



**UNIVERSIDADE
FEDERAL
DE PERNAMBUCO**



Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Eletrônica e Sistemas



Graduação em Engenharia Eletrônica

ARTHUR BARROS DA SILVA TELLES

**Sistema de monitoramento agrícola com energia
eólica**

Recife

2025

ARTHUR BARROS DA SILVA TELLES

Sistema de monitoramento agrícola com energia eólica

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica, do Departamento de Eletrônica e Sistemas, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador(a): Prof. Guilherme Nunes Melo, D.Sc.

Recife
2025

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

Telles, Arthur Barros da Silva.

Sistema de monitoramento agrícola com energia eólica / Arthur Barros da Silva Telles. - Recife, 2025.

66 p. : il., tab.

Orientador(a): Guilherme Nunes Melo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Eletrônica - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Agricultura 4.0. 2. Energia eólica. 3. IoT. I. Melo, Guilherme Nunes. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

ARTHUR BARROS DA SILVA TELLES

**Sistema de monitoramento agrícola com energia
eólica**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica, do Departamento de Eletrônica e Sistemas, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Aprovado em: 08/08/2025

Banca Examinadora

Prof. Guilherme Nunes Melo, D.Sc.
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Hermano Andrade Cabral, Ph.D.
Universidade Federal de Pernambuco

*A meus familiares e amigos, sou
imensamente grato por todo o
amor, suporte e dedicação que
me proporcionaram ao longo
dessa jornada.*

Agradecimentos

Agradeço inicialmente aos meus pais e aos meus irmãos, por sempre me concederem amor e auxílio na superação de diversos obstáculos da vida.

A todos os professores pelos ensinamentos durante o curso, em especial ao meu orientador, professor Guilherme Melo, por toda paciência e dedicação por mim e pelo Departamento de Eletrônica e Sistemas.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Cada sonho que você deixa para
trás, é um pedaço do seu futuro
que deixa de existir.

Steve Jobs

Resumo do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Eletrônica e Sistemas, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica(Eng.)

Sistema de monitoramento agrícola com energia eólica

ARTHUR BARROS DA SILVA TELLES

A Agricultura 4.0 é uma resposta aos desafios da agricultura moderna, que precisa ser mais produtiva, sustentável e adaptável, caracterizando-se pela integração de tecnologias digitais avançadas, que promovem uma gestão mais inteligente e sustentável de processos e recursos, englobando o uso de sensores, automações e processamento de dados. Tudo isso têm uma forte ligação com a energia eólica, uma boa fonte de energia renovável, com potencial ainda pouco explorado no Brasil e reconhecida pelas suas características de longevidade e baixo custo de manutenção. Esse trabalho apresenta o estudo e desenvolvimento de um sistema de monitoramento do solo, com autonomia energética sustentável, que coleta e apresenta informações sobre o solo para o agricultor, ao passo que, se autocarrega utilizando energia eólica. É proposto um sistema de coleta de dados utilizando ESP8266 e sensores, que envia informações via Wi-Fi para a plataforma ThingSpeak, e um sistema de geração eólica utilizando motor, pás, regulador de tensão e bateria, visando a autonomia energética do protótipo.

Palavras-chave: agricultura 4.0; energia eólica; arduino; IoT.

Abstract of Course Conclusion Work, presented to Departament of Eletronic and Systems, as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Electronic Engineering(Eng.)

Agricultural monitoring system with wind energy

ARTHUR BARROS DA SILVA TELLES

Agriculture 4.0 is a response to the challenges of modern agriculture, which needs to be more productive, sustainable, and adaptable. It is characterized by the integration of advanced digital technologies that enable a smarter and more sustainable management of processes and resources, including the use of sensors, automation, and data processing. All of this is closely related to wind energy, a good source of renewable energy with great potential still underexplored in Brazil, and known for its longevity and low maintenance cost. This work presents the study and development of a sustainable energy-autonomous soil monitoring system, which collects and displays information about the soil to the farmer while self-charging using wind energy. A data collection system is proposed using the ESP8266 and sensors, which sends information via Wi-Fi to ThingSpeak plataform, along with a wind generation system composed of a motor, blades, voltage regulator, and battery, aiming at the energy autonomy of the prototype.

Keywords: agriculture 4.0, wind energy, Arduino, IoT.

Lista de Figuras

1.1	Culturas agrícolas por valor de produção no Brasil (em bilhões de reais).	16
1.2	Ranking de Agricultura por valor de produção em Pernambuco.	16
2.1	(a) Modelo de eixo vertical e (b) Modelo horizontal.	26
2.2	Desenho esquemático de uma turbina eólica moderna.	27
2.3	Tecnologias da Agricultura 4.0 e as que estão por vir.	30
2.4	Exemplo de sensores de previsão do tempo.	32
3.1	Placa de desenvolvimento NodeMCU v1.0 (ESP8266) utilizada no projeto.	35
3.2	Pinagem do NodeMCU v1.0 (ESP8266)	36
3.3	Exemplo de aplicação para dados de agricultura	37
3.4	Higrômetro utilizado no projeto.	38
3.5	Pás utilizadas no projeto.	40
3.6	Motor CC C7902-2095 utilizado no projeto.	41
3.7	Motor CC 555 com redução de 27:1 utilizado no projeto.	41
3.8	Regulador de tensão L7805 utilizado no projeto.	42
3.9	Regulador de tensão L7805 utilizado no projeto.	42
3.10	Bateria utilizada no projeto.	43
3.11	Esquemático completo do projeto.	44
3.12	Esquemático do circuito com as conexões entre os componentes do protótipo.	44

3.13	Protótipo em teste de transmissão.	45
3.14	Testes de carga e integração com pás de 51cm.	45
3.15	Teste de carga e integração com pás de 8cm e de 40cm.	46
4.1	Tensões medidas em <i>DeepSleep</i> e funcionamento normal.	48
4.2	Exibição da execução do protótipo conectado ao computador.	49
4.3	Exibição da execução do protótipo conectado ao computador.	50
4.4	Ventilador Arno 40cm utilizado nos testes.	51
4.5	Anemômetro Amgaze Handheld utilizado nos testes.	51
4.6	Testes de capacidade do motor e das pás.	52
4.7	Funcionamento completo do protótipo.	56

Lista de Tabelas

3.1	Informações por nível de <i>Sleep</i> na ESP8266.	35
4.1	Valores de tensão, corrente e potência obtidos de forma experimental	48
4.2	Velocidades médias do vento produzida pelo ventilador obtidas de forma experimental com o anemômetro.	52
4.3	Tensões, correntes e potências obtidas de forma experimental para o motor CC C7902-2095 (sem redução).	53
4.4	Tensões, correntes e potências obtidas de forma experimental para o motor CC 555 (com redução de 27:1).	53

Lista de Abreviações

UFPE	.... Universidade Federal de Pernambuco
DES	.. Departamento de Eletrônica e Sistemas
OLED	..... Organic Light-Emitting Diode
PIB	..... Produto Interno Bruto
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IoT	..... Internet of Things
GPS	.... Sistema de Posicionamento Global
ABEE	.. Associação Brasileira de Energia Eólica
SEP	..... Sistema Elétrico de Potência
RAM	..... Random Access Memory
PAM	..... Produção Agrícola Municipal
PWM	..... Pulse Width Modulation
SPI	..... Serial Peripheral Interface
USB	..... Universal Serial Bus

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Justificativa	18
1.2	Objetivo geral	19
1.2.1	Objetivos específicos	19
1.3	Organização do TCC	19
1.4	Trabalhos relacionados	20
1.4.1	Internet das Coisas na agricultura	21
1.4.2	Tecnologia LoRa no ambiente agro	21
2	Fundamentação Teórica	23
2.1	Geração de energia elétrica	23
2.2	Energia eólica	24
2.2.1	Aerogeradores	25
2.3	Microcontroladores	28
2.4	Arduino	29
2.5	Agricultura 4.0	29
2.6	Sensores aplicados na agricultura	31
3	Desenvolvimento	34
3.1	Captação e transmissão de dados	34
3.1.1	NodeMCU v1.0	34
3.1.2	ThingSpeak	37
3.1.3	Sensores	38

3.2 Autonomia energética	39
3.2.1 Gerador eólico	39
3.3 Protótipo	43
4 Resultados	47
4.1 Testes unitários na captação e transmissão de dados	47
4.2 Testes unitários no gerador eólico	51
4.3 Testes de integração	55
5 Considerações Finais	58
5.1 Conclusão	58
5.2 Dificuldades encontradas	59
5.3 Trabalhos futuros	59
Referências	61

Capítulo 1

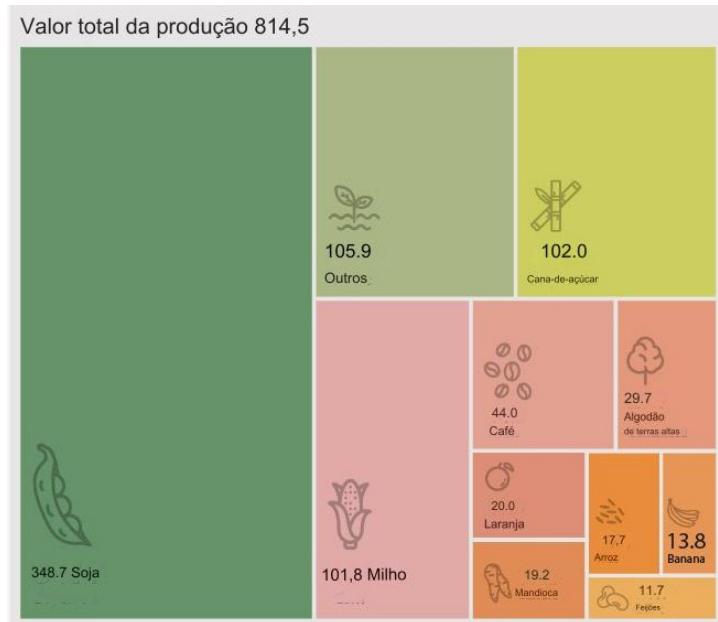
Introdução

A agricultura brasileira é reconhecida como altamente competitiva e geradora de empregos, de riqueza, de alimentos, de fibras e de bioenergia para o Brasil e para outros países, sendo um dos setores que mais contribui para o crescimento do PIB nacional e que responde por 21% da soma de todas as riquezas produzidas (Embrapa, 2023).

Segundo os números da Produção Agrícola Municipal (PAM), através de pesquisas realizadas pelo IBGE (2024), a safra de grãos, para o ano de 2023, foi de 316,4 milhões de toneladas, volume 19,6% superior à produção do ano anterior e recorde na série histórica, tendo soja, cana-de-açúcar, milho e algodão como principais culturas do Brasil e recordes de produção, como observado na Figura 1.1.

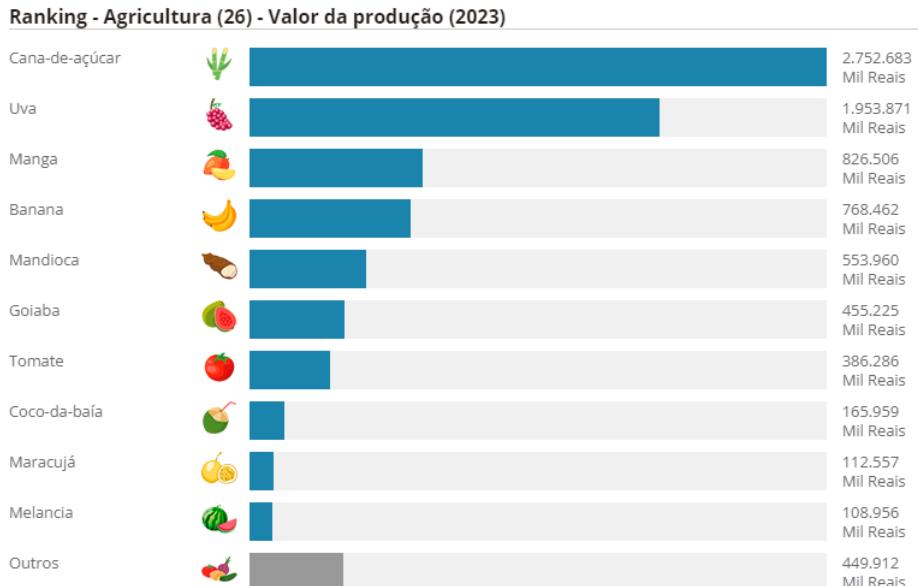
Em Pernambuco, o *ranking* de culturas é um pouco diferente dos gráficos do país, não tendo uma produção forte de soja, como observado na Figura 1.2, dado as características únicas de solo e ambiente comparado ao resto das regiões. Porém, também segue em uma crescente, batendo recordes históricos nos valores de produção agrícola, como em 2022 que ultrapassou R\$ 7,4 bilhões, contra R\$ 6,3 bilhões em 2021 (Diário de Pernambuco, 2023).

Figura 1.1: Culturas agrícolas por valor de produção no Brasil (em bilhões de reais).



Fonte: IBGE (2024)

Figura 1.2: Ranking de Agricultura por valor de produção em Pernambuco.



Fonte: IBGE (2023)

Todo esse desenvolvimento acelerado se deve grande parte ao uso de tecnologias como maquinários com GPS, imagens de satélites, dados em tempo real e até inteligência artificial. Imerso nesse cenário, denominado agricultura 4.0, uma das tecnologias que vem ganhando bastante espaço é a Internet das Coisas (IoT), um

conceito que reúne os mundos físico e digital, permitindo que os indivíduos interajam continuamente com outras pessoas e objetos.

Dessa forma, a interação com o mundo físico mudou, viabilizando novos negócios, facilitando a segurança, aprimorando a tomada de decisões, as estratégias agropecuárias e a automatização dos serviços, e consequentemente impulsionando produtividade e eficiência no uso de insumos e na redução dos impactos ambientais.

Nesse contexto, as operações e as decisões passaram a ser baseadas em informações coletadas em tempo real sobre clima, terra, cultivo, pecuária e produção (Klebio, 2021). Em contrapartida, o crescimento acelerado das tecnologias gera uma crescente demanda energética, segundo o World Energy Outlook 2020, até 2030 a demanda por energia em todo o mundo deverá aumentar em 9% e a maior parte desse aumento virá de mercados emergentes, dos quais o Brasil faz parte (FIA, 2023).

É um problema complexo e que envolve uma série de fatores políticos e econômicos, mas a busca pela segurança energética está muito alinhada a diversificação estratégica das fontes e investimentos consistentes em energias renováveis (Ramos da Silva, 2018).

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica - ABEEólica (2023), o país possui o segundo maior potencial eólico do mundo, grande parte devido a seu litoral extenso e com ventos fortes, o que o torna ideal para a instalação de parques eólicos *offshore*, sendo uma grande oportunidade de reduzir a dependência energética do país às hidrelétricas, que são vulneráveis às variações climáticas.

Por outro lado, a produção desse tipo de energia enfrenta alguns desafios como a necessidade de investimentos em pesquisa e desenvolvimento, a regulamentação da energia eólica *offshore* e a redução do desmatamento (Petróleo & Energia, 2023).

É imerso nesse cenário que se justifica o estudo e desenvolvimento de um sistema de monitoramento agrícola usando energia eólica que coleta e manipula dados de solo, utilizando microcontroladores e sensores, visando impulsionar a produtividade e melhorar a eficiência do uso de insumos.

Esse sistema busca autonomia energética utilizando como fonte a energia eólica,

uma energia limpa e sustentável, com um potencial incrível no Brasil e pouco utilizada nesse tipo de solução, mas que pode ser uma boa escolha em regiões com pouca incidência solar anual.

1.1 Justificativa

A implementação de sistemas de coleta e inteligência de dados na agricultura tem tornado as produções mais eficientes, sustentáveis e personalizadas. Por meio de tecnologias com drones, sensores e dispositivos IoT, os agricultores têm conseguido monitorar, em tempo real, uma série de fatores que reduzem o impacto ambiental e maximizam o rendimento (MundoGEO, 2024), logo, há uma grande procura por esse tipo de tecnologia.

Os sistemas atuais de monitoramento agrícola, em sua maioria, utilizam painéis solares interligados com bancos de baterias para seu pleno funcionamento (Revista AgroCampo, 2024), dessa forma, existe uma relação de sucesso entre um sistema de monitoramento agrícola e a incidência solar no local da sua instalação.

Visando uma autonomia energética mais regular e independente da incidência solar no ambiente, é de suma importância a pesquisa e desenvolvimento na diversificação da fonte energética. É neste cenário que a energia eólica se destaca, ainda pouco explorada, mas sendo conhecida pela sua longevidade e baixa necessidade de manutenção, conseguindo gerar energia dia e noite, muitas vezes.

Tudo isso gera indícios de que a energia eólica poderia ser utilizada para gerar mais autonomia em sistemas de monitoramento agrícola.

Também, existe uma série de sistemas agrícolas que dependem da ligação direta na energia elétrica, que poderiam ser beneficiados com a proposta da utilização da energia eólica para autonomia energética.

1.2 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de *hardware* para a agricultura moderna que tenha autonomia energética. O sistema deve ser capaz de coletar informações importantes sobre o cultivo e transmiti-las constantemente para a internet, onde esses dados serão monitorados.

Desta forma, o sistema trará diversos benefícios como a redução de custos operacionais devido à autossuficiência energética, a sustentabilidade devido ao uso de energia eólica e a melhoria na eficiência do cultivo devido à coleta constante de dados, otimizando o uso de recursos como a água e fertilizantes, e, consequentemente, promovendo uma agricultura mais produtiva e responsável.

1.2.1 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Projetar um sistema de *hardware* que colete informações relevantes do solo e seja eficiente em termos de consumo energético;
- Implementar um sistema de transmissão de dados para envio contínuo das informações coletadas para a internet;
- Projetar um sistema de geração eólica com capacidade de carregar a bateria do sistema de *hardware* buscando maior autonomia do projeto.

1.3 Organização do TCC

É apresentado neste trabalho o estudo e desenvolvimento de um sistema de monitoramento de agricultura alimentado por energia eólica, que coleta dados do solo e envia para a internet, e por meio disso monitora em tempo real uma série de fatores importantes para o cultivo, visando uma maior rapidez e precisão nas atuações cotidianas.

Este trabalho é organizado em capítulos, da seguinte forma:

No Capítulo de Introdução é apresentado, de uma forma geral, o contexto atual no qual a oportunidade abordada está inserida, os objetivos e a motivação do trabalho, bem como alguns trabalhos relacionados importantes para o desenvolvimento deste.

No Capítulo de Fundamentação Teórica são abordados todos os conceitos e tecnologias utilizados no projeto, desde a geração de energia elétrica/eólica, microcontroladores e sensores aplicados na agricultura.

No Capítulo de Metodologia é abordado de forma cronológica o desenvolvimento do protótipo, citando as especificações técnicas dos componentes utilizados e a motivação para seu uso. Ao final, o protótipo é exposto de forma completa, explicando suas partes e funcionalidades.

No Capítulo de Resultados são detalhadas três seções de testes divididas em testes unitários na captação e transmissão de dados, testes unitários no gerador eólico e testes de integração, elucidando uma série de conceitos abordados durante o desenvolvimento e estudo do projeto.

No Capítulo de Considerações Finais são abordadas as conclusões acerca do projeto desenvolvido, bem como as sugestões de trabalhos futuros, visando a melhoria do protótipo e melhor adequação ao problema.

1.4 Trabalhos relacionados

Neste trabalho é proposto a criação de um protótipo envolvendo geração e armazenamento de energia, microcontroladores e sensores, portanto, tem-se a necessidade de pesquisar trabalhos que utilizaram estes tipos de tecnologias e os mecanismos que eles utilizaram para passar da ideação até a implementação.

1.4.1 Internet das Coisas na agricultura

O trabalho relacionado (Klebio, 2021) visa explorar a aplicação da Internet das Coisas (IoT) na agricultura de precisão, destacando como essa tecnologia pode revolucionar o setor agrícola. O estudo aborda os desafios enfrentados pela agricultura, como altos custos de produção e práticas insustentáveis, e propõe soluções através da coleta e análise de dados em tempo real. A pesquisa inclui o desenvolvimento de um sistema baseado em IoT, demonstrando sua viabilidade e destacando a importância de práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis.

Além disso, o autor aponta desafios técnicos que precisam ser superados para expandir a aplicação da IoT na agricultura, entre eles inclue-se o alto custo de uso das tecnologias que pode ser um fator limitante, especialmente para pequenos produtores, a falta de conhecimento prático e teórico na área tecnológica, e o receio de conhecer novas possibilidades no campo.

O autor também menciona a dificuldade pela busca de tecnologia acessível e a inovação causada pelos desafios de realizar leituras de diferentes variações climáticas e a necessidade de melhorias na rede, como a aplicação de outros protocolos além do Wi-Fi e maior autonomia elétrica.

1.4.2 Tecnologia LoRa no ambiente agro

O trabalho de pesquisa relacionado (Germano, 2022) teve como objetivo desenvolver um protótipo de estação meteorológica de baixo custo utilizando a tecnologia LoRa, visando a coleta e monitoramento de dados climáticos em ambientes agrícolas, especialmente para pequenos agricultores que não têm acesso a soluções tecnológicas caras.

A pesquisa aborda conceitos como agrometeorologia, eficiência energética, e a comparação da tecnologia LoRa com outras soluções de rede de longa distância. O protótipo desenvolvido permite a coleta de dados em tempo real, contribuindo para a otimização das práticas agrícolas e a melhoria da produtividade. Além disso, sugere futuras pesquisas para integrar mais sensores e sistemas de irrigação automatizados,

promovendo práticas agrícolas sustentáveis.

O estudo é bastante interessante e traz uma gama de informações relevantes sobre a tecnologia LoRa e outras redes de loga distância, demonstrando a eficácia na transmissão de dados a distâncias de até 4 quilômetros, mesmo em condições de interferência moderada.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Geração de energia elétrica

O conceito básico de geração de energia elétrica envolve a conversão de diferentes fontes de energia primária (como hídrica, térmica, eólica ou solar) em energia elétrica utilizável.

As primeiras observações a respeito da eletricidade estática e, consequentemente, a respeito dos aspectos da energia elétrica ocorreram por volta de 600 a.C. por um filósofo grego chamado Tales de Mileto que, ao esfregar um âmbar a um pedaço de pele de carneiro, observou que pedaços de palhas e fragmentos de madeira começaram a ser atraídas pelo próprio âmbar, e do âmbar, que em grego é elektron, surgiu o nome eletricidade (FORP-USP, 2023).

Os SEPs (sistemas elétricos de potência) e a indústria da energia elétrica surgiram somente por volta de 1880, pois, entre os anos de 1750 e 1850, surgiram muitas descobertas relativas aos princípios da eletricidade e do magnetismo, como a invenção da bateria elétrica em 1800 e do gerador e do motor elétrico em 1831 (Vasconcelos, 2017).

Somente no ano de 1870 a eletricidade teve sua aplicação comercial, por meio de lâmpadas a arco voltaico em iluminação pública (tecnologia comum nos anos de 1888 a 1920) e, no ano de 1879, um grande estímulo para o desenvolvimento da energia elétrica surgiu com Thomas Edison, pela invenção e comercialização da

lâmpada incandescente (Vasconcelos, 2017).

Na década de 1890, se acirraram as disputas entre Westinghouse e Edison na famosa Guerra das Correntes para decidir, entre as correntes CC ou CA, qual seria a padronizada para a distribuição/transmissão da energia elétrica. No fim, a possibilidade da transmissão de energia elétrica em alta tensão por longas distâncias, a transformação da tensão e o uso mais simples e econômico foram os fatores que tornaram a corrente CA vencedora (Pinto, 2013).

O Brasil, desde o final da década de 1990, tem apresentado um crescimento contínuo na capacidade instalada de geração de energia elétrica. Em 2007, por exemplo, o país adicionou 4 mil MW à sua capacidade total, um reflexo dos constantes investimentos e da ampliação do parque gerador, com destaque para as hidrelétricas, que continuam sendo a principal fonte de eletricidade no país (ANEEL, 2008).

Entretanto, nos últimos anos, o país vem investindo cada vez mais em fontes renováveis, como energia eólica, biomassa e solar. Esse crescimento das energias renováveis no Brasil segue uma tendência global de investimentos em fontes limpas e sustentáveis, impulsionado por preocupações ambientais e pela necessidade de diversificação da matriz energética. O Proinfa, programa nacional criado em 2003, estimulou a expansão das fontes renováveis no país, com destaque para a energia eólica, que cresceu 65% ao ano entre 2003 e 2008 (ANEEL, 2008).

A busca por fontes alternativas de energia permite a diversificação da matriz energética brasileira, seja qual for a fonte primária, térmica, solar, marés, biomassa ou eólica, sendo que a última vem crescendo consideravelmente por todo o planeta (ABEEólica, 2023).

2.2 Energia eólica

A energia eólica é a energia cinética contida em uma massa de ar em movimento, sendo que, para ser utilizada, faz-se necessário que ocorra uma conversão da energia cinética de translação para energia cinética de rotação. Esse tipo de conversão de energia ocorre nas turbinas eólicas (aerogeradores) para a produção de energia

elétrica ou mecânica, dependendo da aplicação (ANEEL, 2008).

É uma forma de geração elétrica que se diferencia das fontes convencionais devido a fatores importantes, como a característica estocástica da fonte de energia, no caso o vento. A tecnologia utilizada nas turbinas eólicas vem evoluindo de forma consistente para aumentar a eficiência no processo de conversão eletromecânica de energia (Gonçalves, 2019).

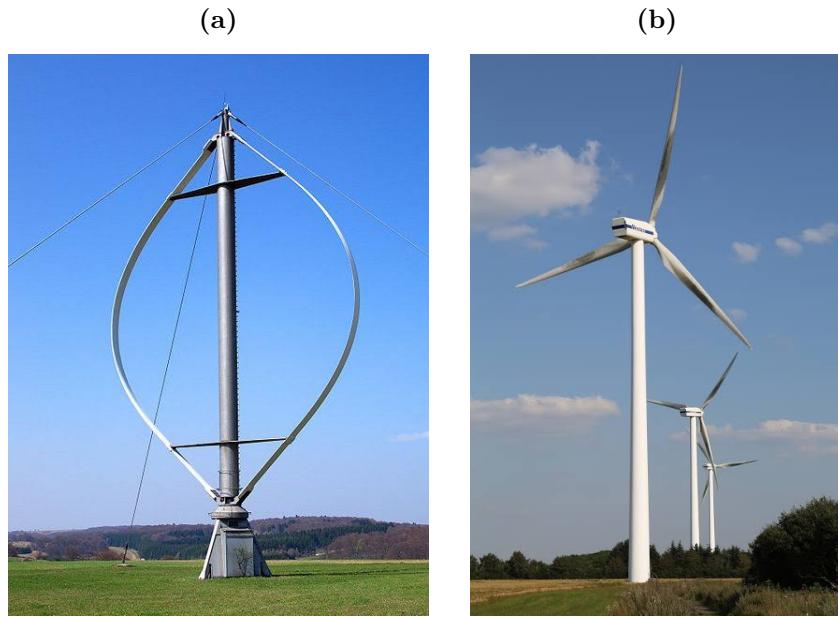
Segundo a Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2021), os primeiros projetos de energia eólica a serem instalados no Brasil datam do ano de 1992, pela Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, com financiamento do Folkcenter (Instituto de Pesquisa Dinamarquês) em parceria com a companhia energética de Pernambuco – CELPE. Um aerogerador foi instalado no arquipélago de Fernando de Noronha, um modelo de 17 metros de diâmetro e com 23 metros de altura. Sua geração de energia correspondia a 10% da energia consumida em todo arquipélago naquele tempo, proporcionando uma economia de aproximadamente de 70.000 litros de óleo diesel por ano.

No Brasil estão em operação 601 parques eólicos com 7 mil aerogeradores e capacidade instalada de 15 GW, essa capacidade de geração do parque eólico mundial vem aumentando consideravelmente graças aos avanços tecnológicos estimulados principalmente por questões ambientais (ABEEólica, 2023).

2.2.1 Aerogeradores

O sistema de geração eólica, também conhecido como aerogerador, é composto por dois modelos, os de eixo vertical e os de eixo horizontal. Os de eixo vertical, em geral, têm a vantagem de não necessitarem de mecanismos de acompanhamento para variações da direção do vento, tornando o projeto de dimensionamento mais barato, porém, menos eficiente. Os de eixo horizontal são mais utilizados na indústria pela sua viabilidade econômica, apesar de serem mais caros, são mais eficientes.

Figura 2.1: (a) Modelo de eixo vertical e (b) Modelo horizontal.



Fonte: CRESESB (2023), Vestas (2023)

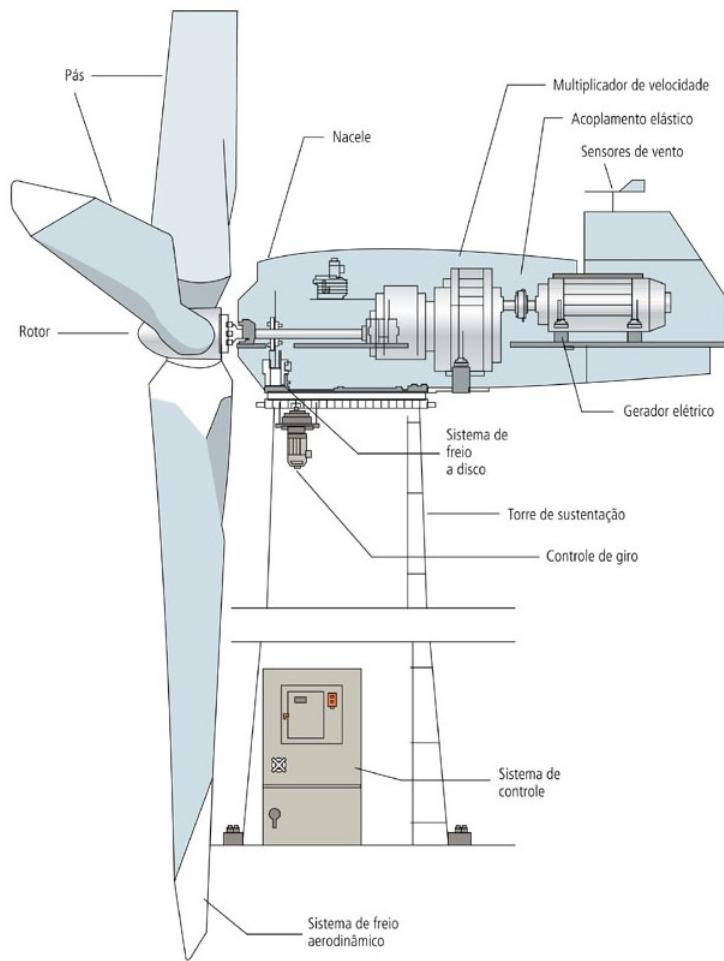
O sucesso de um sistema de energia eólica está diretamente relacionado a diversos fatores ambientais, com destaque para a constância, a velocidade e a direção do vento. Esses fatores são essenciais para o funcionamento eficiente dos aerogeradores e, consequentemente, para a maximização da produção de energia elétrica. Dessa forma, o posicionamento dos aerogeradores deve ser fundamentado em estudos detalhados da circulação atmosférica da região de instalação, a fim de orientá-los corretamente em relação à direção predominante do vento, permitindo uma maior captação desse recurso natural.

Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica - ABEEólica (2023), um aerogerador moderno, como o exposto na Figura 2.2, é composto principalmente pelo:

- Rotor: conecta-se ao eixo principal e transforma a energia cinética dos ventos em energia mecânica rotacional;
- Nacele: abriga componentes como o multiplicador de velocidade, engrenagens, gerador, sistema de controle, anemômetro e motores de rotação;
- Pás: captam a energia cinética dos ventos, convertendo-a em energia mecânica;

- Transmissão: amplifica ou baixa velocidade das rotações do rotor para o nível necessário ao gerador;
- Gerador: converte essa energia mecânica em elétrica por meio de dispositivos eletromecânicos;
- Controlador: orienta o rotor, regula a velocidade e a carga, enquanto a torre sustenta o rotor na posição ideal;
- Anemômetro: monitora a direção, intensidade e velocidade dos ventos.

Figura 2.2: Desenho esquemático de uma turbina eólica moderna.



Fonte: ABEEólica (2023)

Após o processo de conversão, a energia gerada é transmitida por meio de linhas de transmissão até o consumidor final. A instalação dos aerogeradores pode ocorrer

tanto em terra firme, denominando-se usinas *onshore*, quanto em estruturas instaladas no oceano, conhecidas como usinas *offshore* (ABEEólica, 2023).

Este trabalho visa elucidar os principais fatores relacionados ao desenvolvimento de um sistema que busca autossuficiência energética por meio da energia eólica, são eles o cálculo de potência do sistema, cálculo de potência do aerogerador e as questões de transformação, armazenamento e gerenciamento de energia.

2.3 Microcontroladores

Segundo Oliveira e Zanetti (2015), um microcontrolador pode ser descrito como um computador completo em um único chip, composto por um processador, memória e periféricos de entrada e saída, todos integrados em um único encapsulamento. Ainda, ao contrário dos microprocessadores de uso geral, os microcontroladores são programados para executar tarefas específicas, sendo incorporados em outros dispositivos para controlar suas operações ou ações.

De acordo com Kerschbaumer (2023), a principal diferença entre microcontroladores e microprocessadores está em sua estrutura, enquanto os microprocessadores tradicionais possuem apenas os componentes lógicos e aritméticos necessários para o processamento de dados, os microcontroladores integram, além desses, elementos como memória de leitura e escrita para armazenar dados, memória somente de leitura para programas, e periféricos adicionais, como conversores analógico-digitais (CAD) e digital-analógicos (CDA), *EEPROM* para armazenamento permanente de dados, e interfaces de entrada e saída de dados.

Embora operem em frequências de *clock* relativamente baixas, geralmente na faixa de megahertz (MHz), os microcontroladores são mais que suficientes para uma ampla gama de aplicações práticas, como o controle de esteiras industriais, secadoras de roupas ou lava-louças (Oliveira e Zanetti, 2015).

Seu consumo de energia é bastante eficiente, muitas vezes na casa dos miliwatts, e eles podem entrar em modos de baixo consumo, como espera ou suspensão (*Sleep* ou *Wait*), enquanto aguardam eventos externos, como o acionamento de um botão

ou a chegada de um sinal por uma interface de dados (Kerschbaumer, 2023).

Em modo de espera, o consumo de energia desses dispositivos pode chegar a valores extremamente baixos, na faixa de nanowatts, tornando-os ideais para projetos onde a eficiência energética é crucial (Kerschbaumer, 2023).

2.4 Arduino

O Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto, composta por *hardware* e *software* simples capaz de ler entradas e convertê-las em saídas, executando comandos de acordo com essas leituras.

Todos os comandos são processados por um microcontrolador presente na placa, por meio de um conjunto de instruções enviadas através da linguagem de programação e do *software* Arduino (IDE), baseado em processamento (Oliveira e Zanetti, 2015).

As principais vantagens do Arduino é: seu custo relativamente baixo em comparação com outras plataformas de microcontroladores; a compatibilidade do *software* Arduino (IDE) com os sistemas operacionais Windows, Mac OSX e Linux, além de possuir um ambiente simples e fácil de usar; ser uma ferramenta de código aberto, permitindo que o *software* seja expandido e adaptado; e que os projetos das placas Arduino são disponibilizados sob licença Creative Commons, possibilitando modificações e melhorias (Arduino.cc, 2023).

2.5 Agricultura 4.0

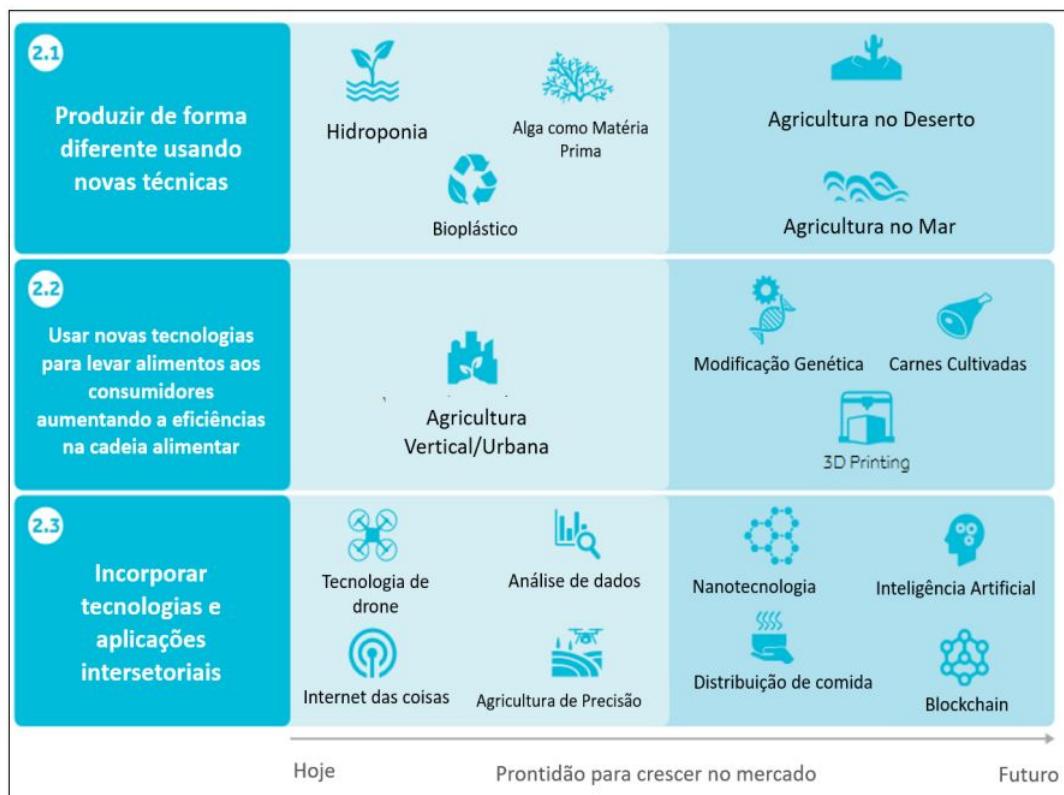
A Agricultura 4.0 é uma resposta aos desafios da agricultura moderna, que precisa ser mais produtiva, sustentável e adaptável. Caracterizando-se pela integração de tecnologias digitais avançadas, que promovem uma gestão mais inteligente e sustentável dos processos produtivos, esse conceito engloba o uso de sensores, drones, Internet das Coisas (IoT), Big Data, Inteligência Artificial (IA) e automação, para transformar as operações agrícolas em sistemas de produção altamente eficientes e

de menor impacto ambiental (Trivelli et al., 2019).

A partir de dados coletados por sensores, drones, sistemas de georreferenciamento e satélites, é possível monitorar variáveis críticas, como a umidade e a qualidade do solo, condições climáticas, e o desenvolvimento das culturas em tempo real (Mantovani et al., 2020). Assim, a Agricultura 4.0 permite ao produtor decisões mais assertivas e ágeis, ampliando a eficiência e a precisão dos processos.

A Figura 2.3 exemplifica as tecnologias abordadas pela Agricultura 4.0 e o que está por vir no decorrer dos anos.

Figura 2.3: Tecnologias da Agricultura 4.0 e as que estão por vir.



Fonte: Neumann (2018)

Essas tecnologias resultam na criação das chamadas “fazendas inteligentes”, onde a integração de dispositivos e máquinas conectados permite o gerenciamento autônomo e otimizado de atividades, como irrigação, aplicação de defensivos e fertilização. Além disso, a agricultura de precisão, a base da Agricultura 4.0, ajuda a identificar variações espaciais no solo e a aplicar insumos nas áreas específicas que realmente necessitam, evitando o desperdício e reduzindo custos operacionais (Cis-

ternas et al., 2020).

O conceito de Agricultura 4.0 também reforça a importância de práticas sustentáveis. Ao empregar tecnologias que economizam recursos, como a água e fertilizantes, e minimizam a emissão de poluentes, essa abordagem contribui para uma agricultura mais consciente e responsável, voltada para a preservação ambiental e a redução do impacto ecológico das práticas agrícolas (Barbosa et al., 2020).

2.6 Sensores aplicados na agricultura

Os sensores têm um papel essencial ao fornecer dados em tempo real que orientam a tomada de decisões no campo. Integrados a sistemas de Internet das Coisas (IoT), esses dispositivos permitem um monitoramento preciso de variáveis como umidade do solo, temperatura, luminosidade e níveis de nutrientes, fatores que influenciam diretamente o crescimento e a produtividade das culturas. Com esses dados detalhados sobre o ambiente agrícola, o agricultor consegue adotar práticas de gestão mais assertivas e sustentáveis.

Os sensores de umidade do solo, por exemplo, medem o teor de água presente, uma informação crucial para o manejo eficiente da irrigação. A partir dessas medições, o agricultor pode determinar a quantidade exata de água necessária para cada estágio de crescimento das plantas, evitando desperdícios e promovendo o uso racional dos recursos hídricos. Em sistemas mais avançados, os sensores de umidade estão integrados a sistemas de irrigação automatizada, que liberam água apenas quando o solo atinge um certo nível de secura.

Segundo a Syngenta Digital (2024), os sensores de previsão do tempo, temperatura e umidade do ar, como o exposto na Figura 2.4, monitoram as condições atmosféricas e são valiosos para identificar situações de estresse térmico nas plantas, permitindo ajustes em práticas como irrigação e sombreamento. Além disso, essas informações contribuem para a previsão de pragas e doenças, uma vez que certas pragas proliferam em faixas de temperatura específicas. Assim, o agricultor pode adotar medidas preventivas, reduzindo a necessidade de defensivos químicos e pro-

movendo um ambiente mais saudável para as culturas.

Figura 2.4: Exemplo de sensores de previsão do tempo.



Fonte: Syngenta Digital (2024)

Os sensores de nutrientes no solo monitoram elementos essenciais como nitrogênio, fósforo e potássio, além de pH e matéria orgânica. Esses dados permitem ao agricultor ajustar a aplicação de fertilizantes de forma localizada, corrigindo deficiências específicas de cada área da plantação. Esse tipo de manejo, conhecido como fertilização de precisão, garante uma nutrição balanceada das plantas, melhora a produtividade e evita o uso excessivo de produtos químicos que podem contaminar o solo e os recursos hídricos (Harold F. Reetz, 2017).

Sensores de luminosidade e radiação solar captam informações sobre a intensidade da luz e a quantidade de radiação recebida pelas plantas. Como a luz é essencial para a fotossíntese, esses dados ajudam a identificar se as plantas estão recebendo luz suficiente ou se é necessário realizar ajustes no manejo, como a instalação de barreiras de sombreamento ou o reposicionamento estratégico das culturas para maximizar a exposição solar (da Rosa Leão, 2024).

Em ambientes controlados, como estufas, sensores de gases, incluindo dióxido de carbono (CO_2) e oxigênio (O_2), monitoram a qualidade do ar, permitindo que o ambiente interno seja ajustado para otimizar o crescimento das plantas. Como o CO_2 é fundamental para a fotossíntese, a manutenção de níveis adequados pode

aumentar a eficiência do processo e a produtividade das culturas, especialmente em ambientes controlados, onde o controle desses parâmetros é mais preciso (Morandi et al., 2024).

Capítulo 3

Desenvolvimento

Os dispositivos escolhidos têm como finalidade completar os objetivos principais deste projeto, são eles: a captação de dados importantes para a agricultura, a comunicação com a internet, via Wi-Fi, e a autonomia energética, por energia eólica. Buscando um monitoramento e uso de recursos mais inteligente nas plantações com um baixo custo operacional.

3.1 Captação e transmissão de dados

Para o processo de captação e transmissão de dados foi desenvolvido um sistema de *hardware* utilizando um microcontrolador, NodeMCU v1.0 (ESP8266), conectado a um higrômetro, que transmite os dados via Wi-Fi para a plataforma ThingSpeak.

3.1.1 NodeMCU v1.0

Para o desenvolvimento deste projeto foi escolhido o microcontrolador NodeMCU v.10 (ESP8266), como exposto na 3.1. Essa placa de desenvolvimento é baseada no módulo ESP-12E Wi-Fi, que é um componente eletrônico altamente tecnológico desenvolvido especialmente para conectar projetos robóticos ou de automação residencial à Internet, com maior facilidade e baixo custo (NodeMCU Team, 2015).

Figura 3.1: Placa de desenvolvimento NodeMCU v1.0 (ESP8266) utilizada no projeto.



Fonte: NodeMCU Team (2015)

Além de conter o Wi-Fi integrado, os módulos ESP8266 contêm uma biblioteca nativa, chamada ”DeepSleepDemo”, voltada para processos de *Sleep* que, consequentemente, facilita a implementação em projetos que necessitam de baixo custo energético, chegando a correntes de $20\ \mu A$ em processos forçados de *DeepSleep*, como exposto na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Informações por nível de *Sleep* na ESP8266.

Item	Auto Light Sleep	Forced Light Sleep	Forced Deep Sleep
Wi-Fi	ON	OFF	OFF
Clock	CYCLING	OFF	OFF
RTC	ON	ON (1)	ON (2)
CPU	ON	ON	OFF
Amperage	1-15 mA (3)	0.4 mA	$20\ \mu A$

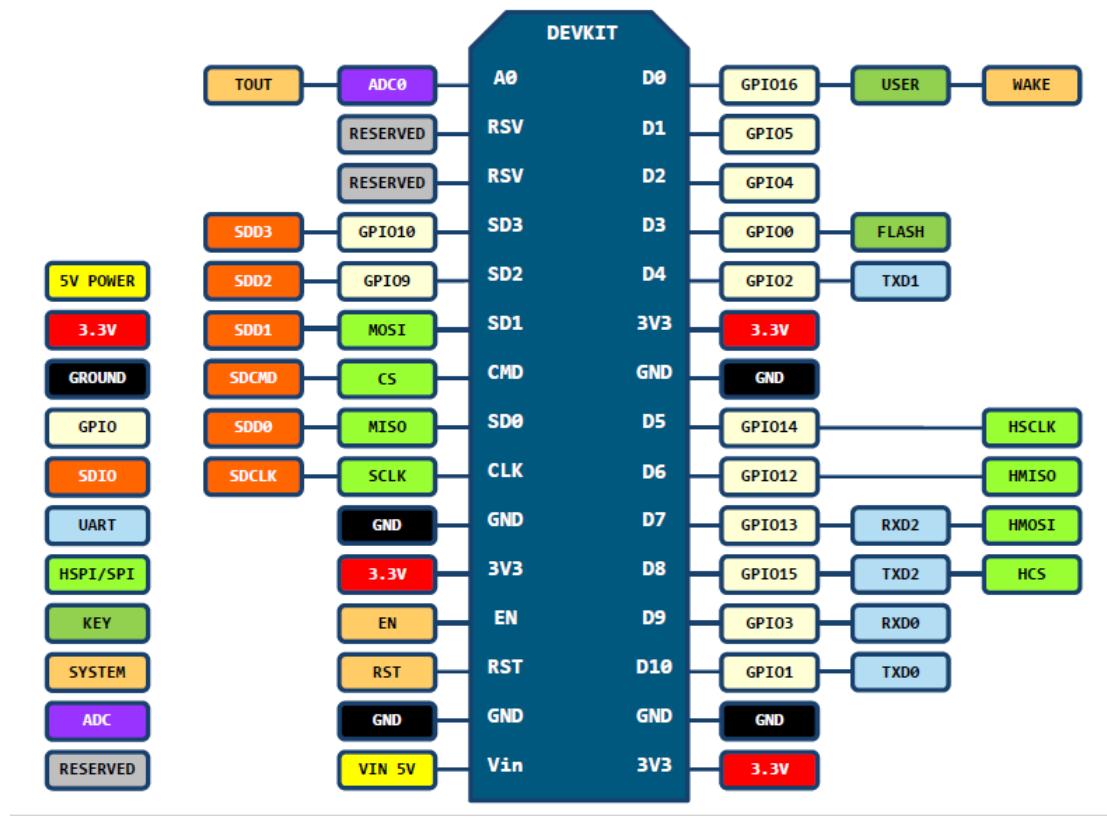
Fonte: Adaptado de ESP8266 Community (2024)

Para orientar a ligação de sensores e atuadores, a Figura 3.2 apresenta a pinagem do NodeMCU v1.0, destacando o mapeamento entre os rótulos da placa (D0...D8) e os GPIOs reais do ESP8266. Alguns pinos possuem restrições de boot (GPIO0, GPIO2 e GPIO15) e devem manter níveis lógicos adequados durante a

inicialização. A entrada A0 corresponde ao ADC do ESP8266, com faixa de tensão limitada conforme a revisão da placa. Para atingir o baixo consumo em *Deep Sleep*, é recomendável ligar diretamente o pino D0 ao RST, permitindo despertar a placa utilizando seu RTC.

Figura 3.2: Pinagem do NodeMCU v1.0 (ESP8266)

PIN DEFINITION



Fonte: NodeMCU Team (2015)

Por fim, para controlar e gerenciar o funcionamento do sistema, foi desenvolvido um código específico em linguagem C/C++ utilizando o *software* Arduino (IDE). Esse programa gerencia a leitura do sensor de umidade, o envio das informações ao servidor ThingSpeak e a aplicação dos modos de *Deep Sleep*, assegurando o baixo consumo energético do dispositivo. O código foi implementado de forma modular e documentada, possibilitando futuras expansões e adaptações do sistema. O repositório com a implementação completa encontra-se disponível em (Telles, Arthur,

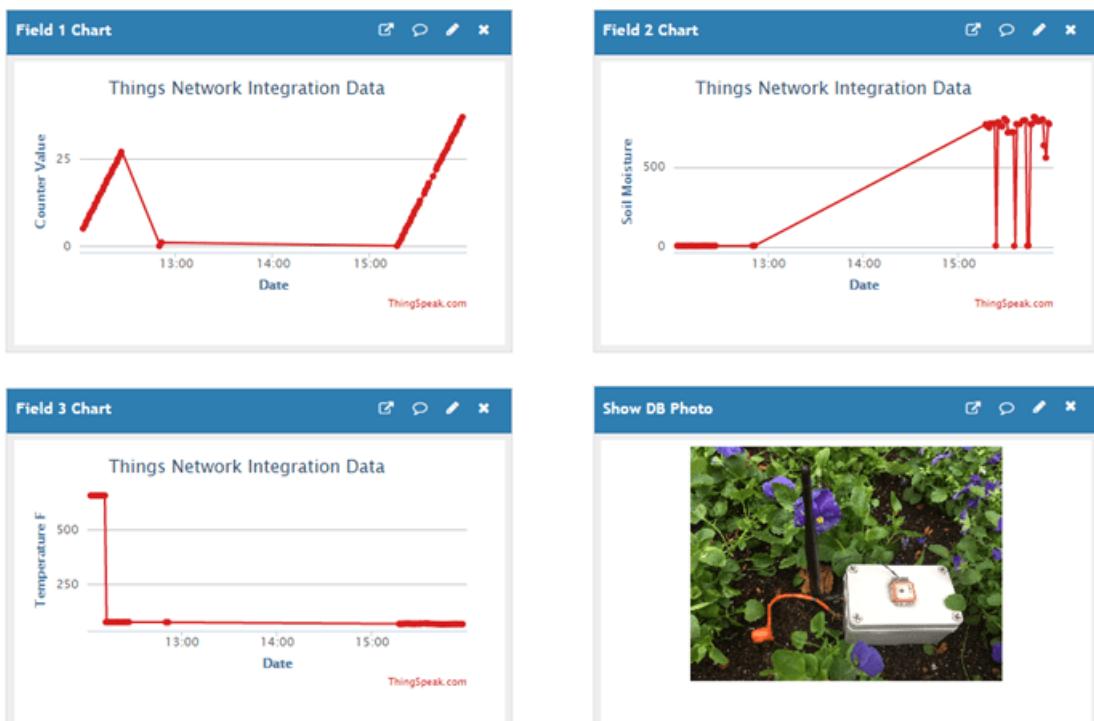
2025), reforçando a transparência e a reproduzibilidade do projeto.

3.1.2 ThingSpeak

O ThingSpeak é uma plataforma de IoT que permite adicionar, visualizar e analisar fluxo de dados em tempo real na nuvem. Ele é um serviço gratuito que permite comunicação através de um protocolo baseado em HTTP. Para enviar dados para o servidor, deve-se criar uma conta no site thingspeak.com e criar um canal para receber as informações dos sensores. Os canais criados são personalizáveis e podem armazenar até 8 campos com informações. A plataforma foi escolhida pela facilidade de conexão com o NodeMCU por meio da internet.

Para o envio das informações, é necessário criar uma conta criando uma conta e configurar um canal com as chaves fornecidas. Cada canal pode ser personalizado para armazenar até 8 campos de dados, além de permitir a inserção de informações adicionais como latitude, longitude e notas descritivas. Os canais podem ser públicos ou privados, de acordo com a necessidade de compartilhamento dos dados.

Figura 3.3: Exemplo de aplicação para dados de agricultura



Fonte: MathWorks (2025)

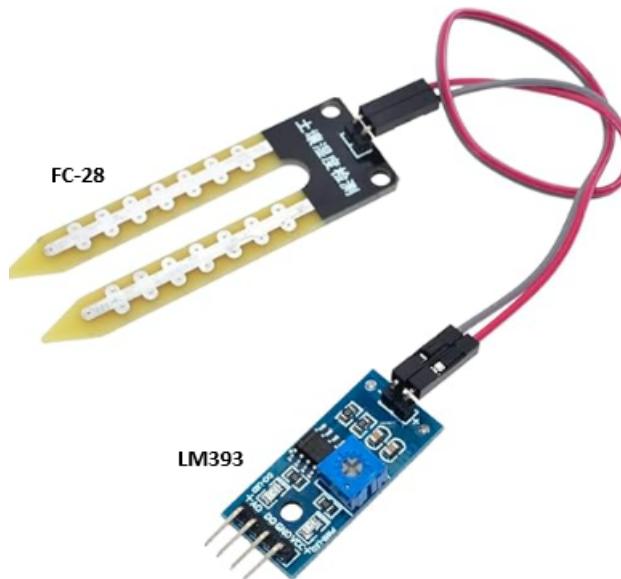
Uma das principais vantagens da plataforma está nos seus recursos de visualização. O ThingSpeak oferece gráficos interativos em tempo real, que podem ser configurados para diferentes tipos de análise, como séries temporais, comparações entre variáveis e monitoramento de tendências. Além disso, é possível integrar ferramentas de análise avançada, como o MATLAB, diretamente na plataforma. Isso possibilita a execução de scripts para cálculos estatísticos, filtragem de ruídos, previsões e outras análises matemáticas e gráficas.

3.1.3 Sensores

Higrômetro

O higrômetro utilizado no projeto, exposto na Figura 3.4, é comumente chamado de módulo sensor de umidade do solo e consiste na junção do FC-28, um componente composto por duas hastes que medem a resistência elétrica do solo (quando o solo está seco a resistência entre as hastes aumenta e quando o solo está úmido a resistência diminui), e o LM393, um comparador de voltagem que conectado ao FC-28 consegue chegar a valores parametrizados que representam a umidade do solo propriamente dita (DFRobot, 2023).

Figura 3.4: Higrômetro utilizado no projeto.



Fonte: DFRobot (2023)

3.2 Autonomia energética

Para o sistema que busca trazer autonomia energética para o protótipo, foi desenvolvido um protótipo de gerador eólico básico com pás, motor, regulador de tensão e bateria.

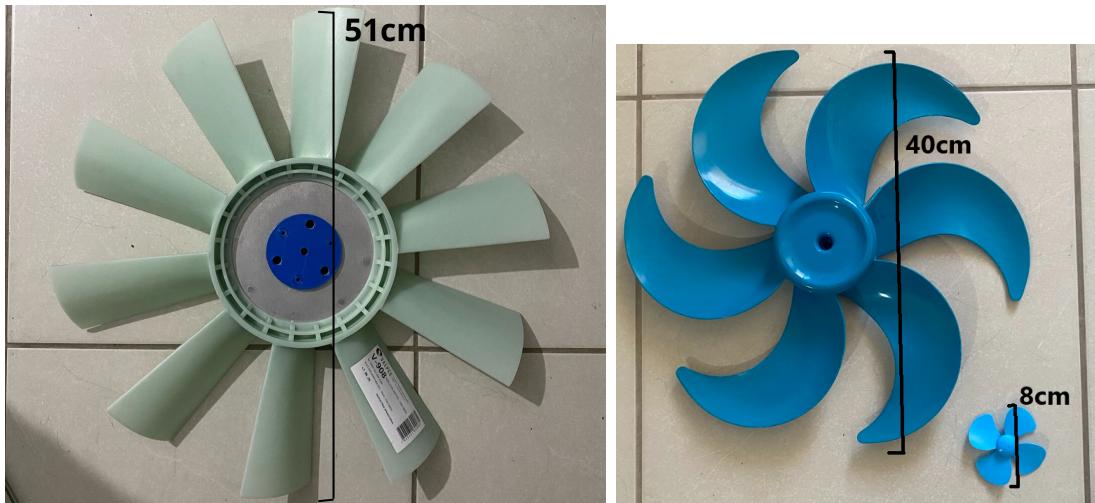
3.2.1 Gerador eólico

O indicador de sucesso do gerador eólico é sua capacidade de transformar energia cinética do ar em energia mecânica e consequentemente energia elétrica, dessa forma, foi estudado componentes e seus desempenhos na transformação de energia, bem como componentes para regular e armazenar a energia produzida.

Pás

As pás são a peça chave para uma boa transformação de energia cinética do ar em energia mecânica, dessa forma, para o estudo e desenvolvimento do protótipo foi utilizado três pás de tamanhos e anatomias diferentes, expostas na Figura 3.5, uma maior, com 51cm de diâmetro, comumente utilizada em radiadores de caminhão modelo 1113/1114, uma média, com 40cm de diâmetro, comumente utilizada por ventiladores turbo e uma outra menor, com 8cm de diâmetro, comumente vendida em pequenos *kits* de estudo de geradores eólicos.

Figura 3.5: Pás utilizadas no projeto.



Fonte: autor.

Geradores

Os geradores utilizados consistem em motores acoplados as pás, que ao girar induzem a tensão e, consequentemente, a corrente.

Para o teste e desenvolvimento do projeto foi utilizado dois motores CC: um modelo C7902-2095, exposto na Figura 3.6, comumente utilizado em impressoras de papel, com tensão nominal de trabalho entre 12V e 24V, e corrente de 0,5A a 1A em aplicações de baixo torque (Infobras Peças e Partes, 2024), e um modelo DC 555 com redutor planetário PG36 com relação de redução de 27:1, rotação de trabalho entre 250RPM a 295RPM, com tensão nominal de trabalho de 12V e corrente de 0.5A a 1A (ETC, 2024), comumente utilizado em projetos de robótica e automações em geral, exposto na Figura 3.7.

Figura 3.6: Motor CC C7902-2095 utilizado no projeto.



Fonte: autor

Figura 3.7: Motor CC 555 com redução de 27:1 utilizado no projeto.



Fonte: autor

Regulador de tensão

A fim de estabilizar a tensão produzida pelo gerador após a conversão de energia mecânica de rotação em energia elétrica, foi utilizado o regulador de tensão L7805, sendo a melhor opção para regular tensões que não são constantes ao longo do tempo, como a obtida através da energia cinética do vento.

O regulador de tensão, exposto na Figura 3.8, apresenta tensão de entrada não polar AC/DC na faixa de 7.5V a 20V, tensão de saída de 5V e corrente de saída máxima em 1.2A (Alldatasheet, 2024).

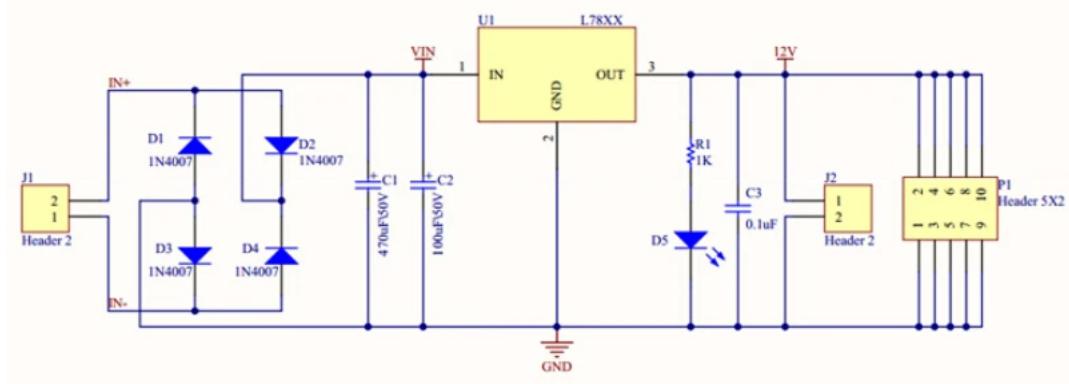
Figura 3.8: Regulador de tensão L7805 utilizado no projeto.



Fonte: AliExpress (2024)

Além de sua função de estabilização, o L7805 também conta com um circuito retificador na entrada, como pode ser visto na Figura 3.9. Esse circuito é responsável por corrigir a polaridade do sinal proveniente do gerador. Esse circuito atua garantindo que a tensão aplicada ao regulador seja sempre positiva, evitando tensões negativas que poderiam danificar os componentes eletrônicos conectados. Dessa forma, mesmo quando a tensão fornecida pelo gerador apresenta oscilações ou variações bruscas, o retificador assegura uma alimentação contínua e segura para o sistema, protegendo a placa de controle e os sensores utilizados no projeto.

Figura 3.9: Regulador de tensão L7805 utilizado no projeto.



Fonte: AliExpress (2024)

Outro diferencial é um dissipador de calor em alumínio já instalado no regulador de tensão, aumentando sua eficiência térmica e garantindo maior durabilidade em

aplicações contínuas. Além disso, conta com bornes a parafuso para facilitar a conexão dos fios de alimentação e de carga, tornando a instalação mais prática e segura. Outro ponto relevante é a presença de dois capacitores eletrolíticos de grande capacidade, que contribuem para fornecer uma tensão e corrente de saída mais estáveis e suaves, reduzindo ruídos e interferências nas linhas de alimentação da carga.

Armazenamento de Energia

Ao final de todo processo de conversão e regulagem da tensão é preciso armazenar a energia gerada em uma bateria. Para o teste e desenvolvimento do projeto foi utilizado uma bateria do tipo *PowerBank* que com 28000mAh de autonomia e tensão de trabalho de 5V.

Figura 3.10: Bateria utilizada no projeto.

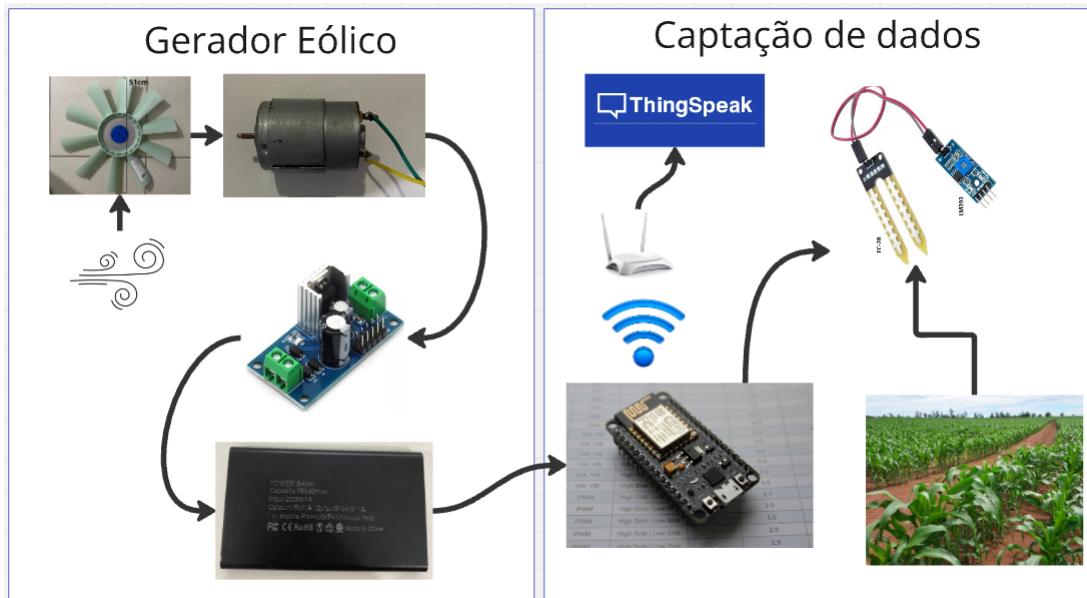


Fonte: autor

3.3 Protótipo

O protótipo foi esquematizado utilizando os componentes citados nas seções 3.1 e 3.2 e exposto na Figura 3.11, divididos em duas partes principais, o gerador eólico, responsável pela autonomia energética, e a captação de dados, responsável pela aferição e transmissão de dados.

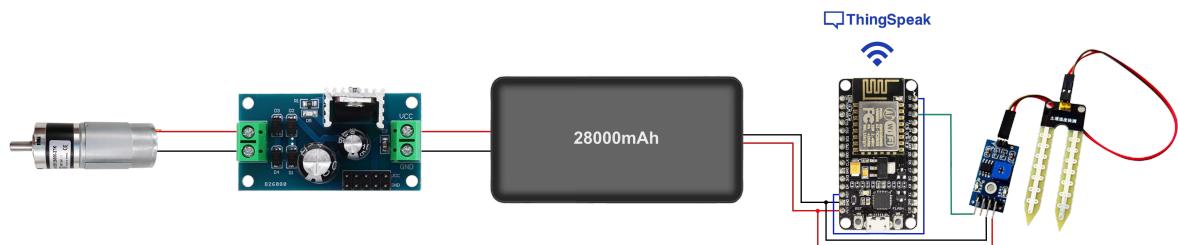
Figura 3.11: Esquemático completo do projeto.



Fonte: autor

Para complementar a descrição do protótipo, a Figura 3.12 apresenta o esquemático detalhado da montagem do circuito, destacando as conexões realizadas entre os principais componentes do sistema, tais como o regulador de tensão, a bateria *PowerBank*, o NodeMCU e o sensor de umidade do solo. O diagrama facilita a compreensão da arquitetura desenvolvida, permitindo visualizar como os sinais são captados, processados e posteriormente transmitidos para a plataforma de monitoramento.

Figura 3.12: Esquemático do circuito com as conexões entre os componentes do protótipo.

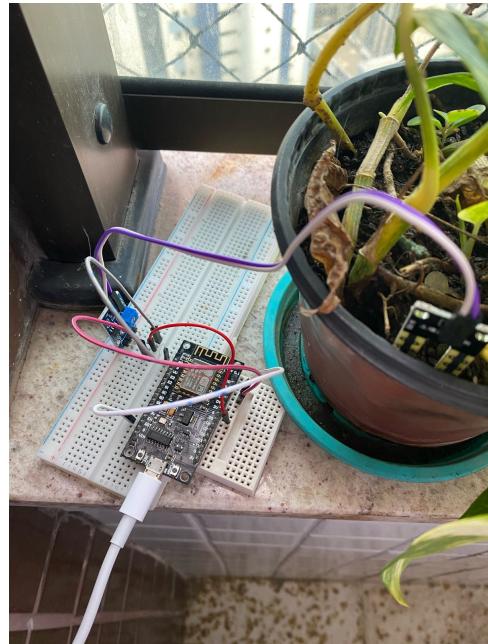


Fonte: autor

O protótipo passou por testes de aquisição e transmissão de dados, exposto na Figura 3.13, testes de carga e testes de integração, sendo testados separadamente

para os três tipos de pás e os dois tipos de motores, expostos nas Figuras 3.14 e 3.15. Seus resultados serão melhor abordados na seção Resultados.

Figura 3.13: Protótipo em teste de transmissão.



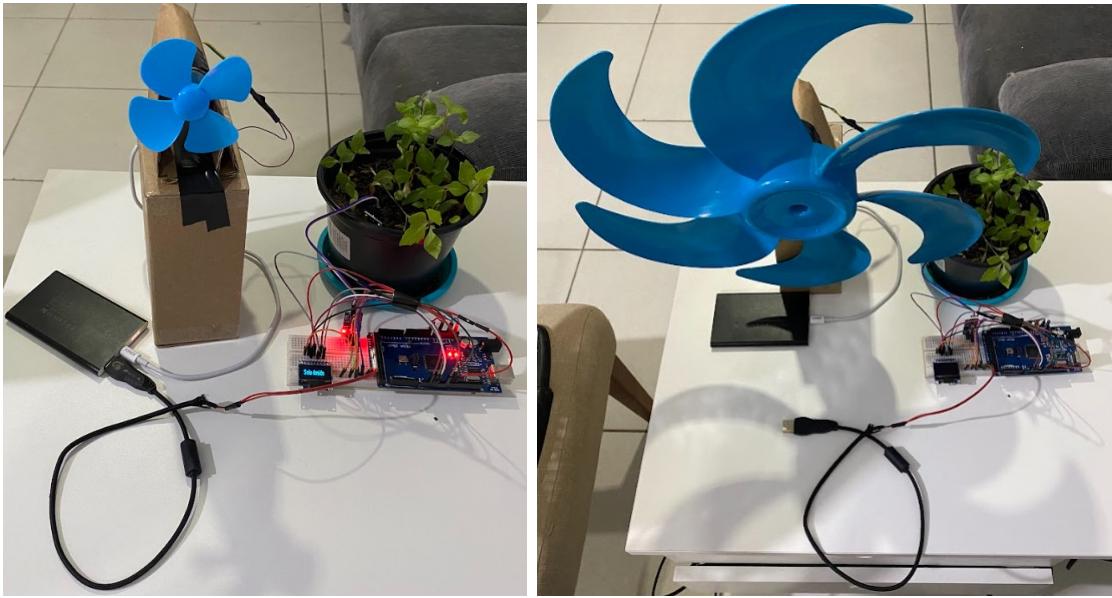
Fonte: autor

Figura 3.14: Testes de carga e integração com pás de 51cm.



Fonte: autor

Figura 3.15: Teste de carga e integração com pás de 8cm e de 40cm.



Fonte: autor

Capítulo 4

Resultados

Os testes foram divididos em 3 etapas: dois testes unitários e um teste de integração. Cada módulo exposto anteriormente, módulo de captação e transmissão de dados e módulo do gerador eólico, foi testado e avaliado separadamente, e após isso, o protótipo foi testado por completo, avaliando seu desempenho e adequação ao cenário real.

4.1 Testes unitários na captação e transmissão de dados

O processo de captação e transmissão de dados teve como fatores chaves a transmissão para a plataforma ThingSpeak e a implementação do modo *Deep Sleep*, capaz de reduzir o consumo em mais de 10 vezes em alguns momentos especificados a nível de código.

Para o processo de captação de dados foi inicialmente calculada a potência requerida durante o pleno funcionamento e em modo *Deep Sleep*, por meio da corrente e da tensão, esta última fixada em 5V, os dados aferidos de corrente estão expostos na Figura 4.1.

A potência elétrica no circuito foi determinada com base na relação entre tensão (V) e corrente elétrica (I), conforme a Equação 4.1. Os valores obtidos experimen-

talmente e os resultados dos cálculos correspondentes encontram-se na Tabela 4.1.

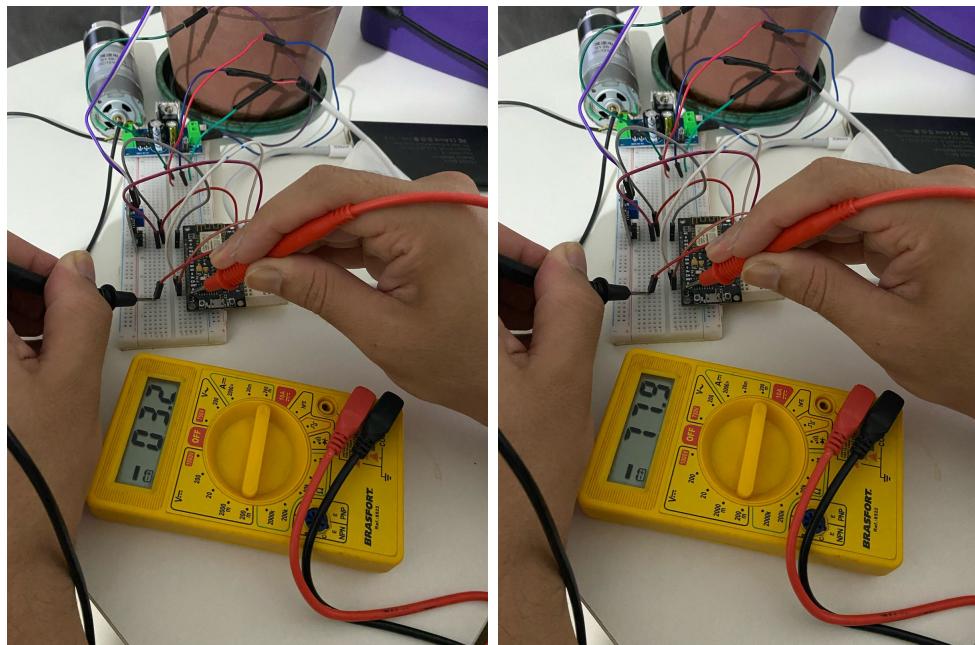
$$P = V \times I \quad (4.1)$$

Tabela 4.1: Valores de tensão, corrente e potência obtidos de forma experimental

Modo	Tensão(V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
Normal	5	77.9	389.5
<i>Deep Sleep</i>	5	3.2	16

Embora a expressão utilizada para calcular a potência elétrica seja válida apenas em condições de corrente contínua (DC), nas quais a tensão e a corrente permanecem constantes no tempo, neste projeto foi adotada como uma aproximação prática. Isso se deve ao fato de que, após o processo de retificação e regulação da tensão pelo módulo L7805 e pelo *PowerBank*, a tensão de operação do sistema mantém-se praticamente constante em torno de 5 V, com variações consideradas desprezíveis no contexto desta análise.

Figura 4.1: Tensões medidas em *DeepSleep* e funcionamento normal.



Fonte: autor

O protótipo gasta menos de 10 segundos para ligar, se conectar ao Wi-Fi, coletar

os dados e enviar para a plataforma ThingSpeak antes de entrar em *DeepSleep* novamente, como exposto na Figura 4.2, coletado durante os testes com a função “`millis()`”.

Figura 4.2: Exibição da execução do protótipo conectado ao computador.

```
EO|t`MMOxExE :IXhZConectando-se à rede WiFi...
.....
WiFi conectado com sucesso!
IP obtido:
192.168.1.17
Projeto TCC - Arthur
Leitura Sensor de Umidade: 265
[Umidade Percentual] 74.00%
Dormindo por dez minutos a partir de agora...
millis() = 6832
..
```

Fonte: Telles, Arthur (2025)

Considerando que nas aplicações que o protótipo seja submetido, seja possível coletar dados em intervalos de 10 minutos apenas, a aplicação passaria $10\text{ segundos} \times 6 = 60\text{s}$ em estado normal por hora, a potência e a corrente média pode ser calculada pela média ponderada entre os valores em estado normal e *DeepSleep* e os tempos de uso por hora:

$$\text{Potência}_{\text{Média}} = \frac{(389.5\text{mW} \times 1\text{min}) + (16\text{mW} \times 59\text{min})}{60\text{min}} \approx 22.2\text{mW} \quad (4.2)$$

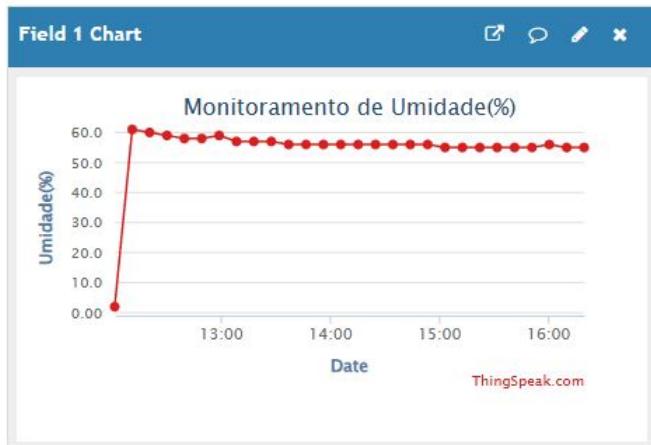
$$\text{Corrente}_{\text{Média}} = \frac{(77.9\text{mA} \times 1\text{min}) + (3.2\text{mA} \times 59\text{min})}{60\text{min}} \approx 4.4\text{mA} \quad (4.3)$$

Para a corrente média encontrada e para a bateria totalmente carregada de 28000mAh, utilizada no projeto, é possível obter teoricamente uma autonomia de 265 dias, calculada através da divisão da carga total e do consumo durante 24Hrs, exposto na Equação 4.4.

$$\text{Autonomia}_{\text{Total}} = \frac{28000\text{mAh}}{4.4\text{mA} \times 24\text{Hrs}} \approx 265 \text{ dias} \quad (4.4)$$

A transmissão de dados é feita para a plataforma ThingSpeak, por meio do Wi-Fi, e o usuário pode visitar e monitorar os dados via internet, como exposto na Figura 4.3, podendo monitorar a variação da umidade do solo após a irrigação.

Figura 4.3: Exibição da execução do protótipo conectado ao computador.



Fonte: autor

Dessa forma, foi possível cumprir com os objetivos principais do processo de captação dos dados e transmissão trazendo informações relevantes ao longo do tempo para o usuário.

Segundo a documentação da biblioteca LowPowerDemo - ESP8266 (2015), é possível chegar em correntes na ordem de $20\mu A$ em *DeepSleep*, mas em placas do tipo NodeMCU v1.0 a corrente mesmo em *DeepSleep* fica na ordem de $5mA$. Acredita-se que o motivo é por conter uma série de mecanismos extras que consomem energia na placa, além do microprocessador ESP8266. Também, foi observado por meio de testes que alterar a alimentação da placa anteriormente feita via USB para diretamente nos pinos Vin e GND reduziu seu consumo de $7mA$ para $3.2mA$.

Para o correto funcionamento do *DeepSleep*, foi necessário adicionar um fio ligando a porta “D0” ao pino de *reset* da placa. Isso ocorre porque é a porta “D0” que força o ESP8266 a acordar. Durante o *DeepSleep*, quase todos os componentes da placa são desligados, incluindo o *clock* e o *led*, ficando a cargo do pino “D0”, em conjunto com o *timer RTC*, realizar o *reset* para despertar o dispositivo.

4.2 Testes unitários no gerador eólico

Os testes unitários do Gerador Eólico consistiram em medir sua produção energética e capacidade de carregamento da bateria utilizando as pás expostas na Figura 3.5 e um ventilador Arno, modelo Turbo Force VF42-VF43, ilustrado na Figura 4.4, utilizado como fonte de vento controlada, com valores de vazão conhecidos, expostos na Tabela 4.2, medidos com um Anemômetro Amgaze Handheld de forma experimental, ilustrado na Figura 4.5.

Figura 4.4: Ventilador Arno 40cm utilizado nos testes.



Fonte: Novalar (2024)

Figura 4.5: Anemômetro Amgaze Handheld utilizado nos testes.



Fonte: Amazon (2024)

As velocidades de vento apresentadas na Tabela 4.2 foram obtidas experimen-

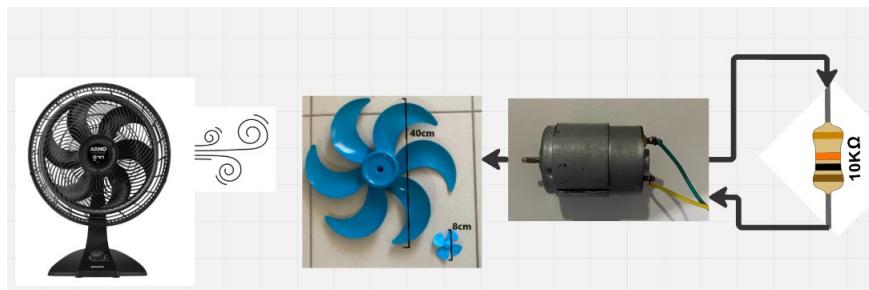
talmente com o anemômetro. Para cada nível de operação do ventilador (1, 2 e 3), realizaram-se medições em diferentes pontos à frente da hélice, mantendo o sensor centralizado e alinhado ao fluxo de ar a aproximadamente 25 cm da grade do ventilador. Em cada ponto, os valores instantâneos de velocidade foram coletados durante 30 segundos, reduzindo interferências causadas por turbulências locais. A velocidade média correspondente a cada nível foi então calculada pela média aritmética das leituras registradas.

Tabela 4.2: Velocidades médias do vento produzida pelo ventilador obtidas de forma experimental com o anemômetro.

Nível do ventilador	Velocidade média do vento (m/s)
3	8,3
2	6,9
1	4,8

Para testar a capacidade do motor e das pás para conversão de energia cinética do vento em energia elétrica, foi elaborado um circuito simples conectando o motor diretamente as pás e a uma resistência de $10k\Omega$, ilustrado na Figura 4.6.

Figura 4.6: Testes de capacidade do motor e das pás.



Fonte: autor

Para cada pá foi medido a tensão e a corrente média fornecida pelo motor ao sistema e posteriormente calculado a potência média fornecida pelos motor, pela Equação 4.1.

Os valores de tensão, corrente e potência média obtidos de forma experimental para as três pás utilizadas nos dois motores estão descritos na Tabela 4.3 e 4.4.

Tabela 4.3: Tensões, correntes e potências obtidas de forma experimental para o motor CC C7902-2095 (sem redução).

Nível do ventilador	Tamanho da Pá	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
3	Pequena	8,14	0,85	6,92
3	Média	4,02	0,41	1,65
3	Grande	0.99	0.10	0.10
2	Pequena	5,10	0,52	2,65
2	Média	3,55	0,32	1,14
2	Grande	0.84	0.07	0.06
1	Pequena	não rodou	não rodou	-
1	Média	2,11	0,19	0,40
1	Grande	0.52	0.04	0.02

Fonte: autor

Tabela 4.4: Tensões, correntes e potências obtidas de forma experimental para o motor CC 555 (com redução de 27:1).

Nível do ventilador	Tamanho da Pá	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
3	Pequena	não rodou	não rodou	-
3	Média	não rodou	não rodou	-
3	Grande	7.63	0.78	5,95
2	Pequena	não rodou	não rodou	-
2	Média	não rodou	não rodou	-
2	Grande	5.43	0.55	2.99
1	Pequena	não rodou	não rodou	-
1	Média	não rodou	não rodou	-
1	Grande	2.39	0.24	0.02

Fonte: autor

Pôde-se observar que a pá maior conseguiu trabalhar com velocidades de vento menores, como no nível 1 do ventilador, sendo a mais eficiente nos teste com o motor

com redução, uma opção ideal quando o foco for força e não velocidade nas pás, essa pá não girou rápido, não obtendo bons resultados no motor sem redução.

Em contrapartida, a pá menor conseguiu girar muito mais veloz, conseguindo chegar a tensões médias maiores mesmo conectada diretamente ao eixo do motor sem redução. Entretanto, não conseguiu girar o motor com redução, visto que, ele é bem mais pesado e necessita de um torque maior para rodar.

A pá menor em diversos testes não rodou imediatamente, precisando de uma energia inicial externa para sair da inércia, acredita-se que foi causado pela sua baixa área de contato com o vento, trazendo uma complicação extra em aplicações reais.

A pá média não conseguiu chegar em tensões acima de 5V no motor sem redução e não conseguiu rodar o motor com redução, dessa forma, não conseguiu obter bons resultados nos dois motores.

A melhor combinação pensando em cenários reais é a utilização da pá maior com o motor com redução, já que consegue-se boas tensões mesmo com velocidades do vento baixa, não necessitando de energia externa para sair da inércia, funcionando bem em todos os testes. Dessa forma, foi utilizado esse *layout* nos testes posteriores.

O regulador de tensão utilizado foi escolhido pela sua capacidade de trabalhar em tensões de entrada variáveis, entre 7.5V e 20V, ideal para um cenário onde as pás giram de forma inconstante. Porém, seu método de regulagem de tensão se baseia em dissipar a tensão sobressalente em forma de calor, por meio do L7805, conservando a corrente e reduzindo a tensão de saída, resultando em uma potência de saída de $3.9mW$, aplicando a fórmula da potência elétrica, como ilustrado na Equação 4.5.

$$P_{saída} = V_{saída} \times I_{saída} = 5V \times 0.78mA \approx 3.9mW \quad (4.5)$$

Este método de transformação de energia é pouco eficiente e pode ser melhor observado pelo cálculo de eficiência energética, através da divisão da potência de saída e a potência de entrada, ilustrado da Equação 4.6, chegando a 61.42% de

eficiência energética.

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \Rightarrow \frac{V_{saída} \times I_{saída}}{V_{entrada} \times I_{entrada}} \Rightarrow \frac{5V \times 0.78mA}{7.63V \times 0.78mA} \approx 65.53\% \quad (4.6)$$

Mesmo assim, foi possível carregar a bateria e cumprir com o objetivo principal do gerador de energia eólica.

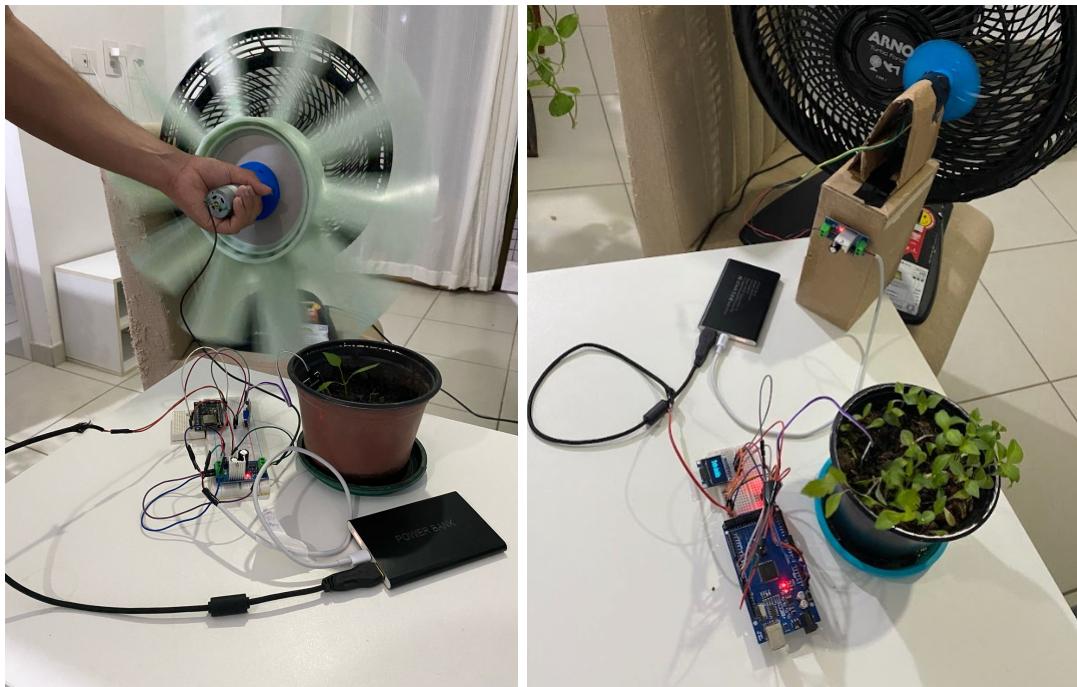
4.3 Testes de integração

Os testes de integração visam elucidar a integração e desempenho do protótipo na totalidade, conectando o processo de geração energética e aquisição de dados.

A utilização do gerador eólico trouxe uma sobrevida para o protótipo, apesar de não conseguir atingir a total autonomia energética dado a baixa eficiência do regulador de tensão e a alta corrente, mesmo em *DeepSleep* do NodeMCU v1.0.

Os dois módulos conseguiram funcionar em conjunto, carregando a bateria, enquanto o processo de aquisição e transmissão de dados acontecia, ilustrado na Figura 4.7.

Figura 4.7: Funcionamento completo do protótipo.



Fonte: autor

Para efeito comparativo, desprezando todas as perdas energéticas no carregamento e descarregamento da bateria, ou seja, assumindo que toda a potência de saída do transformador seja armazenada e consequentemente convertida novamente para o projeto, pode-se assumir que a potência do protótipo final é a diferença de potência da parte do projeto responsável pela aquisição dos dados, calculado na Equação 4.2 e a potência de saída do regulador de tensão, calculado na Equação 4.5, resultando na potência de $22.2mW - 3.9mW = 18.3mW$.

Partindo da potência do protótipo, pode-se chegar a corrente do protótipo, a partir da fórmula da potência, ilustrado na Equação 4.7.

$$I = \frac{P}{V} = \frac{18.3mW}{5V} \approx 3.66mA \quad (4.7)$$

Novamente, pode-se estimar a autonomia do protótipo por meio da divisão do valor teórico de carga total da bateria e o consumo do protótipo em 1 dia, como ilustrado na Equação 4.8.

$$\text{Autonomia}_{\text{Total}} = \frac{28000mAh}{3.66mA \times 24Hrs} \approx 318 \text{ dias} \quad (4.8)$$

Portanto, a autonomia energética do conjunto dos dois módulos aumentou em $318 - 265 = 53$ dias, provando a eficácia do protótipo.

Capítulo 5

Considerações Finais

5.1 Conclusão

O mercado atual agrícola vêm em uma grande crescente, atraindo cada vez mais investimentos e demanda, dessa forma, a Agricultura 4.0 vêm como uma resposta aos desafios da agricultura moderna, que precisa ser mais produtiva, sustentável e adaptável. Nesse contexto, a energia eólica anda lado a lado, sendo uma excelente opção de energia limpa e renovável.

Este trabalho visou esclarecer os conceitos a cerca de um sistema agrícola com autonomia energética, desenvolvendo um protótipo que coleta dados do solo e transmite para o ThingSpeak, por meio do Wi-Fi, entregando as informações online para o usuário, além de se autocarregar através de um pequeno gerador eólico, trazendo mais autonomia para o protótipo e reduzindo a demanda de energia elétrica externa.

Portanto, foi feito um estudo acerca das possibilidades de *Sleep* e redução energética em uma ESP8266 e a relação entre a energia cinética do vento, pás, motores e transformadores, para a produção energética limpa através da transformação de energia, trazendo uma série de possibilidades de desenvolvimento e melhoria do protótipo proposto.

5.2 Dificuldades encontradas

Uma série de desafios precisaram ser vencidos para o pleno funcionamento desse projeto, entre eles estão:

- Atualmente não há no mercado brasileiro pás eólicas de tamanho pequeno (na ordem de meio metro) à venda com preços acessíveis, os projetos comerciais desenvolvidos com essa tecnologia ou geram muito mais potência do que o desejado nesse projeto (valores próximos de 2000W) ou são pás feitas a mão utilizando PVC. Dessa forma, precisou-se contornar esse desafio buscando hélices de radiadores de automóveis, como a utilizada no protótipo que é um modelo para caminhões modelo 1113, visto o preço baixo (proximo aos R\$100,00), seus formatos chatos e sua disponibilidade no mercado brasileiro.
- Para o perfeito encaixe entre os motores e diferentes pás precisou-se desenvolver pequenas peças 3D, ao centro da hélice de caminhão, exposta na Figura 3.5, é possível ver as peças azuis de impressão 3D.
- As potências geradas pelos motores são extremamente baixas, forçando a se trabalhar com pás cada vez maiores e redutores cada vez mais agressivos, mesmo para um projeto com uma potência de consumo na ordem de 20mW.
- A corrente de alimentação medida no NodeMCU durante o *DeepSleep*, diferente do especificado em suas documentações, são na ordem de 10 vezes mais do que o esperado, chegando a $5mA$, sendo o esperado valores próximos a $20\mu A$. Acredita-se que os valores próximos a $20\mu A$ só podem ser obtivos utilizando o ESP-01 ou apenas o microcontrolador ESP8266 embarcado em uma PCB externa.

5.3 Trabalhos futuros

Tendo em vista a robustez e busca pela autonomia energética do protótipo, algumas sugestões foram dadas para o aperfeiçoamento deste projeto.

- Transferência do projeto para o ESP-01 em busca de reduções de corrente mais bruscas durante o *DeepSleep*;
- Desenvolvimento de uma case em metal ou plástico que consiga suportar as adversidades cotidianas externas;
- Desenvolvimento de um suporte móvel para o motor, de modo que este possa se alinhar automaticamente à direção predominante do vento, garantindo melhor eficiência de captação;
- Implementação de outros sensores para uma coleta mais rica de dados, como temperatura do solo, medição de nutrientes e ph;
- Desenvolvimento de um estabilizador de velocidade capaz de gerenciar o movimento das pás, controlando sua direção e velocidade de rotação. O objetivo é tornar a tensão de entrada mais previsível, possibilitando a utilização de conversores de energia do tipo *BUCK* (indicados para aplicações com tensão de entrada constante), aumentando assim a eficiência na conversão energética;
- Implementação de um sistema de comunicação via rádio(LoRa), melhorando a implementação em áreas remotas sem acesso ao WiFi.

Referências

ABEEólica (2023). Associação brasileira de energia eólica. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/>. Acesso em: 02/10/2024.

AliExpress (2024). Lm7805 – módulo regulador de tensão. Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/i/4000326820598.html#nav-specification>. Acesso em: 23/10/2024.

Alldatasheet (2024). Datasheet - regulador de tensão - l7805. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=L7805>. Acesso em: 23/10/2024.

Amazon (2024). Anemômetro amgaze handheld, medidor de velocidade do vento de luz de fundo lcd digital. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Anem%C3%B4metro-retroilumina%C3%A7%C3%A3o-velocidade-term%C3%B4metro-meteorologia/dp/B01JOTJMU6/>. Acesso em: 23/10/2024.

ANEEL (2008). Atlas de energia elétrica do brasil. capítulo 5.2 energia eólica. Disponível em: https://www.fisica.net/energia/atlas_de_energia_eletrica_do_brasil_3a-ed.pdf. Acesso em: 19/10/2024.

Arduino.cc (2023). Arduino - introduction guide. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Acesso em: 28/04/2023.

Barbosa, A., Trevisan, R., Hovakimyan, N., e Martin, N. F. (2020). Modeling yield response to crop management using convolutional neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105197>. Acesso em: 22/08/2025.

Cisternas, I., Velásquez, I., Caro, A., e Rodríguez, A. (2020). Systematic literature review of implementations of precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105626>. Acesso em: 22/08/2025.

CRESESB (2023). Centro de referência para energia solar e eólica sérgio brito. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=231. Acesso em: 19/10/2024.

da Rosa Leão, B. P. (2024). Implementação de sensores de baixo custo para otimização da gestão de recursos naturais na agricultura de pequena escala: um estudo de viabilidade e impacto. Trabalho de conclusão de curso (graduação), Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém. Disponível em: <https://bdta.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/3832>. Acesso em: 28/04/2024.

DFRobot (2023). Fc-28 soil moisture sensor module. Disponível em: <https://www.datasheethub.com/fc-28-soil-moisture-sensor-module/>. Acesso em: 23/10/2024.

Diário de Pernambuco (2023). Pernambuco bate recorde em valor de produção agrícola em 2022, aponta ibge. Disponível em: <https://www.diariodepernambuco.com.br/noticia/agro/2023/09/pernambuco-bate-recorde-em-valor-de-producao-agricola-em-2022-aponta.html>. Acesso em: 02/10/2024.

Embrapa (2023). A agricultura brasileira - portal embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/vii-plano-diretor/a-agricultura-brasileira>. Acesso em: 06/10/2024.

EPE (2021). Fernando de noronha - identificação das alternativas de suprimento - avaliação de médio e longo prazo. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-638/NT-EPE-DEE-DEA-DPG-001-2021_Identificacao%20Potencial%20Noronha.pdf. Acesso em: 29/10/2024.

ESP8266 Community (2024). Lowpowerdemo - esp8266 arduino core. Disponível em: <https://github.com/esp8266/Arduino/tree/master/libraries/esp8266/examples/LowPowerDemo>. Acesso em: 12/07/2025.

ETC (2024). Datasheet - motor dc555. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=MOTORDC555>. Acesso em: 23/10/2024.

FIA (2023). Crise energética no brasil: causas e consequências. Disponível em: <https://fia.com.br/blog/crise-energetica/>. Acesso em: 02/10/2024.

FORP-USP (2023). Histórico da eletricidade. Disponível em: https://www.forp.usp.br/restauradora/pg/metrologia/metrologia_electric/hist_elet.htm. Acesso em: 19/10/2024.

Germano, S. B. (2022). Protótipo de solução IoT para estação meteorológica aplicando tecnologia LoRa no ambiente agro. Disponível em:
https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/1616/1/tcc_Stefane%20Bressani%20Germano.pdf. Acesso em: 22/08/2025.

Gonçalves, M. M. (2019). Implementação de estratégias passivas para aumento da suportabilidade de aerogeradores dfig. Disponível em:
<http://hdl.handle.net/1843/33330>. Acesso em: 22/08/2025.

Harold F. Reetz, J. (2017). *Fertilizantes e o seu uso eficiente*. ANDA, São Paulo. Disponível em: <https://www.ufla.br/dcom/wp-content/uploads/2018/03/Fertilizantes-e-seu-uso-eficiente-WEB-Word-0uubro-2017x-1.pdf>. Acesso em: 22/08/2025.

IBGE (2023). Produção agropecuária em pernambuco — ibge. Disponível em:
<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/pe>. Acesso em: 02/10/2024.

IBGE (2024). Pam 2023: crops break record, but production value falls. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/en/agencia-news/2184-news-agency/news/41311-pam-2023-safra-bate-recorde-mas-valor-da-producao-cai-2>. Acesso em: 02/10/2024.

Infobras Peças e Partes (2024). Motor - c9050-60003. Disponível em:
https://www.infobraspecasepartes.com.br/MLB-3615826836-motor-de-tranco-para-hp-deskjet-f4180f2050-cod-c9050-60003-_JM. Acesso em: 23/10/2024.

Kerschbaumer, R. (2023). Apostila microcontroladores. Disponível em:
<https://professor.luzerna.ifc.edu.br/ricardo-kerschbaumer/wp-content/uploads/sites/43/2018/02/Apostila-Microcontroladores.pdf>. Acesso em: 23/10/2024.

Klebio, J. (2021). Aplicação de internet das coisas (iot) na agricultura de precisão. Disponível em:
<http://aprender.posse.ueg.br:8081/jspui/handle/123456789/280>. Acesso em: 22/08/2025.

LowPowerDemo - ESP8266 (2015). Low-power demo - libraries. Disponível em: <https://github.com/esp8266/Arduino/tree/master/libraries/esp8266/examples/LowPowerDemo>. Acesso em: 09/07/2025.

Mantovani, E., Miranda, R., Landau, E., e Passos, A. (2020). *Agricultura de precisão no contexto do sistema de produção: lucratividade e sustentabilidade*. Boletim de pesquisa e desenvolvimento. Embrapa. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1124732>. Acesso em: 22/08/2025.

MathWorks (2025). Coleta de dados agrícolas. Disponível em: https://www.mathworks.com/help/thingspeak/things_network_ag_data.html. Acesso em: 20/08/2025.

Morandi, M. A. B., Packer, A. P., Mendes, R., Tanure, J. P. M., de Andrade, C. A., e Menezes, C. (2024). *Embrapa Meio Ambiente: trajetória e protagonismo na busca pela sustentabilidade da Agricultura e do Meio Ambiente*. Embrapa Meio Ambiente. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1171806/1/0K-cap-24.pdf>. Acesso em: 22/08/2025.

MundoGEO (2024). Como a inteligência de dados está transformando a agricultura. Disponível em: <https://mundogeo.com/2024/04/25/como-a-inteligencia-de-dados-esta-transformando-a-agricultura/>. Acesso em: 02/10/2024.

Neumann, M. C. (2018). Agricultura 4.0: Protótipo de um internet of things (iot) na cultura da lactuca sativa. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/12952>. Acesso em: 22/08/2025.

NodeMCU Team (2015). Nodemcu devkit v1.0. Disponível em: <https://github.com/nodemcu/nodemcu-devkit-v1.0>. Acesso em: 09/07/2025.

Novalar (2024). Ventilador arno de mesa turbo force 2 em 1 vf42 40cm. Disponível em: <https://www.novalar.com.br/ventilador-de-mesa-arno-turbo-force-2-em-1-vf42-40cm/p?srsltid=AfmB0oonJJezcUqsFDM9Q6vgW7JY2W2rP0CZCr6hbLnyh6xUbqPohMQc>. Acesso em: 23/10/2024.

Oliveira, C. L. V. e Zanetti, H. A. P. (2015). *Arduino Descomplicado: Como Elaborar Projetos de Eletrônica*. Editora Érica, São Paulo. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Arduino-Descomplicado-Elaborar-Projetos-Eletr%C3%A1nica/dp/8536512288>. Acesso em: 22/08/2025.

Petróleo & Energia (2023). Produção de energia eólica no brasil: avanços e desafios. Disponível em:

<https://www.petroleoenergia.com.br/producao-de-energia-eolica-no-brasil/#:text=A%20produ%C3%A7%C3%A3o\%20de%20energia%20e%C3%B3lica,na%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20energia%20e%C3%B3lica>. Acesso em: 06/10/2024.

Pinto, M. d. O. (2013). Energia elétrica: Geração, transmissão e sistemas interligados. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Energia-Elétrica-Transmissão-Sistemas-Interligados/dp/8521624158>. Acesso em: 22/08/2025.

Ramos da Silva, C. M. (2018). Segurança Eenergética, diversificação estratégica e energias renováveis: Um estudo comparado entre Brasil e Japão. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/12630/1/CMRS13_122018.pdf.

Revista AgroCampo (2024). Energia solar para o agronegócio: cresce o número de sistemas instalados no campo. Disponível em:

<https://revistaagrocampo.com.br/agronegocio/energia-solar-para-o-agronegocio-cresce-o-numero-de-sistemas-instalados-no-campo/>. Acesso em: 12/07/2025.

Syngenta Digital (2024). Agricultura de precisão: sensores são uma tendência para otimizar os processos. Disponível em: <https://blog.sygentadigital.ag/sensores-agricultura-precisao-tendencia-otimizar-processos-campo/>. Acesso em: 23/10/2024.

Telles, Arthur (2025). Controlador para um sistema de monitoramento agrícola com energia eólica. Disponível em:

<https://github.com/ArthurTelles/SistemaDeMonitoramentoAgricola>. Acesso em: 22/08/2025.

Trivelli, L., Apicella, A., Chiarello, F., Rana, R., Fantoni, G., e Tarabella, A. (2019). From precision agriculture to industry 4.0: Unveiling technological connections in the agrifood sector. *British Food Journal*. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/BFJ-11-2018-0747>. Acesso em: 22/08/2025.

Vasconcelos, F. M. d. (2017). Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/97351550/geracao-transmissao-e-distribuicao-de-energia-eletrica?>. Acesso em: 22/08/2025.

Vestas (2023). Wind turbine v82-1.65. Disponível em:

<https://en.wind-turbine-models.com/turbines/81-vestas-v82-1.65>.

Acesso em: 19/10/2024.