



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Marcelo José Alves de Santana

**Fabricação e teste de um protótipo de um sistema de monitoramento de
consumo e geração de energia elétrica**

Recife
2023

Marcelo José Alves de Santana

**Fabricação e teste de um protótipo de um sistema de monitoramento de
consumo e geração de energia elétrica**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia e Ge-
ociências da Universidade Federal de Pernambuco
como requisito para a obtenção do título de Enge-
nheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Fernando Roberto
Pereira

Recife
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Santana, Marcelo José Alves de.

Fabricação e teste de um protótipo de um sistema de monitoramento de consumo e geração de energia elétrica / Marcelo José Alves de Santana. - Recife, 2023.

54 p. : il., tab.

Orientador(a): Francisco Fernando Roberto Pereira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2023.

Inclui referências, anexos.

1. processo de desenvolvimento de produtos. 2. monitoramento de energia elétrica. 3. aplicativo. 4. IoT. 5. previsão de gastos. I. Pereira, Francisco Fernando Roberto. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

Marcelo José Alves de Santana

**Fabricação e teste de um protótipo de um sistema de monitoramento de
consumo e geração de energia elétrica**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de
“Engenheiro Mecânico” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica.

Recife, 7 de Agosto de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Francisco Fernando Roberto Pereira, Dr.
DEMEC - CTG - Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Justo Emilio Alvarez Jacobo, Dr.
DEMEC - CTG - Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Janaína Moreira de Meneses, Dr^a.
DEMEC - CTG - Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

O autor do presente trabalho, Marcelo Santana, expressa sua gratidão a todos aqueles que desempenharam um papel fundamental na concretização desta pesquisa. Em primeiro lugar, a Deus, que permitiu chegar até este ponto.

O Prof. Dr. Francisco Pereira, figura eminente e notável nesta jornada, merece particular reconhecimento pela sua força de vontade, sua orientação paciente, seu espírito inovador e sua dedicação incansável ao longo de todo o processo de investigação. Seus preciosos direcionamentos foram determinantes para o alcance do êxito neste trabalho acadêmico.

Aos amigos próximos, principalmente Yohanan Gil e José Otávio, cuja colaboração foi inestimável, rendem-se sinceros agradecimentos. O compartilhamento de saberes e o fornecimento de *feedback* construtivo constituíram pilares fundamentais para o sucesso deste trabalho.

Por fim, dirigem-se também palavras de profunda gratidão aos familiares de Marcelo Santana, cujo incentivo incondicional e apoio irrestrito foram vitais ao longo de toda a empreitada. Sem o suporte e a confiança proveniente deste círculo essencial, esta pesquisa não teria sido viabilizada em sua plenitude.

É com renovada energia e sincera devoção que Marcelo Santana presta suas homenagens a todos os que contribuíram para a materialização deste trabalho. É graças à colaboração e encorajamento de cada um dos mencionados que este projeto alcançou êxito, convertendo-se em uma notável realização acadêmica e profissional.

O conhecimento adquirido neste trabalho de conclusão de graduação representa uma semente para a geração de inovação e o fomento do empreendedorismo. Os fundamentos sólidos estabelecidos constituem o alicerce sobre o qual se construirá um ambiente propício ao florescimento de ideias audaciosas, propulsoras do progresso econômico e social.

RESUMO

O desenvolvimento de sistemas de energias limpas, ou verdes, é uma resposta crucial aos desafios que a sociedade enfrenta atualmente em relação à demanda crescente por energia e às preocupações com o meio ambiente (relacionadas à utilização de combustíveis fósseis). Nesse contexto, dando continuidade ao trabalho realizado anteriormente, no qual foram feitas as duas primeiras etapas do PDP — Projetos Informacional e Conceitual —, o presente trabalho acadêmico abordou o desenvolvimento de um protótipo de um sistema de monitoramento de geração e consumo de energia elétrica por meio dos Projetos Preliminar e Detalhado. Essa abordagem combinou tecnologias de ponta, como módulos mecatrônicos de IoT e um aplicativo multiplataforma, para possibilitar um acompanhamento em tempo real da produção de energia a partir de fontes limpas, como painéis solares, e do consumo por diversos equipamentos elétricos. Para atingir esse objetivo, foram feitos os Projetos Preliminar e Detalhado. Foi desenvolvido um sistema eletrônico de medição de tensão e corrente que trouxe resultados dentro do previsto para um protótipo inicial, além de ter gerado *insights* sobre preocupações que devem ser levadas em consideração. Por fim, juntou-se os resultados e houve o desenvolvimento de um *software* para trabalhar com o *hardware* projetado. Os testes de interação entre o *software* e *hardware* foram feitos comparando os resultados a um sistema de medição já existente (multímetro), gerando sinais ao *hardware* a partir de um variac. A relevância desse trabalho reside no fato de que, ao fornecer informações detalhadas sobre a geração e o consumo de energia, esse sistema de monitoramento permite uma gestão mais eficiente dos recursos, resultando em um uso mais inteligente e consciente da energia. Além disso, contribui para a disseminação do uso de fontes de energia limpa, reduzindo a dependência de fontes não renováveis e diminuindo os impactos ambientais associados. Esse estudo trouxe como resultado um protótipo do produto que será colocado em forma de MVP (*Minimum Viable Product*) no mercado após mais validações e refinamentos futuros.

Palavras-chave: processo de desenvolvimento de produtos, monitoramento de energia elétrica, aplicativo, IoT, previsão de gastos.

ABSTRACT

The development of clean, or green, energy systems is a crucial response to the challenges society currently faces regarding the increasing demand for energy and environmental concerns (related to the use of fossil fuels). In this context, continuing the work previously conducted, in which the first two stages of PDP were carried out — Informational and Conceptual Designs —, the current project addressed the development of a monitoring system prototype for generation and consumption of electric energy via the Preliminary and Detailed Projects. This approach combined cutting-edge technologies, such as IoT mechatronic modules and a multi-platform application, to enable real-time tracking of energy production from clean sources, such as solar panels, and the consumption by various electrical equipment. In order to reach this objective, both Preliminary and Detailed Projects were carried out. An electronic system for voltage and current measurement was developed, which yielded results within the expected range for an initial prototype and provided insights about concerns that need to be taken into account. Finally, the results were combined, and software was developed to work with the designed hardware. Tests for interaction between the software and hardware were conducted by comparing the results to an existing measurement system (multimeter) and generating signals to the hardware using a variac. The significance of this work lies in the fact that by providing detailed information about energy generation and consumption, this monitoring system allows for more efficient resource management, resulting in a smarter and more conscious use of energy. Additionally, it contributes to the widespread adoption of clean energy sources, reducing the dependence on non-renewable sources and mitigating associated environmental impacts. This study resulted in a prototype of the product that will be launched in the market as a Minimum Viable Product (MVP) after further validations and future refinements.

Keywords: product development process, electrical energy monitoring, application, IoT, expenditure forecasting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva tempo x custo relativo incorrido e comprometido	13
Figura 2 – Fluxogramas específicos de projeto do produto.	16
Figura 3 – Fluxograma do Projeto Preliminar.	19
Figura 4 – Relações entre entradas e saídas do Projeto Detalhado.	20
Figura 5 – Fluxograma do Projeto Detalhado.	21
Figura 6 – Informações principais e dependências entre as atividades da fase de Projeto Detalhado.	22
Figura 7 – Fluxograma geral de projeto do produto	24
Figura 8 – Diagrama de blocos do subsistema “ <i>hardware</i> ”	27
Figura 9 – Primeira solução para circuito medidor de tensão	28
Figura 10 – Análise DC da primeira solução para circuito medidor de tensão	28
Figura 11 – Análise AC da primeira solução para circuito medidor de tensão	29
Figura 12 – Segunda solução para circuito medidor de tensão. a: Circuito eletrônico de medição; b: Resposta do circuito (tensão no tempo)	30
Figura 13 – Circuito medidor de tensão por retificação	30
Figura 14 – Circuito medidor de tensão usando um retificador de precisão	31
Figura 15 – Respostas do circuito medidor de tensão usando um retificador de pre- cisão. a: Saída do amplificador operacional U1; b: Saída do amplificador operacional U13; c: Saída do amplificador operacional U14	31
Figura 16 – Circuito de teste do ADC ADS1015	33
Figura 17 – Diagrama de blocos do código de teste do ADS1015	34
Figura 18 – Regressão polinomial de segunda ordem para demonstrar o erro das aferições A, B e C	35
Figura 19 – Precisão obtida nas aferições A, B e C pelo sistema desenvolvido	35
Figura 20 – Circuito de conformação de tensão	37
Figura 21 – Resultado do experimento com a rede elétrica	37
Figura 22 – Circuito de conformação de corrente	38
Figura 23 – Triângulo de Potências	39
Figura 24 – Modelo do aplicativo	42
Figura 25 – Modelo de um PDP.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Preços dos componentes do subsistema “Microcontrolador” (M)	48
Tabela 2 – Lista dos materiais e componentes utilizados no projeto	49
Tabela 3 – Estimativa do preço e peso da impressão 3D	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Polímero: <i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
AC	<i>Alternating Current</i>
AD	Analógico-Digital
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
DC	<i>Direct Current</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IoT	<i>Internet-of-things</i>
LSB	<i>Least Significant Bit</i>
MVP	<i>Minimum Viable Product</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produtos (Product Development Process)
PETG	Polietileno Tereftalato Glicol
PLA	Poliácido Láctico
PTH	<i>Pin Through Hole</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SMD	Surface Mounted Device
TC	Transformador de Corrente
UI	<i>User Interface</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

V	Volt
Ω	Ohm
A	Ampère
rms	Valor eficaz
VA	Volt-Ampère
W	Watt
VAR	Volt-Ampère Reativo
g	Gramma

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	PROCESSO DE PROJETO	15
2.2	PERSPECTIVA GERAL DO PDP	15
2.2.1	Projeto Preliminar	18
2.2.2	Projeto Detalhado	20
3	METODOLOGIA	23
3.1	PROPOSTA DO TRABALHO	23
3.2	DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	24
4	DESENVOLVIMENTO	26
4.1	PROJETO PRELIMINAR	26
4.1.1	Configurações do modelo para o subsistema “<i>hardware</i>”	26
<i>4.1.1.1</i>	<i>Medidor de tensão</i>	<i>26</i>
4.1.1.1.1	Configuração 1: <i>offset</i>	27
4.1.1.1.2	Configuração 2: <i>offset</i>	29
4.1.1.1.3	Configuração 3: retificação	29
4.1.1.1.4	Configuração 4: retificação	30
<i>4.1.1.2</i>	<i>Medidor de Corrente</i>	<i>32</i>
4.1.2	Prototipagem e testes	32
<i>4.1.2.1</i>	<i>Prototipagem e testes do hardware</i>	<i>32</i>
<i>4.1.2.2</i>	<i>Prototipagem e testes do software</i>	<i>41</i>
4.2	INSIGHTS DO PROJETO PRELIMINAR	43
4.3	PROJETO DETALHADO	44
4.3.1	Processos de fabricação	44
<i>4.3.1.1</i>	<i>Subsistema “carcaça”</i>	<i>44</i>
<i>4.3.1.2</i>	<i>Subsistema “hardware”</i>	<i>46</i>
4.3.2	Montagem do produto	46
4.3.3	Orçamento	47
5	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS	52
	ANEXO A – Modelo de um PDP	54

1 INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por energia acompanha a evolução da tecnologia e da indústria, sendo esta era chamada de 4^a revolução industrial (CASTELO-BRANCO *et al.*, 2022). Nesse contexto, o ambiente industrial é integrado horizontalmente (entre máquinas e processos) e verticalmente (entre empresas diferentes) e assuntos como *Internet of Things*, *Big Data*, Inteligência Artificial, *Cloud Computing*, *Cyberphysical Systems* e *Additive Manufacturing* são utilizados para complementar e otimizar a eficiência dos processos industriais. Neste ambiente, ocorre comunicação máquina-máquina, máquina-servidor, servidor-máquina e servidor-servidor. O servidor é um ambiente que gerencia as informações de um ou mais processos ou máquinas e pode retornar resultados de cálculos ou informações mais complexas ao processo (ou apenas armazenar estas informações).

A rápida ascensão da demanda de energia, o uso de fontes renováveis e a evolução tecnológica geram a necessidade de monitorar o consumo e a geração de energia de forma consciente e inteligente, tanto em ambientes residenciais quanto empresariais, além de possibilitar o controle de despesas financeiras. Portanto, com foco na inovação e no empreendedorismo com o objetivo de solucionar problemas da sociedade, a tendência que surge no mercado é a criação de um produto compacto e inteligente para a medição de energia.

O desenvolvimento da seção mecatrônica do produto de monitoramento de energia presente neste trabalho faz parte de um contexto que engloba toda a criação de um produto inovador, envolvendo pesquisa de mercado, definição de personas de usuários e outras etapas necessárias ao nascimento de um empreendimento capaz de solucionar com eficiência um problema latente na sociedade atual. Etapas anteriores do processo de desenvolvimento desse produto foram realizadas por Machado (2023).

Além da possibilidade apresentada aplicada ao ramo industrial, esse produto se estende para além, podendo ser generalizado e aplicado também a empresas prestadoras de serviço e até mesmo a residências, assim como outras tecnologias desenvolvidas durante as demais eras industriais (como a eletricidade ou aplicação de motores elétricos ou à combustão). Isto se aplica por conta de ser um produto cuja produção é facilitada, uma vez que são necessários alguns componentes comuns na eletrônica em geral como resistores, capacitores, microcontroladores, placas de circuito impresso e alguns outros que são facilmente encontrados à venda no Brasil, e podem ainda ser importados de grandes países produtores, como a China, com um custo menor, além de ser possível fazer um projeto redimensionado visando a aplicação monofásica, bifásica e trifásica. A produção da carcaça foi pensada para fabricação facilitada e convencional, podendo ser por métodos de prototipagem rápida (impressão 3D), ou ainda por meio da injeção plástica por meio de moldes. Por conta da facilidade de aquisição dos componentes eletrônicos para a fabricação do circuito e a facilidade da produção da carcaça, este produto se mostra

potencial à produção em larga escala.

O desenvolvimento deste trabalho resultou em um sistema efetivo de monitoramento de consumo e geração de energia elétrica, com experimentos para estudar a precisão e interação entre *ohardware* e o *software*, analisando variações plausíveis para esse tipo de sistema. Para o monitoramento por parte do *backend*, o sistema foi desenvolvido via uma API, possibilitando o acesso por diversos dispositivos. Um sistema de monitoramento via aplicativo também se destaca potencialmente para dispositivos móveis como *smartphones*, *tablets* e *smartwatches* com sistema operacional compatível. Tudo isso foi realizado visando desenvolver um sistema de monitoramento de consumo e geração de energia com abertura para a previsão de custo da conta de energia, facilitando o planejamento financeiro mensal. A partir das pesquisas feitas no contexto externo do projeto, foi observada uma lacuna nos produtos similares existentes no mercado, principalmente quanto ao *software*, que permitisse um planejamento mensal mais preciso com uma *UI* otimizada, limpa e de fácil visualização e interpretação.

Por fim, esse projeto traz como resultado ao cliente os benefícios da comodidade e confiabilidade e até mesmo economia a partir deste sistema de monitoramento de geração e consumo de energia elétrica já que, além de medir e monitorar, os dados gerados são armazenados em um banco de dados que serve de base para um estudo estatístico, visando prever quanto o consumidor gastará após determinado tempo conforme seu comportamento em consumo elétrico, tanto em valor monetário quanto em energia elétrica consumida em seu valor bruto (caso seja usado apenas o sistema de medição de consumo de energia elétrica) ou em seu valor líquido (caso seja utilizado o sistema de medição de produção e consumo de energia elétrica).

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho de pesquisa teve como objetivo geral desenvolver um sistema de monitoramento de consumo e geração de energia elétrica. Para que esse desenvolvimento fosse atingido, estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos:

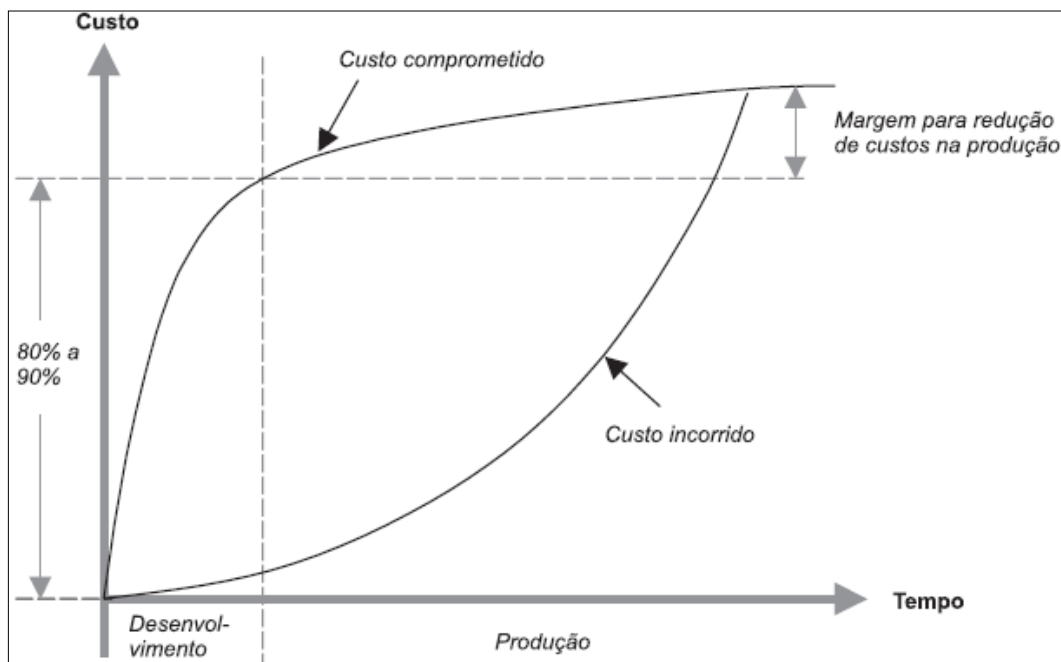
- a) Analisar, dentre os métodos de medição existentes, os que mais provavelmente atendem aos requisitos do projeto, fazendo isto por meio do Projeto Preliminar;
- b) Testar o sistema eletrônico projetado que realiza a medição da tensão de entrada de forma suficientemente precisa;
- c) Desenvolver o Projeto Detalhado a partir do que foi realizado anteriormente;
- d) Desenvolver o *backend* e um *frontend* elementar do *software* de monitoramento de consumo e geração de energia elétrica;
- e) Testar o sistema integrado entre o *hardware* e o *software* (aplicativo de monitoramento em tempo real).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Rozenfeld (2007) destaca, preliminarmente, a importância da fase inicial do desenvolvimento do projeto, onde são tomadas decisões cruciais sobre tecnologias, materiais de fabricação e processos. Essas decisões representam a maior parte dos custos do produto final, podendo chegar a cerca de 85%. As demais etapas, como definição de tolerâncias, fornecedores, cadeia de suprimentos, protótipo e *marketing*, ocorrem posteriormente (ROZENFELD *et al.*, 2007).

O desenvolvimento de produtos é um processo complexo que tem sido estudado desde os primórdios da civilização, quando as pessoas trocavam objetos para atender às suas necessidades básicas, surgindo assim o conceito de valor. No entanto, muitas empresas em todo o mundo não adotam um processo adequado de desenvolvimento de produtos, focando apenas no lançamento rápido. Investir mais tempo nesse processo geralmente aumenta as chances de sucesso nas vendas e contribui para a estabilidade da empresa após o lançamento do produto.

Figura 1 – Curva tempo x custo relativo incorrido e comprometido



Fonte: Rozenfeld (2007)

Durante a fase inicial de um projeto, onde as incertezas são mais significativas e os custos estão em sua maioria indefinidos, o gerenciamento de riscos é fundamental para o sucesso. Esse gerenciamento é realizado através do PDP (Processo de Desenvolvimento de Produtos), o que resulta em uma vantagem competitiva. Como demonstra a Figura 1, quanto mais o projeto avança, maiores se tornam os custos comprometido e incorrido.

Custos incorridos refere-se aos gastos efetivamente realizados até o momento atual e que já fazem parte do histórico financeiro do projeto, sendo assim, não podem ser

recuperados ou alterados, pois já foram consumidos ou utilizados no desenvolvimento do produto, ou seja, representam as despesas reais que já foram pagas ou registradas contabilmente. Por exemplo, salários pagos aos membros da equipe de desenvolvimento, materiais comprados para prototipagem, custos de pesquisa de mercado, entre outros, são considerados custos incorridos.

Por outro lado, custos comprometidos dizem respeito aos gastos futuros que foram planejados e estão vinculados a compromissos contratuais, acordos com fornecedores ou ordens de compra já emitidas. Esses custos representam obrigações financeiras que a empresa assumiu para garantir a continuidade do desenvolvimento do produto. Por exemplo, se a empresa encomendou um lote de componentes a um fornecedor e o pagamento será efetuado na entrega, esse valor ainda não é considerado custo incorrido, mas sim custo comprometido, pois ainda não foi efetivamente desembolsado.

Baxter (1998) chega a uma conclusão semelhante ao discutir o comprometimento dos custos, ele destaca que fazer alterações no desenvolvimento do produto pode acarretar em um custo agregado bastante elevado, muitas vezes inviabilizando a mudança.

Rozenfeld (2007) enfatiza que um produto pode ser compreendido sob duas perspectivas distintas: o ponto de vista comercial e o ponto de vista técnico. No primeiro caso, o produto é simplesmente considerado como qualquer objeto ou serviço que um consumidor adquire por meio de uma compra. Já sob o ponto de vista técnico, um produto é visto como uma combinação de sistemas e subsistemas que atuam de forma integrada ou não para realizar uma atividade específica, sujeitos a diversas restrições.

Conforme mencionado por Carpes Jr. (2014), um produto pode ser considerado novo se apresentar pelo menos uma característica única, tornando-o diferente dos demais. Essa característica pode envolver a criação de uma solução inovadora ou o aperfeiçoamento de uma solução já existente. Essas características devem atender às necessidades do cliente, tais como estética, sustentabilidade, ergonomia, funcionalidade, segurança, produtividade, operacionalidade e economia. Caso o produto não atenda adequadamente às necessidades do público-alvo, sua vida útil será comprometida, podendo resultar em um produto “natimorto”, ou seja, condenado ao fracasso antes mesmo de ser lançado.

Ulrich (2020) apresenta um modelo que explicita bem cada passo do que é feito em cada etapa do PDP, presente no Anexo A (Figura 25). No PDP, o conceito de processo é definido como uma sequência sistemática de procedimentos com certa regularidade (PROCESSO, 2022), enquanto o conceito de fase refere-se a cada etapa de um progresso em andamento (FASE, 2022).

Ao final de cada fase, ocorre uma avaliação de resultados, conhecida como *gate*, que visa analisar os *deliverables* (resultados) obtidos, os quais se tornam a base para a próxima etapa do processo.

Rozenfeld (2007) ainda destaca a importância de um adequado PDP para guiar as etapas do projeto visando um resultado final bem-sucedido. O autor divide o processo

em três grandes áreas: Planejamento (tanto do produto quanto do projeto), Processo de Projeto e Implementação do Projeto, cada uma composta por fases específicas. O foco deste trabalho está no Processo de Projeto — em especial, o Projeto Preliminar e o Projeto Detalhado —, visando a posterior implementação do produto.

O Processo de Projeto de um produto presente neste trabalho parte de um momento onde já foram realizadas as pesquisas de mercado e já foi feito o levantamento de especificações-meta necessárias ao produto (MACHADO, 2023). Desse modo, o projeto começou com a escolha das melhores formas de se produzir o subsistema *hardware*. Posteriormente, foi realizado o desenho geral dos subsistemas, onde são especificados materiais e componentes, facilitando a próxima etapa. Por fim, o Projeto Detalhado é elaborado, onde todos os detalhes, como formas, tamanhos e métodos de fabricação, são minuciosamente definidos para a concretização prática do produto.

2.1 PROCESSO DE PROJETO

Para compreender o desenvolvimento deste trabalho, é fundamental ter conhecimento sobre o PDP. Esse processo é constituído por quatro fases distintas: Projeto Informacional, Projeto Conceitual, Projeto Preliminar e Projeto Detalhado. Cada uma dessas fases desempenha um papel essencial no desenvolvimento do projeto.

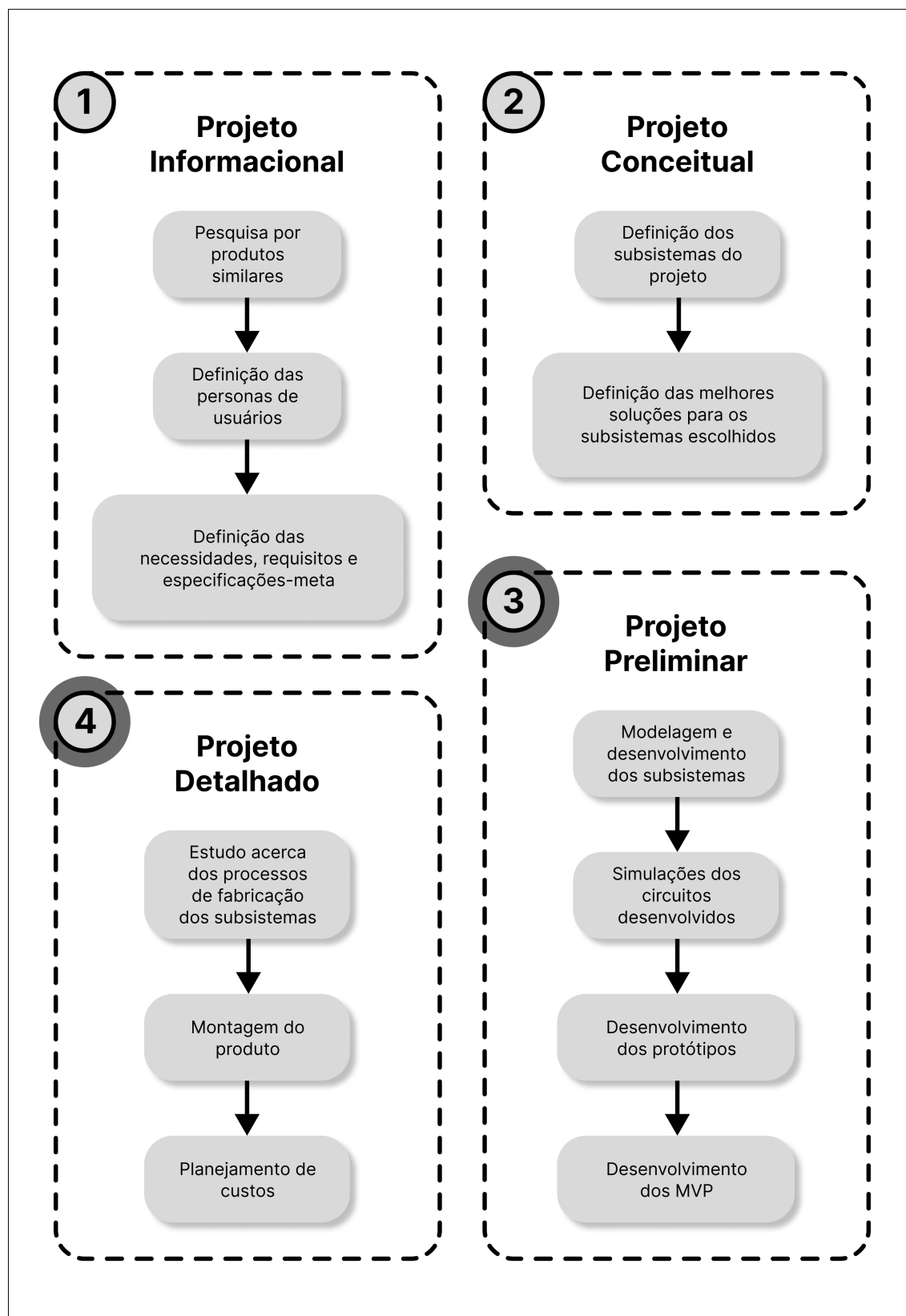
Conforme mencionado anteriormente, o escopo deste projeto está direcionado para as fases que seguem após os Projetos Informacional e Conceitual, sendo elas o Projeto Preliminar e o Detalhado. Dessa forma, o presente projeto se concentrará no aprimoramento das soluções conceituais já estabelecidas, buscando torná-las mais tangíveis e detalhadas para a etapa de produção. A partir dessas etapas, o produto estará pronto para seguir para a fase de fabricação, testes e, por fim, o lançamento no mercado, atendendo às demandas e expectativas dos clientes de forma eficiente e competitiva. Apesar do foco principal deste trabalho serem as fases de Projeto Preliminar e Detalhado, cabe também uma visão geral do PDP com o intuito de gerar um maior entendimento do leitor acerca desse processo.

2.2 PERSPECTIVA GERAL DO PDP

Na etapa de Projeto Informacional, é imprescindível uma análise criteriosa para compreender as necessidades do mercado, bem como as demandas específicas dos potenciais clientes. O levantamento e análise de informações acerca das tendências tecnológicas e das expectativas dos consumidores são necessárias à concepção de soluções inovadoras e alinhadas com as necessidades do mercado no momento.

No Projeto Conceitual, o foco se concentra na geração e na avaliação de múltiplas ideias e abordagens para o desenvolvimento do produto. Esse é o momento de explorar diversas alternativas de *design* para cada subsistema, levando em consideração a viabilidade

Figura 2 – Fluxogramas específicos de projeto do produto.



Fonte: Autor (2022).

técnica, econômica e sustentável de cada conceito. É um momento crucial para a seleção das propostas mais promissoras, que servirão de base para a próxima etapa.

Já no Projeto Preliminar, os conceitos escolhidos na fase anterior são refinados e detalhados, com o objetivo de obter uma visão mais aprofundada do produto. São realizadas análises de conceito e considerações técnicas para garantir a robustez do projeto. Modelos e protótipos iniciais são desenvolvidos para testar as soluções escolhidas, cabendo ao projetista escolher as mais efetivas e que passarão para a etapa seguinte.

Por fim, na etapa de Projeto Detalhado, ocorre a materialização completa da concepção do produto. Todos os aspectos técnicos são minuciosamente especificados, incluindo materiais, processos de fabricação, requisitos de qualidade e performance. Protótipos são confeccionados para validar a funcionalidade e a eficiência do projeto, possibilitando os ajustes necessários antes da produção em larga escala.

A aplicação dessas quatro etapas, de forma sistematizada e iterativa, representa um pilar sólido para o desenvolvimento de produtos de sucesso. Através desse processo, é possível garantir que o produto final atenda às expectativas do mercado e dos clientes, cumprindo seu propósito de forma eficaz e com excelência. A adoção dessa metodologia contribui para a inovação e a competitividade, tornando-se um diferencial essencial para projetos de alto impacto na indústria e no mercado.

É fundamental ressaltar que, embora exista uma sequência lógica otimizada no PDP, que envolve as etapas de Projeto Informacional, Projeto Conceitual, Projeto Preliminar e Projeto Detalhado — conforme mostrado na Figura 2, que enfatiza as duas etapas finais estudadas neste trabalho —, o projetista possui a flexibilidade de retornar a qualquer etapa anterior ou até mesmo avançar mais de uma etapa no processo. Por exemplo, pode-se voltar do Projeto Conceitual para o Projeto Informacional caso seja identificada alguma inviabilidade ou incoerência no desenvolvimento; ou, ainda, avançar diretamente do Projeto Informacional para o Projeto Conceitual, assumindo o risco de não possuir um desenvolvimento totalmente padronizado e coerente, podendo necessitar retornar etapas.

Contudo, como visto na introdução do Capítulo 2, é crucial compreender que cada movimento desse dentro do processo demanda tempo e investimento, e à medida que o projeto avança, os custos tendem a aumentar. Portanto, é de extrema importância tomar decisões cuidadosas durante o processo de desenvolvimento, buscando um equilíbrio entre a flexibilidade para ajustes e a necessidade de evitar retrabalhos significativos.

Conduzir o processo de desenvolvimento de produtos com maturidade e coerência é imprescindível para maximizar a eficiência e minimizar os custos, garantindo, assim, um produto final de alta qualidade, que atenda plenamente às expectativas dos clientes e ao mercado. A análise criteriosa das informações disponíveis em cada etapa e a consideração das implicações de cada movimento no PDP são fatores cruciais para o sucesso do projeto e para o alcance dos objetivos estabelecidos.

Em seguida, serão apresentados com um maior detalhe teórico os Projetos Preli-

minar e Detalhado, que são o foco deste trabalho acadêmico, haja vista a realização das etapas anteriores por Machado (2023).

2.2.1 Projeto Preliminar

Com o Projeto Conceitual realizado, parte-se às definições de formas e funções para os sistemas do produto, bem como definição de *layout*, materiais, primeiros projetos, cálculos e simulações, dentre outros, sempre respeitando o que se definiu das especificações-meta. Logo após, é realizado um estudo e realização de modelos e protótipos, podendo (ou não) se desenvolver a um MVP, o que permite um orçamento preliminar.

Nesta fase do Processo de Desenvolvimento de Produtos, são tomadas decisões cruciais quanto à continuidade do conceito previamente selecionado no Projeto Conceitual ou a necessidade de desenvolver um novo conceito. Um dos aspectos importantes nesta etapa é a seleção dos componentes que serão utilizados no produto. Isso envolve a escolha cuidadosa de peças, componentes e elementos que comporão a estrutura e o funcionamento do produto final (BACK *et al.*, 2008; ROZENFELD *et al.*, 2007; JUNIOR, 2014).

O Projeto Preliminar também é crucial para a avaliação de aspectos de viabilidade econômica, escalabilidade de produção e possíveis ajustes necessários para que o produto atenda aos requisitos de qualidade, desempenho e funcionalidade esperados pelos clientes. Assim, durante essa etapa do PDP, as bases para a concretização do produto são estabelecidas, permitindo o avanço para o Projeto Detalhado, onde todos os aspectos técnicos serão minuciosamente especificados para dar continuidade à sua execução.

Ao definir os componentes e os sistemas que serão utilizados, define-se a arquitetura geral do produto, que pode ser integrada — na qual uma função pode ser distribuída a várias partes do produto, proporcionando uma maximização de desempenho; geralmente para sistemas definidos por peças únicas e exclusivas — ou pode ainda ser em blocos — funções bem definidas, bem estruturadas e individualizadas; permite que o custo dos componentes sejam minimizados.

A validação do produto envolve a construção de um modelo, um protótipo e/ou um MVP. O modelo é uma representação do objeto, podendo ter escala ampliada ou reduzida em relação ao produto, que visa apresentar o produto ao público, avaliar o comportamento dele e a interação entre os componentes, e desenvolver a visualização espacial do produto para possíveis modificações.

O protótipo, por sua vez, é um avanço em relação ao modelo, sendo o primeiro produto fiel ao projeto em dimensões, funcionalidade e construção. Ele visa testar o produto de formas que sua construção seja o mais simples possível para evitar gastos desnecessários e só deve ser construído quando estritamente necessário.

Para que o modelo e/ou protótipo cumpram sua função elementar de validar os produtos, eles devem ter seu propósito claramente definido, escolher o que será medido, coletar dados e interpretá-los, aplicando os resultados ao produto. Para isso, os módulos

específicas, visam atender a necessidade dos clientes).

Quando os módulos estão definidos e determinados, passa-se ao esboço dos componentes e do produto — seja à mão ou com auxílio do computador —, listando todas as informações necessárias conforme a necessidade, bem como os métodos de fabricação e os materiais que atendam às solicitações de qualquer tipo. Isso permite saber se haverá a necessidade de alterar ou não os módulos conforme foram previamente idealizados. Em seguida, é realizada a integração dos aspectos do produto, na qual a montagem do produto permite as adaptações finais necessárias visando atender às especificações-meta.

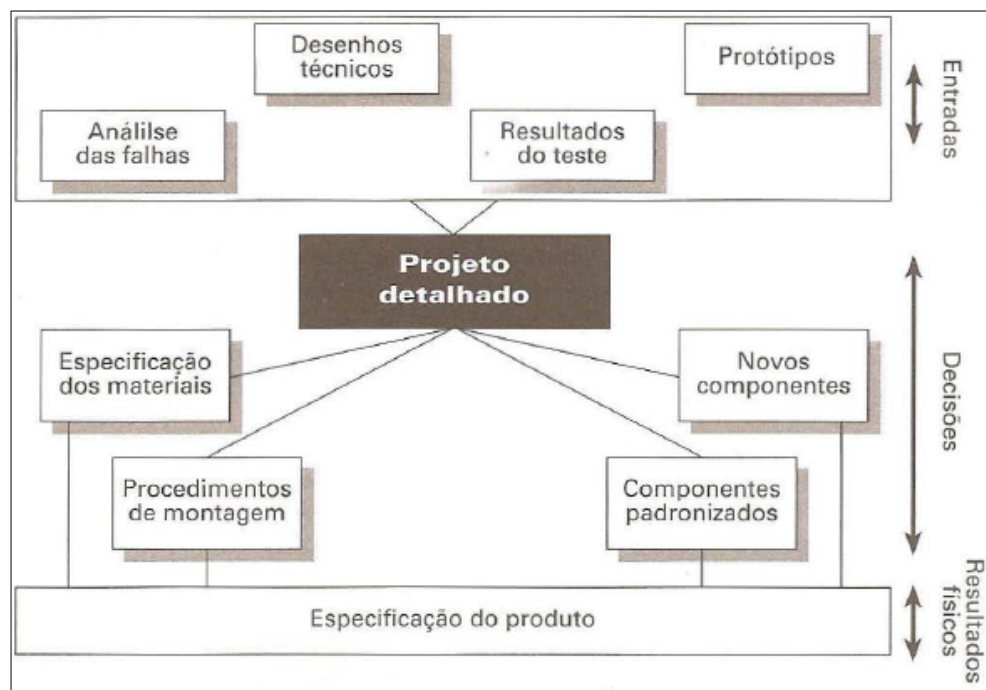
Embora não seja um passo obrigatório para esta etapa, o MVP é uma versão simplificada do produto que será comercializado visando validação dos clientes e para possíveis melhorias, medindo a aceitação dos clientes e a reação do mercado ao produto por meio do recebimento de *feedbacks* diretamente do cliente.

De forma geral, Back (2008) traz um fluxograma que resume bem essa parte, deixando a parte visual bastante intuitiva entre as etapas de um PDP na Figura 3.

2.2.2 Projeto Detalhado

Após as etapas do Projeto Preliminar, levando em consideração os dados coletados e os dimensionamentos, desenhos, montagens, seleção de materiais e orçamentos feitos de forma superficial, um aprofundamento no desenvolvimento do projeto se faz necessário, tendo em vista que agora será entregue ao mercado a versão final do projeto.

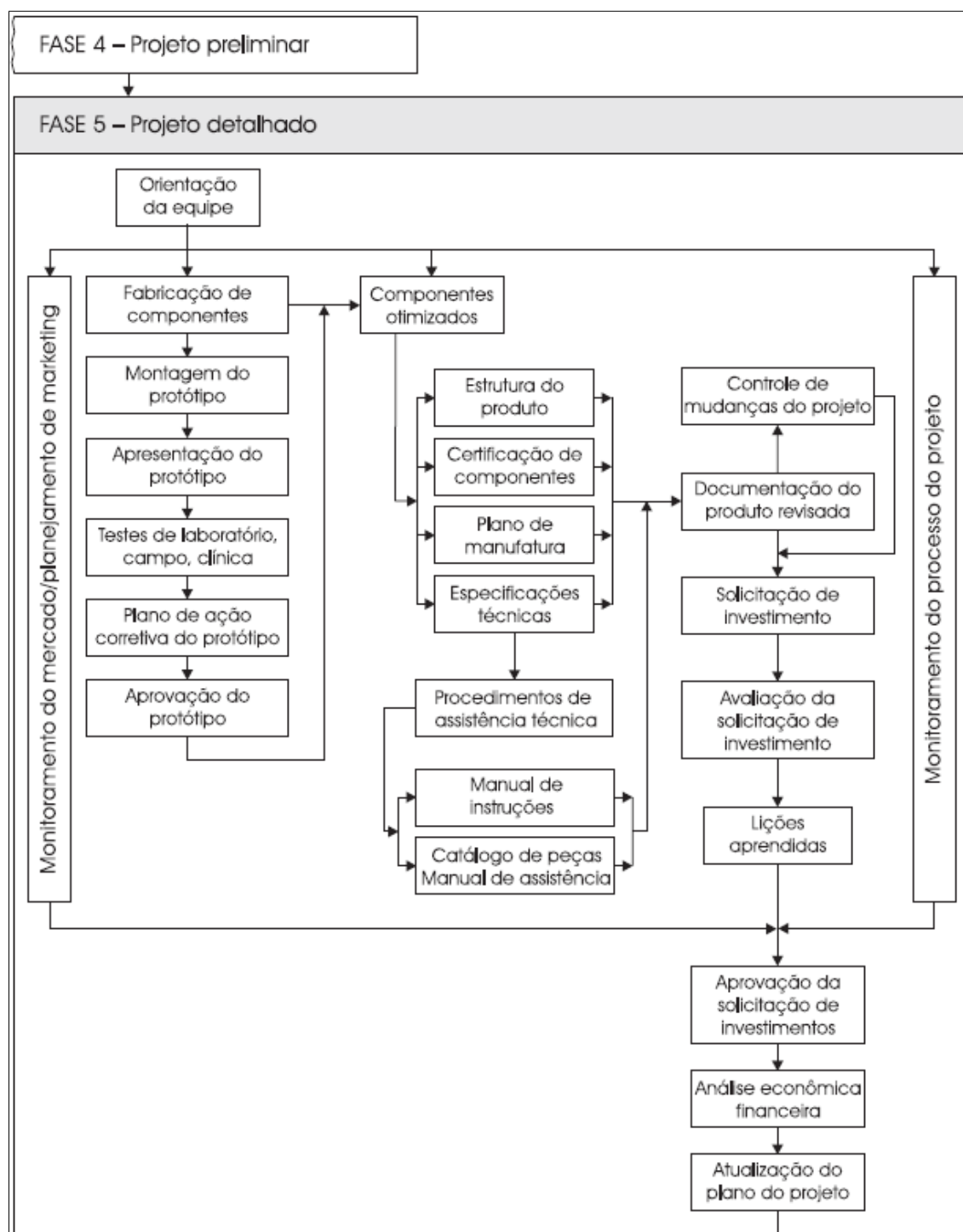
Figura 4 – Relações entre entradas e saídas do Projeto Detalhado.



Fonte: Baxter (1998)

Essa fase visa formalizar tudo o que foi desenvolvido, envolvendo cada sistema e subsistema selecionados, definidos e desenvolvidos até o Projeto Preliminar. Então, tendo em vista essa formalização, é gerada uma documentação própria do produto para permitir sua produção, levando em conta as dimensões, tolerâncias, acabamentos, materiais, custos e demais definições que se fizerem necessárias ao produto final. Aqui também são realizadas

Figura 5 – Fluxograma do Projeto Detalhado.

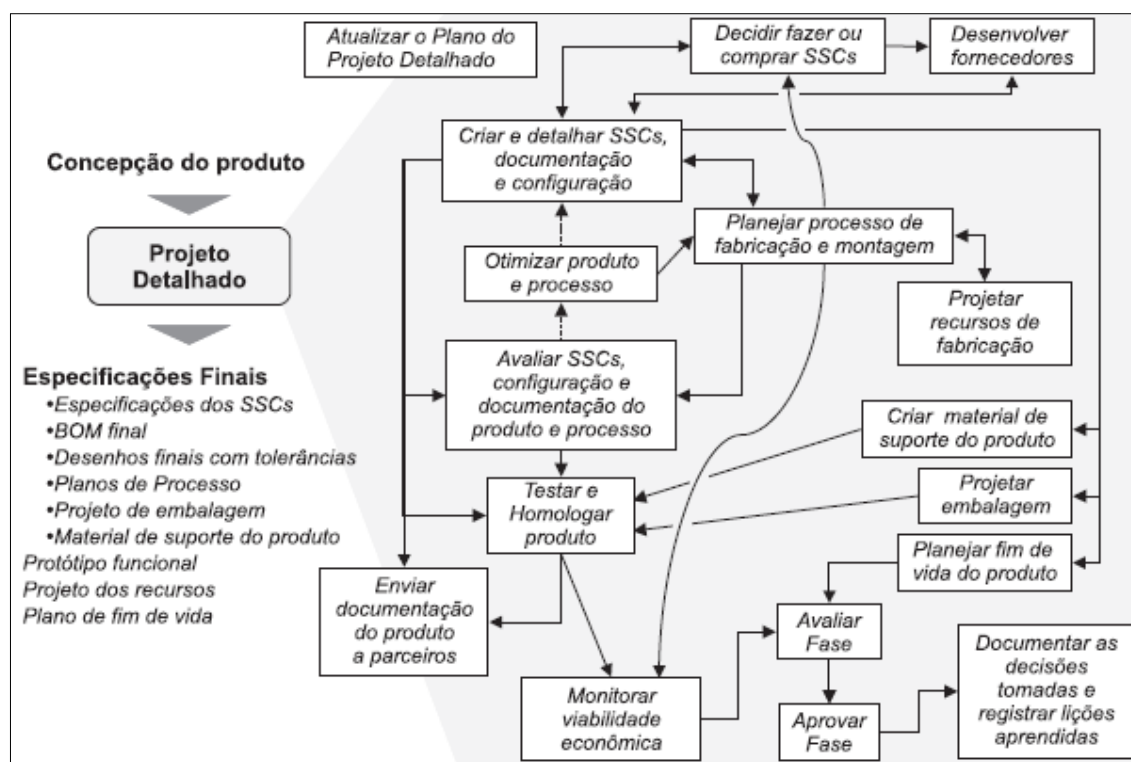


Fonte: Nelson Back (2008)

as versões finais dos desenhos dos componentes, bem como as instruções para montagem (manual do produto). As tolerâncias definidas devem respeitar os processos de fabricação, os materiais e o acabamento solicitado. Vale ressaltar que é preferível existir o material com características já comercializáveis, tendo como objetivo diminuir todo o tempo e processos de personalização, trazendo uma diminuição nos custos (JUNIOR, 2014).

Back (2008) defende ainda que nessa fase seja detalhado o plano de manufatura, preparada a solicitação do investimento e concluídos os testes laboratoriais e de campo, enquanto analisam-se algumas questões relativas à segurança e qualidade do produto, como vê-se no fluxograma apresentado em sua obra na Figura 5.

Figura 6 – Informações principais e dependências entre as atividades da fase de Projeto Detalhado.



Fonte: Rozenfeld (2007)

Rozenfeld (2007) traz, de forma mais visual, um resumo do que se deve tratar nessa fase por meio do fluxograma mostrado na Figura 6. De forma mais resumida, Baxter (1998) traz o que é esperado como resposta do Projeto Detalhado e o que se espera que contenha nele (Figura 4).

3 METODOLOGIA

Para este projeto, foi conduzida uma pesquisa de finalidade aplicada, com objetivos descritivos, adotando uma abordagem quantitativa e qualitativa, através do método hipotético-dedutivo. Como fundamentos metodológicos, utilizaram-se coleta de dados e procedimentos bibliográficos, experimentais e de campo.

Com o intuito de alcançar os objetivos propostos, o autor deste trabalho empregou as abordagens mencionadas na fundamentação teórica, a qual compreende um conjunto abrangente de diversas referências bibliográficas essenciais, devidamente listadas e explicadas. Essa revisão teórica permitiu compreender o estado atual do conhecimento na área de estudo, identificar os principais conceitos, teorias e abordagens utilizadas por pesquisadores anteriores e estabelecer uma base sólida para orientar o próprio estudo.

As próximas seções deste trabalho abordarão as atividades e procedimentos adotados para a geração, coleta e organização dos dados dessa pesquisa, embasados nas análises e estudos realizados, conforme representado no fluxograma da Figura 7.

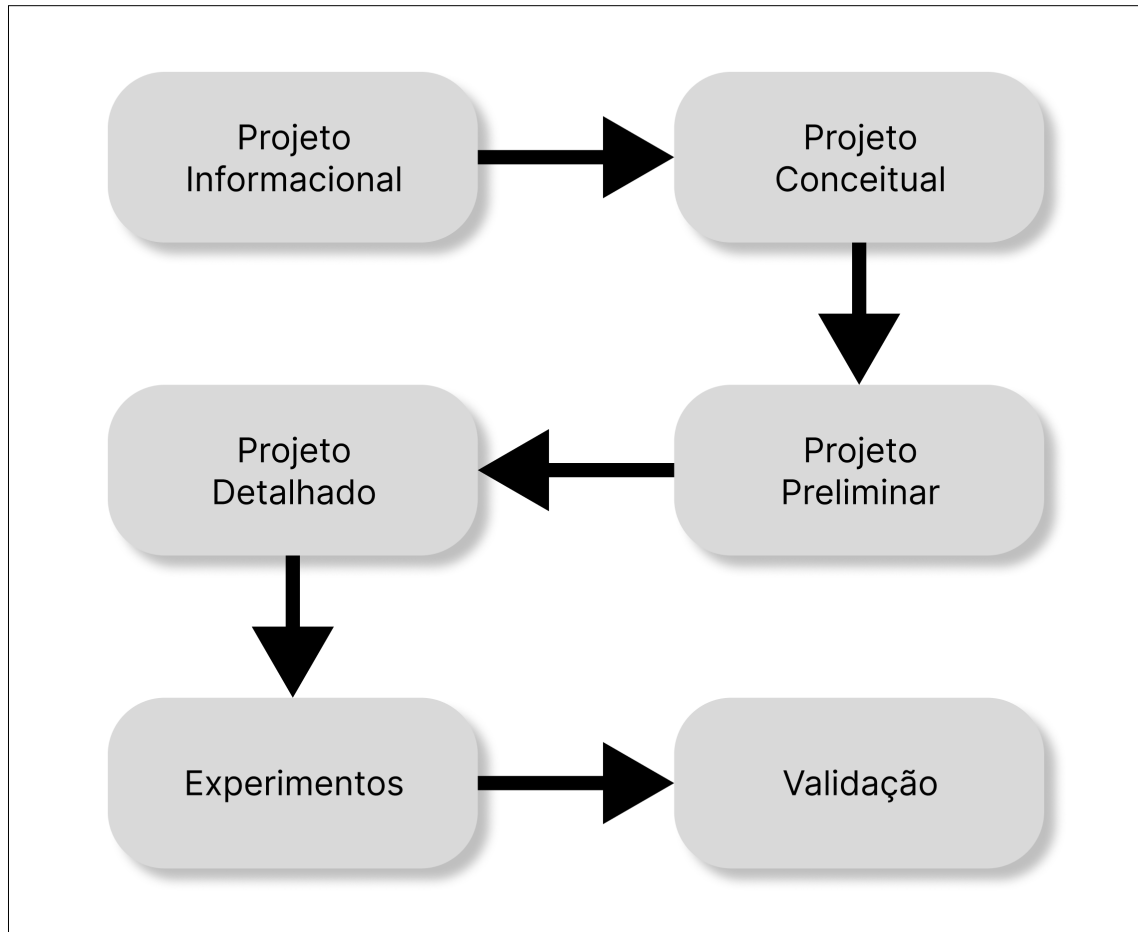
No Projeto Preliminar, foi realizado um estudo dos principais métodos utilizados para a medição de tensão e de corrente utilizados no contexto atual. Já no Projeto Detalhado, orçamentos foram levantados em relação à produção do *hardware* e da carcaça física. Em seguida, experimentos foram conduzidos e validados por meio de um multímetro externo ao sistema.

Como explicado anteriormente, a formulação desse trabalho se deu pela utilização dos resultados obtidos pelo grupo de pesquisa até a etapa de Projeto Conceitual (MACHADO, 2023). Por esse motivo, a fundamentação teórica dos passos anteriores ao Projeto Preliminar não se faz necessária, bastando apenas a análise e reflexão sobre as Figuras 2 e 7.

3.1 PROPOSTA DO TRABALHO

Este trabalho tem como enfoque o desenvolvimento, execução e coleta de dados do *software* e do *hardware*, tendo em vista a escassez de produtos com um *hardware* que permita a implementação de um *software* diferente do originalmente colocado pela empresa fornecedora dos equipamentos de geração de energia e pela concessionária de energia elétrica, tudo isso de forma a possibilitar uma produção em larga escala do sistema físico, de baixo custo de produção que sirva de fonte de aprendizado e investigação acadêmica. Após o desenvolvimento do Projeto Preliminar, foi desenvolvido o protótipo do *hardware* e, posteriormente, um protótipo de MVP com finalidade comercial, constituído tanto do *hardware* quanto do *software* já com as suas funcionalidades integradas em formatos simplificados.

Figura 7 – Fluxograma geral de projeto do produto



Fonte: Autor (2022)

3.2 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

A priori, o protótipo foi realizado em testes e simulações em *softwares* amplamente utilizados mundialmente no âmbito da Engenharia próprios para estas atividades em ambiente computacional.

As simulações, os testes e o projeto do *hardware* foram feitos utilizando os *softwares* Proteus, Falstad e LTspice. O protótipo então foi montado em laboratório e testado de forma a medir a precisão que o equipamento é capaz de alcançar, visando otimizar e melhorar ao máximo a precisão da medição do consumo de energia com os componentes eletrônicos de resolução aceitável ao projeto. Foi utilizado um transformador de tensão variável (*variac*) e o sinal proveniente de uma saída de áudio P2 como fonte, simulando a rede elétrica e suas variações.

O *software* possui três áreas, que foram desenvolvidas em paralelo: o código armazenado na memória do microcontrolador ESP32 foi feito no *software* VSCode na linguagem C e C++; o *front-end* da aplicação de gerenciamento foi feito no *framework* Flutter e o *back-end* da aplicação de gerenciamento foi feito no banco de dados em nuvem Firebase.

Após o desenvolvimento de todas as etapas, o sistema foi testado de forma integrada e os resultados foram colhidos, almejando a comparação com testes realizados por um multímetro.

A carcaça do produto foi desenvolvida no *software SolidWorks* no Projeto Conceitual pelo grupo de pesquisa e o modelo 3D foi exportado em formato adequado à impressão (.stl), que foi realizada em máquina presente no laboratório do Prof. Dr. Justo Emilio Alvarez Jacobo, localizado no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco.

Para finalizar, uma análise foi realizada sobre o completo desenvolvimento do produto, objetivando melhorias do projeto no futuro.

4 DESENVOLVIMENTO

No início do desenvolvimento do trabalho, alguns tópicos relevantes sobre o PDP foram explorados com base nas metodologias progressivas apresentadas por Rozenfeld (ROZENFELD *et al.*, 2007) e por outros autores. Essas abordagens ofereceram uma estrutura coesa ao processo e a abordagem sistemática dos Projetos Preliminar e Detalhado possibilitou a construção de uma base sólida para a criação do protótipo, seguido pelo desenvolvimento do MVP, como será visto a seguir.

4.1 PROJETO PRELIMINAR

O objetivo da fase de Projeto Preliminar foi determinar a configuração do produto, iniciando a partir dos princípios de solução escolhidos no Projeto Conceitual. Dessa forma, as soluções foram configuradas de modo a permitir seu funcionamento e produção em conformidade com as especificações-meta.

Cada subsistema foi analisado separadamente, visando desenvolver um primeiro modelo eficiente e com a menor complexidade possível. A independência de cada subsistema trouxe facilidade a esse processo, visto que foi possível fazer quantas combinações fossem possíveis. Por exemplo, se havia 3 soluções para cada subsistema, existiram 9 combinações possíveis. A análise de cada subsistema ocorreu por meio do esboço preliminar de suas soluções de projeto, assim como análises qualitativas e quantitativas dessas soluções. Ou seja, cada solução apresentada e estudada possuía dados acerca de materiais, dimensões e produtos que poderiam ser utilizados.

4.1.1 Configurações do modelo para o subsistema “*hardware*”

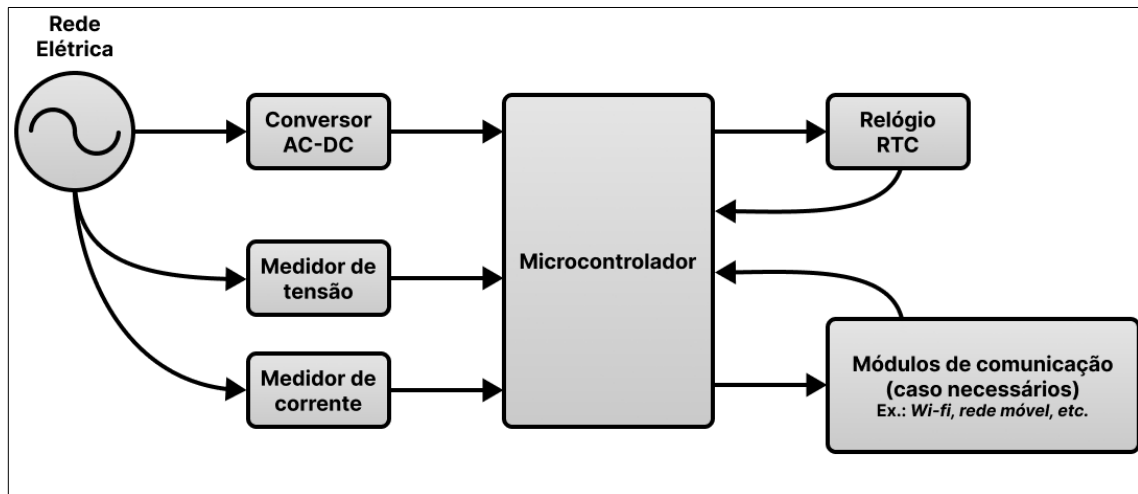
O *hardware* do sistema poderia ter diversas configurações. Algumas delas serão mostradas a seguir e seu funcionamento será descrito.

A Figura 8 demonstra a composição genérica deste subsistema. O conversor AC-DC é alimentado diretamente pela rede elétrica para entregar uma tensão de alimentação estável e controlada ao microcontrolador. O microcontrolador, por sua vez, alimenta circuitos auxiliares, como o RTC e módulos de comunicação e recebe dados destes circuitos secundários, como a data e hora e os dados recebidos na comunicação. Por fim, circuitos medidores de tensão e corrente são ligados diretamente à rede elétrica e seus resultados são inseridos nas portas analógicas do microcontrolador. Estes dados são interpretados pelos conversores AD do microcontrolador.

4.1.1.1 Medidor de tensão

Duas abordagens são comuns ao implementar esse tipo de circuito de medição. A primeira segue a seguinte metodologia: primeiramente diminuir a amplitude do sinal

Figura 8 – Diagrama de blocos do subsistema “hardware”



Fonte: Autor (2022)

da rede elétrica de 340 V para uma de 2.5 V em torno do zero e, em seguida, aplicar um *offset* de 2.5 V para elevar a tensão resultante a um sinal de 0 a 5 V. A segunda abordagem também tem como primeiro passo a diminuição da amplitude do sinal da rede elétrica, contudo, em vez de gerar uma amplitude de 2.5 V em torno do zero, ela gera uma amplitude de 5 V em torno do zero e, em vez de aplicar um *offset* ao sinal resultante, ela aplica uma retificação de onda completa ao sinal, ou seja, transforma todas as tensões negativas do sinal em tensões positivas, gerando uma tensão pulsada de 0 a 5 V.

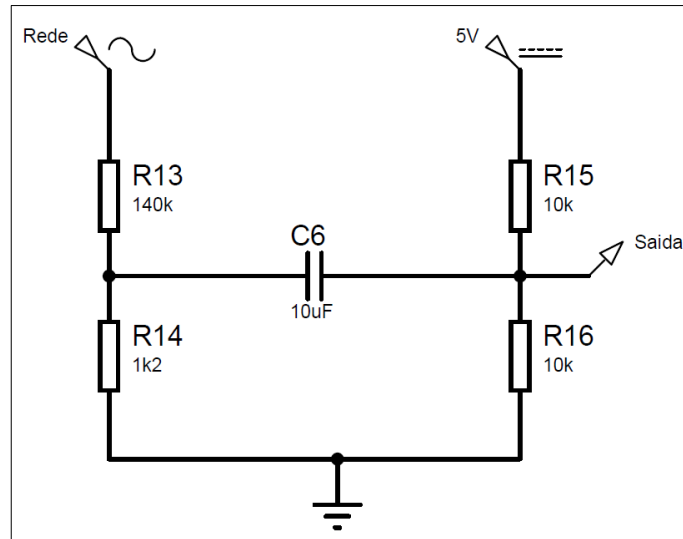
4.1.1.1.1 Configuração 1: *offset*

A Figura 9 mostra uma possibilidade de circuito que segue a primeira abordagem. Para analisar tal circuito, utilizou-se o método da superposição (MALVINO; BATES, 2016). Numa análise de corrente contínua, todas as fontes de tensão alternada são desligadas e todos os capacitores são abertos. O circuito resultante é chamado circuito equivalente DC. Já numa análise de corrente alternada, todas as fontes de tensão contínua são desligadas e todos os capacitores são postos em curto-circuito. O circuito resultante é chamado circuito equivalente AC.

Para que o circuito fosse aplicável ao projeto, foi necessário que não houvesse tensões negativas, tendo em vista que isso influenciaria no funcionamento do produto, já que nem o microcontrolador, nem o ADC que foram utilizados não aceitam tensões abaixo de zero em suas entradas. Isso acarretou na necessidade da aplicação de um *offset* positivo, que consistiu em aplicar uma entrada de tensão contínua visando o deslocamento da tensão média do circuito no sentido positivo, fazendo com que a tensão alternada variasse em valores maiores ou iguais a zero.

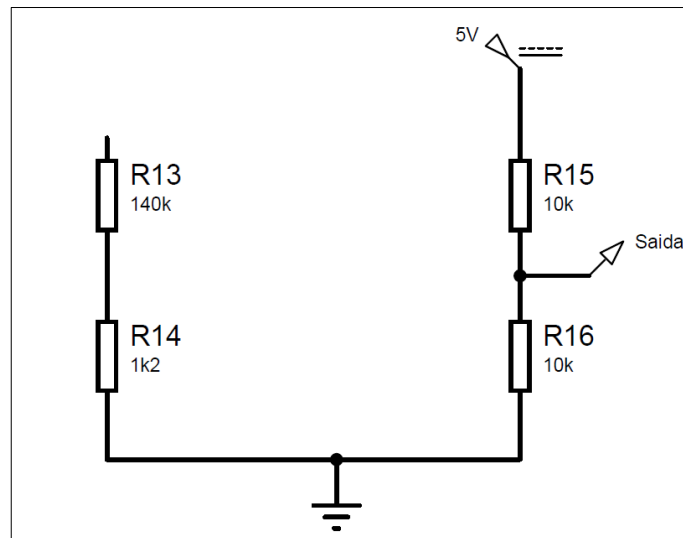
Numa análise DC, retirando-se a fonte AC e abrindo o capacitor C6, há corrente circulando apenas no braço de resistores do lado direito, como demonstra a Figura 10. A

Figura 9 – Primeira solução para circuito medidor de tensão



Fonte: Autor (2022)

Figura 10 – Análise DC da primeira solução para circuito medidor de tensão



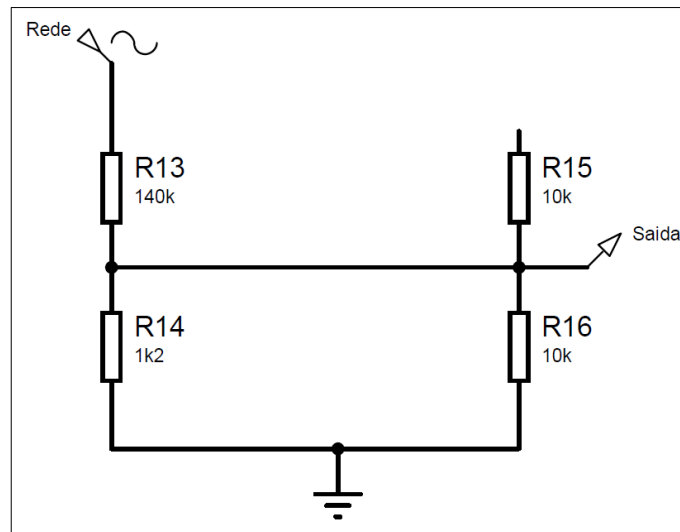
Fonte: Autor (2022)

saída do sistema é a saída de um divisor de tensão com resistores iguais, ou seja, se a entrada é de 5 V, a saída será de 2.5 V.

Numa análise AC, retirando a fonte de tensão de 5 V e pondo em curto o capacitor de acoplamento C6, como demonstra a Figura 11, sobram apenas o braço de resistores do lado esquerdo do circuito e o resistor inferior do lado direito. A saída do sistema é a saída de um divisor de tensão entre o resistor de 140 k Ω e o resistor equivalente gerado pela associação em paralelo dos resistores de 1.2 k Ω e 10 k Ω . Este sistema resulta em uma onda de tensão alternada de amplitude de, aproximadamente, 2.67 V em torno do zero.

O sinal resultante do circuito da Figura 9, portanto, é, pelo princípio da superposição, a soma dos sinais de saída resultantes das análises DC e AC. Logo, o sinal de saída é

Figura 11 – Análise AC da primeira solução para circuito medidor de tensão



Fonte: Autor (2022)

aproximadamente um sinal alternado de amplitude 2.67 V em torno dos 2.5 V de *offset*.

Na simulação do circuito completo, o resultado foi um sinal alternado com amplitude em torno de 2.52 V em torno dos 2.5 V . Isto se deu pelas perdas associadas ao acoplamento capacitivo, que também oferece uma impedância associada à frequência do sinal de entrada. Ao realizar o cálculo utilizando a impedância capacitiva do capacitor de acoplamento, chegou-se a uma tensão de 2.58 V alternada em torno dos 2.5 V , o que representa uma diferença de 2.38% do resultado calculado para o resultado simulado.

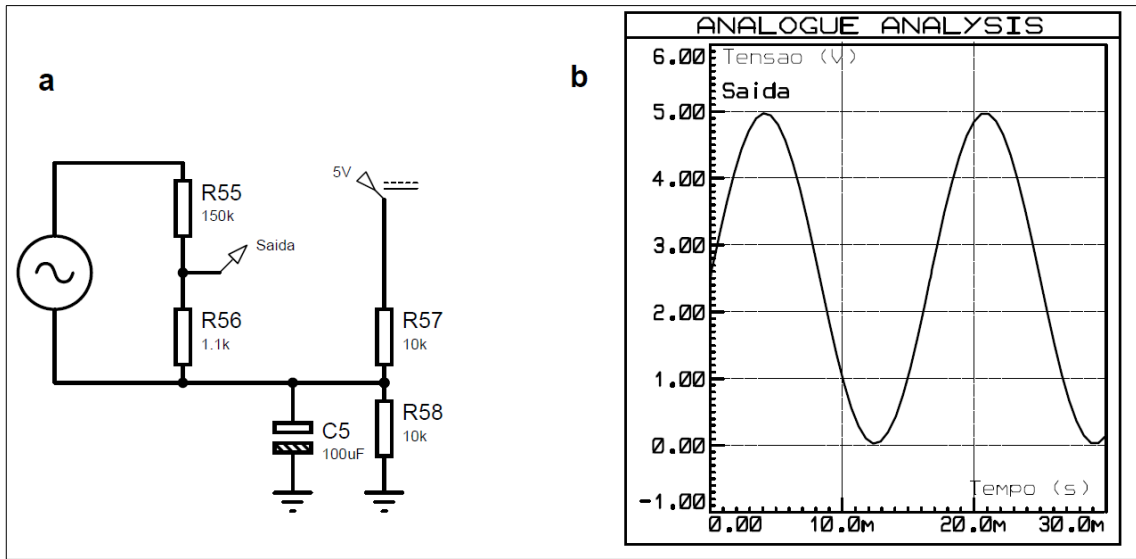
4.1.1.1.2 Configuração 2: *offset*

Uma outra solução para esta primeira abordagem é mostrada na Figura 12. Nesse tipo de configuração, a amplitude da tensão da rede elétrica é conformada para 0 a 5 V pelo divisor de tensão localizado à esquerda do circuito (R55 e R56). A tensão na base deste divisor (logo abaixo do resistor R56) é de 2.5 V , que é proveniente do divisor de tensão localizado à direita do circuito (R57 e R58), que toma 5 V em sua entrada e possui resistores iguais (R57 e R58). O capacitor eletrolítico C5, localizado entre os dois divisores de tensão, tem a função de filtrar sinais de frequências elevadas (ruídos).

4.1.1.1.3 Configuração 3: retificação

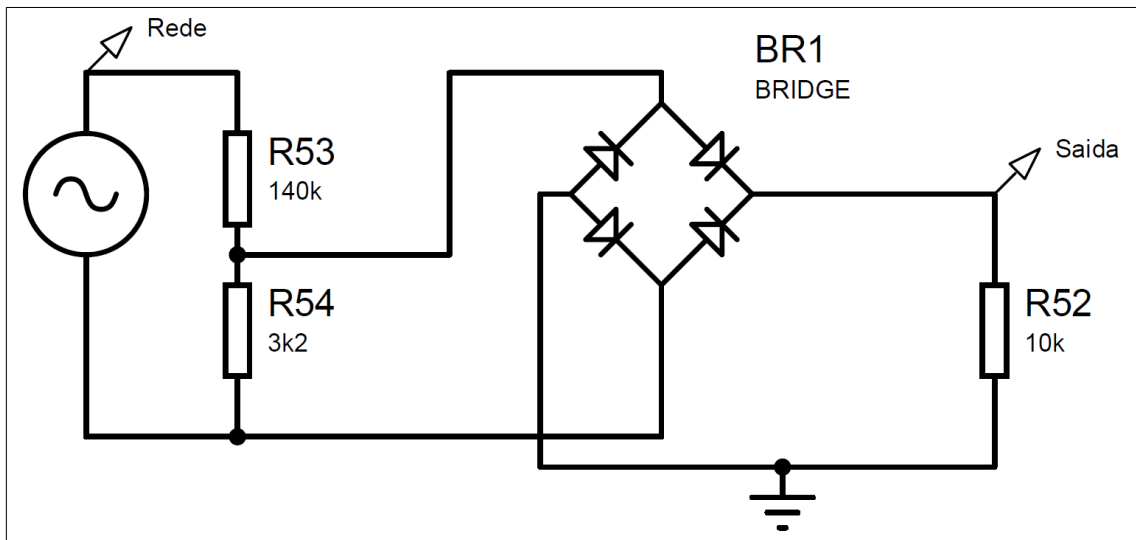
A terceira solução, que utiliza a retificação do sinal de entrada, é a mais simples dentre as duas configurações mostradas no trabalho que utilizam esse método. Esse tipo de sistema consiste em utilizar uma ponte retificadora de onda completa (quatro diodos; BR1) e um divisor de tensão (R53 e R54), assim como mostra a Figura 13.

Figura 12 – Segunda solução para circuito medidor de tensão. a: Circuito eletrônico de medição; b: Resposta do circuito (tensão no tempo)



Fonte: Autor (2022)

Figura 13 – Circuito medidor de tensão por retificação



Fonte: Autor (2022)

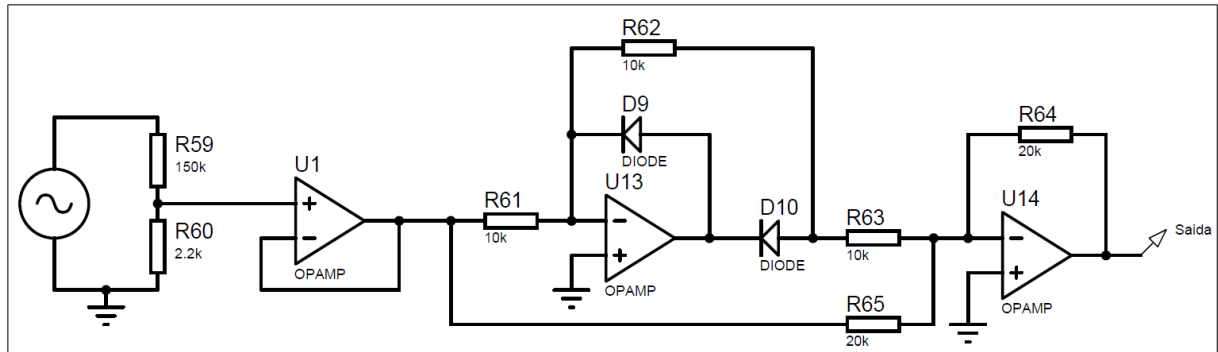
Esse circuito resulta em uma onda pulsada que segue a tensão de entrada. Entretanto, como os diodos oferecem uma perda dada por uma queda de tensão de 0.7 V cada intrínseca ao acoplamento de semicondutores, a resistência do divisor de tensão R53-R54 deve ser compensada modificando-se o valor de R54 por meio de um potenciômetro.

4.1.1.1.4 Configuração 4: retificação

Com o objetivo de diminuir a perda pelos diodos — principalmente em pequenas amplitudes (abaixo de 1 V) —, foi desenvolvido o retificador de precisão. Uma abordagem

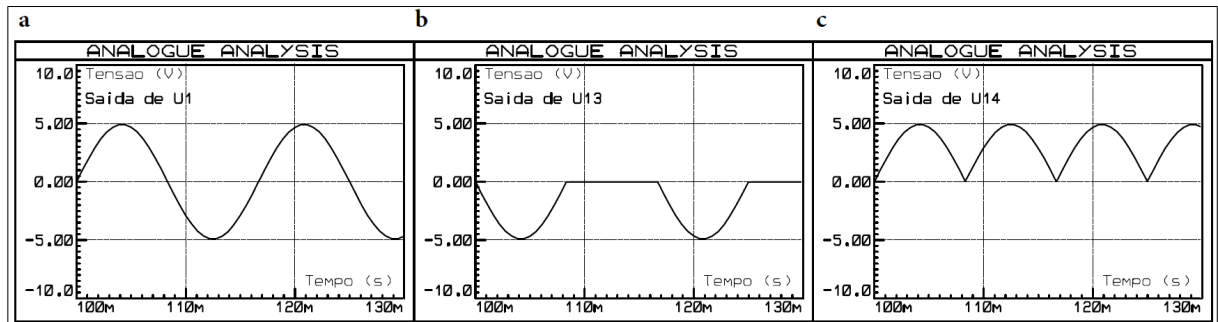
bastante comum é mostrada na Figura 14.

Figura 14 – Circuito medidor de tensão usando um retificador de precisão



Fonte: Autor (2022)

Figura 15 – Respostas do circuito medidor de tensão usando um retificador de precisão. a: Saída do amplificador operacional U1; b: Saída do amplificador operacional U13; c: Saída do amplificador operacional U14



Fonte: Autor (2022)

Nesse tipo de circuito, a tensão da rede é novamente conformada ao intervalo de -5 V a 5 V por meio do divisor de tensão localizado à esquerda de U1. Esta tensão colocada na entrada não inversora (+) do amplificador operacional U1 aparece na saída desse mesmo componente sem modificações, pois U1 está configurado como *buffer*, ou seguidor de tensão. Esta diferença de potencial, de -5 V a 5 V em relação ao terra (0 V) é colocada tanto na entrada inversora (-) de U13 quanto na entrada inversora de U14. O amplificador operacional U13, configurado como inversor com ganho 1 (dado pela relação entre os resistores R61 e R62), apenas mantém intactos em sua saída os sinais positivos provenientes do sinal original aplicado em seu terminal inversor. Já o amplificador operacional U14 é configurado como somador inversor com ganho 1 para o sinal proveniente da saída de U1 e com ganho 2 para o sinal proveniente da saída de U13. Portanto, o sinal de saída é igual ao inverso da soma do sinal de entrada (saída de U1) com o dobro do sinal de saída de U13, ou seja, um sinal retificado totalmente positivo de 0 a 5 V . As respostas deste sistema são melhores apresentadas na Figura 15.

Como os primeiros modelos deveriam ser produzidos com a mínima complexidade possível para o seu funcionamento, foi escolhida a primeira solução dos circuitos medidores de tensão por *offset* (Figura 9) para a medição da tensão da rede elétrica.

4.1.1.2 Medidor de Corrente

Uma forma simples e intuitiva de medir a corrente elétrica em um circuito é transformar esta corrente em uma tensão e implementá-la em uma das portas analógicas do microcontrolador ou na entrada de um ADC. Utilizando esta abordagem, foi possível reutilizar os circuitos previamente estudados para a medição de tensão. Para interpretar uma corrente na forma de tensão elétrica, seria preciso conhecer o valor dos resistores por onde esta corrente elétrica flui. Estes resistores de valores conhecidos são chamados de “resistores *shunt*” e possuem geralmente valores muito baixos (na casa dos $m\Omega$) para que causem uma queda de tensão desprezível no circuito. Consequentemente, mantendo o objetivo de desenvolver circuitos simplificados para o primeiro protótipo, foi escolhida a segunda solução dos circuitos medidores de tensão por *offset* (Figura 12) para a medição da corrente da rede elétrica, a única diferença presente no circuito medidor de corrente é o método de implementação do TC e isto fica a critério do modelo de TC que seria utilizado, já que cada fabricante e cada modelo de TC tem suas características e oferecem uma saída específica (geralmente alguns mV).

4.1.2 Prototipagem e testes

A partir do que foi planejado nas etapas anteriores no âmbito global do PDP (desde o planejamento do produto e a pesquisa de mercado até a seleção dos componentes eletrônicos e a programação), foi possível desenvolver um protótipo de teste. Esse protótipo permitiu que se realizasse a leitura na entrada da tensão que chega ao circuito. Com esse dado e com a medição indireta da corrente (utilizando um transformador de corrente), foi possível calcular a potência sendo consumida, o que proporcionou uma leitura efetiva da energia que está sendo consumida e, consequentemente, uma previsão da conta de energia. Além disso, o mesmo processo permite saber quanta energia estaria sendo gerada pelo mesmo princípio.

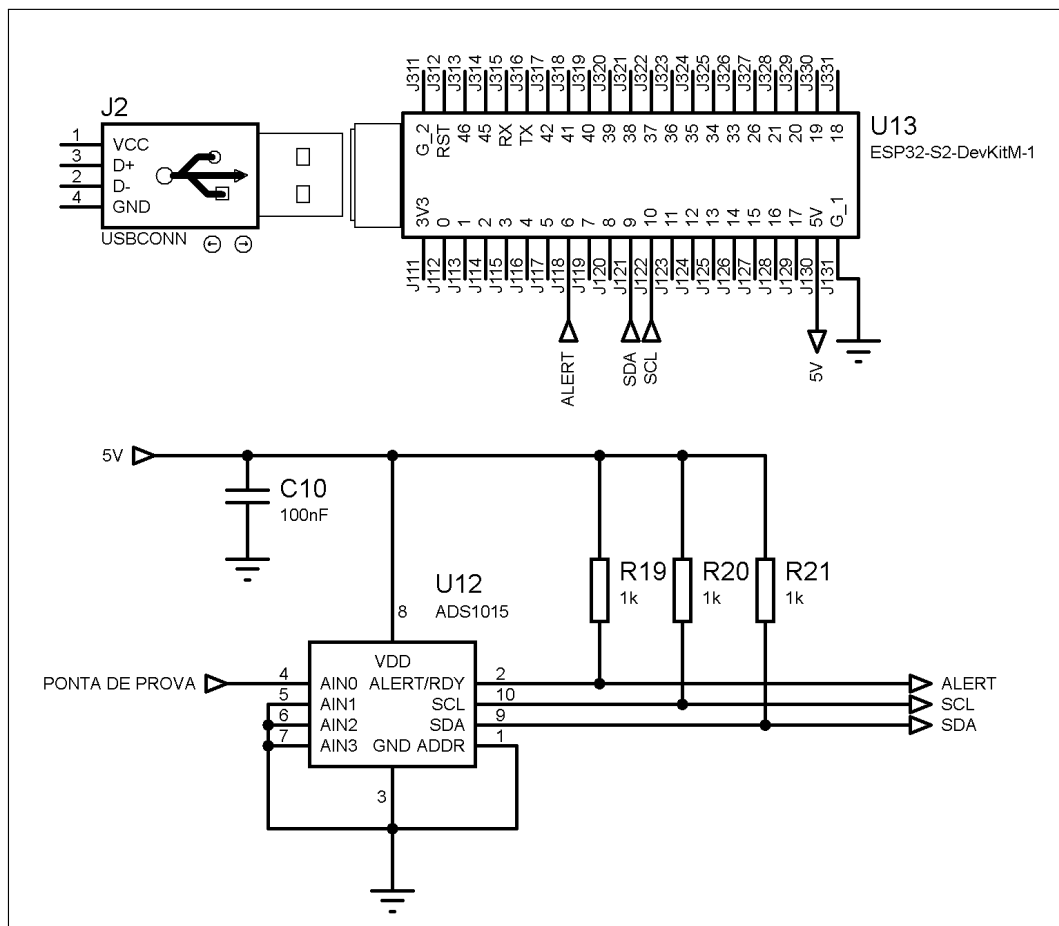
4.1.2.1 Prototipagem e testes do hardware

Uma das características mais notáveis e decisivas que tornam o ESP32 um dos chips mais amplamente adotados para aplicações em IoT nos dias atuais é a sua capacidade de incorporar funcionalidades essenciais, como *Wi-Fi* e *Bluetooth*, diretamente no próprio dispositivo. Isso confere ao ESP32 uma notável vantagem em termos de conectividade, facilitando a interação com redes sem fio e dispositivos periféricos.

No âmbito do atual projeto, a escolha do ESP32 se mostrou fundamental devido à sua capacidade de empregar dois núcleos de processamento. Essa abordagem eleva consideravelmente a capacidade de processamento de dados, permitindo uma análise e transmissão mais rápida e eficiente das informações coletadas. Adicionalmente, essa estratégia viabiliza a manutenção da conectividade ininterrupta, garantindo uma comunicação estável com a internet sem interferências.

Utilizando componentes eletrônicos simples, como resistores e capacitores, foi possível desenvolver o circuito demonstrado na Figura 16 e realizar testes iniciais do ADC utilizando os componentes provisoriamente acoplados a uma *protoboard* e ligados ao ESP32, que foi alimentado por meio da entrada USB de um *notebook* (5 V).

Figura 16 – Circuito de teste do ADC ADS1015

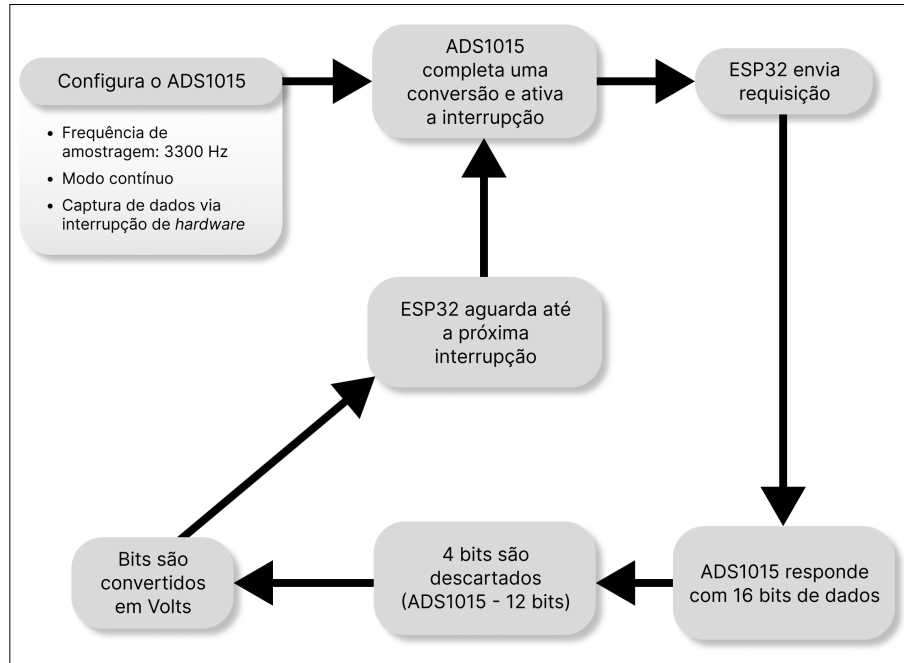


Fonte: Autor (2023)

Visto que podem haver erros sistemáticos em relação ao valor real devido a fatores como ruídos e perdas nos fios condutores, é geralmente utilizado um instrumento externo — como um multímetro de precisão — para calibrar o sistema. Com o código-teste de medição esquematizado no diagrama de blocos da Figura 17 feito por meio da modificação de uma biblioteca do sensor ADS1015, foi posicionada a ponta de prova de um multímetro Minipa ET-1002 no mesmo ponto em que o sistema estava analisando para que fosse possível

comparar os resultados, ou seja, verificar o erro entre o valor medido pelo multímetro e o valor obtido no sistema desenvolvido.

Figura 17 – Diagrama de blocos do código de teste do ADS1015



Fonte: Autor (2023)

A primeira medição de tensão, de aproximadamente $3,3V$ em relação ao GND (terra) do circuito, foi utilizada como parâmetro para a calibração do sistema. Após ter o sistema calibrado para a tensão especificada, foram posicionadas as duas pontas de prova — a do multímetro e a do sistema — em outro ponto; desta vez, em uma pilha de $1,5V$ de tensão nominal. Nesse caso, foi obtido pelo sistema um erro de 90 mV em relação ao instrumento calibrador.

O *datasheet* do ADC ADS1015 indica que o valor máximo para o erro é de 0.25 LSB para as condições básicas de operação (TEXAS INSTRUMENTS, 2023). Sabendo que o ADC possui 12 bits, porém, o bit mais significativo representa o sinal (positivo ou negativo), a Equação (1) define o valor máximo de erro que pode ser encontrado no dispositivo.

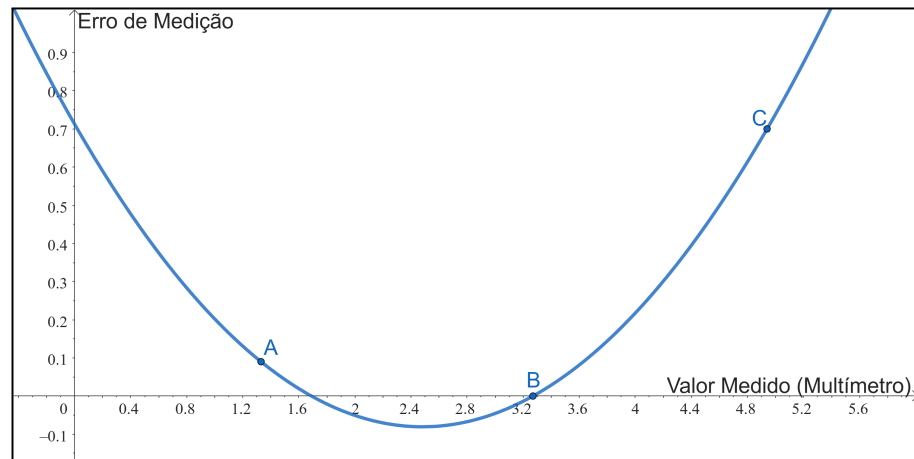
$$\Delta V_{\text{máx}} = \frac{5V}{2^{11}} * 0.25 \cong 611\mu V \quad (1)$$

Portanto, o valor encontrado, de 90 mV , é bastante acima do que o fabricante do ADC indica como aceitável.

Por fim, foram posicionadas as duas pontas de prova na referência da USB, de $5V$. Assim como no teste anterior, também houve um erro considerável nesta medição, desta vez de 700 mV .

Por meio de uma regressão polinomial de segundo grau, foi possível verificar a variação do erro de medição em relação ao ponto em que o sistema foi calibrado, assim como demonstra a Figura 18 — onde foi representado o erro de medição da primeira, da segunda e da terceira aferição (A, B e C, respectivamente) no eixo das ordenadas e o valor medido no eixo das abscissas.

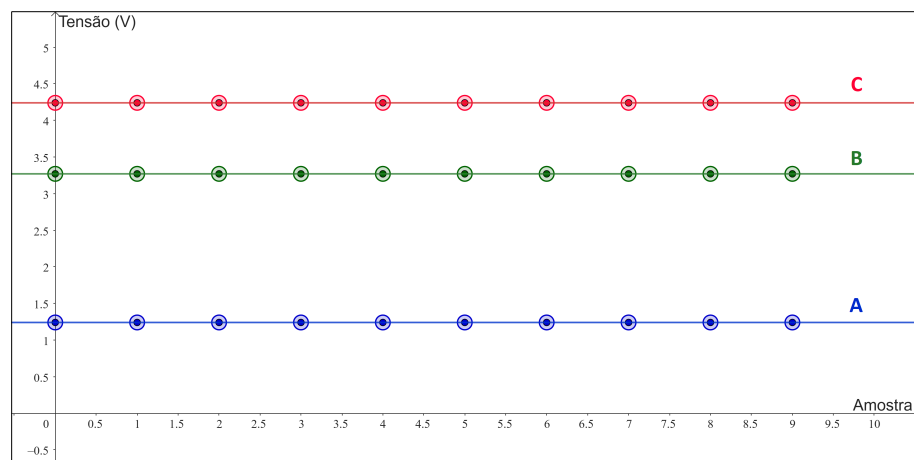
Figura 18 – Regressão polinomial de segunda ordem para demonstrar o erro das aferições A, B e C



Fonte: Autor (2023)

Contudo, a Figura 18 demonstrou que há dificuldades em relação à acurácia do protótipo. Já em relação à precisão do sistema, percebe-se, pela Figura 19, que as medições permaneceram extremamente estáveis. Logo, o resultado desse primeiro modelo revelou uma precisão elevada e uma acurácia muito baixa, além de uma não-linearidade nos resultados de medição.

Figura 19 – Precisão obtida nas aferições A, B e C pelo sistema desenvolvido



Fonte: Autor (2023)

Foi constatado, numa bateria de medições feita anteriormente pelo autor do trabalho, que todas as medições conseguiram uma acurácia de praticamente 100%, com um

erro máximo de aproximadamente $+2$ mV. Contudo, na nova bateria de medições, já em torno de um mês adiante daquela, houve o surgimento dos referidos erros elevados de medição. Estes erros provavelmente foram oriundos de dois principais fatores: da conexão instável dos fios com a *proto-board*, que produziram ruídos indesejados, visto que suas trilhas podem gerar impedâncias parasitas que poderiam influenciar no resultado de uma medição precisa; e de certas falhas nas soldas, como trincas e separação total, causando mau contato nas conexões.

Para sanar este problema, todas as conexões do circuito foram retiradas da *proto-board* e recolocadas cerca de duas a três vezes. Além disso, todas as soldas do ADC foram refeitas com instrumentos mais adequados e com maior cuidado.

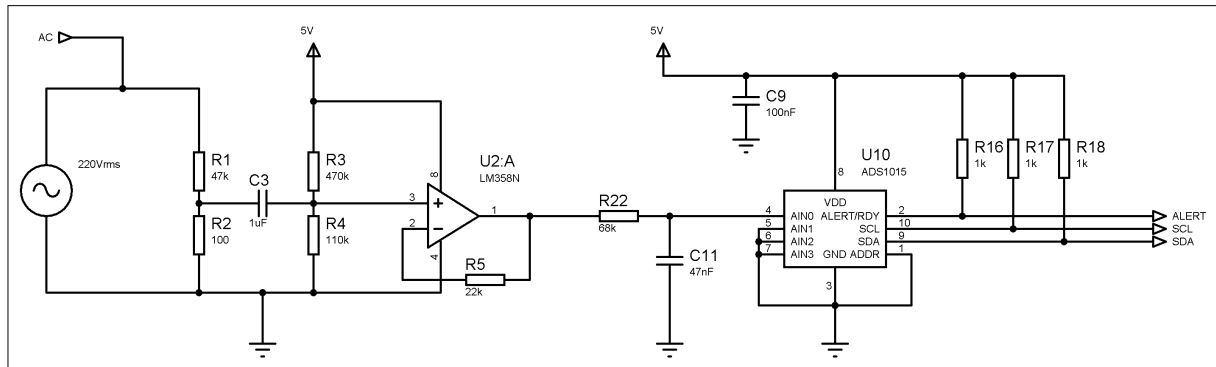
Ainda, tendo em vista a prejudicial falta de controle sobre o que está sendo feito na biblioteca encontrada, foi desenvolvida uma biblioteca própria, desta vez utilizando o *framework* do próprio fabricante do ESP32, o ESP-IDF internamente ao *software* VSCode. Desse modo, foi possível configurar todas as variáveis de modo específico ao projeto. O mais importante dessa mudança feita foi o fato de ganhar o controle sobre a estrutura da comunicação entre o ESP32 e o ADS1015 (I2C, ou *Inter-Integrated Circuit*).

Após estes procedimentos, foram feitos novamente testes análogos aos supracitados. Com a nova configuração, foram realizados testes por meio da medição de um circuito simples, que consiste em um divisor resistivo com um dos resistores substituídos por um potenciômetro. O resultado obtido foi a recuperação da acurácia antes experimentada — o erro médio obtido foi de $+2$ mV — e um ganho de performance do sistema, além de uma maior organização do circuito. A precisão, por sua vez, se manteve inalterada.

Sabendo que foi possível realizar medições em tensões relativamente estáveis e com baixo ruído, partiu-se diretamente para a utilização da rede elétrica residencial no circuito. A utilização da energia proveniente da concessionária local presume diversos cuidados. Em primeiro lugar, há grande risco de choque elétrico por meio de uma tensão considerada alta. Além disso, uma tensão (diferença de potencial) alta aplicada em um circuito é capaz de gerar — dependendo da resistência — uma corrente elevada, o que, se não for previsto, pode causar a queima de componentes ou eventuais incêndios. Com a utilização de um variac, instrumento definido por um transformador de enrolamento secundário variável, é possível atacar os problemas apresentados com duas características fundamentais: o transformador oferece um isolamento galvânico, fato que gera uma proteção crucial à prototipagem de circuitos, pois isola fisicamente o circuito do enrolamento secundário da rede elétrica; e a variação do enrolamento secundário permite ao projetista trabalhar com proporcionalidade e linearidade na tensão de entrada do sistema.

O circuito para a coleta de dados de tensão da rede elétrica é demonstrado na Figura 20. Para reduzir ruídos provenientes da rede elétrica, visto que não é possível, para o ADS1015, medir frequências acima de seu limite inerente (3300 Hz, em casos específicos), foi adicionada uma malha de filtro RC com frequência de corte de, aproximadamente,

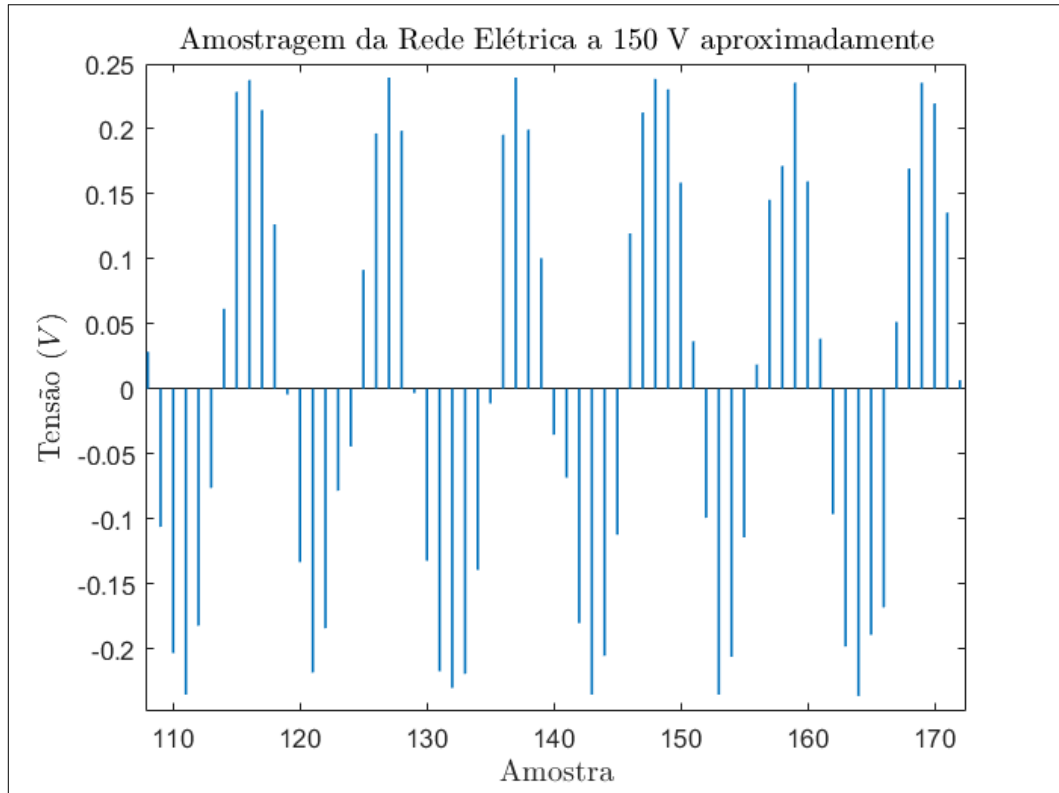
Figura 20 – Circuito de conformação de tensão



Fonte: Autor (2023)

71 Hz na saída do amplificador operacional LM358. Posteriormente, este circuito foi ligeiramente modificado para adquirir uma tensão da rede elétrica de, no máximo, 140 V (para trabalhar com menos riscos ao projetista, mas com a mesma linearidade) e o circuito de filtro RC também foi suavemente modificado para uma frequência de corte em torno de 100 Hz (para que haja um pequeno *gap* entre a frequência a ser medida — 60 Hz — e a frequência de corte).

Figura 21 – Resultado do experimento com a rede elétrica



Fonte: Autor (2023)

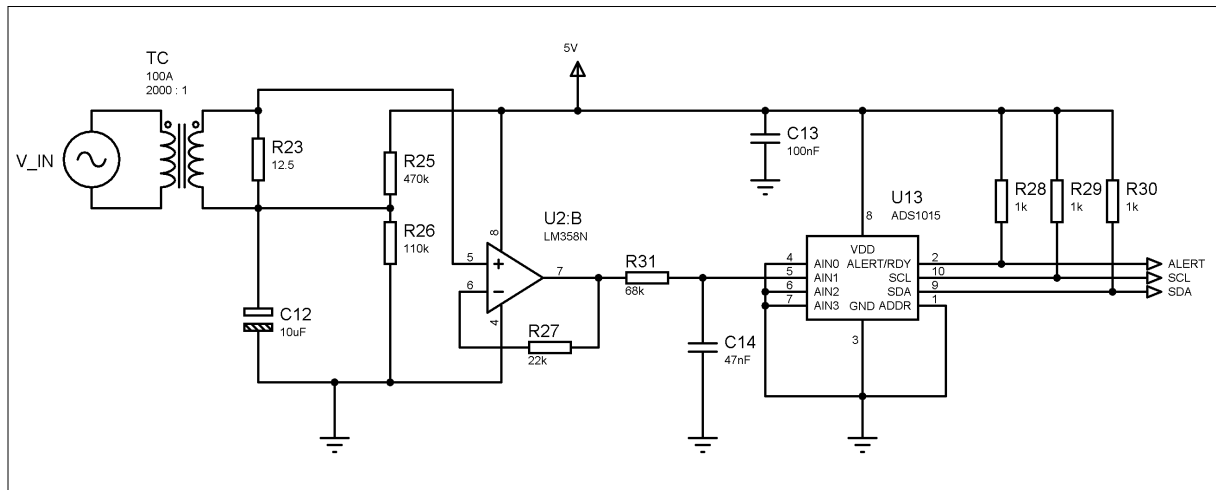
Portanto, haja vista a periculosidade de se testar um circuito diretamente com os 220 V_{rms} provenientes da rede elétrica, testou-se o circuito para uma tensão de, aproxi-

madamente, $150 V_{rms}$. O resultado deste experimento é demonstrado na Figura 21. Os dados da Figura 21 foram tratados de forma que fosse retirado o valor da média de toda a lista de dados, que girou em torno de $0.98 V$, para que a visualização se tornasse mais intuitiva.

O desenvolvimento do sistema de medição de tensão por si só representa a maior parte do processo de desenvolvimento de um medidor de energia feito pelo método presente neste trabalho. Isso se dá pelo fato de que a medição de corrente é indireta por meio de um TC, o que significa que será medida a tensão nos dois circuitos, já que, o *output* do TC é um sinal de tensão alternada linearmente proporcional ao *input*, que é a corrente elétrica (CHAPMAN, 2013).

Para a medição de corrente, foi desenvolvido o circuito apresentado na Figura 22, onde, utilizando-se do mesmo princípio anteriormente explicado, aplicou-se uma tensão de *offset* na saída do TC, obtendo-se, desta forma, um sinal sempre positivo, mas abaixo do valor-limite de $2 V$.

Figura 22 – Circuito de conformação de corrente



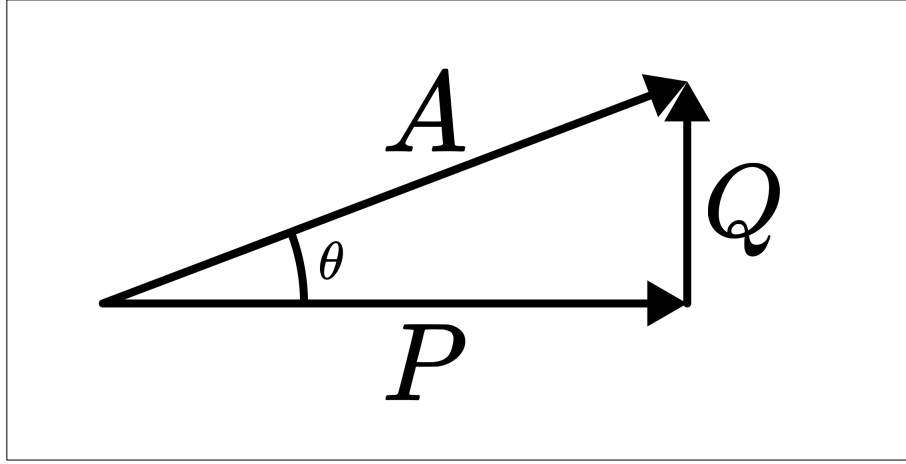
Fonte: Autor (2023)

À esquerda da Figura 22, nota-se a presença de uma fonte de tensão, que foi utilizada apenas com o objetivo de simular a presença de $100 A_{rms}$ de corrente (valor máximo efetivo que o transformador de corrente adquirido suporta) passando pelo circuito a ser medido.

Nota-se, como já mencionado, que foi utilizado o método da Figura 12 de medição de tensão, visto que ele oferece uma filtragem — dada pelo capacitor eletrolítico C5 — de ruídos provenientes do transformador de corrente. Além disso, constata-se a ausência do resistor localizado acima de R23 (na Figura 22). Isso acontece porque, no circuito original, havia a necessidade do abaixamento da tensão de entrada e, portanto, é preciso um divisor de tensão. Entretanto, como o TC gera em sua saída uma tensão baixa — pois transforma $100 A_{rms}$ em cerca de $50 mA_{rms}$ —, apenas a presença do resistor *shunt* é suficiente para

entregar a tensão necessária à entrada do amplificador operacional U2:B.

Figura 23 – Triângulo de Potências



Fonte: Autor (2023)

Para a medição de potência, não basta realizar a multiplicação da tensão pela corrente. Como há uma constante amostragem, o resultado é um conjunto de dados que devem ser armazenados em uma lista, ou *array*. O tamanho dessa lista varia de acordo com os requisitos de projeto e a capacidade computacional (memória disponível).

Como é possível notar na Figura 23, há três tipos de potências: a potência aparente, denotada por A [VA], é a potência total sendo consumida no sistema, ela é a soma vetorial das outras duas; a potência real, denotada por P [W], representa a potência que é convertida em trabalho útil no sistema; já a potência reativa, denotada por Q [VAR], é a parte da potência total que é armazenada e liberada pelos elementos indutivos (bobinas) e capacitivos (capacitores) de um circuito elétrico e não é convertida em trabalho útil.

Tomando como referência sinais senoidais de tensão e corrente de frequência ω , a potência aparente é dada pela Equação (2) (NILSSON; RIEDEL, 2011), onde t_0 representa o tempo inicial onde é iniciada a contagem, T representa o intervalo de tempo definido pelo período da onda senoidal, $p(t)$ representa a potência instantânea no tempo, $v(t)$ representa a tensão instantânea no tempo, $i(t)$ representa a corrente instantânea no tempo e dt representa um diferencial de tempo.

$$A = V_{rms} \cdot I_{rms} = \left(\sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) \cdot dt} \right) \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i^2(t) \cdot dt} \right) \quad (2)$$

Já a potência ativa, por sua vez, é dada pela Equação (3).

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (3)$$

Nota-se que o lado direito da Equação (3) representa a média dos valores instantâneos de potência. Portanto, transformando a Equação (3) para termos discretos, chega-se a Equação (4), onde Δt representa o período de amostragem.

$$P = \frac{1}{T} \sum_{k=t_0}^{t_0+T} v_k \cdot i_k \cdot \Delta t \quad (4)$$

Considerando, de forma hipotética, que Δt não varia no tempo — ou seja, temos um período de amostragem constante — (o que não é verdade quando se trata de sistemas discretos reais, pois possuem diversos processos sendo feitos por componentes eletrônicos físicos), a Equação (4) pode ser representada pela Equação (5).

$$P = \frac{1}{T} [v_{t_0} \cdot i_{t_0} + v_{t_1} \cdot i_{t_1} + \dots + v_{t_0+T} \cdot i_{t_0+T}] \cdot \Delta t \quad (5)$$

Porém, $T/\Delta t$ é igual ao número de amostras, definido como N . Logo, a Equação (6) se prova verdadeira.

$$P = \frac{1}{N} \sum_{k=t_0}^{t_0+T} v_k \cdot i_k \quad (6)$$

Da mesma forma, é possível obter resultado análogo para a Equação (2), de onde surge a Equação (7).

$$A = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=t_0}^{t_0+T} v_k^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=t_0}^{t_0+T} i_k^2} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{k=t_0}^{t_0+T} v_k^2} \sqrt{\sum_{k=t_0}^{t_0+T} i_k^2} \quad (7)$$

Levando em consideração o triângulo de potências da Figura 23, é possível obter a potência reativa como demonstra a Equação (8).

$$Q = \sqrt{A^2 - P^2} \quad (8)$$

A função de verificar se a energia medida é proveniente do consumo da rede elétrica ou da geração de energia na direção da rede elétrica se dá pelo sinal do valor que resulta da Equação (6), já que a Equação (7) retorna sempre valores positivos, porque suas operações internas envolvem valores ao quadrado.

Para calcular o valor em dinheiro das energias ($E = P \cdot \Delta t$), deve-se ter em mente que a variação se dá pelo horário em que a energia é consumida da rede elétrica local. Horário de ponta corresponde ao período em que a demanda de energia elétrica é alta no local, ou seja, quando as pessoas retornam para casa e ligam os aparelhos elétricos. Durante esse período, as concessionárias de energia podem ter dificuldades em atender a demanda máxima, o que pode resultar em custos mais elevados de produção e distribuição de energia. Já o horário fora de ponta é aquele em que a demanda de energia local não é alta, quando a maioria das pessoas está dormindo ou não está em casa. Durante esses

períodos, as concessionárias de energia elétrica têm uma menor demanda e, portanto, podem oferecer tarifas mais baixas para incentivar o consumo. Sendo assim, o custo da energia consumida é dada pela Equação (9), na qual T_∞ representa que o projetista precisa disponibilizar uma forma de dar *reset* no valor de energia e de custo — geralmente feito por um reinício mensal — ou então o valor calculado aumentará infinitamente até que haja *overflow* na variável o que armazena.

$$C = \sum_{k=t_0}^{T_\infty} \frac{P \cdot \Delta t}{3600} \cdot \frac{R\$}{KWh} \quad (9)$$

4.1.2.2 Prototipagem e testes do software

Depois de concluir os ensaios de medição, o ESP32 foi integrado ao banco de dados no *Firebase*. Para realizar essa integração, foi fundamental que o ESP32 estabelecesse uma conexão com a *Internet*, o que implicou a necessidade de acesso a uma rede. Nesse contexto, o *Wi-Fi* foi utilizado para estabelecer essa conexão.

Para conectar-se ao banco de dados do *Firebase*, foi utilizado o protocolo HTTP. Esse protocolo permite que o ESP32 envie solicitações e receba respostas do servidor do *Firebase* em formato JSON (grupos de informações organizadas no formato "chave: valor"). Foram implementadas funções que possibilitaram o envio de solicitações HTTP ao servidor do *Firebase*, abrangendo tarefas como estabelecer uma conexão, enviar e receber dados, autenticar um usuário e desconectar do banco de dados.

Ao enviar uma solicitação HTTP, o ESP32 especifica o tipo de operação que desejava realizar e os parâmetros necessários para essa operação, incluindo o caminho para a localização dos dados no banco de dados. O servidor do *Firebase* processa a solicitação e retorna uma resposta HTTP com um código de status que indica se a operação foi bem-sucedida ou não. Essa integração por meio do protocolo HTTP e das funções específicas de envio e recebimento de dados possibilitou a comunicação entre o ESP32 e o banco de dados do *Firebase* de forma simplificada e com segurança, visto que uma das vantagens de se utilizar um sistema em *cloud* é que o armazenamento dos dados está protegido em um sistema externo, dificultando, portanto, um ataque aos dados por terceiros sem que haja uma chave de liberação para esse ato.

Para que o medidor funcionasse remotamente e possibilitasse que o usuário acesse banco de dados, foi desenvolvido um aplicativo preliminar (Figura 24) cuja função consiste em apresentar as medições realizadas naquele instante.

O aplicativo desenvolvido recebeu os dados do banco de dados e foi capaz de mostrá-los na interface para o usuário. É importante lembrar que a fase de desenvolvimento de uma interface elegante, intuitiva e informativa leva um tempo consideravelmente alto. A Figura 24 apresenta o modelo que foi o alvo do projeto no momento, mas que sofrerá diversas alterações (tanto de cores, quanto de posicionamentos dos botões e de funcionalidades)

tendo em vista a entrega de uma experiência de usuário simplificada, fluida e organizada.

Figura 24 – Modelo do aplicativo



Fonte: Autor (2023)

Vale ressaltar que, ao utilizar um banco de dados na nuvem, haveria chances de que o grupo precisasse arcar com custos, que poderiam incluir taxas de armazenamento, transferência de dados, uso de recursos computacionais, entre outros. Além disso, alguns provedores de serviços de nuvem oferecem diferentes opções de planos de preços e recursos, o que poderia impactar diretamente nos custos do projeto.

Portanto, foi importante realizar uma análise cuidadosa dos custos associados à utilização de um banco de dados na nuvem, considerando fatores como a quantidade de dados a serem armazenados, a frequência de acesso aos dados, a complexidade das consultas, entre outros.

O *Firebase* é um sistema extremamente completo que possui diversos ambientes internos e, por este motivo, no âmbito do presente projeto, os custos para o sistema que está sendo feito elevaram-se exponencialmente a cada aumento do número de escritas no banco de dados, levando o grupo a ter que escolher entre: utilizar outro banco de dados, diminuir a frequência de escritas no banco de dados (para 4 vezes por dia, por exemplo) ou repassar o custo mensal deste banco de dados ao cliente. Decisões de projeto que deverão ser tomadas tendo como objetivo alcançar o consenso entre a empresa desenvolvedora e o cliente final.

4.2 INSIGHTS DO PROJETO PRELIMINAR

Insights valiosos foram adquiridos no contexto do desenvolvimento do sistema de monitoramento de consumo e geração de energia elétrica no âmbito do Projeto Preliminar. Em primeiro lugar, percebeu-se que o componente comprado não atingiu a frequência máxima que é descrita pelo fabricante, isso se deu pelo fato de que o componente enviado pela empresa chinesa não era compatível com o que foi comprado inicialmente. Isso, de fato, ocorre constantemente com clientes de empresas chinesas de *marketplaces*, visto que geralmente não há uma descrição adequada dos componentes e não há um controle de qualidade disponível ao público. O modelo adquirido foi o ADS1115, que possui configuração de comunicação exatamente igual ao seu par, ADS1015, porém, atinge uma frequência máxima de apenas 860 Hz.

Outro problema encontrado foi que as medições do ADC obtido não são feitas em paralelo, ou seja, não é possível adquirir uma amostra de tensão e uma amostra de corrente ao mesmo tempo, isso se dá pelo fato do ADC possuir um multiplexador, que pode ser entendido como uma chave de várias posições. Desse modo, só é possível obter o resultado de medição de uma entrada por vez. Isso se torna um pesadelo quando se fala de medição de sinais AC, pois o pequeno *delay* entre as amostragens de tensão e de corrente gera um erro de medição no triângulo de potências, visto que inclui um diferencial de fase inexistente no sistema. Desse modo, para o multiplexador do ADC utilizado realizar uma nova conversão de dados — ou seja, uma nova medição de tensão ou de corrente — ele precisa finalizar a anterior. Sendo assim, para a medição de redes monofásicas, a frequência final máxima obtida é dividida por 2, pois primeiro o ADC deve medir um canal e, em seguida, medir o outro canal.

Mais um fato acerca do ADC foi que, apesar de ele possuir dois modos de medição: o modo contínuo, onde o ADC permanece realizando aferições infinitamente e o modo *single-ended*, onde ele apenas realiza uma conversão quando requisitado, o modo contínuo não é utilizável no presente projeto, visto que deve ser especificado apenas um canal para esse tipo de medição. Isso levou o sistema a obter uma frequência de amostragem para cada canal um pouco menor do que a metade da frequência máxima (860 Hz), pois, no modo *single-ended*, é necessário o envio por meio da comunicação I2C de 17 bytes (136

bits) de dados — deixando a comunicação mais lenta —, enquanto que o modo contínuo precisaria de apenas 5 bytes (40 bits) em regime permanente.

Outro ponto importante ao desenvolvimento futuro do produto observado diz respeito a adotar medidas técnicas para garantir a segurança dos dados, como a utilização de autenticação de usuários, o armazenamento em servidores seguros, a limitação do acesso aos dados apenas pelas entidades autorizadas e a garantia do direito dos usuários de acessar, corrigir e excluir seus dados pessoais. A preocupação com a Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD) se mostra fundamental para o sucesso do aplicativo, uma vez que os usuários e a legislação vigente em diversos países valorizam cada vez mais a segurança e a privacidade de dados pessoais e a modernização social caminha na direção de um maior incentivo ao desenvolvimento de tecnologias que protejam a segurança dos clientes.

4.3 PROJETO DETALHADO

Um aspecto majoritariamente construtivo será abordado neste tópico acerca do produto que foi desenvolvido. Foram propostos alguns detalhes sobre a fabricação, montagem e orçamento do modelo, além de ter sido realizada uma estimativa sobre o custo final do modelo considerando as dificuldades que podem ser encontradas no decorrer da fabricação do produto.

4.3.1 Processos de fabricação

Cada solução proposta para a fabricação tem a possibilidade de ser terceirizada, o que proporciona maior facilidade, flexibilidade e redução de custos. Tomando o exemplo do subsistema “*hardware*”, há grandes empresas reconhecidas na fabricação de placas de circuito impresso em países em que há parques tecnológicos especialmente para a produção em massa, como China e EUA. Devido à alta demanda e ampla oferta dessas empresas, que contam com fábricas de grande porte, elas conseguem oferecer produtos mais acessíveis aos consumidores, mesmo com a complexidade do processo de fabricação dessas placas. Um dos pontos negativos da terceirização da fabricação de subsistemas-chave, como o circuito eletrônico, é a possibilidade do acontecimento de plágios. Por esse motivo, objetivando a produção em larga escala, cabe ao projetista duas saídas: escolher empresas mais confiáveis e/ou implementar ferramentas que mitiguem os efeitos e/ou diminuam as chances de um plágio ocorrer, como a criptografia e a utilização da necessidade de validação externa ao sistema.

4.3.1.1 Subsistema “*carcaça*”

A estrutura da carcaça foi projetada e dividida em partes, cada uma com sua função específica. A maior parte do planejamento foi dedicada à produção por impressão 3D,

utilizando poucos componentes mecânicos de fixação, como porcas, parafusos e isolantes. No entanto, para viabilizar a produção em larga escala, é crucial analisar a viabilidade da impressão 3D em termos de custo e eficiência.

De maneira geral, a impressão 3D apresenta um custo inicial mais baixo, considerando que são necessárias apenas impressoras disponíveis e com volume de impressão adequado para a fabricação das peças. Em contraste, na injeção de plástico, um molde precisa ser construído para acomodar e moldar o polímero conforme o formato desejado, gerando um custo inicial significativamente maior. No entanto, à medida que a produção se aproxima do regime permanente, o custo por unidade produzida na injeção de plástico diminui, uma vez que o molde permanece o mesmo e o processo é mais rápido. Por outro lado, na impressão 3D, o custo e o tempo de produção mantêm-se constantes ao longo do tempo.

Além disso, o acabamento do produto obtido por meio da injeção de plástico é visualmente superior, devido à reduzida presença de marcas de fabricação, enquanto na impressão 3D diversas marcas são deixadas por toda a peça. Portanto, escolher o método de fabricação é fundamental e a escolha está sujeita a mudanças, já que há dois gráficos de custo geral (envolvendo fatores como custos financeiros, de acabamento e tempo de fabricação): o da injeção de plástico, que começa elevado e decresce com o tempo e o da manufatura aditiva, ou impressão 3D, que é constante. Desse modo, o projetista deve utilizar o fato de que entre uma reta com inclinação nula e uma reta com inclinação diferente de zero sempre há um ponto de interseção para a seleção do método de fabricação.

Ao considerar o material para a fabricação da carcaça, diversos fatores foram levados em conta, incluindo a exposição ao ambiente externo e a resistência necessária para suportar as solicitações aplicadas. Inicialmente, optou-se pela impressão 3D utilizando PLA. Ao empregar o PLA como material para a carcaça, é preciso considerar algumas limitações importantes. O PLA não possui alta resistência ao calor, o que pode afetar sua performance quando exposto a temperaturas elevadas, como o calor gerado pela placa de circuito ou condições climáticas adversas. Portanto, foi necessário observar cuidadosamente a reação da carcaça nessas situações, a fim de avaliar se o material estava atendendo às necessidades do projeto em termos de resistência térmica e durabilidade. Caso tivesse sido constatado que a carcaça não estivesse suportando adequadamente o calor gerado pelo circuito, poderiam ser consideradas alternativas mais adequadas, como o ABS, que é uma opção mais econômica, ou o PETG, ambos os polímeros possuem melhores propriedades mecânicas e de resistência ao calor, como discutido em fontes especializadas (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017). A seleção do material ideal depende da análise criteriosa dos requisitos de desempenho e acerca do ambiente de aplicação do produto final.

O PLA permanece como a principal escolha devido ao seu viés ambientalista, uma vez que é um material biodegradável de origem vegetal. Essa iniciativa verde é valorizada por sua contribuição para a sustentabilidade, permitindo que o produto final seja mais

ecologicamente consciente.

A modelagem da carcaça foi conduzida pelo grupo de pesquisa em outro trabalho acadêmico utilizando o software de modelagem tridimensional *SolidWorks*, assim como a criação dos desenhos técnicos necessários à fabricação e à estruturação do negócio. Após a conclusão dessa etapa, o arquivo foi exportado no formato “.stl” e importado no *software* de fatiamento Ultimaker Cura. Nesse programa, os parâmetros de impressão foram definidos para configurar os detalhes do processo de fabricação na impressora 3D, estabelecendo a comunicação necessária para a impressão do objeto final. É importante destacar que essa parte específica do trabalho foi realizada anteriormente pelo grupo de pesquisa e não faz parte do escopo deste projeto atual.

4.3.1.2 Subsistema “hardware”

O *hardware* foi constituído por componentes eletrônicos, conectores de entrada e de saída, bem como componentes auxiliares que desempenham papéis essenciais na operação e funcionalidade do dispositivo, como *jumpers* e *protoboard*. Os componentes eletrônicos incluem resistores, capacitores, amplificadores operacionais e microcontrolador. Como há uma dificuldade técnica e um tempo consideravelmente alto gasto na fabricação desse subsistema, é possível também terceirizá-la.

Uma empresa chinesa que oferece serviços de produção e montagem de placas de circuito impresso é a JLCPCB. Para gerar uma PCB, o circuito em questão é montado usando um *software* com suporte para geração de placas de circuito impresso, como o Proteus ou uma plataforma online, como a EasyEDA, que possui integração com a JLCPCB. O resultado dessa montagem é um arquivo “.gerber”, que contém todas as informações sobre a localização dos componentes eletrônicos, caminhos elétricos, textos, logotipos, números de série, entre outros.

Existem dois tipos principais de componentes eletrônicos: os do tipo SMD, ou *Surface Mount Device* (Dispositivo de Montagem Superficial), e os do tipo PTH, ou *Pin Through Hole* (Pino Através de Furo). Os componentes PTH são de uso mais simples e podem ser soldados manualmente, uma vez que possuem terminais que podem ser inseridos em furos na PCB. Por outro lado, os componentes SMD são menores e possuem soldagem manual mais complexa. Devido ao seu tamanho reduzido e à ausência de furos para inserção, os componentes SMD são mais econômicos e sua montagem é automatizada com eficiência e precisão usando robôs em processos *pick and place*, o que reduz o tempo de montagem significativamente.

4.3.2 Montagem do produto

O produto contém subsistemas independentes (carcaça e *hardware*) que são montados de forma simplificada. Foi feito, no interior da carcaça, uma área do tamanho da

PCB com travas para permitir a sua fixação. Tomando o subsistema *hardware* como um paralelepípedo, a fixação restringiu todos os seus graus de liberdade.

O produto foi feito para ser fixado na parede ou em caixas de controle do cliente. Os fios da rede elétrica devem estar localizados em paralelo com o sistema de medição e, os fios que forem necessários para o funcionamento correto do sistema devem ser inseridos por dentro da carcaça e instalados na PCB para a alimentação do sistema. Para a medição de corrente, um ou mais TCs devem ser implantados nas fases a serem medidas. Por exemplo, se o sistema for monofásico, apenas um TC será necessário e ele deve estar localizado na fase ou no neutro, pois se trata de medição de corrente alternada. Uma boa prática é a utilização de TCs bipartidos, pois a sua instalação é extremamente simplificada, já que não é necessário cortar ou retirar o fio que deve passar em seu interior.

4.3.3 Orçamento

Na presente seção, é apresentada uma detalhada estimativa dos custos envolvidos no desenvolvimento do primeiro protótipo. Nesta etapa do projeto, foram considerados todos os materiais, componentes, serviços e mão de obra necessários para concretizar o protótipo. Durante o PDP, a análise minuciosa do orçamento permite uma avaliação precisa dos recursos financeiros requeridos, garantindo um planejamento sólido.

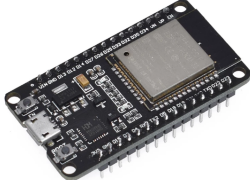
Na Tabela 1, é feito um comparativo entre os preços dos microcontroladores que foram analisados como viáveis ao projeto. Na última coluna da tabela, foi colocada a relação de preços dos componentes que foram selecionados, comparando o preço nacional ao preço de importação (sujeito a alteração conforme cotação do dólar, que foi de US\$ 1,00 = R\$ 4,99 no momento).

Os preços de componentes eletrônicos como capacitores, resistores e amplificadores operacionais foram muito menores em relação aos preços de microcontroladores. A Tabela 2 apresenta um breve descritivo dos componentes utilizados, constando também a quantidade e o preço de cada um desses dispositivos que compõem o sistema.

Por meio do *software* Ultimaker Cura, foi possível realizar a estimativa da massa final e do custo de impressão do subsistema “carcaça”, estudado em detalhes em outro trabalho acadêmico, porém, utilizado para o desenvolvimento atual. O referido *software* exerceu um papel de extrema importância, agindo como intermediário entre o computador e a impressora 3D utilizada no projeto. Por meio dele, todo o percurso da impressão foi delicadamente planejado, possibilitando uma previsão relativamente precisa, com uma pequena margem de erro para menos. Os resultados obtidos foram apresentados na Tabela 3, considerando o valor do quilograma de PLA a R\$ 120,00. É válido ressaltar que esses valores são representativos e verossímeis, tendo em vista a disponibilidade de uma impressora 3D em laboratório.

Da Tabela 3, percebe-se que não há uma diferença significativa tanto de custo quanto de peso final do produto, em qualquer que seja a configuração. A diferença de

Tabela 1 – Preços dos componentes do subsistema “Microcontrolador” (M)

Solução	Modelo	Imagem	Preço Nacional	Preço Importado
M1	ESP8266		ByteFlop Produto: R\$ 39,90 Frete: R\$ 21,80 Total: R\$ 61,70	Loja 2949090 (Aliexpress) Produto: R\$ 10,34 Frete: R\$ 34,57 Total: R\$ 44,91
M2	ESP32		ROCA9180667 (Mercado Livre) Produto: R\$ 40,00 Frete: R\$ 31,90 Total: R\$ 71,90	Loja 5039159 (Aliexpress) Produto: R\$ 19,10 Frete: R\$ 24,73 Total: R\$ 43,83
M3	Arduino Nano Atmega 328p		Loja da Robótica Produto: R\$ 40,00 Frete: R\$ 21,00 Total: R\$ 61,00	Loja 318950 (Aliexpress) Produto: R\$ 31,49 Frete: R\$ 22,48 Total: R\$ 53,97
M4	PIC18F4620		Baú da Eletrônica Produto: R\$ 55,71 Frete: R\$ 28,32 Total: R\$ 84,03	Loja 1100216091 (Aliexpress) Produto: R\$ 30,73 Frete: R\$ 24,94 Total: R\$ 55,67

Fonte: Autor (2022)

preço de R\$ 1,68 se deu por conta de algumas configurações que foram importantes para a impressão, sendo a principal delas o suporte de impressão. A massa final foi colocada desconsiderando os suportes de impressão, ou seja, a massa apenas da carcaça impressa.

É necessário ter em mente que o valor final dos protótipos normalmente é mais elevado porque leva em conta a *protoboard* e componentes comprados em varejo. Quando o projetista eleva o sistema para a produção em massa ou mesmo utiliza componentes eletrônicos SMD, o valor final baixa consideravelmente, eventos que serão estudados no futuro.

Tabela 2 – Lista dos materiais e componentes utilizados no projeto

Nome	Componente	Descrição	Qtd.	Unidade	Valor Unitário
Conversor Analógico-Digital	ADS1015	-	1	Peça	R\$ 39,90
Capacitor monolítico	Capacitor	1 uF	2	Peça	R\$ 0,15
Capacitor monolítico	Capacitor	47 nF	2	Peça	R\$ 0,15
Capacitor monolítico	Capacitor	100 nF	2	Peça	R\$ 0,15
Material de impressão 3D	Filamento	PLA	0,3	kg	R\$ 120,00
Microcontrolador	Esp 32	-	1	Peça	R\$ 43,83
Cabos	Jumpers	-	40	Peça	R\$ 0,35
Amplificador Operacional	LM358	-	1	Peça	R\$ 2,00
Placa de circuito	<i>Protoboard</i>	830 pontos	1	Peça	R\$ 12,00
1/4W; 99% precisão	Resistor	12,5 Ω	1	Peça	R\$ 0,15
1/4W; 99% precisão	Resistor	100 Ω	1	Peça	R\$ 0,15
1/4W; 99% precisão	Resistor	1 k Ω	6	Peça	R\$ 0,15
1/4W; 99% precisão	Resistor	22 k Ω	2	Peça	R\$ 0,15
1/4W; 99% precisão	Resistor	47 k Ω	1	Peça	R\$ 0,15
1/4W; 99% precisão	Resistor	68 k Ω	2	Peça	R\$ 0,15
1/4W; 99% precisão	Resistor	110 k Ω	2	Peça	R\$ 0,15
1/4W; 99% precisão	Resistor	470 k Ω	2	Peça	R\$ 0,15
Transformador de corrente	TC	100 A	1	Peça	R\$ 60,00
Total	-	-	-	-	R\$ 211,18

Fonte: Autor (2023)

Tabela 3 – Estimativa do preço e peso da impressão 3D

Carcaça	Peso (g)	Preço (R\$)
Com tampa tipo porta	142	23,38
Com tampa parafusada	131	20,06

Fonte: Autor (2022)

5 CONCLUSÃO

Com a crescente preocupação com a sustentabilidade e a conservação de recursos naturais, o desenvolvimento de tecnologias inovadoras para monitorar e reduzir o consumo de energia elétrica mostrou-se de grande importância. A pesquisa e o desenvolvimento de sistemas como o visto neste trabalho contribuem para a redução do impacto ambiental e para a promoção do uso da energia elétrica de forma mais consciente.

Com o Projeto Conceitual já realizado anteriormente em outro trabalho acadêmico, foi possível realizar uma varredura dentre os *hardwares* de medição comumente utilizados no mercado. Com a utilização de componentes eletrônicos básicos e após realizar estudos manuais e simulados com o apoio dos *softwares* mais utilizados no globo, o Projeto Preliminar resultou no desenvolvimento e na aplicação daqueles circuitos que mais se aproximaram do objetivo do protótipo, culminando na medição de tensão e de corrente da rede elétrica residencial.

O desenvolvimento do protótipo de medição de tensão e de corrente foi feito utilizando um ESP32 com o *firmware* escrito na linguagem de programação C e C++. Utilizando a lógica de programação, foram criadas bibliotecas tanto para a comunicação com o ADC ADS1015, quanto para a comunicação com o banco de dados em nuvem via *Wi-Fi*. Foi desenvolvido um sistema eletrônico capaz de realizar a medição das energias produzida e consumida com precisão de 100% (variação nula para uma medição única) e acurácia de +2 mV, o que foi considerado suficiente para um primeiro protótipo.

Após a criação do *hardware* e seguindo o PDP, foi realizado o Projeto Detalhado do sistema, onde foram levantados a lista de materiais e o custo de cada componente utilizado. Levando em consideração os componentes eletrônicos e a carcaça, um valor total de cerca de R\$ 230,00 foi obtido para o primeiro protótipo.

O *backend* e o *frontend* do *software* de monitoramento de consumo e geração de energia elétrica foram desenvolvidos visando o acompanhamento do sistema por meio de um aplicativo multiplataforma.

O aplicativo conseguiu obter as informações do banco de dados em nuvem no Firebase sem dificuldades e apresentá-las ao usuário em uma interface simples e intuitiva. A compilação foi feita para Android e Web e funcionou como esperado, contudo, é preciso notar que o aplicativo pode ser entregue para mais plataformas, como: iOS, Windows, Linux e sistemas embarcados.

Foram aprendidas lições relevantes sobre a validação cuidadosa dos componentes na fase de prototipagem e a necessidade de priorizar as funcionalidades mais importantes do *software* de acordo com o objetivo do projeto. O processo de desenvolvimento deste projeto trouxe experiências válidas e replicáveis para projetos futuros na área de *hardware* e de *software*. O sistema criado foi capaz de ler as tensões de entrada provenientes da tensão da rede elétrica e da corrente do TC, o que possibilitou o cálculo da potência

utilizada, assim como das energias consumida e gerada, sendo possível que o sistema calcule e estime o valor monetário do consumo de energia mensal com base no histórico de consumo do usuário. Entende-se, ainda, que este projeto ainda possui suas limitações e uma interface elementar, mas que tem potencial para ser amplamente desenvolvido e se tornar um produto forte e competitivo no mercado.

REFERÊNCIAS

- BACK, Nelson; OGLIARI, André; DIAS, Acires; SILVA, Jonny Carlos da. **Projeto Integrado de Produtos: Planejamento, Concepção e Modelagem**. Barueri, SP: Manole, 2008.
- BAXTER, Mike R. **Projeto de Produto: Guia prático para o *design* de novos produtos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.
- BESKO, Marcos; BILYK, Claudio; SIEBEN, Priscila Gritten. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. Faculdade Opet, 2017. Disponível em: <<https://www.opet.com.br/faculdade/revista-engenharias/pdf/n3/Artigo2-n3-Bilyk.pdf>>. Acesso em: 18/03/2023.
- CASTELO-BRANCO, Isabel; OLIVEIRA, Tiago; SIMÕES-COELHO, Pedro; PORTUGAL, Jorge; FILIPE, Irina. Measuring the fourth industrial revolution through the Industry 4.0 lens: The relevance of resources, capabilities and the value chain. **Computers in Industry**, Elsevier B.V., v. 138, jun. 2022. ISSN 01663615.
- CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. [S.l.]: Mc Graw Hill Education, 2013. P. 69.
- FASE. **In: DICIO, Dicionário Online de Português**. [S.l.]: Porto: 7Graus, 2022.
- JUNIOR, Widomar Pereira Carpes. **Introdução ao Projeto de Produtos**. Porto Alegre, RS: Bookman, 2014.
- MACHADO, Yohanan Gil Cintra. **Projeto Informacional e Projeto Conceitual de um sistema de monitoramento de consumo e geração de energia elétrica**. 2023. 60 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2023.
- MALVINO, Albert; BATES, David. **Eletrônica – Volume 1**. [S.l.]: Mc Graw Hill Education, 2016.
- NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A. **Electric Circuits**. 9. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2011.

PROCESSO. *In: DICIO, Dicionário Online de Português*. [S.l.]: Porto: 7Graus, 2022.

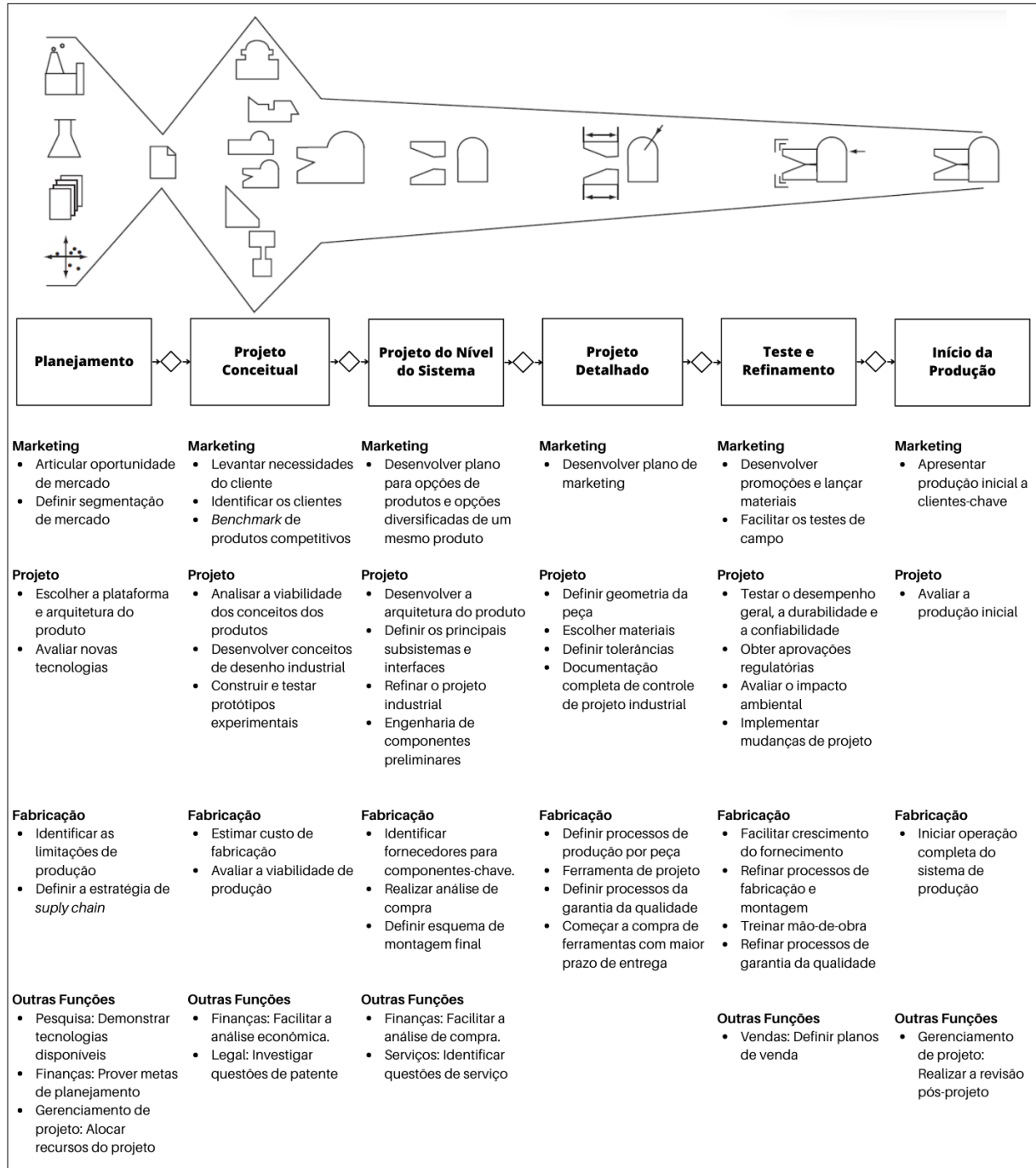
ROZENFELD, Henrique; FORCELLINI, Fernando Antônio; AMARAL, Daniel Capaldo; TOLEDO, José Carlos; SILVA, Sergio Luis da; ALLIPRANDINI, Dário Henrique; SCALICE, Régis Kovacs. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma Referência para a Melhoria do Processo**. [S.l.]: Editora Saraiva, 2007.

TEXAS INSTRUMENTS. Empresa fabricante de componentes eletrônicos, 2023. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1015.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2023.

ULRICH, Karl T.; EPPINGER, Steven D.; YANG, Maria C. ***Product Design and Development***. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2020.

ANEXO A – Modelo de um PDP

Figura 25 – Modelo de um PDP.



Fonte: Adaptado de Ulrich (2020)