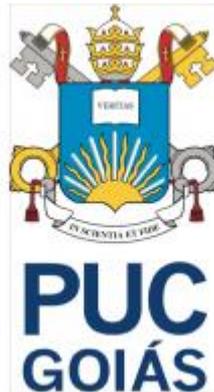


PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITÉCNICA E DE ARTES
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO



**DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTUFA PARA ESTUDOS DE POTENCIAL
DE AÇÃO E POTENCIAL DE VARIAÇÃO EM PLANTAS**

JOÃO MARCOS ALVES ALEIXO MOREIRA

GOIÂNIA
2024

JOÃO MARCOS ALVES ALEIXO MOREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTUFA PARA ESTUDOS DE POTENCIAL
DE AÇÃO E POTENCIAL DE VARIAÇÃO EM PLANTAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola Politécnica e de Artes, da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Talles Marcelo G de A Barbosa

GOIÂNIA
2024

JOÃO MARCOS ALVES ALEIXO MOREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTUFA PARA ESTUDOS DE POTENCIAL
DE AÇÃO E POTENCIAL DE VARIAÇÃO EM PLANTAS**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado em sua forma final pela Escola Politécnica e de Artes, da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia da Computação, em 13/12/2024.

Prof. Luiz Álvaro de Oliveira Júnior

Coordenador de Trabalho de Conclusão de Curso

Banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Talles Marcelo G de A Barbosa

Prof. Dr. José Olímpio Ferreira

Prof. Me. Cláudio Martins Garcia

GOIÂNIA
2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador, Dr. Talles Marcelo Gonçalves de Andrade Barbosa, por sua orientação, paciência e valiosas contribuições ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua expertise e dedicação foram fundamentais para a realização deste projeto.

Aos meus amigos Jean Carlos, Henrique Barbosa e Bruno Raphael, agradeço pelo apoio, incentivo e companheirismo durante toda a trajetória acadêmica. Suas palavras de motivação e amizade fizeram toda a diferença.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho, deixo minha sincera gratidão.

RESUMO

Este estudo apresenta o desenvolvimento de uma estufa automatizada para a análise das respostas de plantas a estímulos ambientais controlados. Construída a partir de materiais reaproveitados, como um rack de servidor descartado, e utilizando microcontroladores, a estufa controla variáveis como luminosidade, temperatura e umidade do solo de forma precisa e automatizada. O sistema inclui um circuito de aquisição de dados composto por amplificadores de instrumentação e conversores analógico-digitais, possibilitando a análise detalhada de sinais bioelétricos, como potenciais de ação (PA) e potenciais de variação (PV), em diferentes espécies vegetais. Experimentos realizados indicaram que variáveis ambientais, como temperatura, luminosidade e umidade do solo, influenciam significativamente as respostas elétricas das plantas. Em condições de maior luminosidade e temperaturas mais altas, os sinais elétricos apresentaram maior amplitude, enquanto a umidade do solo demonstrou ser crucial para a estabilidade dos sinais. Esses resultados reforçam a importância do controle rigoroso das variáveis ambientais para o estudo das respostas das plantas. A estufa automatizada desenvolvida neste trabalho propõe-se como uma ferramenta versátil para pesquisas em fisiologia vegetal e biotecnologia, possibilitando análises detalhadas das interações planta-ambiente. Além disso, oferece aplicações práticas em áreas como agricultura de precisão e monitoramento ambiental, contribuindo para o avanço de práticas sustentáveis e o aumento da produtividade agrícola.

Palavras-chave: Potencial de Ação, Potencial de Variação Estufas Automatizadas, Potencial de Ação Espontâneo.

ABSTRACT

This study presents the development of an automated greenhouse designed to analyze plant responses to controlled environmental stimuli. Constructed from repurposed materials, such as a discarded server rack, and utilizing microcontrollers, the greenhouse precisely and automatically controls variables such as light intensity, temperature, and soil moisture. The system includes a data acquisition circuit comprising instrumentation amplifiers and analog-to-digital converters, enabling detailed analysis of bioelectric signals such as action potentials (AP) and variation potentials (VP) in various plant species. Experiments demonstrated that environmental variables, including temperature, light intensity, and soil moisture, significantly influence plants' electrical responses. Under conditions of higher light intensity and elevated temperatures, the electrical signals exhibited greater amplitude, while soil moisture was found to be critical for signal stability. These findings highlight the importance of rigorous control of environmental variables in studying plant responses. The automated greenhouse developed in this work is proposed as a versatile tool for research in plant physiology and biotechnology, enabling detailed analyses of plant-environment interactions. Additionally, it offers practical applications in areas such as precision agriculture and environmental monitoring, contributing to the advancement of sustainable practices and increased agricultural productivity.

Keywords: Action Potential, Variation Potential, Automated Greenhouses, Spontaneous Action Potential.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Movimentos das folhas da Mimosa pudica antes e após o estímulo	22
Figura 2: Estruturas da Mimosa pudica responsáveis pelos movimentos	23
Figura 3: Vacúolo como elemento central na célula vegetal	27
Figura 4: Ciclo osmótico em resposta a estímulos	28
Figura 5: Transporte de íons durante estímulos	30
Figura 6: Representação de Potencial de Ação (PA)	32
Figura 7: Representação de Potencial de Variação (PV)	33
Figura 8: Fases da vida da mimosa pudica cultivada	45
Figura 9: Diagrama esquemático do sistema experimental. Mostra a disposição dos sensores	48
Figura 10: disposição dos dispositivos na estrutura da estufa	49
Figura 11: Conexão do amplificador EI-1040 ao Arduino Nano e à planta	50
Figura 12: Representação física da estufa automatizada	53
Figura 13: Disposição dos componentes de aquisição de dados	55
Figura 14: Interface gráfica do sistema da estufa	56
Figura 15: Código do Arduino para leitura dos sensores	59
Figura 16: Exemplos de rotas Flask para consulta de dados dos sensores via API	60
Figura 17: Trecho do código da interface que ilustra o envio de comandos para controle de atuadores via requisições HTTP POST	61
Figura 18: Configuração experimental utilizando o Intel Galileo como conversor analógico-digital (AD) de 12 bits	64
Figura 19: Configuração experimental utilizando o Arduino Nano como conversor analógico-digital (AD) de 10 bits	65
Figura 20: Gráfico representando o potencial de ação registrado em condições ambientais de 815 lux e 25,3°C	66
Figura 21: Gráfico representando o potencial de ação registrado em condições ambientais de 18 lux e 25,3°C	67
Figura 22: Gráfico representando o potencial de ação registrado em condições ambientais de 780 lux e 29,8°C	67
Figura 23: Gráfico representando o potencial de variação registrado em condições ambientais de 592 lux e 27.1°C	69

Figura 24: Gráfico representando o potencial de variação registrado em condições ambientais de 602 lux e 30.2°C	69
Figura 25: Tomateiro utilizado nos experimentos para medições de SAPs....	71
Figura 26: Gráfico representando a variação do potencial elétrico espontâneo no tomateiro	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Trabalhos relacionados.....	40
--	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

PA Potencial de Ação

PV Potencial de Variação

SAPs *Spontaneous Action Potentials*, Potencial de ação espontâneo

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objeto de Estudo	18
1.1.1	Problema	19
1.1.2	Hipótese	20
1.1.3	Justificativa	20
2	REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1	Mimosa Pudica (Dormideira)	22
2.1.1	Motivações para o uso da Mimosa Pudica	24
2.2	Dinâmica Celular	26
2.3	Potencial de Ação (PA)	31
2.4	Potencial de Variação (PV)	32
2.5	Contexto Histórico de PAs e PVs	34
2.6	Modelos Experimentais	35
2.7	Tecnologias Aplicadas	37
2.8	Aplicações e Avanços recentes	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	Processo de Desenvolvimento da Hipótese	42
3.1.1	Fundamentação da Hipótese	42
3.1.2	Integração com os Dados da Literatura	43
3.2	Projeto	44
3.2.1	Cultivo da Mimosa	44
3.2.2	Metodologia como Resposta ao Problema	47
3.2.3	Disposição dos componentes	47
3.3	Tecnologias e protótipos	51
3.3.1	Componentes Tecnológicos	51
3.3.2	Protótipo Construído	52

3.3.3	Vantagens do Protótipo.....	57
3.3.4	Ambiente de Desenvolvimento e Codificação.....	58
4	AVALIAÇÃO DA HIPÓTESE	62
4.1	Resultados preliminares	63
4.2	Resultados Obtidos.....	66
4.3	Potencial Elétrico em Tomateiros	70
5	CONCLUSÃO	73
5.1	Considerações Finais	73
5.2	Propostas para Trabalhos Futuros.....	74
	REFERÊNCIAS	76
	APÊNDICES	78
	APÊNDICE A – CÓDIGO ARDUINO	78
	APÊNDICE B – CÓDIGO PYTHON	83
	APÊNDICE C – CÓDIGO WEB.....	88
	ANEXOS.....	94
	ANEXO A – Datasheets.....	94

1 INTRODUÇÃO

Os sinais bioelétricos, como os potenciais de ação (PAs) e os potenciais de variação (PVs), desempenham um papel crucial na comunicação interna das plantas em resposta a estímulos ambientais. Esses sinais não apenas regulam importantes respostas fisiológicas, mas, também, evidenciam a interação das plantas com o ambiente externo, tornando-se ferramentas valiosas para a compreensão de mecanismos adaptativos em condições ambientais variáveis.

Os PAs são caracterizados como sinais elétricos autopropagantes, gerados por rápidas alterações no potencial de membrana celular. Essas mudanças envolvem a abertura de canais iônicos dependentes de voltagem, como os de cálcio (Ca^{2+}) e potássio (K^+), que coordenam a despolarização e repolarização da membrana, possibilitando a propagação do sinal ao longo de grandes distâncias nos tecidos vegetais (Wang *et al.*, 2009; Fromm & Lautner, 2006). Em contrapartida, os PVs apresentam amplitudes e durações variáveis, respondendo diretamente a estímulos como ferimentos, alterações de temperatura e mudanças químicas no ambiente (Chatterjee, 2017). Embora não sejam autopropagantes, os PVs exercem funções essenciais em respostas localizadas, particularmente em processos de defesa e adaptação.

Pesquisas recentes demonstram que os sinais elétricos das plantas podem ser utilizados como indicadores de estresses ambientais, como variações de luz, temperatura e umidade. Tecnologias de monitoramento baseadas nesses sinais possibilitam a análise em tempo real das respostas bioelétricas das plantas aos estímulos externos (Wang *et al.*, 2009). A integração de sensores multicanais em estufas automatizadas tem possibilitado o controle preciso de variáveis ambientais, criando condições experimentais que favorecem a repetibilidade e a confiabilidade dos dados coletados. Esses avanços são fundamentais para a classificação de estímulos elétricos e suas aplicações em agricultura de precisão e sensoriamento ambiental (Chatterjee, 2017).

A utilização de plantas sensíveis, capazes de gerar sinais elétricos em resposta a estímulos ambientais, tem se mostrado uma abordagem eficaz para estudos de potenciais de plantas em ambientes controlados. Espécies como *Mimosa pudica* e *Dionaea muscipula* são amplamente utilizadas devido às suas respostas rápidas e visíveis, enquanto outras plantas, com características específicas como tolerância à

seca ou alta sensibilidade térmica, fornecem informações valiosas sobre os mecanismos eletrofisiológicos (Volkov, 2006). Essas respostas são mediadas por estruturas especializadas, como os pulvínulos e outros tecidos sensoriais, que regulam o fluxo de íons e alterações de turgor para gerar sinais elétricos em resposta a estímulos externos.

A implementação de estufas automatizadas amplia as possibilidades de estudo desses fenômenos em diferentes espécies vegetais. Esses sistemas permitem o controle preciso de variáveis ambientais, como luz, temperatura e umidade, além da coleta de dados bioelétricos em tempo real. Tais ferramentas são indispensáveis para explorar as interações entre múltiplos estímulos ambientais e as respostas bioelétricas das plantas. Essa abordagem contribui para a validação de conceitos fundamentais de potenciais em plantas e para o desenvolvimento de sistemas integrados voltados ao monitoramento ambiental, biotecnologia e agricultura de precisão (Wang *et al.*, 2009; Chatterjee, 2017).

1.1 Objeto de Estudo

Nas plantas existem mecanismos eletrofisiológicos exclusivos que lhes permitem perceber e responder a estímulos ambientais, como luz, temperatura e umidade. Esses mecanismos resultam na geração de sinais elétricos, como os potenciais de ação (PAs) e potenciais de variação (PVs), que desempenham papéis fundamentais na regulação de funções fisiológicas e nas respostas adaptativas às condições externas. No entanto, o estudo aprofundado desses sinais enfrenta desafios importantes devido à ausência de infraestrutura acessível que permita simular, de forma simultânea e precisa, múltiplas condições ambientais.

A capacidade das plantas de produzir sinais bioelétricos oferece informações valiosas sobre mecanismos de adaptação. Esses sinais já foram amplamente documentados em espécies sensíveis, como *Mimosa pudica*, *Dionaea muscipula* e *Aloe vera*, bem como em uma grande variedade de plantas com diferentes características fisiológicas (Fromm & Lautner, 2006; Volkov *et al.*, 2006). Por exemplo, algumas espécies exibem respostas rápidas e visíveis, enquanto outras apresentam maior sensibilidade a estresses específicos, como variações de temperatura ou disponibilidade hídrica. Em tomateiros (*Solanum lycopersicum*), por exemplo, os

potenciais de ação espontâneos (em inglês *Spontaneous Action Potentials*, SAPs) foram observados em resposta a mudanças de luminosidade, sendo mais frequentes no início da manhã ou em condições de luz acesa. Essas respostas bioelétricas refletem a capacidade das plantas de se adaptar a estímulos ambientais e regular processos como a fotossíntese e o transporte de nutrientes (Macedo *et al.*, 2015). Essa diversidade destaca o potencial das plantas como modelos experimentais e biossensores vivos, capazes de responder a uma ampla gama de estímulos. Estudos indicam que esses sinais podem ser usados para classificar estímulos externos e detectar condições ambientais adversas em tempo real, o que reforça sua aplicabilidade tanto na pesquisa acadêmica quanto em aplicações práticas (Chatterjee, 2017; Wang *et al.*, 2009).

O desenvolvimento de uma estufa automatizada e multifuncional, projetada para reproduzir condições controladas para diferentes espécies vegetais, surge como uma solução inovadora para investigar essas respostas. Uma infraestrutura como essa possibilitará estudar os mecanismos eletrofisiológicos das plantas de forma abrangente, controlando variáveis ambientais como luz, temperatura e umidade, além de coletar dados bioelétricos em tempo real. Esses sistemas favorecem a integração de diferentes espécies e contextos experimentais, estabelecendo uma base sólida para validar hipóteses científicas, desenvolver tecnologias aplicáveis à biotecnologia e agricultura de precisão, e avançar no monitoramento ambiental (Wang *et al.*, 2009; Chatterjee, 2017).

1.1.1 Problema

A pesquisa sobre os mecanismos eletrofisiológicos das plantas enfrenta desafios significativos devido à falta de sistemas experimentais automatizados e controlados à distância. Além disso, muitos desses sistemas não permitem o controle simultâneo e preciso de múltiplas variáveis ambientais, como luz, temperatura e umidade, restringindo a análise integrada das respostas das plantas a estímulos combinados.

Esta limitação na integração entre o controle de variáveis ambientais e a coleta de dados bioelétricos afeta negativamente o progresso da ciência. A incapacidade de validar hipóteses sobre as interações entre estímulos ambientais e sinais bioelétricos

das plantas impede avanços em áreas estratégicas, como biotecnologia, agricultura de precisão e monitoramento ambiental. A ausência de uma infraestrutura multifuncional restringe o potencial da pesquisa em desenvolver soluções aplicáveis e acessíveis para os desafios globais da sustentabilidade e da segurança alimentar.

1.1.2 Hipótese

A criação de um sistema experimental automatizado, projetado para controlar simultaneamente múltiplas variáveis ambientais e estabelecer condições experimentais precisas e reproduzíveis, representa uma inovação significativa no estudo dos mecanismos bioelétricos das plantas. Este sistema busca complementar as soluções existentes, oferecendo uma abordagem multifuncional que integra controle ambiental avançado com tecnologias de monitoramento bioelétrico, possibilitando uma análise mais detalhada e abrangente das respostas adaptativas das plantas.

Espera-se que esta infraestrutura forneça uma base robusta para validar hipóteses científicas em diferentes contextos experimentais. Sua implementação tem o potencial de impulsionar avanços em áreas estratégicas como biotecnologia, agricultura de precisão e monitoramento ambiental, ampliando o entendimento e as aplicações práticas em potenciais de plantas.

1.1.3 Justificativa

O desenvolvimento de uma estufa automatizada multifuncional apresenta-se como uma solução essencial para o estudo das respostas bioelétricas das plantas em condições controladas. Esta infraestrutura integra tecnologias modernas de controle ambiental, como regulação precisa de luz, temperatura e umidade, possibilitando análises detalhadas e confiáveis das interações entre estímulos ambientais e as respostas eletrofisiológicas das plantas. Ao proporcionar o controle rigoroso de variáveis ambientais, esta abordagem permite investigar de forma aprofundada os mecanismos por trás dos potenciais bioelétricos das plantas e compreender como essas respostas variam em função das mudanças nas condições externas (Wang *et al.*, 2009).

A principal vantagem deste projeto reside na capacidade de controlar e monitorar múltiplas variáveis ambientais de maneira simultânea, possibilitando uma análise detalhada das interações entre estímulos e respostas das plantas. Esta abordagem promove o avanço do conhecimento científico ao preencher lacunas sobre os mecanismos adaptativos das plantas, validando hipóteses que anteriormente não poderiam ser testadas devido à ausência de um ambiente experimental tão detalhado e controlado.

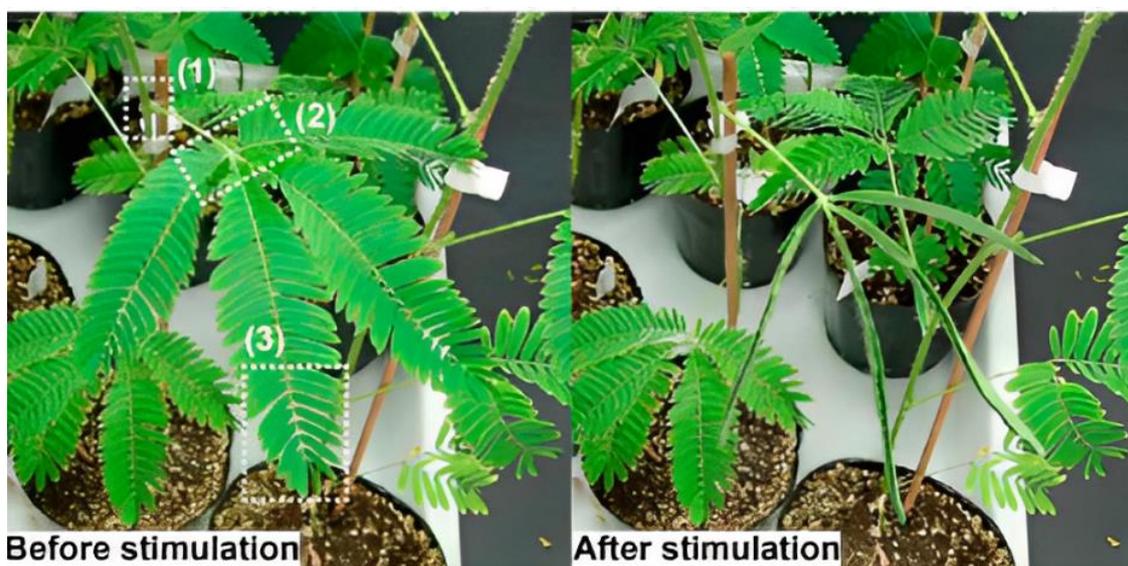
Por fim, a infraestrutura proposta está alinhada com os desafios globais de sustentabilidade. Ao promover práticas agrícolas mais eficientes e ambientalmente responsáveis, ela contribui para o desenvolvimento de soluções inovadoras frente às mudanças climáticas e outros desafios ambientais. A possibilidade de replicar experimentos em diferentes contextos e espécies vegetais amplia o escopo da pesquisa, consolidando esta abordagem como uma ferramenta essencial para enfrentar os desafios da segurança alimentar e da sustentabilidade global (Chatterjee, 2017; Wang *et al.*, 2009).

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Mimosa Pudica (Dormideira)

A *Mimosa pudica*, comumente conhecida como “dormideira” ou “sensitiva”, destaca-se por sua capacidade de reagir rapidamente a estímulos externos, como toque ou mudanças de temperatura. Esse comportamento, denominado movimento tigmomástico, é mediado por canais iônicos mecanossensíveis localizados nos pulvínulos, estruturas motoras situadas nas junções das folhas. A ativação desses canais permite o fluxo de íons como cálcio (Ca^{2+}) e cloreto (Cl^-), resultando em alterações rápidas de turgor celular que levam ao fechamento das folhas como mecanismo de defesa contra herbívoros. Conforme mostrado na Figura 1, antes do estímulo, as folhas estão abertas, mas, após o estímulo, dobram-se como parte dessa resposta defensiva.

Figura 1: Movimentos das folhas da *Mimosa pudica* antes e após o estímulo



Fonte Hagihara e Toyota (2020)

O movimento tigmomástico envolve também a geração de sinais elétricos, como os potenciais de ação (PAs), que percorrem os tecidos vegetais com velocidades de propagação de até 0,8 cm/s, transmitindo eficientemente a resposta ao estímulo. Além dos PAs, a planta apresenta potenciais de variação (PVs), que, embora localizados e

não autopropagantes, desempenham funções essenciais em respostas específicas a estímulos ambientais. A compreensão detalhada desses fenômenos bioelétricos é fundamental para explorar os mecanismos de resposta da planta.

As respostas mecanossensitivas da *Mimosa pudica* são reguladas por estruturas específicas, como os pulvínulos primários, secundários e terciários. Essas estruturas atuam como motores biológicos, regulando os movimentos através de alterações na pressão do turgor das células motoras, que expandem ou contraem rapidamente para possibilitar movimentos eficientes em resposta aos estímulos. Na Figura 2, observa-se as principais estruturas envolvidas nesses mecanismos, incluindo os pulvínulos primários (PP), secundários (SP) e terciários (TP).

Figura 2: Estruturas da *Mimosa pudica* responsáveis pelos movimentos



Fonte Hagihara e Toyota (2020)

- Pulvínulo Primário e Secundário: Localizados na base do pecíolo e dos folíolos, respectivamente, coordenam os movimentos maiores das folhas e ajustes finos nas subdivisões.
- Canais Iônicos Mecanossensíveis: Encontrados principalmente nas células motoras dos pulvínulos, são ativados por deformações físicas, como toques ou pressões, regulando o fluxo de íons como cálcio e potássio (Visnovitz *et al.*, 2007).
- Tecido Vascular Adaptado: Permite mudanças rápidas de volume no pulvínulo, redistribuindo a água necessária para os movimentos (Song *et al.*, 2014).

O comportamento bioelétrico e mecanossensitivo da *Mimosa pudica* oferece uma oportunidade única para investigar como diferentes estímulos ambientais, como

luz, temperatura e umidade, influenciam os sinais elétricos. A implementação de uma estufa automatizada possibilitando o controle preciso dessas variáveis, possibilitando a replicação de condições experimentais e a análise detalhada das interações entre estímulos externos e os PAs e PVs da planta. Esta abordagem integrativa facilita a compreensão dos mecanismos adaptativos da planta e contribui para o avanço de tecnologias aplicáveis à biotecnologia e agricultura de precisão.

O estudo das características bioelétricas e mecanossensitivas da *Mimosa pudica* está diretamente alinhado com os objetivos deste trabalho, que envolvem a análise detalhada das interações entre estímulos ambientais e respostas fisiológicas em plantas. Conforme demonstrado na Figura 3, os experimentos realizados com uma estufa automatizada permitem a coleta de dados confiáveis para a validação de hipóteses. Por meio de variações controladas de luz, temperatura e umidade, é possível compreender como diferentes estímulos influenciam a dinâmica dos sinais bioelétricos da planta e explorar aplicações em monitoramento ambiental e agricultura de precisão.

Além disso, a utilização da *Mimosa pudica* como modelo experimental se destaca não apenas por suas características bioelétricas e mecanossensitivas, mas também por o potencial em diversas aplicações práticas. Sua sensibilidade a fatores como luz, temperatura e umidade a torna uma ferramenta poderosa para estudar as interações planta-ambiente, essa planta pode ser usada como biossensor vivo em diferentes condições, possibilitando monitorar e ajustar variáveis ambientais de forma eficiente. Essas características reforçam o papel central da *Mimosa pudica* nos objetivos deste estudo, especialmente no desenvolvimento de tecnologias avançadas para a biotecnologia e a agricultura de precisão.

2.1.1 Motivações para o uso da *Mimosa Pudica*

A escolha da *Mimosa pudica* como objeto central deste trabalho baseia-se em suas características únicas, que a tornam um modelo experimental ideal para o estudo de respostas bioelétricas e fisiológicas em plantas. As principais motivações para sua seleção incluem:

- **Movimentos rápidos e sensíveis:** A *Mimosa pudica* é equipada com mecanossensores localizados nos pulvínulos, que permitem a detecção

precisa e a resposta eficiente a estímulos externos, como toques e variações ambientais. Essa propriedade facilita a investigação de fenômenos bioelétricos relacionados à ativação de canais mecanossensíveis (Hagihara & Toyota, 2020).

- Respostas observáveis e mensuráveis: Diferentemente de outras plantas, a *Mimosa pudica* apresenta reações rápidas e facilmente perceptíveis, como o fechamento das folhas e alterações no turgor celular. Essas características simplificam a coleta de dados e a validação de hipóteses experimentais (Hagihara & Toyota, 2020).
- Repolarização eficiente: Estudos recentes destacam que o tempo de repolarização dos potenciais elétricos na *Mimosa pudica* é rápido e eficiente, possibilitando o registro contínuo de sinais elétricos em condições experimentais controladas (Volkov *et al.*, 2021).
- Simplicidade técnica: A captação de sinais elétricos na *Mimosa pudica* não exige revestimentos complexos, como o PEDOT (Poli(3,4-etilenodioxitiofeno), comumente necessário em outras espécies). Essa simplicidade reduz a complexidade técnica e os custos associados à instrumentação, tornando a planta acessível para estudos de bioeletricidade (Volkov *et al.*, 2021).

Essas características fazem da *Mimosa pudica* uma escolha altamente apropriada para experimentos realizados em estufas automatizadas com estímulos controlados. Sua sensibilidade a variáveis ambientais, como luz, temperatura e umidade, permite o estudo detalhado das interações entre essas condições e os sinais bioelétricos das plantas. Além disso, sua resposta rápida e visível a estímulos promove sua utilização como ferramenta didática em educação científica e tecnológica.

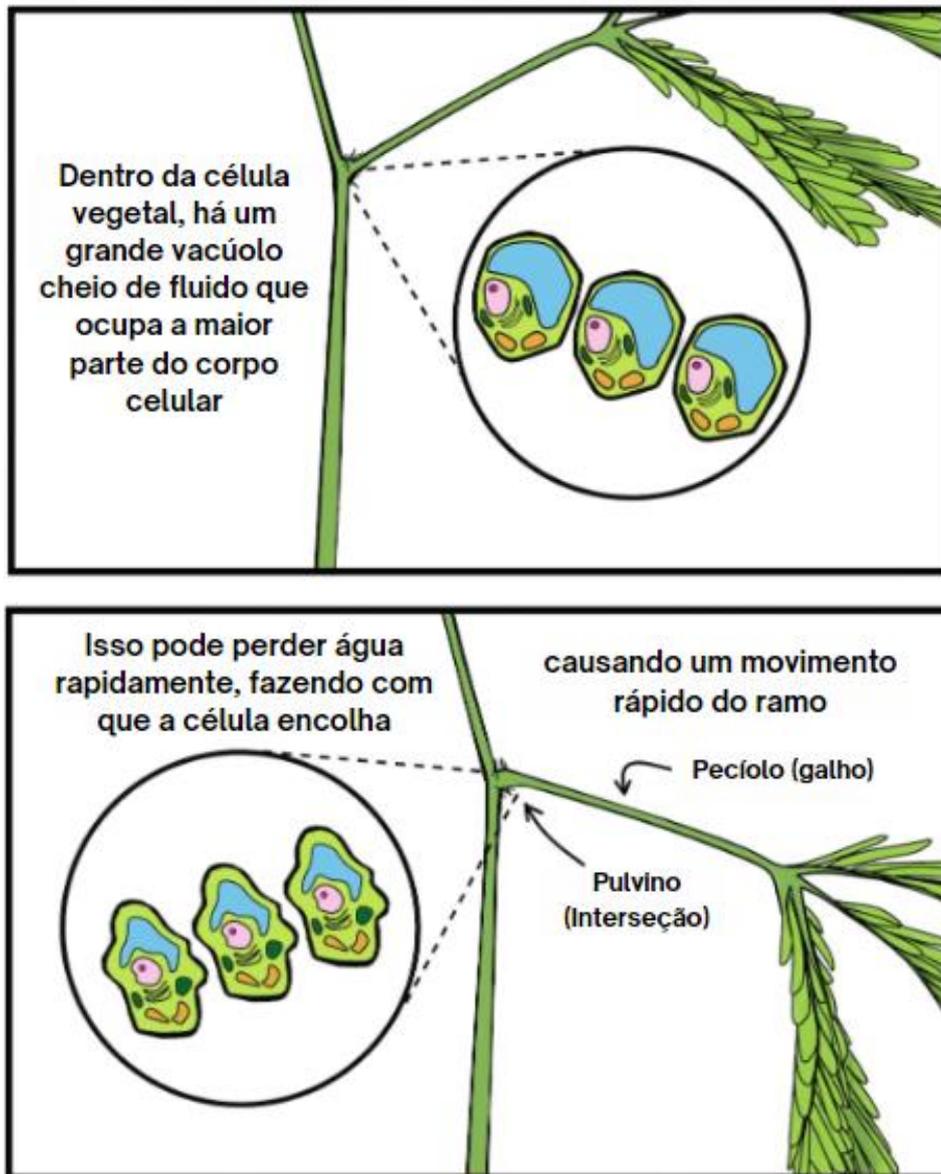
O uso da *Mimosa pudica* em estufas automatizadas oferece vantagens práticas não apenas para monitorar variáveis ambientais, mas também para investigar a dinâmica celular da planta. A capacidade da planta de gerar respostas mensuráveis em tempo real possibilita a análise das influências de fatores ambientais na atividade celular. O estudo dessas interações contribui diretamente para o entendimento dos mecanismos de transmissão de sinais e das respostas adaptativas das plantas a variações no ambiente. Esse conhecimento é essencial para compreender os

processos biofisiológicos subjacentes aos sinais bioelétricos e explorar aplicações científicas e tecnológicas baseadas em sua dinâmica celular.

2.2 Dinâmica Celular

As respostas bioelétricas observadas na *Mimosa pudica* dependem de processos celulares altamente organizados, que envolvem alterações no transporte de íons e na regulação osmótica. Esses mecanismos sustentam movimentos rápidos e eficientes, como o fechamento das folhas em reação a estímulos externos. Segundo Hagihara e Toyota (2020), os movimentos tigmomásticos da planta são mediados por alterações volumétricas das células, controladas por canais iônicos e transportadores específicos.

Figura 3: Vacúolo como elemento central na célula vegetal



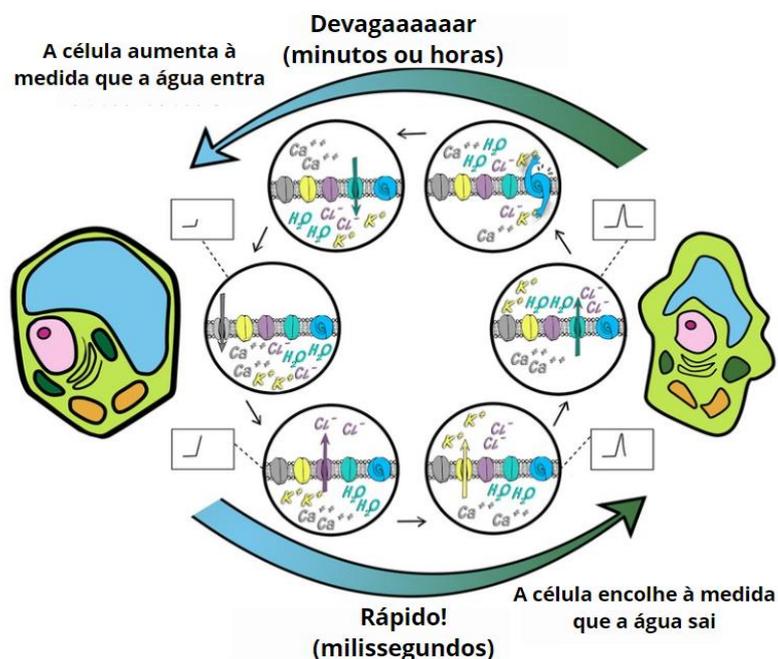
Fonte modificado de backyardbrains

O vacúolo, o maior compartimento intracelular das células vegetais, desempenha um papel essencial nesses movimentos ao atuar como um reservatório de íons, como cálcio (Ca^{2+}), potássio (K^+) e cloreto (Cl^-). Esses íons regulam o potencial de membrana e controlam o fluxo hídrico necessário para os movimentos celulares. Como mostrado na Figura 3, o vacúolo regula o equilíbrio hídrico da célula, promovendo rápidas alterações de pressão osmótica que levam à expansão ou contração celular em resposta aos estímulos (Hagihara e Toyota, 2020).

O ciclo osmótico celular, ilustrado na Figura 4, detalha como o fluxo de água e íons reage aos estímulos ambientais. Esse processo é composto por dois eventos principais:

- Influxo de íons e entrada de água: Íons como cálcio e potássio entram na célula, promovendo o aumento do volume celular.
- Efluxo de íons e saída de água: A saída de íons e água, mediada por canais e transportadores especializados, reduz o volume celular.

Figura 4: Ciclo osmótico em resposta a estímulos



Fonte modificado de backyardbrains

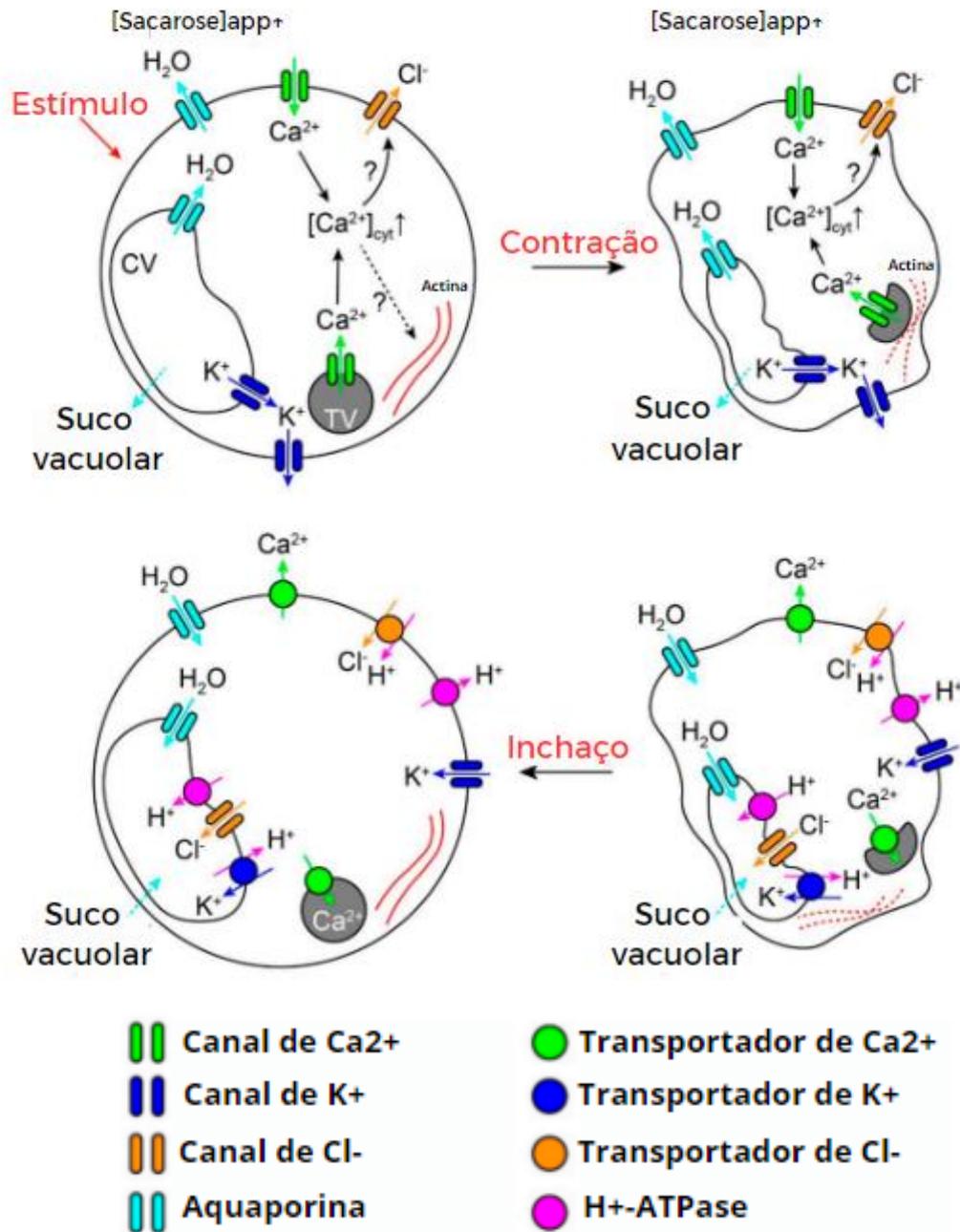
Essas alterações volumétricas são coordenadas em diferentes escalas de tempo, desde milissegundos em respostas rápidas até minutos ou horas para adaptações mais lentas (Hagihara e Toyota, 2020). Como mostrado na Figura 4, os canais de cálcio iniciam o ciclo osmótico, enquanto os canais de potássio e cloreto estabilizam o potencial de membrana e facilitam a expulsão de água. As aquaporinas e H^+ -ATPases também desempenham papéis essenciais na regulação da pressão osmótica e no transporte hídrico.

Conforme ilustrado na Figura 5, os pulvínulos da *Mimosa pudica*, estruturas especializadas nos movimentos foliares, regulam as rápidas alterações de turgor necessárias para os movimentos tigmotáticos. A ativação de canais

mecanossensíveis nesses pulvínulos permite a redistribuição de íons e água, resultando em respostas rápidas e eficientes (Hagihara e Toyota, 2020). Os principais transportadores e canais envolvidos nesse processo incluem:

- Canais de cálcio (Ca^{2+}): Iniciam o ciclo osmótico em resposta aos estímulos.
- Canais de potássio (K^+) e cloreto (Cl^-): Estabilizam o potencial de membrana e facilitam a expulsão de água.
- Aquaporinas e H^+ -ATPases: Regulam a pressão osmótica e o transporte hídrico.

Figura 5: Transporte de íons durante estímulos



Fonte modificado de Hagihara e Toyota (2020)

Esses mecanismos, evidenciados na Figura 5, são fundamentais para impulsionar os movimentos tigmotáticos e conectar os estímulos externos às respostas motoras da planta.

Os movimentos tigmotáticos da *Mimosa pudica* dependem diretamente da propagação de sinais bioelétricos, como os potenciais de ação (PAs) e os potenciais de variação (PVs). Esses sinais desempenham um papel central na coordenação dos

estímulos detectados pelos canais mecanossensíveis e na ativação das respostas motoras. Para compreender plenamente os mecanismos que sustentam essas respostas rápidas e coordenadas, é fundamental explorar a dinâmica dos PAs e PVs.

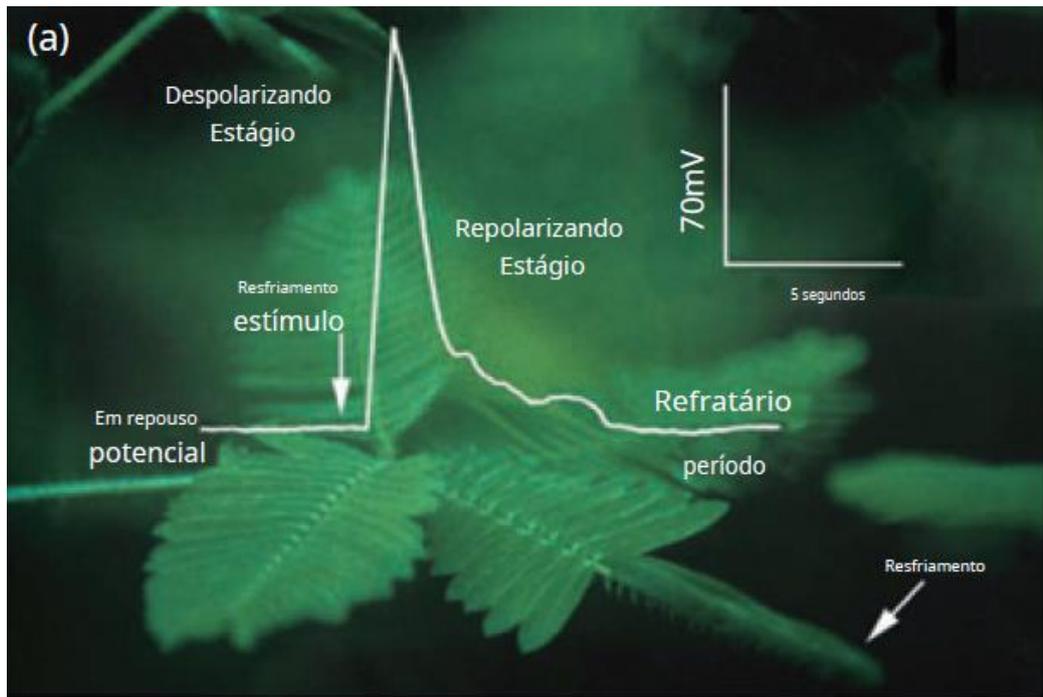
2.3 Potencial de Ação (PA)

Os potenciais de ação (PAs) são sinais elétricos gerados por alterações rápidas no potencial de membrana celular em resposta a estímulos externos, como toques, mudanças de temperatura ou estímulos químicos. Ao contrário dos potenciais de variação (PVs), os PAs são autopropagantes, o que significa que podem se deslocar ao longo dos tecidos da planta sem perda de intensidade, possibilitando a transmissão de sinais elétricos por grandes distâncias.

Na Figura 6, é apresentada a dinâmica dos PAs na Mimosa pudica, destacando três fases principais:

- **Fase de Despolarização:** Um estímulo inicial, como toque ou resfriamento, provoca a abertura de canais iônicos de cálcio (Ca^{2+}), possibilitando a entrada desses íons no citoplasma. Esse processo gera uma rápida elevação do potencial de membrana, representada pelo pico ascendente no gráfico.
- **Fase de Repolarização:** Após a despolarização, canais de potássio (K^+) são ativados, promovendo a saída desses íons da célula. Esse movimento restaura o potencial de membrana ao estado basal, evidenciado pela queda no gráfico.
- **Período Refratário:** Durante este período, a célula não pode gerar um novo PA imediatamente, pois necessita recuperar o equilíbrio eletroquímico e osmótico. Esse intervalo de inatividade é essencial para evitar sobrecargas no sistema.

Figura 6: Representação de Potencial de Ação (PA)



Fonte modificado de Fromm e S. Lautner (2006)

O gráfico mostra que os PAs são eventos rápidos, com amplitudes que atingem cerca de 70 mV e duração de poucos segundos. Esses sinais desempenham papéis cruciais em plantas sensíveis como a *Mimosa pudica*, coordenando respostas rápidas, como o fechamento das folhas, em reação a estímulos ambientais.

A propagação eficiente dos PAs é mediada por vias especializadas, como o floema, que assegura a comunicação elétrica entre diferentes partes da planta (Fromm & Lautner, 2006). Essa funcionalidade permite que a planta reaja rapidamente a estímulos externos, destacando o papel central dos PAs em sua fisiologia adaptativa e defensiva.

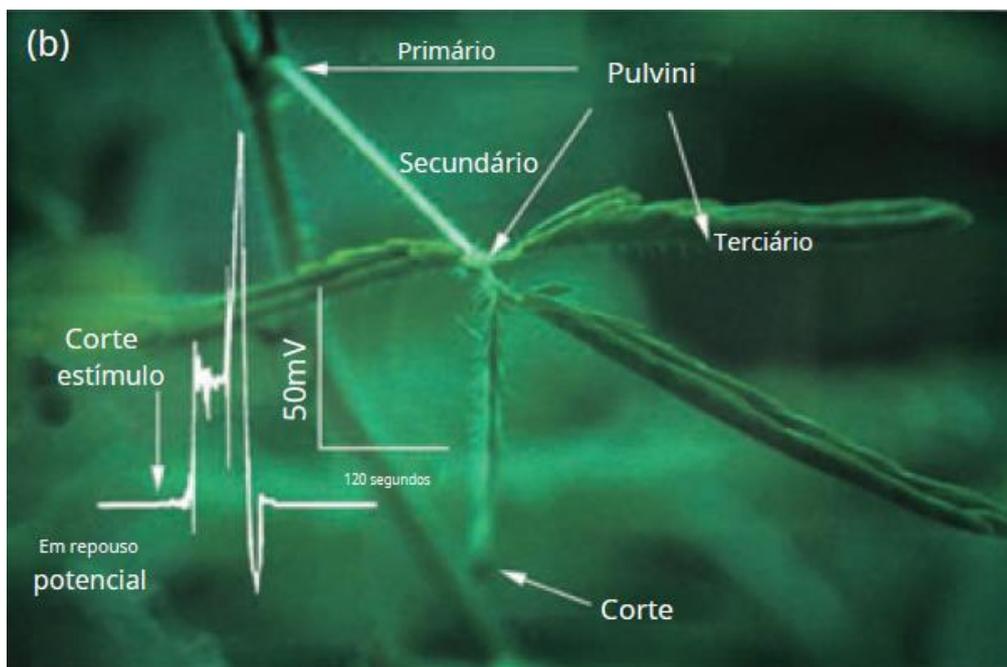
2.4 Potencial de Variação (PV)

O Potencial de Variação (PV) é um sinal elétrico gerado em plantas por estímulos localizados, resultando em alterações temporárias no potencial de membrana. Ao contrário dos Potenciais de Ação (PAs), os PVs não são autopropagantes, apresentando amplitude e duração variáveis que dependem diretamente da intensidade e do tipo de estímulo aplicado.

Na Figura 7, é demonstrada a propagação de um PV em resposta a um estímulo mecânico aplicado nas estruturas especializadas da *Mimosa pudica*, conhecidas como pulvínulos (primário, secundário e terciário). Essas estruturas, localizadas nas junções dos pecíolos e folíolos, desempenham um papel crucial nos movimentos rápidos das folhas em reação a estímulos externos. O gráfico sobreposto destaca os seguintes processos principais:

- **Despolarização Inicial:** O estímulo aplicado ativa canais iônicos nos pulvínulos, gerando uma abertura transitória que permite o influxo de íons, como cálcio (Ca^{2+}), na célula. Esse processo resulta em um aumento temporário no potencial de membrana.
- **Atenuação do Sinal:** Diferentemente do PA, o PV sofre dissipação ao longo do tecido. Isso é evidenciado no gráfico como uma diminuição gradual da amplitude do sinal à medida que é registrado em pulvínulos mais distantes.
- **Dependência da Estrutura:** A resposta elétrica do PV é mediada pelas propriedades específicas de cada pulvínulo, como sua conectividade e sensibilidade a estímulos. Essas características variam entre os pulvínulos primário, secundário e terciário, influenciando a dinâmica do PV.

Figura 7: Representação de Potencial de Variação (PV)



Fonte modificado de Fromm e S. Lautner (2006)

A figura 7 ilustra claramente o papel dos pulvínulos como centros de resposta localizados, modulando os movimentos das folhas. O PV registrado reflete a capacidade do sistema de resposta bioelétrica da planta de reagir de forma controlada e adaptativa, sendo essencial para mecanismos de defesa e adaptação a estímulos ambientais (Fromm & Lautner, 2006).

Os PVs, em conjunto com os PAs, desempenham papéis complementares na fisiologia vegetal, especialmente em plantas como a *Mimosa pudica*. Enquanto os PAs são responsáveis pela propagação rápida de sinais elétricos para coordenar respostas de longo alcance, os PVs atuam localmente, possibilitando respostas adaptativas específicas e moduladas.

O estudo de PVs, como os associados aos movimentos rápidos da *Mimosa pudica*, reflete o progresso acumulado em décadas de investigação sobre sinais bioelétricos. Desde os mecanismos celulares até as respostas organizadas em estruturas especializadas, como os pulvínulos, essas descobertas foram possibilitadas por avanços significativos no entendimento sobre potenciais em plantas. Revisitar as bases históricas dessa área de pesquisa ajuda a compreender como as técnicas modernas foram desenvolvidas, possibilitando análises mais detalhadas desses fenômenos.

2.5 Contexto Histórico de PAs e PVs

O estudo das respostas elétricas em plantas possui uma rica trajetória histórica. No século XVIII, Luigi Galvani realizou experimentos em músculos de rãs conectados a fios metálicos, estabelecendo as bases para a compreensão dos sinais elétricos biológicos. Posteriormente, Matteucci e Du Bois-Reymond ampliaram essas descobertas, correlacionando alterações de voltagem em tecidos vivos a estímulos externos. Essas contribuições foram fundamentais para o desenvolvimento dos conceitos modernos de potenciais de ação (PAs) e potenciais de membrana (Volkov, 2006).

As primeiras medições de sinais elétricos em plantas ocorreram no final do século XIX. Em 1873, Sir John Burdon-Sanderson conduziu experimentos com a planta carnívora *Dionaea muscipula* ("venus flytrap"), medindo diferenças de tensão entre as superfícies adaxial e abaxial das folhas em resposta a estímulos mecânicos.

Este trabalho pioneiro foi seguido pelos estudos de Bose, que explorou os potenciais elétricos na *Mimosa pudica*, demonstrando que estímulos mecânicos geravam PAs propagados através dos pulvínulos, controlando os movimentos rápidos das folhas (Volkov, 2006).

No início do século XX, avanços tecnológicos marcaram um novo patamar no estudo de potenciais em plantas. A introdução de microeletrodos por pesquisadores como Umrath e Osterhout, na década de 1930, possibilitou as primeiras medições confiáveis de potenciais de membrana intracelulares em células de plantas como *Nitella* e *Chara*. Esses instrumentos possibilitaram investigações detalhadas sobre os mecanismos de transporte iônico e a geração de PAs, fornecendo uma base sólida para estudos futuros (Volkov, 2006).

A década de 1970 trouxe avanços ainda mais significativos com a aplicação de amplificadores eletrônicos e técnicas como o "patch clamp". Essas ferramentas possibilitaram o estudo da atividade de canais iônicos individuais em membranas celulares. Descobriu-se, por exemplo, que enquanto os PAs em células vegetais dependem do influxo de íons cálcio (Ca^{2+}) e do efluxo de cloreto (Cl^-), os PAs em células animais são principalmente mediados por íons sódio (Na^+). Essas diferenças destacam as adaptações únicas das plantas na propagação de sinais elétricos (Volkov, 2006).

Além dos avanços técnicos, estudos pioneiros identificaram uma conexão direta entre sinais elétricos e respostas fisiológicas nas plantas. Pesquisas com a *Mimosa pudica* demonstraram que o floema atua como a principal via de propagação dos PAs, possibilitando a coordenação de respostas como movimentos foliares e mecanismos de defesa. Estudos contemporâneos continuam a explorar as interações entre potenciais elétricos e processos metabólicos, como a fotossíntese e o transporte de nutrientes, evidenciando a importância desses sinais para a fisiologia e adaptação vegetal (Volkov, 2006).

2.6 Modelos Experimentais

A seleção de modelos experimentais baseia-se nas características específicas das plantas e nas respostas bioelétricas que se pretende investigar. Certas espécies são amplamente utilizadas devido às suas propriedades únicas, como a capacidade

de gerar potenciais de ação (PAs) rápidos ou responder a estímulos mecânicos e elétricos. Entre os modelos mais estudados destacam-se: *Mimosa pudica*, *Dionaea muscipula* e o tomateiro (*Solanum lycopersicum*), cada uma com atributos específicos que as tornam adequadas para diferentes abordagens experimentais.

- *Mimosa pudica*: Reconhecida por suas respostas mecânicas rápidas, como o fechamento das folhas ao toque ou variações de temperatura, a *Mimosa pudica* é amplamente utilizada para investigar os mecanismos de transporte de íons e a relação entre sinais bioelétricos e alterações osmóticas. Esses movimentos são mediados por PAs e potenciais de variação (PVs), que se propagam pelos pulvínulos, coordenando os movimentos da planta. Além disso, sua fácil cultura e resposta visível a estímulos tornam-na ideal para estudos iniciais e demonstrações experimentais (Hagihara & Toyota, 2020; Volkov, 2006).
- *Dionaea muscipula*: Popularmente conhecida como "venus flytrap", esta planta carnívora apresenta movimentos rápidos e eficientes para capturar presas. Suas armadilhas foliares fecham em resposta a estímulos mecânicos nos pelos sensitivos, acionados por PAs propagados através das células do limbo foliar. Esses mecanismos tornam a *Dionaea muscipula* um modelo clássico para estudos sobre como os PAs desencadeiam respostas mecânicas e metabólicas em plantas (Fromm & Lautner, 2006; Volkov, 2006).
- Tomateiro (*Solanum lycopersicum*): O tomateiro é uma espécie sensível a variações ambientais e bem documentada. Em particular, mutantes deficientes em ácido abscísico podem ser empregados para investigar como a falta desse hormônio afeta a geração de sinais elétricos em resposta a estímulos. Sua relevância para experimentos também está associada à sua aplicabilidade prática em agricultura, dado o valor comercial.

O uso de modelos experimentais como o tomateiro tem sido impulsionado por inovações tecnológicas que permitem explorar os sinais bioelétricos com maior precisão. O desenvolvimento de sensores, microeletrodos e estufas automatizadas tem possibilitado a replicação de condições ambientais controladas e a coleta de dados em tempo real. Isso facilita a análise detalhada de PAs e PVs, ampliando as possibilidades de experimentação e validação científica.

O estudo de modelos experimentais está sendo transformado por avanços tecnológicos, possibilitando uma análise mais precisa e a replicação de experimentos

em condições controladas. A utilização de espécies como *Mimosa pudica*, *Dionaea muscipula* e tomateiro continua a oferecer insights valiosos para entender os mecanismos bioelétricos e explorar suas aplicações em biotecnologia, agricultura de precisão e sensoriamento ambiental.

2.7 Tecnologias Aplicadas

Os avanços tecnológicos desempenham um papel central no estudo das respostas bioelétricas de plantas, possibilitando maior precisão na análise de sinais elétricos e no controle das condições experimentais. Essas inovações impulsionam significativamente o estudo de potenciais em plantas e suas aplicações em agricultura de precisão.

A medição de sinais bioelétricos, como potenciais de ação (PAs) e potenciais de variação (PVs), tornou-se mais eficiente com o desenvolvimento de sensores de alta sensibilidade e amplificadores de sinal. Ferramentas modernas, como microcontroladores Arduino e Raspberry Pi, possibilitam o registro em tempo real das variações do potencial de membrana. Amplificadores de instrumentação combinados com conversores analógico-digitais aumentam a precisão na captura de dados, facilitando análises detalhadas de fenômenos bioelétricos em plantas como a *Mimosa pudica* (Volkov, 2006).

Estufas automatizadas desempenham um papel crucial em experimentos controlados, fornecendo um ambiente estável para manipular variáveis como luz, temperatura, umidade e composição do solo. Esses sistemas utilizam sensores para monitorar variáveis ambientais e atuadores para ajustar automaticamente as condições, garantindo a consistência nos experimentos. Segundo Wang *et al.* (2009), sistemas multicanais que integram sensores para medir simultaneamente sinais bioelétricos e variáveis ambientais oferecem análises mais completas das respostas das plantas. Tais avanços são particularmente úteis para plantas como a *Mimosa pudica*, que requerem estímulos controlados para respostas confiáveis.

Além do monitoramento, as tecnologias associadas a estufas automatizadas viabilizam aplicações práticas na agricultura e biotecnologia. Biossensores integrados permitem identificar respostas elétricas das plantas em tempo real, antecipando estresses ambientais antes do surgimento de sintomas visíveis (Mancuso & Marras,

2006). A robótica complementa esses sistemas, ajustando dinamicamente variáveis como luz e temperatura para replicar cenários ambientais de forma precisa e repetitiva (Sareen, 2017). Essa abordagem facilita experimentos mais complexos e promove a adoção de práticas agrícolas automatizadas, como o monitoramento remoto de estresses em culturas comerciais.

A integração de sensores diretamente em tecidos vegetais, como no sistema "Cyborg Botany" de Sareen (2017), exemplifica a convergência entre biologia e tecnologia. Esses dispositivos permitem medir sinais bioelétricos continuamente, enquanto monitoram variáveis ambientais em tempo real, abrindo novas oportunidades para pesquisas em sensoriamento ambiental e biotecnologia. Wang *et al.* (2009) também destacaram a importância da validação estatística para garantir a confiabilidade dos dados em sistemas automatizados, possibilitando o desenvolvimento de métodos precisos para experimentos complexos.

Embora ainda existem desafios relacionados à complexidade técnica dos sistemas automatizados, os avanços contínuos nos estudos de Bio eletricidade vegetal continuam a ampliar o entendimento das interações entre plantas e o ambiente, consolidando essas tecnologias como ferramentas essenciais para pesquisa e aplicação na agricultura de precisão.

2.8 Aplicações e Avanços recentes

Os sinais bioelétricos das plantas, como os potenciais de ação (PAs) e os potenciais de variação (PVs), demonstram ser ferramentas valiosas para o monitoramento em tempo real do estado fisiológico das culturas. Tecnologias modernas permitem integrar sensores diretamente aos tecidos vegetais para identificar respostas a estresses ambientais, como seca, salinidade e variações de temperatura. Sistemas baseados em sinais elétricos são propostos como métodos não invasivos, capazes de detectar estresses antes que sintomas visíveis se manifestem, possibilitando intervenções mais rápidas e eficazes no manejo agrícola (Volkov, 2006; Mancuso & Marras, 2012).

A utilização de plantas sensíveis, como a *Mimosa pudica*, em conjunto com sensores bioelétricos, destaca-se no monitoramento ambiental. Esses sistemas podem atuar como "biossensores vivos", detectando poluentes químicos, variações

de pH no solo e a presença de metais pesados. Sareen (2017) apresentou um sistema híbrido que combina sensores de baixo custo com respostas bioelétricas de plantas, possibilitando monitoramento remoto em ambientes urbanos e rurais. Adicionalmente, sistemas multicanais projetados para estufas automatizadas, como os descritos por Wang *et al.* (2009), demonstraram alta precisão na medição simultânea de estímulos ambientais, como luz, temperatura e umidade, enquanto registram sinais elétricos das plantas. Esses avanços validam a confiabilidade dos dados e abrem novas possibilidades para o estudo detalhado das interações entre estímulos ambientais e respostas bioelétricas.

As respostas bioelétricas das plantas também foram exploradas no desenvolvimento de tecnologias inovadoras, como dispositivos bioeletrônicos. Esses sistemas combinam sensores, atuadores e plantas vivas, criando plataformas funcionais para aplicações em robótica biológica e monitoramento autossustentável. Por exemplo, sinais elétricos de plantas podem ser utilizados para controlar dispositivos automatizados em ambientes agrícolas ou gerar alertas em condições ambientais adversas (Volkov, 2006). O desenvolvimento de estufas automatizadas, capazes de replicar condições controladas, também tem promovido avanços na validação de hipóteses experimentais e na otimização de respostas a múltiplos estímulos (Fromm & Lautner, 2006; Wang *et al.*, 2009).

Modelos experimentais como a *Mimosa pudica* contribuíram significativamente para a educação em ciências biológicas e tecnologia. Sua resposta rápida e visível a estímulos torna-a um modelo ideal em experimentos para estudantes e pesquisadores, promovendo o aprendizado de conceitos fundamentais de bioeletricidade. Essa aplicabilidade em contextos educativos reforça sua importância no avanço da pesquisa e na popularização de conhecimentos científicos.

Apesar dos avanços significativos, a aplicação de tecnologias para o monitoramento de plantas ainda enfrenta desafios, especialmente devido à complexidade técnica dos sistemas automatizados e sensores. A integração de diferentes componentes e a necessidade de interpretar dados com precisão requerem abordagens sofisticadas e conhecimentos especializados. No entanto, o aprimoramento contínuo dessas tecnologias, aliado a um melhor entendimento das interações entre plantas e variáveis ambientais, oferece grande potencial para avanços em agricultura sustentável, sensoriamento ambiental e biotecnologia. Essas inovações também ampliam as possibilidades de aplicação prática em contextos

acadêmicos e comerciais, consolidando sua importância em um cenário global de inovação.

Os estudos revisados fornecem uma base sólida para o desenvolvimento de sistemas que integram sinais bioelétricos e monitoramento ambiental. Wang *et al.* (2009) mostraram que sinais elétricos das plantas podem ser monitorados junto com variáveis ambientais, enquanto Chatterjee (2017) destacou o potencial de usar esses sinais para distinguir estímulos externos com alta precisão.

Estudos mais recentes, como o de Marta A. Lobo *et al.* (2023), reforçam a relação entre os sinais bioelétricos e as condições ambientais em plantas como a *Mimosa pudica*, evidenciando a sensibilidade da planta a mudanças de temperatura e umidade. Além disso, o trabalho revelou atrasos na resposta elétrica da planta, sugerindo uma dinâmica complexa de adaptação aos estímulos ambientais.

Com base nesses avanços, este trabalho busca expandir o uso de sistemas automatizados para monitorar e analisar os sinais bioelétricos da *Mimosa pudica* em resposta a variáveis ambientais. A proposta é integrar tecnologias modernas de sensoriamento e automação, contribuindo tanto para o estudo de potencial em plantas quanto para aplicações práticas como agricultura de precisão e monitoramento ambiental.

Tabela 1: Trabalhos relacionados

Autor(es)	Ano	Objetivo	Metodologia
Zhong-Yi Wang <i>et al.</i>	2009	Desenvolver um sistema de monitoramento para sinais elétricos em plantas e variáveis ambientais em estufas.	Integração de sensores ambientais e eletrodos para capturar sinais bioelétricos e dados ambientais simultaneamente.
Shre Kumar Chatterjee	2017	Investigar a possibilidade de classificar estímulos externos usando sinais bioelétricos de plantas.	Modelagem de sistemas (forward/inverse) e classificação de estímulos

			utilizando árvores de decisão e estatísticas.
Marta A. Lobo <i>et al.</i>	2023	Examinar a relação entre temperatura, umidade e sinais bioelétricos na <i>Mimosa pudica</i> .	Sistema de aquisição com sensores ambientais e eletrodos para monitoramento de sinais por 5 dias em tempo real.

Fonte autoria própria

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Processo de Desenvolvimento da Hipótese

A formulação da hipótese deste estudo baseia-se em uma análise aprofundada da literatura científica sobre potencial em plantas e suas aplicações. Pesquisas anteriores destacam que plantas, como a *Mimosa pudica*, produzem sinais bioelétricos, incluindo PAs e PVs, em resposta a alterações ambientais, como mudanças de temperatura, umidade e luminosidade (Wang *et al.*, 2009; Fromm & Lautner, 2006). Esses sinais refletem adaptações fisiológicas que podem ser utilizados como indicadores de mudanças no ambiente.

De acordo com Marta A. Lobo *et al.* (2023), a *Mimosa pudica* apresenta uma relação direta entre variações ambientais e alterações em nos sinais bioelétricos, demonstrando potencial para atuar como um sensor biológico vivo. Contudo, a replicação experimental das condições ambientais e a análise integrada desses sinais ainda apresentam limitações, como a ausência de sistemas robustos e escaláveis.

Com base nessa lacuna, este estudo propõe o desenvolvimento de um sistema automatizado capaz de controlar com precisão as condições ambientais e coletar dados bioelétricos em tempo real. A integração de tecnologias modernas de sensoriamento e automação visa não apenas avançar nas pesquisas, mas também oferecer soluções práticas para aplicações como agricultura de precisão e monitoramento ambiental.

3.1.1 Fundamentação da Hipótese

A hipótese central deste estudo é que um sistema automatizado, integrando sensores e atuadores para controle preciso de variáveis ambientais e registro contínuo de sinais bioelétricos, pode superar limitações técnicas existentes e possibilitar uma análise detalhada das respostas adaptativas das plantas. Esta abordagem dinâmica possibilita investigar as interações entre estímulos ambientais, como luz, temperatura e umidade, e os sinais elétricos gerados pelas plantas.

Pesquisas anteriores fundamentam esta hipótese. Chatterjee (2017) demonstrou o potencial das técnicas de classificação para diferenciar estímulos ambientais com alta precisão, destacando a viabilidade de utilizar sinais bioelétricos como indicadores confiáveis. Marta A. Lobo *et al.* (2023) forneceram evidências experimentais robustas, indicando que variações de temperatura e umidade influenciam diretamente os potenciais de variação (PVs) na *Mimosa pudica*. Por sua vez, Wang *et al.* (2009) destacaram a relevância de sistemas automatizados para o monitoramento contínuo de sinais bioelétricos e variáveis ambientais, fornecendo um modelo inicial para a construção de infraestruturas que integrem essas medições simultaneamente.

A integração dessas tecnologias, aliada ao uso de plantas sensíveis como *Mimosa pudica*, oferece uma base sólida para explorar, com maior precisão e confiabilidade, as respostas bioelétricas das plantas a múltiplos estímulos ambientais. Essa fundamentação apoia a hipótese de que o desenvolvimento de sistemas automatizados pode revolucionar o campo da bioeletricidade vegetal, com aplicações diretas em agricultura de precisão e monitoramento ambiental.

3.1.2 Integração com os Dados da Literatura

Os dados revisados na literatura reforçam a necessidade de sistemas integrados e precisos para estudar sinais bioelétricos de plantas em condições controladas. Trabalhos como os de Wang *et al.* (2009) e Marta A. Lobo *et al.* (2023) identificaram os sinais bioelétricos, como os PAs e os PVs, como indicadores confiáveis de mudanças ambientais, destacando sua relevância para estudos em ambientes experimentais controlados. Fromm & Lautner (2006) também enfatizaram que os PAs e PVs desempenham papéis cruciais na regulação de processos fisiológicos das plantas em resposta a estímulos externos.

Este estudo avança ao propor um sistema automatizado que integra tecnologias modernas de sensoriamento e atuação. Essa abordagem possibilitará o registro simultâneo de sinais elétricos e dados ambientais em tempo real, preenchendo lacunas identificadas na literatura. Ao combinar controle preciso de variáveis ambientais com o monitoramento contínuo das respostas bioelétricas, o sistema contribuirá significativamente para o estudo das interações planta-ambiente.

Além disso, abrirá novas possibilidades para aplicações científicas e práticas, como agricultura de precisão e sensoriamento ambiental, consolidando o papel dos sinais bioelétricos como ferramentas para a compreensão e manejo de ecossistemas vegetais.

3.2 Projeto

3.2.1 Cultivo da Mimosa

O cultivo da *Mimosa pudica*, popularmente conhecida como "dormideira", exige cuidados específicos, principalmente durante a fase de germinação, devido à alta sensibilidade da planta às condições ambientais, como temperatura e umidade. Para investigar os fatores que influenciam o sucesso no cultivo, foi realizado um experimento durante o final do ano, em uma estação mais quente, com o plantio de 30 sementes submetidas a duas condições distintas. O objetivo foi avaliar as taxas de germinação e sobrevivência das mudas.

Na primeira condição, denominada Plantio Convencional, 15 sementes foram plantadas diretamente no solo sem qualquer tratamento prévio. O resultado desta abordagem foi desanimador: apenas duas sementes germinaram, mas ambas as mudas morreram antes de completarem seis meses de vida. Estes resultados reforçam as dificuldades naturais do cultivo sem preparação inicial das sementes.

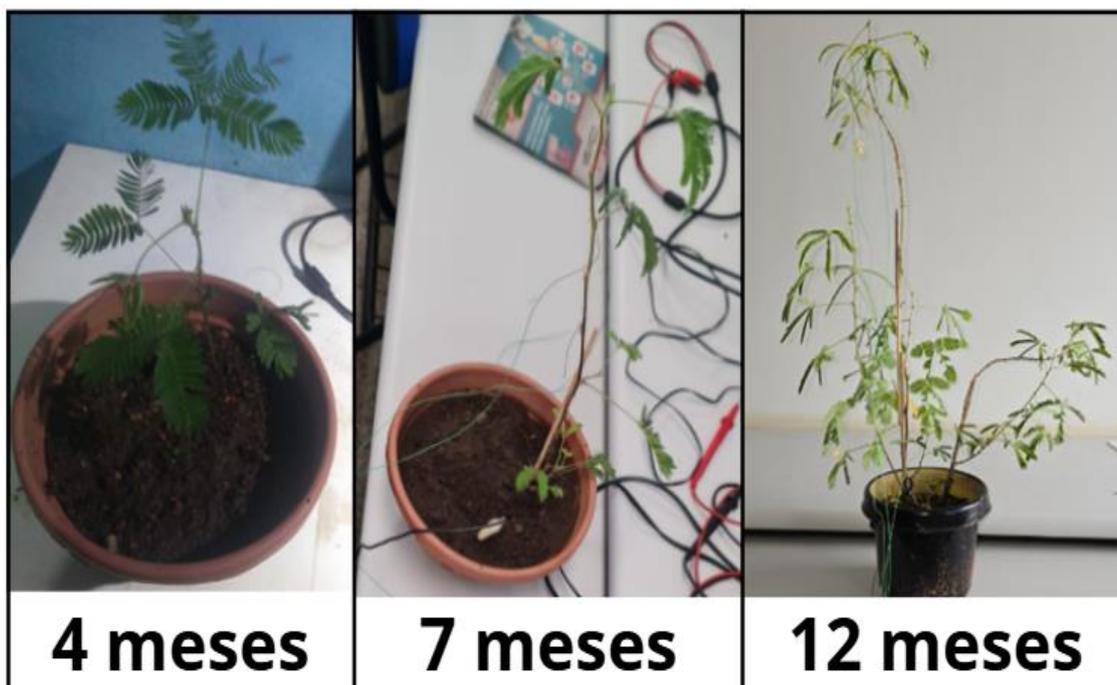
Já na segunda condição, intitulada Plantio com Pré-tratamento, outras 15 sementes foram submetidas a um protocolo experimental de escarificação para facilitar a germinação. O processo consistiu em aplicar uma leve compressão na casca das sementes usando um alicate, para possibilitar melhor absorção de água. Em seguida, as sementes foram colocadas entre folhas de papel toalha úmido, criando um ambiente semelhante a um "sanduíche" de papel-toalha-semente-papel-toalha. O papel toalha foi mantido constantemente úmido, e as sementes foram monitoradas diariamente em busca de sinais de germinação, como o aparecimento de pequenas raízes brancas. Este método segue práticas semelhantes às descritas em estudos sobre estímulos e cuidados iniciais para a *Mimosa pudica* (BACKYARD BRAINS, 2024).

O tempo necessário para a germinação variou de três dias a três semanas. Neste método, quatro sementes germinaram, resultando em uma taxa de sucesso de 26,7%. As mudas germinadas foram cuidadosamente transplantadas para vasos médios, onde receberam irrigação moderada e luz solar indireta, fatores que contribuíram para o desenvolvimento inicial das plantas.

Estes resultados demonstram que o pré-tratamento das sementes aumenta significativamente as chances de germinação e sobrevivência da *Mimosa pudica*, evidenciando a importância de técnicas preparatórias no cultivo dessa espécie sensível.

Conforme ilustrado na Figura 8, o desenvolvimento inicial da planta foi lento, com mudas frágeis e raízes profundas. As mudas, com altura entre 2 e 4 cm, atingiram o estágio crítico de três a quatro pequenos ramos, o que indicou maior resistência. A terceira parte da figura apresenta uma planta adulta (cerca de 1 ano de idade), com aproximadamente 40 cm, bem estabelecida, comprovando o sucesso do método de pré-tratamento.

Figura 8: Fases da vida da mimosa pudica cultivada



Fonte autoria própria

O cultivo da *Mimosa pudica* apresenta diversos desafios que devem ser considerados para garantir o sucesso do processo.

Um dos principais obstáculos está relacionado à taxa de germinação, que se mostrou bastante baixa, variando entre 10% e 20%, um dado que está alinhado com estudos prévios sobre a espécie. Além disso, mesmo entre as sementes que germinaram, apenas cerca de um terço conseguiu sobreviver à fase de muda. Este resultado evidencia a importância de oferecer condições ideais durante o cultivo inicial, como umidade controlada, temperatura adequada e manejo cuidadoso do solo.

Outro desafio significativo foi a característica de raízes profundas da planta, que já se manifestaram desde os estágios iniciais de crescimento. Esta adaptação natural da *Mimosa pudica* exigiu o transplante para vasos maiores em pouco tempo, a fim de evitar restrições ao desenvolvimento radicular. Esta necessidade implica planejamento e recursos adicionais para garantir que as plantas tenham espaço suficiente para crescer de forma saudável.

Por fim, a estação do ano também se mostrou um fator determinante no sucesso do cultivo. O plantio realizado durante o verão foi essencial, pois essa estação oferece maior disponibilidade de luz solar e temperaturas mais altas, condições críticas para a germinação e o crescimento inicial da *Mimosa pudica*. Cultivar a planta fora dessa estação pode resultar em taxas de sucesso ainda menores, dada a sensibilidade da espécie às variações climáticas.

Estes desafios destacam a complexidade de cultivar a *Mimosa pudica* e reforçam a necessidade de cuidados específicos em cada etapa do processo para maximizar a taxa de sobrevivência e o desenvolvimento saudável da planta.

O método de escarificação aumentou significativamente a taxa de germinação, tornando-se uma técnica recomendada para o cultivo da *Mimosa pudica* em condições experimentais controladas. A estufa automatizada desenvolvida neste trabalho desempenhou um papel crucial ao oferecer um ambiente controlado, possibilitando o ajuste preciso de variáveis como luz, temperatura e umidade. Isso garantiu a saúde das plantas e favoreceu o crescimento, mesmo sob condições que poderiam ser adversas para o desenvolvimento natural da *Mimosa pudica*.

Estes resultados reforçam a importância do controle ambiental automatizado no cultivo de plantas sensíveis em estudos experimentais.

3.2.2 Metodologia como Resposta ao Problema

Este projeto propõe a criação de uma estufa automatizada projetada para controlar simultaneamente múltiplas variáveis ambientais e registrar, em tempo real, as respostas das plantas a diferentes estímulos. A estrutura foi idealizada com o objetivo de oferecer um ambiente experimental preciso e reprodutível, possibilitando análises detalhadas das interações entre fatores como luz, temperatura e umidade e os comportamentos adaptativos das plantas.

A metodologia tem como foco principal a construção de uma infraestrutura que possibilite a validação de hipóteses científicas em condições controladas e a aplicação prática dos resultados em áreas como biotecnologia, agricultura de precisão e monitoramento ambiental. O sistema desenvolvido integra sensores que coletam dados ambientais, enquanto atuadores ajustam automaticamente as variáveis, garantindo um alto grau de automação e reduzindo interferências externas que poderiam comprometer os experimentos.

A proposta busca criar uma infraestrutura adaptável e inovadora, que facilite a realização de experimentos avançados, especialmente em contextos educacionais e institucionais. Ao fornecer um ambiente controlado e configurável, o projeto amplia as possibilidades de estudo sobre as interações planta-ambiente, criando oportunidades para pesquisadores e educadores explorarem novas fronteiras na ciência vegetal.

Com esta abordagem, espera-se contribuir significativamente para o avanço da ciência, abordando lacunas como a falta de infraestrutura experimental precisa e replicável. Além disso, a metodologia promove o desenvolvimento de aplicações práticas que conectem o conhecimento gerado aos desafios reais da agricultura sustentável e do monitoramento ambiental, consolidando a estufa automatizada como uma ferramenta essencial para estudos e inovações práticas.

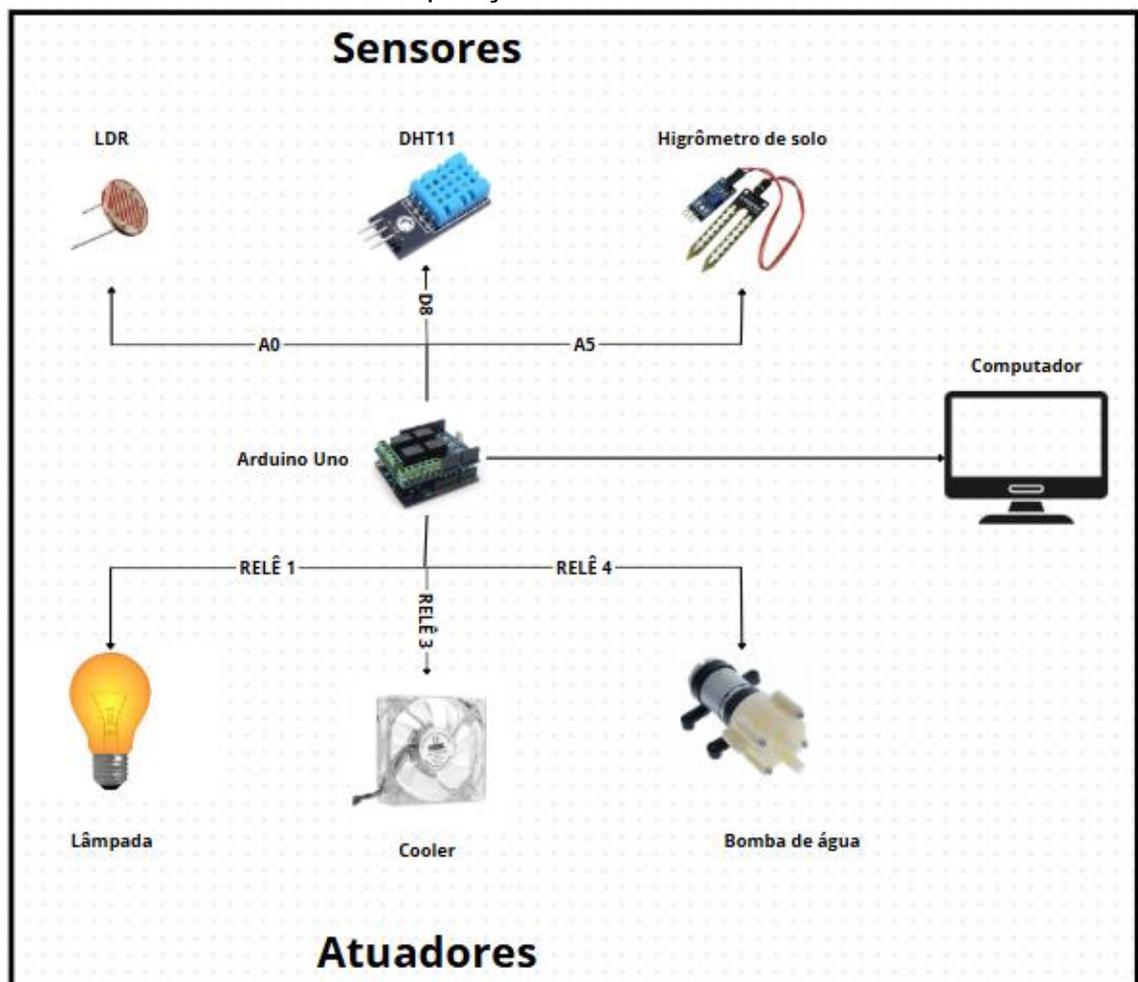
3.2.3 Disposição dos componentes

O sistema desenvolvido apresenta uma integração entre sensores, atuadores e dispositivos de controle, com o objetivo de monitorar e ajustar as condições ambientais da estufa e registrar sinais bioelétricos das plantas. A configuração do

sistema é representada por três esquemas visuais que explicam detalhadamente o funcionamento e a disposição dos componentes.

A Figura 9 ilustra o esquema de ligação entre os sensores, os atuadores, o Arduino Uno R3 e o computador. Neste diagrama, é evidenciado como o computador atua como elemento central para a supervisão do sistema, exibindo dados em tempo real e possibilitando ajustes precisos das condições experimentais dentro da estufa. Esta conexão garante a visualização contínua das variáveis ambientais, como luminosidade, temperatura e umidade, além de possibilitar o controle eficiente de parâmetros críticos para os experimentos.

Figura 9: Diagrama esquemático do sistema experimental. Mostra a disposição dos sensores

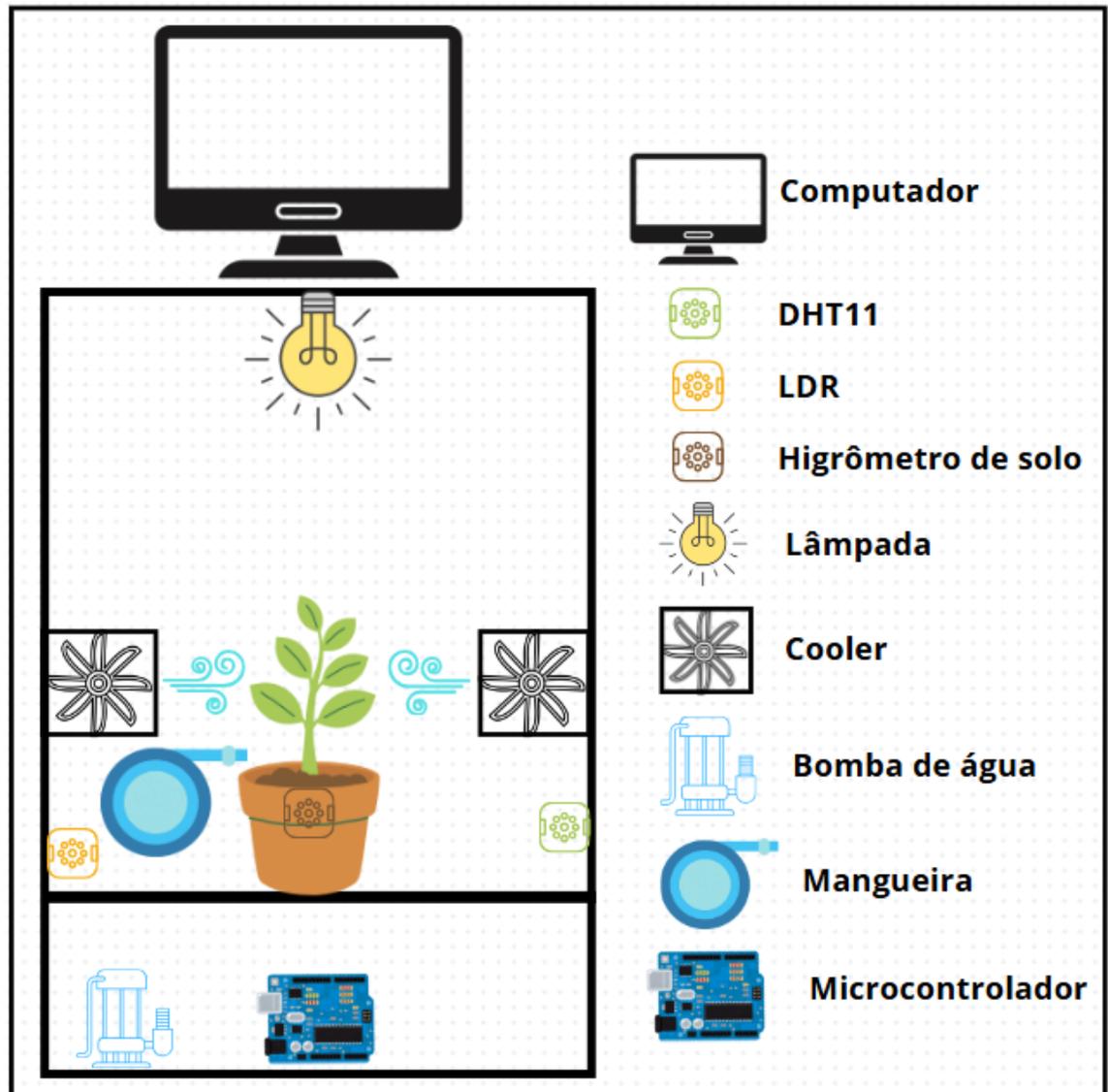


Fonte autoria própria

Na Figura 10, é apresentada a disposição física dos componentes no interior da estufa automatizada. Esta figura detalha como os sensores e atuadores

estão organizados no espaço, destacando a praticidade da montagem e a eficiência na interação entre os diferentes elementos do sistema. A disposição planejada otimiza o funcionamento da estufa, possibilitando a coleta de dados de maneira confiável e reduzindo interferências externas.

Figura 10: disposição dos dispositivos na estrutura da estufa

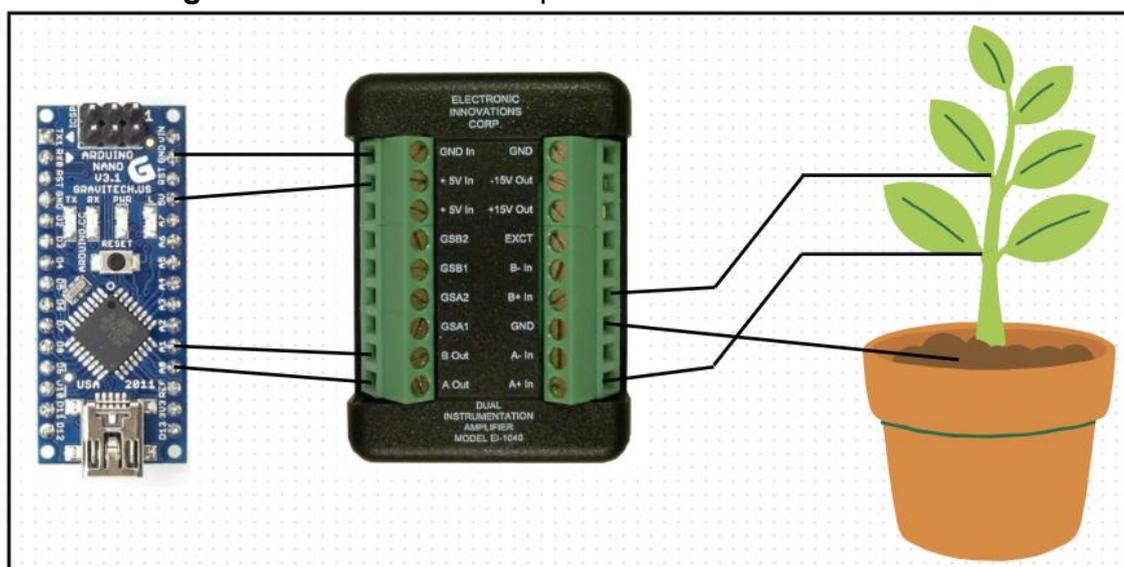


Fonte autoria própria

A Figura 11 descreve o esquema de conexão entre os componentes responsáveis pela captura e amplificação dos sinais bioelétricos gerados pelas plantas. Nesse sistema, o Arduino Nano é utilizado como núcleo de processamento, recebendo os sinais amplificados pelo dispositivo EI-1040. Esses sinais são convertidos de analógicos para digitais, garantindo precisão e fidelidade

na captura das respostas eletrofisiológicas das plantas. O amplificador EI-1040, configurado para um ganho de 10 vezes, intensifica os sinais de baixa amplitude provenientes dos processos eletrofisiológicos. Além disso, os eletrodos não invasivos conectados diretamente aos pulvínulos das plantas asseguram uma coleta eficiente dos sinais, preservando a integridade das estruturas vegetais.

Figura 11: Conexão do amplificador EI-1040 ao Arduino Nano e à



Fonte autoria própria

Esta integração tecnológica permite o registro detalhado e em tempo real das interações entre as variáveis ambientais e as respostas bioelétricas das plantas. No próximo subcapítulo, será explorado como esta configuração contribui para alcançar os objetivos deste estudo, ampliando a compreensão das interações planta-ambiente em condições controladas.

3.3 Tecnologias e protótipos

3.3.1 Componentes Tecnológicos

O sistema automatizado da estufa utiliza o Arduino Uno R3 como componente central para o controle e integração de sensores e atuadores. Este microcontrolador é programado para processar os dados captados pelos sensores e gerenciar o acionamento dos atuadores, garantindo o controle das condições ambientais de acordo com as necessidades dos experimentos. Ele desempenha funções como a leitura de dados ambientais e a ativação ou desativação dos dispositivos com base em parâmetros predefinidos.

Os sensores instalados monitoram continuamente as condições internas da estufa, fornecendo dados detalhados para ajustes automáticos:

LDR (Light Dependent Resistor): Mede a intensidade da luz em lux, conectado ao pino A0 do Arduino por meio de um divisor de tensão, garantindo medições consistentes da luminosidade interna.

DHT11: Monitora digitalmente a temperatura e a umidade do ar. Está conectado ao pino D8 do Arduino, possibilitando o acompanhamento constante dessas variáveis ambientais.

Higrômetro de Solo: Mede a umidade do substrato onde as plantas estão cultivadas, conectado ao pino A5 por meio de um módulo analógico. Este sensor fornece informações críticas para o controle da irrigação.

Os atuadores garantem o ajuste dinâmico das condições internas da estufa, respondendo às informações enviadas pelos sensores:

Lâmpada Incandescente: Controlada pelo relé 1 (pino D7 do Arduino), ajusta a luminosidade interna.

Coolers: Dois coolers instalados nas laterais, conectados ao relé 3 (pino D5), promovem a circulação do ar e ajudam a estabilizar temperatura e umidade.

Bomba de Água RS385: Com potência de 6 W, conectada ao relé 4 (pino D4), realiza a irrigação automática das plantas através de mangueiras configuradas para o sistema.

O Arduino Uno R3 está conectado a um computador que exibe em tempo real os dados captados pelos sensores. Esta interface permite o acompanhamento contínuo das condições ambientais da estufa, além dos sinais captados pelos eletrodos nas plantas. A visualização em tempo real facilita ajustes imediatos e intervenções, possibilitando a manutenção precisa das condições experimentais.

A estrutura física da estufa foi projetada para atender às necessidades experimentais com praticidade. Foi utilizado um rack de servidor descartado, adaptado e pintado de preto para reduzir a interferência da luz externa e melhorar a resposta do LDR. Esta solução proporciona uma base durável e funcional para os experimentos, além de ser uma alternativa prática para projetos científicos.

3.3.2 Protótipo Construído

O protótipo da estufa automatizada foi projetado com foco em funcionalidade, eficiência e acessibilidade, empregando materiais reciclados e tecnologias de fácil implementação. A estrutura física consiste em um rack de servidor descartado, adaptado para acomodar os sensores, atuadores e microcontroladores. Esta adaptação garante organização e facilidade de manutenção, além de possibilitar um controle eficiente das condições experimentais.

Os sensores foram estrategicamente conectados ao Arduino Uno R3 utilizando cabos blindados para minimizar interferências externas. O LDR, responsável por medir a intensidade luminosa em lux, está conectado ao pino A0 do microcontrolador por meio de um divisor de tensão. O sensor DHT11, utilizado para monitorar a temperatura e a umidade do ar, está ligado à porta D8, enquanto o módulo do higrômetro, que mede a umidade do solo, está conectado ao pino A5. Esta integração garante a leitura precisa das variáveis ambientais, possibilitando que os atuadores respondam automaticamente às condições monitoradas.

Os atuadores, compostos por uma lâmpada incandescente, dois coolers e uma bomba de água RS385, são acionados pelo shield de relés do Arduino Uno. A lâmpada, utilizada para ajustar a luminosidade interna, está conectada ao relé 1 (pino D7), enquanto os coolers, responsáveis pela circulação de ar, estão ligados ao relé 3 (pino D5). A bomba de água, que regula a irrigação por meio de mangueiras, está

conectada ao relé 4 (pino D4) e posicionada em uma caixa para proteção contra danos ambientais.

A Figura 12 a seguir ilustra a configuração detalhada do sistema de sensores e atuadores da estufa automatizada, demonstrando sua disposição na prática:

Figura 12: Representação física da estufa automatizada



Fonte autoria própria

Embora o sistema da estufa automatizada seja responsável por controlar e ajustar as condições ambientais para a planta, a leitura dos sinais bioelétricos, como os potenciais de ação (PA) e os potenciais de variação (PV), foi realizada separadamente. Para garantir maior precisão na captação desses sinais e minimizar interferências externas, a estufa foi coberta com papel alumínio, criando uma estrutura que atua como uma gaiola de Faraday. Esta estratégia foi fundamental para reduzir ruídos eletromagnéticos provenientes do ambiente, garantindo maior fidelidade aos sinais capturados.

Os sinais foram coletados utilizando eletrodos não invasivos e invasivos conectados aos pulvínulos primários das plantas, acoplados ao amplificador EI-1040. Este amplificador foi configurado com um ganho de 10x para amplificar os sinais de baixa intensidade antes de serem processados digitalmente pelo Arduino Nano. Vale ressaltar que, embora o sistema automatizado da estufa controle as variáveis

ambientais, o EI-1040 não faz parte diretamente da estrutura automatizada, sendo um equipamento auxiliar dedicado exclusivamente à leitura e análise dos sinais bioelétricos.

A cobertura de papel alumínio demonstrou ser uma solução eficiente para reduzir interferências externas, proporcionando um ambiente experimental mais controlado e contribuindo para a qualidade dos dados coletados. Esta abordagem destacou-se como uma prática indispensável para o sucesso das medições eletrofisiológicas realizadas neste estudo.

Por fim, os microcontroladores estão conectados a um computador via USB, que processa e exibe os dados coletados em tempo real. Softwares de monitoramento interpretam as informações, garantindo que o sistema funcione de forma eficiente e que as condições ambientais sejam ajustadas conforme necessário para a saúde das plantas e o sucesso dos experimentos.

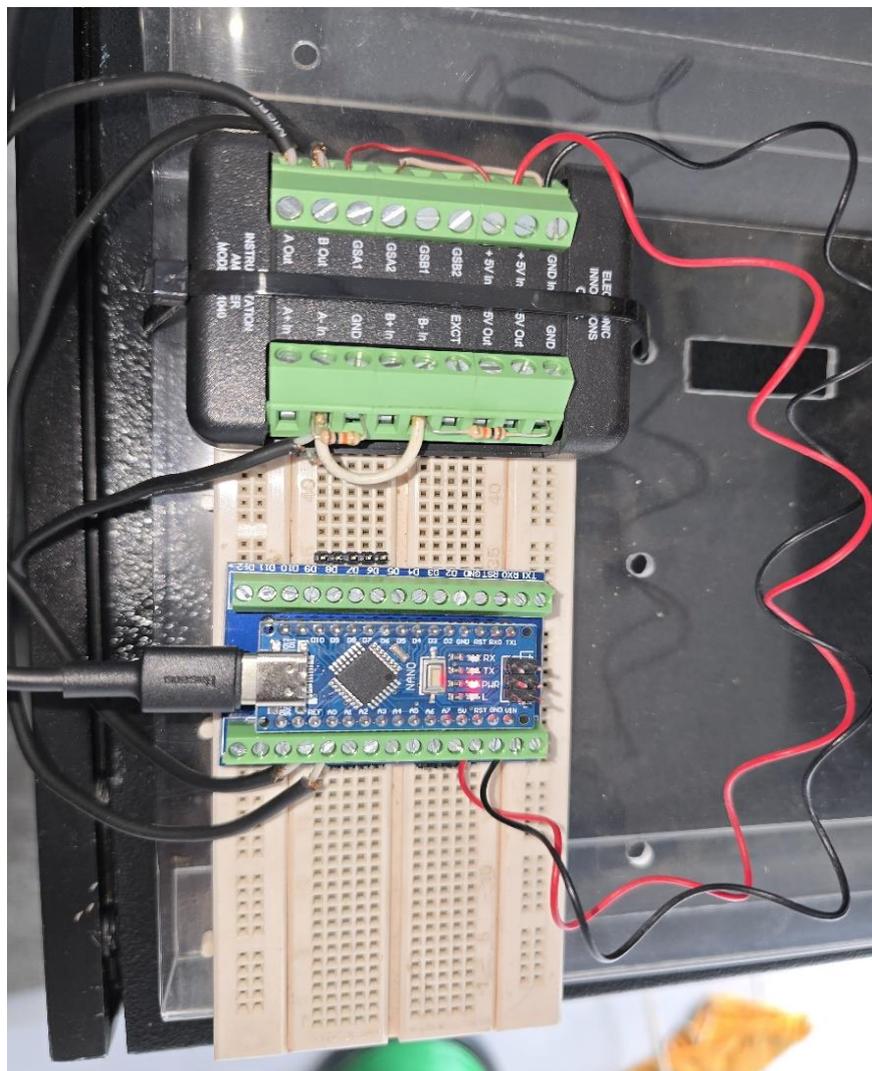
O sistema de aquisição de dados foi projetado para captar e processar sinais bioelétricos gerados pelas plantas, utilizando dois componentes principais: o amplificador de instrumentação EI-1040 e o microcontrolador Arduino Nano. Esta configuração permite a amplificação, digitalização e análise em tempo real dos sinais elétricos, garantindo precisão e confiabilidade nos dados obtidos.

O amplificador EI-1040 é um dispositivo programável de alta precisão, projetado para amplificar sinais de baixa intensidade com um ganho configurável. Neste trabalho, o EI-1040 foi programado para um ganho de 10x, garantindo que os sinais captados pelos eletrodos não invasivos posicionados nas plantas sejam amplificados o suficiente para posterior conversão analógica-digital. O circuito do EI-1040, detalhado no datasheet, inclui entradas diferenciais (A+ e B+) que conectam os eletrodos, e saídas analógicas que enviam o sinal amplificado ao próximo estágio do sistema.

O Arduino Nano atua como o módulo de processamento central do sistema de aquisição. Este microcontrolador compacto é equipado com um conversor analógico-digital (ADC) de 10 bits, que transforma os sinais analógicos amplificados pelo EI-1040 em dados digitais. O Arduino Nano possui entradas específicas para conectar o EI-1040 (A0 e GND), possibilitando uma integração eficiente. A escolha do Arduino Nano se justifica por sua alta frequência de amostragem, simplicidade operacional e compatibilidade com outros componentes do sistema.

A integração destes componentes possibilita a coleta precisa de dados bioelétricos em tempo real, que podem ser analisados para compreender as respostas fisiológicas e adaptativas das plantas. A utilização do EI-1040, um amplificador dedicado, elimina ruídos e garante que o Arduino Nano processe sinais com maior acurácia, essencial para validação científica em experimentos controlados. As Figuras 12 e 13 apresentam os esquemas detalhados de cada dispositivo, reforçando a robustez técnica do sistema implementado.

Figura 13: Disposição dos componentes de aquisição de dados



Fonte autoria própria

A Figura 13 ilustra a integração do sistema de aquisição de dados, destacando a conexão dos eletrodos não invasivos posicionados na planta ao amplificador EI-1040, que amplifica os sinais bioelétricos captados. Esses sinais são transmitidos para

o Arduino Nano, responsável pela conversão analógica-digital e processamento. O diagrama enfatiza a organização e funcionalidade do sistema, evidenciando como os diferentes componentes trabalham em conjunto para assegurar a coleta precisa dos dados bioelétricos em tempo real.

A interface gráfica desenvolvida, destacada na Figura 14, não apenas simplifica o controle e o monitoramento das variáveis ambientais da estufa, mas também demonstra a eficácia da integração entre hardware e software no sistema automatizado. Esta visualização interativa reflete o compromisso com a usabilidade e a eficiência, conectando a coleta precisa dos dados ambientais ao controle dos atuadores em tempo real. Esta funcionalidade será aprofundada no tópico "3.3.4 Ambiente de Desenvolvimento e Codificação", onde serão descritas as ferramentas, linguagens e métodos que possibilitaram a criação desta solução integrada e acessível.

Figura 14: Interface gráfica do sistema da estufa



Fonte autoria própria

3.3.3 Vantagens do Protótipo

O protótipo desenvolvido apresenta-se como uma solução inovadora para o estudo das respostas das plantas a diferentes variáveis ambientais e para aplicações em agricultura de precisão. Entre suas principais vantagens, destaca-se a capacidade de controlar múltiplas variáveis ambientais, como luminosidade, temperatura e umidade, de forma precisa e integrada. Esta funcionalidade permite a criação de condições experimentais estáveis e reproduzíveis, garantindo a consistência dos dados coletados.

Outro ponto positivo é a flexibilidade do protótipo, que pode ser adaptado para atender a diferentes espécies vegetais e cenários experimentais. Esta característica torna o sistema aplicável a uma ampla gama de estudos, desde investigações básicas sobre interações planta-ambiente até experimentos mais complexos voltados para o desenvolvimento de novas tecnologias em agricultura e biotecnologia.

Além disso, a estufa elimina a dependência das condições climáticas externas, possibilitando a geração de estímulos ambientais controlados independentemente do clima no momento. Essa característica é especialmente relevante para pesquisas que demandam precisão e consistência, uma vez que as variações naturais do ambiente podem interferir nos resultados experimentais. Assim, o protótipo garante maior controle sobre os fatores analisados e permite a realização de estudos em qualquer época do ano, independentemente das condições meteorológicas.

A estrutura física do sistema também apresenta vantagens relevantes. Ao reutilizar materiais descartados, como o rack de servidor que compõe sua base estrutural, o projeto incorpora práticas sustentáveis, contribuindo para uma abordagem experimental que reduz o impacto ambiental. Além disso, a adaptação do rack com pintura e ajustes específicos melhora a funcionalidade do sistema, minimizando interferências externas, como a entrada de luz indesejada.

Por fim, a automação integrada ao protótipo minimiza a necessidade de intervenção humana durante os experimentos, reduzindo possíveis erros e aumentando a confiabilidade dos resultados. Esta automação permite ajustes automáticos das condições ambientais em tempo real, ampliando as possibilidades de análise detalhada sobre as respostas das plantas a diferentes estímulos. Assim, o protótipo oferece uma base robusta para pesquisas científicas e aplicações práticas,

consolidando-se como uma ferramenta útil e versátil em estudos ambientais e agrícolas.

3.3.4 Ambiente de Desenvolvimento e Codificação

O sistema automatizado da estufa foi desenvolvido com base em uma arquitetura modular e integrativa, projetada para coletar e processar dados ambientais e bioelétricos em tempo real, além de controlar múltiplas variáveis experimentais de forma simultânea. Esta abordagem foi implementada por meio de três componentes principais: o firmware do Arduino, um servidor web utilizando o framework Flask em Python e uma interface gráfica interativa construída em HTML. Estes elementos trabalham em sinergia para garantir a funcionalidade e eficiência do sistema.

No campo do software, o firmware do Arduino foi programado na IDE Arduino, que possibilitou o desenvolvimento e upload do código para o microcontrolador. Essa programação é responsável pela leitura dos sensores e pelo acionamento dos atuadores, assegurando a interação contínua e precisa entre o hardware e o software. Para gerenciar a comunicação com o Arduino e os dispositivos conectados, o servidor backend foi desenvolvido em Python com Flask. Este framework gerencia os dados recebidos dos sensores e os comandos enviados para os atuadores, ao mesmo tempo que serve como intermediário entre o microcontrolador e a interface do usuário. Por sua vez, a interface gráfica foi projetada com HTML, CSS e JavaScript, oferecendo uma experiência de monitoramento e controle intuitiva e responsiva.

Bibliotecas específicas desempenharam papéis cruciais na funcionalidade do sistema. No servidor Python, a biblioteca serial foi utilizada para estabelecer a comunicação com o Arduino, enquanto threading possibilitou a execução de tarefas simultâneas, como o processamento de dados dos sensores e a gestão dos atuadores. No Arduino, a biblioteca DHT.h possibilitou a leitura dos sensores de temperatura e umidade DHT11, essenciais para monitorar o ambiente interno da estufa. No front-end, frameworks como Bootstrap e funções JavaScript, como setInterval, foram utilizadas para atualizar os dados em tempo real e garantir interatividade.

O código desenvolvido para o Arduino desempenha funções centrais no sistema, como a coleta de dados e o controle dos atuadores. Os sensores conectados

incluem um LDR para medir a intensidade luminosa, um higrômetro para avaliar a umidade do solo e o DHT11, que monitora a temperatura e a umidade relativa do ar. Estes dados são coletados em intervalos de dois segundos e enviados ao servidor Flask por meio da porta serial, em um formato padronizado para facilitar o processamento. Além disso, o código do Arduino gerencia o acionamento da lâmpada, do cooler e da bomba de água com base nas condições monitoradas ou nos comandos recebidos do servidor. A Figura 15 ilustra uma parte essencial do código do Arduino, onde as leituras dos sensores são capturadas e transmitidas para o servidor.

Figura 15: Código do Arduino para leitura dos sensores

```
void loop() {
  int ldrValue = analogRead(A0);
  float soilHumidity = analogRead(A1) * (100.0 / 1023.0);
  float temperature = dht.readTemperature();
  float humidity = dht.readHumidity();

  // Envia os dados para o servidor
  Serial.print("LDR: "); Serial.print(ldrValue);
  Serial.print(", SOIL Humidity: "); Serial.print(soilHumidity);
  Serial.print(", Temp: "); Serial.print(temperature);
  Serial.print(", DHT Humidity: "); Serial.println(humidity);

  delay(2000); // Aguarda antes da próxima leitura
}
```

Fonte autoria própria

O servidor Flask atua como uma ponte entre o Arduino e a interface gráfica. Ele processa os dados recebidos do Arduino, organiza-os em formato JSON e os disponibiliza por meio de uma API REST. Esta API permite que a interface acesse os dados atualizados em tempo real e envie comandos de controle. Além disso, o servidor gerencia o "modo automático", que ajusta os atuadores de forma independente para manter as condições ambientais ideais. A Figura 16 apresenta

exemplos de endpoints GET e POST no código do servidor, demonstrando como os dados dos sensores são disponibilizados e como os comandos para os atuadores são enviados ao Arduino.

Figura 16: Exemplos de rotas Flask para consulta de dados dos sensores

```
@app.route('/data', methods=['GET'])
def get_data():
    return jsonify(data)

@app.route('/control', methods=['POST'])
def control_actuator():
    actuator = request.json.get("actuator")
    action = request.json.get("action")
    enviar_comando_serial(f"LIGAR_{actuator.upper()}") if action == "on" else f"DESLIGAR
    return jsonify(data)
```

Fonte autoria própria

A interface gráfica foi projetada para oferecer uma interação amigável e dinâmica. Desenvolvida em HTML e CSS com suporte de JavaScript, ela permite que os usuários monitorem as condições da estufa em tempo real e alternem entre o controle manual e automático dos atuadores. A integração com o servidor Flask possibilita o envio de comandos e a recepção de atualizações constantes sobre o estado do sistema. Por exemplo, o botão "Ligar Lâmpada", ilustrado na Figura 17, utiliza a função toggleActuator para enviar requisições POST à API do Flask, garantindo uma operação responsiva e eficiente.

Figura 17: Trecho do código da interface que ilustra o envio de comandos para controle de atuadores via requisições HTTP POST

```
<button class="btn btn-primary" onclick="toggleActuator('lamp', 'on')">Ligar Lâmpada</butt
<button class="btn btn-secondary" onclick="toggleActuator('lamp', 'off')">Desligar Lâmpada

<script>
function toggleActuator(actuator, action) {
  fetch('/control', {
    method: 'POST',
    headers: { 'Content-Type': 'application/json' },
    body: JSON.stringify({ actuator, action })
  }).then(response => response.json())
  .then(data => console.log(data))
  .catch(error => console.error('Erro:', error));
}
</script>
```

Fonte autoria própria

O sistema desenvolvido combina hardware e software de maneira integrada para criar uma solução robusta e eficiente. Esta abordagem modular não apenas simplifica a manutenção e expansão do sistema, mas também proporciona um ambiente controlado e confiável para experimentos científicos. Ao integrar coleta de dados, controle de variáveis ambientais e monitoramento em tempo real, o sistema automatizado da estufa representa um avanço significativo em estudos e aplicações práticas em agricultura de precisão e monitoramento ambiental.

4 AVALIAÇÃO DA HIPÓTESE

A hipótese central deste estudo sugeria que um sistema automatizado, projetado para controlar simultaneamente múltiplas variáveis ambientais, como luz, temperatura e umidade, enquanto registra em tempo real os sinais bioelétricos gerados pela planta *Mimosa pudica*, possibilita uma análise aprofundada das respostas fisiológicas e eletrofisiológicas da planta a estímulos ambientais. O objetivo era compreender como a manipulação precisa dessas variáveis poderia influenciar a geração dos potenciais de ação (PA) e potenciais de variação (PV) pela planta.

Os experimentos foram conduzidos em uma estufa automatizada, onde condições como luminosidade, temperatura e umidade do solo foram ajustadas em intervalos predeterminados. Durante os testes, os PA foram induzidos por estímulos mecânicos diretos aplicados aos pulv. ínulos da *Mimosa pudica*, uma abordagem amplamente aceita para provocar respostas elétricas rápidas. Os PV, por sua vez, foram desencadeados por um estresse térmico controlado, utilizando um objeto aquecido para simular danos localizados e gerar respostas elétricas mais duradouras. Essas metodologias possibilitaram avaliar as respostas bioelétricas da planta em relação a diferentes tipos de estímulos.

Apesar do planejamento cuidadoso e da infraestrutura desenvolvida, os experimentos enfrentaram desafios significativos relacionados à interferência de ruídos nos dados coletados. Muitos dos sinais registrados pelos sensores foram distorcidos por fatores externos, como variações inesperadas nas condições ambientais externas, incluindo luz excessiva ou vento, interferências elétricas provenientes do ambiente experimental e falhas ocasionais nos próprios sensores ou nos cabos de conexão. Essas interferências resultaram em uma grande quantidade de dados contaminados, comprometendo a identificação clara dos PA e PV e dificultando a interpretação dos resultados.

Estes problemas evidenciaram a necessidade de melhorias no controle das condições experimentais e na qualidade do sistema de aquisição de dados. Foi constatado que a sensibilidade do sistema a ruídos comprometeu parcialmente a validação da hipótese, embora também tenha gerado aprendizados importantes. As dificuldades destacaram a importância de aprimorar o isolamento elétrico dos componentes, reforçar o controle das variáveis ambientais para minimizar influências

externas e aperfeiçoar os algoritmos de filtragem de sinais, de modo a distinguir dados relevantes de ruídos.

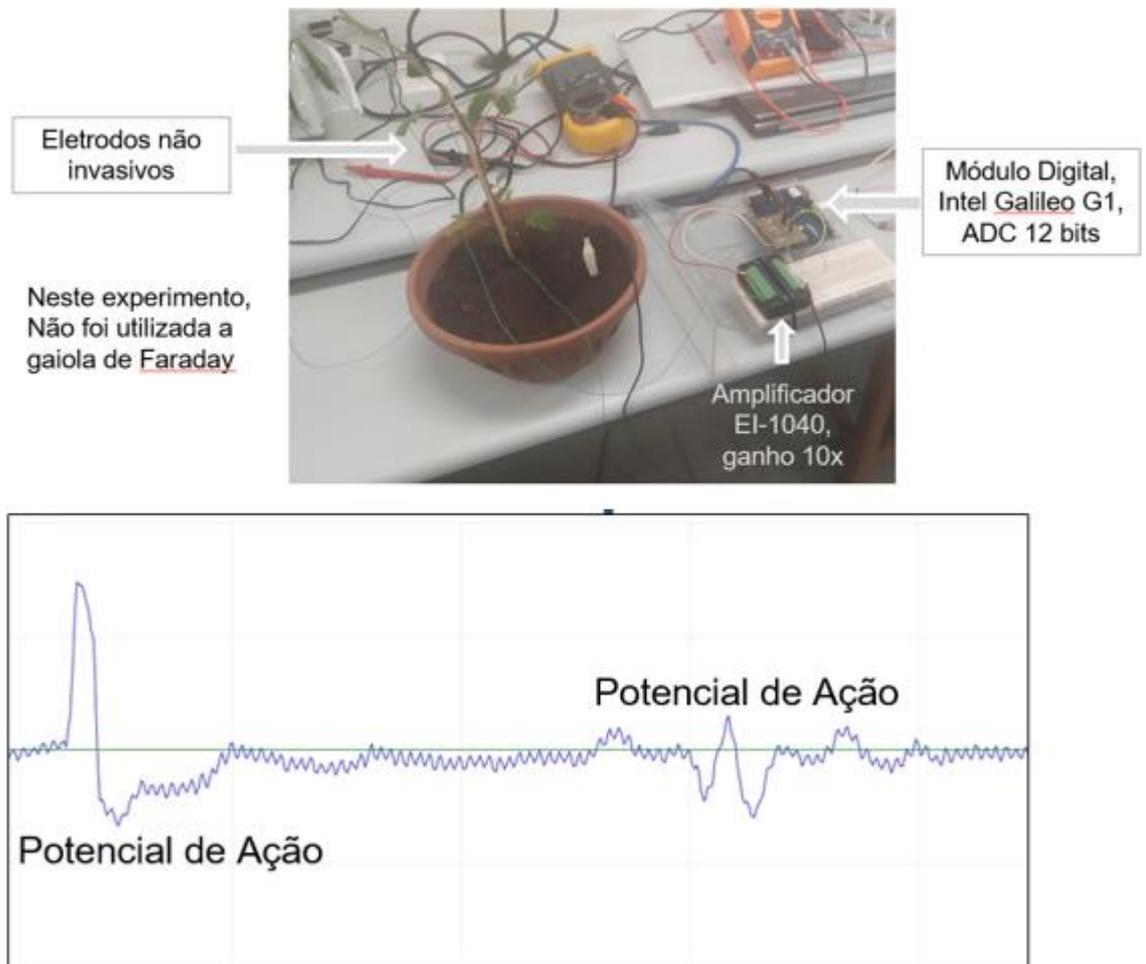
No futuro, será necessário implementar estratégias para mitigar estas interferências e garantir a coleta de dados mais confiáveis. Melhorias no isolamento elétrico dos cabos e sensores, ajustes nos parâmetros de calibração e o uso de filtros de sinais mais sofisticados poderão contribuir significativamente para aumentar a precisão e confiabilidade do sistema. Além disso, a realização de experimentos em ambientes ainda mais controlados, com proteção contra variações externas, poderá minimizar os efeitos de fatores indesejados e fornecer condições ideais para a coleta de dados.

Embora os desafios enfrentados tenham dificultado a validação completa da hipótese, o estudo revelou pontos críticos a serem aprimorados no sistema. Estes obstáculos não apenas reforçaram a relevância do controle ambiental e da qualidade dos equipamentos, mas também abriram novas perspectivas para futuras investigações. O contínuo aperfeiçoamento do sistema automatizado e das metodologias experimentais será essencial para alcançar os objetivos propostos e avançar no entendimento das respostas bioelétricas da *Mimosa pudica* em condições controladas.

4.1 Resultados preliminares

Na etapa inicial dos experimentos, foi utilizado o Intel Galileo como conversor analógico-digital (AD), com uma resolução de 12 bits. Esta escolha foi motivada pela expectativa de maior precisão na conversão de sinais analógicos. Na Figura 18, observa-se o circuito experimental, que inclui sensores instalados em um vaso com planta e o Intel Galileo configurado para coletar os dados

Figura 18: Configuração experimental utilizando o Intel Galileo como conversor analógico-digital (AD) de 12 bits

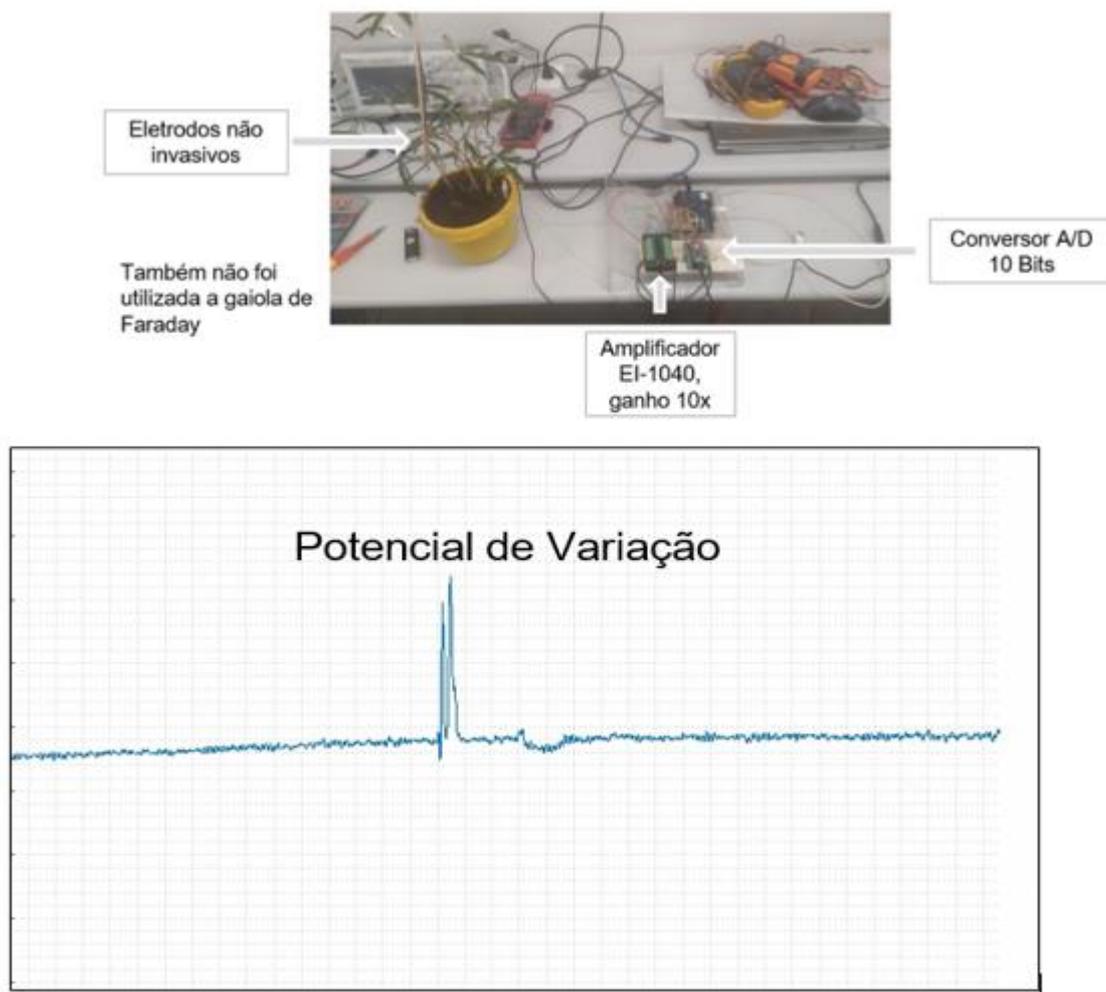


Fonte autoria própria

Os resultados do experimento mostraram limitações no desempenho do Intel Galileo. Conforme o gráfico da figura 18, o potencial de ação capturado apresentou oscilações e ruídos significativos, dificultando a interpretação dos dados. Apesar de sua alta resolução de 12 bits, a instabilidade no processamento dos sinais analógicos foi evidente, comprometendo a qualidade geral das leituras. Este comportamento foi atribuído a questões relacionadas à capacidade do hardware em lidar com variações rápidas do sinal, gerando inconsistências.

Para o segundo teste, o sistema foi reconfigurado para utilizar o Arduino Nano como conversor AD, com uma resolução de 10 bits. A configuração do circuito experimental, apresentada na Figura 19, foi semelhante à utilizada no primeiro experimento, mas desta vez empregando o Arduino Nano como interface de captura.

Figura 19: Configuração experimental utilizando o Arduino Nano como conversor analógico-digital (AD) de 10 bits



Fonte autoria própria

O desempenho do Arduino Nano superou o do Intel Galileo, como demonstrado no gráfico da figura 19. Neste caso, o potencial de variação capturado revelou-se mais estável, com uma leitura mais linear e reduzido nível de ruído. Mesmo com resolução inferior, o Arduino Nano conseguiu fornecer dados mais consistentes e adequados para análise, evidenciando maior compatibilidade com as exigências experimentais. Isso reafirma a eficácia do Arduino Nano na captura de sinais, especialmente em cenários com variações dinâmicas.

Os resultados mostraram diferenças claras entre os dois dispositivos. O Intel Galileo, apesar de possuir maior resolução (12 bits), apresentou dificuldades em processar variações rápidas, como evidenciado pelo ruído no potencial de ação do gráfico da figura 18. Por outro lado, o Arduino Nano, mesmo com resolução menor (10

bits), apresentou maior estabilidade e confiabilidade, conforme demonstrado no gráfico da figura 19.

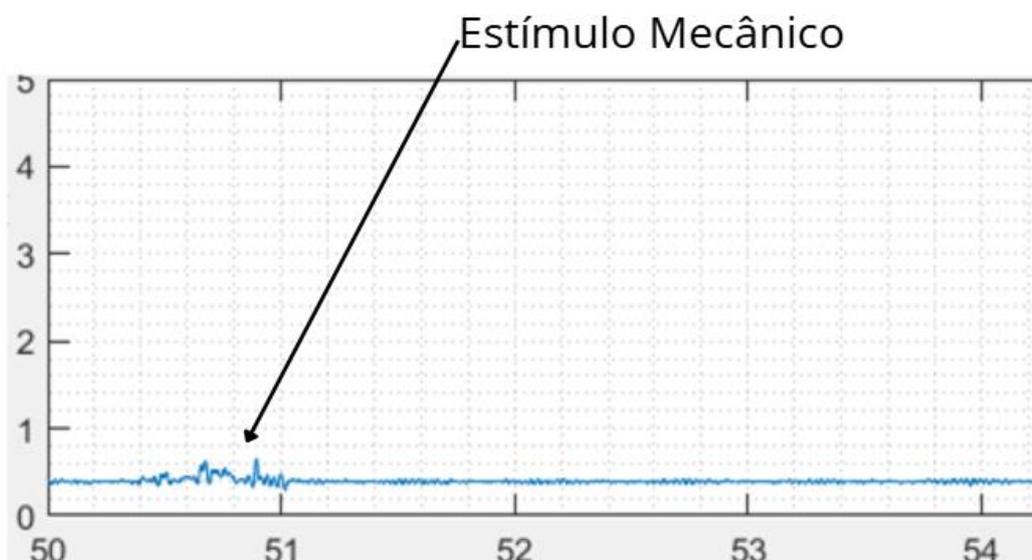
Estes experimentos serviram como base para a escolha do Arduino Nano como o conversor AD mais adequado para a construção da estrutura final do projeto. O equilíbrio entre simplicidade de integração, estabilidade nos sinais e compatibilidade geral o tornou uma opção superior.

4.2 Resultados Obtidos

Nos experimentos realizados, PAs foram analisados em plantas sob diferentes condições de luminosidade e temperatura, utilizando estímulos táteis para induzir respostas elétricas. Os sinais foram coletados em diversas condições ambientais, evidenciando como esses fatores modulam as respostas elétricas das plantas.

A Figura 20 apresenta o comportamento do sinal em condições de 815 lux (unidade de medida para luminosidade) e 25,3 °C. Observa-se um pico discreto de amplitude, indicando uma resposta da planta ao estímulo aplicado

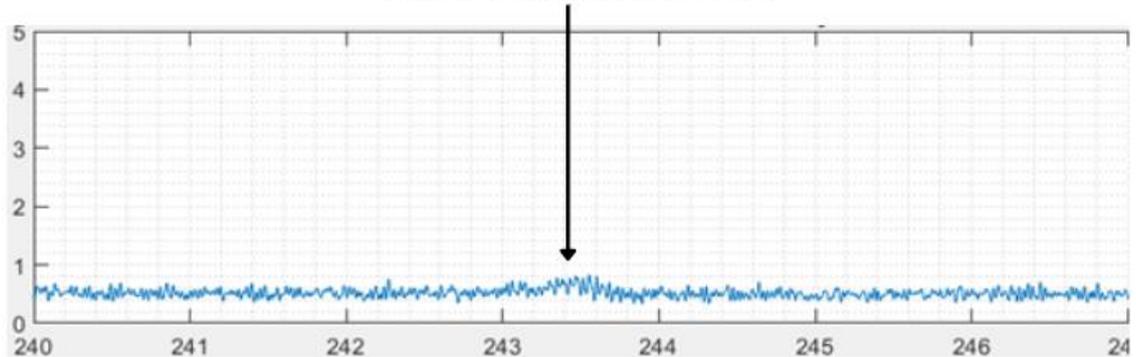
Figura 20: Gráfico representando o potencial de ação registrado em condições ambientais de 815 lux e 25,3°C



Fonte autoria própria

Em contraste, a Figura 21, coletada sob 18 lux e 25,3 °C, revelou um sinal quase ausente de variações significativas, demonstrando que baixos níveis de luminosidade reduzem drasticamente a resposta elétrica da planta.

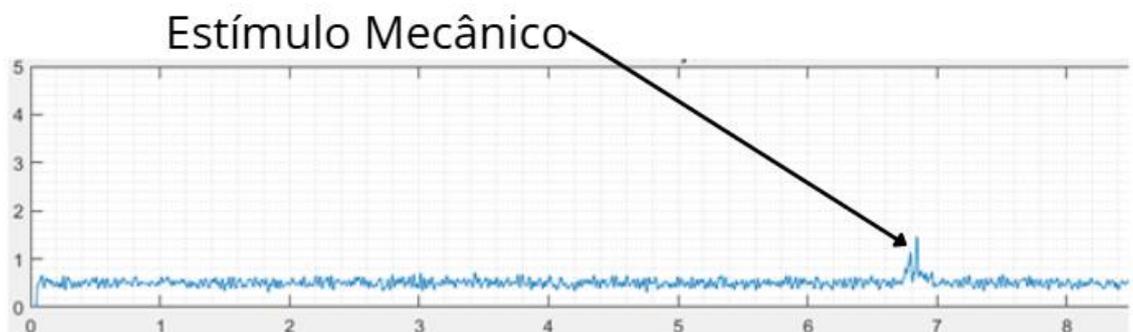
Figura 21: Gráfico representando o potencial de ação registrado em condições ambientais de 18 lux e 25,3°C



Fonte autoria própria

Além disso, na Figura 22, em condições de 780 lux e 29,8 °C, os potenciais apresentaram maior definição e amplitude, reforçando que temperaturas elevadas influenciam positivamente na intensidade dos sinais, embora apresentem um atraso para se manifestar, conforme evidenciado na literatura (Lobo *et al.*, 2023).

Figura 22: Gráfico representando o potencial de ação registrado em condições ambientais de 780 lux e 29,8°C



Fonte autoria própria

Os gráficos apresentados utilizam o eixo X para representar o tempo em segundos e o eixo Y para indicar a tensão em volts, facilitando a análise das variações nos potenciais de ação conforme os estímulos aplicados e as condições ambientais.

Os dados coletados indicam que a temperatura influencia a resposta elétrica, mas com um certo atraso, possivelmente refletindo o tempo necessário para que a planta processe a mudança ambiental e gere a resposta elétrica. Este comportamento foi descrito em experimentos com a planta *Mimosa pudica*, que demonstraram que o potencial de variação (VP) responde proporcionalmente a mudanças de temperatura, mas com um atraso associado ao ajuste interno da planta às novas condições (Lobo *et al.*, 2023).

Adicionalmente, foi avaliada a influência da umidade do solo nos potenciais elétricos. Testes específicos mostraram que, dentro da faixa funcional para as plantas, a umidade teve pouca ou nenhuma interferência nas respostas elétricas. Isso sugere que a saída elétrica das plantas é mais sensível às condições de luz e temperatura do ambiente, corroborando estudos que destacam o papel crítico desses fatores na modulação dos sinais elétricos (Silva *et al.*, 2021).

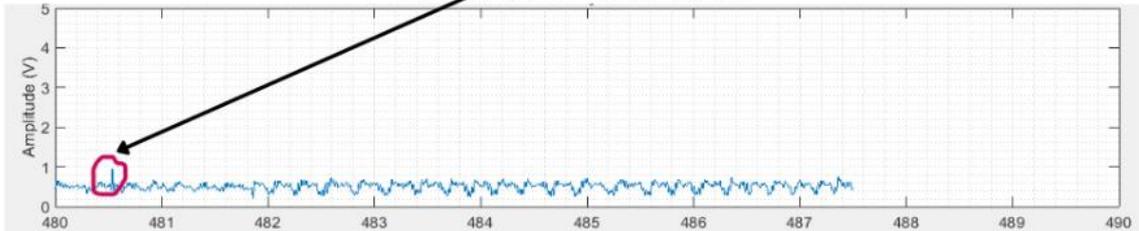
A análise também revelou desafios técnicos na interpretação dos sinais devido à presença de ruídos, como ilustrado nas imagens coletadas. Estes ruídos dificultam a identificação clara dos potenciais de ação e reforçam a necessidade de desenvolver circuitos específicos para filtrar e amplificar os sinais, proposta que será explorada no tópico 5.2 Propostas para Trabalhos Futuros.

Por fim, os resultados reforçam que os sinais elétricos das plantas são modulados de forma complexa pelas condições ambientais. A combinação de luz e temperatura demonstrou ser determinante para a qualidade dos sinais, com respostas reduzidas em baixa luz e atrasos observados em altas temperaturas. Estes achados são consistentes com a literatura que destaca a interdependência entre sinais elétricos e fatores ambientais, sugerindo que melhorias no controle experimental são essenciais para avanços futuros.

Além dos potenciais de ação, foram realizados experimentos para capturar potenciais de variação (VPs), que representam uma resposta bioelétrica mais caótica e desafiadora de interpretar. A Figura 23 mostra um VP registrado em condições de 592 lux e 27,1 °C, enquanto a Figura 24 apresenta um VP sob 602 lux e 30,2 °C. Diferentemente dos PAs, os VPs exibem um comportamento menos linear

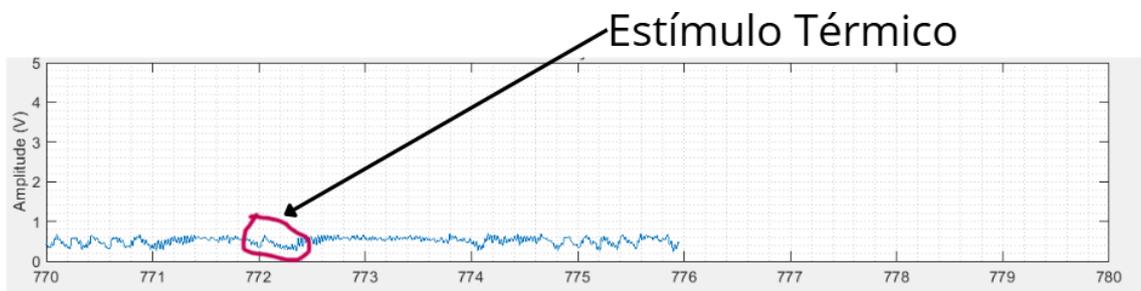
e altamente sensível a estímulos mecânicos, o que torna sua análise mais complexa

Figura 23: Gráfico representando o potencial de variação registrado em condições ambientais de 592 lux e 27.1°C
Estímulo Térmico



Fonte autoria própria

Figura 24: Gráfico representando o potencial de variação registrado em condições ambientais de 602 lux e 30.2°C



Fonte autoria própria

A captura de VPs exige cuidados adicionais, pois o estímulo necessário para induzir esses sinais pode ser invasivo e danificar os tecidos da planta. Isso não apenas dificulta a coleta de dados consistentes, mas também pode comprometer a saúde da planta em experimentos de longa duração. Esses desafios destacam a necessidade de equipamentos especializados para minimizar danos durante a medição e melhorar a qualidade dos dados obtidos.

Os resultados reforçam que os VPs, assim como os PAs, são modulados por fatores ambientais, como luminosidade e temperatura. Contudo, a captura de VPs é ainda mais sensível a variações nos estímulos aplicados e apresenta maior suscetibilidade a interferências externas. Estes desafios apontam para a

necessidade de circuitos específicos, que serão discutidos no tópico 5.2 Propostas para Trabalhos Futuros, a fim de aprimorar a sensibilidade e filtragem de sinais para análise mais robusta.

4.3 Potencial Elétrico em Tomateiros

Após a análise dos resultados obtidos com potenciais de ação (PAs) em *Mimosa pudica* sob diferentes variáveis ambientais, este tópico aborda os potenciais de ação espontâneos (SAPs) registrados em tomateiros, destacando a influência de fatores como luminosidade e temperatura. Os SAPs são potenciais gerados espontaneamente pelas plantas em resposta a mudanças no ambiente ou a variações internas, como o ritmo circadiano. Eles desempenham um papel essencial na regulação de processos fisiológicos e na adaptação das plantas às condições ambientais.

A Figura 25 apresenta o tomateiro utilizado nos experimentos. Durante as medições, as condições ambientais incluíram uma intensidade luminosa de 363 lux, temperatura de 35,2 °C, umidade relativa do ar de 30% e umidade do solo de 43%. Estes parâmetros foram fundamentais para avaliar as respostas do tomateiro em termos de sinais elétricos, com foco na variação entre a luz acesa e apagada como estímulos principais.

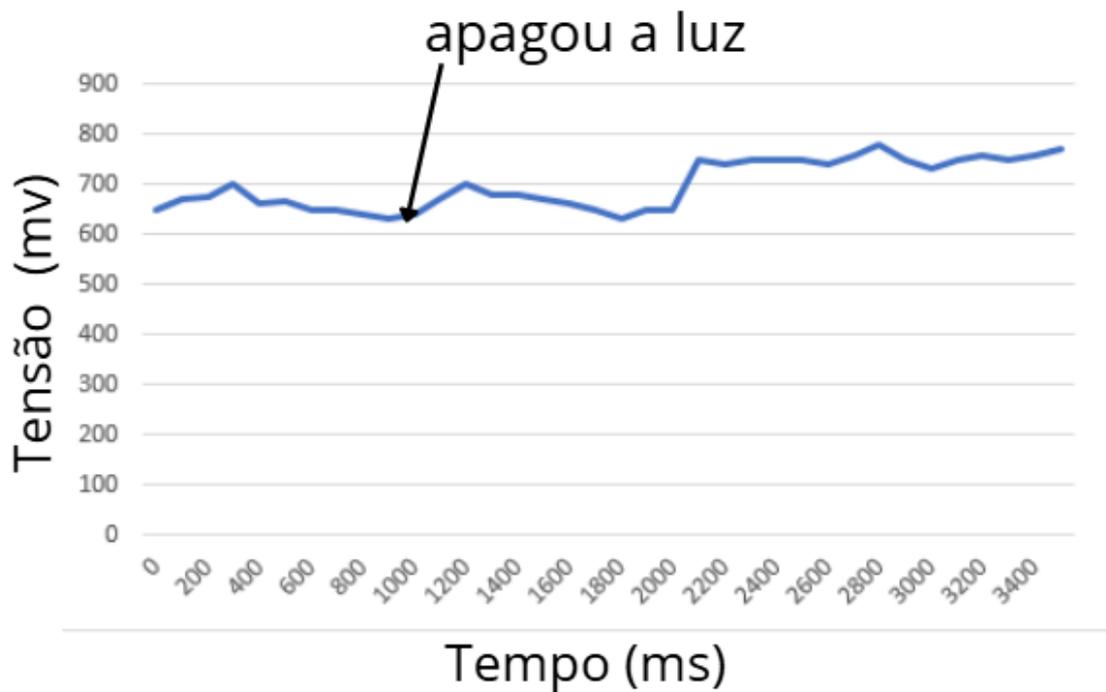
Figura 25: Tomateiro utilizado nos experimentos para medições de SAPs



Fonte autoria própria

A Figura 26 mostra os resultados obtidos durante o experimento. O gráfico indica as variações do potencial elétrico da planta ao longo do tempo, destacando o impacto do estímulo de apagar a luz, que causou uma redução temporária no potencial elétrico, seguido por um aumento gradual na tensão registrada. Esses resultados corroboram estudos prévios que apontam que mudanças na luz são capazes de desencadear respostas elétricas significativas em tomateiros (Macedo *et al.*, 2015).

Figura 26: Gráfico representando a variação do potencial elétrico espontâneo no tomateiro



Fonte autoria própria

Este experimento demonstra a sensibilidade dos tomateiros às condições ambientais e reforça o papel crucial dos SAPs na adaptação da planta às mudanças no ambiente, especialmente sob condições controladas de luz e temperatura (Silva *et al.*, 2021).

5 CONCLUSÃO

5.1 Considerações Finais

O desenvolvimento da estufa automatizada e da metodologia para monitorar a *Mimosa pudica* sob diferentes condições ambientais demonstrou ser uma abordagem inovadora e promissora no estudo das respostas das plantas às variações do ambiente. A integração do controle preciso de variáveis como temperatura, luminosidade e umidade do solo com a coleta de dados em tempo real proporcionou avanços significativos na análise dos processos adaptativos das plantas.

Este trabalho se destacou por sua abordagem original, ao combinar tecnologias acessíveis, como sensores de precisão e microcontroladores, para criar um sistema robusto de monitoramento e controle ambiental. A possibilidade de coletar dados em tempo real ampliou as possibilidades de análise, enquanto o uso de materiais reciclados na construção da estufa reforçou o compromisso com a sustentabilidade, promovendo práticas ambientalmente responsáveis.

Embora o projeto tenha apresentado resultados positivos, enfrentou desafios relacionados à interferência de ruídos nos dados coletados, causados por fatores como variações ambientais inesperadas ou limitações no isolamento dos sensores. Estes desafios destacam a necessidade de melhorias no sistema, especialmente no processo de aquisição de dados e na filtragem de ruídos, visando uma maior estabilidade e precisão nas medições futuras.

Em conclusão, este estudo contribuiu de forma significativa para o entendimento das interações planta-ambiente, abrindo novas perspectivas para aplicações práticas em áreas como monitoramento ambiental, biotecnologia e agricultura de precisão. Os resultados obtidos e as soluções implementadas neste trabalho fornecem uma base sólida para futuras investigações, com potencial de expansão para estudos mais abrangentes e diversificados.

5.2 Propostas para Trabalhos Futuros

Apesar dos resultados promissores obtidos com o sistema de estufa automatizada, diversos aspectos podem ser aprimorados para otimizar os experimentos e superar as limitações observadas. Uma das principais dificuldades enfrentadas foi a coleta de sinais bioelétricos, como os potenciais de ação (PA) e potenciais de variação (PV), frequentemente comprometidos pela presença de ruídos provenientes de fontes externas não controladas. Essa interferência afetou a precisão e a confiabilidade dos dados obtidos, especialmente em experimentos que dependiam de medições consistentes.

Para enfrentar essas limitações, é essencial o desenvolvimento de um circuito eletrônico especializado para a aquisição de sinais de PA e PV. Este circuito deve atender a requisitos como baixo custo, tamanho reduzido, alta acurácia e baixo consumo de energia, de modo a possibilitar o uso eficiente de técnicas como o Energy Harvesting. A ausência de um circuito específico no sistema atual, que se baseia em amplificadores genéricos e sensores convencionais, resultou em dados com interferências significativas, dificultando a reprodutibilidade dos experimentos e exigindo ajustes constantes durante a aquisição de dados.

Uma hipótese para solucionar essa limitação é avaliar a substituição de componentes eletrônicos por alternativas mais modernas, utilizando simulações e prototipagem para otimizar a funcionalidade e eficiência do sistema. Além disso, o projeto de placas de circuito impresso mais eficazes pode reduzir interferências externas e aumentar a sensibilidade para a captura de sinais bioelétricos.

Outra proposta importante para trabalhos futuros é a integração desse circuito especializado com o sistema automatizado de controle e monitoramento ambiental já existente. Essa integração permitirá a correlação direta entre variáveis ambientais, como luminosidade, temperatura e umidade do solo, com os sinais bioelétricos das plantas. Com isso, será possível realizar uma análise mais robusta e detalhada das interações entre os estímulos ambientais e as respostas fisiológicas das plantas, garantindo maior precisão nos dados coletados.

Esses aprimoramentos tecnológicos são cruciais para validar as hipóteses iniciais deste trabalho. A criação de um circuito especializado, integrado a sistemas automatizados, aumentará a confiabilidade das medições e expandirá o potencial do sistema para aplicações mais avançadas em estudos sobre potenciais elétricos em

plantas, biotecnologia e agricultura de precisão. Isso fortalecerá as contribuições do trabalho, tanto para a ciência quanto para suas aplicações práticas, promovendo avanços sustentáveis no monitoramento e na interação homem-planta.

REFERÊNCIAS

BACKYARD BRAINS. ***The Amazing Electrical Properties of Plants: Hands-On Experiments with Mimosa pudica***. [s.l.]: Backyard Brains, 2024. Disponível em: https://backyardbrains.com/experiments/Plants_SensitiveMimosaPudica. Acesso em: 27 set. 2024.

Chatterjee, S. K. ***An Approach Towards Plant Electrical Signal Based External Stimuli Monitoring System***. (Doctoral dissertation, University of Southampton), 2017.

FROMM, Jörg & LAUTNER, Silke. ***Electrical signals and their physiological significance in plants***. München, Germany: Blackwell Publishing Ltd, 2006.

Hagihara, Takuma and Toyota, Masatsugu. ***Mechanical Signaling in the Sensitive Plant Mimosa pudica L.*** Japan and Madison: *Plants*, 2020.

Lobo, Marta A. *et al.* ***Electrical sensing of the plant Mimosa pudica under ambient temperatures***. Porto e Coimbra, Portugal: IEEE, 2023.

Macedo, F. C. O *et al.* ***Action potentials in abscisic acid-deficient tomato mutant generated spontaneously and evoked by electrical stimulation***. University of São Paulo, Piracicaba, 2015.

Mancuso, Stefano & Marras, Anna Maria. ***New solid state microsensors in plant physiology***. Sesto Fiorentino (FI), Italy: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

Sareen, Harpreet. ***Cyborg Botany: Augmented Plants as Sensors, Displays and Actuators***. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2017.

Silva, Fábila Barbosa *et al.* ***Multivariate characterization of spontaneously generated electrical signals evoked by electrical stimulation in abscisic acid mutant tomato plants.*** Erechim, RS: Federal University of Fronteira Sul (UFFS), 2021.

Song, X. D. *et al.* ***Application of biochar from sewage sludge to plant cultivation: Influence of pyrolysis temperature and biochar-to-soil ratio on yield and heavy metal accumulation.*** Shanghai, China: Elsevier, 2014.

Tamás, Visnovitz *et al.* ***Mechanoreceptor Cells on the Tertiary Pulvini of Mimosa pudica L.*** Budapest, Hungary: Landes Bioscience, 2007.

Volkov, Alexander G. ***Mechanisms of multielectron reactions at the plasma/water interface: Interfacial catalysis, RONS, nitrogen fixation, and plasma activated water.*** Huntsville, United States: Elsevier Ltd, 2021.

Volkov, Alexander G. ***Plant Electrophysiology: Theory and Methods.*** 1 ed. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

Wang, Zhong-Yi *et al.* ***Plant Electrical Signal Monitoring System in Greenhouse and its Applications.*** Pequim, China: Elsevier Ltd, 2009.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CÓDIGO ARDUINO

```
#include <DHT.h>

#define LDR_PIN A0
#define HIGROMETRO_PIN A5
#define DHT_PIN 8
#define DHT_TYPE DHT11

#define LAMP_PIN 7
#define COOLER_PIN 6
#define PUMP_PIN 5
#define FAN_PIN 4

DHT dht(DHT_PIN, DHT_TYPE);

bool automaticMode = false;
bool lampState = false;
bool coolerState = false;
bool pumpState = false;
bool fanState = false;

const int tempThreshold = 30;
const int tempHysteresis = 2;
const int soilHumidityThreshold = 40;
const int ldrThreshold = 600;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  dht.begin(); // Inicializa o sensor DHT11
```

```

pinMode(LAMP_PIN, OUTPUT);
pinMode(COOLER_PIN, OUTPUT);
pinMode(PUMP_PIN, OUTPUT);
pinMode(FAN_PIN, OUTPUT);

Serial.println("Sistema iniciado. Aguardando leituras...");
}

void loop() {
  // Teste sensor LDR
  int ldrValue = analogRead(LDR_PIN);
  Serial.print("Valor LDR: ");
  Serial.println(ldrValue);

  // Teste sensor Higrometro
  int soilHumidity = analogRead(HIGROMETRO_PIN);
  soilHumidity = map(soilHumidity, 0, 1023, 100, 0); // Mapeia o valor para o
intervalo de 100 a 0
  Serial.print("Umidade do solo: ");
  Serial.println(soilHumidity);

  // Teste sensor DHT11
  float airHumidity = dht.readHumidity();
  float temperature = dht.readTemperature();

  if (isnan(airHumidity) || isnan(temperature)) {
    Serial.println("Falha ao ler o sensor DHT11");
  } else {
    Serial.print("Temperatura: ");
    Serial.println(temperature);
    Serial.print("Umidade do ar: ");
    Serial.println(airHumidity);
  }
}

```

```

// Lógica do modo automático, se ativado
if (automaticMode) {
    // Lógica para a lâmpada: ligada à noite (baixa luz), desligada durante o dia
    (luz suficiente)
    if (ldrValue < ldrThreshold) {
        lampState = true; // Liga a lâmpada quando a luz é baixa
    } else {
        lampState = false; // Desliga a lâmpada durante o dia
    }

    // Lógica para o cooler com histerese
    if (temperature > tempThreshold) {
        coolerState = true;
    } else if (temperature < tempThreshold - tempHysteresis) {
        coolerState = false;
    }

    // Lógica para a bomba de água
    if (soilHumidity < soilHumidityThreshold) {
        pumpState = true;
        digitalWrite(PUMP_PIN, HIGH);
        delay(2000); // Liga a bomba por 2 segundos
        pumpState = false;
        digitalWrite(PUMP_PIN, LOW);
    }

    // Lógica para o ventilador
    if (temperature > tempThreshold + 5) { // Se a temperatura ultrapassar um
limite superior
        fanState = true;
    } else {
        fanState = false;
    }
}

```

```

}

// Atualiza os pinos dos atuadores
digitalWrite(LAMP_PIN, lampState ? HIGH : LOW);
digitalWrite(COOLER_PIN, coolerState ? HIGH : LOW);
digitalWrite(PUMP_PIN, pumpState ? HIGH : LOW);
digitalWrite(FAN_PIN, fanState ? HIGH : LOW);

// Envia dados para o Serial Monitor
Serial.print("LAMPADA: ");
Serial.print(lampState ? "ON" : "OFF");
Serial.print(", COOLER: ");
Serial.print(coolerState ? "ON" : "OFF");
Serial.print(", FAN: ");
Serial.print(fanState ? "ON" : "OFF");
Serial.print(", BOMBA: ");
Serial.println(pumpState ? "ON" : "OFF");

delay(2000); // Aguarda 2 segundos para a próxima leitura
}

```

Este apêndice apresenta o código desenvolvido para implementar um sistema automatizado de monitoramento e controle de variáveis ambientais. O objetivo principal do código é processar dados coletados de sensores e ajustar automaticamente o comportamento dos atuadores com base em parâmetros predefinidos, assegurando o funcionamento eficiente do sistema.

Descrição Geral do Código

O código foi estruturado para executar as seguintes etapas:

Configuração Inicial:

Definição dos limites para as variáveis monitoradas, como temperatura, umidade e luminosidade.

Configuração dos pinos de entrada e saída para comunicação com os dispositivos externos.

Inicialização dos componentes e envio de mensagens iniciais ao monitor serial.

Processamento dos Dados:

O código realiza leituras contínuas de variáveis ambientais e aplica cálculos ou mapeamentos necessários para interpretar os dados em uma escala apropriada.

A lógica condicional avalia os valores lidos em comparação com os limites estabelecidos e determina as ações necessárias, como ativação ou desativação de atuadores.

Aspectos Técnicos Relevantes

Histerese: Implementada para evitar oscilações frequentes no acionamento de atuadores, proporcionando maior estabilidade ao sistema.

Automação Inteligente: A lógica de controle permite decisões automatizadas com base nas condições do ambiente monitorado, eliminando a necessidade de intervenções manuais constantes.

Feedback ao Usuário: A exibição periódica dos dados e do status dos atuadores no monitor serial contribui para maior transparência e controle do sistema.

Este código exemplifica a aplicação prática de algoritmos computacionais em sistemas de controle automatizado, com destaque para sua capacidade de integração e adaptação a diferentes cenários.

APÊNDICE B – CÓDIGO PYTHON

```
from flask import Flask, jsonify, render_template, request
import serial
import threading

app = Flask(__name__)

# Configuração da porta serial
ser = None
modo_automatgico = False # Estado do modo automático

# Dados iniciais
data = {
    "ldr": 0,
    "humidity_soil": 0,
    "temperature": 0,
    "humidity_dht": 0,
    "lamp": "Desligado",
    "cooler": "Desligado",
    "pump": "Desligado",
    "modo_automatgico": False
}

def init_serial():
    global ser
    try:
        ser = serial.Serial('/dev/ttyACM0', 9600) # Porta serial do Arduino
        print("Porta serial aberta com sucesso!")
    except serial.SerialException as e:
        print(f"Erro ao abrir a porta serial: {e}")
        ser = None

def read_from_serial():
    if ser:
        while True:
```

```
try:
    if ser.in_waiting > 0:
        line = ser.readline().decode('utf-8').strip()
        process_serial_data(line)
except Exception as e:
    print(f"Erro ao ler da porta serial: {e}")
```

```
def process_serial_data(line):
```

```
    try:
        parts = line.split(", ")
        for part in parts:
            if "LDR: " in part:
                data["ldr"] = int(part.split(": ")[1])
            elif "SOIL Humidity: " in part:
                data["humidity_soil"] = float(part.split(": ")[1])
            elif "Temp: " in part:
                data["temperature"] = float(part.split(": ")[1])
            elif "DHT Humidity: " in part:
                data["humidity_dht"] = float(part.split(": ")[1])
            elif "Lamp: " in part:
                data["lamp"] = part.split(": ")[1]
            elif "Cooler: " in part:
                data["cooler"] = part.split(": ")[1]
            elif "Pump: " in part:
                data["pump"] = part.split(": ")[1]
            elif "Modo Automático: " in part:
                data["modo_automatgico"] = part.split(": ")[1] == "Ativo"
    except Exception as e:
        print(f"Erro ao processar dados da serial: {e}")
```

```
def enviar_comando_serial(comando):
```

```
    if ser:
        try:
            ser.write(f"{comando}\n".encode())
            print(f"Enviado: {comando}")
        except Exception as e:
```

```

        print(f"Erro ao enviar comando: {e}")

@app.route('/toggle_auto_mode', methods=['POST'])
def toggle_auto_mode():
    global modo_automatgico
    modo_automatgico = not modo_automatgico
    data["modo_automatgico"] = modo_automatgico
    enviar_comando_serial("ATIVAR_AUTOMATICO" if modo_automatgico else
"DESATIVAR_AUTOMATICO")
    return jsonify(data)

@app.route('/control', methods=['POST'])
def control_actuator():
    if modo_automatgico:
        return jsonify({"error": "Modo automático ativado. Desative para controle
manual."}), 403

    actuator = request.json.get("actuator")
    action = request.json.get("action")

    if actuator == "lamp":
        data["lamp"] = "Ligado" if action == "on" else "Desligado"
        enviar_comando_serial("LIGAR_LAMPADA" if action == "on" else
"DESLIGAR_LAMPADA")
    elif actuator == "cooler":
        data["cooler"] = "Ligado" if action == "on" else "Desligado"
        enviar_comando_serial("LIGAR_COOLER" if action == "on" else
"DESLIGAR_COOLER")
    elif actuator == "pump" and action == "on":
        data["pump"] = "Ligado"
        enviar_comando_serial("LIGAR_BOMBA")
        threading.Timer(2, desligar_bomba).start()

    return jsonify(data)

@app.route('/data', methods=['GET'])
def get_data():

```

```

    return jsonify(data)

def desligar_bomba():
    data["pump"] = "Desligado"
    enviar_comando_serial("DESLIGAR_BOMBA")

@app.route('/')
def index():
    return render_template('index.html', data=data)

if __name__ == '__main__':
    init_serial()
    if ser:
        threading.Thread(target=read_from_serial, daemon=True).start()
    app.run(host='0.0.0.0')

```

Este código Python foi desenvolvido para criar uma interface entre um microcontrolador Arduino e um servidor web, utilizando o framework Flask para gerenciamento das rotas e a biblioteca serial para comunicação via porta serial. A principal funcionalidade do código é receber dados gerados pelo Arduino e processá-los, além de possibilitar o envio de comandos de controle para dispositivos conectados.

O programa funciona como uma aplicação web que gerencia um sistema automatizado. Ele realiza a comunicação com o Arduino para monitorar variáveis ambientais e controlar dispositivos. O código pode operar tanto no modo automático, onde as decisões são tomadas com base nos dados recebidos do Arduino, quanto no modo manual, possibilitando ao usuário ativar ou desativar os dispositivos manualmente.

Funcionamento:

O código lê continuamente dados enviados pelo Arduino através da porta serial, processa essas informações e as organiza em um dicionário Python chamado data.

Os dados recebidos incluem informações sobre luminosidade (LDR), umidade do solo, temperatura, umidade do ar (DHT), e o estado atual de dispositivos como lâmpada, cooler e bomba de água.

Os dados processados são armazenados no dicionário `data` e exibidos no navegador por meio de uma interface web, criada com o uso do Flask e do arquivo `index.html`.

No modo manual, o servidor aceita comandos HTTP para ligar ou desligar os dispositivos conectados ao Arduino, como lâmpada, cooler e bomba de água.

No modo automático, as decisões sobre o estado dos dispositivos são tomadas com base nos dados recebidos do Arduino, sem intervenção do usuário.

Os comandos para controlar os dispositivos são enviados ao Arduino pela porta serial, no formato esperado pelo microcontrolador.

O código é projetado para receber dados gerados pelo programa em execução no Arduino, o qual envia leituras de sensores e estados dos dispositivos. Estes dados são analisados no servidor Python e apresentados ao usuário ou utilizados para tomar decisões automáticas.

APÊNDICE C – CÓDIGO WEB

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="pt-BR">
<head>
  <meta charset="UTF-8">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
  <title>Estufa Automática com Estímulos Controlados</title>
  <link
                                rel="stylesheet"
href="https://stackpath.bootstrapcdn.com/bootstrap/4.3.1/css/bootstrap.min.css">
  <style>
    #status-image {
      max-width: 500px;
      width: 100%;
      height: auto;
      display: block;
      margin: 0 auto 20px;
    }
    .disabled-button {
      background-color: #cccccc;
      color: #666666;
      cursor: not-allowed;
    }
  </style>
</head>
<body>
  <div class="container text-center">
    <h1 class="my-4">Estufa Automática com Estímulos Controlados</h1>
    

    <div class="row">
```

```

<!-- Coluna dos Sensores -->
<div class="col-md-6">
  <h3>Sensores</h3>
  <table class="table table-bordered">
    <tr><th>LDR:</th><td id="ldr-value">Carregando...</td></tr>
    <tr><th>Temperatura:</th><td id="temperature-
value">Carregando...</td></tr>
    <tr><th>Humidade do Ar:</th><td id="humidity-dht-
value">Carregando...</td></tr>
    <tr><th>Humidade do Solo:</th><td id="humidity-soil-
value">Carregando...</td></tr>
  </table>
</div>

<!-- Coluna dos Atuadores -->
<div class="col-md-6">
  <h3>Atuadores</h3>
  <table class="table table-bordered">
    <tr><th>Lâmpada:</th><td id="lamp-status">Desligado</td></tr>
    <tr><th>Cooler:</th><td id="cooler-status">Desligado</td></tr>
    <tr><th>Bomba:</th><td id="pump-status">Desligado</td></tr>
  </table>
</div>
</div>

  <button id="auto-mode-button" class="btn btn-warning my-4"
onclick="toggleAutomaticMode()">Ativar Modo Automático</button>

<div class="row mt-4">
  <div class="col">
    <button class="btn btn-primary control-button"
onclick="toggleActuator('lamp', 'on')">Ligar Lâmpada</button>
    <button class="btn btn-secondary control-button"
onclick="toggleActuator('lamp', 'off')">Desligar Lâmpada</button>

```

```

        </div>
        <div class="col">
            <button class="btn btn-primary control-button"
onclick="toggleActuator('cooler', 'on')">Ligar Cooler</button>
            <button class="btn btn-secondary control-button"
onclick="toggleActuator('cooler', 'off')">Desligar Cooler</button>
        </div>
        <div class="col">
            <button class="btn btn-primary control-button"
onclick="toggleActuator('pump', 'on')">Ligar Bomba</button>
        </div>
    </div>
</div>

<script>
function fetchData() {
    fetch('/data')
        .then(response => response.json())
        .then(data => {
            document.getElementById('ldr-value').innerText = data.ldr + " lux";
            document.getElementById('temperature-value').innerText =
data.temperature + " °C";
            document.getElementById('humidity-dht-value').innerText =
data.humidity_dht + " %";
            document.getElementById('humidity-soil-value').innerText =
data.humidity_soil + " %";
            document.getElementById('lamp-status').innerText = data.lamp;
            document.getElementById('cooler-status').innerText = data.cooler;
            document.getElementById('pump-status').innerText = data.pump;
            updateStatusImage(data.lamp, data.cooler, data.pump);
            toggleControlButtons(data.modos_automatizados);
        })
        .catch(error => console.error('Erro ao buscar dados:', error));
}

```

```

function toggleActuator(actuator, action) {
  fetch('/control', {
    method: 'POST',
    headers: { 'Content-Type': 'application/json' },
    body: JSON.stringify({ actuator, action })
  })
  .then(response => response.json())
  .then(data => {
    fetchData(); // Atualiza o estado dos atuadores
  })
  .catch(error => console.error('Erro ao controlar atuador:', error));
}

```

```

function toggleAutomaticMode() {
  fetch('/toggle_auto_mode', {
    method: 'POST',
  })
  .then(response => response.json())
  .then(data => {
    document.getElementById('auto-mode-button').innerText =
data.modos_automatizado ? "Desativar Modo Automático" : "Ativar Modo Automático";
    toggleControlButtons(data.modos_automatizado);
  })
  .catch(error => console.error('Erro ao alternar modo automático:', error));
}

```

```

function toggleControlButtons(isAutomatic) {
  const buttons = document.querySelectorAll('.control-button');
  buttons.forEach(button => {
    button.disabled = isAutomatic;
    button.classList.toggle('disabled-button', isAutomatic);
  });
}

```

```

function updateStatusImage(lamp, cooler, pump) {
let imageNumber = 8; // Supondo que 8 representa todos desligados

if (lamp === "Ligado" && cooler === "Ligado" && pump === "Ligado") {
    imageNumber = 1; // Todos ativos
} else if (lamp === "Ligado" && cooler === "Ligado") {
    imageNumber = 2; // Apenas lâmpada e cooler ativos
} else if (lamp === "Ligado" && pump === "Ligado") {
    imageNumber = 3; // Apenas lâmpada e bomba ativos
} else if (cooler === "Ligado" && pump === "Ligado") {
    imageNumber = 5; // Apenas cooler e bomba ativos
} else if (lamp === "Ligado") {
    imageNumber = 4; // Apenas lâmpada ativa
} else if (cooler === "Ligado") {
    imageNumber = 6; // Apenas cooler ativo
} else if (pump === "Ligado") {
    imageNumber = 7; // Apenas bomba ativa
}

    document.getElementById('status-image').src =
`/static/${imageNumber}.png`;
}

    setInterval(fetchData, 2000);
    fetchData();
</script>
</body>
</html>

```

Este código HTML cria uma interface web para monitorar e controlar uma estufa automatizada. A página utiliza o framework Bootstrap para estilização, oferecendo uma apresentação responsiva e intuitiva. A interface exibe dados provenientes de sensores conectados a um sistema Arduino, como luminosidade (LDR), temperatura,

umidade do ar e umidade do solo. Além disso, apresenta o estado atual de atuadores, como lâmpada, cooler e bomba de água, possibilitando que o usuário visualize as condições em tempo real.

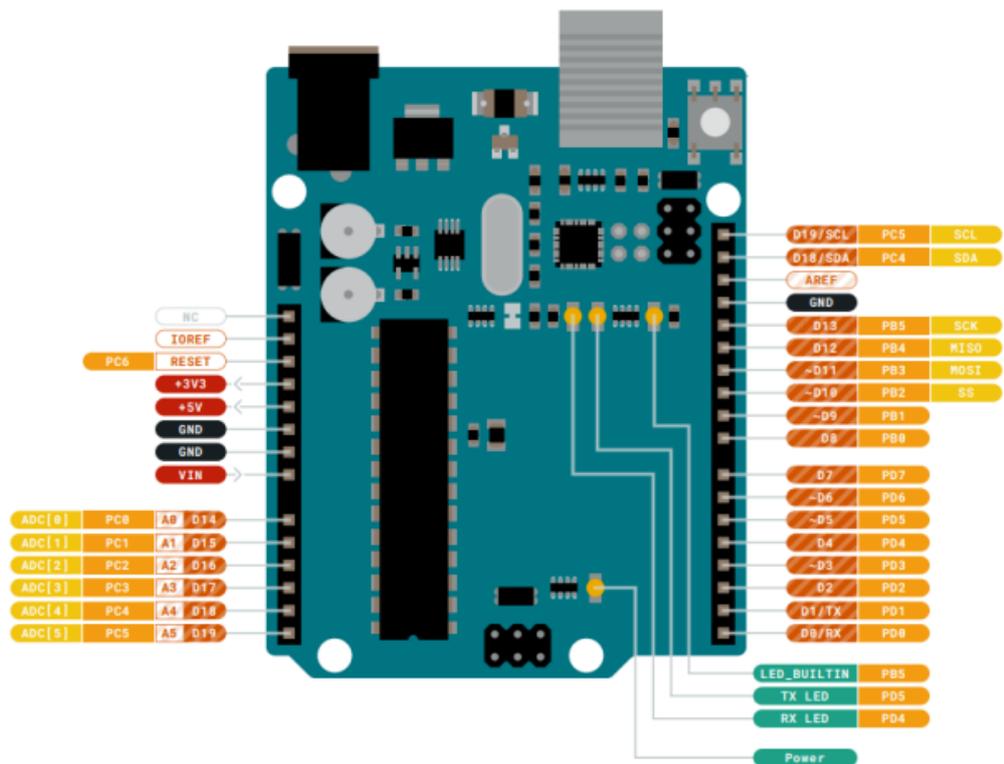
A interface possui botões que permitem ao usuário alternar entre o modo automático e o manual, bem como controlar os atuadores diretamente no modo manual. O modo automático desativa os botões de controle manual para evitar conflitos. Por trás da interface, um script JavaScript utiliza a API Fetch para se comunicar com um servidor Flask, enviando comandos e recebendo atualizações de estado periodicamente.

Uma funcionalidade adicional do código é a atualização dinâmica da imagem de status dos atuadores, que reflete a combinação de dispositivos ligados no momento. A página se atualiza automaticamente a cada dois segundos, garantindo que os dados exibidos sejam sempre recentes. Essa interface é uma peça essencial do sistema, conectando o usuário às funcionalidades da estufa automatizada de forma clara e eficiente.

ANEXOS

ANEXO A – Datasheets

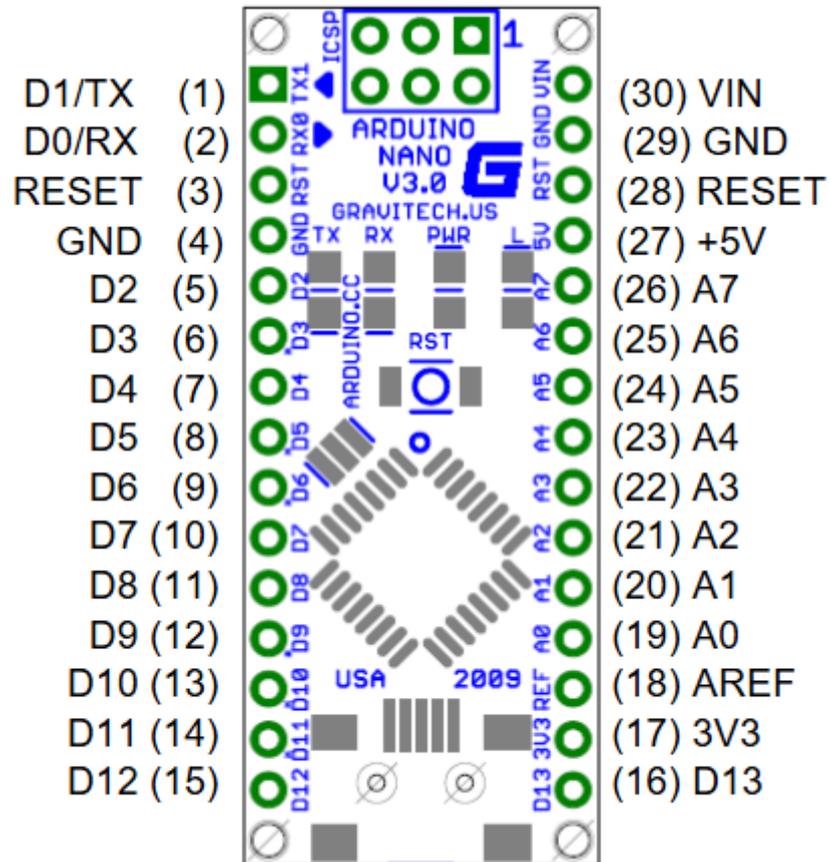
Anexo 1: DATASHEET ARDUINO UNO R3



Fonte Arduino Documentation. Disponível em:

<https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoUno>

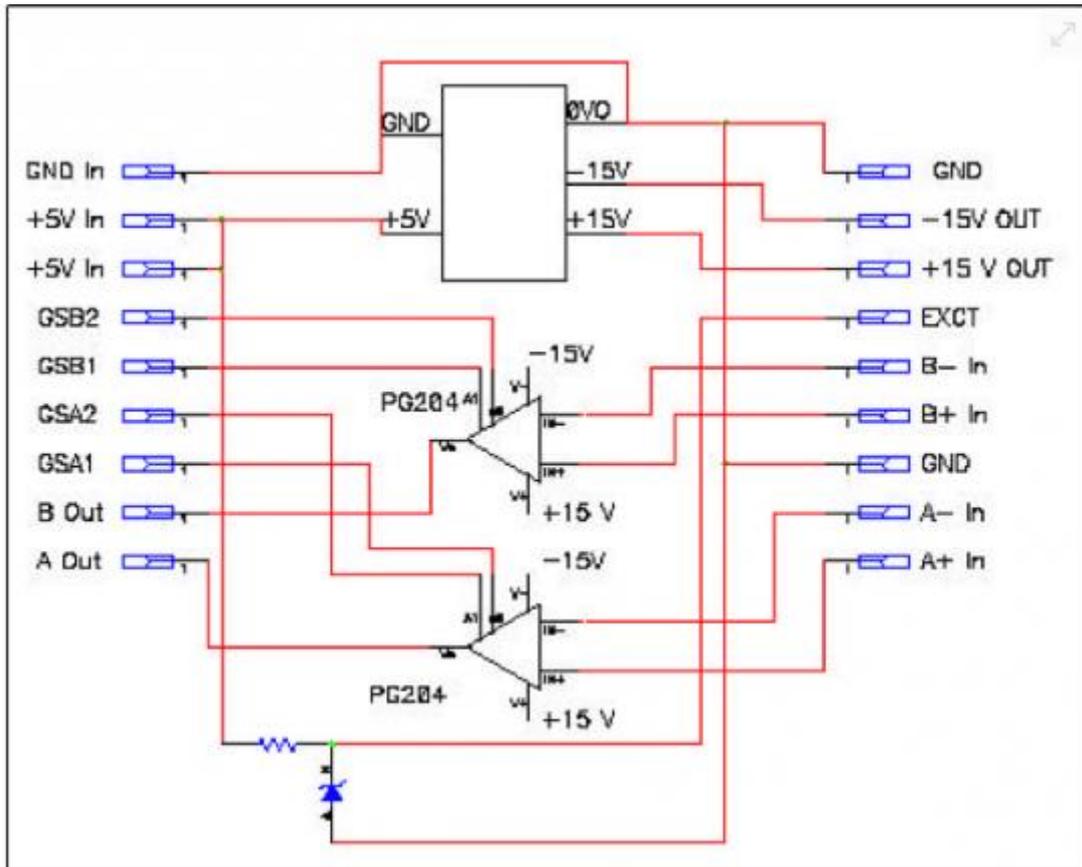
Anexo 2: DATASHEET ARDUINO NANO



Fonte ALLDATASHEET.COM Disponível em:

<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1943445/ARDUINO/ARDUINO-UNO.html>

Anexo 3: DATASHEET AMPLIFICADOR EI-1040



Fonte LABJACK Disponível em: <https://support.labjack.com/docs/ei-1040-datasheet>

RESOLUÇÃO nº 038/2020 – CEPE

ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O(A) estudante João Marcos Alves Ulisses Moreira
do Curso de Engenharia de Computação, matrícula 20201003300846
telefone: (62) 99245-4104 e-mail 20201003300846@pucgoias.edu.br,
na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei
dos Direitos do Autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás)
a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado
Desempenhamento de uma tarefa para estudos de potencial de ação e potencial de
revisão em plantas gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos,
conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de
computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som
(WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWW, AVI, QT); outros, específicos da
área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção
científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 17 de dezembro de 2024.

Assinatura do autor: João Marcos Alves Ulisses Moreira

Nome completo do autor: João Marcos Alves Ulisses Moreira

Assinatura do professor-orientador: Talles Manoel Gonçalves de Andrade Botelho

Nome completo do professor-orientador: Talles Manoel Gonçalves de Andrade Botelho