnicos de todas as peças usináveis do dispositivo de parametrização. A Figura 4.26, exemplifica como essa etapa foi realizada.

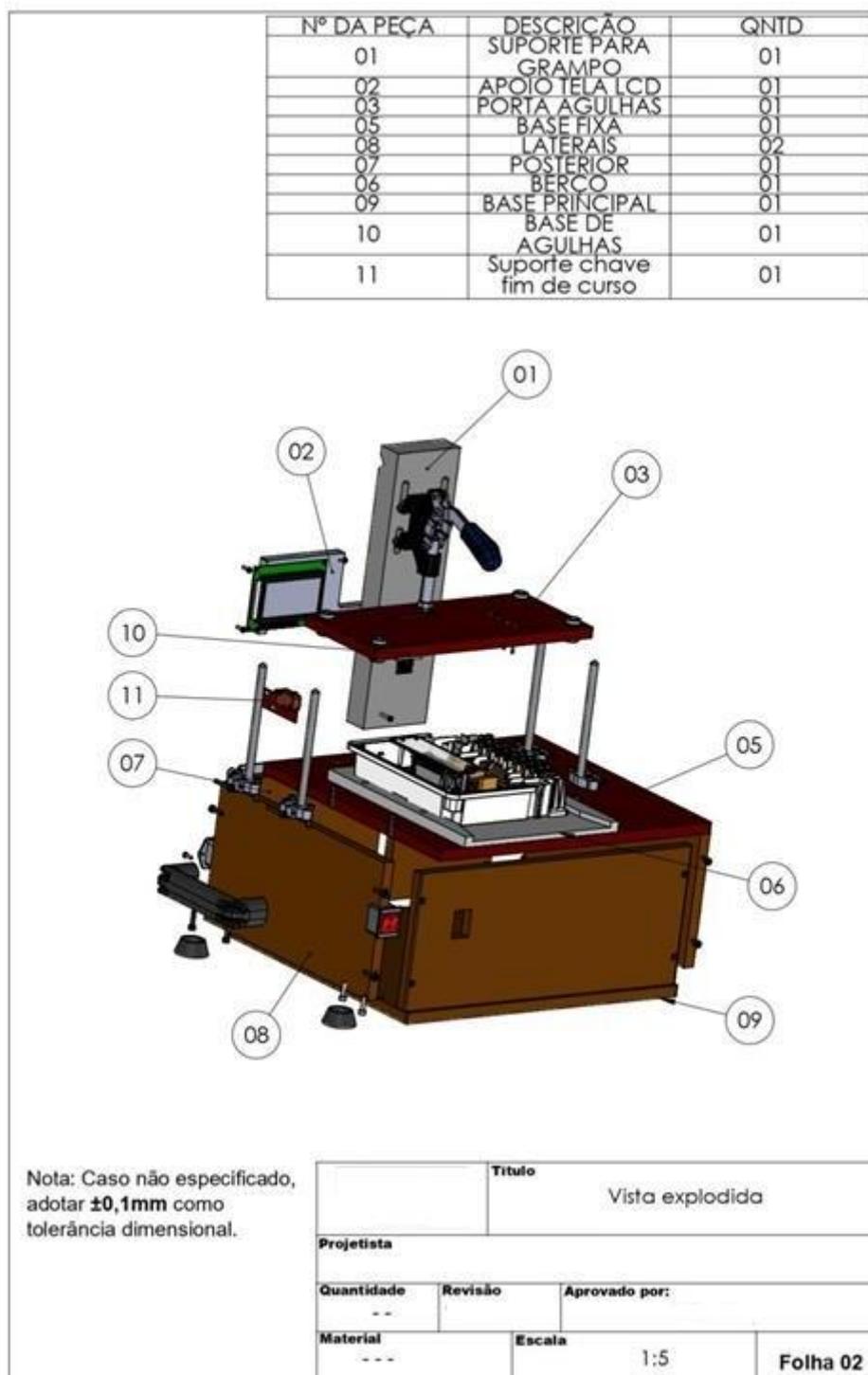
Figura 4.26 - Desenho técnico base de agulhas.



Ao fim do projeto mecânico, foi necessário que uma lista quantitativa de peças fosse desenvolvida, o software possui configurações que permitem que a mesma seja criada de maneira automática. A Figura 4.27, visou tornar o projeto mecânico completo, pois demonstra

diversos dados quantitativos como: quantos parafusos foram utilizados, quantas peças comerciais foram utilizadas, quantas peças precisaram ser usinadas, dentre outras.

Figura 4.27 - Lista de peças Dispositivo de parametrização.



O desenho técnico descrito na Figura 4.27 ressalta os conceitos de lista de peças descritos acima.

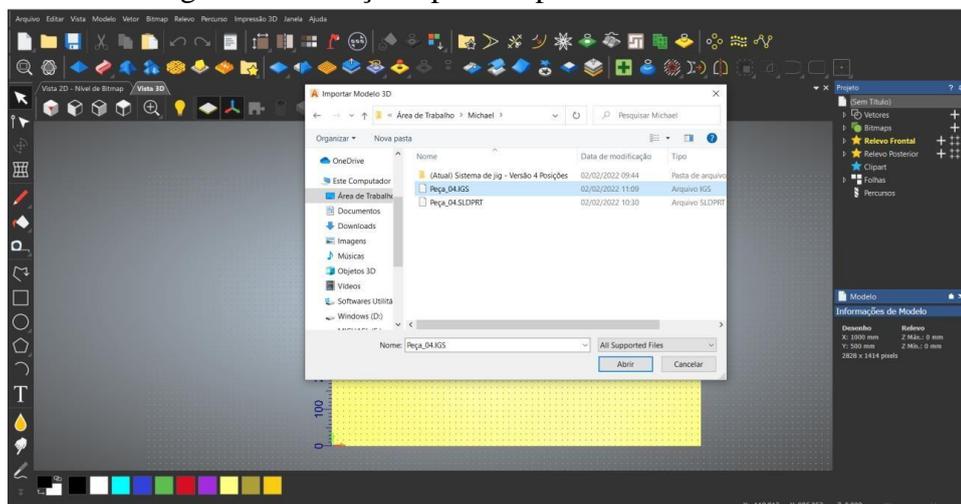
4.7.4 Usinagem

A usinagem ocorreu em duas etapas:

1. Geração do código da peça em linguagem de máquina;
2. Usinagem prática;

Quanto a primeira etapa, todas as peças desenhadas no software SolidWorks foram salvas em formato Igs para que depois pudessem ser importada ao software do ArtCam (responsável por gerar o código em linguagem de máquina). A Figura 4.28 mostra o processo de importação de peça.

Figura 4.28 - Peça importada para o ArtCam.



O software ArtCam possui diversas ferramentas, dentre elas, a possibilidade de gerar a linguagem de máquina, para tal, foi necessário informar dados como: espessura da peça a ser usinada, tipo de ferramenta que irá realizar os furos/cortes necessários, posicionamento inicial da ferramenta, velocidade de rotação, dentre outros. Após toda essa etapa de edição, o software encerra sua parte gerando um arquivo G-Code, contendo os dados necessários para a usinagem da peça em máquina CNC. A segunda etapa, refere-se a usinagem na prática, para tal, foi utilizada uma CNC (Computer Numeric Control). O processo de usinagem em máquina CNC

oferece diversas vantagens como: Mais flexibilidade, maior precisão, maior quantidade de operações, variedades de operações com a mesma fixação, maior produtividade das máquinas, curto tempo de produção quando comparada aos sistemas convencionais, entre outros.

Em suma, todo o projeto mecânico seguiu uma linha lógica de atuação, partindo de que:

1. O desenvolvimento mecânico foi realizado via software de desenho, utilizando da modelagem em 3 dimensões;
2. A montagem a partir da união das peças que foram geradas na etapa da modelagem 3D;
3. Criação dos desenhos técnicos, visando fornecer dados e medidas o suficiente para auxiliar a compreensão na etapa de usinagem;
4. Etapa final, usinagem, praticamente juntando todas as etapas acima descritas, nela os arquivos de desenhos foram modificados via software para uma linguagem em que a máquina pudesse atuar, dados inseridos nos desenhos 2D foram utilizados como fonte de referência, e para checar se as medidas finais que os objetos precisariam ter estavam corretas, dentro dos seus limites de tolerância.

4.8 Elaboração dos diagramas

A descrição detalhada dos diagramas começa com os resultados dos estudos para cada caso de componentes eletrônicos e elétricos. Os componentes utilizados foram escolhidos com base na lógica de como os circuitos deveriam funcionar. As ligações elétricas efetuadas respeitaram as fichas técnicas de cada componente eletrônico e elétrico. Os circuitos eletrônicos diferem dos circuitos elétricos, pois possuem interconexões entre vários componentes eletrônicos e componentes de potência, enquanto os circuitos elétricos possuem apenas conexões entre componentes elétricos.

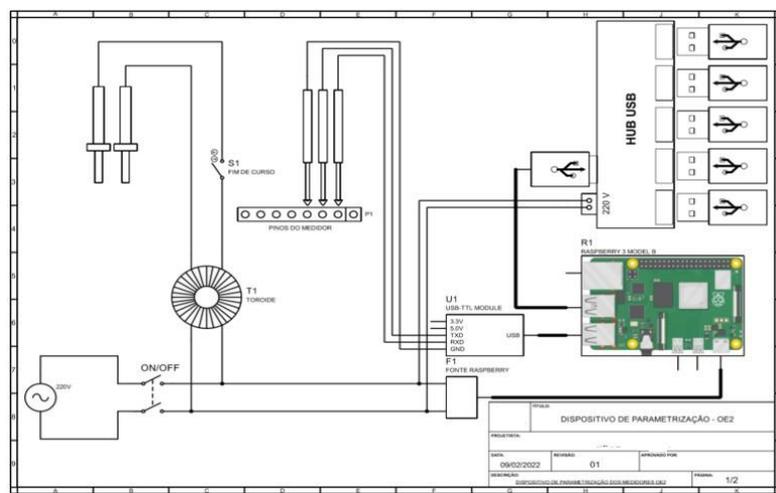
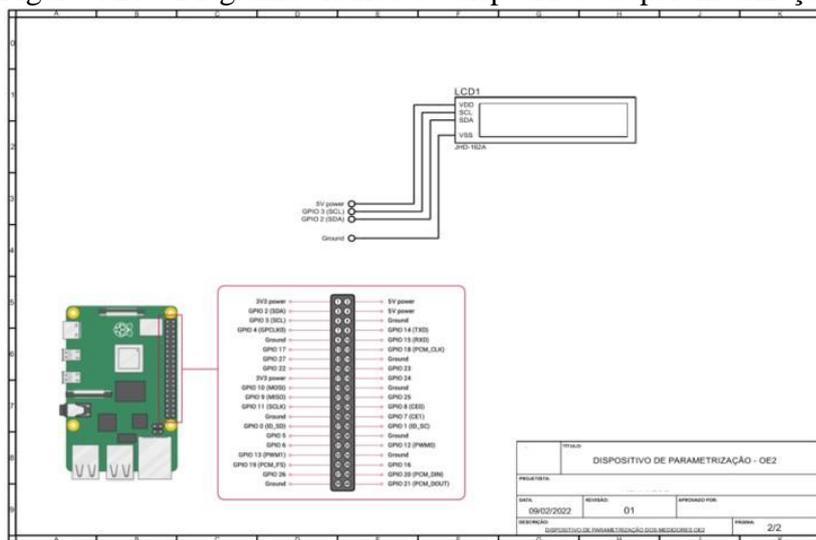
O maior diferencial dos componentes eletrônicos é a possibilidade de controlar os mesmos, pois esse grupo de componentes tornam-se um circuito integrado, no qual é necessário um comando programável para realizarem alguma atividade, como por exemplo, o microcontrolador (IC, Arduino, PLC, etc.) no qual recebe determinado comando e transmite para os componentes eletrônico que, por sua vez obedecem e operam de acordo com o comando. Com base nos argumentos apresentados, foi elaborado os diagramas dos dispositivos responsáveis pelos testes de validação do sistema LoRa e seus respectivos produtos. Os

dispositivos foram nomeados como dispositivo de parametrização; dispositivo de tensão aplicada; dispositivo de gravação de firmware.

4.9 Dispositivo de parametrização

Inicialmente, foi necessário criar o diagrama elétrico do dispositivo, foi utilizado o software Proteus, como nos demais diagramas. Este circuito foi ligado junto à solução eletrônica, o Raspberry foi utilizado para criar a interface e comunicar com o medidor protótipo. A interface foi desenvolvida para mostrar ao usuário o resultado da parametrização. E a comunicação do dispositivo com medidor foi intermediada pelo USB TTL, que estará conectado no Raspberry e com agulhas em contato direto com os pinos do medidor. O diagrama está representado na Figura 4.29.

Figura 4.29 - Diagrama elétrico do dispositivo de parametrização



O produto utilizado para o desenvolvimento do sistema LoRa, é chamado de medidor eletrônico polifásico. Este produto necessita ser parametrizado conforme protocolo do cliente e, para atender esta demanda o dispositivo de parametrização foi desenvolvido, porém para que o cliente e sua companhia consigam obter o controle dos medidores parametrizados corretamente, foi utilizado o sistema LoRa para torna-se possível, ou seja, o sistema LoRa controla todos os medidores no qual passaram pelo dispositivo de parametrização e comunica através de um ID para o banco de dados da companhia, informando assim que o mesmo encontra-se no status de parametrizado e apto para prosseguir o processo de teste.

O diagrama foi desenvolvido no software Proteus, pois o mesmo permite simular possíveis erros elétricos que podem causar curto circuito e conseqüentemente danificar os componentes. A seguir pode-se analisar o uso do microcontrolador Raspberry PI 3, ele foi responsável pela interface do dispositivo de parametrização e através dele que a lógica programável foi aplicada para parametrizar os medidores. Além disso, podemos observar o uso de um toroidal para criar um campo magnético capaz de gerar uma corrente pré-determinada pelo cliente, logo os medidores são alimentados e parametrizados. Contou-se com o auxílio de um Hub USB para conectar objetos externos como por exemplo, mouse, teclado e scanner. Podemos observar também um módulo RX/TX que é o responsável pelas trocas de informações entre o medidor protótipo e a Raspberry com o banco de dados. Foi utilizado um display gráfico para auxiliar a interface do dispositivo, assim como mostra a segunda etapa do diagrama elétrico apresentado na Figura 4.29.

O circuito eletrônico evidenciado na Figura 4.30 contém a parte física simples, porém de grande funcionalidade. Diferentemente dos circuitos anteriores, a parte do sistema embarcado ficou responsável pela Raspberry PI 3, foi através dela que todos os comandos de parametrização foram enviados para os medidores eletrônicos. Podemos observar que se necessitou do auxílio de um toroidal para gerar uma determinada corrente capaz de alimentar os medidores eletrônicos para receberem as parametrizações. Além desses componentes acima citados, foi utilizado também uma Hub USB para alimentar objetos externos do dispositivo, como por exemplo, teclado, mouse, monitores e scanner.

Este circuito por ter a parte física simples, as ligações elétricas foram simples de ligar, como podemos observar na 4.30 usamos uma extensão elétrica de 3 tomadas para alimentar a Raspberry PI 3, transformador toroidal e o Hub USB.

Figura 4.30 – Circuito eletrônico do sistema de parametrização.



O transformador toroidal utilizado no protótipo é o que está evidenciado na Figura 4.31, o mesmo possui diversos materiais magnéticos, desde fitas finas de aço silício com grão orientado, até materiais advindos da nanotecnologia. Isso resulta em uma imensa gama de produtos que podem se beneficiar da grande potência do transformador toroidal. O hub USB utilizado no dispositivo de parametrização é o que está evidenciado na Figura 4.32 o mesmo foi responsável por ampliar os canais de portas USB que o dispositivo contém. O hub comunica-se diretamente com a Raspberry tornando possível a comunicação de dados externos com internos.

Figura 4.31 - Transformador toroidal.

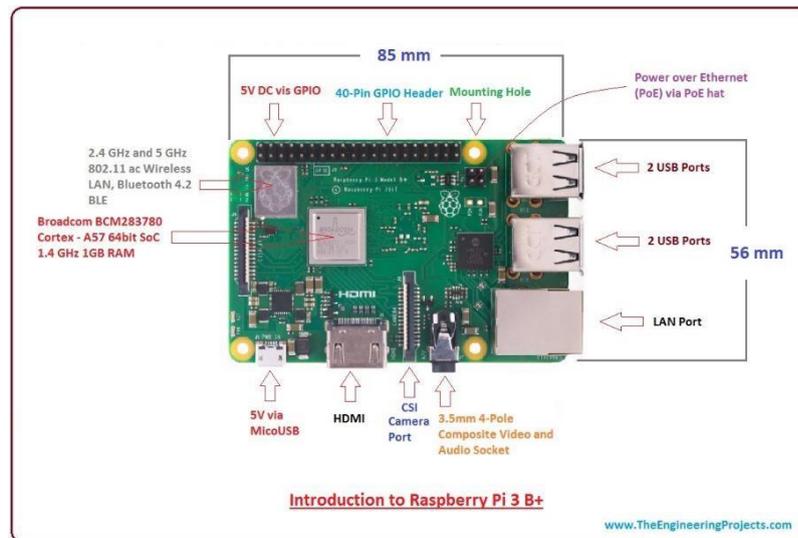


Figura 4.32 - Hub USB 2.0 com 7 portas.



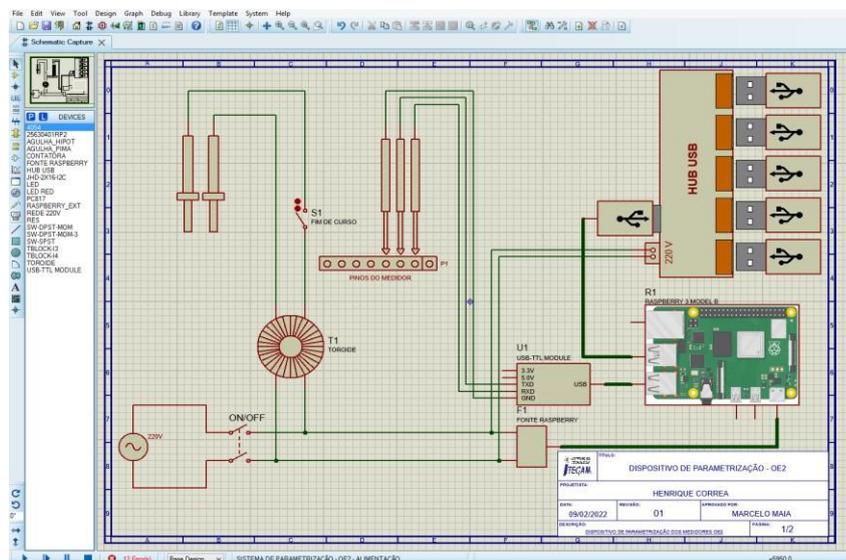
A Figura 4.33 representa o Raspberry utilizado no sistema embarcado do dispositivo de parametrização. O mesmo é um minicomputador que se conecta a um monitor de PC ou TV, sendo operado por um mouse e teclado padrão. Todo o hardware do Raspberry é integrado em uma única placa, permitindo que as pessoas explorem os componentes.

Figura 4.33 - Raspberry Pi 3.



A Figura 4.34 mostra o circuito simulado no software Proteus e como foi respeitado todas as ligações ao montar a parte física, antes de começarmos qualquer tipo de desenvolvimento de montagem, foi necessário simular a funcionalidade do circuito através do software, para nos precaver de imprevistos como, curto-circuito ou perda de componente elétrico/eletrônico devido a surtos elétricos. Feito isto, após a validação de segurança e funcionalidade, o circuito torna-se apto para sair do software e passar para a montagem física, vale ressaltar que à cada etapa do processo de montagem, os circuitos são montados e testados por parte para ser mais fácil detectar algum tipo de problema.

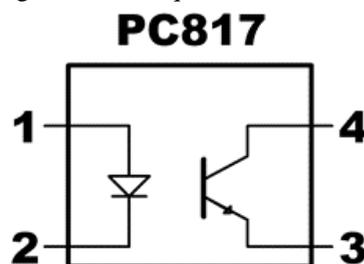
Figura 4.34 - Diagrama elétrico do dispositivo de parametrização (software proteus; 1/2).



Foi utilizado um conversor USB TTL para promover a comunicação serial de RX/TX com a Raspberry. O mesmo permitiu que sinais da porta USB fossem convertidos em sinal serial de nível TTL RS232, dessa forma facilitando a comunicação entre computadores e plataformas microcontroladoras que não possuem conversor USB serial integrado na placa.

Devido ao fato desta comunicação ser feita diretamente com o medidor, o qual possui uma fonte de tensão e um circuito próprio, qualquer anormalidade na comunicação como sobrecarga de tensão e corrente, ou até mesmo curtos entre terminais, pode comprometer o hardware do medidor de maneira irreversível. Por isso optou-se por desenvolver um circuito de isolamento através de um optoacoplador PC817, o qual possui internamente um diodo emissor de luz na entrada, e um fototransistor na saída, como pode ser visto na Figura 4.35.

Figura 4.35 - Conversor USB para serial TTL RS232 - PL2303. Figura 4.36 - Esquema elétrico do PC817.



Para o desenvolvimento deste circuito, utilizou-se o Proteus para simular o circuito e utilizando uma ferramenta interna chamada de ARES, modelou-se uma placa de circuito impresso a qual seguiu normas e padrões de placas profissionais da indústria. Esta placa seguiu o diagrama projetado pela equipe de desenvolvimento que pode ser visualizada na Figura 4.37, a qual foi a primeira versão desta placa isoladora de uma comunicação SIMPLEX (apenas uma direção), além de seu projeto de placa de circuito impresso na Figura 4.38.

Figura 4.37 - Diagrama elétrico da placa isoladora SIMPLEX.

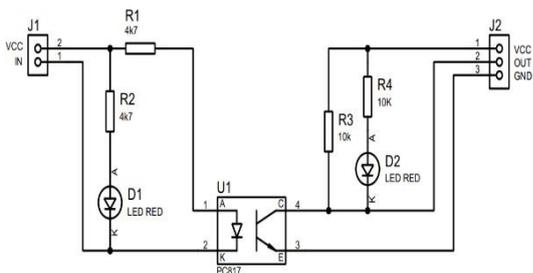
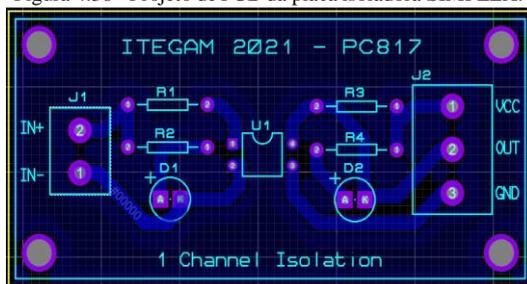
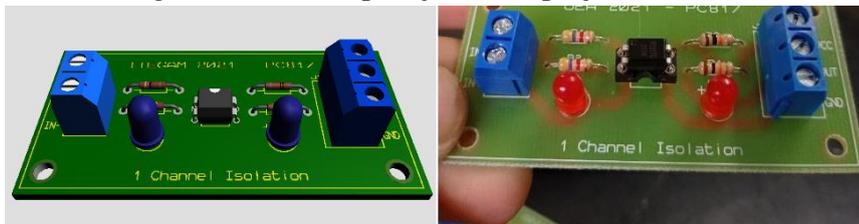


Figura 4.38 - Projeto de PCB da placa isoladora SIMPLEX.



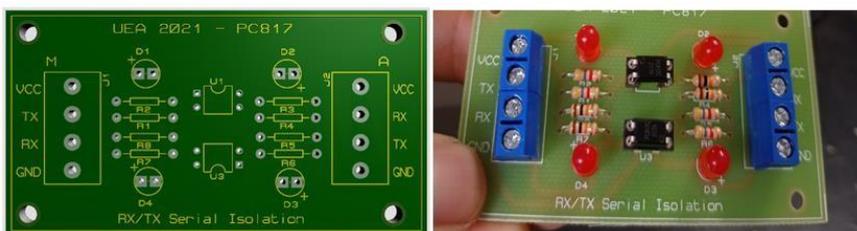
Esta pesquisa foi enviada para uma empresa terceira prototipar a mesma, aplicando uma camada de verniz, bem como a serigrafia para indicar os componentes durante o processo de soldagem. A Figura 4.39 apresenta uma comparação entre o modelo 3D gerado durante o projeto e a peça final montada com os componentes fixados.

Figura 4.39 - Comparação entre projeto e modelo final.



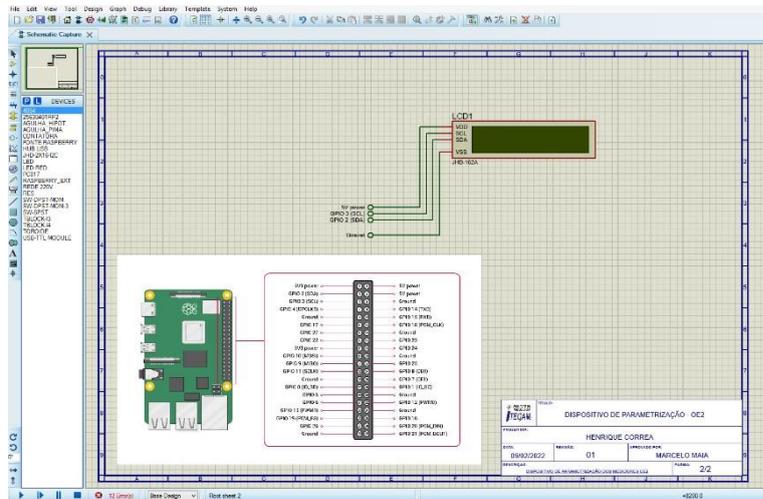
Da mesma forma com a validação do desenvolvimento de uma placa de isolamento para apenas um caminho de comunicação SIMPLEX, partiu-se para o projeto de um modelo final e completo que isolasse ambos os caminhos de comunicação RX/TX, servindo como uma comunicação do tipo DUPLEX, como é mostrado na Figura 4.40 sendo uma comparação entre o modelo idealizado e a placa impressa e soldada.

Figura 4.40 - Projeto de PCB da placa isoladora DUPLEX.



A Figura 4.41 representa a segunda parte do projeto no software Proteus, no qual apresenta o Raspberry e um LCD para informar o status dos medidores, se caso foram parametrizados ou não. O modelo do LCD utilizado encontra-se na Figura 4.42.

Figura 4.41 - Diagrama elétrico do dispositivo de parametrização (software proteus; 2/2). Figura 4.42- Display LCD 16x2 backlight verde com I2C soldado.

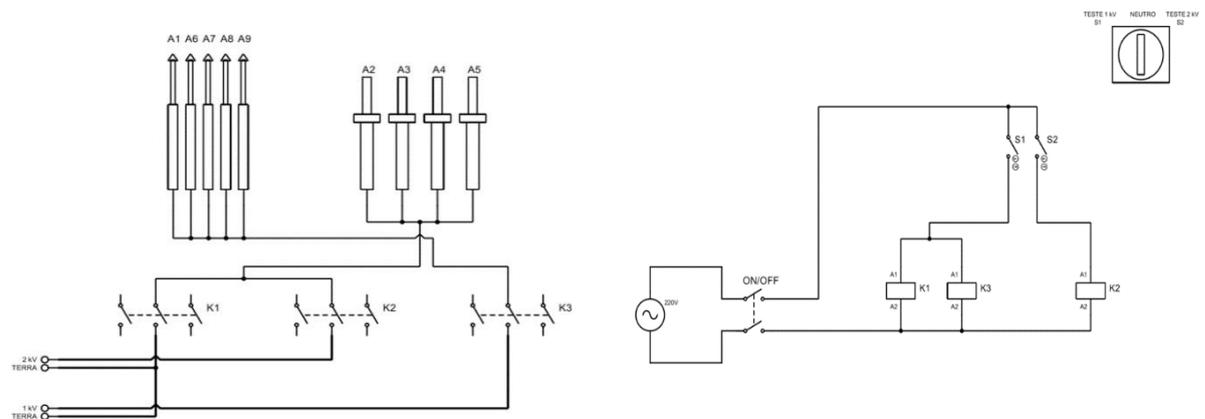


com I2C soldado.



4.10 Dispositivo de ensaio de tensão aplicada

Figura 4.43 - Diagrama elétrico do dispositivo de tensão aplicada.



Este dispositivo é popularmente conhecido como teste HIPOT. Ele atua gerando alta tensão, no qual é aplicada sobre o isolante/aterramento nos medidores eletrônicos, monitorando assim a passagem de tensão. Acima podemos analisar, na Figura 4.44, o esquema elétrico do equipamento que auxilia o HIPOT a realizar seus testes, no caso este equipamento foi desenvolvido com a utilização da tecnologia do sistema LoRa com o intuito de monitorar via banco de dados o status de cada medidor ensaiado.

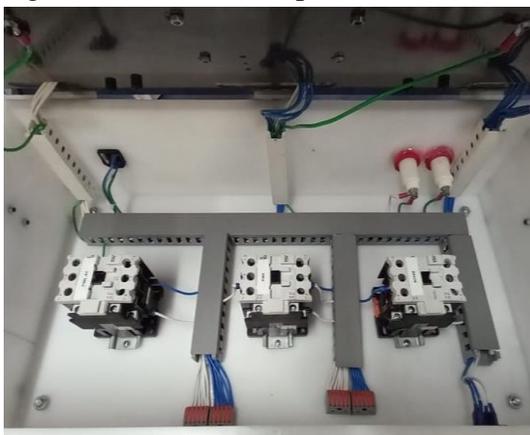
Foi importante a simulação do circuito no software antes de montá-lo na prática, pois o software informa quando há algo de errado, ou possíveis curtos-circuitos. Evitando assim que

os componentes não sejam danificados devido a conexões incorretas. Foi possível inserir no Proteus os comandos programáveis, sendo assim possível simular como o circuito irá se comportar e se a lógica utilizada atende a demanda que o cliente solicitou.

O circuito da Figura 4.44 representa um diagrama de potência do dispositivo de ensaio de tensão aplicada, o mesmo foi realizado no software Proteus e devidamente simulado para não ocorrer nenhum acidente elétrico. Este dispositivo tem a finalidade de realizar testes de tensão aplicada para saber se algum medidor está com fuga de corrente, ou com algum componente danificado que possa prejudicar o seu desempenho ao chegar no cliente final. Este diagrama contém poucos componentes, pois o mesmo tem a base de funcionamento simples, foi necessário apenas um conjunto de chaveamento que trabalha de acordo com o RTM (relatório técnico metrológico) que estabelece como os chaveamentos devem ser feitos e qual a ordem que os mesmos devem atuar nos respectivos ensaios.

Pode-se analisar no diagrama da Figura 4.44, três contactoras, cada uma com é responsável por um teste pré estabelecido pelo RTM, podemos observar também vários curtos para chaveados, pois como já foi relatado anteriormente, o intuito destes ensaios é simular possíveis erros para encontrar fuga de corrente nos medidores ou curto-circuito.

Figura 4.44 - Diagrama elétrico do dispositivo de tensão aplicada.

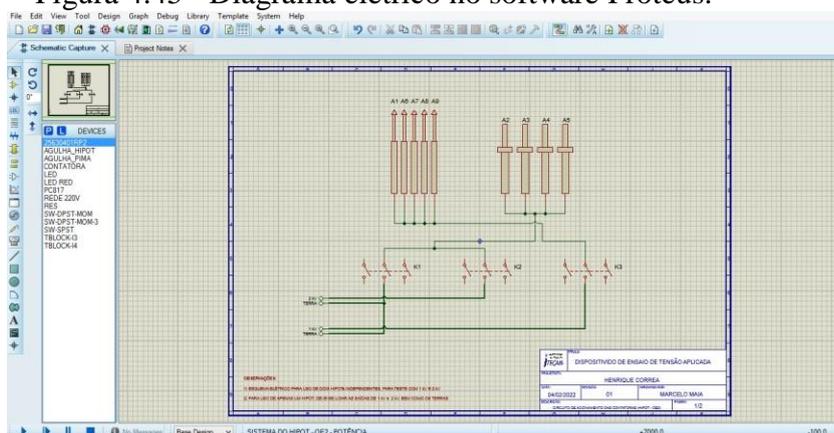


Conforme o diagrama apresentado anteriormente na Figura 4.43, podemos observar como o mesmo foi montado na prática na Figura 4.44, assim pode-se observar com mais clareza como funciona a parte física do diagrama. O circuito respeitou o diagrama simulado no Software Proteus e obedecemos a todos os circuitos de segurança para que não ocorra possíveis surtos elétricos que podem ocasionar em acidentes graves para o operador do dispositivo.

Como podemos analisar o circuito na Figura 4.43, existem três contactoras que são responsáveis pelos três tipos de ensaios de tensão aplicada conforme RTM, a primeira contactora do lado esquerdo é o curto entre o Pima e o Borne Principal, a contactora do meio é responsável pelo teste do Pima e a última do lado direito é o teste do Borne Principal, todos os testes são realizados de forma individual com a intenção de detectar alguma espécie de fuga de corrente, curto-circuito ou alteração na contagem de energia dos medidores eletrônicos polifásicos, por este motivo as contactoras são acionadas uma de cada vez conforme o ensaio estabelecido via protocolo.

Foi utilizado alguns utensílios para modernizar a montagem com a intenção de deixá-la mais prática e fácil para eventuais manutenções, como por exemplo, usado o conector Wago de 5 posições para facilitar e disponibilizar mais segurança aos curtos das agulhas e aterramento do dispositivo, utilizado também conectores banana tipo estrela com capacidade de 2KV (dois mil volts) de tensão, estes conectores servem para as entradas dos cabos do equipamento Hipot.

Figura 4.45 - Diagrama elétrico no software Proteus.



A Figura 5.45 evidencia o software utilizado para simular as conexões e possíveis erros elétricos que podem ocasionar algum tipo de curto-circuito. A interface e suas ferramentas estão amostras com o intuito de evidenciar como o diagrama foi desenvolvido e respeitado na montagem física, ao lado esquerdo podemos observar os componentes que foram utilizados no desenvolvimento do circuito e no lado direito podemos observar como as fiações elétricas foram projetadas para que não haja nenhum tipo surto elétrico.

Figura 4.46 - Contactora CNU-32R.



Figura 4.47 - Conector (wago) de emenda 5 vias mola altronic.

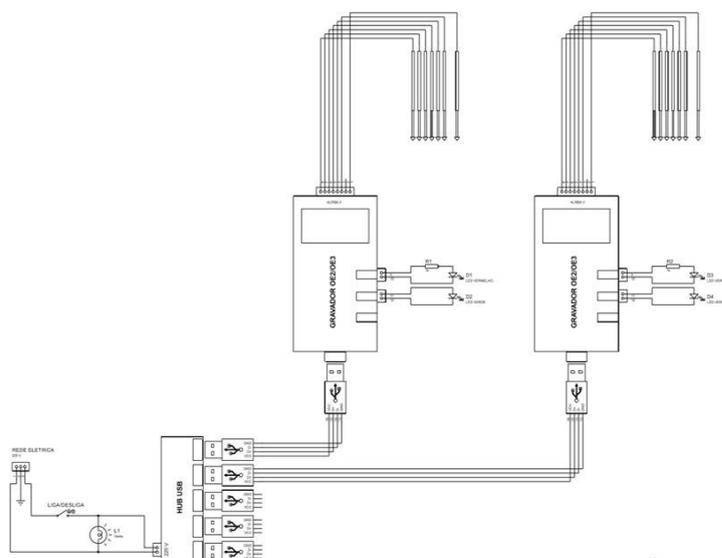


A Figura 4.46 representa a contactora utilizada para realizar os ensaios de tensão aplicada individualmente, foi escolhida essa contactora, pois o contato é tripolar com 220V capaz de aceitar até 32A (amper), logo se tornou eficiente para o processo apresentado acima, pois sua robustez inibe possíveis danos ao componente elétrico devido a alta tensão aplicada pelo equipamento Hipot. Como pode-se observar na Figura 5.43 existem curtos elétricos entre as agulhas, pois o ensaio funciona em série, logo os curtos elétricos são necessários. Por este motivo utilizamos o conector wago de 5 vias conforme a Figura 4.47 para facilitar a ligação elétrica e assentir mais segurança ao circuito, pois os conectores eliminam o uso de fitas isolantes por isolar as partes condutoras, com os cabos desencapados, basta inserí-los na emenda com as alavancas e travar baixando-as. O modelo que utilizamos suporta 600 Volts e 32 Amper, cabos flexíveis de 0,8 a 4,0 milímetros cúbicos e cabos rígidos de 0,8 a 2,5 milímetros cúbicos.

4.11 Dispositivo de gravação de firmware

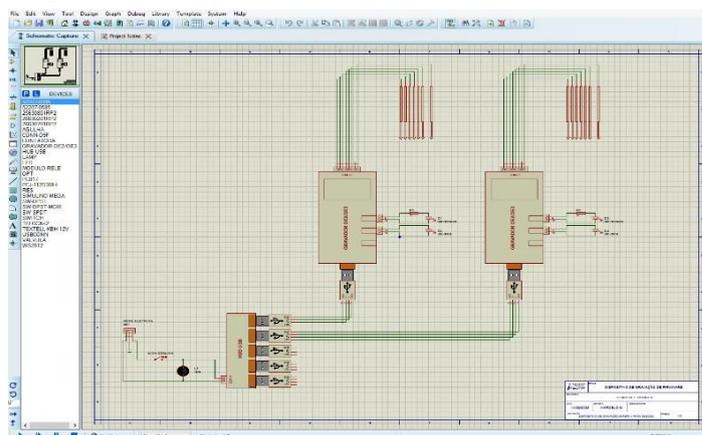
Este dispositivo foi responsável por gravar o firmware do medidor, a gravação em questão foi estabelecida e realizada pelo cliente de origem, ou seja, não temos o controle da mesma, porém o nosso dispositivo é responsável pelo controle e confiabilidade de que os firmwares serão gravados corretamente, conforme mostra a Figura 4.48.

Figura 4.48 - Diagrama elétrico do dispositivo de gravação de firmware.



Para garantir esta confiabilidade, a rede LoRa se responsabiliza por efetuar análises de dados e conferir se os dados obtidos estão de acordo com o protocolo do solicitante. Conforme o status da análise feita pelo sistema LoRa, o mesmo se comunica com o banco de dados para registrar as informações para que o solicitante consiga monitorar os dados de gravação de cada firmware.

Figura 4.49 - Diagrama do dispositivo de gravação de firmware (Software Proteus).



O diagrama apresentado na Figura 5.49 evidencia a simulação no software Proteus antes de montar a parte física, como já foi relatado anteriormente, é de suma importância validar a segurança do circuito elétrico antes de montar a parte física, pois a NR10 - Norma Regulamentadora de segurança em instalações e serviços em eletricidade, nos orienta a manter sempre a segurança. Assim como o circuito elétrico do dispositivo de parametrização, o

dispositivo de gravação de firmware também é simples, como podemos observar na Figura 4.50 a parte física é composta apenas por gravadores, gravadores, esses que já foram relatados anteriormente informando que o próprio solicitante do projeto nos disponibilizou para desenvolver tal dispositivo.

Figura 4.50 - Gravadores de firmware.



Além dos gravadores, foi utilizado um carregador múltiplo de mesa para energizá-los. Com este desenvolvimento foi possível realizar gravações iniciais para posteriormente realizar as parametrizações.

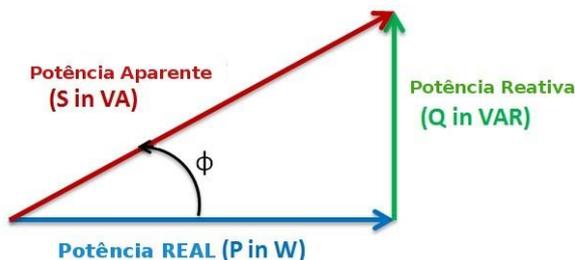
4.12 Dispositivo de ajuste

Com o objetivo de validar a medição do medidor eletrônico polifásico LoRa, desenvolveu-se o dispositivo de ajuste e aferição, o qual é dedicado à gerar, em um tempo determinado, uma corrente e tensão estável, uma vez que este medidor terá sua medição comparada à um medidor padrão já certificado pela empresa. Esta tensão e corrente aplicada deve ter a maior estabilidade possível, impedindo desvios na medição que tornem os valores aplicados no protótipo e no medidor padrão diferentes. Além de certificar que a tensão e corrente aplicada estejam em um padrão determinado, o dispositivo desenvolvido, foi capaz de controlar também a defasagem entre tensão e corrente, a qual impacta na medição da potência ativa consumida pelo usuário do medidor, pois esta é relacionada ao fator de potência, que por sua vez é relacionado ao ângulo de defasagem.

Para o desenvolvimento deste dispositivo, fez-se necessário pesquisar acerca de Fator de Potência, bolsistas buscaram dissertações, artigos científicos e demais referências bibliográficas para entender o processo de ajuste de um medidor eletrônico. A razão entre a potência ativa e a potência reativa encontra-se o fator de potência, este fator informa a eficiência

do uso da energia. Comumente, em literaturas, é encontrado o triângulo das potências, conforme mostrado na Figura 4.51.

Figura 4.51 - Triângulo das potências.



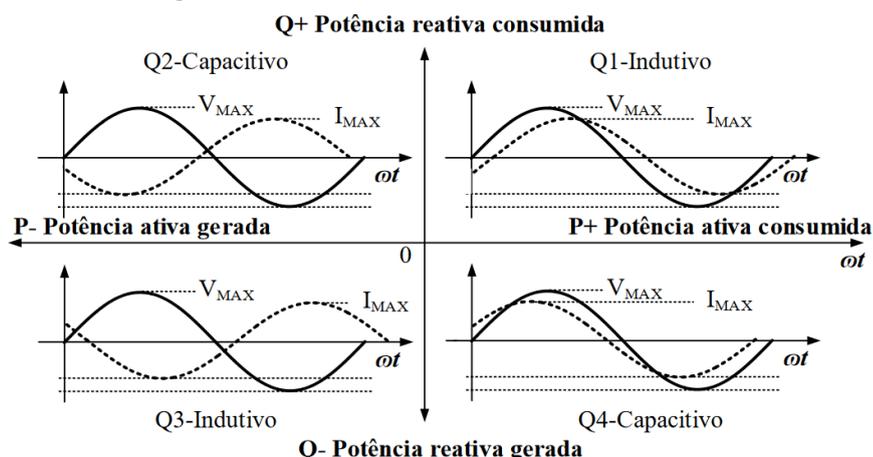
Com este triângulo pode ser encontrado o ângulo do fator de potência e as demais potências envolvidas no sistema elétrico. Ainda avaliando a Figura 4.51, o Fator de Potência pode ser definido como o cosseno do ângulo formado entre a componente real e a componente total quando a potência que flui provém de cargas lineares, como apresentado na equação 9.

$$f_p = \cos \phi \quad (9)$$

A potência ativa é responsável pela realização de trabalho útil, estando também associada às perdas joulicas do sistema, ou seja, perdas térmicas. A potência reativa não produz trabalho útil, entretanto flui entre carga e geração adicionando perdas magnéticas aos sistemas, estando associada matematicamente à parte imaginária da potência aparente. E a potência aparente é a potência total que circula no sistema.

O medidor protótipo LoRa polifásico, como seu próprio nome diz, está dentro de sistemas polifásicos, e têm como característica a somatória das potências em cada uma das fases para determinar a potência total. Em medidores eletrônicos, o sentido do fluxo da potência depende diretamente do ângulo de defasagem entre tensão e corrente de tal forma que cada quadrante trigonométrico representará uma combinação diferente dos fluxos de potência ativa e reativa, a Figura abaixo mostra os quadrantes do fluxo das potências.

Figura 4.52- Quadrante do Fluxo de Potência.



Quando a potência flui da fonte para a carga, ou seja, quando a potência é consumida pela carga, considera-se que a potência é ativa ou reativa direta, quando flui da carga para a fonte, ou seja, quando a potência é fornecida pela carga, tem-se potência ativa ou reativa reversa. Para pesquisa, foi utilizado também tabelas que apresentam um resumo do sentido dos fluxos e as características de cada um deles como são apresentados nas Tabelas 4.1 e Tabela 4.2.

Tabela 4.1 - Sentido do Fluxo por Quadrante.

Características da Potência	Direta	Reversa
Ativa	Q1, Q4 ($271^\circ \rightarrow 1^\circ$)	Q2, Q3 ($91^\circ \rightarrow 269^\circ$)
Reativa	Q1, Q4 ($271^\circ \rightarrow 1^\circ$)	Q2, Q3 ($91^\circ \rightarrow 269^\circ$)

Tabela 4.2 - Tipo de Potência por Quadrante.

Características da Potência	Direta	Reversa
Indutiva	Q1 ($1^\circ \rightarrow 89^\circ$)	Q3 ($181^\circ \rightarrow 269^\circ$)
Capacitiva	Q4 ($271^\circ \rightarrow 359^\circ$)	Q2 ($91^\circ \rightarrow 179^\circ$)

Segundo normas do INMETRO, 2012, descritas no RTM 587, os medidores devem estar com erros percentuais conforme sua classe e de acordo com o tipo de energia, ativa ou reativa. As Tabelas 4.3 e 4.4 mostram os erros.

Tabela 4.3 - Limites de erro percentual para medidores de energia ativa.

% In	$\cos \phi$	Limites de erro percentuais para medidores com índice de classe

		D	C	B	A
10	1	+/- 0,2	+/- 0,5	+/- 1,0	+/- 2,0
100	1	+/- 0,2	+/- 0,5	+/- 1,0	+/- 2,0
100	0,5 ind	+/- 0,3	+/- 0,6	+/- 1,0	+/- 2,0
100	0,8 cap	+/- 0,3	+/- 0,6	+/- 1,0	+/- 2,0

Tabela 4.4 - Limites de erro percentual para medidores de energia reativa.

% In	sen ϕ	Limites de erro percentuais para medidores com índice de classe			
		D	C	B	A
10	1	+/- 0,4	+/- 1,0	+/- 2,0	+/- 4,0
100	1	+/- 0,4	+/- 1,0	+/- 2,0	+/- 4,0
100	0,5 ind	+/- 0,6	+/- 1,2	+/- 2,0	+/- 4,0
100	0,8 cap	+/- 0,6	+/- 1,2	+/- 2,0	+/- 4,0

O medidor protótipo desenvolvido recebeu ensaios em energia ativa e reativa, o padrão de classe desse modelo é o B, conforme descrito nas tabelas acima, foi levado em consideração o erro percentual de +/- 1,0 para energia ativa e +/- 2,0 para energia reativa.

O dispositivo de teste desenvolvido para este ajuste teve a mesma concepção dos demais, foi realizada modelagem 3D, utilizando o software SolidWorks, ainda neste software desenhos técnicos 2D foram criados, arquivos em formato IGS gerados e transformados em linguagem de máquina, GCode.

4.12.1 Modelagem 3D

A concepção do dispositivo foi pensada em automação do processo de ajuste, com utilização de cilindros pneumáticos para movimentos de peças que entram em contato com partes metálicas do medidor protótipo, além do conjunto de peças elétricas eletrônicas que compõem a solução. Durante o projeto mecânico, foi especificado a utilização de materiais como fenolite e poliacetal (Nitacetal) para compor a base e peças que exerceram movimentos nos eixos x e z, para partes fixas foi utilizado chapas em alumínio. As figuras 4.52 e 4.53 mostram o resultado da modelagem.

Figura 4.53 - Vista perspectiva do Dispositivo de Ajuste.

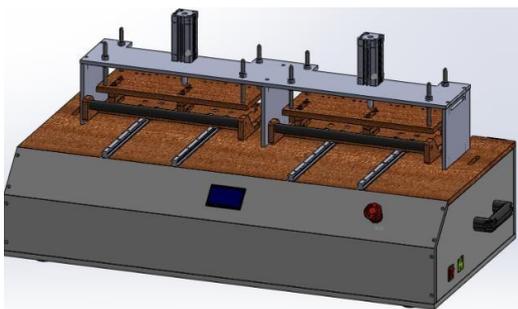
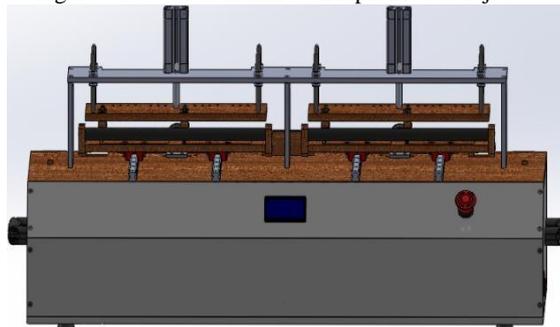


Figura 4.54 - Vista frontal do Dispositivo de Ajuste.



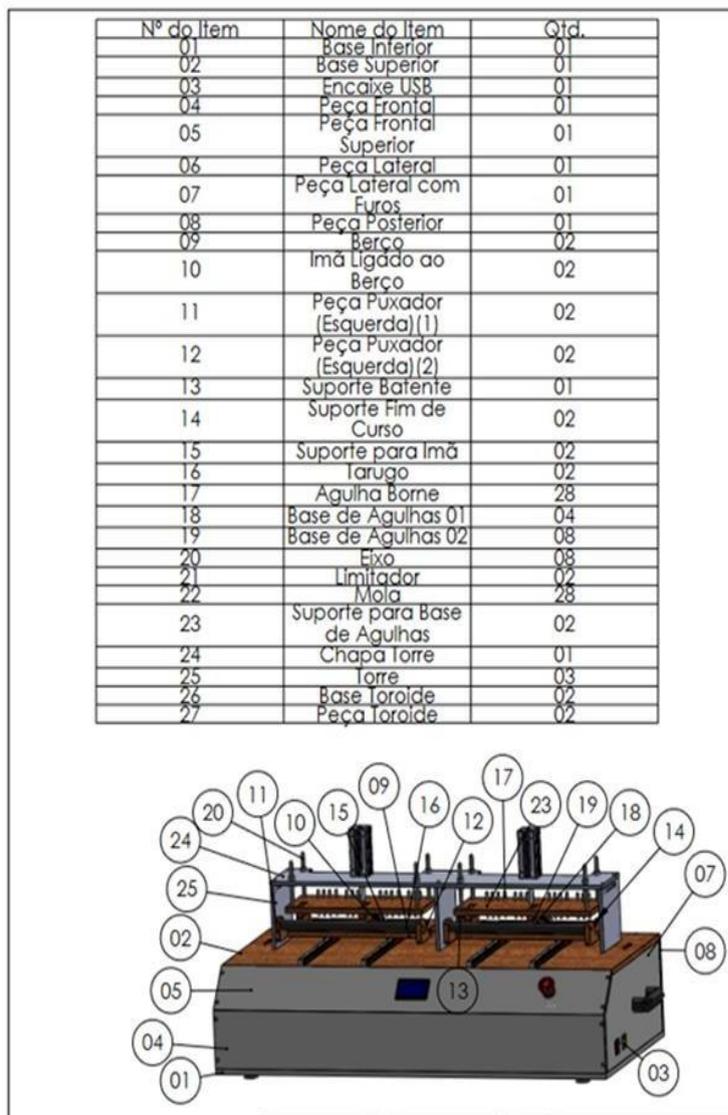
Dispositivo projetado para ajustar quatro medidores simultaneamente, acionado o sistema pneumático eletronicamente quando berços entram em contato com sensor micro switch. Quando posicionado, medidores são ajustados conforme parâmetros descritos.

A Figura 4.53, mostra a vista frontal do dispositivo, apresentando a visão geral, na figura, nota-se a utilização de guias lineares, patins, responsáveis pelo movimento dos berços no eixo x, eixos fixados no suporte das bases de agulhas, responsáveis pelo movimento das bases de agulhas no eixo z. Foi projetado a instalação do botão de emergência, display LCD gráfico 128x64 Backlight, pés de apoio, alças para movimentação do dispositivo. A modelagem 3D serviu como base para avaliar como seria a solução pronta, após o processo de usinagem. Dado como concluído esta etapa, iniciou-se a criação dos desenhos 2D.

4.12.2 Desenhos 2D

Para esta atividade, foi utilizado o ambiente Desenho, do SolidWorks. Nele criou-se todas as peças usináveis, com todo detalhamento necessário para confecção. O desenho 2D foi desenvolvido em uma perspectiva bidimensional, com representação de altura e largura em uma superfície plana, onde o plano de projeção foi a própria tela do computador, posteriormente impressa em uma folha de papel, e requiriu a capacidade de visualização espacial de seu detalhamento. Este tipo de desenhos trata-se de uma representação mais específica do desenho de um produto, com detalhamentos como dimensões, materiais, tolerâncias e acabamentos. A seguir são mostradas nas duas figuras 4.52 e 4.53 do desenho técnico 2D. A figura 4.54, cria a percepção ao desenvolvedor da ideia geral do equipamento, facilitando a montagem do dispositivo.

Figura 4.55 - Cria a percepção ao desenvolvedor da ideia geral do equipamento, facilitando a montagem do dispositivo.



Dentre os desenhos técnicos, foi criado uma vista auxiliar para identificar o nome das peças aos respectivos componentes do dispositivo, além da inclusão da quantidade utilizada de cada componente. Após o processo de criação das peças em 2D, os arquivos foram enviados para o processo de fabricação.

4.12.3 Usinagem

O processo de criação das peças se deu em dois momentos, o primeiro utilizando o equipamento CNC e o segundo utilizando a fresadora e torno. Na CNC foi confeccionado todas as peças em fenolite e poliacetal (Nitacetal), para esta operação, foi necessário salvar os

desenhos modelados com a extensão IGS, compatível com o software ArtCAM. Todas as peças usinadas na CNC foram vetorizadas e convertidas em formato de máquina, para assim dar-se início na usinagem. Peças como base inferior, superior, laterais, berço, suporte da base de agulhas e outras com este mesmo material foram confeccionadas. A confecção se deu colocando fresas conforme especificado na vetorização e ajustando os parâmetros de velocidade e avançada máquina (Figura 4.56).

Figura 4.56 - IHM para setar parâmetros da CNC.



Nas figuras 4.57 e 4.58, é mostrado a confecção da base superior e berço do dispositivo.

Figura 4.57- Confeção da base inferior.



Figura 4.58 - Confeção do berço.



Para usinagem da base superior, optou-se pelo uso do fenolite, por ser material resistente e de fácil usinabilidade, a base superior serviu como apoio para os guias e torres do suporte dos cilindros. A base também protege todo circuito de potência, que por sua vez foi instalado dentro do dispositivo. O dispositivo contou com quatro posições para acomodar os medidores protótipos, usinado também em fenolite o berço impede que o protótipo seja deslocado durante o ajuste.

Figura 4.59 - Confeção de peças em poliacetal.



As peças em material poliacetal também foram confeccionadas utilizando a CNC, mostrado na Figura 4.59, está sendo usinada as partes: base inferior, frontal, posterior e laterais.

Mostrado na Figura 4.60, encontra-se a base frontal, além da usinagem na CNC foi necessário finalizar a confecção utilizando a fresadora, a operação na fresadora foi para fazer ângulos de 45° e encaixar no dispositivo, o ângulo serviu para peça ficar levemente inclinada facilitando a observação dos dados apresentados no display. Houve a necessidade de usinagem em máquinas mais robustas, caso da fresadora, neste equipamento foi realizado a confecção de peças em alumínio, conforme mostrado na Figura 4.61.

Figura 4.60 - Usinagem da base frontal.

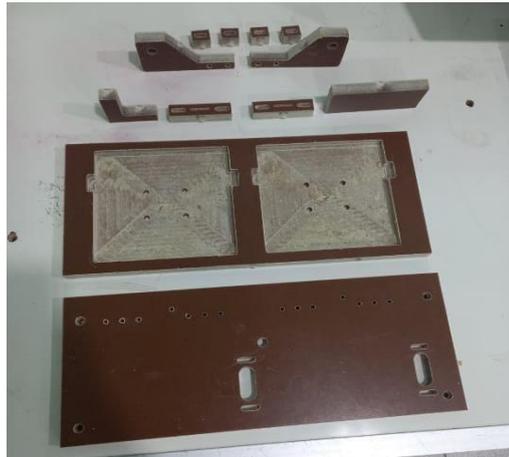


Figura 4.61 - Usinagem do suporte dos cilindros.



Utilizou-se do equipamento fresadora para usinagem de materiais em alumínio, na peça foram feitos furos para acomodar rolamentos lineares, fixar os cilindros e passagem de cabos. Em sua grande maioria, as peças confeccionadas foram feitas utilizando a fresadora e CNC, a seguir é mostrado algumas peças confeccionadas para este dispositivo. Na Figura 4.62, é apresentado algumas peças confeccionadas utilizando a CNC, de baixo para cima está o suporte da base de agulhas de comunicação, berço, base de agulhas de comunicação, suporte para o sensor micro switch e suporte para empurrador do berço.

Figura 4.62 - Peças confeccionadas na CNC.



Na Figura 4.62, é apresentado algumas peças confeccionadas utilizando a CNC, de baixo para cima está o suporte da base de agulhas de comunicação, berço, base de agulhas de comunicação, suporte para o sensor micro switch e suporte para empurrador do berço.

4.12.4 Montagem

Após a usinagem das peças, ocorreu a montagem do dispositivo. A montagem ocorreu tomando como referência a modelagem 3D e os desenhos 2D, foi utilizado parafusos de diversos tamanhos para fixação e diversas chaves para os apertos. Inicialmente foi realizado a montagem da base do dispositivo, seguido da instalação da base superior, berços, torres e suporte das bases de agulhas, a Figura 4.63 mostra o conjunto da base inferior montada.

Figura 4.63 - Base do dispositivo de ajuste.



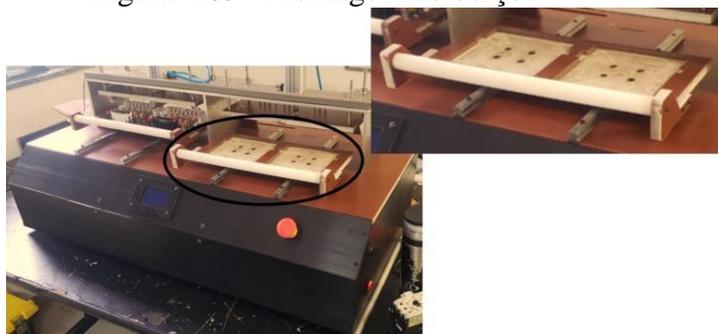
Figura 4.64 - Montagem do suporte da base de agulhas.



Esta base teve a finalidade de suportar a estrutura superior (Torres, berços, base superior, medidor protótipo dentre outros), além de armazenar o circuito de potência, responsáveis pela energização de cada fase e transferência da corrente. Outra montagem relevante foi o suporte da base de agulhas, nesta peça foi instalado as agulhas responsáveis pelo contato nos bornes do medidor, que por sua vez conduzia tensão e corrente para o medidor protótipo, a Figura 4.65 mostra a montagem destas peças conforme Figura 4.64.

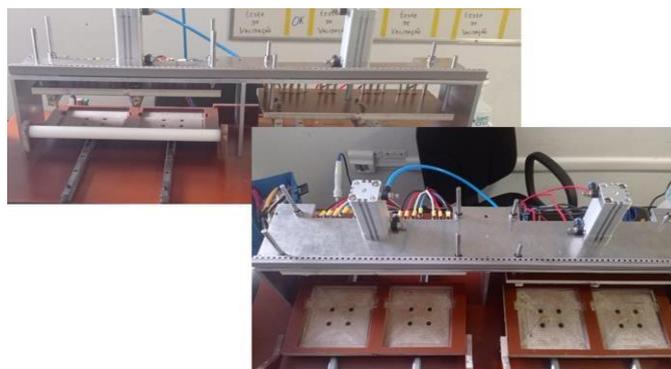
A base de agulhas foi fixada à haste do cilindro pneumático, e com auxílio de eixos e rolamentos lineares realizava o movimento de subida e descida, eixo z, e mantinha o contato elétrico no medidor protótipo. O berço, teve a finalidade de posicionar o medidor protótipo de forma que não se deslocasse durante a execução do ajuste, conforme mostra a figura 4.65.

Figura 4.65 - Montagem do berço.



Em detalhe na Figura 4.65, destaca-se o berço. O dispositivo contou com dois berços com duas posições cada, para sua funcionalidade foi necessário a instalação de guias lineares e patins, a fim de realizar o movimento no eixo x, foi composto também por um tarugo de poliacetal e duas alças. Dentre as montagens, foi utilizado elementos de alumínio, denominadas torres e suporte do cilindro. Optou-se pela utilização deste material por ser rígido e de fácil usinabilidade. As torres foram projetadas para dar a altura, eixo z, conforme o comprimento da haste do cilindro e garantir o contato das agulhas nos bornes sem causar danos ao protótipo, a Figura 4.66 destaca esta montagem.

Figura 4.66 - Montagem de peças em alumínio.



Como ilustrado na Figura 4.66, as peças em alumínio foram montadas em cima da base superior, foram fixadas por meio de parafusos do tipo Allen, cabeça cilíndrica. O conjunto mecânico foi montado, após a junção de cada componente, com isso foi obtido toda a solução mecânica para realizar o ajuste no medidor. Disponibilizando-o para a etapa de desenvolvimento de software, elétrico e eletrônico, na Figura 4.67 é mostrado a versão final da montagem deste equipamento

Figura 4.67 - Dispositivo de ajuste do medidor LoRa Polifásico.

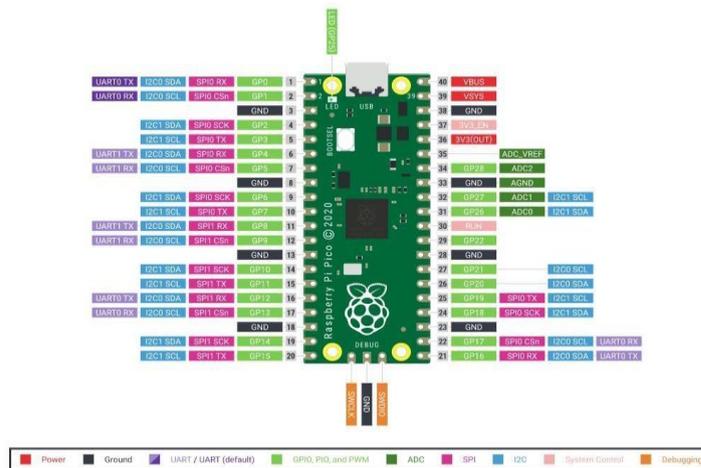


4.12.5 Elétrico e Eletrônico

Raspberry Pico

O sistema de ajuste e aferição foi embarcado em um microcontrolador do tipo Raspberry Pi Pico, o qual possui como processador o chip RP2040, desenvolvido pela Raspberry Pi Foundation. Este microcontrolador, apresentado na Figura 4.68, pode ser programado através da linguagem MycroPython, porém para o desenvolvimento deste projeto, utilizou-se a linguagem de programação C++, com o intuito de obter uma programação de baixo nível, para encontrar o melhor desempenho possível.

Figura 4.68 - Raspberry Pi Pico (RP2040).



A escolha do microcontrolador levou em consideração as principais marcas de processadores para desenvolvimento, sendo testado um Arduino Mega, Esp32 devModule em comparação ao Pico, onde o melhor desempenho de processamento e custo foi da linha Raspberry. As especificações técnicas deste microcontrolador podem ser observadas na **Tabela 4.5**.

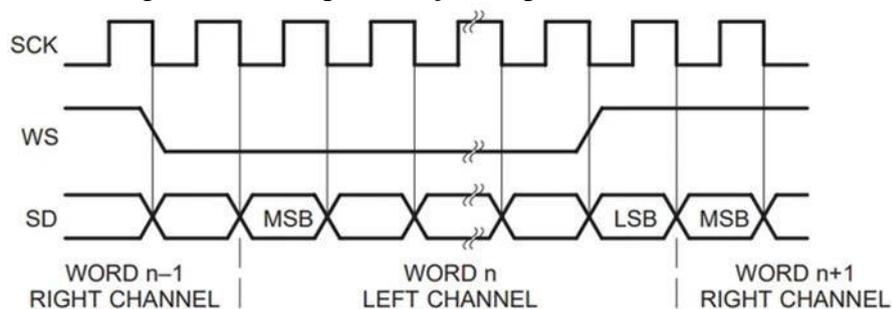
Tabela 4.5 - Especificação técnica do processador RP2040.

Especificação	Valor
Dual Core Arm Cortex M0+ Clock	133 MHz
SRAM	264 KB
Memória Flash	2 MB
12-bits ADC (Com emulação de 16-bits)	3 Canais

I2S (Inter-IC- Sound)

As tensões e correntes aplicadas no medidor para verificação da acurácia de cada medição emulam as condições de uso normal nas residências clientes do medidor de energia, e estes valores são bem maiores do que qualquer conversor digital-analógico pode fornecer, por este motivo o dispositivo de ajuste e aferição foi dividido em duas partes, sendo a primeira etapa de controle, e a segunda etapa sendo o circuito de potência. O controle, portanto, da tensão e corrente no tempo foi comandada pelo microcontrolador através da geração de sinais senoidais que serão amplificados pela potência, e para gerar este sinal em 60 Hz, com uma taxa de amostragem superior a 61440 Hz, tendo cada amostra 16 bits, é utilizada a comunicação do tipo I2S (Inter-IC-Sound), a qual é um protocolo de comunicação desenvolvida para enviar dados de alta qualidade, em uma alta taxa de amostragem, tendo sua principal finalidade na reprodução e transmissão de áudios e sons em altíssima qualidade. Esta funciona através da utilização de três canais, os quais estão especificados na Figura 4.69.

Figura 4.69 - Representação do protocolo I2S.



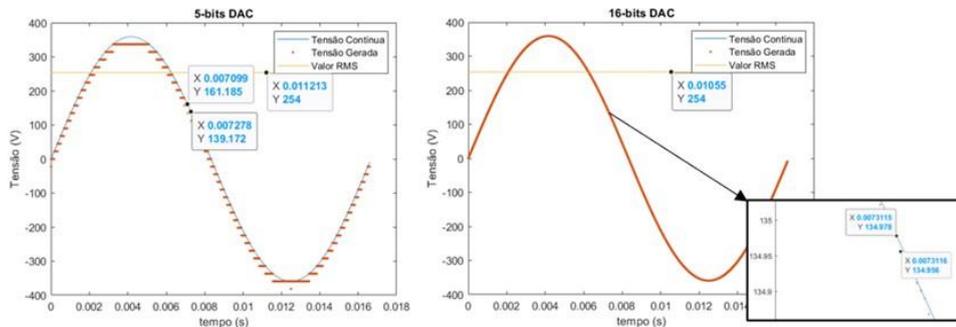
Esta comunicação funciona a partir do princípio de emissão de dois canais em um único fio de forma alternada, o que em alta velocidade torna os dois canais quase simultâneos. Isto é necessário para o sistema de ajuste e aferição, pois, para que seja possível controlar a fase entre a tensão e corrente, a geração destes dois sinais deve ser o máximo simultânea possível, para que o ângulo de fase seja 0° , e caso haja mudança do fator de potência devido aos outros

componentes do circuito, com a alta taxa de amostragem é possível corrigir atrasos e adiantamentos de até $6 \mu s$, o que representa uma resolução de $0,13^\circ$.

Conversor digital-analógico DAC UDA1334A

O microcontrolador Raspberry Pi Pico não possui um conversor analógico-digital nativo do processador, portanto, é necessário a utilização de um módulo externo para geração do sinal, porém, como este sinal será amplificado de uma tensão com $3,3 V_{pp}$, para um sinal de $254 V_{rms}$, isto indica um ganho de amplificação igual a $217,7$. Este ganho também indica que a resolução da geração deve ser alta para que o erro na saída não impacte no controle do sinal. A Figura 4.70, demonstra como uma resolução de 16-bits apresenta um erro menor em comparação à um de 4-bits.

Figura 4.70 - Comparação do erro de resolução.

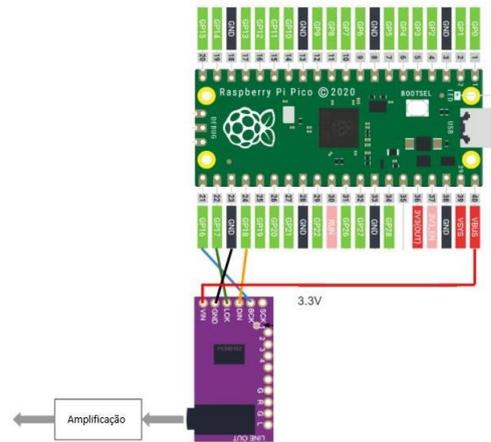


Isto indica um erro de $22,013 V$ em um gerador de 5-bits, em relação a um erro de $0,02 V$ na escala de tensão, o que indica um erro em RMS de $0,0039 V_{rms}$. Portanto, utilizou-se o DAC UDA1334A, ilustrado na Figura 4.71, o qual representa um DAC de 16-bits com dois canais de saída, suportando alta definição de áudio com até $96 ksp/s$ (Amostras por segundo). Isto permite um controle com uma precisão de $0,003 V_{rms}$, dentro dos padrões exigidos pela empresa, além de obter uma velocidade de amostragem que permite ajustar o ângulo de fase em até $0,34^\circ$, dentro do padrão de $0,8^\circ$ capacitivos e $0,6^\circ$ indutivos. A Figura 4.72 apresenta a ligação elétrica deste módulo no microcontrolador Raspberry Pi Pico, através do protocolo I2S.

Figura 4.71 - DAC UDA1334A.



Figura 4.72 - Ligação elétrica UDA1334A.



A Figura 4.72 apresenta a ligação elétrica deste módulo no microcontrolador Raspberry Pi Pico, através do protocolo I2S.

Sensor de Corrente CR8459-2000N

Com o intuito de medir a tensão e a corrente no medidor, para desta forma realizar o controle destas grandezas, é necessário utilizar sensores que permitam o conversor analógico-digital converter em uma escala lida pelo microcontrolador. No caso da tensão é utilizado um transformador que baixa a tensão de 254 Vrms para 3 Vpp, dentro da escala de leitura do ADC do Raspberry Pi Pico, porém, para leitura da corrente, optou-se por um sensor de corrente não-invasivo chamado CR8459-2000N, o qual pode ser visto na Figura 4.73, o qual converte o campo magnético em tensão Vrms.

Figura 4.73 - Sensor de Corrente CR8459-2000N.

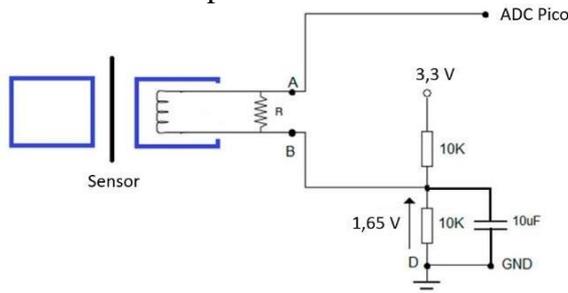


Com este sensor, é possível utilizar através de um circuito de acoplamento, o ADC interno do Raspberry Pi Pico, permitindo uma leitura com resolução 16-bits, permitindo um alto desempenho no controle da corrente de cada fase.

Conversor analógico Digital ADC (Raspberry Pico)

O conversor analógico-digital ADC interno da Raspberry Pi Pico possui uma resolução de 12-bits, porém é possível através da tecnologia SARS otimizar o ADC para uma leitura de 16-bits, transformando um sinal lido de 0 a 3,3 V em um valor digital entre 0 e 65536. Para ler valores AC na entrada do microcontrolador é necessário condicionar o sinal, e isto é feito através de um circuito de acoplamento que é apresentado na Figura 4.74.

Figura 4.74 - Circuito de Acoplamento do Sensor de Corrente.



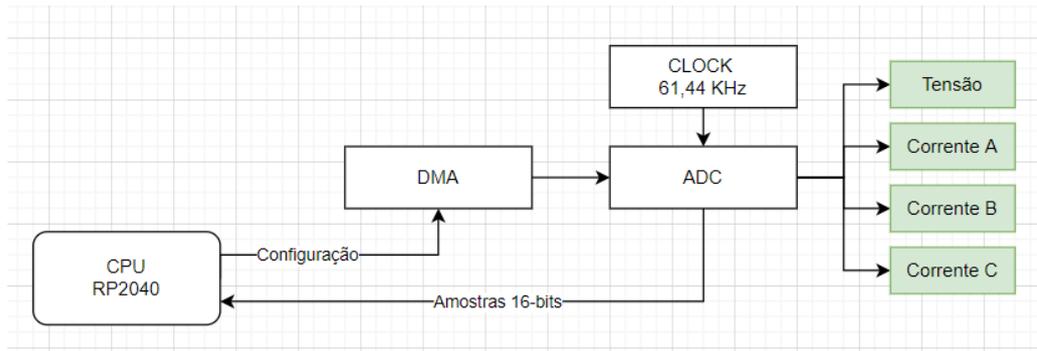
Com a tensão e corrente condicionados para a leitura no ADC, é utilizado a programação C++ para realizar a leitura das duas grandezas de maneira quase simultânea, isto é possível através do CLOCK interno de 48 MHz, onde para realizar uma leitura de uma amostra do ADC é necessários 96 ciclos de CLOCK, indicando uma velocidade máxima de 125 kHz para cada um dos quatro canais, porém utilizou-se um valor padrão de 61,55 kHz:

- Canal 1 (ADC0) = Tensão
- Canal 2 (ADC1) = Corrente da Fase A
- Canal 3 (ADC2) = Corrente da Fase B
- Canal 4 (ADC3) = Corrente da Fase C

Amostragem do Sinal (MATLAB)

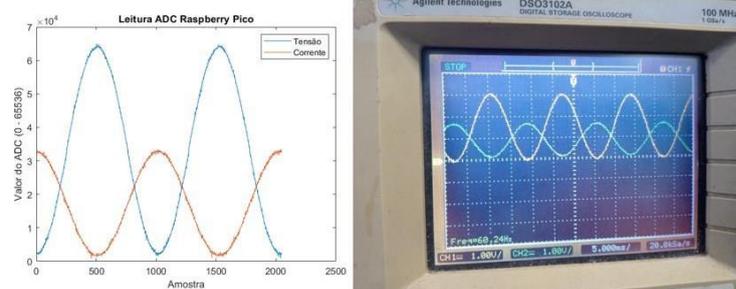
Para validar o funcionamento da leitura do microcontrolador, e verificar se a medida está dentro de uma faixa aceitável, onde é possível aplicar o controle de tensão e de corrente, desenvolveu-se um programa de armazenamento de amostras de tensão e corrente. Isto é feito através de um mecanismo chamado DMA (direct memory access), onde é enviado uma configuração de leitura, e o microcontrolador se encarrega de ler uma amostra de cada um dos canais, em uma velocidade definida, e um tamanho de amostra definido. Este mecanismo pode ser observado na Figura 4.75.

Figura 4.75 - Mecanismo de leitura de amostras.



Com estas amostras coletadas, é possível avaliar através do software MATLAB a forma de onda medida pelo sistema, e dessa forma comparar com o osciloscópio, com o intuito de validar a precisão de cada medida de amostra. A Figura 4.76 apresenta uma leitura comparando os valores lidos pelo Raspberry Pico e a forma de onda lida pelo osciloscópio.

Figura 4.76 - Comparação da medição do ADC com o osciloscópio.



Esta medição de comparação foi realizada com um osciloscópio Agilent DSO3102A (Digital Storage Oscilloscope), o qual realiza medição de até 100 MHz, com uma taxa de amostragem de 1 GSa/s, em comparação com o Raspberry Pi Pico que possui uma taxa de amostragem de 61,44 kSa/s.

Controle de Tensão e corrente

Com a medição realizada pelo ADC do Raspberry Pi Pico validada, partiu-se para o desenvolvimento do controle de tensão e corrente, o qual é realizada através de 4 controladores PID (Proportional, Integrative and Derivativa), um para a tensão aplicada, e outros 3 para a corrente de cada fase. Isto é realizado através do cálculo do valor RMS de tensão e corrente e verificação do erro, entre o valor medido e o valor desejado. Para realizar o teste de ajuste e aferição do medidor eletrônico polifásico LoRa, utilizou-se os seguintes padrões de valores:

- Tensão = 254 Vrms

- Corrente = 2 Arms
- Fase = $0,8^\circ$ Capacitivo até $0,6^\circ$ Indutivo

Para aplicação dos controladores, utilizou-se os amplificadores de potência e seus transformadores, compondo o circuito de potência, e para realizar o circuito de controle desenvolveu-se uma placa para enviar os valores de tensão e corrente, o qual está apresentado na Figura 4.77. A partir disso, ligou-se o aparato de potência na mecânica do dispositivo para realizar a passagem de tensão e corrente pelo medidor. O resultado do controle de tensão e corrente pode ser visto na Figura 4.78.

Figura 4.77 - Circuito de Controle de Tensão e Corrente.



Figura 4.78 - Teste de Controle de tensão e corrente da Fase A.

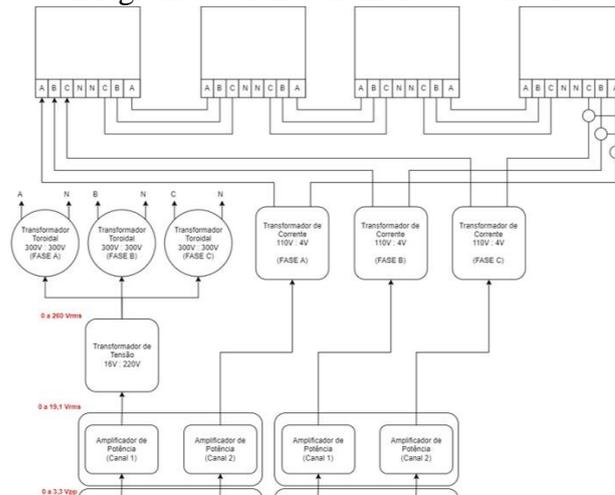


Conforme visto na Figura 4.78, o controlador estabilizou em uma tensão de 254,029 Vrms e uma corrente na fase A de 1,987 Arms, o que indica o pleno funcionamento do controle de tensão e corrente.

Circuito de potência

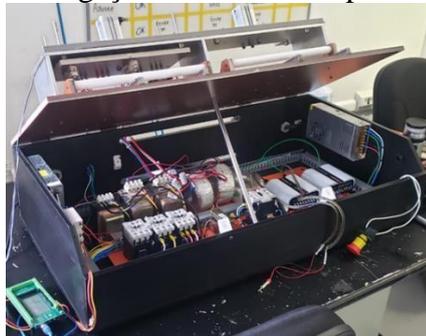
Para realizar a amplificação do sinal gerado pelo circuito de controle, o qual possui sinais de 3,3 Vpp, e alcançar os valores desejados de tensão e corrente que são 254 Vrms e 2 Arms, foi desenvolvido um circuito de potência, o qual é esquematizado na Figura 4.79, a qual simplifica o esquema elétrico do circuito de potência, desde o amplificador até os transformadores.

Figura 4.79 - Diagrama de funcionamento do circuito de potência



Este diagrama apresenta os estágios da amplificação do sinal de controle, onde é utilizado um amplificador de potência para gerar a potência necessária, e em seguida é utilizado um amplificador de tensão com fator 16:220, e para a geração da corrente é utilizado um transformador 110:4, por fim é utilizado um transformador toroidal para isolar a tensão da corrente. A Figura 4.80 apresenta a ligação física do dispositivo de ajuste e aferição.

Figura 4.80 - Ligação do circuito de potência.

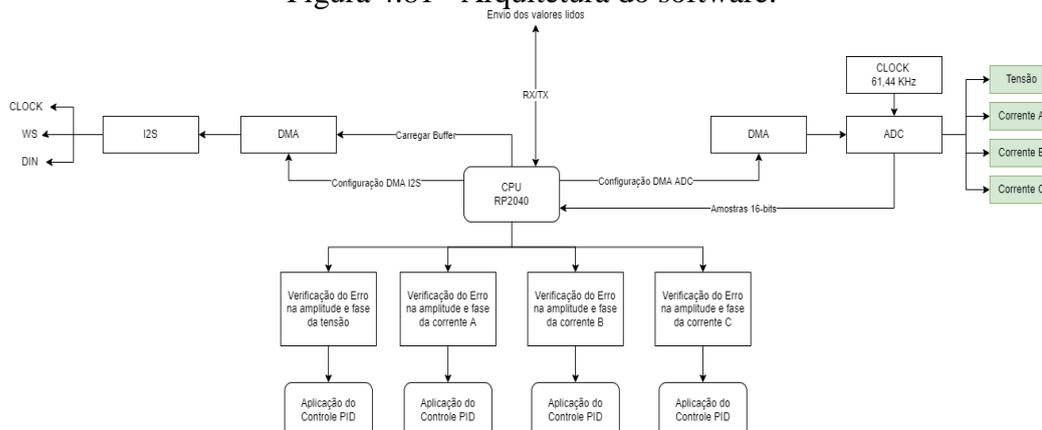


4.12.6 Firmware Embarcado

O programa responsável por controlar o envio do sinal para o dispositivo de ajuste é feito em C++, através da utilização dos recursos disponibilizados pela biblioteca PICO SDK e PICO EXTRAS, o qual possui funções relacionadas ao comando das entradas e saídas, utilização do ADC, Timer, DMA, I2S, Multicore, entre outros. Para a programação do firmware, utilizou-se o ambiente de desenvolvimento Visual Studio Code, o qual reúne as ferramentas necessárias para criação dos arquivos de programa.

A arquitetura do software desenvolvido para o sistema embarcado pode ser vista na Figura 4.81, a qual indica o funcionamento das lógicas de controle.

Figura 4.81 - Arquitetura do software.

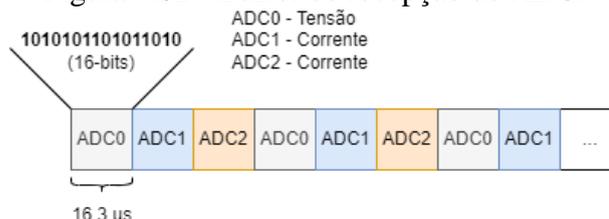


Devido ao fato de esta aplicação exigir uma alta taxa de envio, e uma alta taxa de recepção, para enviar e receber os dados com a maior acurácia possível, foi necessário utilizar alguns recursos do hardware deste chip para otimizar a velocidade do código, evitando que haja etapas blocantes no código. Um exemplo destes recursos é o DMA, o qual teve como função acessar diretamente um comando armazenado para controlar canais de comunicação do microcontrolador, como por exemplo ADC e canal I2S.

Isto foi feito através da configuração de um canal DMA, o qual armazena uma quantidade de informação, e envia estes dados sem a necessidade de utilizar a CPU principal. No caso do controle do sinal enviado pelo UDA1334A, o canal DMA foi utilizado para armazenar um “buffer”, que se trata de um conjunto de dados, os quais foram enviados de forma sequencial através do CLOCK aplicado no canal I2S.

Estes valores são enviados, e após isso são lidos pelo ADC através da função “sampleADC()”, a qual dispara uma série de leituras através de outro canal DMA, utilizando um buffer para armazenar os dados destes 3 canais de ADC. A forma como eles são armazenados pode ser visto na Figura 4.82.

Figura 4.82 - Buffer de recepção do ADC.



O código completo da geração do sinal e a leitura dos valores medidos pelo dispositivo de ajuste para o medidor LoRa Polifásico.

CAPÍTULO VI

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Com o avanço da tecnologia, em especial, no sistema de distribuição de energia elétrica, percebe-se uma modernização na aferição de consumo de energia elétrica, que antes, eram feitas através de leituras manuais por medidores eletromecânicos. Os medidores eletrônicos, por sua vez, conseguem garantir uma leitura mais precisa dos consumos e em tempo real, o que o torna mais eficaz a aferição. Outro aspecto relevante, é o fato de quando o medidor está interligado à uma rede, é possível acompanhar o consumo remotamente, evitando custos de mão de obra e deslocamento de funcionários para fazer as leituras. LoRa, é uma tecnologia de comunicação sem fio e funciona através de rádio frequência. É uma técnica de modulação de espectro de espalhamento, isso ocorre quando uma onda de rádio é manipulada para codificar informações usando um formato chirreado CSS (Chirp Spread Spectrum).

Portanto, este artigo apresenta uma proposta de desenvolver um protótipo de medidor eletrônico polifásico de energia elétrica utilizando rede LoRa, criando a possibilidade de geração, distribuição e utilização de energia inteligente e solução integrada de gerenciamento de economia de energia. A proposta do desenvolvimento baseia-se em três principais partes. A primeira faz referência às soluções mecânicas do protótipo, com criação de projetos 3D de cada peça plástica, e confecção via manufatura aditiva, utilizando impressora 3D. A eletrônica, está referenciada à segunda parte, com toda pesquisa para utilização da Rede LoRa em medidores eletrônicos polifásicos de energia, além de placas embarcadas para atender especificações de medição de energia.

E por fim, a terceira parte aborda o aspecto do desenvolvimento de software, com elaboração de firmwares para emissão, recepção de dados via rede e toda lógica do protótipo para efetuar o registro e informar em tela de LCD o consumo.

Futuramente, pretende-se gerar pesquisa para que a solução eletrônica encontrada nesta pesquisa, possa ser otimizada e desenvolvido uma única placa com todos os processadores necessários para o correto funcionamento do medidor. É notável ainda, que seja relevante a confecção de dispositivos de testes com parâmetros definidos pelo Regulamento Técnico Metrológico – RTM, para a validação de cada etapa do medidor.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos até o momento, pode-se considerar os seguintes passos futuros:

- 1) Desenvolver uma linha de produção para produção em série do medidor eletrônicopolifásico.
- 2) Desenvolver uma placa única com todos os processadores necessários para o correto funcionamento do medidor
- 3) Desenvolver um protótipo bifásico;

REFERÊNCIAS

AHSAN, Mominul et al. Smart monitoring and controlling of appliances using LoRa based IoT system. **Designs**, v. 5, n. 1, p. 17, 2021.

ALCIATORE, David G.; HISTAND, Michael B. **Introdução à Mecatrônica e aos Sistemas de Medições**. AMGH Editora, 2014.

AMMAR, Yasmin; BDIRI, Sadok; DERBEL, Faouzi. An ultra-low power wake up receiver with flip flops based address decoder. In: **2015 IEEE 12th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD15)**. IEEE, 2015. p. 1-5.

ARSYAD, Nur Aliya et al. Breast milk volume using portable double pump microcontroller Arduino Nano. **Enfermeria clínica**, v. 30, p. 555-558, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14519: Medidores Eletrônicos de Energia Elétrica (Estáticos) – Especificação**. Rio de Janeiro, p. 2. 2000

BAHMANYAR et al. Emerging smart meters in electrical distribution systems: Opportunities and challenges. In: **2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)**. IEEE, 2016. p. 1082-1087.

BANGASH, Yawar Abbas et al. Security Issues and Challenges in Wireless Sensor Networks: A Survey. **IAENG International Journal of Computer Science**, v. 44, n. 2, 2017.

BARRO, Pape Abdoulaye; ZENNARO, Marco; PIETROSEMOLI, Ermanno. LTN–The local things network: on the design of a LoRaWAN gateway with autonomous servers for disconnected communities. 2019 Wireless Days (WD). IEEE, 2019. p. 1-4. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8734239>. Acesso em: 10 Jan. 2022.

BENTO, Antonio Carlos et al. An Applied Survey with ESP8266 Lolin+ Shield Base with Nextion Touchscreen Display. In: **2021 IEEE 11th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)**. IEEE, 2021. p. 1281-1286.

BENTO, Antonio Carlos. IoT of Nextion X TFT ILI9341: Experimental Results and Comparative Survey. **International Research Journal of Engineering, IT and Scientific Research**, v. 4, n. 2, p. 14-23, 2018.

BENTO, Antonio Carlos. Nextion Tft Development an Experimental Survey for Internet of Things Projects. **International Journal**, v. 8, n. 11, p. 1-9, 2020.

BERTOLETI, Pedro. **Proyectos com ESP32 y LoRa**. Editora NCB, 2019.

BUCHHOLZ, Bernd M.; STYCZYNSKI, Zbigniew. **Smart Grids-fundamentals and technologies in electricity networks**. Heidelberg: Springer, 2014.

CAVALHEIRO, David Manuel Nunes. **Projecto e Optimização da Alimentação de um Sensor de Velocidade de Onda de Pulso**. 2011. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia.

CHAVES, Claudionor Fernandes. **Transformador de corrente eletrônico utilizando Bobina de Rogowski e interface óptica com POF para aplicação em sistemas de potência**. 2008. Tese de Doutorado. Tese (Mestrado), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CIVIDINO, Lorenzo. Power factor, harmonic distortion; causes, effects and considerations. In: **[Proceedings] Fourteenth International Telecommunications Energy Conference-INTELEC'92**. IEEE, 1992. p. 506-513.

CORREIA, Arthur Nunes Ferreira. **Aplicações De Sistema De Monitoramento De Consumo De Energia Elétrica Para Unidades Consumidoras Conectadas Em Média Tensão**. 2019.

DE PAULA, Gilberto José. **Medidor de demanda de energia elétrica residencial com acesso remoto**. Centro Universitário de Brasília. Brasília, p. 66, 2013.

DE PAULA, Railma Lima et al. Development of a Prototype of a Single-Phase Electronic Energy Meter Using a Lora Network. **International Journal of Development Research**, v. 11, n. 12, p. 52727-52744. 2021.

DE PAULA, Railma Lima et al. Development of a Prototype of a Single-Phase Electronic Energy Meter Using a Lora Network. **International Journal of Development Research**, v. 11, n. 12, p. 52727-52744.

DERTIEN, Edwin; REGTIEN, P. P. L. **Sensors for mechatronics**. Elsevier, 2018.

DO ESPÍRITO SANTO, Walter; ORDOÑEZ, Edward; RIBEIRO, Admilson. **Uma revisão sistemática sobre a Segurança nos Protocolos de Comunicação para Internet das Coisas**. Journal on Advances in Theoretical and Applied Informatics, v. 4, n. 1, p. 1-9, 2018.

EFTHYMIU, Costas; KALOGRIDIS, Georgios. Smart grid privacy via anonymization of smart metering data. In: **2010 first IEEE international conference on smart grid communications**. IEEE, 2010. p. 238-243.

FANG, Yi-yuan; CHEN, Xue-jun. Design and simulation of UART serial communication module based on VHDL. In: **2011 3rd International Workshop on Intelligent Systems and Applications**. IEEE, 2011. p. 1-4.

FERREIRA, Pedro Guilherme Costa. **Prof. Dr. João Carlos de Oliveira Aires**. 2013. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

FOIATTO, Noara et al. AUTOMATIZATION OF TAMPERING IDENTIFICATION IN INDUCTION ELECTRICAL POWER METERS. In: **XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology, Lisbon, Portugal, September**. 2009. p. 6-11.

GHASEMPOUR, Alireza. Internet of things in smart grid: Architecture, applications, services, key technologies, and challenges. **Inventions**, v. 4, n. 1, p. 22, 2019.

GIORDANO, Domenico et al. Methodology for the accurate measurement of the power dissipated by braking rheostats. **Sensors**, v. 20, n. 23, p. 6935, 2020.

GUNGOR, V. Cagri et al. A survey on smart grid potential applications and communication requirements. **IEEE Transactions on industrial informatics**, v. 9, n. 1, p. 28-42, 2012.

HILL, Jason Lester. **System architecture for wireless sensor networks**. University of California, Berkeley, 2003.

HOWARTH, Preben et al. “metrology–in short” 3rd edition. **EURAMET project**, v. 1011, 2008.

ILÁRIO, Lucas Rodrigues. **Contribuições para integração da indústria 4.0 nas redes elétricas inteligentes**. 2020.

IQBAL, Amjad; IQBAL, Tariq. Low-cost and secure communication system for remote micro-grids using AES cryptography on ESP32 with LoRa module. In: **2018 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)**. IEEE, 2018. p. 1-5.

IRYODA, Maurício Tutida; GUIDO JÚNIOR, Paschoal. **Estudo e desenvolvimento de um medidor de índices de continuidade, nos aspectos de duração e frequência, na rede elétrica de baixa tensão (etapa de implementação)**. 2005.

KHAIR, Ummul et al. Modeling and simulation of electrical prevention system using Arduino Uno, GSM modem, and ACS712 current sensor. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2017. p. 012049.

KHWANRIT, Ruengwit et al. Accuracy comparison of present low-cost current sensors for building energy monitoring. In: **2018 International Conference on Embedded Systems and Intelligent Technology & International Conference on Information and Communication Technology for Embedded Systems (ICESIT-ICICTES)**. IEEE, 2018. p. 1-6.

KNÖRIG, André; HOWELL, Brendan. Advanced prototyping with fritzing. In: **Proceedings of the fourth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction**. 2010. p. 341-344.

KNÖRIG, André; WETTACH, Reto; COHEN, Jonathan. Fritzing: a tool for advancing electronic prototyping for designers. In: **Proceedings of the 3rd international conference on tangible and embedded interaction**. 2009. p. 351-358.

KUZLU, Murat; PIPATTANASOMPORN, Manisa; RAHMAN, Saifur. Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN. **Computer Networks**, v. 67, p. 74-88, 2014.

LADDHA, Neha R.; THAKARE, A. P. A review on serial communication by UART. **International journal of advanced research in computer science and software engineering**, v. 3, n. 1, 2013.

LORA ALLIANCE. LoRaWAN What is it: A Technical overview of LoRa and LoRaWAN. 2015. Disponível em: <https://lora-alliance.org/resource-hub/what-lorawanr>. Acesso em: 10 Jan. 2022.

MACEDO, Evandro LC et al. On the security aspects of Internet of Things: A systematic literature review. **Journal of Communications and Networks**, v. 21, n. 5, p. 444-457, 2019.

MAKSIMOVIĆ, Mirjana; VUJOVIĆ, Vladimir. Internet of things based e-health systems: ideas, expectations and concerns. In: **Handbook of large-scale distributed computing in smart healthcare**. Springer, Cham, 2017. p. 241-280.

MARJOVSKY, Gustavo. **Instantaneous Power Theory for Active Filtering of High Displacement Power Factor Non-linear Loads**. University of Manitoba (Canada), 2011.

MELO, Luís DR et al. Development of a phage cocktail to control *Proteus mirabilis* catheter-associated urinary tract infections. **Frontiers in microbiology**, v. 7, p. 1024, 2016.

MENEZES, Wesley Rodrigues de et al. **Medidores inteligentes e comunicação de dados em redes inteligentes**. 2020.

MONK, Simon. **Fritzing for inventors: take your electronics project from prototype to product**. McGraw-Hill Education, 2016.

MONTROSE, Mark I. **EMC and the printed circuit board: design, theory, and layout made simple**. John Wiley & Sons, 2004.

MONTROSE, Mark I. **Printed circuit board design techniques for EMC compliance**. Piscataway, NJ: IEEE press, 1996.

NAGAYAMA, Tomonori; SPENCER JR, Billie F. **Structural health monitoring using smart sensors**. Newmark Structural Engineering Laboratory. University of Illinois at Urbana-Champaign., 2007.

NAKUTIS, Žilvinas et al. A framework for remote in-service metrological surveillance of energy meters. **Measurement**, v. 168, p. 108438, 2021.

NANO, Arduino. Arduino Nano. **A MOBICON Company**, 2018.

OLIVEIRA, R. A. et al. Electronic metering in Brazil: A qualitative analysis for its evolution. In: **2016 2nd International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG)**. IEEE, 2016. p. 1-6.

PANTELI, Mathaios; MANCARELLA, Pierluigi. Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies. **Electric Power Systems Research**, v. 127, p. 259-270, 2015.

PINHEIRO, José Ricardo Giordano. **Desenvolvimento de um sistema de medição de baixo custo para a monitoração de alimentadores aéreos de distribuição de energia elétrica da classe 15 KV**. 2011.

PONTES, Luiz Renato Braz et al. **A evolução das redes inteligentes e sua implementação**. 2017.

RAMOS, Manoel MO; PEIXOTO, J. Guilherme P.; LOPES, Ricardo T. Proposal of requirements for accreditation of laboratories for calibration of instruments for diagnostic radiology. 7^a International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2007, Santos, SP, Brazil, September 29 to October 5, 2007 Associação Brasileira de Energia Nuclear – ABEN.

RATNAWATI, Nur et al. Load Characteristics with Current Detection Using an Arduino Based ACS712 Sensor. **Buletin Ilmiah Sarjana Teknik Elektro**, v. 2, n. 2, p. 83-90, 2020.

RAZA, Syed Safdar; AHMAD, Masood; PERVEIZ, M. Shoaib. Performance of energy meters under harmonic generating environment. **Science International (Lahore)**, v. 26, n. 5, p. 2063-2069, 2014.

REINHARD, Erik et al. **High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting**. Morgan Kaufmann, 2010.

RIBEIRO, Daniela Rosa. **A participação dos medidores eletrônicos na rede inteligente de energia elétrica**. 2015.

RODRIGUES, Vagner da Silva et al. Tarifação binômia para consumidores de energia de baixa tensão no Brasil: viabilidade legal e técnica. 2020.

RUIZ-ROMERO, Salvador et al. Integration of distributed generation in the power distribution network: The need for smart grid control systems, communication and equipment for a smart city—Use cases. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 38, p. 223-234, 2014.

SALMAN, Tara. Internet of things protocols and standards. Affairs, M. Of END, 2015.

SANKARAN, C. **Power quality**. CRC press, 2017.

SANTOS, Mauricio de Carvalho; NUNES, Rafael Policarpo. **Redes inteligentes de energia**. 2018.

SCHAEFER, Jones Luís et al. Management Challenges and opportunities for energy cloud development and diffusion. **Energies**, v. 13, n. 16, p. 4048, 2020.

SILVA, Luiz Carlos Evangelista da. **Efeitos das distorções harmônicas (tensões e correntes) e desequilíbrios (tensões) em medidores eletrônicos trifásicos de energia elétrica ativa**. 2008.

STIMMEL, Carol L. **Big data analytics strategies for the smart grid**. Boca Ratón: CRC press, 2015.

SU, Bo; WANG, Li. Application of Proteus virtual system modelling (VSM) in teaching of microcontroller. In: **2010 International Conference on E-Health Networking Digital Ecosystems and Technologies (EDT)**. IEEE, 2010. p. 375-378.

TEIXEIRA, Leandro Lettieri. **Medidor de energia eletrônico: utilizando microprocessador**. 2009.

TESCHE, Frederick M.; IANOZ, Michel; KARLSSON, Torbjörn. **EMC analysis methods and computational models**. John Wiley & Sons, 1996.

VALLE, Gustavo Ari et al. **Desenvolvimento de dispositivo amostrador de sinais de tensão e corrente para cálculo das grandezas elétricas referentes à rede e do consumo de energia**. 2018.

VAN VELTHOVEN, Michelle Helena; CORDON, Carlos; CHALLAGALLA, Goutam. Digitization of healthcare organizations: the digital health landscape and information theory. **International journal of medical informatics**, v. 124, p. 49-57, 2019.

VIJAYAPRIYA, Tamilmaran; KOTHARI, Dwarkadas Pralhadas. **Smart grid: an overview. Smart Grid and Renewable Energy**, v. 2, n. 4, p. 305-311, 2011.

WAHLBERG, Marcus. Current measurements of low-power battery driven devices. 2022.

WAKHLE, Garima Bandhawarkar; AGGARWAL, Iti; GABA, Shweta. Synthesis and Implementation of UART using VHDL Codes. In: **2012 International Symposium on Computer, Consumer and Control**. IEEE, 2012. p. 1-3.

WERANGA, K. S. K.; KUMARAWADU, Sisil; CHANDIMA, D. P. **Smart metering design and applications**. Singapore: Springer, 2014.

WERANGA, K. S. K.; KUMARAWADU, Sisil; CHANDIMA, D. P. **Smart metering design and applications**. Singapore: Springer, 2014.

WILMSHURST, Tim. **Designing embedded systems with PIC microcontrollers: principles and applications**. Elsevier, 2006.

ZHANG, Zhendong; LEGGATE, David; MATSUO, Takayoshi. Industrial inverter current sensing with three shunt resistors: Limitations and solutions. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 32, n. 6, p. 4577-4586, 2016.

ZIEGLER, Silvio et al. Current sensing techniques: A review. **IEEE Sensors Journal**, v. 9, n. 4, p. 354-376, 2009.

ZYRIANOFF, Ivan et al. Impacto de LoRaWAN no Desempenho de Plataformas de IoT baseadas em Nuvem e Névoa Computacional. In: Anais do XVII Workshop em Clouds e Aplicações. SBC, 2019. p. 43-56.

APÊNDICES

APÊNDICE A



ISSN: 2230-9926

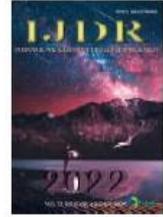
Available online at <http://www.journalijdr.com>

IJDR

International Journal of Development Research

Vol. 12, Issue, 08, pp. 57920-57926, August, 2022

<https://doi.org/10.37118/ijdr.25020.08.2022>



RESEARCH ARTICLE

OPEN ACCESS

PROPOSED DEVELOPMENT OF A POLYPHASE ELECTRONIC POWER METER PROTOTYPE USING THE LORA NETWORK

¹Caio Luiz Jodas Nogueira, ²Jandecy Cabral Leite, ³Marcelo Maiado Nascimento, ⁴Marivan Silva Gomes, ⁵Juarez da Silva Ramos Junior, ⁶Railma Lima de Paula, ⁷Michael da Silva Caralho, ⁸Henrique Mark dos Santos Correa, ⁹Laís Freitas Bastos and ¹⁰Luis Gabryel dos Santos Miranda

¹Post Graduate Master in Engineering, Process Management, Systems and Environmental (PPG.EPMSE),
Institute of Technology and Education Galileo of the Amazon (ITEGAM), Manaus, Amazonas, Brasil

^{2,3,5,6}Institute of Technology and Education Galileo of the Amazon (ITEGAM), Manaus, Amazonas, Brasil

^{4,7,8,9,10}University of Amazonas State (UEA), Manaus, Amazonas, Brasil

ARTICLE INFO

Article History:

Received 10th June, 2022

Received in revised form

24th June, 2022

Accepted 09th July, 2022

Published online 17th August, 2022

Key Words:

Electronic Meter,

LoRa Network,

Energy Consumption.

*Corresponding author:

Caio Luiz Jodas Nogueira

ABSTRACT

With the development of the electronics and mechanics prototype with a proposal for a new polyphase electronic electric energy meter aiming at subsequent manufacture, according to its manufacturing specifications as a product in the industrial environment. The objective of the article was to develop a prototype of a new polyphase electronic electric energy meter using LoRa network, for remote measurement of energy consumption. The prototype was developed for a company from the Industrial Pole of Manaus (PIM). An Experimental Methodology was used, presenting the model proposal, mechanical base, Terminal Block, Meter Cover, The Terminals, The Electronics, Transmission LoRa Interface, and the Reception LoRa Interface. Data collection was carried out through meetings with company professionals, technical visits, and research on the importance of the topic. The results showed that the main development phases were validated, and that the long-distance meter communication proved to be effective for energy consumption recording, and has potential manufacturing condition.

APENDICE B

REVISTA INTERNATONAL JOURNAL OF DEVELOPMENT RESEARCH QUALIS CAPES A2

The screenshot shows the Sucupira platform interface. At the top left is the Sucupira logo. At the top right is a blue bar with a lock icon and the text 'ACESSO RESTRITO'. Below this is a dark blue header for 'Qualis Periódicos'. The main content area contains search filters: 'Evento de Classificação' (CLASSIFICAÇÕES DE PERIÓDICOS QUADRIÊNIO 2013-2016), 'Área de Avaliação' (INTERDISCIPLINAR), 'ISSN' (empty), 'Título' (International Journal of Development Research), and 'Classificação' (A2). There are 'Consultar' and 'Cancelar' buttons. Below the filters is a table titled 'Periódicos' with one row of results. The table has columns for ISSN, Título, Área de Avaliação, and Classificação. The 'Classificação' column for the first row is highlighted with a yellow box. At the bottom of the table are navigation buttons: 'Início', 'Anterior', '1', 'Próxima', and 'Fim'. Below the navigation buttons is the text '1 a 1 de 1 registro(s)'.

ISSN	Título	Área de Avaliação	Classificação
2230-9926	INTERNATIONAL JOURNAL OF DEVELOPMENT RESEARCH	INTERDISCIPLINAR	A2