



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITORIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EMBARCADO AUTOCALIBRADO PARA
GESTÃO ENERGÉTICA PELO LADO DA DEMANDA**

EDER ANDRADE DA SILVA

Foz do Iguaçu
2021

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EMBARCADO AUTOCALIBRADO PARA
GESTÃO ENERGÉTICA PELO LADO DA DEMANDA**

EDER ANDRADE DA SILVA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa De Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia E Sustentabilidade da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito à obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

Orientador: Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior.

Co-Orientador: Dr. Jorge Javier Gimenez Ledesma.

EDER ANDRADE DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EMBARCADO AUTOCALIBRADO PARA
GESTÃO ENERGÉTICA PELO LADO DA DEMANDA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa De
Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia E
Sustentabilidade da Universidade Federal da Integração
Latino-Americana, como requisito à obtenção do título
de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

APROVADA EM 16 DE DEZEMBRO DE 2021

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior.
UACSA-UFRPE

Co-Orientador: Dr. Jorge Javier Gimenez Ledesma.
UNILA

Dr. Marcel Ayres de Araujo.
UACSA - UFRPE

Dr. Marco Roberto Cavallari.
UFABC

Dr. Anderson Diogo Spacek.
Centro Tecnológico - SATC

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos professores orientador e coorientador não só pela constante orientação neste trabalho, mas sobretudo pela sua amizade.

Aos professores da banca pelas orientações.

Aos colegas de curso.

Aos meus pais pelo apoio nesta jornada.

A minha filha pela compreensão sobre a quantidade de horas em frente ao computador.

E, a minha companheira pela motivação e paciência durante a execução deste trabalho.

Os nossos pais amam-nos porque somos seus filhos, é um fato inalterável. Nos momentos de sucesso, isso pode parecer irrelevante, mas nas ocasiões de fracasso, oferecem um consolo e uma segurança que não se encontram em qualquer outro lugar.

Bertrand Russell

SILVA, Eder Andrade da. Desenvolvimento de um sistema embarcado autocalibrado para gestão energética pelo lado da demanda. 2021. 82 páginas.

SILVA, Eder Andrade da. Desenvolvimento de um sistema embarcado autocalibrado para gestão energética pelo lado da demanda. 82 páginas. Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021.

RESUMO

Em virtude da crescente preocupação e busca pela sustentabilidade energética, tem-se o aumento da demanda recente na área de gestão e eficiência energética relacionado com *Internet of Things* (IoT), *Smart Home*, *Smart Building* e *Smart Grid*. Áreas que estão interligadas com o desenvolvimento de *Smart Energy Meters*. Observa-se que a disponibilidade do padrão de consumo em tempo real, faz parte da necessidade apresentada pela pesquisa e que é essencial para perceber e compreender oportunidades de economia. Neste contexto, esta dissertação documenta o desenvolvimento de um sistema embarcado para realizar a medição, o monitoramento de consumo e o controle de cargas elétricas, possibilitando a melhoria da eficiência energética nos sistemas de energia pela gestão realizada pelo lado da demanda. O medidor inteligente desenvolvido mede eletronicamente o consumo e, outros parâmetros em um determinado intervalo de tempo e transmite por meio do protocolo *Message Queue Telemetry Transport* (MQTT), as medições por uma rede de comunicação sem fio para um servidor hospedado em nuvem acessível ao usuário de forma remota. As informações podem ser visualizadas em aparelhos eletrônicos portáteis com acesso à internet, informando o usuário sobre seu consumo de energia, possibilitando o controle e a gestão completa sobre a carga. Para o desenvolvimento do protótipo, foi utilizado o circuito integrado (CI) ADE9153A, sendo este um CI de medição de energia com autocalibração, em conjunto com um ESP32, um microcontrolador equipado com comunicação sem fio, sendo que o custo final do dispositivo ficou abaixo de trezentos e cinquenta reais para produção de um lote de dez unidades. A validação do dispositivo produzido foi realizada comparando as leituras do dispositivo com as leituras obtidas através do sistema de avaliação do fabricante do circuito integrado ADE9153A, que garante Classe 1 de exatidão nas medições de energia ativa conforme os padrões IEC 62053-21; IEC 62053-22; EN50470-3; OIML R46; e ANSI C12.20. O resultado das medições do dispositivo desenvolvido comparados as medições do sistema de avaliação do fabricante apresentou erros menores que $\pm 0,1\%$ e, erros menores que $\pm 1\%$ com relação ao fundo de escala do dispositivo, mostrando-se como uma solução viável para a aplicação proposta e para outras aplicações com pequenas adequações do *software* e da plataforma de monitoramento.

Palavras-chave: *Medidor de Energia. Eficiência Energética. Economia de Energia. IoT.*

SILVA, Eder Andrade da. Development of a self-calibrated embedded system for energy management on the demand side. 2021. 82 páginas. Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa De Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021

ABSTRACT

Due to the growing concern and search for energy sustainability, there has been an increase in recent demand in the area of energy management and efficiency related to Internet of Things (IoT), Smart Home, Smart Building and Smart Grid. Areas that are interconnected with the development of Smart Energy Meters. It is observed that the availability of the consumption pattern in real time is part of the need presented by the research and that it is essential to perceive and understand savings opportunities. In this context, this dissertation documents the development of an embedded system to measure, monitor consumption and control electrical loads, enabling the improvement of energy efficiency in energy systems through management performed on the demand side. The developed smart meter electronically measures consumption and other parameters in a given time interval and transmits the measurements over a wireless communication network through the Message Queue Telemetry Transport (MQTT) protocol to a cloud-hosted server accessible to the user. remotely. The information can be viewed on portable electronic devices with internet access, informing the user about their energy consumption, enabling complete control and management of the load. For the development of the prototype, the integrated circuit (IC) ADE9153A was used, which is an IC of energy measurement with self-calibration, together with an ESP32, a microcontroller equipped with wireless communication, and the final cost of the device was below of three hundred and fifty reais for the production of a batch of ten units. The validation of the device produced was performed by comparing the device readings with the readings obtained through the ADE9153A integrated circuit manufacturer's evaluation system, which guarantees Class 1 accuracy in active energy measurements according to IEC 62053-21 standards; IEC 62053-22; EN50470-3; OIML R46; and ANSI C12.20. The result of the measurements of the developed device compared to the measurements of the manufacturer's evaluation system showed errors smaller than $\pm 0.1\%$ and errors smaller than $\pm 1\%$ in relation to the full scale of the device, showing itself as a viable solution for the proposed application and for other applications with minor adjustments to the software and monitoring platform.

Key words: *Energy Meter. Energy Efficiency. Energy Savings. IoT.*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.2	CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA.....	15
1.3	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	15
1.4	ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO	17
2.2	PORTFÓLIO DE PATENTES.....	27
2.3	PORTFÓLIO DE PRODUTOS.....	30
2.4	CONSIDERAÇÕES.....	34
3	MATERIAIS E METÓDOS.....	35
4	PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA PROPOSTO	38
4.1	SISTEMA EMBARCADO	38
4.1.1	<i>Circuito de medição</i>	<i>38</i>
4.1.2	<i>Circuito de isolamento</i>	<i>43</i>
4.1.3	<i>Circuito de processamento e comunicação.....</i>	<i>46</i>
4.1.4	<i>Fonte de alimentação.....</i>	<i>49</i>
4.1.5	<i>Circuito de controle de carga.....</i>	<i>51</i>
4.1.6	<i>Montagem do dispositivo</i>	<i>53</i>
4.1.7	<i>Firmware.....</i>	<i>53</i>
4.2	DASHBOARD.....	57
4.2.1	<i>Gerenciamento de dispositivos</i>	<i>58</i>
4.2.2	<i>Gerenciamento de clientes</i>	<i>60</i>
4.2.3	<i>Configuração do monitoramento</i>	<i>60</i>
4.3	CONSIDERAÇÕES.....	63
5	ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....	64
5.1	VALIDAÇÃO DAS LEITURAS DE TENSÃO RMS	65
5.2	VALIDAÇÃO DAS LEITURAS DE CORRENTE RMS	65
5.3	VALIDAÇÃO DAS LEITURAS DE FREQUÊNCIA	67
5.4	VALIDAÇÃO DAS LEITURAS DE POTÊNCIAS ATIVA, REATIVA E DO FP.....	68
5.5	VALIDAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ATIVA E REATIVA.....	70
5.6	VALIDAÇÃO DO DISPOSITIVO EM UMA INSTALAÇÃO REAL	72
5.7	LEVANTAMENTO DE CUSTOS DE PRODUÇÃO	77
5.8	CONSIDERAÇÕES.....	78
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	79
	REFERÊNCIAS.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Roteiro <i>Methodi Ordinatio</i>	17
Figura 2 - Tamanho do mercado global das tecnologias IoT.	23
Figura 3 - O protótipo de medidor inteligente realizado por ABATE.....	24
Figura 4 - Demonstrativo (a) do <i>layout</i> e (b) da placa montada.	24
Figura 5 - Diagrama de blocos da referência de <i>hardware</i>	25
Figura 6 - Medidor SM-W Lite.....	32
Figura 7 - Watt Meter JE05.....	32
Figura 8 - Newatt G121-100A.	33
Figura 9 - NIR 810B-ZI.	34
Figura 10 - Procedimentos para desenvolvimento da pesquisa.	35
Figura 11 - Diagrama eletrônico do circuito de medição.....	41
Figura 12 - Demonstrativo do (a) <i>layout</i> e da (b) da placa de medição produzida.	42
Figura 13 - Demonstrativo da (a) visualização 3D e da (b) montagem da placa do circuito de medição.	43
Figura 14 - Diagrama eletrônico do circuito de isolamento.....	44
Figura 15 - Demonstrativo do (a) <i>layout</i> e da (b) da placa de isolamento produzida.	45
Figura 16 - Demonstrativo da (a) visualização 3D e da (b) montagem PCB de isolamento.	45
Figura 17 - Diagrama eletrônico do circuito de processamento e comunicação.	47
Figura 18 - Demonstrativo do (a) <i>layout</i> e da (b) da placa de processamento e comunicação produzida.....	48
Figura 19 - Demonstrativo da (a) visualização 3D e da (b) montagem da placa do circuito de isolamento.	49
Figura 20 - Diagrama eletrônico da fonte chaveada.	50
Figura 21 - Visualização 3D da placa fonte.	51
Figura 22 - Diagrama da placa de acionamento da carga.	52
Figura 23 - <i>Layout</i> da placa de acionamento.	52
Figura 24 - (a) Dispositivo com a eletrônica montada (b) Dispositivo.....	53
Figura 25 - Configuração do canal de leitura do shunt.	54
Figura 26 - Página inicial da plataforma de gerenciamento.....	58
Figura 27 - Aba de adição de dispositivos.	59
Figura 28 - Aba de importação do cadastro de dispositivos.	59
Figura 29 - Aba de gerenciamento de clientes.	60
Figura 30 - <i>Dashboard</i> EAS METER.....	61
Figura 31 - Aba de configuração do monitoramento.	62
Figura 32 - Demonstrativo da <i>dashboard</i> em <i>smartphone</i>	62
Figura 33 - EV-ADE9153ASHIELDZ.....	64
Figura 34 - Dashboard mobile (a) e alicate amperímetro (b).....	67
Figura 35 - Dashboard com leituras de potência ativa.....	68
Figura 36 - Dashboard com leituras de potência reativa.....	69
Figura 37 - Terminal de <i>download</i>	70
Figura 38 - Instalação em campo.	72
Figura 39 - Demonstrativo do sistema operando sem carga.	73

Figura 40 - Demonstrativo do sistema acionando a carga.	74
Figura 41 - Demonstrativo do sistema operando em regime permanente.....	75
Figura 42 - Demonstrativo do sistema operando com variação de carga.	76
Figura 43 - Demonstrativo do sistema chaveando a carga (desligando).....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pesquisa nas bases de dados.....	18
Tabela 2 - Artigos em concordância com o tema.	20
Tabela 3 - Atualização da pesquisa de artigos em concordância com o tema.....	26
Tabela 4 - Resultado das buscas por registros de patente.	27
Tabela 5 - Registros de patente com aderência ao sistema proposto.	28
Tabela 6 - Compilado de dispositivos no mercado.	31
Tabela 7 - Demonstrativo da validação da leitura de tensão eficaz.	65
Tabela 8 - Demonstrativo da validação da leitura de corrente elétrica.	66
Tabela 9 - Validação do tempo de acionamento da proteção de sobrecorrente.....	66
Tabela 10 - Comparação da medição de potência ativa.	68
Tabela 11 - Demonstrativo da validação da leitura de potência reativa.....	69
Tabela 12 - Demonstrativo da validação da leitura de fator de potência.	69
Tabela 13 - Exemplo de dados disponibilizados no arquivo .csv.....	71
Tabela 14 - Custos de produção do dispositivo.....	78
Tabela 15 - Especificações do EAS Meter.	80

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico das últimas décadas, observa-se um aumento da necessidade de monitorar o padrão de consumo de energia em tempo real, monitoramento este que é essencial para perceber oportunidades de economia de energia, pensamento que vem ao encontro com a busca por processos e tecnologias sustentáveis visando promover a eficiência e sustentabilidade energética. Dentre os aspectos que possibilitam alcançar este objetivo, o conceito de edificações inteligentes se destaca e origina-se com o aumento da integração de tecnologia avançada em edificações e seus sistemas, tais que todo o ciclo de vida das edificações possa ser operado e controlado remotamente para conveniência, conforto, economia e eficiência energética (JIA et al., 2019). Atualmente, cerca de 40% do uso global de energia é atribuído às edificações urbanas, que contribuem com 30% das emissões totais de CO₂ no mundo (AHMAD et al., 2016). Ainda quanto à sustentabilidade, as emissões globais de gases de efeito estufa estão crescendo continuamente em uma escala mundial e, as questões de mudança climática estão cada vez mais presentes, causando graves impactos à população e ao ecossistema (NIŽETIĆ et al., 2019).

Mundialmente, incluindo o Brasil, os países buscam alternativas para o desafio da descarbonização de suas edificações nos próximos anos e as medidas propostas para isso incluem: aumentar a proporção de edificações com necessidades energéticas quase nulas, ou em inglês *Near Zero Energy Buildings* (NZEB); sistemas de energia mais inteligentes e eficientes; e mudanças de comportamento no consumo energético entre os consumidores (AHMAD et al., 2016).

A integração da IoT em edificações inteligentes é um dos meios para atingir tais objetivos, de forma a possibilitar o fornecimento de medições em tempo real e informações com dados relevantes. Atividades como iluminação, estacionamento de veículos, uso de eletrodomésticos e autorização de acesso podem ser reconhecidas pelo uso de objetos conectados a uma mesma rede (DAISSAOUI et al., 2020). Atualmente, o conceito de IoT é cada vez mais afirmado como o ambiente de pessoas e objetos interconectados entre si, não tratando apenas de comunicação Máquina a Máquina (M2M). A IoT é sobre a forma como humanos e máquinas se conectam, usando serviços públicos comuns (ABATE et al., 2019).

Neste contexto, a presente dissertação de mestrado teve como objetivo desenvolver um sistema composto de uma interface para o usuário de fácil interpretação conectada a um medidor de energia com autocalibração, incluindo gerenciamento de dispositivos, usuários, parametrização e controle remoto, interoperabilidade entre vários dispositivos, armazenamento de dados, processamento e possibilidade de tomada de decisão, assim como análise de alguns aspectos da qualidade de energia.

Para realização do desenvolvimento do sistema, foi necessário elencar as características de disponibilidade de compra no mercado, agilidade de desenvolvimento, capacidade de processamento e conexão sem fio. Após essa análise, o módulo microcontrolador ESP32 da *Espressif Systems* foi selecionado para a realização desta tarefa. Em busca de desenvolver um protótipo com tecnologia de ponta, o CI de medição de energia ADE9153A da *Analog Devices*, que se caracteriza como um CI de medição de energia monofásico com autocalibração foi adicionado ao projeto de forma a garantir confiabilidade das medições realizadas. O recurso de calibração automática *mSure*® permite que o medidor calibre automaticamente os canais de corrente e tensão e, conseqüentemente, realize os cálculos de potências ativa, reativa e aparente sem a necessidade de um padrão ou medidor de referência (ANALOG DEVICES, 2018).

O sistema desenvolvido é um dispositivo eletrônico de medição e controle remoto eletrônico com custo na ordem de trezentos reais. Por meio de dispositivos eletrônicos portáteis como smartphones, tablets e notebooks, ele possibilita ao usuário monitorar o consumo energético e realizar o controle de cargas monofásicas de baixa tensão em residências e indústrias por meio de uma interface amigável. Sua instalação torna a realização da medição e do controle de cargas simples, auxiliando na redução do desperdício de consumo de energia e no controle da demanda.

1.1 OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A presente dissertação visa o desenvolvimento de um sistema capaz de aumentar a eficiência energética em sistemas de energia utilizando a realização de medições de consumo de energia, tensão e corrente elétricas, além de potências ativa, reativa e aparente, tendo ainda a capacidade de realizar o controle remoto das cargas monofásicas de baixa tensão por meio de conexão sem fio com servidor conectado a nuvem. Visando atingir o objetivo geral os seguintes objetivos específicos foram realizados:

- Pesquisa do portfólio bibliográfico, de produtos e patentes.
- Seleção dos componentes do *hardware* para validação em laboratório.
- Integração dos componentes selecionados e produção do dispositivo.
- Desenvolvimento da programação do dispositivo.
- Configuração do servidor em nuvem para o armazenamento da *dashboard* e do painel de controle.
- Validação do dispositivo e do sistema.

1.2 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA

Considerando os aspectos científico e acadêmico, o sistema desenvolvido promove o desenvolvimento de tecnologias que poderão estar presentes nas residências de qualquer consumidor de energia elétrica, seja para fins relacionados ao monitoramento ou para o controle da demanda.

O sistema se afasta dos sistemas encontrados no desenvolvimento do portfólio bibliográfico por utilizar tecnologias mais recentes, e também de produtos e sistemas disponíveis no mercado, devido a sua exatidão de $\pm 1\%$ nas medições mesmo mantendo o princípio de desenvolvimento com plataformas *open-source* e de baixo custo de desenvolvimento e produção, além da incorporação de uma tecnologia de autocalibração.

Devido à possibilidade de desconectar completamente as cargas da rede de distribuição, o sistema proposto gera como benefício a maior disponibilidade de energia no sistema elétrico. Este benefício possibilita o atendimento por concessionária ou permissionária de distribuição de energia em maior número e também de forma mais eficiente aos consumidores.

1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

O sistema exposto visa auxiliar na prevenção e redução do desperdício de energia, este atributo é possível por possuir como funcionalidades a medição precisa de grandezas elétricas e de parâmetros de qualidade de energia. Além, de possibilitar ao usuário o gerenciamento energético e o controle remoto da carga através de conexão sem fio com um *gadget*.

O sistema em operação possibilita a redução de consumo de energia, portanto, o mesmo pode reduzir o valor da fatura para o usuário e caso o número de dispositivos instalados seja muito grande, pode reduzir a necessidade nacional de aumentar os investimentos em geração de energia, característica que impacta diretamente no meio ambiente e no aspecto social. Também busca, informar e conscientizar os usuários com os dados disponíveis na interface sobre os benefícios da gestão e correta utilização dos recursos naturais, contribuindo para o desenvolvimento sustentável do planeta.

Visto que o sistema é instalado em baixa tensão de até 240Vca e, com finalidade de ser operado por usuários residenciais e de indústrias de pequeno porte, é possível que o sistema receba a patente de aplicação. Além disso, a execução deste projeto contribui para desenvolver o setor de tecnologia nacional, com menor custo e desempenho de componentes atualizados, que poderá servir de ponto de partida para outras pesquisas relacionadas ao tema ou integrar soluções comerciais de eficiência energética já disponíveis no mercado.

1.4 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em seis capítulos. Neste primeiro, é descrita a problemática abordada, sendo também colocados os objetivos, a contribuição, a justificativa e a relevância da pesquisa.

No segundo capítulo, encontram-se a revisão bibliográfica com a contextualização do tema, o portfólio bibliográfico, o portfólio de produtos e de patentes, englobando as tecnologias de medição e comunicação sem fio.

O terceiro capítulo traz as metas da metodologia aplicada para o desenvolvimento deste estudo, no qual se apresentam as considerações tomadas para a elaboração do sistema e da validação.

O desenvolvimento do protótipo proposto é descrito no quarto capítulo, sendo este dividido em tópicos, detalhando o desenvolvimento do sistema embarcado e da *dashboard*.

Na sequência, o quinto capítulo apresenta os resultados obtidos e a análise da validação do sistema desenvolvido.

Finalmente, expõe-se as considerações e os trabalhos futuros no sexto capítulo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como revisão bibliográfica, neste capítulo são apresentados os portfólios bibliográfico, de patentes e de produtos. Apresenta-se ainda o método utilizado para execução de levantamento bibliográfico e os resultados obtidos com o mesmo.

2.1 PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO

O portfólio bibliográfico foi realizado com a utilização da *Methodi Ordinatio* (PAGANI; KOVALESKI; RESENDE, 2015). Esta metodologia equaciona os três fatores mais relevantes a serem considerados na busca de um artigo científico que são: (i) o ano de publicação do artigo, (ii) o número de citações que o artigo obteve até a data da pesquisa e o (iii) fator de impacto do mesmo.

Para execução do método de levantamento bibliográfico, deve ser aplicado o roteiro de execução conforme a Figura 1.

Figura 1- Roteiro *Methodi Ordinatio*.

Etapa 1	• Determinar a intenção de pesquisa;
Etapa 2	• Pesquisa preliminar;
Etapa 3	• Definição de combinações, base de dados e tempo;
Etapa 4	• Pesquisa definitiva;
Etapa 5	• Filtragem;
Etapa 6	• Identificação do FI e citações;
Etapa 7	• Cálculo do <i>InOrinatio</i> ;
Etapa 8	• Localização do artigo;
Etapa 9	• Leitura e análise sistemática;

Fonte: Do autor.

Etapa 1: Nesta etapa estabeleceu-se que a orientação da pesquisa deveria ser sobre “eficiência energética” e “dispositivo de medição de energia”, pois são temas da linha de pesquisa em que se insere este trabalho. Além da intenção da pesquisa, nesta etapa foram definidas também as palavras-chave iniciais correlacionadas ao tema.

Etapa 2: Nesta etapa, foi realizada uma pesquisa preliminar exploratória nas bases de dados bibliográficas comumente utilizados no tema da pesquisa, utilizando as combinações de palavras-chave para refinar a busca e, eliminar trabalhos não relevantes para o portfólio.

Etapa 3: Consistiu em definir as palavras-chave utilizadas na busca definitiva e suas respectivas combinações, bem como quais os bancos de dados utilizados para gerar o portfólio.

Etapa 4: Etapa em que foi executada a busca definitiva e a coleta das informações nas bases de dados de relevância para área de atuação. A busca desta pesquisa ocorreu nas bases *ScienceDirect* e *IEEEXplore*, apresentando o resultado resumido na Tabela 1.

Tabela 1- Pesquisa nas bases de dados.

Combinações de palavras chave	ScienceDirect	IEEEXplore	Totais
"Energy Meter" and "IoT" and "Energy Savings"	59	1	60
"Energy Meter" and "IoT" and "Energy Efficiency"	109	4	113
"Energy Meter" and "IoT" and "MQTT"	19	2	21
Total de Resultados			194

Fonte: Do autor.

Etapa 5: A realização da filtragem demandou um gerenciador de referências bibliográficas para remover os artigos duplicados. Dos artigos restantes, gerou-se uma tabela para ser realizada a análise da relação do título, do resumo e das palavras-chave com o tema da pesquisa.

Etapa 6: Após a filtragem dos artigos, foi necessário a busca do fator de impacto de cada documento assim como o número de citações para o complemento da tabela gerada na etapa 5.

Etapa 7: Nesta etapa foi realizado o cálculo do índice *InOrdinatio*, deste modo o método auxiliou a encontrar os artigos relevantes em cada tema com a fórmula apresentada na Equação 1.

$$InOrdinatio = (IF/1000) + \alpha * [10 - (ResearchYear - PublishYear)] + (\Sigma Ci) \quad (1),$$

onde: IF: fator de impacto do artigo; α : fator de ponderação que varia de 1 a 10 para ser atribuída pelo pesquisador; *ResearchYear*: ano em que a pesquisa foi desenvolvida; *PublishYear*: ano em que o documento foi publicado; e ΣCi : número de vezes que o artigo foi citado. Os principais trabalhos resultaram em uma maior pontuação, visto que, quanto mais recente a publicação do trabalho, quanto maior o número de citações e maior o fator de impacto do mesmo, maior a pontuação (BARROS, M. V. A, PIEKARSKI, C. M. A, SALVADOR, [s.d.]).

Etapa 8: Obtenção dos trabalhos em formato integral que não foram localizados anteriormente.

Etapa 9: Etapa em que se realizou a leitura e a análise sistemática dos artigos para identificação dos pontos em comum e problemas solucionados.

A verificação do alinhamento ao tema da pesquisa, através da leitura na íntegra dos artigos, obteve como resultado 40 (quarenta) artigos. Por fim, tendo ordenados os 40 (quarenta) artigos de acordo com a metodologia *Methodi Ordinatio*, foram selecionados os 16 (dezesesseis) artigos da Tabela 2 com relevância e aderência à temática da pesquisa para compor o portfólio bibliográfico deste estudo, a seguir os detalhes dos mesmos são apresentados. Devido à natureza do estudo ser de desenvolvimento de equipamento eletrônico, foram incluídos como referência também alguns documentos de desenvolvimento e manuais de equipamentos eletrônicos utilizados nos circuitos e relevantes à pesquisa.

Segundo (SIANO, 2014), o controle de demanda ativo pelo lado do usuário pode oferecer uma ampla gama de benefícios potenciais na operação, expansão e na eficiência do sistema de mercado de energia. Além disso, pode melhorar a confiabilidade do sistema de energia a longo prazo, reduzindo a demanda de pico. Reduz também os investimentos gerais de custo de planta e capital e adia a necessidade de atualizações da rede transmissão e distribuição de energia. A pesquisa mostra os potenciais benefícios das redes inteligentes, tecnologias e sistemas inovadores, como medidores inteligentes, controladores de energia e sistemas de comunicação que, são decisivos para facilitar a coordenação eficiente da resposta em demanda na rede de distribuição, e são descritos e discutidos com referências a estudos de casos industriais reais e projetos de pesquisas.

Conforme apresentado por (AHMAD et al., 2016), a maioria das legislações e políticas sobre medição de energia na Europa são em resposta à diretiva de desempenho energético de edifícios e, a medição de energia está incluída nas políticas e regulamentações existentes em apenas alguns países. No entanto, o autor levanta que desenvolvimentos recentes na política estão apontando para requisitos de medição mais rigorosos no futuro, mudando de conformidade voluntária para obrigatória. No que diz respeito ao equipamento de medição, o trabalho mostra que desenvolvimentos significativos foram feitos no passado recente em miniaturização, precisão, robustez, armazenamento de dados, capacidade de se conectar usando vários protocolos de comunicação e a integração com sistemas existentes de gerenciamento de energia de edifícios e a nuvem, resultando em uma variedade de soluções possíveis. Traz ainda que desenvolvimentos em tecnologias de comunicação, em particular sem fio de baixa potência, estão possibilitando a implementação econômica de redes de sensores de M2M e IoT. Em que a privacidade e a proteção de dados, continuam sendo uma preocupação para agregadores de dados e usuários finais. Destaca que a padronização de protocolos de rede e funcionalidades de dispositivos permanece uma área ativa de pesquisa e desenvolvimento, especialmente devido à prevalência de muitos protocolos na indústria de sistemas de gerenciamento de energia de edifícios. Reforça ainda que as soluções disponíveis geralmente carecem de interoperabilidade entre os sistemas de *hardware* e *software*.

Tabela 2 - Artigos em concordância com o tema.

	Autor	Título	Journal/Proceedings	Ano
1	Siano, P.	<i>Demand response and smart grids - A survey</i>	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	2014
2	Ammar, M., Russello, G. and Crispo, B.	<i>Internet of Things: A survey on the security of IoT frameworks</i>	<i>Journal of Information Security and Applications</i>	2018
3	Haider, H.T., See, O.H. and Elmenreich, W.	<i>A review of residential demand response of smart grid</i>	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	2016
4	Shrouf, F. and Miragliotta, G.	<i>Energy management based on Internet of Things: Practices and framework for adoption in production management</i>	<i>Journal of Cleaner Production</i>	2015
5	Ahmad, M.W., Mourshed, M., Mundow, D., Sisinni, M. and Rezgui, Y.	<i>Building energy metering and environmental monitoring - A state-of-the-art review and directions for future research</i>	<i>Energy and Buildings</i>	2016
6	Emmanuel, M. and Rayudu, R.	<i>Communication technologies for smart grid applications: A survey</i>	<i>Journal of Network and Computer Applications</i>	2016
7	Shaukat, N., Ali, S.M., Mehmood, C.A., Khan, B., Jawad, M., Farid, U., Ullah, Z., Anwar, S.M. and Majid, M.	<i>A survey on consumers empowerment, communication technologies, and renewable generation penetration within Smart Grid</i>	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	2018
8	Avancini, D.B., Rodrigues, J.J., Martins, S.G., Rabêlo, R.A., Al-Muhtadi, J. and Solic, P.	<i>Energy meters evolution in smart grids: A review</i>	<i>Journal of Cleaner Production</i>	2019
9	Nižetić, Sandro; Djilali, Nedjib; Papadopoulos, Agis; Rodrigues, Joel J. P. C.	<i>Smart technologies for promotion of energy efficiency, utilization of sustainable resources and waste management</i>	<i>Journal of Cleaner Production</i>	2019
10	Jia, M., Komeily, A., Wang, Y. and Srinivasan, R.S.	<i>Adopting Internet of Things for the development of smart buildings: A review of enabling technologies and applications</i>	<i>Automation in Construction</i>	2019
11	Abate, F., Carratù, M., Liguori, C. and Paciello, V.	<i>A low-cost smart power meter for IoT</i>	<i>Measurement: Journal of the International Measurement Confederation</i>	2019
12	Dranka, Gé.G. and Ferreira, P.	<i>Towards a smart grid power system in Brazil: Challenges and opportunities</i>	<i>Energy Policy</i>	2020
13	Daissaoui, A., Boulmakoul, A., Karim, L. and Lbath, A.	<i>IoT and Big Data Analytics for Smart Buildings: A Survey</i>	<i>Procedia Computer Science</i>	2020
14	Sai Shibu, N.B., Hanumanthiah, A., Sai Rohith, S., Yaswanth, C.H., Hemanth Krishna, P. and Pavan, J.V.	<i>Development of IoT Enabled Smart Energy Meter with Remote Load Management</i>	<i>2018 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, ICCIC 2018</i>	2018
15	Minchev, D.P. and Dimitrov, A.I.	<i>Laboratory Automation System Using IOT Devices</i>	<i>2020 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA), pp. 1-4</i>	2020
16	Do Amarai, H. L. M.; DeE Souza, A. N.; Gastaldello, D. S.; Fernandes, F.; Vale, Z.	<i>Smart meters as a tool for energy efficiency</i>	<i>11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, IEEE INDUSCON 2014</i>	2014

Fonte: Do autor.

Em (AMMAR; RUSSELLO; CRISPO, 2018), questiona-se, visto que uma grande variedade de aplicativos foi desenvolvida e implantada usando diversos *frameworks* comerciais, os mecanismos utilizados na estruturação de IoT com ênfase em privacidade e segurança. Um *framework* IoT é um conjunto de regras de orientação, protocolos e padrões que simplificam a implementação de aplicativos. É avaliada a arquitetura, os fundamentos do desenvolvimento de aplicativos, o *hardware* compatível e os recursos de segurança para cada *framework*. A comparação de arquiteturas de segurança mostra que os mesmos padrões são usados para proteger as comunicações, e diferentes metodologias são seguidas para fornecer outras propriedades de segurança.

O estudo elaborado por (HAIDER; SEE; ELMENREICH, 2016) apresenta uma visão geral sobre sistemas residenciais de resposta a demanda, técnicas de agendamento de carga e as tecnologias de informação e comunicação mais recentes que oferecem suporte a aplicativos residenciais de resposta a demanda. Destaca e analisa os desafios que devem se tornar tópicos de pesquisa relevantes no que diz respeito a resposta a demanda residencial de redes inteligentes. Mostra que a maioria dos esquemas de resposta a demanda sofre de um problema de externalidade que envolve o efeito do alto nível de consumo nas taxas de preços de outros clientes, especialmente durante o período de pico. Este problema contribui para recomendação no uso de preços por nível de consumo, de forma a fornecer aos clientes um nível adaptativo de preços de consumo de energia em diferentes períodos de operação de carga e, é baseado no monitoramento da tarifa de energia do cliente.

Na pesquisa realizada por (SHROUF; MIRAGLIOTTA, 2015) sobre as práticas de gerenciamento de produção com eficiência energética, realiza-se uma revisão abrangente da literatura e, na visão de especialistas, de forma a contribuir para a compreensão das práticas que são aprimoradas e habilitadas pela IoT. Discute-se os benefícios que podem ser obtidos com a adoção dessas práticas de gestão, apresentando um *framework* para apoiar a integração dos dados de energia coletados nas ferramentas e plataformas de tecnologia da informação de uma empresa. E destaca-se como os processos de tomada de decisões operacionais e táticas podem alavancar os dados a fim de melhorar a eficiência energética e, logo, a competitividade das empresas de manufatura.

Segundo (EMMANUEL; RAYUDU, 2016), existe um consenso crescente para a convergência das tecnologias de comunicação em uma rede habilitada para *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (TCP/IP) para os emergentes aplicativos de rede inteligente e também a necessidade de convergência em uma plataforma de protocolo comum para alcançar a interoperabilidade de protocolos de comunicação herdados e em evolução. Apresenta-se ainda uma revisão dos componentes integrais da rede emergente e das infraestruturas de comunicação e resume-se seus requisitos de comunicação e rede, como Controle de Acesso à Mídia (MAC) com base no

guia *IEEE* para interoperabilidade de rede inteligente e no instituto nacional de padrões e estruturas de tecnologia da Nova Zelândia.

Na pesquisa realizada por (SHAUKAT et al., 2018), apresenta-se uma análise do modelo de arquitetura da rede inteligente com foco na capacitação e na interação do consumidor com os dados de medição e o controle do consumo de energia, visando a aceitação e capacitação do mesmo para aplicação de programas de resposta em demanda e também do gerenciamento pelo lado da demanda. Apresenta ainda uma discussão dos detalhes das tecnologias de comunicação e dos modelos de sistemas de potência como *Pico Grid*, *Nano Grid*, *Micro Grid*, *Inter Grid*, usinas e geração distribuída.

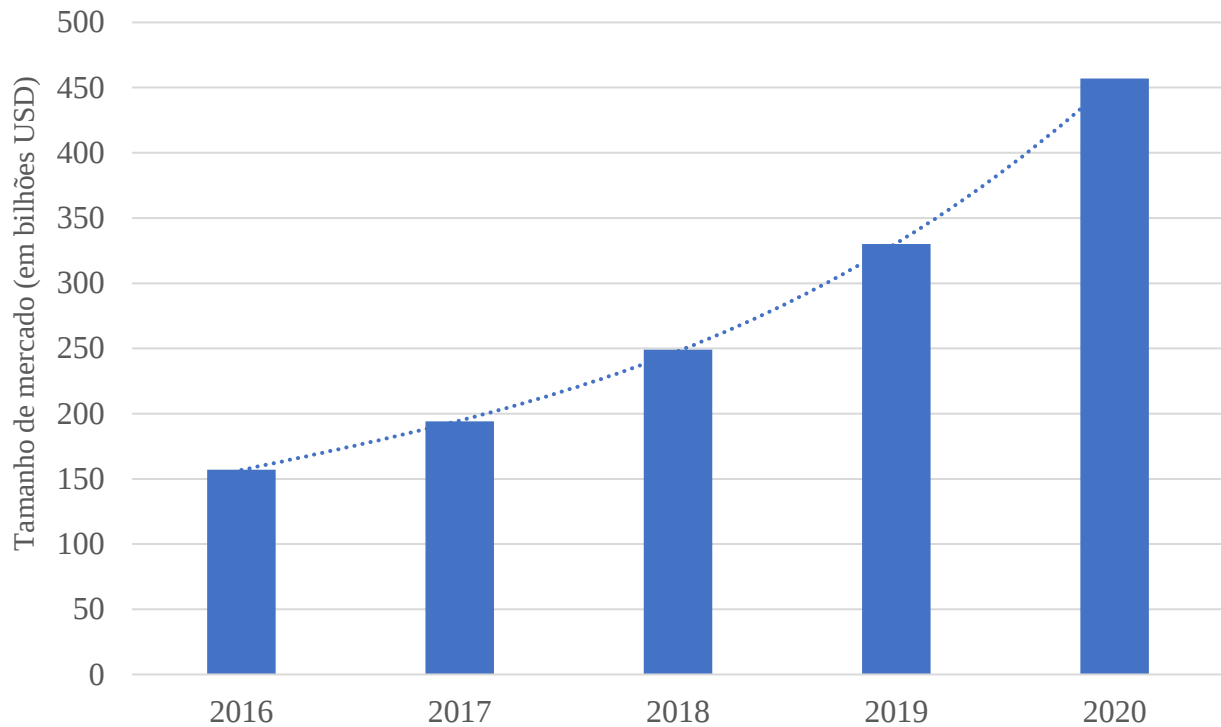
Com relação a visão de redes inteligentes, (AVANCINI et al., 2019) argumentam que os medidores de energia inteligentes são atrativos para uso na indústria de geração e distribuição de energia por serem capazes de cumprir suas funções de maneira mais eficiente em termos de energia, recursos de comunicação e controle remoto. Porém, para fornecer uma solução totalmente funcional, o medidor inteligente deve seguir a descrição detalhada das principais funcionalidades necessárias. Isto é, a medição periódica e precisa, o armazenamento de dados e alarmes, as interfaces de comunicação, o controle de dispositivos domésticos, os sistemas de gerenciamento de dados, o gerenciamento do lado da demanda, a prevenção contra roubo de energia e a segurança do sistema como um todo.

Já na pesquisa realizada por (NIŽETIĆ et al., 2019), apresenta-se uma abordagem multidisciplinar das tecnologias inteligentes para a promoção da eficiência energética, utilização de recursos sustentáveis e gestão de resíduos. Aborda-se os artigos que reúnem o progresso da pesquisa em quatro áreas temáticas principais, edifícios verdes, uso e consumo de energia, utilização de energia solar, eficiência e eliminação de resíduos, cidades inteligentes IoT. Além de trazer valores estimados pela Forbes, mensurando o tamanho do mercado global emergente das tecnologias de IoT, conforme a Figura 2.

Em um cenário brasileiro de perspectivas de implementação de um sistema de energia inteligente, (DRANKA; FERREIRA, 2020) afirmam que a digitalização, a descentralização e a descarbonização são consideradas as principais impulsionadoras dessa transição nos sistemas de energia. Sugere-se ainda que as políticas de geração distribuída (GD), gerenciamento do lado da demanda e novos esquemas tarifários estão em um caminho de implantação acelerada no país. Afirma-se também que o atual sistema de medição de rede é considerado uma questão fundamental a ser tratada. Convergindo com este trabalho, tem-se que a adoção da tecnologia IoT para monitorar o consumo de energia no âmbito residencial e no chão de fábrica ainda está em um estágio primitivo em relação ao número de empresas de manufatura discretas existentes no mundo. No entanto, várias

empresas de manufatura instalaram tais sistemas para monitorar o consumo de energia no nível da máquina (SHROUF; MIRAGLIOTTA, 2015).

Figura 2 - Tamanho do mercado global das tecnologias IoT.

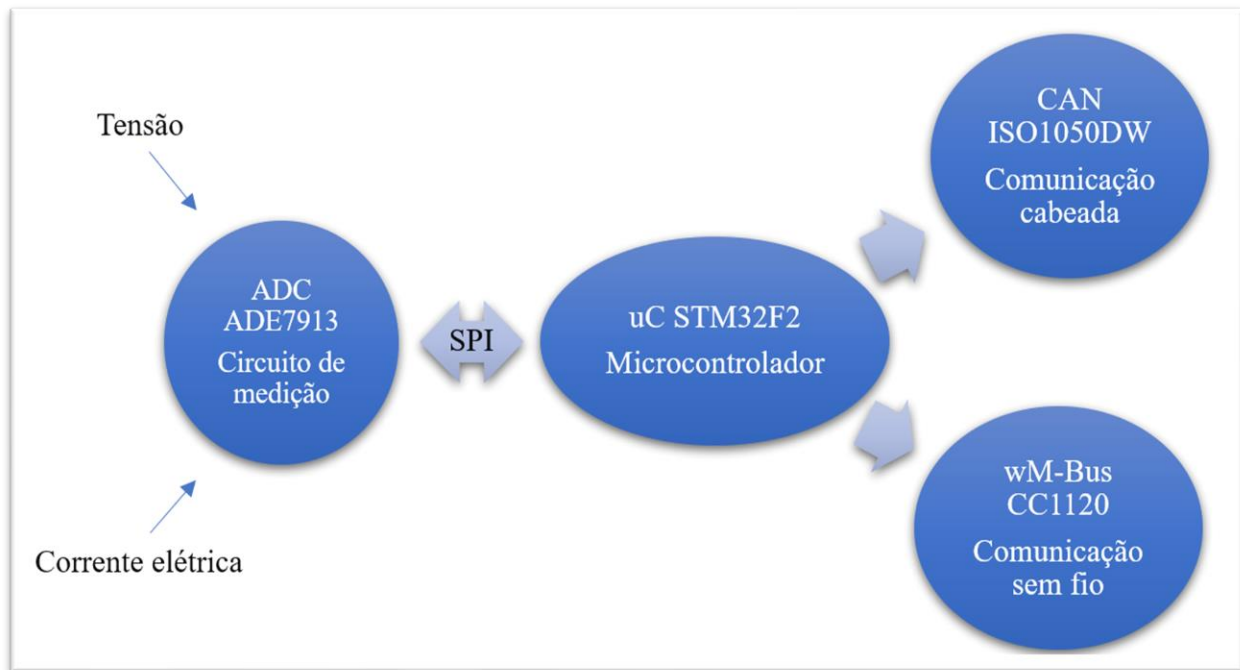


Fonte: Adaptado de (NIŽETIĆ et al., 2019).

Quando medidores inteligentes são aplicados como ferramenta para eficiência energética, podem ser verificados os benefícios de sua implementação, além de quais pontos produzem um impacto benéfico à interface com o usuário, conforme (DO AMARAI et al., 2014). Portanto a aplicação permite fácil acesso e entendimento dos dados de consumo. Isto teria por objetivo motivar os usuários a aumentarem a atenção no consumo local de energia elétrica. Portanto, o aumento da eficiência do consumo ou da conscientização do consumidor se traduz, em muitos casos, em economia de energia, esta que pode ser superior à projeção da expansão física dos sistemas elétricos.

Com o desenvolvimento de um medidor de energia inteligente de baixo custo para IoT, (ABATE et al., 2019) apresentam um *hardware* de 2018 capaz de se adaptar à variabilidade da rede, mas mantendo um alto nível de exatidão de medição. O protótipo apresentado na Figura 3 possui um ADE7913 CI de medição de energia que realiza os cálculos necessários e transfere os valores por interface serial para um microcontrolador STM32F2 que, por sua vez, transfere os dados para um transceptor RF CC1120 da Texas Instruments que opera em uma frequência de comunicação de 169 MHz.

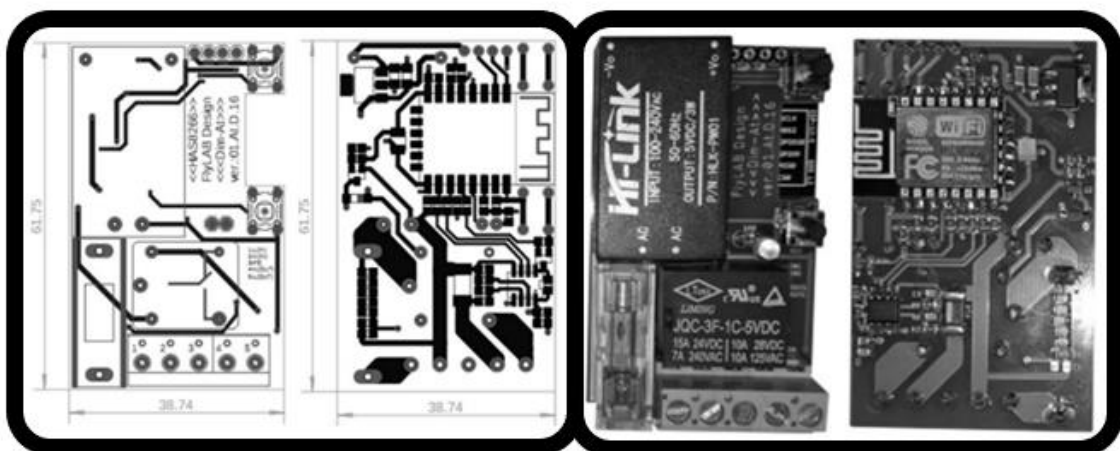
Figura 3 - O protótipo de medidor inteligente realizado por ABATE.



Fonte: Adaptado de (ABATE et al., 2019).

No caso de (MINCHEV; DIMITROV, 2020), apresenta-se um sistema de automação com base no medidor de energia HLW8012 da HLW Technology e um ESP8266. Nesta solução, o ESP8266 realiza a leitura dos pulsos gerados pelo medidor de energia e envia o valor computado de consumo para um gateway por meio do protocolo MQTT. Tal tecnologia permitia o acionamento de relés de controle de carga através de um navegador de internet em um computador ou celular. O protótipo é apresentado na Figura 4-a, enquanto que o circuito (PCB) produzida é apresentada na Figura 4-b.

Figura 4 - Demonstrativo (a) do *layout* e (b) da placa montada.



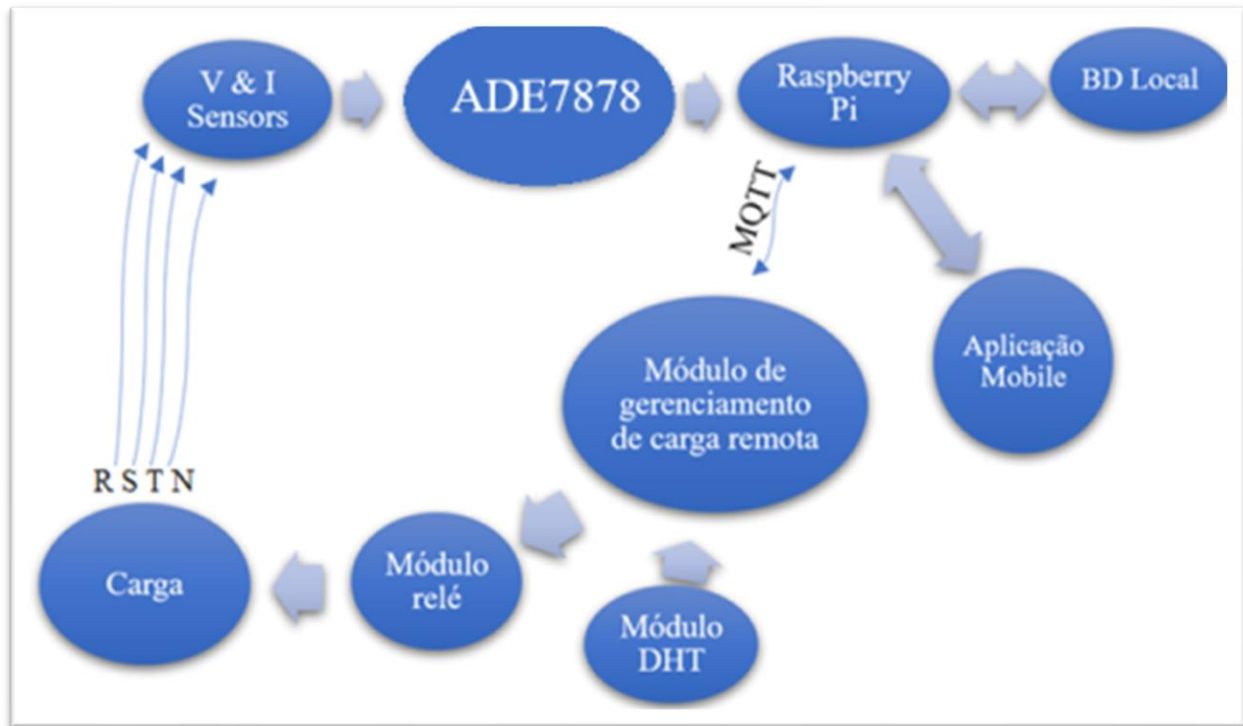
(a)

(b)

Fonte: Adaptado de (MINCHEV; DIMITROV, 2020).

Outra referência de *hardware* é apresentada em (SAI SHIBU et al., 2018), em que o medidor desenvolvido comanda remotamente o gerenciamento da carga. Porém, o sistema de medição é trifásico. O diagrama de blocos do medidor de energia inteligente habilitado para IoT com gerenciamento remoto de carga é apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Diagrama de blocos da referência de *hardware*.

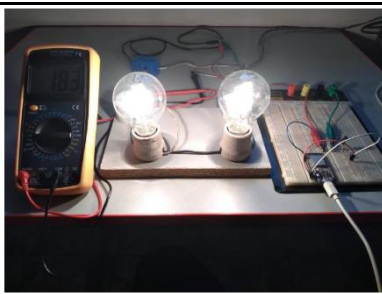


Fonte: Adaptado de (SAI SHIBU et al., 2018).

O sistema de aquisição de dados é composto por um ADE7878A que é responsável por realizar os cálculos das grandezas elétricas de um sistema trifásico e transferir para o *RaspberryPi*, o qual, por sua vez, se comunica por meio do protocolo MQTT com um aplicativo *Android* e um ESP32, responsável por controlar um módulo de relés. Este sistema permite ao usuário do aplicativo gerenciar as cargas pela Internet.

Recentemente, tem-se o surgimento de novas pesquisas e publicações sobre o assunto. Porém, nenhuma das pesquisas encontradas apresentou o nível de avanço em *hardware* do estudo desenvolvido. A Tabela 3 apresenta alguns dos trabalhos desenvolvidos neste ano com suas respectivas produções.

Tabela 3 - Atualização da pesquisa de artigos em concordância com o tema.

	Autor	Título	Produções
1	Fabiano Bergamin, Junior Cristiano Minotti.	Monitoramento do consumo de energia elétrica em tempo real	 
2	Daniel de Souza Dias, Me. Fábio Timbó Brito.	Análise de consumo e simulação de tarifa branca: Abordagem utilizando medidor de energia IoT de baixo custo e aplicativo para <i>smartphone</i> .	 
3	Leonardo Adam, Carlos Henrique Barriquello, Daniel Pinheiro Bernardon, Filipe Gabriel Carloto, Lucas Maziero e Tiago Bandeira Marchesank	Desenvolvimento de dispositivo para Comunicação à longa distância com Medidores de energia elétrica para Consumidores do Grupo b	 

Fonte: Do autor.

2.2 PORTFÓLIO DE PATENTES

Além da busca pelo portfólio bibliográfico, uma pesquisa de patentes sobre dispositivos semelhantes ao sistema foi realizada na base de patentes do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), pois o sistema desenvolvido é de interesse comercial do autor somente no mercado nacional.

O uso da base do INPI visa fornecer um panorama de como está evoluindo em território nacional o tema deste estudo, embora a base também contenha patentes de nível internacional. Para realização das buscas, foram pesquisados os seguintes termos em títulos e resumos desta base: (i) medidor de energia; (ii) eficiência energética; e (iii) IoT na data da pesquisa. Isto resultou em 930 (novecentos e trinta) registros de patente.

A Tabela 4, apresenta os resultados obtidos e também o número de registros de patente duplicados que foram excluídos, e o número de registros de patente que possuíam aderência ao propósito do sistema proposto nesta dissertação de mestrado.

Tabela 4 - Resultado das buscas por registros de patente.

	Medidor de energia	Eficiência energética	IoT
No título	134	43	35
No resumo	407	199	112
Duplicados	91	31	29
Aderentes	4	4	1

Fonte: Do autor.

A Tabela 5 apresenta os registros que foram selecionados após a análise individual dos resumos, observando se a aplicação descrita pela patente estava relacionada ao sistema desenvolvido. É possível observar que a preocupação com o gerenciamento da energia elétrica em edificações é constatada a mais de duas décadas.

O registro de patente PI 9600042-2 com depósito realizado no ano de 1996 (mil novecentos e noventa e seis) descreve um sistema de computadores interconectados, funcionando no modo mestre-escravo, para controle da operação de cargas elétricas, que opera de forma a monitorar para permitir a determinação remota do estado de corrente e parâmetros de consumo de energia elétrica por uma carga elétrica em um circuito de ramificação. Porém, devido à idade do sistema, não operaria com as tecnologias atuais tal como o sistema proposto.

O mesmo ocorre com o registro de patente PI 9702088-5, que se refere a sistemas de medição distribuídos que usam comunicação sem fio. A evolução descrita por esse registro possibilita o uso de telemetria para realizar a extração das medições realizadas pelo dispositivo.

Tabela 5 - Registros de patente com aderência ao sistema proposto.

Pedido	Depósito	Título	IPC
PI 9600042-2	05/01/1996	Sistema de automação de prédios e gerenciamento de energia	G06f 19/00
PI 9702088-5	23/01/1997	Sistema de medição	G08c 15/06
BR 10 2015 024167 4	21/09/2015	Aparelho para gestão de consumo de água, gás e energia elétrica por meio de smart meters	G07f 15/06
BR 10 2017 008414 0	24/04/2017	Módulo individual de gerenciamento automatizado de medição (AMMI)	G01r 22/06
BR 10 2012 008461 9	11/04/2012	Sistema registrador de consumo para avaliação da eficiência energética composto por redes de sensores cabeados, integradas por radiofrequência em ambientes com blindagem eletromagnética	G01r 21/08
BR 10 2014 019725 7	08/08/2014	Sistema digital de eficiência energética	G06f 19/00
BR 10 2017 025250 7	24/11/2017	Dispositivo e sistema para monitoramento da eficiência de equipamentos elétricos	G05b 23/00
Br 10 2018 017224 7	22/08/2018	Sistema para gerenciamento remoto de cargas elétricas	G05b 19/04
BR 10 2019 023392 3	07/11/2019	Dispositivo integrado com sistema de gestão, automação, monitoramento, controle de consumo e qualidade de energia elétrica para quadros de distribuição elétrica residencial, comercial e industrial baseado em internet das coisas	G05b 23/02

Fonte: Do autor.

Seguindo a ordem cronológica, o próximo foi o registro de patente BR 10 2012 008461 9, intitulado “Sistema registrador de consumo para avaliação da eficiência energética composto por redes de sensores cabeados, integradas por radiofrequência em ambientes com blindagem

eletromagnética”. Este apresenta uma preocupação com a eficiência energética e propõe um sistema modular para realização da medição setorizada junto ao quadro de distribuição. A comunicação local é realizada por meio de um sistema cabeado que, posteriormente, comunica-se por radiofrequência com um banco de dados. O sistema é funcional, porém é complexo para o usuário.

A BR 10 2014 019725 7, intitulada “Sistema digital de eficiência energética”, descreve um sistema composto por um conjunto de automação e aplicações em *software*, responsável pelo monitoramento, controle e atuação nos consumidores de energia presentes em unidades industriais ou comerciais. Seria possível, assim, controlar as grandezas medidas faturadas pelas concessionárias de energia e todas as demais fontes de energia de cada unidade, tratando de forma generalizada as energias térmica, hidráulica e elétrica.

Na BR 10 2015 024167 4, um aparelho para gestão de consumo de água, gás e energia elétrica por meio de medidores inteligentes, apresenta-se uma solução composta por módulos de gestão e consumo, além de módulos de programação. O equipamento descrito funciona como uma ponte entre o medidor inteligente de água, gás ou energia elétrica e um *software* para informar o usuário de seu consumo.

O registro de patente BR 10 2017 008414 0, identificado como “Módulo individual de gerenciamento automatizado de medição (AMMI)”, funciona da mesma forma que o anterior. É um equipamento eletrônico que se comunica com o medidor eletrônico e envia as informações para concessionária e o consumidor. Neste caso, porém, a comunicação é realizada por meio de um enlace de *Power Line Communication* ou rede *ZigBee*. Ambos diferem do protótipo proposto por não possuir o módulo de medição, utilizar um medidor já existente ou instalado, ou funcionar como um acessório para um medidor.

A BR 10 2017 025250 7 descreve um sistema para monitoramento da eficiência de equipamentos elétricos, que apresenta o módulo de medição e de atuação integrados, comunicando-se com um servidor por comunicação sem fio para concentrar as informações neste último. O servidor possibilita a consulta aos dados de consumo por outros dispositivos móveis com interface compatível. Diferencia-se do protótipo proposto por não possuir um servidor para concentração dos dados no local.

A BR 10 2018 017224 7, intitulada “Sistema para gerenciamento remoto de cargas elétricas”, é descrita como um sistema para gerenciamento remoto de cargas elétricas que, de acordo com as suas características, propicia a formação de um sistema de gerenciamento remoto em estrutura própria e específica baseada em dispositivos de medição e controle de energia elétrica conectados a circuitos elétricos ou conjunto de circuitos elétricos em unidades consumidoras e um dispositivo de controle inteligente interligado aos dispositivos de medição e controle de energia elétrica, ambos embutidos

em quadro de distribuição de força de eletricidade e integrando um método de gestão de eficiência energética de cargas elétricas, com vistas a possibilitar uma completa otimização nos procedimentos de gerenciamento remoto de circuitos elétricos individualizados em quadros de distribuição de força de eletricidade e de gestão energética ampla das cargas elétricas ligadas. Este sistema, porém, necessita de um sistema adicional de *background* em um computador local ou uma máquina virtual armazenada em nuvem para funcionar.

A BR 10 2019 023392 3, com título: “Dispositivo integrado com sistema de gestão, automação, monitoramento, controle de consumo e qualidade de energia elétrica para quadros de distribuição elétrica residencial, comercial e industrial baseado em internet das coisas”, descrita como um dispositivo IoT inteligente, para quadros de distribuição elétrica para gestão, medição e controle de consumo com análise da qualidade da energia elétrica, aplicado a residências, ambientes comerciais, industriais e concessionárias operadoras/distribuidoras de energia elétrica, sem a necessidade de alterações de infraestrutura, obedecendo características mecânicas e elétricas de disjuntores comerciais, um dispositivo que está disposto em módulos escaláveis (módulos mestre-escravo), dotados de interface de dados via *WiFi* e/ou celular e/ou via satélite, conforme necessidade específica do usuário, com funções programáveis mais simples como, liga/desliga, medição de consumo/monetização instantânea e acumulada, até as mais complexas como, suporte e função de dispositivos de proteção contra surtos de tensão e de interruptor diferencial residual (IDR), e também com suporte a realização de análise de sinais elétricos (assinatura eletrônica de sinais elétricos de equipamentos eletroeletrônicos) provenientes de equipamentos ligados ao módulo IoT de gestão inteligente de energia, através de algoritmos que combinam técnicas de filtragem digital clássica e filtragem de correlação. Difere-se do protótipo proposto por dispor-se em módulos mestre-escravo e não possuir a autocalibração.

A pesquisa dos termos, (i) medidor de energia; (ii) eficiência energética; e (iii) IoT em títulos e resumos na base do INPI não apresentou nenhum depósito aderente ao trabalho no ano de 2021.

2.3 PORTFÓLIO DE PRODUTOS

Para completar o levantamento de informações referentes ao tema de intenção da pesquisa, o portfólio de produtos disponíveis para comercialização no mercado nacional foi buscado em bases de fornecedores de revistas nacionais e sites de *e-commerce*. A busca realizada considerou os termos *smart meter* e medidor de energia. De acordo com o levantamento realizado dos sistemas de medição de energia que são comercializados, as principais características destes dispositivos são nível de tensão suportado, capacidade de leitura de corrente, exatidão das leituras, grandezas mensuradas,

tecnologias de comunicação e capacidade de controle remoto da carga. Foram compilados e apresentados na Tabela 6 os produtos que se enquadram na aplicação residencial e comercial de baixa tensão, os dispositivos de medição com foco na indústria foram excluídos da seleção por não representarem concorrência no foco de interesse comercial do protótipo produzido.

Tabela 6 - Compilado de dispositivos no mercado.

Modelo	Fabricante	I(A)	V(V)	Tipo	Comunicação	Atuador
SM-W Lite	IE Tecnologia	100	90–250	Monofásico	Wifi	Não possui
MB1000	Brasiltec	50	176-276	Monofásico	Pulso	Não possui
Sonoff POW	Idead	16	90-250	Monofásico	Wifi	Por APP
Smart Plug	Positivo	10	100-240	Monofásico	Wi-fi	Por APP
Watt Meter JE05	BIN Technology	100	100-240	Trifásico	Wifi	Não possui
G121-100A	Newatt	100	127-220	Trifásico	Wifi	Não possui
EMW-3	ELSYS	100	70-260	Trifásico	Wifi	Não possui
NIR 810B-ZI	Khomp	20	90-250	Monofásico	Wifi	Por APP

Fonte: Do autor.

Alguns dos produtos atualmente disponíveis no mercado nacional e que podem concorrer, direta ou indiretamente, com o protótipo proposto são explanados a seguir. Destaca-se que a solução de medição desenvolvida é entregue ao usuário e permite acompanhar o consumo de usuários de pequeno e médio porte, em baixa tensão e em tempo real pela internet, além de automatizar tanto a realização de medição quanto a verificação dos impactos das ações de melhoria da eficiência. O medidor de baixo custo permite, ainda, o controle das cargas e, a redução das perdas de forma remota.

Conforme (IE TECNOLOGIA, 2020), o modelo SM-W Lite é um medidor residencial monofásico que tem por objetivo: (i) ler e disponibilizar grandezas elétricas em plataforma de gestão WEB simplificada no equipamento; ou (ii) transmitir para *software* de terceiros via protocolos GET/POST ou MQTT. O sistema apresentado na Figura 6 realiza a medição de corrente elétrica de forma indireta via transformador de corrente com capacidade de até 100A e calcula as grandezas de potência ativa e energia consumida.

O Watt Meter JE05 (BIN TECNOLOGY, 2020) mostrado na Figura 7 é uma placa desenvolvida com base no módulo ESP8266 e realiza a medição de três entradas de tensão de 0 a 300Vac e três entradas de corrente com transformadores de corrente como sensores com capacidade de até 100A. A comunicação é realizada através dos protocolos MODBUS TCP e MQTT CLIENTE, que podem ser usados simultaneamente e permitem a interface com o produto. As medidas de tensão, corrente, potência ativa, reativa, aparente, fator de potência e frequência, são instantâneas e estarão

disponíveis para leitura. Existem também leituras de valores acumulados como kWh e kVAr, sendo possível zerar leituras acumuladas.

Figura 6 - Medidor SM-W Lite.



Fonte: Adaptado de (IE TECNOLOGIA, 2020).

Figura 7 - Watt Meter JE05.



Fonte: Adaptado de (BIN TECNOLOGY, 2020).

Em (NEWATT; MINIPA, 2020), o multimedidor inteligente G121-100A da Figura 8 possui doze canais de leitura de corrente, comunicação sem fio e Ethernet para realizar a transmissão dos

dados para o aplicativo possibilitando a medição em tempo real e a geração de um histórico de consumo. Da mesma forma que os produtos mencionados anteriormente, o sensor de corrente utilizado é um transformador de corrente com capacidade de leitura de até 100A.

Figura 8 - Newatt G121-100A.



Fonte: Adaptado de (NEWATT; MINIPA, 2020).

O medidor de consumo de energia monofásico IEEE 802.15.4 com atuador para quadro de energia NIR 810B-ZI (KHOMP, 2020) é o produto que mais se assemelha com a proposta deste estudo. Tal como observado na Figura 9, o medidor é um *end point* da linha IoT que realiza leituras de energia, potência, corrente e tensão, enviando os dados coletados para o *gateway* de telemetria via protocolo de comunicação IEEE 802.15.4. Dependendo da aplicação configurada, o dispositivo ainda consegue acionar um relé remotamente, abrindo ou fechando o circuito. Em sua aplicação típica, o medidor de consumo de energia deve ser embarcado ao quadro disjuntor para identificar com exatidão o consumo de determinado maquinário ou setor dentro de um grande complexo. A faixa de monitoramento de consumo vai de 100mA até 20A com exatidão aproximada de $\pm 1\%$. Porém este dispositivo difere-se do protótipo proposto por necessitar de um gateway concentrador para realização da telemetria.

Recentemente, tem-se o surgimento de novos produtos no mercado nacional, porém de origem importada. Dentre eles cita-se o SONOFF POW R2, que é um dispositivo de monitoramento e controle de cargas monofásicas desenvolvido com base no microcontrolador ESP8266, uma versão anterior ao microcontrolador utilizado neste desenvolvimento. Porém, as especificações

disponibilizadas pelo fabricante não apresentam informações sobre a exatidão nas medições realizadas. E por ser um dispositivo importado não altera o objetivo de desenvolver tecnologia nacional.

Figura 9 - NIR 810B-ZI.



Fonte: Adaptado de (KHOMP, 2020).

2.4 CONSIDERAÇÕES

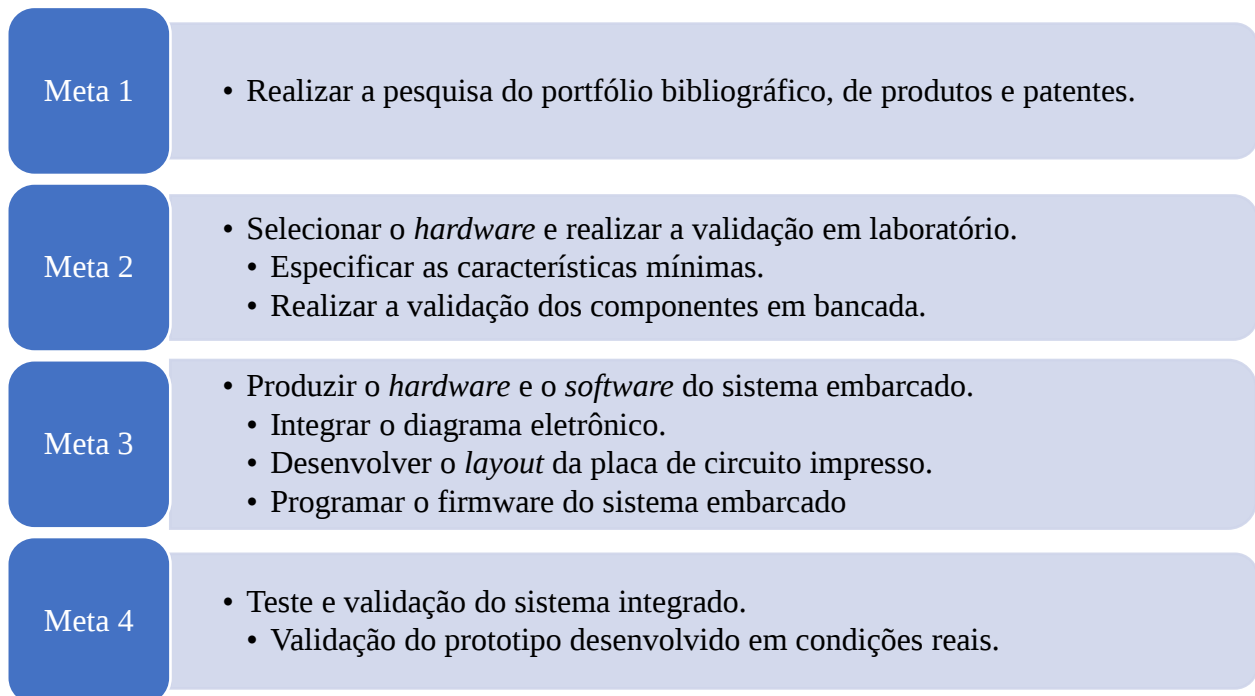
Neste capítulo, foram apresentados o método sistemático para levantamento do portfólio bibliográfico, assim como os resultados do portfólio de patentes e de produtos. Pelo grande número de resultados apresentado nas pesquisas, é possível observar o interesse a nível global pelo tema. É possível constatar também que vários dispositivos apresentam funcionalidades semelhantes às do protótipo desenvolvido, porém nenhum dos dispositivos encontrados menciona a funcionalidade de autocalibração disponível no CI de medição selecionado para o desenvolvimento deste protótipo.

3 MATERIAIS E METÓDOS

Neste capítulo, apresenta-se a forma como cada objetivo específico foi alcançado com a descrição dos materiais e métodos utilizados. Para facilitar a execução do desenvolvimento da solução proposta, foram estabelecidas as metas com uma evolução lógica e cronológica no avanço do projeto do dispositivo, do *firmware* e da *dashboard* de monitoramento.

Logo, apresenta-se as quatro metas estabelecidas, junto com as principais considerações em relação ao desenvolvimento, sendo estas esplanadas de forma mais específica em seus respectivos tópicos. A Figura 10 apresenta as metas atingidas em ordem cronológica.

Figura 10 - Procedimentos para desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: Do autor.

Meta 1: A execução serviu para apresentar o levantamento dos portfólios acerca dos dispositivos IoT de gerenciamento, medição e controle de energia em baixa tensão. Como detalhado na Seção 2.1, para definir o estado da arte foi utilizado a *Methodi Ordinatio*. Além do levantamento de artigos, foi também realizada a pesquisa de patentes e registros na base de dados do INPI acerca do tema, conforme a Seção 2.2, assim como o levantamento de características dos dispositivos comercializados, descritos na Seção 2.3. As informações obtidas com a pesquisa do portfólio bibliográfico, de produtos e patentes, possibilitaram definir o desenvolvimento da solução, dos componentes de *hardware* e das características necessárias do dispositivo a ser desenvolvido.

Meta 2: Considerando os dados obtidos durante a execução da meta um, foi possível selecionar o *hardware* e realizar a validação dos componentes em laboratório. Esta validação de componentes, reduz as necessidades de alteração de *hardware* e possibilita determinar as características de operação do dispositivo para atender as especificações.

Como requisito para selecionar o *hardware* foi necessário delimitar as especificações das características aplicáveis. O intervalo de operação do sistema foi especificado como monofásico de 85V à 250V e com leitura de corrente até 10A. A comunicação, por meio de rede sem fio e com precisão das leituras de no mínimo 1%. Deste modo, buscou-se atender sistemas de baixa tensão e, principalmente, cargas residenciais.

Com as especificações definidas, foi realizada a avaliação dos componentes eletrônicos individualmente através de pesquisa de lançamentos de novos produtos no segmento de medição de energia e comunicação sem fio de fabricantes presentes no mercado, tais como: *Microchip*, *Analog Devices*, *Texas Instruments*, *Maxim Integrated*, *Nordic Semiconductor* e *Espressif Systems*. Buscou-se, desta forma, garantir as especificações e a tecnologia de ponta utilizada no *hardware*. Dentre as opções disponíveis, os chips da *Analog Devices* apresentaram as características necessárias para execução do protótipo. Destaca-se ainda que, devido à quantidade de distribuidores da marca presentes no país e no exterior, são de aquisição simplificada.

Os componentes foram comprados e, em sequência, os testes de validação individual foram realizados em bancada: medição dos componentes para validar os encapsulamentos, teste de gravação de *firmware*, de comunicação entre circuito de processamento e medição, e de comunicação sem fio.

Executando a validação na meta dois, facilita a integração do protótipo que deve ser pensada para ser simplificada e robusta. Como os testes e a validação dos componentes ocorreram em laboratório, foi possível analisar as placas de avaliação de componente: EV-ADE9153ASHIELDZ e ESP32-DevKitC-32D. Estas são desenvolvidas e comercializadas pelos próprios fabricantes selecionados. Por fim, a partir desta análise, foi possível executar a meta seguinte.

Na Meta 3: Para produzir o *hardware* do dispositivo, os esquemáticos das placas de avaliação foram adaptados e integrados de acordo com as especificações definidas na meta dois. Para desenvolver o diagrama eletrônico e o *layout* das placas de circuito impresso utilizando um *software* de *design* eletrônico, além das placas de avaliação, foram adicionados ao projeto o circuito da fonte de alimentação e o circuito de chaveamento da carga. As placas de circuito impresso foram enviadas para ser produzidas por empresa especializada no ramo e a montagem do dispositivo foi realizada manualmente por este autor. Com o protótipo montado, foi possível desenvolver o *firmware* do sistema embarcado e, depurá-lo para executar a melhoria e a correção de possíveis falhas.

Para realização dos testes de medição de grandezas e de funcionamento do controle de carga, assim como do desenvolvimento do ambiente de integração para os equipamentos funcionais, foi necessário configurar uma máquina virtual no *Google Cloud Platform (GCP)* com a instalação do *ThingsBoard.io*, possibilitando a execução da meta quatro.

Na Meta 4: Após a montagem do dispositivo, da realização dos testes elétricos de funcionamento foi realizado o processo de autocalibração. Para validação do protótipo utilizou-se a comparação das leituras obtidas pela *dashboard* com as leituras obtidas pela placa de referência EV-ADE9153ASHIELDZ. E, a partir da utilização do painel de controle em uma aplicação real com controle e monitoramento de cargas em baixa tensão, concluiu-se as metas estabelecidas.

4 PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA PROPOSTO

Neste capítulo, apresenta-se o sistema desenvolvido, desde o protótipo de *hardware*, iniciando com a seleção dos componentes, o desenvolvimento da placa de circuito impresso e a respectiva programação do *firmware* até a configuração da *dashboard*.

Como a proposta foi desenvolver um dispositivo com capacidade de realizar as medições de grandezas elétricas e disponibilizá-las por meio de comunicação sem fio, possibilitando que o usuário monitore e gerencie o consumo através do controle de acionamento remoto da carga, o protótipo de *hardware* foi dividido em blocos de funcionalidades, tornando-se modular. Definidos os circuitos para seleção dos componentes utilizados no protótipo, as características de disponibilidade no mercado, tecnologia recente e aplicabilidade na solução foram consideradas.

O *firmware* do dispositivo, foi desenvolvido utilizando a plataforma *Arduino* de programação e a *dashboard* para o monitoramento dos dados e controle da carga foi desenvolvida utilizando a plataforma *open-source IoT ThingsBoard*.

Para possibilitar o acesso de forma simplificada e com confiabilidade de disponibilidade de vinte e quatro horas por dia e todos os dias do ano, a plataforma *ThingsBoard* foi instalada em uma máquina virtual da GCP e a comunicação do dispositivo com a GCP é realizada através do protocolo de comunicação MQTT, que é um protocolo de mensagens para sensores e pequenos dispositivos móveis otimizado para redes TCP/IP.

4.1 SISTEMA EMBARCADO

Nesta seção, apresenta-se o *hardware* e o *firmware* com o processo de autocalibração do dispositivo desenvolvido de forma modular, indicando as características de cada circuito, o diagrama eletrônico e o respectivo *layout* de placa desenvolvida e produzida. Os circuitos que compõe o *hardware* são: (i) circuito de medição; (ii) circuito de isolamento; (iii) circuito de processamento e comunicação; (iv) fonte de alimentação; e (v) circuito de controle de carga;

No tópico referente ao *firmware*, demonstra-se como os valores entregues pelo circuito de medição de energia são convertidos para valores reais e o processo de autocalibração.

4.1.1 Circuito de medição

O circuito de medição é o circuito responsável pela aquisição dos dados e computação das grandezas elétricas. Este tópico apresenta o (i) diagrama eletrônico com a descrição de funcionalidades e características dos componentes e, o (ii) *layout* e a placa de circuito impresso.

Diagrama eletrônico: O diagrama eletrônico da placa de medição pode ser visto na Figura 11, observa-se que os sensores selecionados para o hardware foram o sensor de corrente elétrica do tipo resistor shunt identificado como R11 e, o sensor de tensão é o divisor resistivo composto por quatro resistores, identificados como R7, R6, R5 e R4 de $249\text{k}\Omega$ como resistor grande e um resistor R3 de $1\text{k}\Omega$ como resistor pequeno, todos com 1% de tolerância. Esta opção se deu pelo fato dessas resistências possuírem as seguintes características: qualidade de medição, confiabilidade, custo de produção reduzido, integridade dos sinais e facilidade de desenvolvimento. Cabe ressaltar que esta seleção só é possível, pois o protótipo em aplicação fixa deve ser invasivo para possibilitar o controle de acionamento da carga a ele conectada. Estes são os valores recomendados pelo fabricante para rede elétrica com tensão eficaz nominal de até 240Vca. Com estes valores de resistência o sinal entregue ao conversor analógico digital permanece dentro da margem de segurança de $\pm 0,5\text{V}$ estipulada pelo fabricante do CI. Também é possível observar que tanto o sensor de corrente, como o sensor de tensão possuem filtros RC, compostos pelos componentes R8, R9, R10, C19, C20, C21 e C22 para minimizar ruídos e diferenças de fase entre os sinais de corrente e tensão. A placa conta com quatro LEDs para *debug*, o LED identificado como D1 indica que o CI está alimentado, os LEDs D2 e D4 são ligados diretamente aos pinos CF1 e CF2 respectivamente, pinos que são saídas lógicas de frequência de calibração, ou seja, fornecem informações de potência proporcional aos registradores internos do CI. O pino CF2 ainda pode ser configurado como pino de saída de cruzamento por zero do canal de tensão. E o LED D3 está conectado ao pino de interrupção do CI, pino que é levado a 0V sempre que existe uma solicitação de interrupção no CI. Eles LEDs são especialmente úteis durante o desenvolvimento e seguem como indicadores de estado do dispositivo durante a operação.

O regulador de tensão ADP122AUJZ-3 identificado como U2 somado aos capacitores C23, C24 e C25 realizam a adequação da tensão de alimentação de 5V para 3,3V, aplicado exclusivamente para o ADE9153A, recurso utilizado em conjunto com a placa de isolamento para garantir o isolamento e a supressão de ruídos entre as fontes de tensão das placas de medição e processamento.

Constam ainda os bornes de entrada e saída J2 e J1 respectivamente e, as conexões com o circuito de isolamento J3, circuito da fonte de alimentação J6 e J7 e, do circuito do controle de carga J4 e J5, os demais componentes são os capacitores e o oscilador necessários para o correto funcionamento do circuito e os valores são definidos conforme indicação do fabricante do circuito integrado de medição de energia.

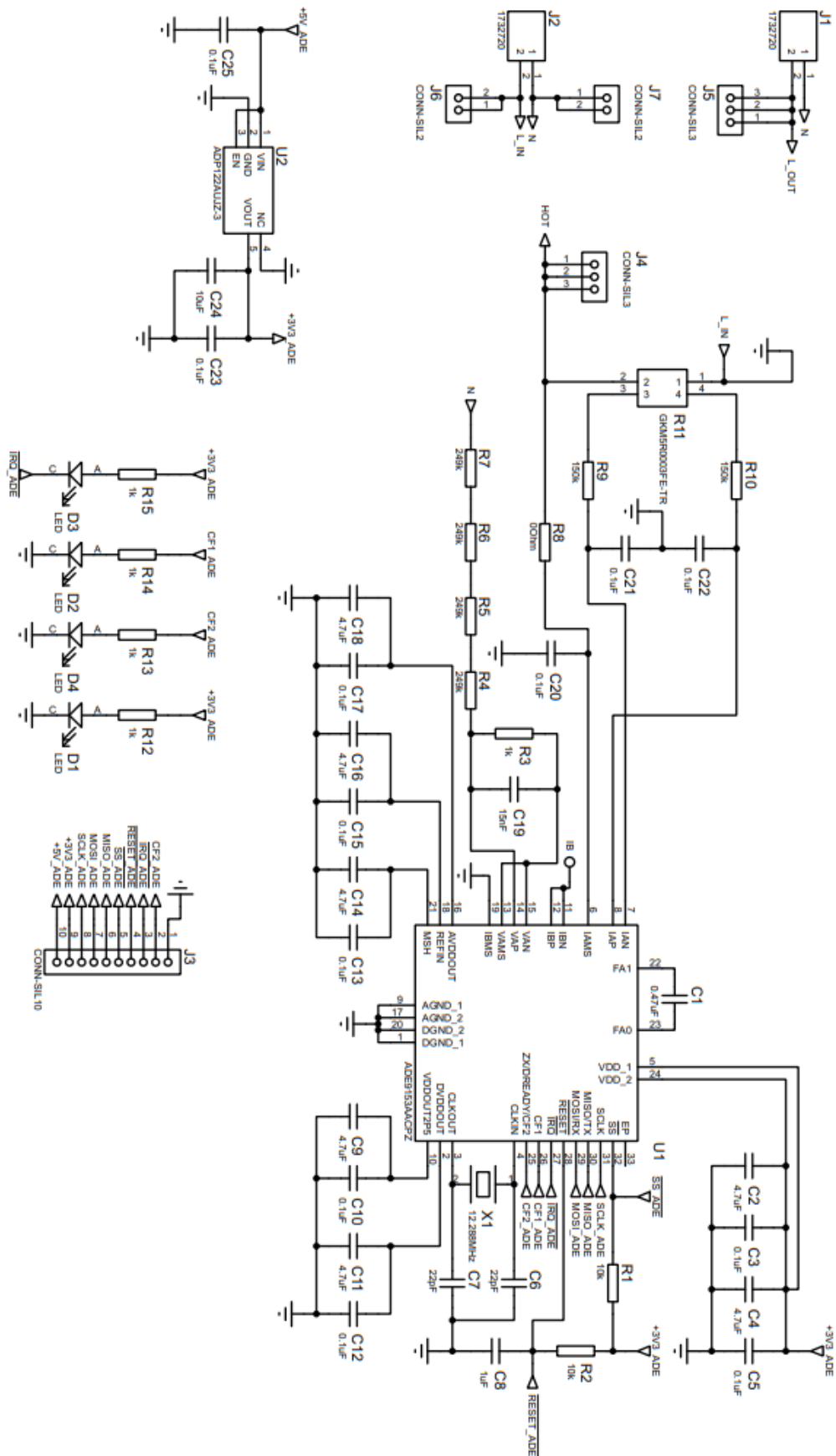
Dentre os fabricantes pesquisados, o que apresentou maior disponibilidade de *chips* no segmento de medição de energia elétrica e com as características necessárias para o desenvolvimento dos protótipos, somado com a disponibilidade de placas de avaliação dos *chips*, foi a *Analog Devices*.

Das opções disponíveis deste fabricante, o CI selecionado foi o ADE9153A. Este é um circuito integrado de medição de energia monofásico com autocalibração. O recurso de calibração automática *mSure*® permite que um medidor calibre automaticamente os canais de corrente e tensão sem usar uma fonte ou um medidor de referência padrão, quando um resistor *shunt* é usado como um sensor de corrente. Este recurso foi considerado determinante na escolha do circuito integrado, pois nenhum dos concorrentes pesquisados possuía este recurso até o momento em que este trabalho foi realizado.

O circuito integrado selecionado incorpora três conversores analógico-digital, fornecendo uma relação sinal-ruído de 88dB e, um conjunto de recursos de metrologia avançados, tais como energia ativa, energia reativa fundamental e cálculos de potência aparente, além de cálculos RMS de corrente e tensão. O ADE9153A inclui também medições de qualidade de energia, como detecção de cruzamento zero, cálculo de período de linha, medição de ângulo, detecção de pico, sobrecorrente e medições de fator de potência.

Cada canal de entrada suporta estágios de ganho independentes e flexíveis. O canal A é ideal para sensor *shunt*, tendo um estágio de ganho flexível e fornecendo faixas de entrada em escala real de pico de 26,04mV até pico de 62,50mV. O acesso aos registros é realizado por uma porta serial de 10MHz e o chip opera com 3,3V de alimentação.

Figura 11 - Diagrama eletrônico do circuito de medição.

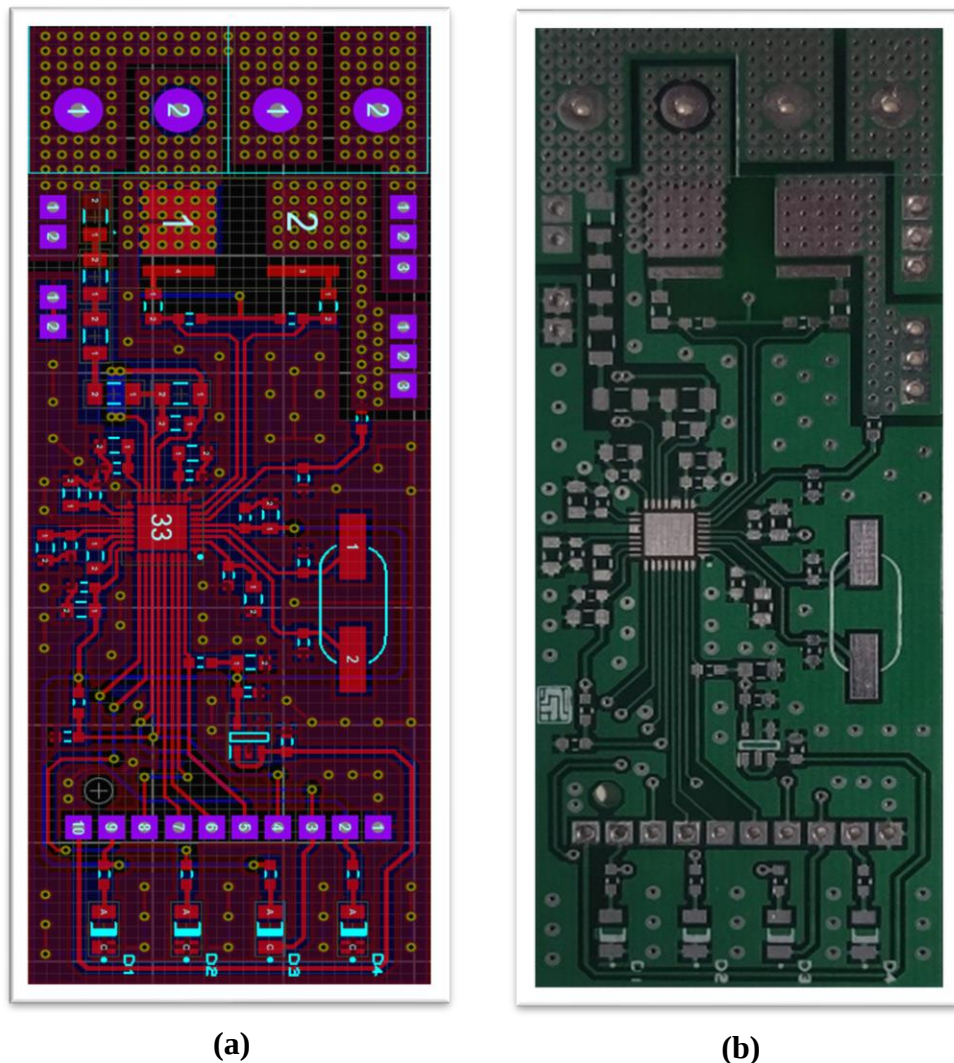


Fonte: Do Autor.

Layout e placa de circuito impresso: Com o diagrama definido, foi possível desenvolver o *layout* da placa em *Surface Mounted Device (SMD)*, obtendo um bom nível de compactação conforme observado na Figura 12-a, assim como a placa que foi produzida em fibra de vidro com espessura de 1,6mm e dupla face de cobre na Figura 12-b.

Nas trilhas de elevada corrente, foram adicionadas ilhas com furos metalizados em grande quantidade para aumentar a capacidade de condução de corrente elétrica, assim com planos de terra na parte analógica do circuito, conferindo resistência, dissipação de calor e imunidade a ruídos.

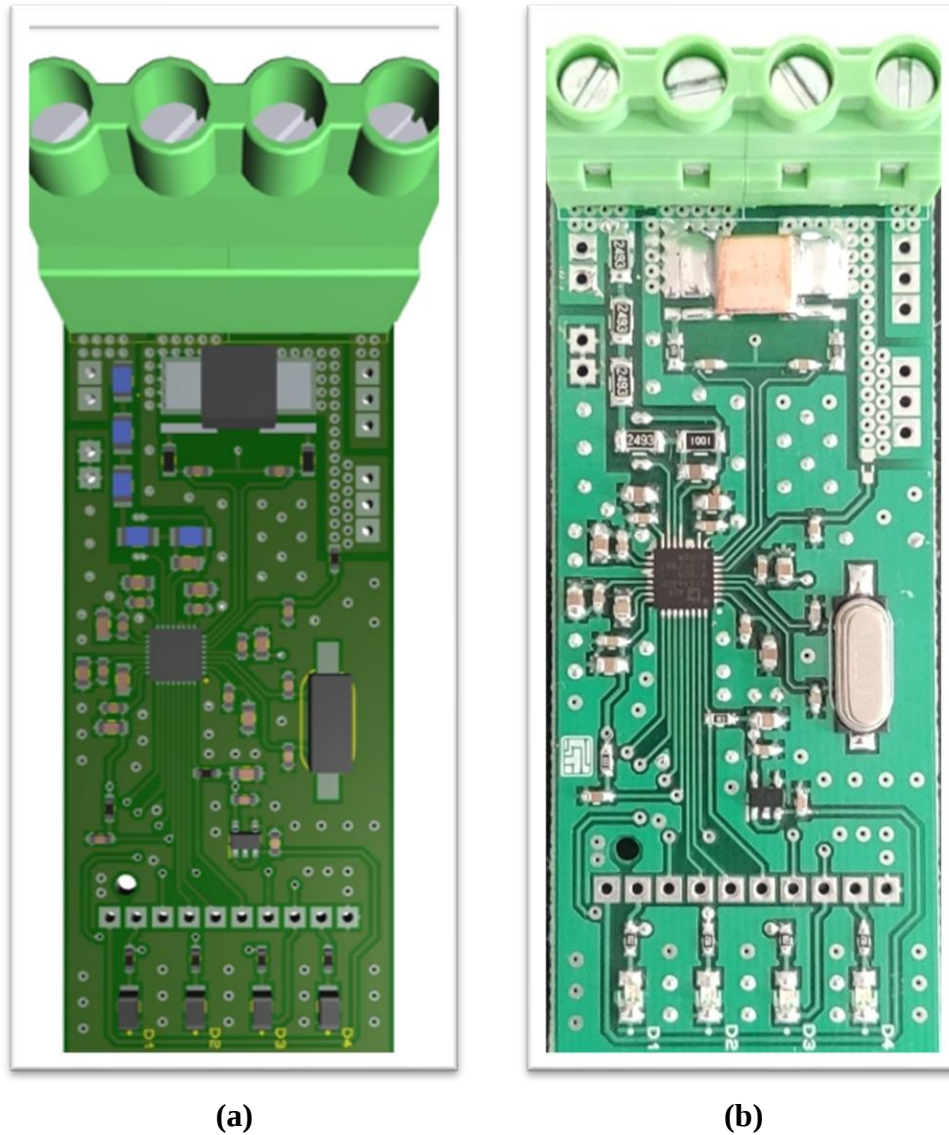
Figura 12 - Demonstrativo do (a) *layout* e da (b) da placa de medição produzida.



Fonte: Do autor.

Para reduzir os erros de montagem, a visualização 3D da placa de medição, mostrada na Figura 13-a, foi desenvolvida com elevada fidelidade, utilizando os arquivos de modelo de encapsulamento disponibilizados pelos fabricantes dos componentes. A Figura 13-b apresenta a montagem realizada.

Figura 13 - Demonstrativo da (a) visualização 3D e da (b) montagem da placa do circuito de medição.



Fonte: Do autor.

4.1.2 Circuito de isolamento

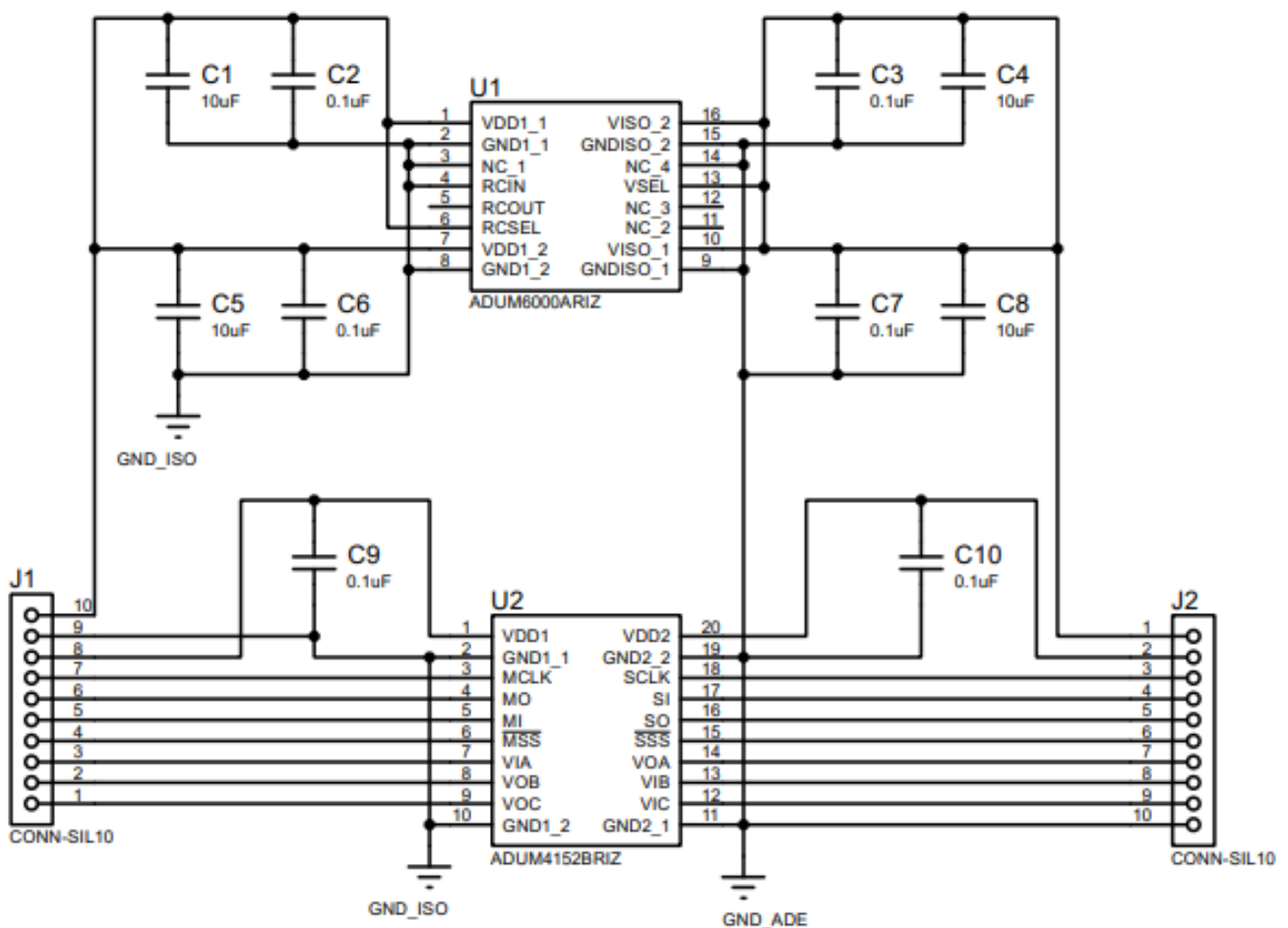
Para garantir a segurança e integridade das informações transmitidas todas as conexões entre as placas foram realizadas com circuito de isolamento. A conexão mais crítica é entre as placas de medição e processamento de dados, isto devido ao número de vias utilizados e a velocidade de comunicação entre os componentes. Portanto, para esta parte do circuito foram utilizados o (i) CI ADuM4152BRIZ e o (ii) CI ADuM6000ARIZ, ambos da *Analog Devices*. Após a descrição destes CIs, são apresentados o (iii) diagrama eletrônico; e (iv) *layout* e placa de circuito impresso.

ADuM4152BRIZ: é um isolador digital para *Serial Peripheral Interface (SPI)* que opera com 5V ou 3,3V, tem isolamento de 5kV por 1 minuto, imunidade a transientes de 25kV/ μ s e suporta SPI

com velocidade de até 17MHz. Vale destacar que a velocidade utilizada no dispositivo foi de 10MHz, velocidade padrão de comunicação do CI de medição de energia.

ADuM6000ARIZ: é um conversor CC-CC isolado de 400mW que opera com 5V ou 3,3V, tem isolamento de 5kV por 1 minuto, imunidade a transientes de 25kV/ μ s sendo desenvolvido para trabalhar juntamente com o anterior, possibilitando o completo isolamento de linhas de dados e alimentação. A placa é relativamente simples por necessitar somente de alguns capacitores de acoplamento para evitar interferências e o diagrama eletrônico pode ser observado na Figura 14.

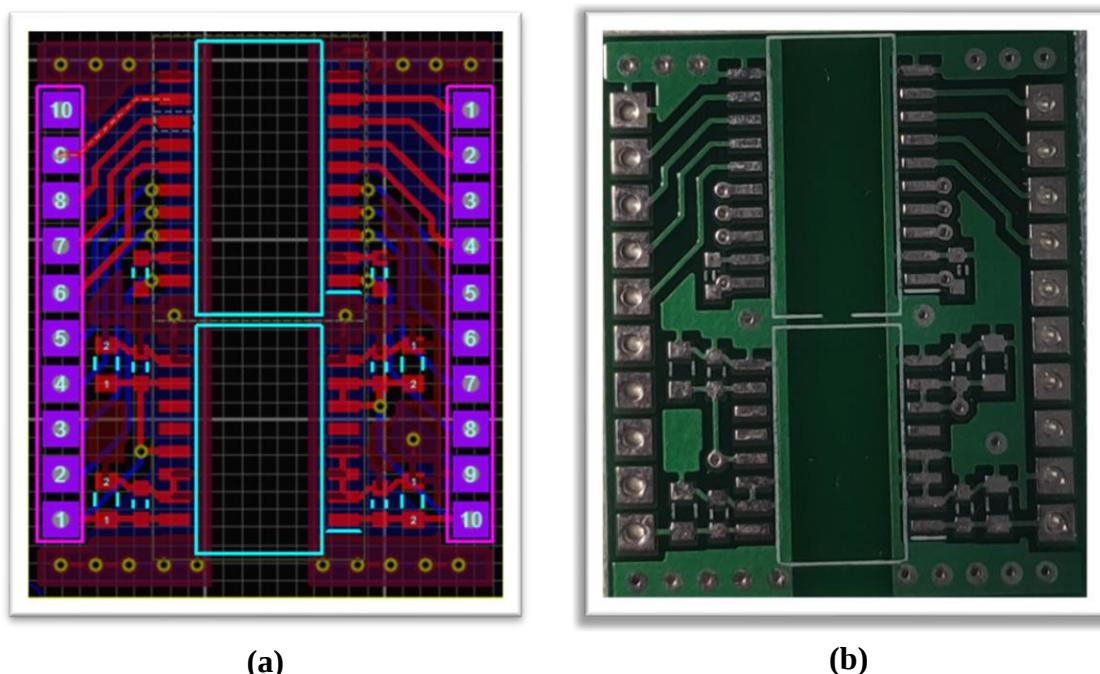
Figura 14 - Diagrama eletrônico do circuito de isolamento.



Fonte: Do autor.

Na sequência, o *layout* e a placa produzida do circuito de isolamento são apresentados nas Figuras 15-a e -b, respectivamente.

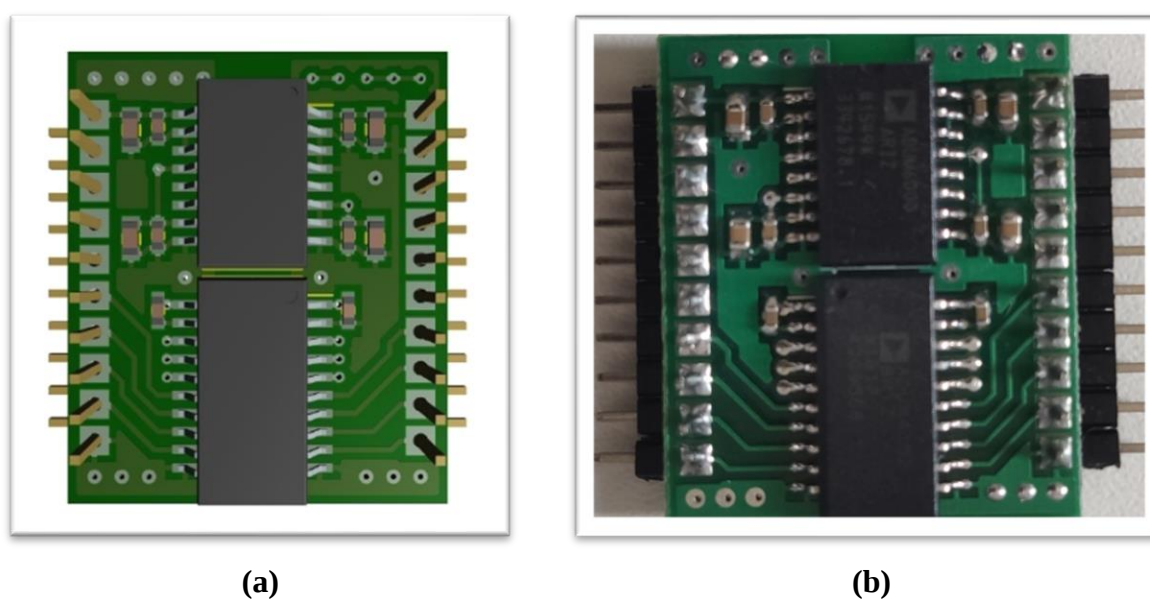
Figura 15 - Demonstrativo do (a) *layout* e da (b) da placa de isolamento produzida.



Fonte: Do autor.

O projeto em 3D, Figura 16-a, e a montagem da placa de isolamento, Figura 16-b, soldada manualmente e que apresenta aspecto profissional.

Figura 16 - Demonstrativo da (a) visualização 3D e da (b) montagem PCB de isolamento.



Fonte: Do autor

4.1.3 Circuito de processamento e comunicação

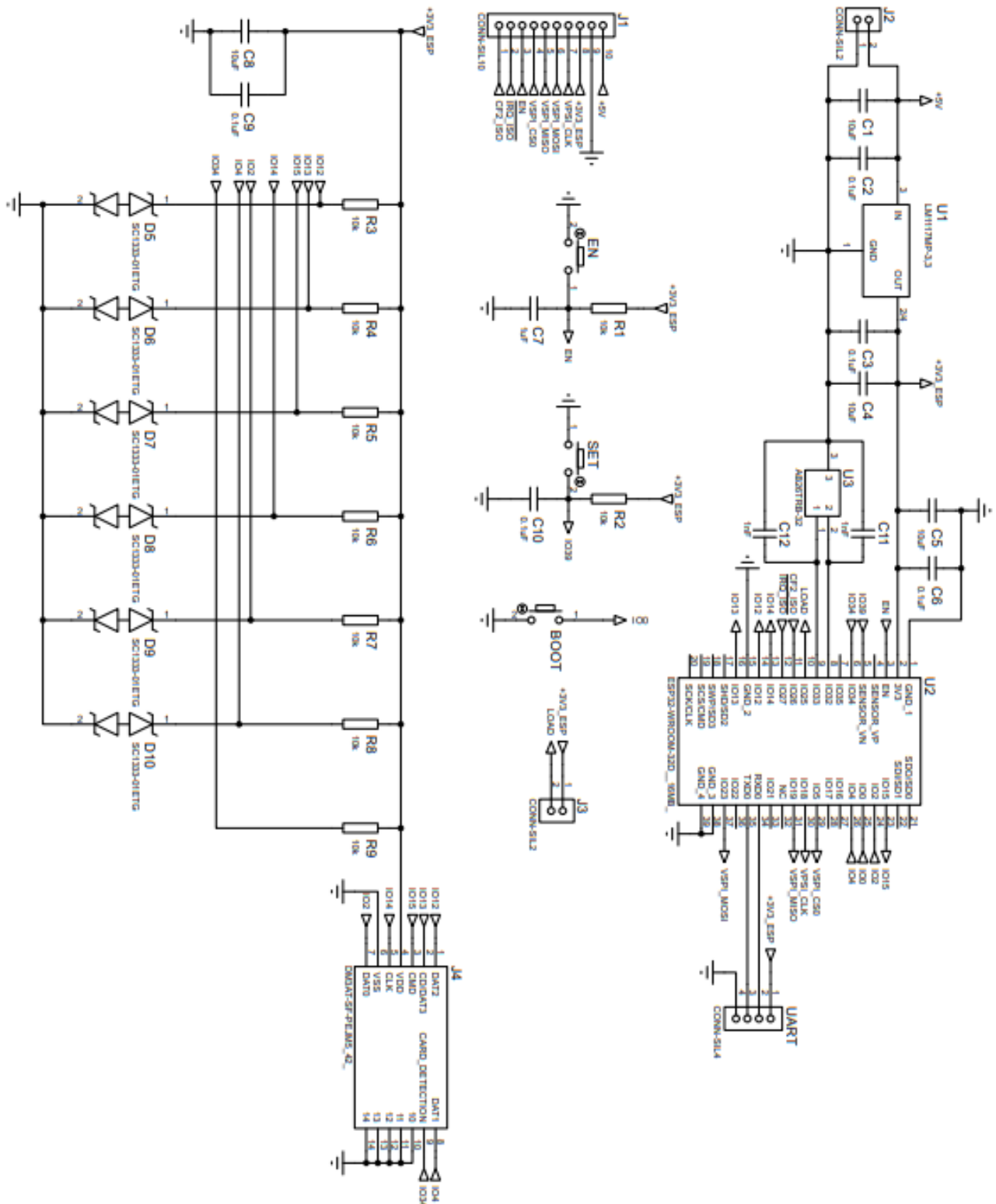
Para possibilitar a comunicação sem fio e manter um baixo custo de desenvolvimento, um módulo ESP32 foi definido como o controlador do protótipo. O controlador selecionado possui como conectividade sem fio o padrão Wi-Fi 802.11 b/g/n e Bluetooth v4.2 BR/EDR e BLE. Possui ainda a interface SPI para comunicação com o ADE9153A e pinos de entrada para o cristal de 32kHz utilizado como base de tempo para o relógio de tempo real, botões de *set*, *reset*, *boot*, o botão *set* com função programável e uma saída para possibilitar o acionamento da carga. Para facilitar a visualização são apresentados o (i) diagrama eletrônico; e (ii) *layout* e placa de circuito impresso.

Diagrama eletrônico: Da mesma forma que no circuito de medição, o circuito de processamento e comunicação possui um regulador linear de 3,3V identificado como U1, como pode ser visto na Figura 17. Porém, devido ao pico de corrente ao iniciar a comunicação, o CI utilizado é o LM1117MP-3.3 que juntamente com os capacitores C1, C2 C3 e C4, conferem potência suficiente para o ESP32 operar sem apresentar falha na comunicação sem fio. Os capacitores C5 e C6, são capacitores de desacoplamento e conferem imunidade a interferências evitando *reset* por queda de tensão de alimentação conforme indicação da *Espressif*.

O conector identificado como J1, é o de conexão com a placa do circuito de isolamento, o J2 é o de conexão com a placa da fonte de alimentação e, o J3 de conexão com a placa do circuito de controle de carga. Prevendo a continuidade do desenvolvimento do protótipo como dispositivo comercial e a possibilidade de incremento de funcionalidades, como por exemplo, o armazenamento de dados em cartão de memória, que já está previsto em *hardware* pelo conector identificado por J4, o circuito de processamento foi projetado ainda, para ser expansível através da porta de comunicação *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART), que também serve para realizar a atualização do *firmware* quando não for possível a atualização por comunicação sem fio. O conector identificado como UART serve também para realização de *debug* por meio da comunicação serial.

Os diodos identificados como D5, D6, D7, D8, D9 e D10 são diodos supressores de transientes e tem a funcionalidade de proteger a comunicação com o cartão de memória e os dados nele contidos. E, os demais componentes foram adicionados conforme indicação nos manuais para garantir o correto funcionamento da aplicação.

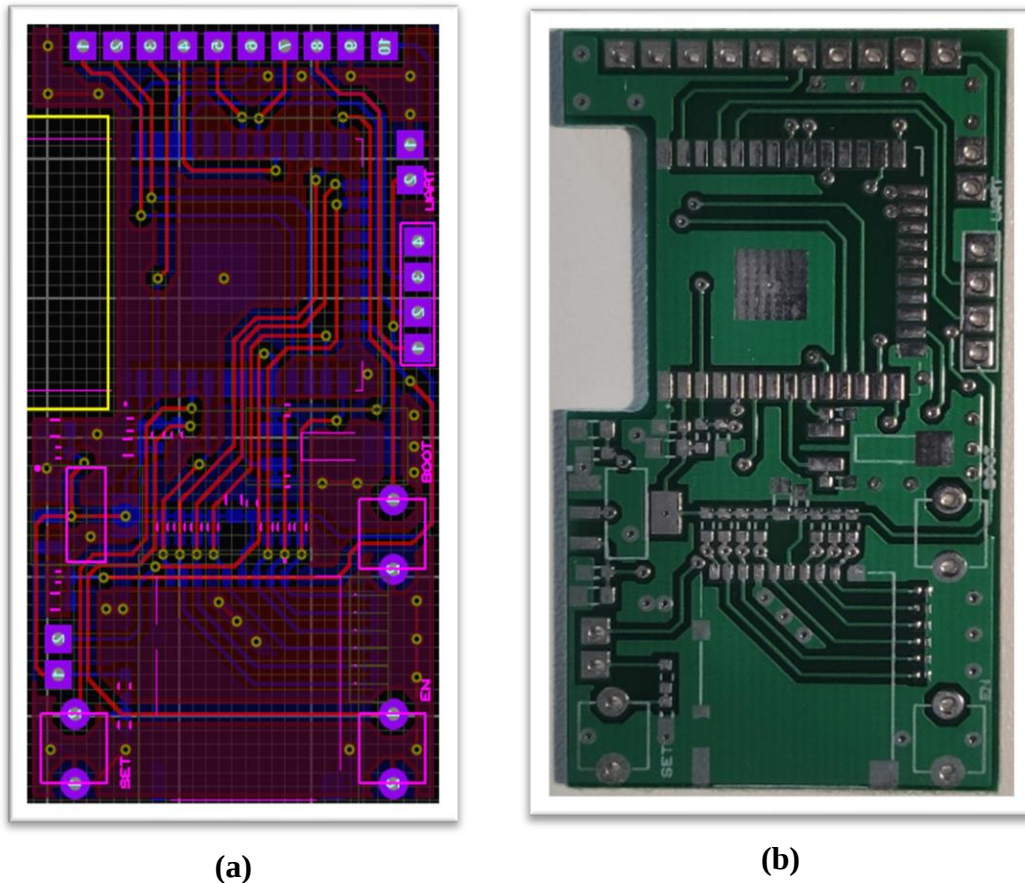
Figura 17 - Diagrama eletrônico do circuito de processamento e comunicação.



Fonte: Do autor.

Na Figura 18-a, pode ser observado o *layout* desenvolvido para a placa de processamento e comunicação; enquanto que, na Figura 18-b, pode-se ver a placa produzida a partir do respectivo circuito.

Figura 18 - Demonstrativo do (a) *layout* e da (b) da placa de processamento e comunicação produzida.

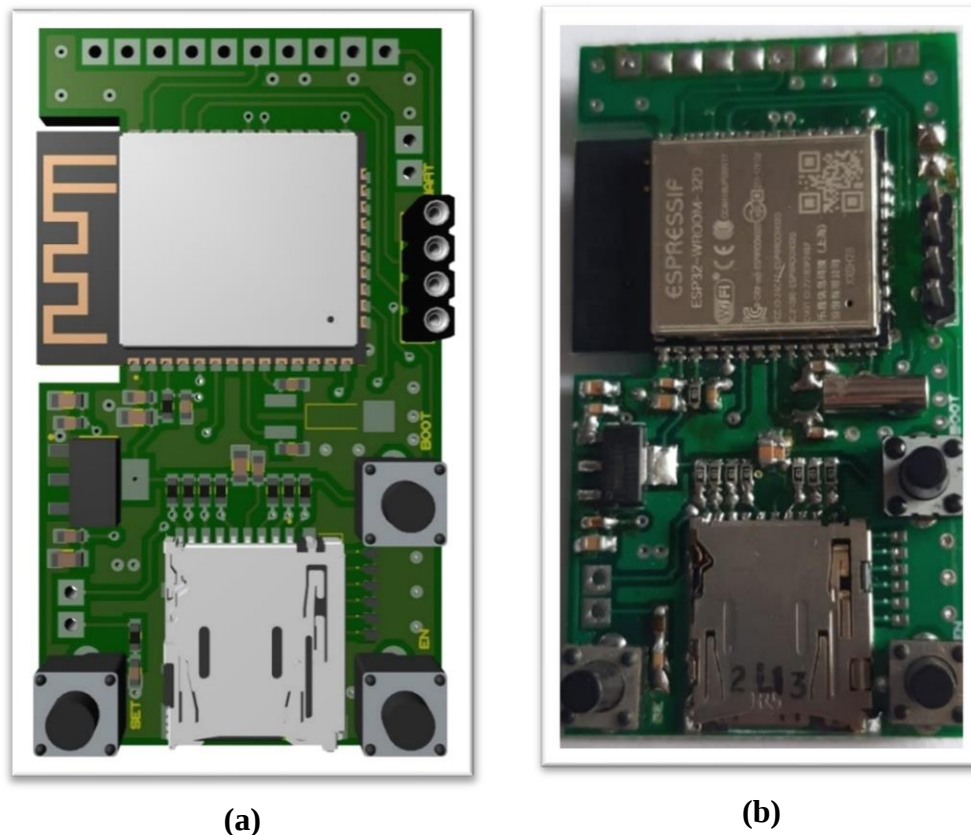


Fonte: Do autor.

O *layout* foi desenvolvido em dupla face com os componentes alocados em face única, esta prática foi selecionada por agilizar o processo produtivo em escala através de máquinas de *pick and place* SMD e também por já proporcionar uma compactação razoável da área de placa. O recorte na parte metálica da placa e o posicionamento da antena do circuito de comunicação foram desenvolvidos observando as recomendações do fabricante do chip.

Na Figura 19-a, pode ser observada a visualização 3D gerada a partir do *layout* desenvolvido para a placa de processamento; enquanto que, na Figura 18-b, pode-se ver a montagem a partir do respectivo circuito. Como qualquer circuito de comunicação, a regulação da tensão de alimentação está bem próxima do ponto de alimentação do chip, conferindo robustez e imunidade a ruídos.

Figura 19 - Demonstrativo da (a) visualização 3D e da (b) montagem da placa do circuito de isolamento.



Fonte: Do autor

4.1.4 Fonte de alimentação

Devido à necessidade de compactação e de operar de forma automática em 110V ou 220V a fonte projetada foi uma fonte chaveada Flyback isolado. A fonte usa como circuito de chaveamento o TNY268, um chip da Power com alta eficiência e potência de até 10W para a faixa de 85–265Vca dentro de um invólucro. O circuito de chaveamento possui proteções integradas contra sobrecorrente, sobretensão, sobre temperatura no CI de chaveamento e o *auto-restart* em caso de falha.

O isolamento do primário com o secundário é realizado pelo transformador e o circuito de *feedback* possui um opto-acoplador para manter a isolação. A regulação de tensão de saída usa como referência um diodo Zener de 3,9V e 1% de estabilidade, o que garante uma variação máxima da tensão de saída da fonte na ordem de 5%, valor aceitável visto que os principais Cis utilizados no protótipo são alimentados por conversores CC-CC isolados e com saída em 3,3V e 1% de tolerância. Como pode ser observado na Figura 20, a proteção de entrada da fonte é realizada por um varistor de 275V e um fusistor de 33Ω/2W, identificados como VR1 e R1.

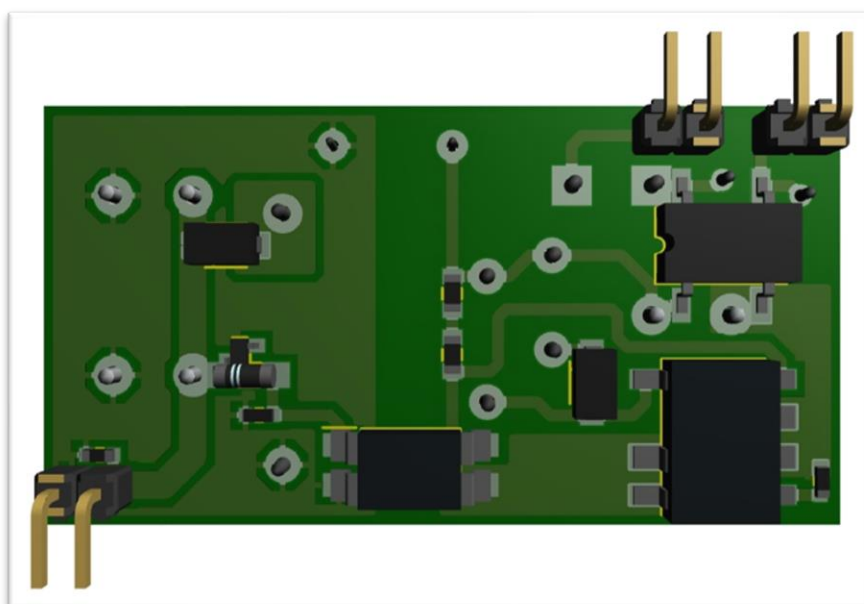
A retificação da tensão é realizada por uma ponte de diodos MB10S e o capacitor C1 realiza a estabilização da tensão no primário.

O capacitor C2 é um capacitor de *Bypass* externo para alimentação do CI gerada internamente e, os resistores R2 e R3 servem para detectar a subtensão na alimentação para possibilitar a proteção do CI de chaveamento.

O CI TNY268 identificado como U1 é habilitado pelo sinal no pino EN e realiza a comutação de potência do pino D. Essa comutação sobre o primário é controlada pelo sinal de *feedback* fornecido pelo opto acoplador identificado como U2, que realiza a leitura do sinal sobre o resistor R4 estabilizado pelo diodo Zener D7. A retificação do secundário é realizada pelo diodo D3 e os capacitores C4, C5 e C6 filtram e estabilizam a saída.

Diferentemente das demais placas do dispositivo, a placa fonte foi desenvolvida em face simples e, a visualização 3D está representada na Figura 21. A opção por montar essa placa em face simples deve-se ao fato de ter sido desenvolvida com componentes em *Pin Through Hole (PTH)* e *SMD*, cujo custo de produção é relativamente menor.

Figura 21 - Visualização 3D da placa fonte.

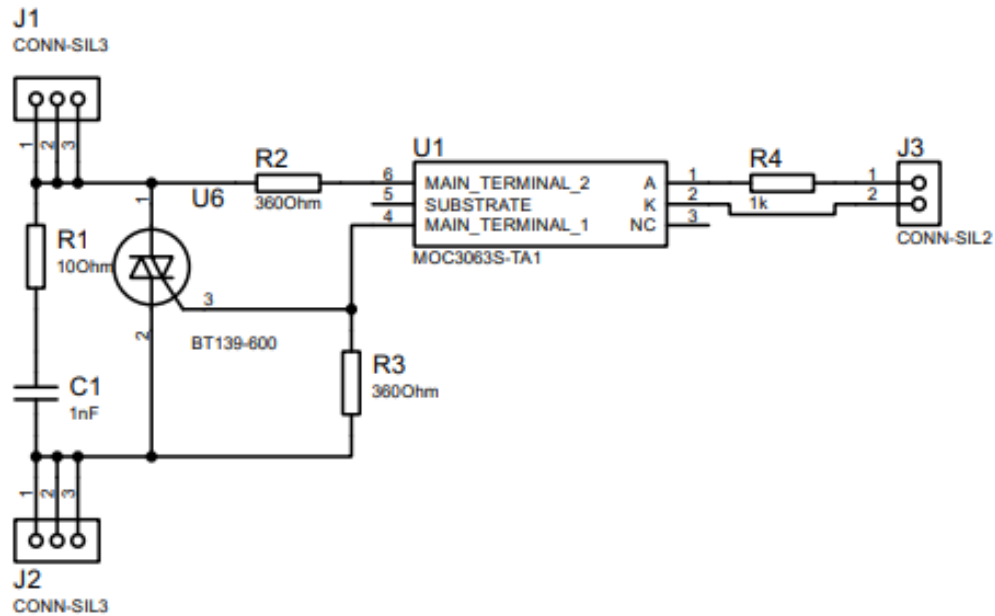


Fonte: Do autor.

4.1.5 Circuito de controle de carga

Para realização da interface entre o módulo microcontrolador ESP32 que opera em 3,3V e o dispositivo de acionamento eletrônico da carga, foi necessária a utilização de um opto acoplador com saída TRIAC e função *zero-cross*, conforme diagrama apresentado na Figura 22. Além de isolar galvanicamente a parte de potência da parte de processamento, o opto acoplador realiza o chaveamento da carga sempre na passagem por zero da rede elétrica, garantindo assim o menor nível de ruído e pico de corrente.

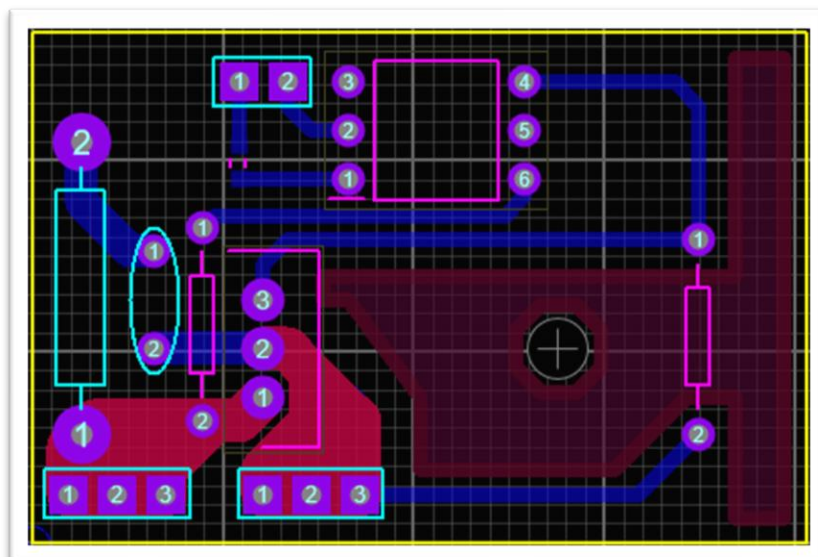
Figura 22 - Diagrama da placa de acionamento da carga.



Fonte: Do autor.

A placa comporta ainda um circuito *Snubber* para atenuação do ruído de chaveamento do TRIAC. Visando a redução do tamanho final do dispositivo, a carga conectada foi limitada à monofásica de até 240Vca e 10A. Dessa forma, a dissipação de calor do dispositivo de atuação da carga é realizada na área criada para dissipação junto ao *layout*, conforme Figura 23.

Figura 23 - *Layout* da placa de acionamento.



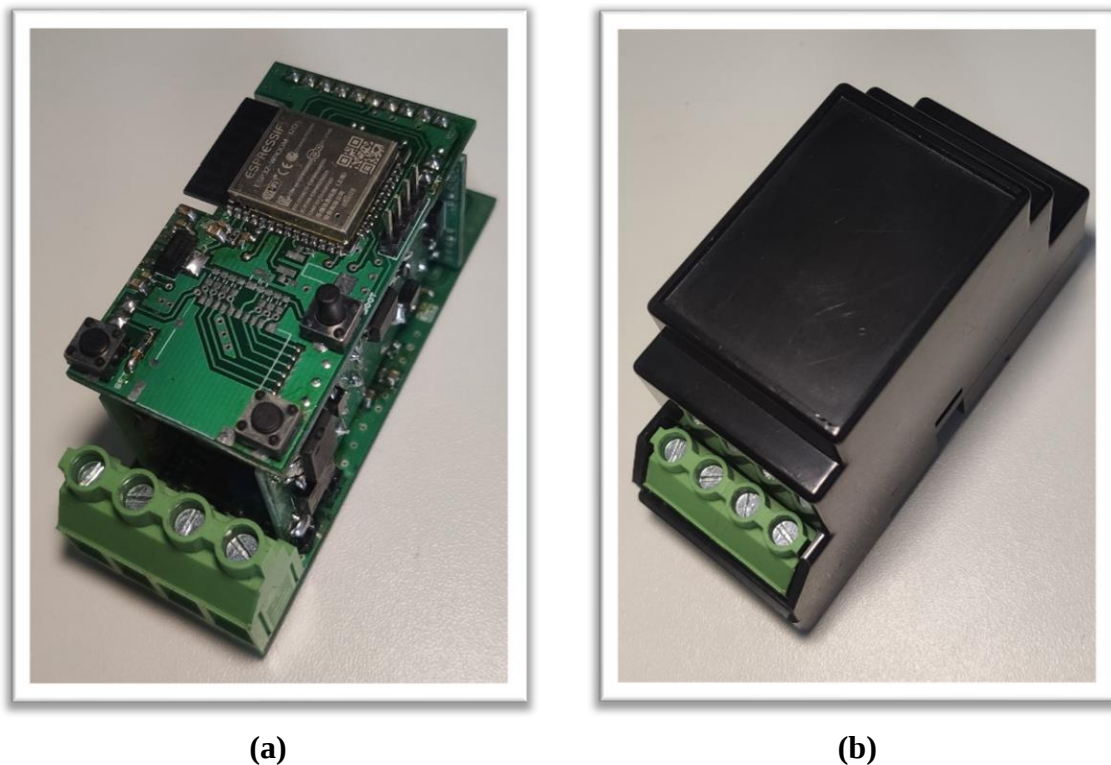
Fonte: Do autor.

4.1.6 Montagem do dispositivo

O dispositivo foi pensado para ser montado como uma caixa de dobradura, sendo a base a placa de medição, nas laterais as placas de acionamento, fonte de alimentação e isolamento e como tampa a placa de processamento e comunicação, desta forma foi possível otimizar o tamanho final do dispositivo sem perder as funcionalidades ou abrir mão da segurança e do isolamento entre a placa de medição e a placa de processamento.

Após a soldagem dos componentes em suas respectivas placas, as mesmas foram montadas umas nas outras resultando no dispositivo ilustrado pela Figura 24-a, que encaixou perfeitamente na embalagem selecionada para o medidor: uma caixa padrão para trilho DIN, a qual teve somente que ser aberta em uma das laterais para passagem dos bornes da placa de medição, conforme Figura 24-b.

Figura 24 - (a) Dispositivo com a eletrônica montada (b) Dispositivo.



Fonte: Do autor.

4.1.7 Firmware

O *firmware* embarcado no microcontrolador é capaz de realizar, além da configuração do chip medidor de energia, a leitura de todas as grandezas elétricas disponíveis nos registradores, realizar o procedimento de autocalibração do dispositivo e comunicar-se por rede de Internet sem fio

para disponibilizar os dados mensurados e possibilitar o controle de acionamento da carga ao dispositivo conectada.

As configurações do ADE9153A durante a inicialização do sistema permitem a tradução dos valores de registro em códigos em valores reais. Esta tradução é realizada através de equações de multiplicação dos valores lidos nos registradores, pelas constantes de conversão alvo, como por exemplo, o valor de I_{rms} apontado pela Equação 1.

$$I_{rms} = AIRMS \times TARGET_AICC \quad (1),$$

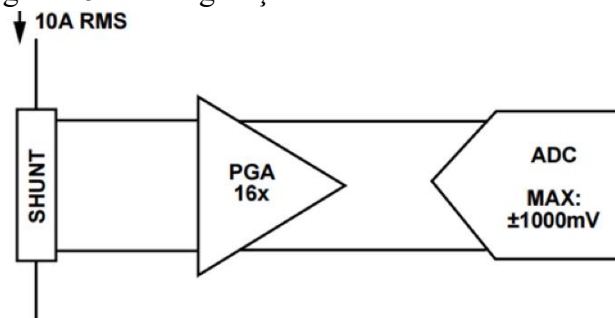
onde I_{rms} é o valor medido de corrente RMS, AIRMS é o valor lido no registrador que armazena o resultado da metrologia de cálculo de corrente e TARGET_AICC é a constante de conversão alvo obtida no projeto do dispositivo. Da mesma forma, são obtidos os valores de tensão e potências.

Durante a inicialização, os registros importantes devem ser configurados ou inicializados primeiro, antes que o sistema com ADE9153A opere. As configurações de registro são comuns a cada dispositivo de medição de energia ADE9153A, incluindo os limites, modos e requisitos de arquitetura, como o valor do resistor shunt e do divisor resistivo.

Existem também algumas configurações de registro que devem ser exclusivas para um único dispositivo de medição de energia, ADE9153A, como os registros xxGAIN e os registros MS_xxCC_USER. Os valores desses registros são obtidos com o processo de autocalibração, que possui duas fases. A fase de arquitetura, que ajuda a selecionar valores de componentes para as configurações de design e a fase de fluxo de produção, que é realizada em cada dispositivo fabricado usando o ADE9153A.

Na fase de arquitetura e seguindo a recomendação do fabricante, conforme a Figura 25, de usar o ganho de dezesseis vezes no *Programmable Gain Amplifier* (PGA) do canal A, multiplicador onde se conecta o sensor de corrente, para obter o desempenho ideal. É necessário calcular um valor entre a corrente máxima a ser medida, IMAX, e a faixa de entrada analógica em escala real do conversor analógico-digital (ADC) para permitir espaço para sobrecorrente.

Figura 25 - Configuração do canal de leitura do shunt.



Fonte: Adaptado de (ANALOG DEVICES, [s.d.])

O *shunt* utilizado no protótipo é de $0,5m\Omega$, portanto o pico do sinal de entrada, considerando a Lei de Ohm e a corrente máxima de 10A, é de 7,07mV com o ganho de dezesseis vezes aplicado pelo PGA obtém-se 113,12mV na entrada do ADC. Este valor de sensor foi selecionado prevendo a ampliação da faixa de leitura para 20A, sem a necessidade de alteração da parametrização ou da placa do circuito de medição.

Dando sequência ao processo de autocalibração conforme o roteiro disponibilizado pela *Analog Devices* no *datasheet* do componente, é necessário calcular o valor de $AI_{HEADROOM}$ através da Equação 2.

$$R_{SHUNT} = \frac{\frac{\pm 1V}{AI_{PGAGAIN}}}{AI_{HEADROOM} \times I_{MAX} \times \sqrt{2}} \quad (2)$$

Logo:

$$AI_{HEADROOM} = \frac{\frac{\pm 1V}{16}}{0,0005 \times 10 \times \sqrt{2}}$$

$$AI_{HEADROOM} = 8,83884$$

No canal de tensão, os resistores divisores de potencial foram selecionados para controlar a tensão nos pinos VAP e VAN. Mantendo a mesma para a metade da escala de entrada do conversor, garantindo assim a possibilidade de realizar a leitura em caso de sobretensão. Vale destacar aqui que diferentemente do canal A de corrente, o ganho do canal de leitura de tensão é sempre igual a um, isso evita erros de deslocamento de fase, gerando confiabilidade nos cálculos de potência reativa. Definidos os resistores é realizado o cálculo de $V_{HEADROOM}$ pela Equação 3:

$$R_{BIG} = \left(\frac{V_{NON} \times V_{HEADROOM} \times \sqrt{2}}{\pm 0,5V} - 1 \right) \times R_{SMALL} \quad (3)$$

Logo:

$$V_{HEADROOM} = \left(\frac{R_{BIG}}{R_{SMALL}} + 1 \right) \times \frac{\pm 0,5V}{V_{NON} \times \sqrt{2}}$$

$$V_{HEADROOM} = \left(\frac{996}{1} + 1 \right) \times \frac{\pm 0,5V}{240 \times \sqrt{2}}$$

$$V_{HEADROOM} = 1,46871971$$

A configuração da medição de potência reativa é baseada no valor nominal do canal de tensão, que pode ser calculado com a equação 4.

$$VLEVEL = VHR_ROUND OFF \times 1144084 \quad (4),$$

onde VLEVEL é o valor do registro no ADE9153A, e VHR_ROUND OFF é a margem da faixa dinâmica do sinal de entrada nominal, ou seja, $V_{HEADROOM}$ em relação à escala total, arredondada para o número inteiro mais próximo. Para este protótipo, o valor de $V_{HEADROOM}$ é 1,47. O número inteiro mais próximo, 2 é o valor VHR_ROUND OFF. Estes valores obtidos são essenciais para definir no *software* as constantes de conversão alvo que são utilizadas no processo de autocalibração.

Dois tipos de constantes de conversão foram usados: (i) a constante de conversão alvo, que é idêntica para todos os dispositivos de um determinado projeto, e (ii) a constante de conversão *mSure*, que varia de dispositivo para dispositivo. A definição das constantes de conversão alvo de corrente e tensão requer a utilização dos valores calculados nas equações 2 e 3 e fornece as relações nA/code e nV/code através das Equações 5 e 6.

$$TARGET_AICC = \frac{I_{MAX} \times A_{HEADROOM}}{52725703} \quad (5)$$

$$TARGET_AVCC = \frac{V_{NOM} \times V_{HEADROOM}}{26362852} \quad (6)$$

Logo,

$$TARGET_AICC = 1676,38163nA/code$$

e,

$$TARGET_AVCC = 13370,8117nV/code$$

As constantes de conversão alvo para potência ativa (TARGET_WCC), potência reativa (TARGET_VARCC) e potência aparente (TARGET_VACC) foram calculadas com a Equação 7. Utilizou-se os valores TARGET_AICC e TARGET_AVCC encontrados e o registro APGAIN. Este último foi usado para modificar a constante de conversão das potências (ativa, reativa e aparente) e o valor de TARGET_WCC, TARGET_VARCC e TARGET_VACC, que são iguais.

$$TARGET_WCC = TARGET_AICC \times TARGET_AVCC \times \left(1 + \frac{APGAIN}{2^{27}}\right) \quad (7)$$

Logo,

$$TARGET_WCC = 3008,43439\mu W/code$$

Após estes cálculos, as constantes para AWATTHR_HI, AFVARHR_HI, e os registros AVAHR_HI foram calculados com base no valor do TARGET_WCC obtendo a constante de conversão alvo do valor da potência ativa (TARGET_WHCC) com a Equação 8.

$$TARGET_WHCC = \frac{TARGET_WCC \times 2^{13}}{3600 \times 4000} \quad (8)$$

Logo,

$$TARGET_WHCC = 1711,4649 \text{ nWh/code}$$

$$TARGET_VARHCC = 1711,4649 \text{ nVARh/code}$$

$$TARGET_VAHCC = 1711,4649 \text{ nVAh/code}$$

Após este passo, bastou realizar a configuração dos registradores e rodar o processo de autocalibração para obter as constantes de conversão *mSure* e o valor de ganho para corrente e tensão que todos os dispositivos com a mesma constante de conversão, leram o mesmo IRMS, VRMS, e valores de potência quando conectados com a mesma fonte de alimentação e carga.

O processo de autocalibração consiste em iniciar os registradores dos canais de leitura de corrente e tensão para que o sistema *mSure* realize os cálculos de convergência para obtenção das constantes de conversão *mSure* de cada canal. Este processo de medição direta do sinal não requer um medidor de referência, o único requisito é que o dispositivo esteja acionado e, o conjunto de recursos de metrologia avançada WATT, VAR, VA, Wh, VARh e VAh atenderá aos padrões de energia ativa IEC 62053-21; IEC 62053-22; EN50470-3; OIML R46; e ANSI C12.20. Assim como os padrões IEC 62053-23 e IEC 62053-24 para energia reativa e medição RMS de corrente e tensão garantindo Classe 1 de medição em todas as grandezas.

O *firmware* foi desenvolvido utilizando a plataforma *open-source Arduino*, devido ao grande número de bibliotecas disponíveis e a agilidade de desenvolvimento. Para comunicação com o ADE9153A foi utilizada a biblioteca disponibilizada junto com a placa de avaliação EV-ADE9153ASHIELDZ adquirida, o que possibilitou a redução do tempo de desenvolvimento consideravelmente.

O gerenciamento da rede sem foi realizado utilizando as bibliotecas nativas para o ESP32 e a comunicação com o servidor com a plataforma IoT instalada foi realizada através do protocolo MQTT, com as bibliotecas também disponibilizadas diretamente no gerenciador de bibliotecas do Arduino.

4.2 DASHBOARD

Nesta seção, são apresentadas a descrição das funcionalidades da plataforma de gerenciamento online, assim como a *dashboard* desenvolvida. As funcionalidades que necessitam edição na plataforma consistem em (i) gerenciamento de dispositivos e (ii) gerenciamento de clientes. A *dashboard*, por sua vez, possibilita (iii) configuração do monitoramento e, (iv) visualizar individualmente as grandezas monitoradas.

O sistema de gerenciamento da plataforma *ThingsBoard.io* configurado em uma instância de máquina virtual no *Google Cloud* possibilita o cadastro dos dispositivos com os quais se comunicará, de forma que cada dispositivo cadastrado seja acessado individualmente para leitura dos dados mensurados, além de permitir o controle da carga conectada ao respectivo dispositivo. Para realizar o gerenciamento o acesso ao servidor é utilizado o domínio ou endereço de IP. Basta fazer o *login* e a página inicial é aberta, conforme a Figura 26.

Figura 26 - Página inicial da plataforma de gerenciamento.

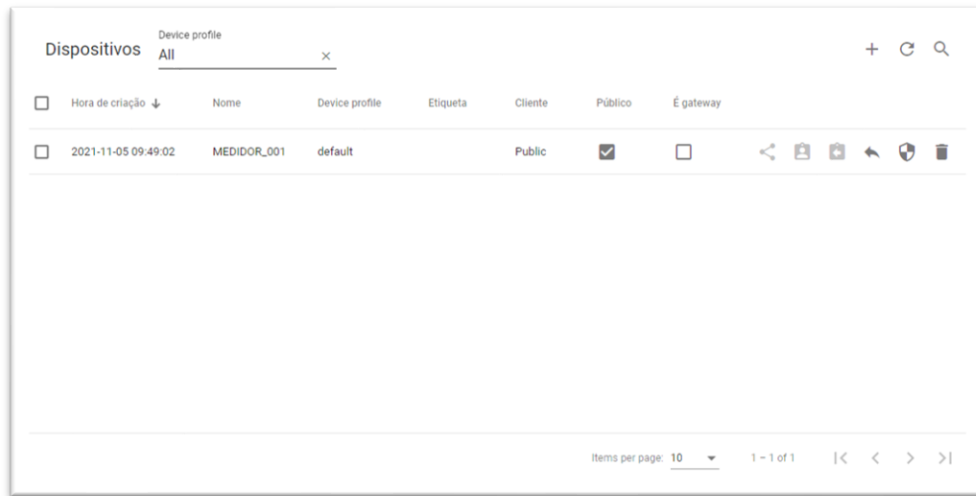


Fonte: Do autor.

4.2.1 Gerenciamento de dispositivos

Para facilitar o gerenciamento dos dispositivos e o controle escalar da plataforma é possível cadastrar os dispositivos a qualquer momento por meio do acesso ao menu de configurações da plataforma. Conforme a Figura 27, a adição do novo dispositivo é bem simplificada, bastando apenas clicar em adicionar e informar um nome para o dispositivo, que o sistema gera automaticamente um *token* de segurança para sua autenticação.

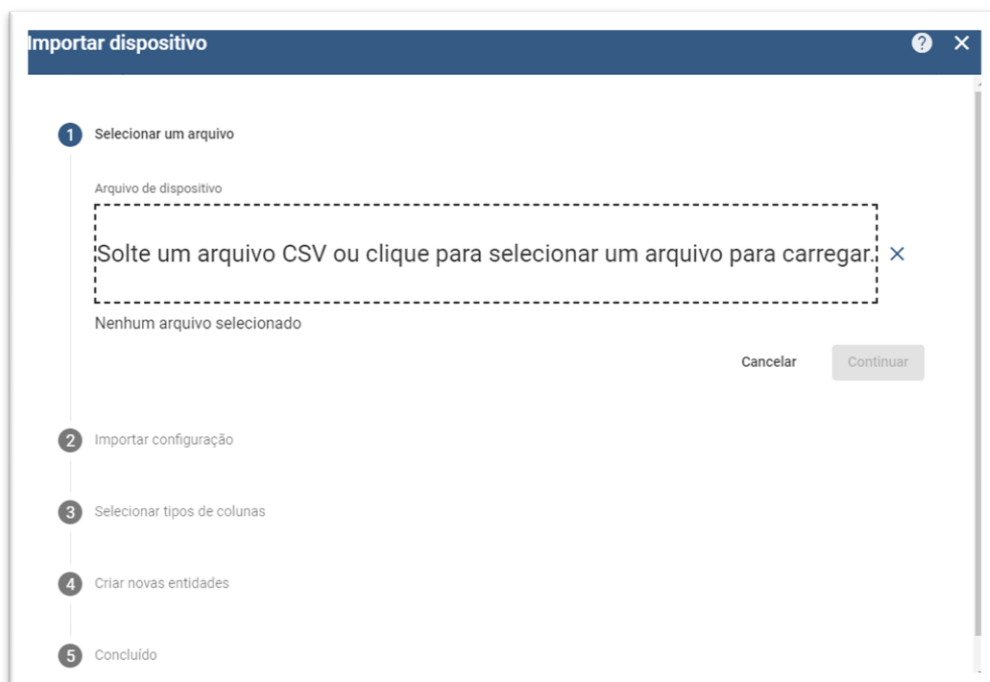
Figura 27 - Aba de adição de dispositivos.



Fonte: Do autor.

De acordo com a necessidade da aplicação, é possível desmembrar o cadastro de dispositivos em *profiles* criando regras de acesso. É possível também importar uma lista de dispositivos através de um arquivo .csv para realização do cadastro em massa, tal como apresentado na Figura 28.

Figura 28 - Aba de importação do cadastro de dispositivos.



Fonte: Do autor.

Dentro do gerenciamento de dispositivos, ainda existe a opção de realizar o controle de versão do *firmware* instalado e realizar a atualização de forma remota, porém esta função não foi implementada até o momento.

4.2.2 Gerenciamento de clientes

De acordo com a aplicação desejada do dispositivo, o gerenciamento de clientes pode ser executado e configurado de forma que a *dashboard* seja acessível de qualquer computador ou *smartphone* com acesso a Internet, existindo a opção de tornar a *dashboard* pública ou privada. Caso seja privada, faz-se necessário o cadastro do cliente do sistema e o seu devido nível de permissões, conforme a Figura 29.

Figura 29 - Aba de gerenciamento de clientes.

☐	Hora de criação ↓	Título	E-mail	País	Cidade	
☐	2021-10-26 14:58:19	Public				
☐	2021-10-23 17:36:52	Customer C				
☐	2021-10-23 17:36:52	Customer B				
☐	2021-10-23 17:36:51	Customer A				

Items per page: 10 1 - 4 of 4 |< < > >|

Fonte: Do autor.

Dentro do gerenciamento de clientes, é possível cadastrar o *login* e a senha para acesso ao sistema, vincular os dispositivos cadastrados que o cliente tem acesso e a *dashboard* disponível para o mesmo. Dessa forma, é possível limitar o nível de acesso e controle de cada usuário. Um exemplo seria personalizar a *dashboard* para ser somente de monitoramento, impossibilitando determinado usuário de realizar o desligamento da carga conectada ao dispositivo.

4.2.3 Configuração do monitoramento

Após o cadastro do dispositivo e do cliente com as devidas permissões, o mesmo está apto a alimentar os dados de telemetria para *dashboard*, que é ilustrada pela Figura 30, dando início ao processo de monitoramento e controle da carga. Na barra de identificação, estão as opções comuns a todos os widgets, tais como dispositivo de origem das medições, janela de tempo e opção de tela cheia. Na sequência, constam os *widgets* de (i) controle, (ii) tensão RMS, (ii) corrente RMS, (iv)

frequência, (v) temperatura da placa de medição, (vi) fator de potência (FP), (vii) potências ativa e reativa e, os gráficos de (viii) medições de consumo de energia elétrica, (ix) tensão RMS e, (x) corrente RMS.

Os *widgets* são dinâmicos e ajustam-se automaticamente ao tamanho da tela utilizada, ordenando-se de acordo com a configuração realizada, seja em um *desktop*, *notebook*, *tablet* ou *smartphone*. Para visualização de todos os *widgets*, basta utilizar a barra de rolagem.

Figura 30 - Dashboard EAS METER.



Fonte: Do autor.

A opção de janela de tempo possui as opções de configuração da amostragem em tempo real e do histórico que pode ser exportado em arquivo .csv, assim como do intervalo de atualização e agrupamento, conforme a Figura 31.

Figura 31 - Aba de configuração do monitoramento.

Tempo real Histórico

☒ Última
Última
1 minute Avançado

☐ Interval
Função de agregação de dados
Média

Intervalo de agrupamento
1 second Avançado

Fuso horário
Browser Time (UTC-03:00) x

Cancelar Atualizar

Fonte: Do autor.

No caso de acesso à *dashboard* através de um *smartphone*, a única diferença em relação ao acesso pelo computador está na visualização dos *widgets*, que em um computador são apresentados um ao lado do outro e, no *smartphone* ficam em sequência, um abaixo do outro, conforme a Figura 32.

Figura 32 - Demonstrativo da *dashboard* em *smartphone*.

Fonte: Do autor.

4.3 CONSIDERAÇÕES

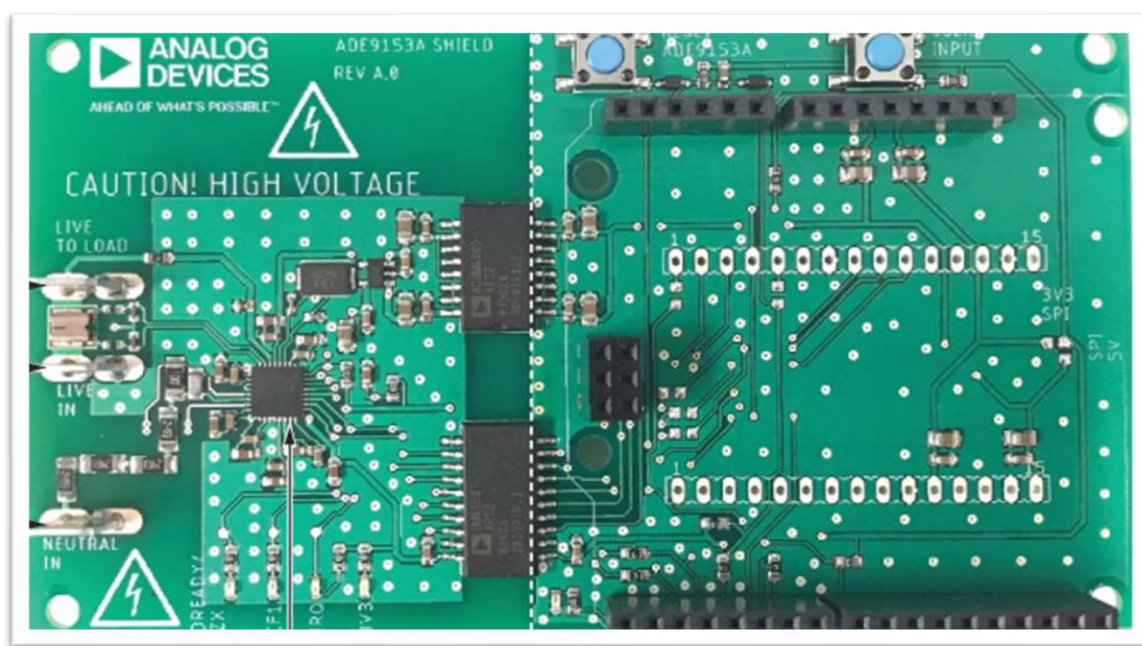
Neste capítulo, apresentou-se a evolução do desenvolvimento do *hardware* para a solução, assim como as funcionalidades do *software* para o sistema embarcado, além das funcionalidades do sistema de gerenciamento e da *dashboard*. No próximo capítulo, serão apresentados os resultados obtidos com a validação dos desenvolvimentos citados até o momento e, posteriormente, as conclusões e trabalhos futuros a serem realizados.

5 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com a validação do protótipo desenvolvido, assim como os resultados das medições com o equipamento e dos testes em laboratório.

Para validar as funcionalidades do protótipo, foi adquirida a placa de avaliação que o fabricante dispõe, mostrada na Figura 33. A EV-ADE9153ASHIELDZ é compatível com o *Arduino* UNO, o *Arduino* Zero e o ESP8266, devido a disponibilidade o *Arduino* UNO foi utilizado na validação das leituras. Possui um resistor *shunt* integrado para medição de corrente, semelhante ao protótipo desenvolvido, permitindo validação rápida do sistema de medição de energia. O fabricante disponibiliza a biblioteca com os arquivos de comunicação e os exemplos de aplicação para simplificar a implementação do sistema. Usando a calibração automática *mSure®*, a placa de avaliação pode ser autocalibrada e o fabricante garante medir energia com 1% de precisão na faixa dinâmica, sem a necessidade de equipamentos de calibração.

Figura 33 - EV-ADE9153ASHIELDZ.



Fonte: Adaptado de (ANALOG DEVICES, [s.d.])

Visto que o fabricante fornece a biblioteca de comunicação com o *Arduino* UNO e que a placa de avaliação é compatível com o mesmo, a validação do protótipo foi realizada comparando-se os resultados obtidos com a leitura da placa de avaliação. Desta forma, foram realizados os testes de comparação das leituras obtidas com a placa de avaliação e as leituras do protótipo já autocalibrado quando aplicados os mesmos níveis de carga. A ordem de validação das grandezas foi: (i) tensão RMS, (ii) corrente RMS, (iii) frequência, (iv) potências ativa, reativa e o FP e, (v) consumo de energia

ativa e reativa. Por fim, validou-se o dispositivo no caso de instalação real de uso e se apresentou o levantamento de custos para produção.

5.1 VALIDAÇÃO DAS LEITURAS DE TENSÃO RMS

Para realização dos testes de medição de tensão, foi utilizado um regulador de tensão monofásico com saída proporcional de até 260Vac. Devido ao intervalo de operação da fonte chaveada desenvolvida, a medição de tensão ocorreu de 90 à 250Vca, isso para garantir a integridade do dispositivo que possui um varistor de 275Vac para proteção de entrada do circuito. Na Tabela 7, constam os valores das dez leituras realizadas dentro do intervalo de operação do dispositivo.

Tabela 7 - Demonstrativo da validação da leitura de tensão eficaz.

Número da medição	Variac [V]	EVAL [V]	EASMETER [V]	ERRO [%]
1	90,0	89,9	90,0	-0,11
2	100,0	100,0	100,1	-0,10
3	110,0	109,9	110,0	-0,09
4	120,0	119,9	120,0	-0,08
5	130,0	130,1	130,0	0,08
6	190,0	189,9	190,0	-0,05
7	200,0	200,1	200,1	0,00
8	220,0	220,1	220,0	0,05
9	240,0	239,9	240,0	-0,04
10	250,0	249,9	249,8	0,04

Fonte: Do autor.

O ajuste de tensão do regulador de tensão monofásico foi aferido com um alicate amperímetro da UNI-T modelo UT210E PRO que possui 1% de exatidão no intervalo medido e como pode ser observado o maior erro foi de 0,2V, praticamente no fundo de escala, atribuindo, portanto, um erro de 0,08%. Enfim, essa é a característica de estabilidade do divisor resistivo de precisão.

5.2 VALIDAÇÃO DAS LEITURAS DE CORRENTE RMS

Para realização dos testes de medição de corrente, foram utilizados um aquecedor halógeno de ambiente, um secador de cabelos e uma grelha elétrica como carga. O aquecedor utilizado possui dois estágios de aquecimento e as cargas foram combinadas para cobrir o intervalo de operação de 0 a 10A de corrente no dispositivo. Na Tabela 8, apresenta-se os valores obtidos e é possível observar que assim como nas medições de tensão a diferença entre as medições é mínima, sendo a máxima discrepância entre os valores de 0,01A, ou seja 0,1% no fundo de escala.

Durante a execução deste teste, foi possível identificar uma deficiência de dissipação de calor no triac responsável pelo acionamento da carga. Após uma hora de operação com a carga máxima disponível, o triac estava a 72°C, temperatura muito acima do desejável para operação em regime permanente conforme indicado pelo fabricante. Para resolver esse detalhe o modelo do TRIAC utilizado foi substituído por um com capacidade de condução de corrente e encapsulamento maior. A placa de acionamento deve passar por uma atualização, de forma a aumentar a área de dissipação através da própria placa com dupla-face cobreada e furos metalizados.

Tabela 8 - Demonstrativo da validação da leitura de corrente elétrica.

CARGA	UT210E PRO	EVAL [A]	EASMETER [A]	ERRO [%]
1	1,09	1,10	1,09	0,91
2	2,15	2,15	2,14	0,47
3	4,29	4,29	4,28	0,23
4	6,45	6,45	6,44	0,16
5	8,58	8,59	8,58	0,12
6	10,64	10,63	10,64	0,00

Fonte: Do autor.

Durante a execução deste teste, determinou-se o ajuste do acionamento da proteção por sobrecorrente, como o dispositivo deve trabalhar com até 10A, caso a leitura realizada ultrapasse o valor configurado como limite de sobrecorrente, a carga é desligada no próximo ciclo de medição. A validação dessa proteção foi realizada com os dados obtidos pelo terminal de depuração utilizado durante os testes e, estão demonstrados na Tabela 9. Verificasse que no ciclo de medição posterior a identificação da sobrecorrente, o dispositivo realizou o corte da carga.

Tabela 9 - Validação do tempo de acionamento da proteção de sobrecorrente.

TEMPO	Corrente RMS [A]
18:57:39.198	6,71
18:57:40.183	10,64
18:57:41.166	1,41
18:57:42.188	0,05
18:57:43.215	0,00

Fonte: Do autor.

5.3 VALIDAÇÃO DAS LEITURAS DE FREQUÊNCIA

A medição de frequência considera o período do sinal de tensão que possui seu valor disponível no registro APERIOD do CI de medição de energia. Se o valor do período calculado estiver fora da faixa, ou seja, não estiver entre 40 Hz e 70 Hz, ou se não forem detectados cruzamentos de zero no sinal de tensão, o registro APERIOD é forçado a corresponder a 50 Hz ou 60 Hz, dependendo do bit SELFREQ no registro ACCMODE e, essa falha é observada por meio da interrupção gerada pelo estouro do *timeout* do registrador de passagem por zero.

Na aplicação utilizada o sistema opera em 60 Hz, e o cálculo da frequência é realizado pela Equação 9.

$$f = \frac{4000 \times 2^{16}}{APERIOD+1} [Hz] \quad (9)$$

A validação das leituras de frequência deu-se com a comparação do valor mostrado na dashboard sendo acessada por um celular, com o valor indicado pelo alicate amperímetro, não foi possível validar a precisão da medição em toda faixa de leitura devido à falta de um dispositivo capaz de realizar a variação da frequência, entretanto como pode ser observado na Figura 34, o valor é idêntico ao mensurado pelo amperímetro e acompanha as variações de forma dinâmica.

Figura 34 - Dashboard mobile (a) e alicate amperímetro (b).



(a)



(b)

Fonte: Do autor.

5.4 VALIDAÇÃO DAS LEITURAS DE POTÊNCIAS ATIVA, REATIVA E DO FP

Para validação da potência ativa, foi utilizado como carga o aquecedor de ambiente dos testes de corrente elétrica e, realizada a comparação dos valores obtidos na dashboard, na Figura 35, com os valores lidos pela placa de avaliação.

Figura 35 - Dashboard com leituras de potência ativa.



Fonte: Do autor.

Como indicado na dashboard, se calcularmos o valor da potência ativa multiplicando os valores de tensão e corrente RMS, obtêm-se 898,33W, o que representa uma diferença de 0,17% em relação ao valor de potência ativa mensurado pelo protótipo. Quando comparado a placa de avaliação o percentual de erro reduz para 0,04% como pode ser observado na Tabela 8.

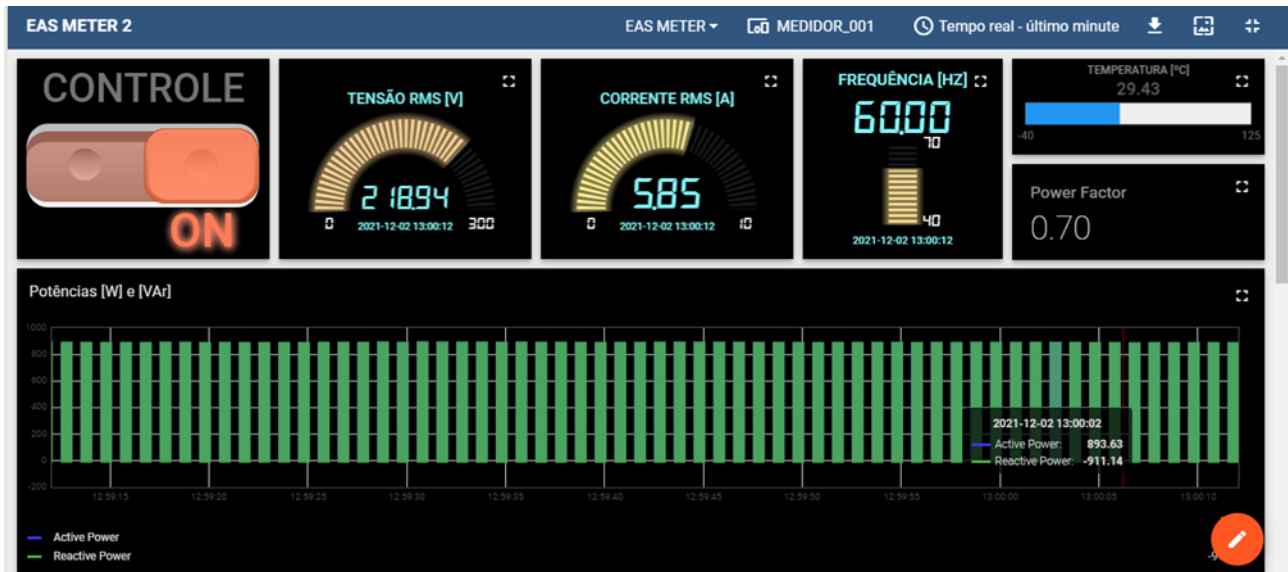
Tabela 10 - Comparação da medição de potência ativa.

EVAL [W]	EASMETER [W]	ERRO [%]
899,54	899,89	-0,04

Fonte: Do autor.

Para validação da potência reativa, foi utilizada como carga, além do aquecedor de ambiente dos testes de corrente elétrica, uma carga capacitiva utilizada em correção de fator de potência, e realizada a comparação dos valores obtidos na dashboard, Figura 36, com os valores lidos pela placa de avaliação apresentados na Tabela 11.

Figura 36 - Dashboard com leituras de potência reativa.



Fonte: Do autor.

Como pode ser observado o erro apresentado é de 0,02VAr, ou seja, erro percentual em relação à medição da placa de avaliação de 0,002%.

Tabela 11 - Demonstrativo da validação da leitura de potência reativa.

EVAL [VAr]	EASMETER [VAr]	ERRO [%]
-911,12	-911,14	0,002

Fonte: Do autor.

Na sequência, a carga capacitiva foi substituída por uma carga indutiva e foi possível realizar a validação também do fator de potência, que, como consequência da divisão da potência ativa pela potência aparente não apresentou erro devido a precisão das medidas anteriores já validadas.

Tabela 12 - Demonstrativo da validação da leitura de fator de potência.

CARGA	EVAL [FP]	EASMETER [FP]	ERRO [%]
INDUTIVA	0,44	0,44	0,00
RESISTIVA	1,00	1,00	0,00
CAPACITIVA	0,70	0,70	0,00

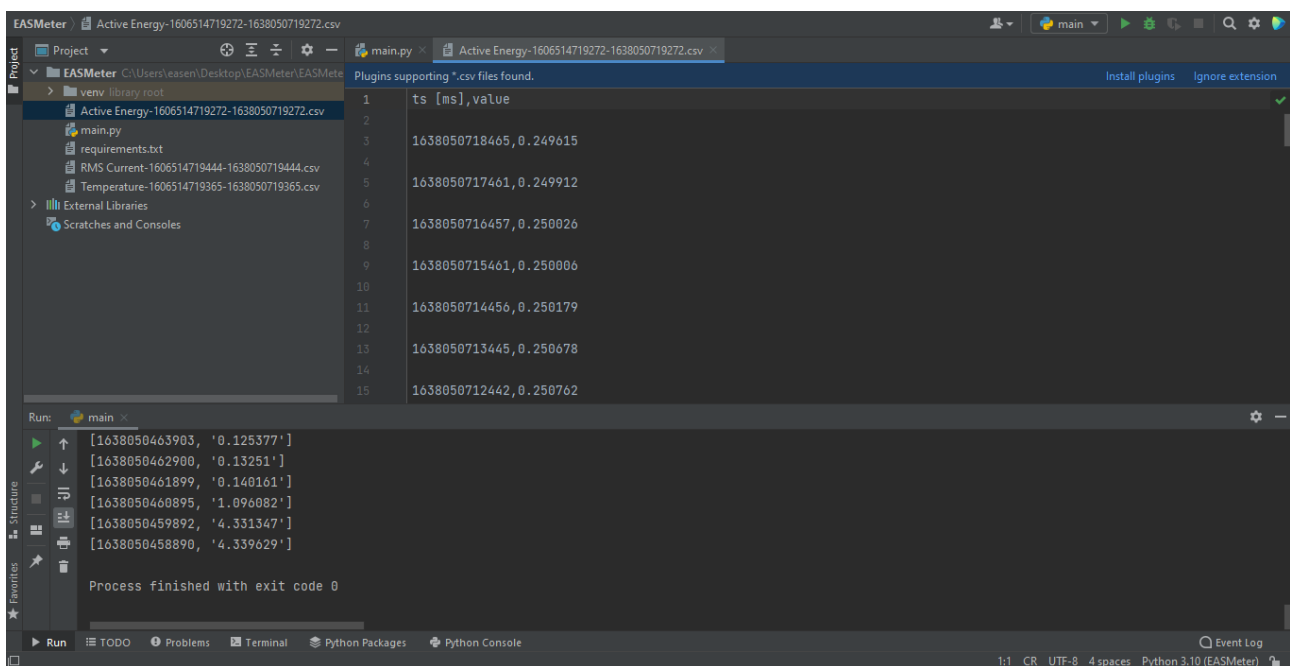
Fonte: Do autor.

5.5 VALIDAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ATIVA E REATIVA.

No mesmo teste, dando sequência à aferição das grandezas, foi realizada a integração das medidas de sessenta segundos de energia ativa e reativa, conforme exportação do banco de telemetria criado para *dashboard*. A exportação dos dados foi pensada para possibilitar a integração com sistemas comerciais. Deste modo, cada variável pôde ser solicitada através de comandos para o servidor que cria uma lista com o *timestamp* em milissegundos no formato *unix* e, o valor da grandeza solicitada, esta lista é disponibilizada em formato *.csv* por ser facilmente convertido para qualquer outro formato.

Para simular um *software* comercial foi desenvolvido um simples terminal em Python, ilustrado pela Figura 37, que faz a requisição ao servidor e grava o arquivo disponibilizado com os tempos de início e fim da telemetria.

Figura 37 - Terminal de *download*.



```

EASMeter / Active Energy-1606514719272-1638050719272.csv
Project
  EASMeter C:\Users\leasen\Desktop\EASMeter\EASMeter
    venv library root
    Active Energy-1606514719272-1638050719272.csv
    main.py
    requirements.txt
    RMS Current-1606514719444-1638050719444.csv
    Temperature-1606514719365-1638050719365.csv
  External Libraries
  Scratches and Consoles

Run: main.py
[1638050463903, '0.125377']
[1638050462900, '0.13251']
[1638050461899, '0.140161']
[1638050460895, '1.096082']
[1638050459892, '4.331347']
[1638050458890, '4.339629']
Process finished with exit code 0

Plugins supporting *.csv files found.
1 ts [ms], value
2
3 1638050718465,0.249615
4
5 1638050717461,0.249912
6
7 1638050716457,0.250026
8
9 1638050715461,0.250006
10
11 1638050714456,0.250179
12
13 1638050713445,0.250678
14
15 1638050712442,0.250762
  
```

Fonte: Do autor.

Após o download do arquivo, é necessário realizar a formatação dos dados de tempo e a substituição do ponto decimal por vírgula. Após a formatação, os dados são apresentados como demonstrado pela Tabela 13. Para adequar a visualização, algumas linhas da tabela foram suprimidas, porém, os valores foram integralizados do mesmo modo. Com a integração dos valores de energia ativa e reativa do protótipo e comparando com a integração apresentada pela placa de avaliação, observa-se o erro de 0,04% em ambas as grandezas.

Tabela 13 - Exemplo de dados disponibilizados no arquivo .csv.

Tempo	EVAL [kWh]	EAS METER [kWh]
19:15:00	0,249615	0,249526
19:15:01	0,249912	0,249823
19:15:02	0,250026	0,249937
19:15:03	0,250006	0,249917
19:15:04	0,250179	0,25009
19:15:05	0,250678	0,250589
19:15:06	0,250762	0,250673
19:15:07	0,250524	0,250435
19:15:08	0,250447	0,250358
19:15:09	0,25049	0,250401
19:15:31	0,25075	0,250661
19:15:32	0,250786	0,250697
19:15:33	0,250538	0,250449
19:15:34	0,250475	0,250386
19:15:35	0,250625	0,250536
19:15:36	0,250718	0,250629
19:15:37	0,25088	0,250791
19:15:38	0,251258	0,251169
19:15:39	0,250849	0,25076
19:15:40	0,250921	0,250832
19:15:41	0,250795	0,250706
19:15:42	0,250769	0,25068
19:15:43	0,250995	0,250906
19:15:44	0,250887	0,250798
19:15:45	0,250671	0,250582
19:15:46	0,250981	0,250892
19:15:47	0,251017	0,250928
19:15:48	0,250938	0,250849
19:15:49	0,250581	0,250492
19:15:50	0,250266	0,250177
19:15:51	0,250475	0,250386
19:15:52	0,250634	0,250545
19:15:53	0,25075	0,250661
19:15:54	0,250735	0,250646
19:15:55	0,250772	0,250683
19:15:56	0,250683	0,250594
19:15:57	0,250889	0,250800
19:15:58	0,250783	0,250694
19:15:59	0,250894	0,250805
Somatório	15,02978	15,02444

Fonte: Do autor.

5.6 VALIDAÇÃO DO DISPOSITIVO EM UMA INSTALAÇÃO REAL

Após a validação individual das grandezas e com o protótipo apresentando as leituras dentro do esperado em laboratório, o mesmo foi instalado num quadro de distribuição aparente de uma residência, conforme Figura 38. A iluminação externa da residência foi dividida em dois circuitos e, adicionada aos protótipos para ser controlada e monitorada pelos dispositivos.

O circuito um controla três refletores de iluminação do jardim frontal, cada refletor com potência de 50W e, o circuito dois controla a iluminação do pátio, composto por quatro lâmpadas LED de 14W e dois refletores de 50W. Dessa forma é possível realizar as leituras das grandezas de cada circuito assim como a ativação e o desligamento das cargas através da internet.

Figura 38 - Instalação em campo.



Fonte: Do autor.

Com o sistema integrado e operando continuamente, foi possível utilizá-lo para realizar a gestão de cargas em operação, assim como o levantamento de dados em campo de forma automatizada e precisa. Desta forma e com a integração aos *softwares* comerciais já existentes, a análise e

proposição automática de ações de eficiência energética para os vários usos finais e a emissão de relatórios de diversos tipos ficaram simplificadas.

Para demonstrar as possibilidades de acompanhamento de variações de carga, uma simulação foi realizada e o acompanhamento efetuado utilizando *dashboard*. O passo a passo das variações de cargas pode ser visto nas Figura 39 à Figura 43. Na situação um, o dispositivo encontrava-se alimentado e com a carga desligada, como pode ser observada na Figura 39. O controle está em OFF e a *dashboard* indica somente o valor da tensão RMS, da frequência e da temperatura. Existe, nas leituras de potência, um ruído muito próximo de zero que não é contabilizado como consumo, conforme indicado pelo gráfico.

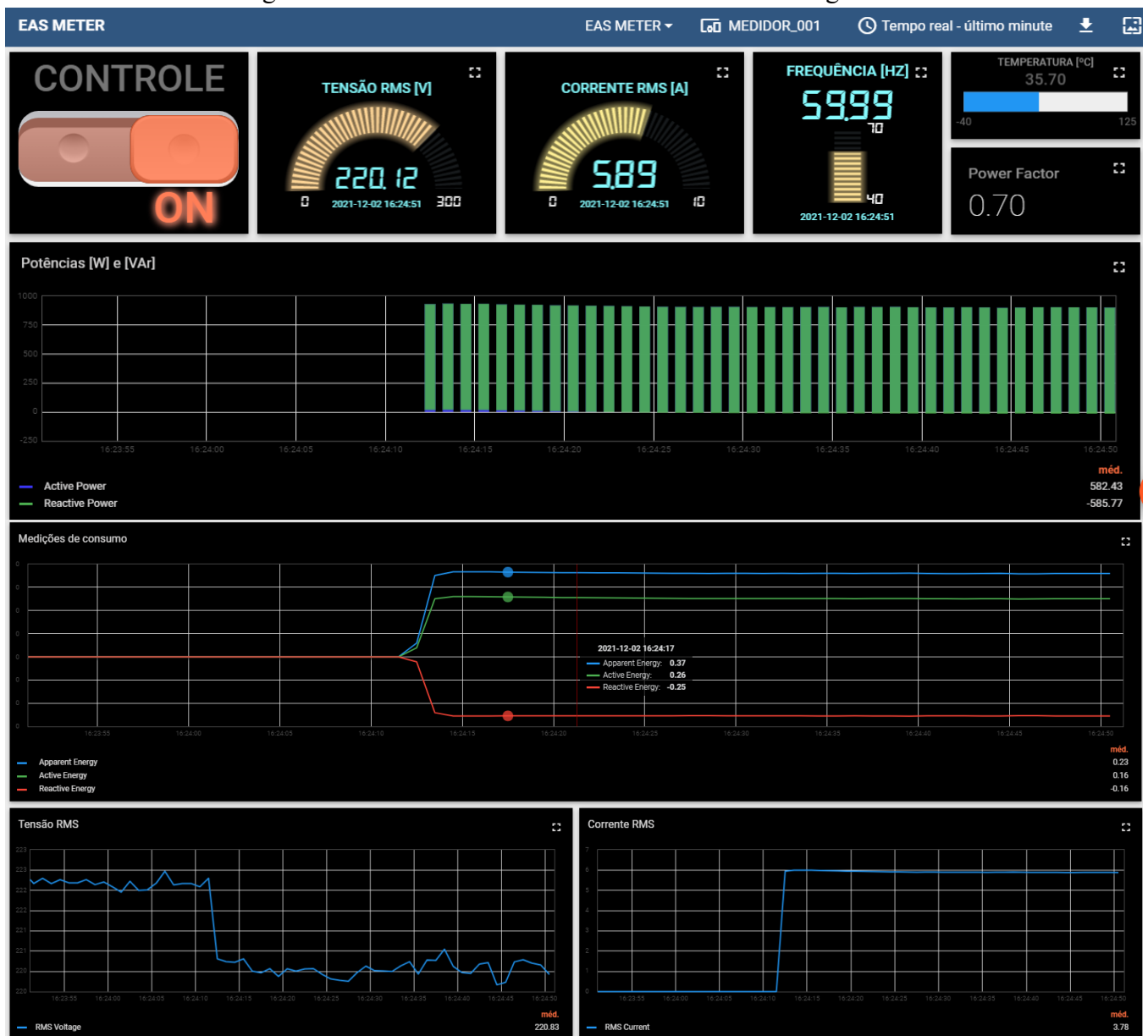
Figura 39 - Demonstrativo do sistema operando sem carga.



Fonte: Do autor.

Na situação dois, o dispositivo encontrava-se alimentado e a carga é acionada deslizando o botão de controle para ON. Como pode ser observado na Figura 40, a dashboard indica o valor da tensão RMS, da corrente RMS, da frequência, da temperatura, do fator de potência, das potências ativa e reativa e também os gráficos e valores de consumo de energia ativa e reativa. Nos gráficos de tensão e corrente RMS, pode ser observado a queda de tensão pela entrada da carga no mesmo momento da subida do valor da corrente elétrica. Todos os gráficos possuem a funcionalidade de ao passar o cursor sobre determinado ponto dos gráficos, os valores e o horário da amostra são apresentações, conforme indicado no gráfico de medições de consumo.

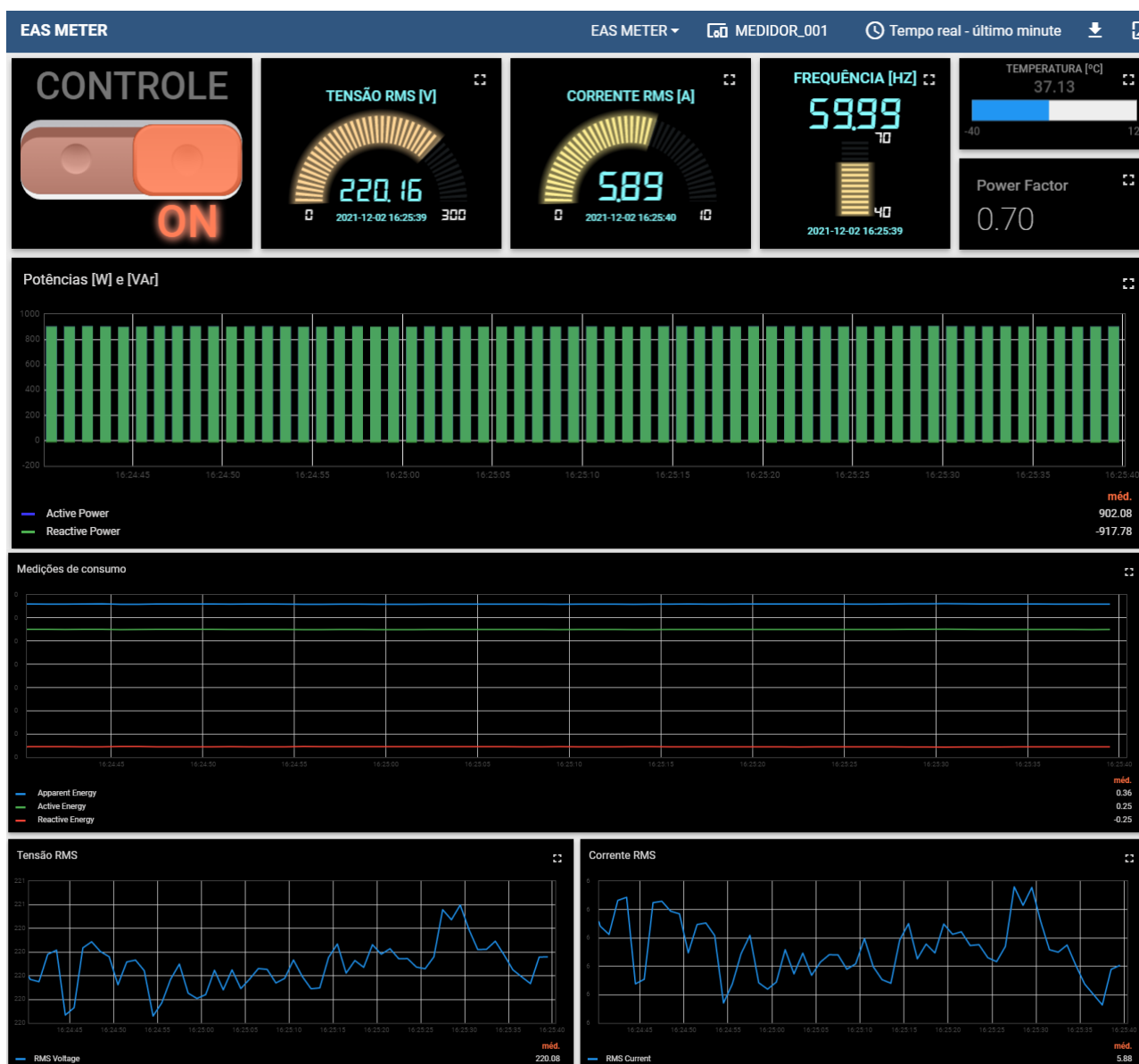
Figura 40 - Demonstrativo do sistema acionando a carga.



Fonte: Do autor.

Na situação três, o dispositivo encontrava-se alimentado e a carga acionada, como pode ser observada na Figura 41. O controle estava em ON e a dashboard indicava o valor da tensão RMS, da corrente RMS, da frequência, da temperatura, do fator de potência, das potências ativa e reativa e também os gráficos e valores de consumo de energia ativa e reativa. Nos gráficos de tensão e corrente RMS, pode ser observado uma pequena variação, porém, como os *widgets* são dinâmicos, a escala mostrada se ajusta automaticamente conforme o sistema vai estabilizando. E o gráfico de indicação de consumo mantém a estabilidade devido a não variação da carga.

Figura 41 - Demonstrativo do sistema operando em regime permanente.



Fonte: Do autor.

Na situação quatro, o dispositivo encontrava-se alimentado e a carga acionada, porém houve uma redução na carga durante a operação como pode ser observado na Figura 42. O controle estava em ON, e a dashboard indicava o valor da tensão RMS, da corrente RMS, da frequência, da

temperatura, do fator de potência, das potências ativa e reativa e também os gráficos e valores de consumo de energia ativa e reativa. Nos gráficos de tensão e corrente RMS, pode ser observado a subida da tensão e a redução da corrente. O *widget* de potência registra a variação da carga indicando a redução da potência ativa, alterando dessa forma o fator de potência e, o gráfico de indicação de consumo registra o momento de chaveamento da carga e a redução do consumo na sequência.

Figura 42 - Demonstrativo do sistema operando com variação de carga.



Fonte: Do autor.

Na situação cinco, o dispositivo encontrava-se alimentado e a carga é desligada, como pode ser observada na Figura 43. O controle passou para OFF, e a dashboard indica os valores atuais. Nos gráficos de tensão e corrente RMS, pode ser observado a subida da tensão e a redução da corrente para zero. O mesmo acontece com as medições de consumo de energia ativo e reativo. O widget de potência registra a variação da carga indicando a redução da potência ativa, alterando dessa forma o

fator de potência e, o gráfico de indicação de consumo registra o momento de chaveamento da carga e a redução do consumo na sequência.

Figura 43 - Demonstrativo do sistema chaveando a carga (desligando).



Fonte: Do autor.

5.7 LEVANTAMENTO DE CUSTOS DE PRODUÇÃO

Visto que existe o interesse comercial do dispositivo, foi realizado o levantamento de custos para produção em escala do dispositivo, divididos em custos de componentes e de montagem. É possível observar pela Tabela 14 que o custo para produção em série sofre uma redução considerável.

Os custos de aquisição dos componentes eletrônicos representam o maior valor devido ao alto custo de importação agregado, entretanto é possível com a produção em escala buscar redução nos valores dos impostos e até mesmo algum subsídio para manutenção da produção dos dispositivos.

Tabela 14 - Custos de produção do dispositivo.

Custo individual para	10 peças	100 peças	1000 peças
Custo de componentes eletrônicos	R\$ 252,45	R\$ 210,48	R\$ 180,20
Caixa plástica 2 DIN	R\$ 9,85	R\$ 7,34	R\$ 4,90
Placa de circuito impresso	R\$ 27,25	R\$ 22,30	R\$ 18,10
Montagem SMD	R\$ 32,80	R\$ 22,30	R\$ 17,50
Total	R\$ 322,35	R\$ 262,42	R\$ 220,70

Fonte: Do autor.

Em comparação aos equipamentos concorrentes no mercado o custo está coerente, não é o menor custo, porém, entrega mais funcionalidades que os outros dispositivos e contempla uma solução diferenciada por meio da escalabilidade do sistema de gerenciamento e monitoramento.

5.8 CONSIDERAÇÕES

Este capítulo apresentou os resultados obtidos com a validação do desenvolvimento proposto após a evolução das atividades necessárias para conclusão dos módulos de *hardware* e *software* do dispositivo, assim como o uso em situação real e o levantamento de custos para produção em escala do dispositivo. O próximo capítulo apresenta a conclusão e os trabalhos futuros para o dispositivo.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os objetivos traçados no início do estudo foram: (i) realizar a pesquisa do portfólio bibliográfico, de produtos e patentes, realizada durante todo o desenvolvimento da solução e apresentada no capítulo dois; (ii) realizar a seleção dos componentes do *hardware* para validação em laboratório, executada como a meta dois e descrita no capítulo três; e (iii) integrar os componentes selecionados e produzir o dispositivo, conforme descrito no capítulo quatro, assim como, os objetivos (iv) desenvolvimento do *software* do dispositivo, e (v) configuração do servidor em nuvem para o armazenamento da *dashboard*. O objetivo (vi), realizar a validação do dispositivo e do sistema, também foi atingido com sucesso, conforme o capítulo cinco.

Após a execução deste trabalho, considera-se que foi possível desenvolver um protótipo com alto nível de integração de *hardware* e *software*, incluindo a característica diferencial de ser autocalibrado. Além disso, conforme especificação do fabricante do CI de medição utilizado, o dispositivo pode atender as normas de energia ativa IEC 62053-21, IEC 62053-22, EN50470-3, OIML R46 e ANSI C12.20, assim como a IEC 62053-23 e a IEC 62053-24 para energia reativa. O dispositivo mostrou-se eficiente no intervalo de operação de 90 à 250Vca, sendo a fonte implementada de range universal, a tensão de operação não precisa ser selecionada no dispositivo e, apresenta possibilidade de mensurar correntes de até 10A, equivalente ao limite de chaveamento suportado pelo dispositivo.

Com a validação do protótipo sendo comparada à placa de avaliação, foi possível verificar que todas as grandezas mensuradas apresentaram erros de medição menores que 1% do fundo de escala e que, em escala de produção, o processo de parametrização dos dispositivos ficou muito simplificada. A autocalibração dispensa o uso de medidores de referência e reduz os custos de calibração em laboratórios externos. Vale destacar que, o custo final do dispositivo ficou abaixo de trezentos e vinte cinco reais.

Ainda durante o desenvolvimento do dispositivo, foram observadas algumas possibilidades de implementações e funcionalidades que podem ser adicionadas e que agregarão valor como solução comercial, assim como algumas necessidades de adequação para facilitar a produção. Estas implementações serão realizadas como trabalhos futuros com o dispositivo, visto que algumas delas já estão implementadas no *hardware*, necessitando o aprimoramento do *software* e a validação das funções. Como continuidade desta pesquisa e desenvolvimento tecnológico, sugerem-se as seguintes implementações e melhorias descritas a seguir: (i) Adicionar a atualização através da *dashboard*; (ii) Atualização da placa de acionamento; (iii) Adicionar a funcionalidade do cartão SD; (iv) Implementar

a medição bidirecional; (v) Implementar as métricas para disparo de avisos em casos adversos; e (vi) Adicionar a possibilidade de reproduzir a forma de onda dos sinais de corrente e tensão.

Adicionar a atualização através da dashboard: função já implementada da dashboard, falta adaptar o *firmware* para aceitar o controle de versões e atualização de forma remota assim como a validação da função.

Atualização da placa de acionamento: tarefa necessária para produção com segurança de dissipação de calor nos casos de trabalho com cargas de correntes elevadas.

Adicionar a funcionalidade do cartão SD: o *hardware* já está preparado para a implementação, deve ser trabalhado o *firmware* e a dashboard para possibilitar a operação mesmo sem conexão com a internet.

Implementar a medição bidirecional: função para aumentar o campo de aplicação de forma a possibilitar a operação em conjunto com sistemas de geração distribuída. Implementar as métricas para disparo de avisos em casos adversos: função a ser implementada no servidor para informar o usuário quando existir a necessidade de tomada de decisão ou ocorrência de eventos não programados.

Adicionar a possibilidade de reproduzir a forma de onda dos sinais de corrente e tensão: função bem específica que possibilitaria realizar a oscilografia dos sinais mensurados com alta taxa de amostragem.

Para finalizar o trabalho e com a configuração atual do dispositivo, as características técnicas estão apresentadas na Tabela 15. Porém, podem ser adaptadas de acordo com a necessidade da solução buscada, através da constante evolução do desenvolvimento e produção de novas versões.

Tabela 15 - Especificações do EAS Meter.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Tensão	Faixa de operação de 85V a 275V (tensão fase-neutro)
Corrente	Corrente Máxima 10A
Frequência	50 ou 60Hz
Precisão	Classe 1 (1% para todas as grandezas mensuradas)
Taxa de amostragem	4000 SPS
Faixa de temperatura	-10°C a 70°C
Interfaces de Comunicação	802.11 b/g/n (802.11n até 150 Mbps)
Grandezas Mensuradas	V, I, HZ, WATT, VAR, VA, FP, Wh, VARh, e VAh
Dimensões	88x37x59mm
Peso	0,6kg

Fonte: Do autor.

REFERÊNCIAS

- ABATE, F.; CARRATÙ, M.; LIGUORI, C.; PACIELLO, V. A low cost smart power meter for IoT. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, [S. l.], v. 136, p. 59–66, 2019. ISSN: 02632241. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.12.069.
- AHMAD, Muhammad Waseem; MOURSHED, Monjur; MUNDOW, David; SISINNI, Mario; REZGUI, Yacine. **Building energy metering and environmental monitoring - A state-of-the-art review and directions for future research**. **Energy and Buildings**Elsevier Ltd, 2016. ISSN: 03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.03.059.
- AMMAR, Mahmoud; RUSSELLO, Giovanni; CRISPO, Bruno. Internet of Things: A survey on the security of IoT frameworks. **Journal of Information Security and Applications**, [S. l.], v. 38, p. 8–27, 2018. ISSN: 22142126. DOI: 10.1016/j.jisa.2017.11.002.
- ANALOG DEVICES, Inc. EV-ADE9153ASHIELDZ User Guide EV-. [S. l.], [s.d.].
- ANALOG DEVICES, Inc. Energy Metering IC with Autocalibration ADE9153A. [S. l.], 2018.
- AVANCINI, Danielly B.; RODRIGUES, Joel J. P. C.; MARTINS, Simion G. B.; RABÊLO, Ricardo A. L.; AL-MUHTADI, Jalal; SOLIC, Petar. Energy meters evolution in smart grids: A review. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 217, p. 702–715, 2019. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.229.
- BARROS, M. V. A, PIEKARSKI, C. M. A, SALVADOR, R. Elétrica Mais Limpa : Uma Análise De Produção Científica. **Avaliação de Ciclo de Vida de sistemas de geração de energia elétrica mais limpa: uma análise de produção científica**, [S. l.], [s.d.].
- BIN TECHNOLOGY. **Manual do Usuário - JE05 WATT METER**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.bintechnology.com.br/wattmeterje05>.
- DAISSAOUI, Abdellah; BOULMAKOUL, Azedine; KARIM, Lamia; LBATH, Ahmed. IoT and Big Data Analytics for Smart Buildings: A Survey. **Procedia Computer Science**, [S. l.], v. 170, p. 161–168, 2020. ISSN: 18770509. DOI: 10.1016/j.procs.2020.03.021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.021>. Acesso em: 4 set. 2020.
- DO AMARAI, Haroldo L. M.; DE SOUZA, Andre N.; GASTALDELLO, Danilo S.; FERNANDES, Filipe; VALE, Zita. Smart meters as a tool for energy efficiency. **2014 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, IEEE INDUSCON 2014 - Electronic Proceedings**, [S. l.], 2014. ISBN: 9781479955510. DOI: 10.1109/INDUSCON.2014.7059413.

DRANKA, Géremi Gilson; FERREIRA, Paula. Towards a smart grid power system in Brazil: Challenges and opportunities. **Energy Policy**, [S. l.], v. 136, 2020. ISSN: 03014215. DOI: 10.1016/j.enpol.2019.111033.

EMMANUEL, Michael; RAYUDU, Ramesh. **Communication technologies for smart grid applications: A survey**. **Journal of Network and Computer Applications** Academic Press, 2016. ISSN: 10958592. DOI: 10.1016/j.jnca.2016.08.012.

ESPRESSIF. **ESP32 Technical Reference Manual** US Army Corps of Engineers. [s.l: s.n.]. Disponível em: [http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical Reference Manual_\(CPD-74B\).pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical Reference Manual_(CPD-74B).pdf).

HAIDER, Haider Tarish; SEE, Ong Hang; ELMENREICH, Wilfried. **A review of residential demand response of smart grid**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** Elsevier Ltd, 2016. ISSN: 18790690. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.016.

IE TECNOLOGIA. **Manual do Usuário - Medidor SM-W Lite**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://ietecnologia.com/product/medidor-de-energia-monofasico-wifi-de-baixo-custo-sm-w-lite/>.

JIA, Mengda; KOMEILY, Ali; WANG, Yueren; SRINIVASAN, Ravi S. Adopting Internet of Things for the development of smart buildings: A review of enabling technologies and applications. **Automation in Construction**, [S. l.], v. 101, p. 111–126, 2019. ISSN: 09265805. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.01.023.

KHOMP. **Medidor de consumo de energia monofásico IEEE 802.15.4 com atuador para quadro de energia**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.khomp.com/pt/produto/medidor-de-energia-endpoint-iot/>.

MINCHEV, D. P.; DIMITROV, A. I. Laboratory Automation System Using IOT Devices. *In*: 2020 21ST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL APPARATUS & TECHNOLOGIES (SIELA) 2020, **Anais [...]**. : IEEE, 2020 p. 1–4. ISBN: 978-1-7281-4346-0. DOI: 10.1109/SIELA49118.2020.9167121. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9167121/>. Acesso em: 4 set. 2020.

NEWATT; MINIPA. **MEDIDOR INTELIGENTE DE ENERGIA - NEWATT G121-100A**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.newatt.com.br/medidores-inteligentes/>.

NIŽETIĆ, Sandro; DJILALI, Nedjib; PAPADOPOULOS, Agis; RODRIGUES, Joel J. P. C. Smart technologies for promotion of energy efficiency, utilization of sustainable resources and waste management. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 231, p. 565–591, 2019. ISSN: 09596526.

DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.397.

PAGANI, Regina Negri; KOVALESKI, João Luiz; RESENDE, Luis Mauricio. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, [S. l.], v. 105, n. 3, p. 2109–2135, 2015. ISSN: 15882861. DOI: 10.1007/s11192-015-1744-x.

PATOLA. C ATÁ LO G O. [s.l: s.n.]. Disponível em: http://www.patola.com.br/pt_PATOLA_CATALOGO_DIGITAL.pdf.

SAI SHIBU, N. B.; HANUMANTHIAH, Aravind; SAI ROHITH, S.; YASWANTH, C. H.; HEMANTH KRISHNA, P.; PAVAN, J. V. S. Development of IoT Enabled Smart Energy Meter with Remote Load Management. **2018 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, ICCIC 2018**, [S. l.], p. 1–4, 2018. ISBN: 9781538615072. DOI: 10.1109/ICCIC.2018.8782381.

SHAUKAT, N.; ALI, S. M.; MEHMOOD, C. A.; KHAN, B.; JAWAD, M.; FARID, U.; ULLAH, Z.; ANWAR, S. M.; MAJID, M. A survey on consumers empowerment, communication technologies, and renewable generation penetration within Smart Grid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 81, n. April 2016, p. 1453–1475, 2018. ISSN: 18790690. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.208. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.208>.

SHROUF, Fadi; MIRAGLIOTTA, Giovanni. Energy management based on Internet of Things: Practices and framework for adoption in production management. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 100, p. 235–246, 2015. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.03.055.

SIANO, Pierluigi. **Demand response and smart grids - A survey**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 2014. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2013.10.022.