

**UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS DE ERECHIM
ÁREA DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

EDUARDO SACHET SBARDELOTO

**DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR PORTÁTIL DE UMIDADE DE GRÃOS
DE SOJA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ERECHIM - RS
2024**

EDUARDO SACHET SBARDELOTO

**DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR PORTÁTIL DE UMIDADE DE GRÃOS
DE SOJA**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica, Área de
Engenharias e Ciência da Computação da
Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.**

Orientador: Prof. Dr. Cássio Luciano Baratieri

**ERECHIM - RS
2024**

EDUARDO SACHET SBARDELOTO

**DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR PORTÁTIL DE UMIDADE DE GRÃOS
DE SOJA**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica, Área de
Engenharias e Ciência da Computação da
Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.**

Erechim, 09 de dezembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cássio Luciano Baratieri (Orientador)
URI Erechim

Prof. Me. Deividi Felipe Zaions (Examinador)
URI Erechim

Prof. Me. Claudio Augusto Zakrzewski (Examinador)
URI Erechim

RESUMO

A soja é cultivada no Brasil há mais de cem anos e, atualmente, o país é o maior produtor mundial do grão. Portanto, é indispensável a utilização de tecnologias voltadas à agricultura, a fim de garantir o alto padrão dos produtos destinados ao mercado. A determinação do teor de umidade dos grãos é de grande relevância no setor agrícola, visto que esse parâmetro é fundamental para definir a qualidade do produto. Na colheita, é importante o conhecimento sobre o teor de água contido nas sementes, buscando reduzir as perdas ocasionadas pela colheitadeira. Na armazenagem, é recomendável que os grãos apresentem um teor de umidade de até 13%, evitando a contaminação por fungos, bactérias e insetos. No ato da comercialização, o armazém aplica descontos que podem chegar a 2% para cada ponto de umidade que exceda 14%. Tendo em vista a importância deste monitoramento, este trabalho propõe o estudo e o desenvolvimento de um medidor portátil e de baixo custo para determinar o teor de umidade em grãos de soja de forma prática e rápida. No protótipo desenvolvido, o microcontrolador realiza a leitura da frequência de operação do sensor, convertendo-a em um valor percentual de umidade, que é exibido ao usuário em um *display*. O sensor é constituído por um capacitor de placas paralelas, local onde a amostra é depositada para a análise. O circuito oscilador é composto por um CI NE555P configurado no modo astável, responsável por gerar uma onda quadrada conforme o comportamento do capacitor sensor. A placa de desenvolvimento ESP32 Dev Kit V1 foi utilizada para receber o código da programação, elaborado em linguagem C++. A calibração do protótipo foi realizada através da determinação da umidade de seis amostras de soja pelo método da estufa a 105 °C. A partir dos resultados obtidos, foi elaborada uma reta de regressão linear relacionando os percentuais de umidade encontrados com a frequência média obtida pelo capacitor sensor em três medições de cada amostra. A equação da reta foi inserida na programação do microcontrolador a fim de fazer com que a frequência lida seja convertida em percentual de umidade. Para realizar a aferição do protótipo, efetuaram-se ensaios de medição do teor de umidade em amostras de soja contendo diferentes teores de água. Os resultados dos ensaios foram comparados aos resultados de um equipamento de referência. Diante disso, concluiu-se que o protótipo desenvolvido apresentou um funcionamento confiável e preciso em amostras com teores de umidade entre 10,8% e 21,2%, porém não mostrou um bom desempenho em grãos com cerca de 30% de umidade.

Palavras-chave: Capacitor de placas paralelas; microcontrolador; soja; teor de umidade.

ABSTRACT

Soybeans have been cultivated in Brazil for over a hundred years and the country is currently the world's largest producer of the grain. Therefore, it is essential to use technologies aimed at agriculture in order to ensure the high standard of products destined for the market. Determining the moisture content of grains is of great importance in the agricultural sector, since this parameter is essential to define the quality of the product. During harvesting, it is important to know the moisture content contained in the seeds, in order to reduce losses caused by the harvester. During storage, it is recommended that the grains have a moisture content of up to 13%, to avoid contamination by fungi, bacteria and insects. At the time of sale, the warehouse applies discounts that can reach 2% for each moisture point that exceeds 14%. Given the importance of this monitoring, this work proposes the study and development of a portable and low-cost meter to determine the moisture content of soybeans in a practical and fast way. In the prototype developed, the microcontroller reads the sensor's operating frequency, converting it into a moisture percentage value, which is displayed to the user on a display. The sensor consists of a parallel plate capacitor, where the sample is deposited for analysis. The oscillator circuit consists of an NE555P IC configured in astable mode, responsible for generating a square wave according to the behavior of the sensor capacitor. The ESP32 Dev Kit V1 development board was used to receive the programming code, written in C++ language. The prototype was calibrated by determining the moisture content of six soybean samples using the oven method at 105 °C. Based on the results obtained, a linear regression line was created relating the moisture percentages found to the average frequency obtained by the sensor capacitor in three measurements of each sample. The equation of the line was inserted into the microcontroller programming in order to convert the read frequency into moisture percentage. To calibrate the prototype, tests were performed to measure the moisture content of soybean samples containing different water contents. The test results were compared to those of a reference equipment. Therefore, it was concluded that the prototype developed presented reliable and accurate operation in samples with moisture content between 10.8% and 21.2%, but did not show good performance in grains with approximately 30% moisture content.

Keywords: Parallel plate capacitor; microcontroller; soybean; moisture content.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Forma e tamanho de grãos de soja com diferentes teores de umidade.....	17
Figura 2 - Curvas de dispersão e absorção representando o modelo de Debye para uma substância polar com tempo de relaxação único.....	20
Figura 3 - Composição do grão em relação à quantidade de água e de matéria seca.....	22
Figura 4 - Medidor de umidade de grãos Gehaka G610i.....	27
Figura 5 - Sistema desenvolvido por Pawlowski et al. (2018).....	27
Figura 6 - Vista superior (A) e inferior (B) em perspectiva do sistema desenvolvido por Araújo (2018).....	28
Figura 7 - Variação da capacitância em relação ao teor de umidade para as amostras A e B nas frequências de 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz (a aproximadamente 25 °C).....	29
Figura 8 - Medidor de umidade de grãos de soja desenvolvido.....	30
Fluxograma 1 - Etapas do funcionamento do sistema.....	31
Figura 9 - Amostra de grãos de soja da cultivar Brasmax Delta.....	31
Figura 10 - Capacitor sensor fixado na estrutura do protótipo.....	32
Figura 11 - Impressora 3D Creality modelo Ender 5 Plus.....	33
Figura 12 - CI NE555P.....	34
Figura 13 - Arquitetura interna e pinagem do CI NE555P.....	35
Figura 14 - Circuito para operação em modo astável do CI NE555P.....	36
Figura 15 - Circuito oscilador desenvolvido.....	37
Figura 16 - Sensor óptico reflexivo TCRT5000 acoplado ao módulo.....	38
Figura 17 - Ligação dos sensores TCRT5000 aos respectivos módulos conectados à PCB.....	38
Fluxograma 2 - Programação do protótipo.....	40
Figura 18 - Placa de desenvolvimento ESP32 DevKit V1.....	40
Figura 19 - Interface do software Arduino IDE.....	41
Figura 20 - IHM do protótipo.....	42
Figura 21 - Display LCD 16x2 com backlight azul.....	42
Figura 22 - Módulo adaptador I2C.....	43
Figura 23 - Display LCD 16x2.....	43
Figura 24 - Bateria de 9 V recarregável.....	44
Figura 25 - Regulador de tensão 7805.....	44
Figura 26 - Chave gangorra on/off e suporte da bateria do protótipo.....	45
Figura 27 - Esquema da PCB do protótipo.....	45
Figura 28 - Gravação do esquema da PCB em placa de fenolite cobreada.....	46
Figura 29 - PCB do protótipo com componentes conectados.....	46
Figura 30 - Balança analógica.....	47

Figura 31 - Disposição das amostras de soja nas vasilhas entre duas folhas de papel de germinação.....	48
Figura 32 - Copo medidor e borrifador utilizados para a umidificação das amostras.....	48
Figura 33 - Frequência do capacitor sensor vazio.....	50
Figura 34 - Estufa utilizada para a determinação do teor de umidade das amostras.....	51
Figura 35 - Recipientes e béquer contendo sílica gel na estufa de secagem.....	51
Figura 36 - Dessecador utilizado para resfriar os recipientes.....	52
Figura 37 - Balança analítica de precisão.....	52
Figura 38 - Recipientes contendo as amostras de soja na estufa de secagem.....	53
Gráfico 1 - Reta de regressão linear da relação entre o teor de umidade e a frequência média obtida nos ensaios com as amostras.....	55
Figura 39 - Trecho do código responsável por calcular o teor de umidade da amostra.....	56
Figura 40 - Medidor de umidade de grãos Motomco 999 FB.....	56
Figura 41 - Medição do teor de umidade das amostras no protótipo.....	60
Figura 42 - Mensagem de erro exibida na tela do display.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de água inserida em cada amostra.....	49
Tabela 2 - Resultado das medições da frequência do capacitor sensor contendo cada amostra com as respectivas médias calculadas.....	50
Tabela 3 - Resultado das pesagens dos recipientes com tampa e das pesagens inicial e final das amostras.....	53
Tabela 4 - Teor de umidade de cada amostra determinado pelo método da estufa a 105 °C....	54
Tabela 5 - Frequência média do capacitor sensor para os diferentes teores de umidade contido nas amostras.....	55
Tabela 6 - Orçamento do projeto.....	58
Tabela 7 - Resultado da medição do teor de umidade das seis amostras de soja analisadas no equipamento de referência.....	59
Tabela 8 - Resultados obtidos pelo protótipo nas medições do teor de umidade das amostras de soja.....	60
Tabela 9 - Comparação dos resultados das medições do equipamento de referência com a média das medições do protótipo em cada amostra.....	61
Tabela 10 - Erro absoluto apresentado pelo protótipo na medição do teor de umidade das amostras.....	61
Tabela 11 - Erro relativo apresentado pelo protótipo na medição do teor de umidade das amostras.....	62
Tabela 12 - Desvio padrão apresentado pelo protótipo na medição do teor de umidade das amostras.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
ASA	<i>American Soybean Association</i>
CI	Circuito Integrado
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
GND	<i>Ground</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IHM	Interface Homem-Máquina
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LCR	Indutância (L), capacitância (C) e resistência (R)
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
Pa	Peso da água
PCI	Placa de circuito impresso
PCB	<i>Printed circuit board</i>
PH	Peso Hectolitro
PLA	Poliácido Láctico
Pms	Peso de matéria seca
Pt	Peso total
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RC	Resistivo Capacitivo
SCL	<i>Serial Clock</i>
SDA	Secretaria de Defesa Agropecuária
SDA	<i>Serial Data</i>
SEMADESC	Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Desenvolvimento, Ciência, Tecnologia e Inovação
Vcc	Tensão em corrente contínua

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	Permissividade elétrica relativa ou constante dielétrica complexa
ε_{∞}	Permissividade elétrica em frequências altas o suficiente para que a orientação molecular não contribua com a polarização
ε_s	Permissividade estática (valor da permissividade a frequência zero)
j	Unidade imaginária
f	Frequência (Hz)
π	Número pi
ω	Frequência angular do campo elétrico alternado (Hz)
τ	Tempo de relaxação (s)
ε'	Constante dielétrica ou permissividade relativa
ε''	Fator de perda dielétrica
C	Capacitância (F)
ε_0	Constante dielétrica do vácuo (F/m)
A	Área das placas paralelas (m ²)
d	Distância entre as placas paralelas (m)
f_{osc}	Frequência de oscilação (Hz)
P	Peso inicial, peso do recipiente e sua tampa mais o peso do grão úmido (g)
p	Peso final, peso do recipiente e sua tampa mais o peso do grão seco (g)
t	Tara, peso do recipiente com sua tampa (g)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivos.....	13
1.1.1 Objetivo geral.....	13
1.1.2 Objetivos específicos.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 Produção de soja no Brasil.....	15
2.2 Propriedades dos grãos de soja.....	16
2.2.1 Propriedades físicas.....	16
2.2.2 Propriedades químicas.....	18
2.2.3 Propriedades dielétricas.....	18
2.2.3.1 Influência da frequência.....	19
2.2.3.2 Influência do teor de água.....	20
2.2.3.3 Influência da temperatura.....	21
2.2.3.4 Influência da densidade volumétrica.....	21
2.3 Teor de umidade presente nos grãos.....	21
2.3.1 Importância de monitorar o teor de umidade.....	22
2.4 Métodos comumente utilizados para determinar o teor de umidade em grãos.....	23
2.4.1 Métodos diretos.....	24
2.4.2 Métodos indiretos.....	25
2.5 Aspectos construtivos de sensores capacitivos utilizados na determinação do teor de umidade.....	26
3 METODOLOGIA.....	30
3.1 Visão geral do sistema.....	30
3.2 Amostra de grãos de soja.....	31
3.3 Sensor capacitivo.....	32
3.3.1 Capacitância do capacitor sensor.....	33
3.4 Circuito oscilador.....	34
3.4.1 CI NE555P.....	34
3.4.2 CI NE555P no modo astável.....	35
3.4.3 Circuito oscilador desenvolvido.....	36
3.5 Sensor óptico reflexivo TCRT5000.....	37
3.6 Circuito microcontrolado.....	39
3.6.1 ESP32 DevKit V1.....	39
3.6.2 Arduino IDE.....	41
3.7 Interface homem-máquina (IHM).....	41

3.7.1 Display LCD 16x2.....	42
3.7.2 Módulo adaptador I2C.....	43
3.8 Circuito de alimentação.....	44
3.9 PCB (Printed Circuit Board).....	45
3.10 Calibração do protótipo.....	47
3.10.1 Amostras de soja utilizadas na calibração do protótipo.....	47
3.10.2 Determinação da frequência de operação do capacitor sensor.....	49
3.10.3 Determinação do teor de umidade das amostras pelo método da estufa a 105 °C.....	50
3.10.4 Reta de regressão linear.....	54
3.11 Testes de precisão do protótipo.....	56
3.12 Cálculo das incertezas.....	56
3.12.1 Erro absoluto.....	57
3.12.2 Erro relativo.....	57
3.12.3 Desvio Padrão.....	57
3.13 Orçamento do projeto.....	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
4.1 Teor de umidade das amostras determinado pelo equipamento de referência.....	59
4.2 Teor de umidade das amostras determinado pelo protótipo desenvolvido.....	59
4.3 Comparação dos resultados obtidos com o protótipo e o equipamento de referência.....	61
4.4 Determinação do erro absoluto.....	61
4.5 Determinação do erro relativo.....	62
4.6 Determinação do desvio padrão.....	63
5 CONCLUSÃO.....	64
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	65
REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

A soja é uma planta originária da região nordeste da China. Essa cultura chegou no continente americano no século XIX, quando começou a ser cultivada como forrageira nos Estados Unidos da América por volta do ano de 1890. Na década de 1940 foi introduzida no Paraguai e, em 1950, no México e na Argentina (MANDARINO, 2017).

A primeira referência de soja no Brasil ocorreu em 1882, na Bahia, porém, as cultivares introduzidas dos Estados Unidos não tiveram boa adaptação nessa região, que apresenta latitude em torno de 12 graus Sul. Posteriormente, em 1891, novas cultivares foram introduzidas no estado de São Paulo, mais precisamente na cidade de Campinas, na latitude de, aproximadamente, 22 graus Sul, apresentando melhor desempenho. As variedades mais adequadas para o consumo humano chegaram em terras brasileiras através dos primeiros imigrantes japoneses em 1908. No entanto, a cultura foi oficialmente estabelecida no país no Rio Grande do Sul em 1914, na região pioneira de Santa Rosa, onde os primeiros plantios comerciais começaram a ser realizados a partir de 1924 (MANDARINO, 2017).

A aceitação da soja como alimento é gradual no Ocidente. Durante o século XVIII, cientistas europeus iniciaram pesquisas com brotos de soja visando sua utilização na produção de óleo e como fonte de nutrientes para animais. O cultivo comercial começou nos Estados Unidos nos primeiros anos do século XX e, durante a segunda década desse século, a elevada concentração de óleo e proteína nos grãos começou a atrair a atenção das indústrias ao redor do mundo (APROSOJA, 2023).

Foi somente após o término da Primeira Guerra Mundial, em 1919, que a soja se tornou um importante item de comércio exterior. O ano de 1921, quando a *American Soybean Association* (ASA) foi fundada, pode ser considerado como o marco da consolidação da cadeia produtiva da soja em esfera mundial (APROSOJA, 2023).

Além de ser o maior exportador de soja do mundo, o Brasil é líder na produção de soja mundial desde a safra de 2019/2020 (BOSCHIERO, 2023). Sendo assim, esse produto necessita de certos cuidados para garantir a competitividade e qualidade no mercado, como o monitoramento do teor de umidade dos grãos, fator que pode causar muitos prejuízos aos produtores se não for controlado da forma correta.

A umidade do grão é determinada através da relação percentual entre a quantidade de água e a massa total da amostra. Para atender às demandas do mercado, é essencial que produtos, como a soja, mantenham um teor de umidade em torno de 14%. Esse parâmetro é um dos principais aspectos considerados pelos compradores de grãos, o qual pode levar o

produtor a ter prejuízos no momento da comercialização pelo fato das unidades recebedoras descontarem valores elevados na hora do pagamento (SEMADESC, 2016).

A soja colhida com um alto teor de umidade é mais sujeita ao desenvolvimento de fungos e bactérias, comprometendo não apenas a qualidade do produto, mas também a segurança ambiental e de saúde. Por outro lado, a soja muito seca pode levar à perda de peso, bem como à deterioração da qualidade nutricional e calórica, o que pode impactar negativamente a rentabilidade do produtor (MARRARI, 2024).

Na colheita, grãos com umidade acima de 14% podem estar sujeitos a danos mecânicos latentes provenientes de colheitadeiras mal reguladas. Porém, um teor de umidade abaixo de 12% resulta em maior sensibilidade à quebra de grãos (MOTOMCO, 2024).

Atualmente, grande parte dos medidores de umidade utilizados para determinar a umidade de grãos *in loco* operam com base no princípio capacitivo. O custo desses equipamentos, que utilizam sistema capacitivo para a realização das medições, pode variar de R\$ 1.500,00 a R\$ 8.000,00, dependendo da marca, modelo e funcionalidades que oferecem. A portabilidade, precisão e rapidez na obtenção dos resultados tornam esses dispositivos altamente viáveis para aplicações no setor agrícola (PHELPS, 2024; GEHAKA, 2024).

Neste contexto, insere-se a proposta deste trabalho, que trata sobre um medidor portátil de umidade de grãos de soja constituído por um sensor capacitivo de placas paralelas, o qual proporciona ao produtor rural o acesso a uma tecnologia de fácil manuseio e com um custo inferior ao das opções disponíveis no mercado. Essa solução auxilia no monitoramento do teor de umidade dos grãos, contribuindo para evitar a perda de qualidade do produto, reduzir os descontos aplicados na comercialização e garantir um armazenamento seguro, sem a incidência de insetos, fungos e bactérias.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um medidor portátil e de baixo custo para determinar o teor de umidade em grãos de soja.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar a importância de medir a umidade de grãos de soja no contexto brasileiro.

- Investigar os principais métodos utilizados para medir a umidade de grãos.
- Elaborar o circuito eletrônico do medidor de umidade de grãos.
- Executar o processo de calibração do medidor a partir de um padrão de referência.
- Realizar ensaios laboratoriais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é abordado uma revisão sobre a produção de soja no Brasil, características físicas e químicas dos grãos de soja, propriedades dielétricas e os principais fatores que as influenciam, tópicos sobre o teor de umidade em grãos, compreendendo a importância de determinar essa grandeza, além dos principais métodos utilizados para medir esse fator, inclusive o método por capacitância, o qual é realizado através de um sensor capacitivo, cujo seus aspectos construtivos também são apresentados. Esses assuntos proporcionam a fundamentação teórica e a contextualização do desenvolvimento da proposta.

2.1 Produção de soja no Brasil

Nos últimos anos, o Brasil apresentou uma grande evolução na produção de soja por conta dos avanços científicos e disponibilidade de tecnologias para a agricultura. A introdução de máquinas agrícolas e o desenvolvimento de cultivares com alta produtividade adaptadas às diversas regiões foram fundamentais nesse processo. Além disso, a criação de pacotes tecnológicos que englobam o manejo do solo, fertilização, controle de pragas e doenças, bem como a identificação e resolução de problemas durante o processo de colheita, tem contribuído significativamente para esse progresso (FREITAS, 2011).

Os dados fornecidos pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) (2024) mostram que, na safra brasileira de 2015/2016, a área plantada correspondia a cerca de 33,2 milhões de hectares, e a produção atingiu, aproximadamente, 95,7 milhões de toneladas. Em relação à safra de 2023/2024, a área plantada foi em torno de 45,7 milhões de hectares, e registrou-se uma produção por volta de 147,4 milhões de toneladas. O período de maior produção da história do país foi na safra de 2022/2023, onde alcançou-se um resultado de 154,6 milhões de toneladas do produto.

De acordo com Boschiero (2023), o Mato Grosso é o estado com maior produção do Brasil, sendo responsável por 26% da soja nacional. No ranking também aparecem os estados do Paraná, Rio Grande do Sul, Goiás e Mato Grosso do Sul, cada um com uma produção de, respectivamente, 15, 14, 10 e 8% da produção do país.

2.2 Propriedades dos grãos de soja

Os aspectos físicos dos grãos de soja apresentados neste trabalho incluem tamanho e forma, porosidade intergranular, volume, massa de mil grãos e massa específica. As propriedades químicas compreendem o teor de proteína, óleo, amido, carboidratos, fibras e cinzas. Além disso, é abordado o assunto sobre as propriedades dielétricas dos grãos e os principais fatores que as influenciam, os quais são: a frequência, o teor de água, a temperatura e a densidade volumétrica.

2.2.1 Propriedades físicas

Determinar as propriedades físicas dos grãos corretamente é de fundamental importância a fim de aprimorar os processos industriais e otimizar os equipamentos utilizados nas operações de colheita e pós-colheita (RESENDE *et al.*, 2005).

O tamanho e forma são características específicas de cada produto, determinadas geneticamente e sujeitas a influências ambientais durante e após sua formação, as quais afetam outras propriedades físicas dos grãos. Esses parâmetros são levados em consideração para o dimensionamento do tamanho e da forma dos furos das peneiras em equipamentos usados na separação e classificação. O tamanho é estabelecido através de medidas dos eixos perpendiculares do grão, sendo que, quanto mais irregular o formato, mais medidas são necessárias. Por sua vez, a forma é determinada por meio de uma comparação com um formato padrão predefinido, o qual pode ser esférico, cilíndrico, oval, cônico, etc (SILVA, 2008, p. 28). A forma das sementes de soja é oval e o diâmetro geométrico dos grãos com teor de água de 14% b.u. tem variação de 5,66 mm a 6,42 mm, conforme um estudo realizado por Onetta e Ruffato (2018).

Uma das mudanças físicas mais significativas nos produtos agrícolas é a redução de seu volume, que ocorre durante o processo de secagem. Como apresentado na Figura 1, a perda de água provoca alterações na forma e, geralmente, resulta em uma diminuição nas dimensões dos grãos, fenômeno conhecido como contração volumétrica. Sendo assim, o teor de água é o parâmetro que exerce a maior influência sobre as propriedades físicas das sementes (BOTELHO *et al.*, 2015). Com a variação do volume dos grãos, outras propriedades físicas são influenciadas, como a porosidade (ONETTA, 2018). Segundo Onetta e Ruffato (2018), o volume dos grãos de soja que apresentam umidade de 14% b.u. podem variar de 96,86 mm³ a 139,28 mm³.

Figura 1 - Forma e tamanho de grãos de soja com diferentes teores de umidade



Fonte: DOMINGUES; CANEPPELE, C.; CANEPPELE, M. A. B. (2005)

A porosidade intergranular refere-se à porcentagem do volume total ocupada pelo ar em uma massa de sementes. Este percentual de espaços “vazios” é influenciado pelo tamanho, forma e características da superfície dos grãos. Um produto com uma superfície não uniforme geralmente contém mais espaços vazios do que grãos com superfície lisa (ARAÚJO *et al.*, 2014). Com um teor de umidade de 13,8% b.u., a soja apresenta porosidade intergranular em torno de 44% (LOPES *et al.*, 2019).

A massa de mil grãos é o peso de um determinado número de sementes, referente à quantidade de massa seca desses grãos, sua composição físico-química, variação entre as espécies, tamanho e forma (DOMINGUES; CANEPPELE, C.; CANEPPELE, M. A. B., 2005). Essa propriedade é importante para determinar a qualidade do produto, a qual é influenciada pelas condições climáticas durante a formação e enchimento. A massa de mil grãos de soja com um teor de umidade de 14% b.u. corresponde a valores entre 95,62 g e 159,99 g (ONETTA; RUFFATO, 2018).

Outra propriedade física de grande relevância é a massa específica aparente e a massa específica unitária dos produtos agrícolas. As informações provenientes desta característica física são úteis para o dimensionamento de silos, cálculos de transportadores, bem como para separadores e classificadores de grãos e sementes. Vários fatores influenciam a densidade dos materiais vegetais, incluindo o teor de água, a forma e a superfície do produto (ARAÚJO *et al.*, 2014). Conforme um estudo realizado por Onetta e Ruffato (2018), a massa específica aparente da soja com umidade de 14% b.u. pode variar de 623,53 kg/m³ a 732,62 kg/m³.

2.2.2 Propriedades químicas

A soja é uma das possíveis fontes de proteína para ser utilizada na alimentação humana e animal. Seus grãos possuem alto valor nutritivo, em virtude de serem constituídos por cerca de 20% de óleo e 40% de proteína, porém, possuem quantidades reduzidas ou mesmo insignificantes de amido (TOLEDO *et al.*, 2007).

Outras substâncias de grande relevância na composição química da soja são os carboidratos, fibras e cinzas. Em um estudo realizado por Ramalho, Rodrigues e Oliveira (2020) com diferentes cultivares de soja, o teor de carboidratos nos grãos em base seca variou de 16,03% a 29,42%, as fibras de 4,30% a 8,14% e as cinzas 5,30% a 7,28%.

As propriedades químicas da soja podem alterar de uma variedade para outra, além de serem influenciadas por fatores ambientais (temperatura, umidade, tipo de solo) e também pela tecnologia aplicada (irrigação, não irrigação e todo o sistema de cultivo) (VASILE *et al.*, 2008, tradução nossa).

2.2.3 Propriedades dielétricas

Um dos fatores que determinam como ocorre a interação dos grãos com um campo eletromagnético são as propriedades dielétricas. Esta grandeza complexa é composta por uma parte real (constante dielétrica) e uma parte imaginária (fator de perda), a qual pode ser relacionada a um parâmetro físico de interesse, como o teor de umidade (BARTLEY; NELSON; MCCLENDON, 2002, tradução nossa).

As propriedades dielétricas de diversos materiais são influenciadas por vários fatores, como a frequência do campo elétrico aplicado, o teor de água, a temperatura, a estrutura e densidade do material. Nos produtos agrícolas, os quais são considerados materiais higroscópicos, o teor de água geralmente é um fator determinante. Em materiais granulares ou particulados, a densidade volumétrica da mistura ar-partícula também influencia nessas propriedades. É importante ressaltar que, as características dielétricas dos materiais estão relacionadas à sua composição química, especialmente aos momentos dipolares permanentes associados à presença de água e outras moléculas que constituem os materiais de interesse (NELSON, 1991, tradução nossa).

2.2.3.1 Influência da frequência

A maioria dos materiais têm suas propriedades dielétricas alteradas em virtude da frequência dos campos elétricos aplicados. Um fenômeno importante que faz as propriedades dielétricas dependerem da frequência é a polarização resultante da orientação do campo elétrico imposto em moléculas que apresentam momentos de dipolo permanentes (NELSON, 1992, tradução nossa).

Debye (1929) *apud* Nelson (1992) desenvolveu uma fórmula a fim de descrever este processo para materiais polares puros, a qual é descrita na Equação (1):

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau} \quad (1)$$

onde:

ε = permissividade elétrica relativa ou constante dielétrica complexa;

ε_{∞} = permissividade elétrica em frequências altas o suficiente para que a orientação molecular não contribua com a polarização;

ε_s = permissividade estática (valor da permissividade a frequência zero);

j = unidade imaginária da equação;

$\omega = 2\pi f$ = frequência angular do campo elétrico alternado (Hz);

τ = tempo de relaxação, que se refere ao período associado ao tempo necessário para os dipolos reverterem para orientação de origem quando o campo elétrico é removido (s).

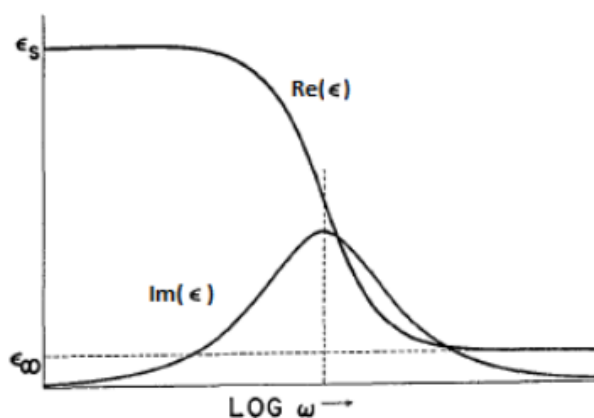
Separando a parte real e imaginária da Equação (1), tem-se:

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})\omega\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (3)$$

Sendo assim, em relação ao processo de relaxação molecular, ε_{∞} é constante em frequências muito altas, e ε_s é constante em frequências muito baixas, e as perdas são zero. Porém, em frequências intermediárias ocorre uma dispersão e a perda máxima acontece em $\omega = 1/\tau$ (NELSON, 1992, tradução nossa). A Figura 2 mostra a relação definida entre a Equação (2) e (3).

Figura 2 - Curvas de dispersão e absorção representando o modelo de Debye para uma substância polar com tempo de relaxação único



Fonte: NELSON (1992)

A água no estado líquido é um bom exemplo de dielétrico polar puro, porém, é muito difícil encontrá-la no estado livre em produtos agrícolas. Normalmente ela está ligada quimicamente com outras moléculas ou é absorvida fisicamente nos capilares ou cavidades do material (NELSON, 1991, tradução nossa).

Grãos e sementes representam misturas heterogêneas, que abrigam uma diversidade de arranjos moleculares complexos, onde as ligações da água ocorrem de diversas formas, com energias de ligação diferentes. Isso resulta em várias moléculas e compostos com propriedades dielétricas distintas e desconhecidas em um mesmo material (MOURA, 2012).

A permissividade complexa relativa ao espaço livre, também conhecida como constante dielétrica complexa, $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$, em que ϵ' é a constante dielétrica, e ϵ'' é o fator de perda dielétrica, utilizada para caracterizar materiais (NELSON, 2000, tradução nossa).

Em sistemas capacitivos utilizados para medir a umidade de grãos, a alteração da capacitância do sensor está diretamente relacionada com a permissividade relativa (ϵ') da amostra. A partir disso, é possível determinar, indiretamente, o teor de água contido nos grãos. O fator de perda dielétrica (ϵ'') é associado à conversão irreversível de energia elétrica em calor dentro do material dielétrico (MOURA, 2012).

2.2.3.2 Influência do teor de água

O teor de umidade em grãos e sementes afeta significativamente suas propriedades dielétricas, pois a água possui uma constante dielétrica alta, aproximadamente 78, em temperatura ambiente, enquanto a dos materiais de base está na ordem de 2. Sendo assim,

uma elevada porcentagem de água faz com que a constante dielétrica aumente, geralmente de forma proporcional (SCHIFFMANN, 2006, tradução nossa).

2.2.3.3 Influência da temperatura

As propriedades dielétricas dos materiais variam com a temperatura, e essa variação depende dos processos de relaxamento dielétrico que ocorrem sob as condições específicas e da frequência utilizada. À medida que a temperatura aumenta, o tempo de relaxamento diminui, e o pico do fator de perda, conforme ilustrado na Figura 2, se desloca para frequências mais altas. Assim, em uma região de dispersão, aumentando-se a temperatura, a permissividade aumentará, enquanto o fator de perda pode aumentar ou diminuir, dependendo se a frequência utilizada é superior ou inferior à frequência de relaxamento. Geralmente, a dependência da temperatura da permissividade (ϵ_{∞}) é insignificante, e embora a de ϵ_s seja maior, sua influência é pequena em uma região de dispersão. Com o aumento da temperatura, a permissividade diminui em frequências abaixo da região de dispersão (NELSON, 1991, tradução nossa).

2.2.3.4 Influência da densidade volumétrica

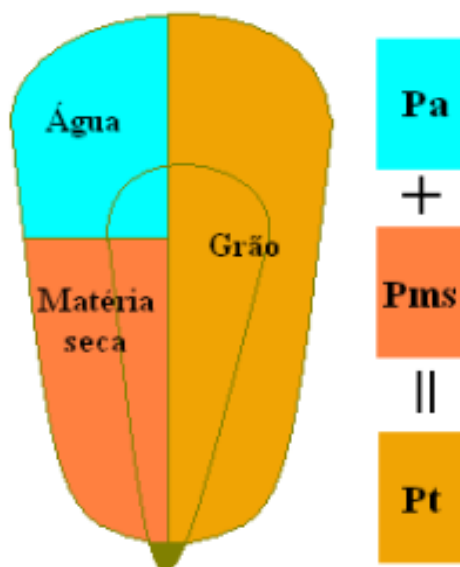
A constante dielétrica do ar corresponde a 1,0. Na prática, o ar é um meio transparente às ondas eletromagnéticas em frequências alternadas. Portanto, o ar presente nos espaços entre os grãos altera as propriedades dielétricas dos mesmos, reduzindo a constante dielétrica, a densidade e o aquecimento (SCHIFFMANN, 2006, tradução nossa).

2.3 Teor de umidade presente nos grãos

Os grãos de produtos agrícolas contêm uma proporção variável de água e matéria seca. O teor de umidade relaciona a massa de água presente em uma amostra com a massa total (massa de matéria úmida), ou com a massa de matéria seca, indicando o grau de umidade em base úmida (b.u.) ou em base seca (b.s.), respectivamente (OLIVEIRA; ROSA; CARVALHO, 2021). Normalmente, a porcentagem de umidade na base úmida é empregada em termos comerciais e na determinação de preços. Em contrapartida, o teor de umidade na base seca é frequentemente utilizado em atividades de pesquisa e em cálculos específicos (SILVA, 2008).

A Figura 3 apresenta a composição de um grão em relação à quantidade de água e de matéria seca, onde: P_a é o peso da água, P_{ms} o peso de matéria seca e P_t o peso total.

Figura 3 - Composição do grão em relação à quantidade de água e de matéria seca



Fonte: SILVA (2008)

A água contida nos grãos é encontrada de duas formas, água livre e água de constituição. A água livre está presente no estado líquido em contato direto com a estrutura celular, a qual é evaporada no processo de secagem dos produtos, pois sua evaporação ocorre a partir da presença de ar com baixa umidade relativa. Já, a água de constituição, que também compõe a estrutura celular, está quimicamente ligada ao material (SILVA, 2008).

2.3.1 Importância de monitorar o teor de umidade

Fazer o monitoramento da umidade dos grãos é de suma importância para determinar a qualidade dos produtos, uma vez que possibilita definir o momento ideal da colheita e o potencial para um armazenamento seguro. Além disso, é importante na determinação do preço de mercado, pois a matéria seca do grão tem mais valor do que a água que contém, e os custos de secagem também são levados em conta, visto que nesse processo os grãos mais úmidos necessitam de maiores gastos. Na produção de farinhas de grãos, rações animais e outros alimentos, o teor de umidade é uma informação relevante para o processamento eficiente e obtenção de produtos de alta qualidade (NELSON, 2000, tradução nossa).

Na armazenagem de grãos, elevados teores de umidade propiciam o crescimento de fungos, bactérias e insetos, ocasionando deterioração, mofo, aquecimento e perda de qualidade, além de causar endurecimento, rachaduras e germinação prévia, reduzindo a utilidade e valor comercial dos produtos. Em processos industriais, como a moagem, trituração e extração de óleos, grãos muito secos dificultam o processamento, provocando queda no rendimento e qualidade do produto final. Em contrapartida, grãos excessivamente úmidos podem gerar obstruções e mau funcionamento das máquinas (MARRARI, 2024).

É indicado realizar a colheita da soja com teor de umidade em torno de 13% a 15%, que é uma faixa segura para minimizar danos mecânicos aos grãos e compatível com a trilha mecânica da colhedora. Em condições com teor de umidade acima de 20% ocorrem perdas significativas no sistema de trilha, pois grande parte dos grãos não são separados das vagens e retornam ao campo (DEL AGUILA, L. S. H.; DEL AGUILA, J. S.; THEISEN, 2011).

De acordo com a Portaria SDA (Secretaria de Defesa Agropecuária) nº 532, de 14 de fevereiro de 2022, estabelecida pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), recomenda-se que o percentual máximo de água contida nos grãos de soja seja de 13% para fins de comercialização (LEAL, 2022). Caso a umidade exceda essa média, o armazém oferece um valor menor do que seria pago originalmente por determinada quantidade do produto. Se um produtor entregar a soja com 20% de umidade, por exemplo, a umidade está 7 pontos percentuais acima do ideal, sendo assim, o "excesso de umidade", representado pelo número 7, é multiplicado por um valor de correção, que normalmente varia de 1,5% a 2,0%. Sendo assim, o desconto poderia chegar a até 14% no pagamento ao produtor. O cálculo varia entre os armazéns, dependendo do valor de correção estabelecido pelo comprador (SEMADESC, 2016).

2.4 Métodos comumente utilizados para determinar o teor de umidade em grãos

Os métodos utilizados para determinar o teor de umidade em grãos e sementes são divididos em duas categorias. Os métodos diretos determinam a umidade removendo o conteúdo de água da amostra. Por outro lado, os indiretos utilizam as propriedades elétricas dos grãos (MORITZ *et al.*, 2012). Além disso, podem ser classificados também como destrutivos, onde ocorre a modificação ou destruição dos grãos durante o processo de medição, e não destrutivos, método no qual a integridade dos mesmos é preservada (LUZ, 2002). Em relação aos métodos apresentados neste trabalho, apenas o método dielétrico

(capacitância) é considerado não destrutivo, os demais métodos são classificados como destrutivos.

2.4.1 Métodos diretos

Tendo em vista que, grande parte dos métodos diretos necessitam da secagem dos grãos por longos períodos de tempo e temperaturas específicas, os mesmos geralmente não são utilizados na comercialização de produtos agrícolas (NELSON, 2000).

Os principais métodos diretos para a determinação do teor de umidade em grãos são os seguintes:

- **Método da Estufa:** é baseado na secagem de uma amostra de grãos de massa conhecida, onde o teor de umidade é determinado pela quantidade de massa perdida durante o processo de secagem. Para obter o grau de umidade, em base úmida, calcula-se a proporção entre a massa perdida da amostra após a secagem e sua massa original, multiplicando o resultado por 100. O tempo e a temperatura de secagem variam de acordo com o tipo de produto e as condições da estufa utilizada, podendo demorar até 72 horas e chegar a temperaturas na faixa de 130 °C (SILVA, 2008).
- **Método por destilação:** esse procedimento é compreendido no método de destilação com tolueno e no método de Brown Duvel. No método de destilação com tolueno, os grãos são moídos e fervidos em tolueno, onde a água condensada é recolhida em uma proveta graduada, enquanto o tolueno condensado é devolvido ao recipiente em ebulição. O processo de ebulição prossegue conforme a água é adicionada na proveta. Por fim, o teor de umidade dos grãos é obtido através do volume de água coletado na proveta (LUZ, 2002). O método de Brown Duvel é semelhante ao método anterior, porém, não há necessidade de moer a amostra e o aquecimento é gerado por um sistema termométrico que move automaticamente a fonte de calor. Consiste em um sistema composto por uma manta aquecedora com um balão ligado a um aparelho de destilação, o qual é acoplado a um recipiente graduado para coletar a água condensada durante o processo (PARK; ANTONIO, 2006).
- **Método infravermelho:** o instrumento utilizado para determinar a umidade é composto por uma balança acoplada a uma fonte de radiação. Para realizar este processo, uma amostra é inserida em um suporte previamente tarado, que geralmente é um pequeno prato de alumínio. Em seguida, fazendo o uso de uma balança, a amostra é pesada, juntamente com o suporte em que se encontra, a fim de registrar a massa

inicial. Após a incidência da radiação sobre a amostra, a mesma é pesada novamente para se obter a massa final do produto, assim, tornando possível a determinação do teor de umidade (AMOEDO; MURADIAN, 2002).

- **Método Karl Fischer:** é um método com alta precisão, o qual baseia-se na reação química entre a água em forma de umidade residual de uma amostra de grãos moídos e uma solução do reagente de Karl Fischer, o qual é constituído por iodo, azida e uma base. A reação resulta na formação do íon triiodeto e a quantidade de iodo usada neste procedimento é diretamente proporcional à fração de água contida na amostra, assim, possibilitando determinar o teor de umidade (AFINKO, 2024).

2.4.2 Métodos indiretos

Os métodos indiretos são frequentemente utilizados no controle da secagem, armazenagem e nas transações comerciais, em virtude da rapidez na determinação do teor de umidade em base úmida, ou seja, mostram a relação percentual entre a quantidade de água e a massa total da amostra (SILVA, 2008).

Os métodos indiretos comumente utilizados para determinar o teor de umidade em grãos incluem:

- **Método dielétrico (capacitância):** consiste nas alterações do campo elétrico, o qual é influenciado pelas propriedades dielétricas do material em análise após a interação do mesmo com uma corrente aplicada (JENSEN *et al.*, 2006). Os aparelhos utilizados são constituídos por um porta-amostra (capacitor) de placas paralelas ou cilindros concêntricos, onde a capacitância é alterada a partir da inserção dos grãos. A mudança na capacitância está diretamente relacionada à constante dielétrica do grão. Medidores de umidade do tipo dielétrico operam em frequências entre 1 MHz e 20 MHz. Alguns detectam a temperatura e o peso da amostra, corrigindo automaticamente o resultado final em relação a essas variáveis (NELSON; TRABELSI; KRASZEWSKI, 2001).
- **Método da condutividade elétrica (resistência):** esse método é realizado através de um equipamento onde uma amostra de grãos é comprimida entre dois eletrodos conectados a uma fonte de energia e a um galvanômetro, que indica o comportamento da corrente no sistema. É aplicada uma corrente contínua entre os dois eletrodos, a qual encontra uma resistência que depende da quantidade de água presente no grão. Assim, é possível determinar o grau de umidade dos produtos, pois, quanto mais

elevado for o teor de água, menor será a resistência à passagem da corrente, e vice-versa (ANTUNES *et al.*, 2019).

2.5 Aspectos construtivos de sensores capacitivos utilizados na determinação do teor de umidade

Para determinar a umidade em grãos e sementes, os sensores capacitivos apresentam diferentes estruturas e tamanhos, todos projetados para atender de forma otimizada às suas respectivas aplicações (JÚNIOR, 2009). Os capacitores de cilindros concêntricos e de placas paralelas são os mais amplamente utilizados, pelo fato de possuírem uma resposta conhecida à variação da capacitância (CORREA, 2020).

De acordo com Berbert *et al.* (1998) *apud* Moura (2012), uma das vantagens do capacitor de placas paralelas é a distribuição uniforme das linhas de campo elétrico entre as placas. Por outro lado, o capacitor de cilindros concêntricos proporciona auto isolamento quando o eletrodo externo é ligado ao fio terra. Neste trabalho optou-se pelo capacitor de placas paralelas devido à sua simplicidade de geometria e sensibilidade à variações elétricas.

Mathews (1963) *apud* Moura (2012) realizou um dos primeiros estudos sobre o desenvolvimento de protótipos para a determinação do teor de umidade em produtos granulares e constatou que, para se obter resultados satisfatórios na medição da capacitância, o suporte para as amostras deve apresentar volume mínimo de 25 cm³.

Atualmente, existe uma diversidade de modelos de medidores de umidade de grãos disponíveis no mercado, fabricados e comercializados por diversas empresas. Um dos modelos de grande relevância é o G610i desenvolvido pela Gehaka, apresentado na Figura 4, o qual consiste em um equipamento portátil que determina a umidade dos grãos de diversos cereais de forma precisa e confiável a partir de um capacitor de placas paralelas. Além disso, é constituído por uma balança eletrônica, para fazer a pesagem da amostra, e um termômetro digital que faz a leitura da temperatura da amostra (GEHAKA, 2016).

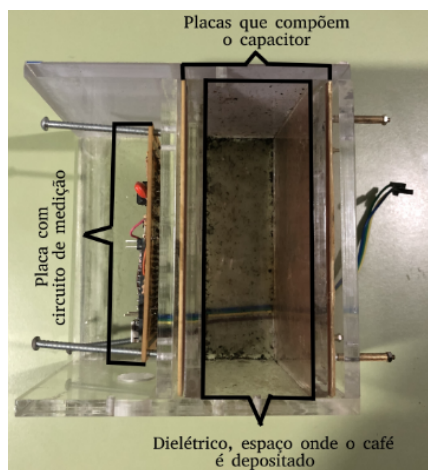
Figura 4 - Medidor de umidade de grãos Gehaka G610i



Fonte: GEHAKA (2024)

Pawlowski *et al.* (2018) desenvolveram um capacitor de placas paralelas para medir a umidade de grãos de café, mostrado na Figura 5. Neste projeto, os autores desenvolveram um circuito de medição a partir do circuito integrado (CI) LM555, juntamente com resistores e capacitores, incluindo o capacitor sensor, onde os grãos são depositados. Utilizou-se um Arduino Nano para medir o período da onda gerada pelo LM555, e a calibração do equipamento foi feita através do método gravimétrico. Por fim, realizou-se uma regressão linear entre a umidade obtida pelo método gravimétrico e a umidade medida pelo sensor desenvolvido, tendo como resultado do sistema, um coeficiente de determinação de 99%, indicando o alto desempenho do dispositivo.

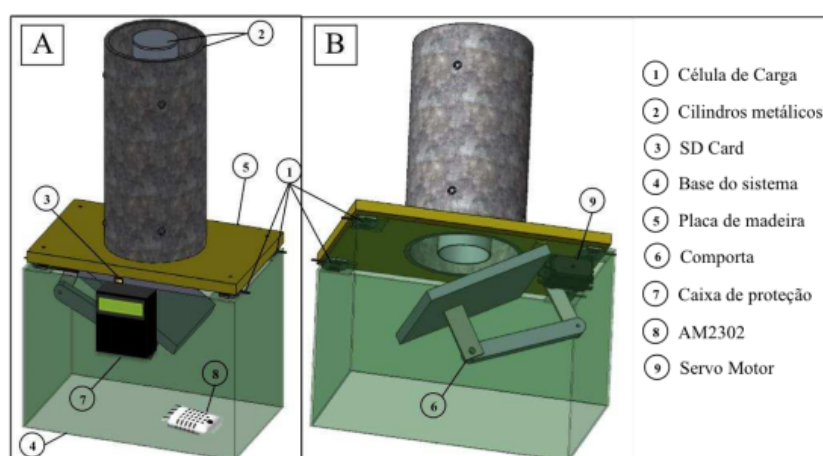
Figura 5 - Sistema desenvolvido por Pawlowski *et al.* (2018)



Fonte: PAWLOWSKI *et al.* (2018)

Araújo (2018) elaborou um sensor capacitivo a partir de um capacitor de cilindros concêntricos, com o intuito de determinar o teor de água de grãos de feijão e milho. Utilizou-se o Arduino UNO como controlador, o qual possui um microcontrolador ATMEL ATmega328, além do sensor AM2302 para a leitura da temperatura e da umidade relativa do ar intergranular, a fim de corrigir os resultados do teor de umidade das amostras em relação a esses parâmetros. Nethercott (2014) *apud* Araújo (2018) afirma que, um circuito puramente capacitivo determina a capacitância com maior precisão em capacitores inferiores a 1 nF, e um circuito resistivo capacitivo (RC) tem precisão para determinar essa grandeza em capacitores cuja capacitância é superior a 1 nF. Sendo assim, o autor desenvolveu um circuito puramente capacitivo e um circuito RC, ambos de corrente contínua, para determinar as propriedades dielétricas dos grãos. O sensor apresentou bom desempenho, porém, não funcionou corretamente para grãos com teor de água acima de 25%. A Figura 6 mostra a visão em perspectiva do projeto desenvolvido.

Figura 6 - Vista superior (A) e inferior (B) em perspectiva do sistema desenvolvido por Araújo (2018)

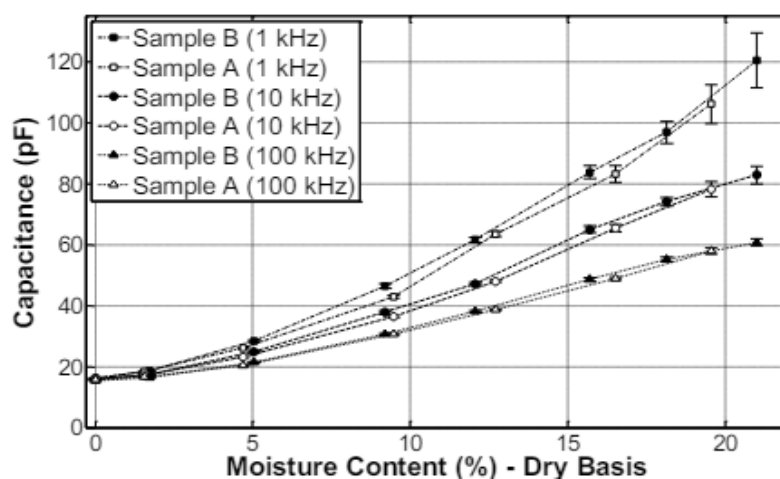


Fonte: ARAÚJO (2018)

Bessa *et al.* (2013) desenvolveram um capacitor cilíndrico a fim de utilizá-lo como sensor para medir o teor de umidade em duas variedades de soja com diferentes temperaturas e frequências. Um medidor LCR foi utilizado para medir a capacitância, o qual foi conectado a um computador para adquirir e armazenar os dados em um programa desenvolvido. Além disso, o programa realizava o comando do medidor LCR para automatizar as medições. Realizaram-se as leituras de temperatura a partir do sensor LM335, e os dados obtidos também foram enviados ao programa de computador. Os testes foram feitos em frequências baixas, na escala de 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz, e, em 100 kHz confirmou-se a melhor

precisão. Entretanto, foram obtidos resultados satisfatórios em frequências de 1 kHz e 10 kHz. Neste estudo, os resultados indicaram que, sob frequências mais baixas, a mudança na constante dielétrica da soja é maior do que em frequências altas em relação ao teor de umidade, conforme pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Variação da capacitância em relação ao teor de umidade para as amostras A e B nas frequências de 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz (a aproximadamente 25 °C)



Fonte: BESSA *et al.* (2013)

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, serão apresentados os procedimentos metodológicos adotados neste trabalho, incluindo as especificações do projeto, os equipamentos utilizados no desenvolvimento e na calibração do protótipo, além da funcionalidade e características dos componentes constituintes.

3.1 Visão geral do sistema

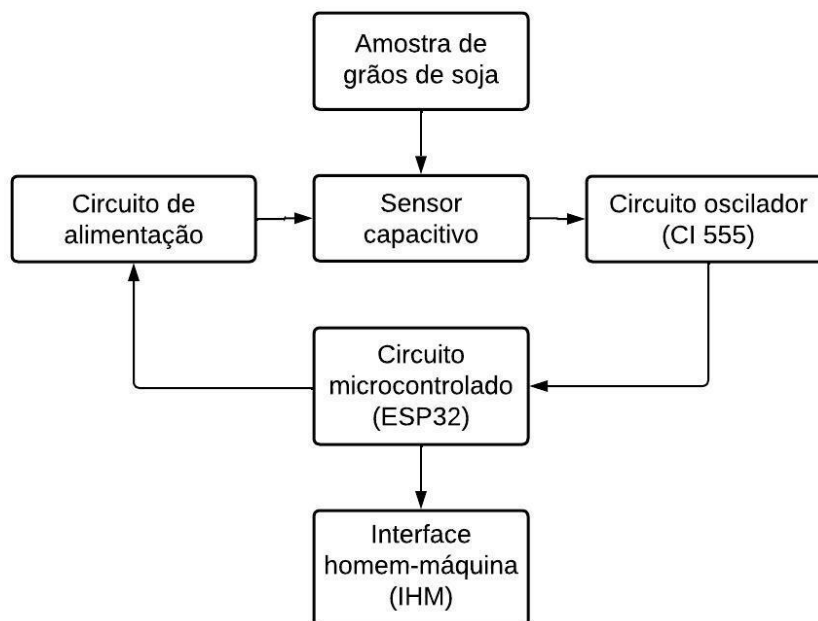
O medidor de umidade de grãos de soja desenvolvido é apresentado na Figura 8. O sistema proposto visa verificar a alteração da capacitância de um capacitor de placas paralelas através da leitura da frequência de oscilação do circuito, a qual sofre interferência devido ao material dielétrico presente entre as placas. Ao inserir uma amostra de grãos de soja no sensor capacitivo, o microcontrolador é responsável por relacionar a frequência com o teor de umidade do produto, apresentando o resultado final, em percentual de umidade, em um *display*. Vale ressaltar que, devido à possibilidade de ser gerado um produto, o código completo da programação do microcontrolador não será disponibilizado. O Fluxograma 1 mostra as etapas do processo do sistema.

Figura 8 - Medidor de umidade de grãos de soja desenvolvido



Fonte: Elaborado pelo autor

Fluxograma 1 - Etapas do funcionamento do sistema



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2 Amostra de grãos de soja

A cultivar de soja Brasmax Delta colhida na safra 2023/2024 foi selecionada para a realização da calibração e testes do equipamento desenvolvido. Uma amostra dos grãos é apresentada na Figura 9.

Figura 9 - Amostra de grãos de soja da cultivar Brasmax Delta



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 Sensor capacitivo

O sensor desenvolvido consiste em um capacitor de placas planas paralelas, onde a amostra do produto é inserida para a aquisição dos dados em relação ao teor de umidade. As placas selecionadas para o projeto são constituídas de alumínio, o que diminui os efeitos causados pela corrosão ocasionada pela água presente nos grãos, possuem 1,5 mm de espessura, 110 mm de altura e 148 mm comprimento, totalizando uma área de 16.280 mm², ou 162,8 cm².

O espaçamento entre as placas do capacitor sensor corresponde a 15 mm, o que resulta em um volume de 244,2 cm³, considerado ideal para depositar os grãos e obter resultados satisfatórios na determinação do teor de umidade.

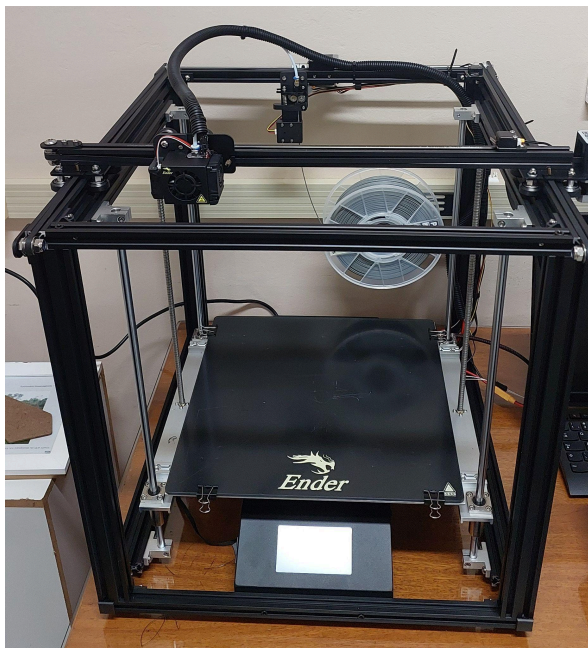
Como apresentado na Figura 10, as placas do sensor são fixadas na estrutura do protótipo, a qual foi impressa a partir do material termoplástico PLA em uma impressora 3D da fabricante Creality, modelo Ender 5 Plus, que é exibida na Figura 11.

Figura 10 - Capacitor sensor fixado na estrutura do protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 11 - Impressora 3D Creality modelo Ender 5 Plus



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.1 Capacitância do capacitor sensor

A capacitância do capacitor sensor desenvolvido foi determinada através da Equação (4), sugerida por Halliday, Resnick e Walker (2016):

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (4)$$

em que:

C = capacitância (F);

ϵ_0 = constante dielétrica do vácuo = $8,85 * 10^{-12}$ F/m;

A = área das placas paralelas (m²);

d = distância entre as placas paralelas (m);

Inserindo os dados do capacitor na Equação (4), considerando o vácuo como meio dielétrico entre as placas, obteve-se o resultado apresentado na Equação (5).

$$C = \frac{8,85 * 10^{-12} * 0,01628}{0,015} = 9,6 * 10^{-12} F \quad (5)$$

Assim, a capacitância do capacitor desenvolvido corresponde a 9,6 pF.

3.4 Circuito oscilador

O circuito oscilador deste projeto é constituído por um CI NE555P configurado no modo astável, a fim de gerar uma onda quadrada conforme o comportamento do capacitor sensor.

3.4.1 CI NE555P

A Figura 12 apresenta o circuito integrado NE555P, o qual é um componente de uso geral, frequentemente implementado em dispositivos eletrônicos, que apresenta baixo custo e alta versatilidade. Sua arquitetura interna, representada na Figura 13, é composta por vários blocos funcionais, incluindo comparadores de tensão, *flip-flop*, amplificadores operacionais, resistores e transistores, que permitem a configuração para operação em modo astável, monoestável e biestável, possibilitando realizar a função de oscilador, temporizador e gerador de pulsos, respectivamente (MATTEDE, 2022).

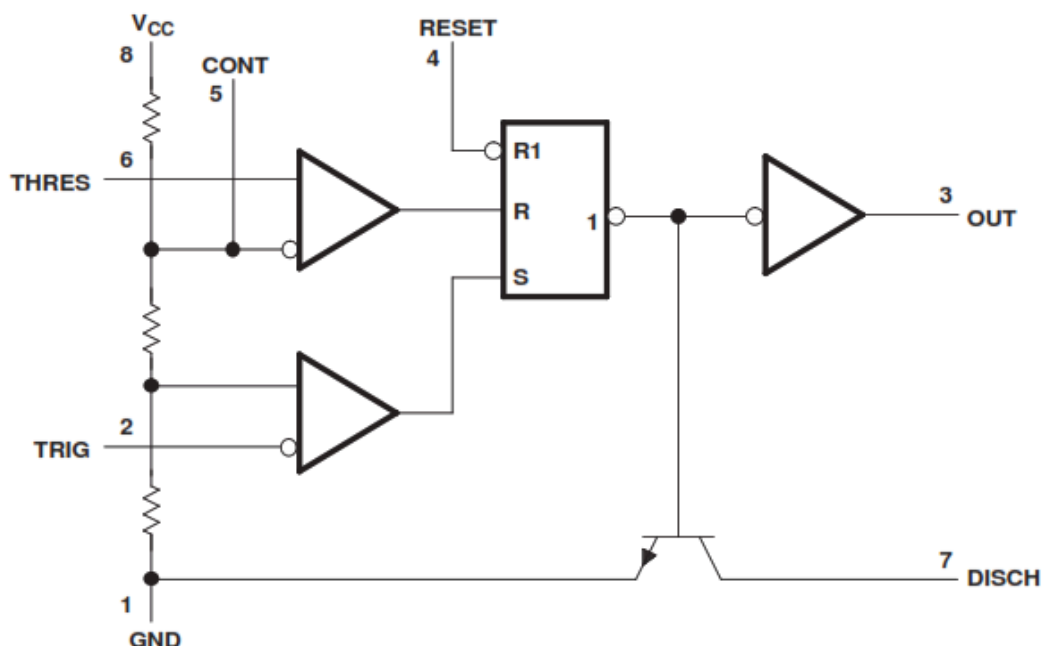
A tensão de alimentação do CI varia de 4,5 V a 16 V, o que o torna viável para aplicações em circuitos alimentados por baterias. A corrente máxima de saída pode chegar até 200 mA e a faixa de temperatura adequada para aplicação é de 0 °C a 70 °C (INSTRUMENTS, 2006).

Figura 12 - CI NE555P



Fonte: ERKATRON (2023)

Figura 13 - Arquitetura interna e pinagem do CI NE555P



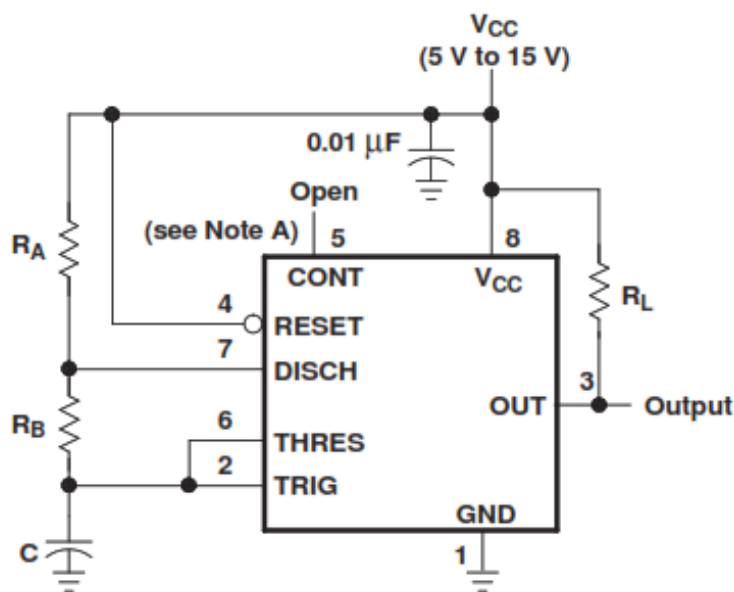
Fonte: INSTRUMENTS (2006)

3.4.2 CI NE555P no modo astável

No modo astável, o CI 555 funciona como um circuito oscilador, criando uma onda quadrada a partir da repetição do ciclo de carga e descarga de um capacitor adicionado ao circuito (MOL, 2020).

Conforme o circuito de operação em modo astável do CI NE555P mostrado na Figura 14, ao adicionar um resistor (R_B) entre o pino *discharge* (7) e o *trigger* (2) e conectar o *threshold* (6) ao *trigger* (2), o temporizador é disparado de forma automática e funciona como um multivibrador. O capacitor C carrega por meio de R_A e R_B e, em seguida, descarrega somente através de R_B . Sendo assim, o ciclo de trabalho é controlado pelos valores de R_A e R_B . A conexão astável resulta na carga e descarga do capacitor C entre o nível de tensão limite ($2/3 * V_{cc}$) e o nível de tensão de disparo ($1/3 * V_{cc}$). Os tempos de carga e descarga e, consequentemente, a frequência e o ciclo de trabalho, não dependem da tensão de alimentação (INSTRUMENTS, 2006).

Figura 14 - Circuito para operação em modo astável do CI NE555P



Fonte: INSTRUMENTS (2006)

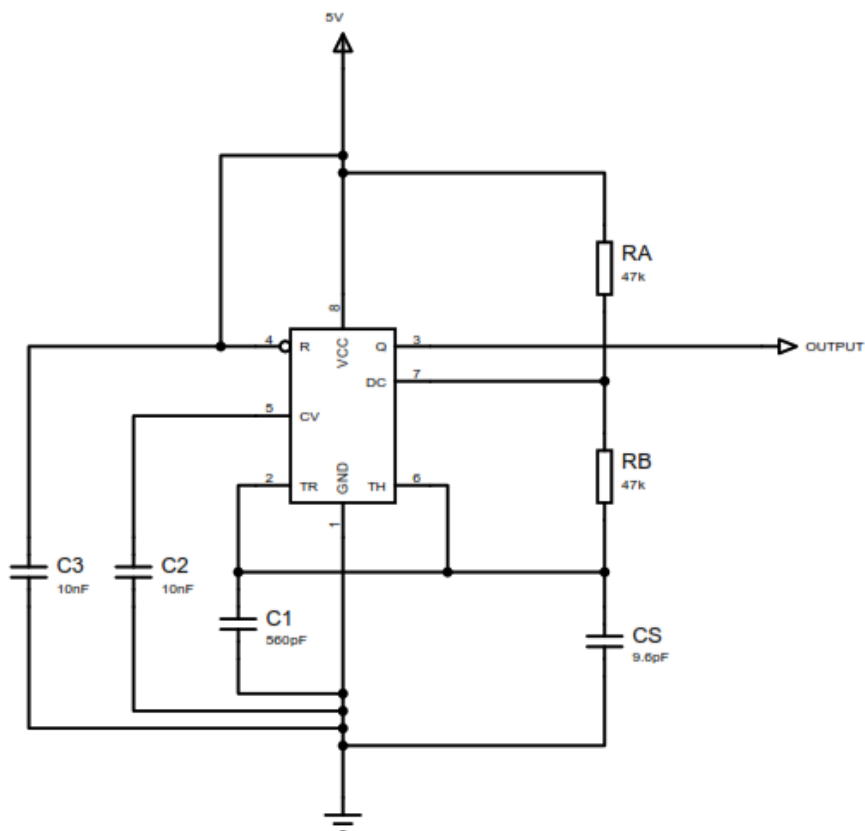
A frequência de oscilação da onda quadrada obtida pelo NE555P no modo astável é definida pela Equação (6), proposta por Instruments (2006).

$$f_{osc} = \frac{1,44}{(R_A + 2 \cdot R_B) \cdot C} \quad (6)$$

3.4.3 Circuito oscilador desenvolvido

Com base no circuito fornecido por Instruments (2006) no *datasheet* do NE555P, foi elaborado o circuito oscilador do projeto, configurando-se o CI no modo astável. Na Figura 15 é representado o circuito desenvolvido, onde ambos os resistores (R_A e R_B) possuem valor de 47 kΩ. Nos pinos 4 (C3) e 5 (C2) foram inseridos capacitores de poliéster de 10 nF conectados ao GND a fim de serem utilizados como filtro e, entre os pinos 1 e 2, foi adicionado um capacitor cerâmico (C1) de 560 pF com o intuito de diminuir a frequência de operação e ter variações menores ao inserir grãos de soja com diferentes teores de umidade no sensor, facilitando o processamento da leitura do período da onda. CS é o capacitor sensor, que apresenta capacitância de 9,6 pF quando vazio.

Figura 15 - Circuito oscilador desenvolvido



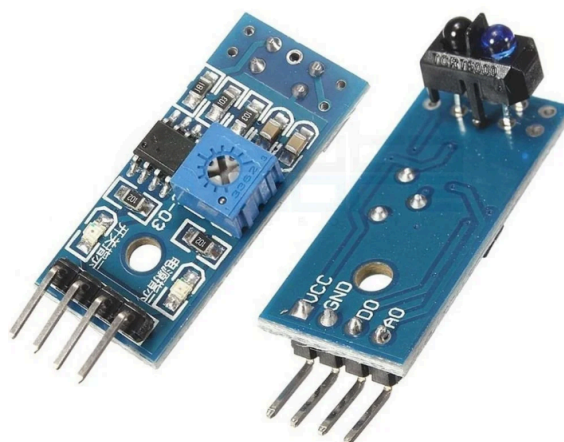
Fonte: Elaborado pelo autor

A definição dos componentes se deu através de testes realizados em bancada com o circuito montado em protoboard, além de cálculos realizados utilizando-se a fórmula da Equação (6).

3.5 Sensor óptico reflexivo TCRT5000

O sensor óptico reflexivo TCRT5000 é amplamente utilizado em aplicações que requerem detecção de presença ou ausência de objetos. É capaz de detectar objetos a uma distância efetiva entre 0,2 mm e 15 mm. Seu funcionamento é baseado na emissão de luz infravermelha a partir de um LED em direção a uma superfície. No momento em que essa luz atinge uma superfície, parte dela é refletida de volta ao sensor, o qual possui um fototransistor que detecta a quantidade de luz refletida. A corrente de operação é de aproximadamente 20 mA, enquanto a tensão varia entre 3,3 V e 5 V (MAKERHERO, 2024). A Figura 16 apresenta o sensor óptico reflexivo TCRT5000 acoplado ao módulo.

Figura 16 - Sensor óptico reflexivo TCRT5000 acoplado ao módulo

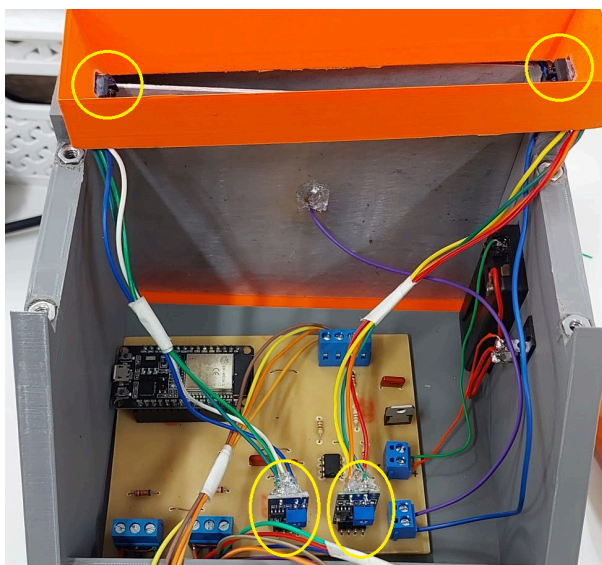


Fonte: ÔMEGA (2024)

Para garantir a confiabilidade e precisão dos resultados na determinação do teor de umidade da soja, o capacitor sensor do protótipo precisa estar completamente preenchido com grãos. Sendo assim, dois sensores ópticos reflexivos TCRT5000 foram instalados nas extremidades superiores da estrutura do capacitor sensor, onde os grãos são depositados, com a finalidade de verificar se o mesmo encontra-se totalmente cheio no momento da medição.

A Figura 17 mostra a ligação de ambos os sensores aos respectivos módulos, os quais estão conectados à PCB.

Figura 17 - Ligação dos sensores TCRT5000 aos respectivos módulos conectados à PCB



Fonte: Elaborado pelo autor

3.6 Circuito microcontrolado

O circuito microcontrolado do protótipo foi desenvolvido utilizando a placa de desenvolvimento ESP32 DevKit V1, a qual recebe, através do pino GPIO 34, o sinal da onda quadrada gerada pelo NE555P por meio do pino 3 (*output*) do CI. O microcontrolador é programado para medir o período da onda, ou seja, o tempo entre duas bordas de subida do sinal, por intermédio de interrupção de *hardware* vinculada a um pino de entrada digital, possibilitando determinar a frequência de operação. A partir disso, realiza o cálculo do teor de umidade do produto com base na equação da curva de calibração do sensor, obtida mediante regressão linear.

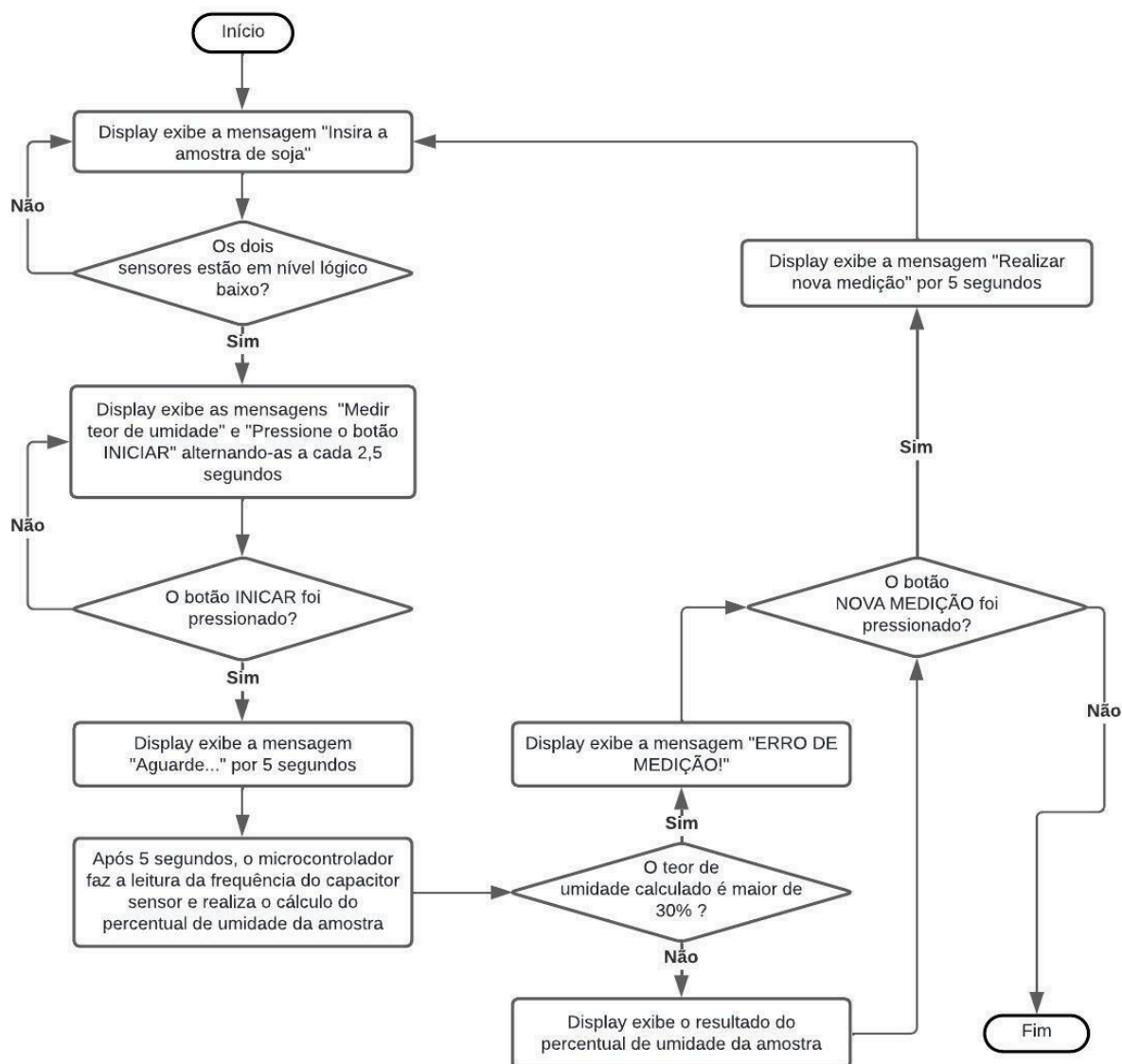
O Fluxograma 2 apresenta a programação do protótipo, onde observa-se que a medição do teor de umidade do produto só pode ser realizada quando ambos os sensores estiverem em nível lógico baixo, indicando que o capacitor sensor está completamente preenchido com grãos. O fluxograma também exibe as mensagens que aparecem na tela do *display* durante a medição, as quais orientam o usuário no andamento do processo.

3.6.1 ESP32 DevKit V1

A placa de desenvolvimento ESP32 DevKit V1, que pode ser vista na Figura 18, geralmente é aplicada em projetos de robótica, entretenimento, automação residencial, entre outros. Possui processador *dual-core* de 32 *bits* de até 240 MHz, 520 KB de RAM, 4 MB memória *flash* interna, além de *Wi-Fi* e *Bluetooth* integrados. É composta por 34 pinos GPIO, dos quais 22 são pinos digitais e 12 são pinos analógicos. Além disso, é compatível com várias linguagens de programação, como: C, C++, *Python*, Lua, *MicroPython* e *JavaScript* (MAKIYAMA, 2023a).

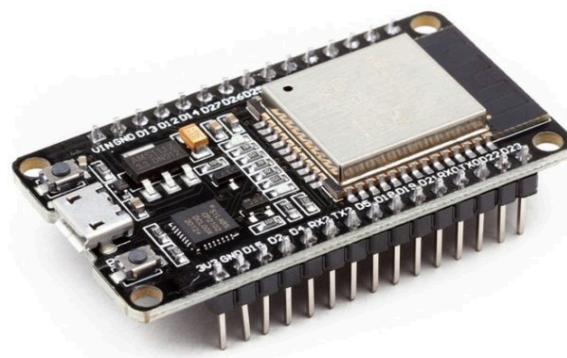
A tensão operacional varia de 2,3 V a 3,6 V. Quando é usada uma fonte de alimentação única, a recomendação é que a tensão seja de 3,3 V e a corrente de saída corresponda a 500 mA ou mais (SYSTEMS, 2019).

Fluxograma 2 - Programação do protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 18 - Placa de desenvolvimento ESP32 DevKit V1



Fonte: MAKIYAMA (2023)

3.6.2 Arduino IDE

A Arduino IDE é o *software* de programação onde o microcontrolador deste projeto foi programado, em linguagem C++. Consiste em um ambiente de fácil navegação e apresenta diversos recursos, como mostrado na Figura 19, com o intuito de facilitar e agilizar o processo de desenvolvimento e registro de códigos em determinada placa.

Figura 19 - Interface do *software* Arduino IDE



Fonte: Elaborado pelo autor

3.7 Interface homem-máquina (IHM)

A IHM compreende a comunicação entre humano e máquina, mais especificamente, entre operador e sistema, facilitando o entendimento do operador do sistema sobre o funcionamento da máquina ou do processo que está sendo executado (MAKIYAMA, 2023b).

A IHM do protótipo é apresentada na Figura 20, a qual é composta por um *display* LCD 16x2 acoplado ao módulo adaptador I2C, além de dois botões devidamente identificados, um para iniciar o processo de medição do teor de umidade da amostra inserida no sensor e outro para realizar uma nova medição.

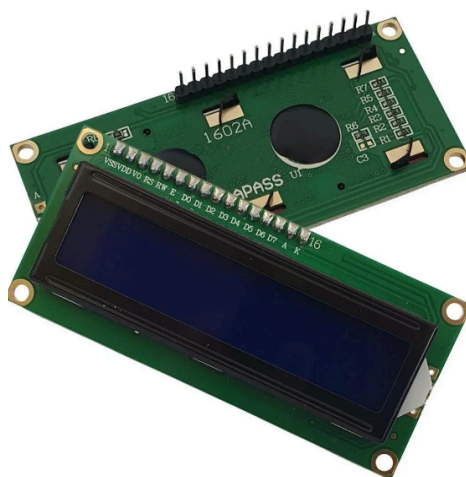
Figura 20 - IHM do protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor

3.7.1 Display LCD 16x2

O *display* LCD 16x2 possui 16 colunas e 2 linhas, podendo contar com luz de fundo azul ou verde, e caracteres na cor branca. É constituído por 16 pinos, dos quais 11 são de entrada/saída, o pino 1 e o 2 servem para conexões de alimentação, os pinos 15 e 16 para o *backlight* (luz de fundo) e o pino 3 para o contraste. Esse dispositivo facilita a conexão de uma interface homem-máquina (IHM), com a capacidade de exibir caracteres, letras e números de forma nítida e clara, expondo informações ou resultados sobre determinado processo ao usuário (MELLO, 2022). A Figura 21 representa um *display* LCD 16x2 com *backlight* azul.

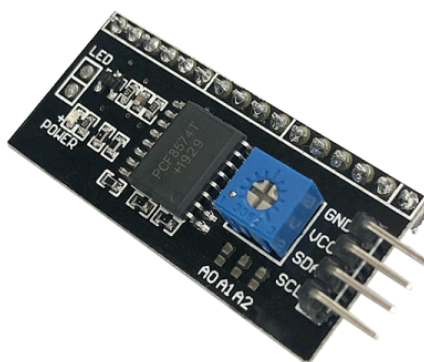
Figura 21 - Display LCD 16x2 com *backlight* azul

Fonte: AUTOCORE (2024)

3.7.2 Módulo adaptador I2C

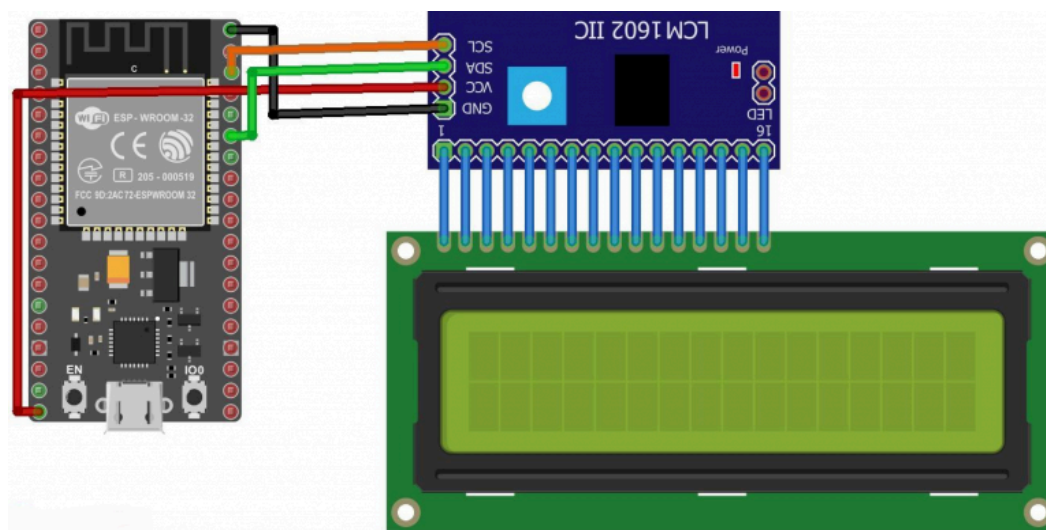
O módulo adaptador I2C, mostrado na Figura 22, possibilita uma conexão mais rápida e eficiente do *display* com o microcontrolador, reduzindo a quantidade de conectores e ligações na placa. No esquema de ligação apresentado na Figura 23, observa-se que, com apenas 4 fios condutores, é possível conectar o *display* na placa ESP32. O fio vermelho, ligado no pino 5 V da ESP, representa a alimentação do módulo, e o preto indica o GND. O fio verde e o laranja consistem na comunicação, constituída pelo pino SDA (*Serial Data*) e SCL (*Serial Clock*), e são conectados na GPIO 21 e 22, respectivamente. Para uma melhor conexão, é recomendável soldar o módulo no *display* (TEIXEIRA, 2019).

Figura 22 - Módulo adaptador I2C



Fonte: ROBOCORE (2024)

Figura 23 - *Display* LCD 16x2



Fonte: TEIXEIRA (2019)

3.8 Circuito de alimentação

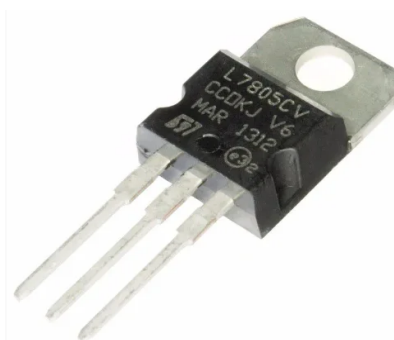
Os circuitos do protótipo são alimentados por uma bateria de 9 V recarregável, que pode ser vista na Figura 24. Para a alimentação do circuito oscilador, do *display* e da placa ESP32 é utilizado um regulador de tensão 7805, representado na Figura 25, o qual regula a tensão de entrada, que pode variar entre 8 V a 20 V, para uma tensão de saída estável de 5 V (STMICROELECTRONICS, 2004).

Figura 24 - Bateria de 9 V recarregável



Fonte: INSTRUTHERM (2015)

Figura 25 - Regulador de tensão 7805



Fonte: A2 ROBOTICS (2024)

Para ligar e desligar o equipamento, foi instalada uma chave gangorra *on/off* de dois terminais no circuito de alimentação. A Figura 26 apresenta a chave utilizada, juntamente com o suporte da bateria do protótipo, ambos situados na lateral do dispositivo.

Figura 26 - Chave gangorra *on/off* e suporte da bateria do protótipo



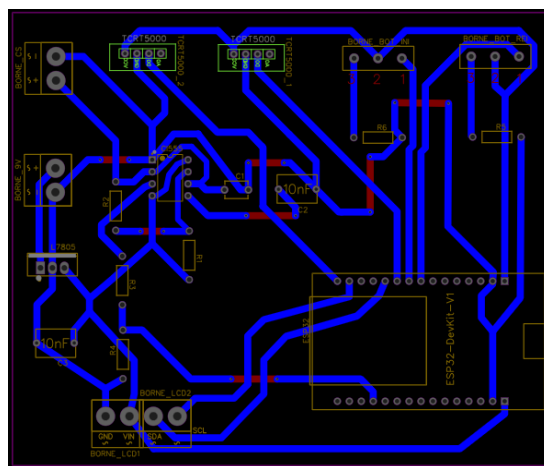
Fonte: Elaborado pelo autor

3.9 PCB (*Printed Circuit Board*)

A PCB, também conhecida como Placa de Circuito Impresso (PCI), é uma estrutura composta por trilhas condutoras de cobre que tem a função de conectar os componentes eletrônicos. Essa tecnologia permite a compactação dos dispositivos, além de melhorar a eficiência, a confiabilidade e a segurança dos circuitos eletrônicos (MAKIYAMA, 2024).

O esquema da PCB deste projeto, ilustrado na Figura 27, foi desenvolvido no *software* EasyEDA e o mesmo contempla todos os componentes eletrônicos do protótipo, incluindo o circuito oscilador, o sistema de alimentação, o microcontrolador, além dos sensores ópticos, botões e o *display*.

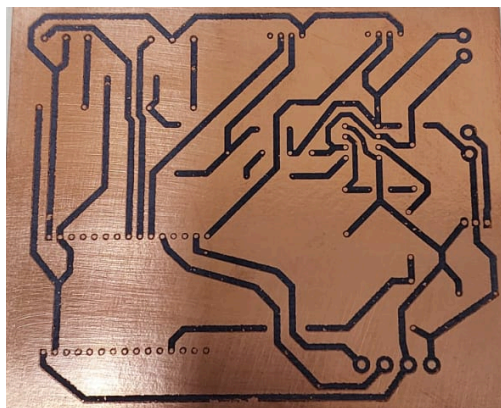
Figura 27 - Esquema da PCB do protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor

A PCB do protótipo foi confeccionada com placa de fenolite de face simples. A gravação das trilhas na face cobreada foi realizada transferindo a imagem do esquema da PCB, impresso em papel fotográfico, com o auxílio de um ferro de passar roupa em alta temperatura. A Figura 28 mostra a gravação do esquema na placa de fenolite.

Figura 28 - Gravação do esquema da PCB em placa de fenolite cobreada

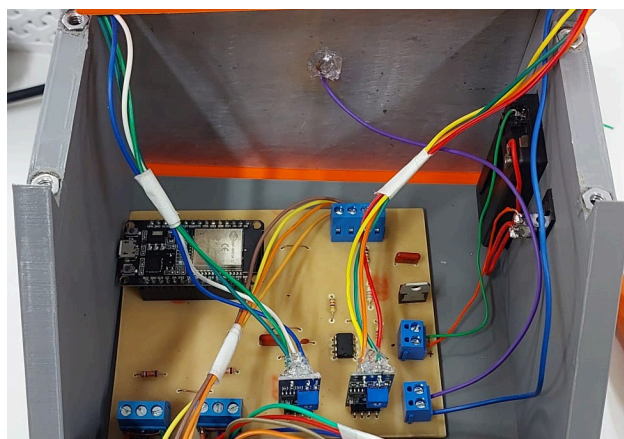


Fonte: Elaborado pelo autor

A placa foi imersa em uma solução de percloreto de ferro para promover sua corrosão e, em seguida, foi lavada com água. Posteriormente, os componentes foram soldados com estanho, utilizando um ferro de solda.

A Figura 29 apresenta a PCB do protótipo, localizada na parte interna do mesmo, com todos os componentes devidamente conectados.

Figura 29 - PCB do protótipo com componentes conectados



Fonte: Elaborado pelo autor

3.10 Calibração do protótipo

A calibração do protótipo foi realizada com base em padrões de referência, determinando-se a umidade de seis amostras de soja pelo método da estufa a 105 °C. O teor de umidade foi relacionado com a frequência obtida no sensor desenvolvido em cada amostra. A partir dos resultados alcançados, uma reta de regressão linear foi elaborada no *software* Microsoft Excel. A equação da reta foi inserida na programação do microcontrolador, possibilitando determinar a umidade do produto.

3.10.1 Amostras de soja utilizadas na calibração do protótipo

Foram selecionadas seis amostras de soja para a calibração do protótipo. Dentre elas, cinco foram umidificadas com diferentes quantidades de água a fim de gerar teores de umidade variados. O método de umidificação dos grãos ocorreu através do embebedimento com água.

Primeiramente, definiu-se o peso de cada amostra em 500 g utilizando uma balança analógica, ilustrada na Figura 30. As amostras foram colocadas em vasilhas, entre duas folhas de papel de germinação, conforme mostrado na Figura 31.

Figura 30 - Balança analógica



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 31 - Disposição das amostras de soja nas vasilhas entre duas folhas de papel de germinação



Fonte: Elaborado pelo autor

Em seguida, fazendo o uso de um copo medidor, com capacidade máxima de 10 ml, mediu-se a quantidade de água que foi adicionada em cada amostra. A água contida no copo foi transferida para um borrifador, permitindo sua aplicação uniforme sobre as amostras. O copo medidor e o borrifador utilizados são apresentados na Figura 32. Após a umidificação, as amostras ficaram em repouso por 24 horas, permitindo a completa absorção da água.

Figura 32 - Copo medidor e borrifador utilizados para a umidificação das amostras



Fonte: Elaborado pelo autor

As amostras foram identificadas com os números de 1 a 6, sendo que a amostra 1 foi utilizada como padrão e não passou pelo processo de umidificação. A Tabela 1 mostra a quantidade de água adicionada em cada amostra.

Tabela 1 - Quantidade de água inserida em cada amostra

Amostra	Quantidade de água adicionada (ml)
1	-
2	10
3	30
4	50
5	80
6	100

Fonte: Elaborado pelo autor

3.10.2 Determinação da frequência de operação do capacitor sensor

A frequência de operação do capacitor sensor do protótipo foi medida pelo microcontrolador, o qual foi programado para ler a frequência do sensor calculando o número de pulsos gerados pelo circuito oscilador em um intervalo de tempo específico e exibir o resultado na tela do *display*. Vale ressaltar que essa programação foi utilizada somente para analisar a frequência de operação no momento da calibração do sensor. Após os procedimentos de calibração, foi inserida a equação, obtida por meio de regressão linear, na programação, permitindo que o microcontrolador apresente o resultado do percentual de umidade da amostra na tela do *display*.

A medição da frequência com o capacitor sensor vazio e com o mesmo contendo cada uma das seis amostras selecionadas foi realizada antes do processo de determinação do teor de umidade pelo método da estufa a 105 °C. Foram realizadas três medições de frequência para cada amostra e, em seguida, foi calculada a média dos resultados obtidos.

A frequência do capacitor sensor vazio, ou seja, considerando somente o vácuo como meio dielétrico, corresponde a 15 kHz, como apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Frequência do capacitor sensor vazio



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados das três medições da frequência do capacitor sensor contendo cada amostra, com as respectivas médias calculadas, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultado das medições da frequência do capacitor sensor contendo cada amostra com as respectivas médias calculadas

Amostra	Medição 1 (Hz)	Medição 2 (Hz)	Medição 3 (Hz)	Média (Hz)
1	14007	14007	14005	14006
2	13728	13726	13711	13722
3	13505	13499	13487	13497
4	13226	13200	13187	13204
5	12689	12663	12797	12716
6	11806	11846	11990	11881

Fonte: Elaborado pelo autor

3.10.3 Determinação do teor de umidade das amostras pelo método da estufa a 105 °C

A determinação do teor de umidade das amostras foi realizada em laboratório através do método da estufa a 105 °C. A estufa utilizada nesse procedimento é apresentada na Figura 34.

Figura 34 - Estufa utilizada para a determinação do teor de umidade das amostras



Fonte: Elaborado pelo autor

Inicialmente, a estufa foi ajustada na temperatura de 105 °C, onde foi realizada a secagem dos recipientes destinados a acomodar os grãos de soja, assim como de um béquer contendo sílica gel utilizada no dessecador. Os recipientes e o béquer permaneceram na estufa por 30 minutos. Esse procedimento é apresentado na Figura 35. Após a secagem, os recipientes foram resfriados em um dessecador, ilustrado na Figura 36.

Figura 35 - Recipientes e béquer contendo sílica gel na estufa de secagem



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 36 - Dessecador utilizado para resfriar os recipientes



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir disso, os recipientes e suas respectivas tampas foram pesados em uma balança analítica de precisão com sensibilidade de 0,001 g, apresentada na Figura 37. Em seguida, realizou-se a pesagem das amostras de soja, tarando os recipientes com suas tampas. Cerca de 50 g de cada amostra foram inseridos nos recipientes.

Figura 37 - Balança analítica de precisão



Fonte: Elaborado pelo autor

Posteriormente à pesagem inicial, as amostras foram colocadas na estufa, onde permaneceram por 24 horas a uma temperatura de 105 °C. A Figura 38 mostra os recipientes, sobre as respectivas tampas, contendo as amostras de soja na estufa de secagem.

Figura 38 - Recipientes contendo as amostras de soja na estufa de secagem



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao serem retirados da estufa, os recipientes com as amostras foram imediatamente tampados e transferidos para o dessecador, onde permaneceram por, aproximadamente, 40 minutos, para resfriamento. Depois disso, as amostras, juntamente com seus recipientes tampados, foram pesadas novamente na balança de precisão. O resultado das pesagens inicial e final das amostras, além do peso dos recipientes com tampa, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultado das pesagens dos recipientes com tampa e das pesagens inicial e final das amostras

Amostra	Peso do recipiente com tampa (g)	Peso inicial da amostra (g)	Peso inicial + recipiente com tampa (g)	Peso final + recipiente com tampa (g)
1	24,947	50,125	75,072	69,845
2	23,598	50,168	73,766	67,596
3	24,484	50,060	74,544	67,128
4	22,574	50,182	72,756	64,024
5	37,692	50,196	87,888	77,056
6	26,512	50,009	76,521	65,510

Fonte: Elaborado pelo autor

Para calcular o teor de umidade contido em cada amostra, utilizou-se a fórmula apresentada na Equação (7), sugerida por Brasil (2009):

$$\% \text{ de Umidade } (U) = \frac{100 * (P-p)}{P-t} \quad (7)$$

onde:

P = peso inicial, peso do recipiente e sua tampa mais o peso do grão úmido (g);

p = peso final, peso do recipiente e sua tampa mais o peso do grão seco (g);

t = tara, peso do recipiente com sua tampa (g).

A Tabela 4 apresenta o teor de umidade de cada amostra.

Tabela 4 - Teor de umidade de cada amostra determinado pelo método da estufa a 105 °C

Amostra	Teor de umidade (%)
1	10,4
2	12,3
3	14,8
4	17,4
5	21,6
6	22

Fonte: Elaborado pelo autor

3.10.4 Reta de regressão linear

A reta de regressão linear estabelece a relação entre uma variável independente e sua correspondente variável dependente, representada por uma linha reta. Quando os pontos em um gráfico estão distribuídos de forma caótica, não é possível traçar uma linha reta que cruze por todos eles. Nesse caso, utiliza-se o método de regressão linear para posicionar a reta de forma que minimize as distâncias dos pontos à linha. Embora alguns pontos fiquem afastados, essas distâncias são reduzidas ao máximo possível (EBAC, 2023).

O coeficiente de determinação (R^2) determina a qualidade do ajuste do modelo aos dados. O valor desse coeficiente varia de 0 a 1 e, quanto mais próximo de 1 for o resultado, melhor será o ajuste da regressão linear aos dados do gráfico (DNC, 2024).

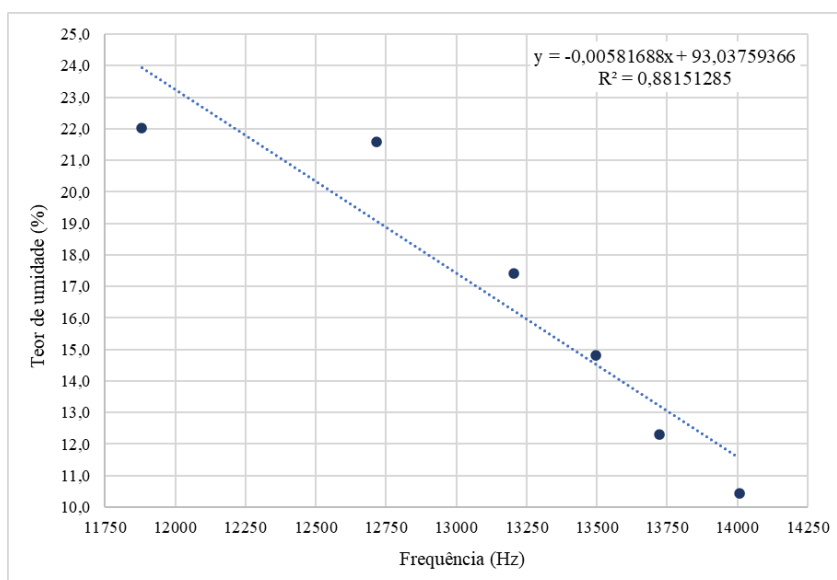
A reta de regressão linear utilizada na calibração do protótipo foi elaborada no *software* Microsoft Excel a partir do gráfico da relação entre a frequência média apresentada pelo capacitor sensor e o teor de umidade determinado pelo método da estufa para cada amostra. Os valores obtidos, juntamente com os resultados da regressão linear e o coeficiente de determinação (R^2), são apresentados no Gráfico 1, o qual foi gerado a partir dos dados da Tabela 5, que mostra a frequência média do capacitor sensor para os diferentes teores de umidade contido nas amostras.

Tabela 5 - Frequência média do capacitor sensor para os diferentes teores de umidade contido nas amostras

Amostra	Frequência média (Hz)	Teor de umidade (%)
1	14006	10,4
2	13722	12,3
3	13497	14,8
4	13204	17,4
5	12716	21,6
6	11881	22

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 1 - Reta de regressão linear da relação entre o teor de umidade e a frequência média obtida nos ensaios com as amostras



Fonte: Elaborado pelo autor

A equação da reta de regressão linear encontrada é evidenciada na Equação (8).

$$y = -0,00581688x + 93,03759366 \quad (8)$$

Na Equação (8), y é a variável dependente, que é calculada com base no valor de x , a qual é considerada a variável independente. O coeficiente angular de -0,00581688 indica que, para cada aumento de uma unidade em x , y diminui em 0,00581688. O valor de 93,03759366 representa o valor de y quando x for igual a 0, ou seja, a intercepção da reta no eixo y .

O coeficiente de determinação (R^2) encontrado para a reta de regressão linear, corresponde a 0,88151285.

Após determinar a equação da reta de regressão linear, a mesma foi inserida no código da programação do microcontrolador, onde o teor de umidade é representado pela variável y ,

que é calculado com base na frequência de operação do sensor, considerada a variável x . A Figura 39 mostra o trecho do código responsável por calcular o teor de umidade da amostra.

Figura 39 - Trecho do código responsável por calcular o teor de umidade da amostra

```
float frequencia = (contagemPulsos / (float)INTERVALO_MEDICAO_MS) * 1000;  
  
float umidade = (-0.00581688 * frequencia) + 93.03759366;
```

Fonte: Elaborado pelo autor

3.11 Testes de precisão do protótipo

Os testes de precisão do protótipo foram realizados comparando os resultados das medições de seis amostras de soja com diferentes teores de umidade às medições realizadas em um medidor de umidade da fabricante Motomco, modelo 999 FB, utilizado como referência. O equipamento de referência é apresentado na Figura 40.

Figura 40 - Medidor de umidade de grãos Motomco 999 FB



Fonte: Elaborado pelo autor

3.12 Cálculo das incertezas

Os métodos utilizados para quantificar as incertezas nas medições dos ensaios realizados com o protótipo e com o equipamento de referência incluem o erro absoluto, o erro relativo e o desvio padrão. O objetivo é analisar a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos com o protótipo desenvolvido.

3.12.1 Erro absoluto

O erro absoluto expressa a diferença direta entre o valor medido e o valor verdadeiro ou de referência. É sempre um valor positivo e é expresso na mesma unidade da grandeza que está sendo analisada (BENÍTEZ, 2020). No caso da determinação do erro absoluto do protótipo, o resultado é apresentado em porcentagem de umidade, uma vez que a medição envolve a umidade dos grãos.

A fórmula proposta por Benítez (2020), apresentada na Equação (9), foi utilizada para o cálculo do erro absoluto do medidor de umidade de grãos desenvolvido.

$$\text{Erro absoluto} = |\text{Valor real} - \text{Valor medido}| \quad (9)$$

A fim de determinar o erro absoluto, considerou-se como *Valor real* o resultado da medição obtida no equipamento de referência e, como *Valor medido*, o resultado da média das três medições feitas com o protótipo em cada amostra.

3.12.2 Erro relativo

O erro relativo, expresso em porcentagem, é empregado para avaliar a precisão de uma medição, pois indica o quanto o valor obtido se aproxima do valor verdadeiro ou de referência. Ele coloca em perspectiva a influência do erro na medição, ou seja, quanto esse erro pode impactar a confiabilidade do resultado. Quanto menor for o erro relativo, maior será a qualidade da medição, refletindo uma maior precisão (BENÍTEZ, 2020).

O cálculo do erro relativo das medições realizadas pelo protótipo foi realizado através da Equação (10), fornecida por Benítez (2020).

$$\text{Erro relativo} = \frac{\text{Erro absoluto}}{\text{Valor real}} \quad (10)$$

O erro médio relativo foi determinado pela soma dos erros relativos de cada amostra, dividida pelo número total de amostras. Esse valor proporciona uma média do erro percentual, refletindo a precisão do protótipo de forma geral.

3.12.3 Desvio Padrão

O desvio padrão indica o grau de dispersão de um conjunto de dados em relação à média e é apresentado na mesma unidade de medida dos resultados analisados. Esse parâmetro mostra o quão consistentes ou uniformes são os valores dentro do conjunto. Quanto

mais próximo de zero for o desvio padrão, maior será a homogeneidade dos dados, indicando que as medições estão mais concentradas em torno da média (GOGONI, 2023).

Com base nos resultados das medições realizadas pelo medidor de umidade de grãos desenvolvido, calculou-se o desvio padrão de cada amostra utilizando a função DESVPAD.A no *software* Microsoft Excel. Também determinou-se o desvio padrão médio, somando os valores dos desvios padrão de cada amostra e dividindo o resultado pelo número de amostras.

3.13 Orçamento do projeto

A Tabela 6 apresenta o orçamento deste projeto, incluindo o valor dos componentes e de alguns materiais utilizados no desenvolvimento do protótipo.

Tabela 6 - Orçamento do projeto

Item	Quant.	Un.	Valor un. (R\$)	Valor total (R\$)
Barra de pinos 1x40 fêmea	1	un	3,00	3,00
Bateria recarregável de 9 V 12800 mAh	1	un	106,40	106,40
Bobina de filamento PLA	1	un	152,00	152,00
Capacitor cerâmico 560 pF	1	un	1,00	1,00
Capacitor de poliéster 10 nF 250V	2	un	0,50	1,00
Chave tátil 12x12x3 mm	2	un	2,00	4,00
CI NE555P	1	un	5,00	5,00
Conector borne 2 vias	4	un	4,00	16,00
Conector borne 3 vias	2	un	3,00	6,00
Display LCD 16x2 com módulo I2C	1	un	41,90	41,90
LM7805	1	un	2,50	2,50
Módulo com sensor TCRT5000	2	un	10,00	20,00
Placa de fenolite 10x10 cm	1	un	10,00	10,00
Placa ESP32 DevKit V1	1	un	46,90	46,90
Placas de alumínio	2	un	10,00	20,00
Resistor 10 k Ω	3	un	0,20	0,60
Resistor 4,7 k Ω	1	un	0,20	0,20
Resistor 47 k Ω	2	un	0,20	0,40
Suporte para bateria de 9V	1	un	25,00	25,00
			Total:	461,90

Fonte: Elaborado pelo autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos em medições realizadas com o medidor de umidade de grãos desenvolvido serão apresentados neste capítulo. Para avaliar a precisão do protótipo, os dados foram comparados com as medições do equipamento de referência. A partir disso, foi possível calcular o erro absoluto, o erro relativo e o desvio padrão das medições do medidor projetado, permitindo analisar seu desempenho e confiabilidade.

4.1 Teor de umidade das amostras determinado pelo equipamento de referência

A Tabela 7 mostra o resultado do teor de umidade contido em cada uma das seis amostras de soja que foram analisadas no equipamento de referência.

Tabela 7 - Resultado da medição do teor de umidade das seis amostras de soja analisadas no equipamento de referência

Amostra	Teor de umidade (%)
1	10,8
2	14,7
3	17,2
4	18,6
5	21,2
6	29,2

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 Teor de umidade das amostras determinado pelo protótipo desenvolvido

Após a análise no equipamento de referência, realizaram-se três medições do teor de umidade de cada amostra com o equipamento desenvolvido. Na Figura 41, é mostrado o processo de medição do teor de umidade das amostras no protótipo. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8.

Figura 41 - Medição do teor de umidade das amostras no protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8 - Resultados obtidos pelo protótipo nas medições do teor de umidade das amostras de soja

Amostra	Medição 1 Teor de umidade (%)	Medição 2 Teor de umidade (%)	Medição 3 Teor de umidade (%)
1	12	11,1	10,9
2	14,7	13,8	14,2
3	16,2	16,7	17,3
4	18,7	18	18,7
5	22,8	22,3	21,1
6	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

Não foi possível determinar o teor de umidade da amostra 6 com o protótipo desenvolvido, pois o mesmo apresentou inconsistência nas medições, com a frequência de operação registrada como zero. A frequência gerada pelo CI NE555P é determinada pela Equação (6), que relaciona os componentes do circuito com a frequência de oscilação. Em amostras com teores elevados de umidade, em torno de 30%, a capacitância do capacitor sensor aumenta significativamente, reduzindo a frequência para valores próximos de zero.

Nessas condições, o CI pode interpretar a saída como uma frequência nula, resultando em leituras incoerentes.

4.3 Comparação dos resultados obtidos com o protótipo e o equipamento de referência

A partir das medições realizadas nos equipamentos, os resultados foram comparados. Foi calculada a média das três medições do protótipo para cada amostra e comparada com as medições do equipamento de referência. Os resultados obtidos são exibidos na Tabela 9.

Tabela 9 - Comparação dos resultados das medições do equipamento de referência com a média das medições do protótipo em cada amostra

Amostra	Equipamento de referência (%)	Média do protótipo (%)
1	10,8	11,3
2	14,7	14,2
3	17,2	16,7
4	18,6	18,5
5	21,2	22,1
6	29,2	-

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 Determinação do erro absoluto

Ao comparar os resultados obtidos, foi possível determinar o erro absoluto apresentado pelo protótipo nas medições realizadas, conforme mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Erro absoluto apresentado pelo protótipo na medição do teor de umidade das amostras

Amostra	Erro absoluto (%)
1	0,5
2	0,5
3	0,5
4	0,1
5	0,9
6	-

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base na determinação do erro absoluto para cada amostra, foi calculado o erro médio absoluto, que resultou em 0,5%.

4.5 Determinação do erro relativo

Na Tabela 11, é possível analisar o erro relativo apresentado pelo protótipo com base nos resultados obtidos no equipamento de referência na medição do teor de umidade das amostras.

Tabela 11 - Erro relativo apresentado pelo protótipo na medição do teor de umidade das amostras

Amostra	Erro relativo (%)
1	4,63
2	3,40
3	2,91
4	0,54
5	4,25
6	-

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da determinação do erro relativo para cada amostra, foi calculado o erro médio relativo, onde obteve-se o resultado de 3,14%.

Considerando o erro médio relativo, o protótipo poderia apresentar um teor de umidade acima de 30% na medição da amostra 6. Não sendo possível determinar a umidade dessa amostra com o dispositivo desenvolvido, foi inserida na programação do microcontrolador uma condição que, caso a umidade calculada pelo mesmo seja superior a 30%, é exibida a mensagem “ERRO DE MEDIÇÃO!” na tela do *display* do protótipo, como pode ser visto na Figura 42.

Figura 42 - Mensagem de erro exibida na tela do *display*



Fonte: Elaborado pelo autor

4.6 Determinação do desvio padrão

O desvio padrão das medições do protótipo em comparação com os resultados do equipamento de referência é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Desvio padrão apresentado pelo protótipo na medição do teor de umidade das amostras

Amostra	Desvio padrão (%)
1	0,6
2	0,5
3	0,6
4	0,4
5	0,9
6	-

Fonte: Elaborado pelo autor

Também realizou-se o cálculo do desvio padrão médio das medições do protótipo, obtendo-se o resultado de 0,6%.

5 CONCLUSÃO

Tendo em vista a importância de determinar o teor de umidade dos grãos a fim de evitar prejuízos no momento da colheita, no processo de armazenagem e na comercialização dos produtos agrícolas, este trabalho propôs o estudo e o desenvolvimento de um medidor de umidade de grãos de soja portátil e de baixo custo, quando comparado aos modelos disponíveis no mercado que utilizam o princípio capacitivo para determinar a umidade em grãos.

A revisão bibliográfica contribuiu na definição do método por capacitância para ser implementado no protótipo, garantindo baixo custo e alta precisão nos resultados. Também foi fundamental para o dimensionamento do capacitor sensor e dos circuitos que compõem o dispositivo, além de auxiliar na compreensão dos fatores que podem interferir nas medições.

Os componentes utilizados e o método de medição empregado no protótipo ajudaram a reduzir os custos, além de facilitar o uso do equipamento. O sistema foi projetado para ser operado de forma prática e rápida, permitindo que qualquer indivíduo obtenha o resultado do teor de umidade dos grãos com facilidade. Pelo fato do equipamento determinar o teor de umidade através de um método não destrutivo, basta inserir a amostra de soja no sensor e pressionar um botão para realizar a medição, sem a necessidade de pesá-la.

A partir da comparação dos resultados de medições do teor de umidade de diversas amostras com um equipamento de referência, o protótipo apresentou um erro médio absoluto de 0,5%, erro médio relativo de 3,14% e desvio padrão médio de 0,6%. Embora o dispositivo tenha fornecido resultados satisfatórios em amostras com umidade variando de 10,8% a 21,2%, observou-se que, em grãos contendo por volta de 30% de umidade, não foi possível obter valores consistentes. Por se tratar de um equipamento de baixo custo, pode-se concluir que o medidor de umidade de grãos desenvolvido demonstrou um desempenho confiável e preciso em determinados níveis de umidade das amostras.

Sendo assim, é viável o uso do equipamento desenvolvido por produtores rurais, devido ao baixo custo, facilidade de operação, portabilidade, precisão e rapidez na obtenção de resultados em medições do teor de umidade da soja, dessa forma, garantindo a qualidade do produto na colheita, na armazenagem e na comercialização, evitando descontos no pagamento do produto por parte do armazém.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Apesar do protótipo desenvolvido ter apresentado resultados satisfatórios, existem alguns aprimoramentos que podem ser realizados em futuros trabalhos. Com o intuito de melhorar a precisão das medições em amostras com teores de umidade próximos a 30%, sugere-se ajustar os valores dos componentes do circuito oscilador, possibilitando que o CI 555 realize leituras mais precisas da frequência de operação em níveis de capacitância mais elevados. Além disso, a substituição do sensor atual, baseado em um capacitor de placas paralelas, por um modelo de cilindros concêntricos pode contribuir para uma maior estabilidade e sensibilidade nas medições. Por fim, seria relevante realizar a calibração do equipamento para outros tipos de grãos, como milho e trigo.

REFERÊNCIAS

- AFINKO. **O que é a titulação Karl Fischer?** 02 abr. 2024. Disponível em: <<https://afinkopolimeros.com.br/o-que-e-a-titulacao-karl-fischer/>>. Acesso em: 27 mai. 2024.
- AMOEDO, L. H. G.; MURADIAN, L. B. de A. Comparação de metodologias para a determinação de umidade em geléia real. **Revista Química Nova**, v. 25, n. 4, p. 676-679, 2002.
- ANTUNES, A. M. *et al.* Avaliação de metodologias para determinação do teor de água nos grãos de *Oryza Sativa L.* e de *Coffea Crabica L.* **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 34, n. 4, p. 583-591, out. - dez. 2019.
- APROSOJA. **A Soja**. 2023. Disponível em: <<https://aprosojabrasil.com.br/a-soja/>>. Acesso em: 02 mai. 2024.
- ARAÚJO, G. M. **Sistema de baixo custo para determinação do teor de água e massa específica aparente de feijão e milho**. 2018. 51 f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018.
- ARAUJO, W. D. *et al.* Propriedades físicas dos grãos de amendoim durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 3, p. 279–286, mar. 2014.
- BARTLEY, J. R. P. G.; NELSON, S. O.; MCCLENDON, R. W. Dimensional analysis of a permittivity measurement probe. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 51, n. 6, p. 1312–1315, 2002.
- BENÍTEZ, L. Cálculo do erro absoluto e do erro relativo. **YuBrain**, 2020. Disponível em: <<https://www.yubrain.com/pt-br/ciencia/erro-relativo-e-calculo-de-erro-absoluto/>>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- BERBERT, P. A. *et al.* Construção e avaliação de um capacitor de cilindros concêntricos para determinação das propriedades dielétricas de grãos. **Engenharia Agrícola**, v. 18, p. 76-91, 1998.
- BESSA, W. S. *et al.* Analysis of capacitive measurements at low frequencies for moisture content determination in soybeans. **Brazilian Journal of Instrumentation and Control**, v. 1, n. 1, p. 29-34, 20 Nov. 2013.
- BOSCHIERO, Beatriz Nastaro. 6 maiores produtores de soja do mundo: quando e quanto produzem? **Blog AgroAdvance**, 08 set. 2023. Disponível em: <<https://agroadvance.com.br/blog-6-maiores-produtores-de-soja-do-mundo/#:~:text=Produtividade%20m%C3%A9dia%20de%20soja%20dos,de%2012%20milh%C3%B5es%20de%20toneladas>>. Acesso em: 02 mai. 2024.
- BOTELHO, Fernando Mendes *et al.* Influência da temperatura de secagem sobre as propriedades físicas dos grãos de soja. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, vol. 23, n. 3, p. 212-219, mai. / jun. 2015.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF, 2009.

CONAB. Portal de Informações Agropecuárias. **Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB)**, 2024. Disponível em:
<<https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-graos.html>>. Acesso em: 26 out. 2024.

CORREA; A. C. B. **Medidor de umidade de grãos com interface de usuário utilizando protocolos de comunicação para internet das coisas**. 2020. 96 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Industrial Elétrica com Ênfase em Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

DEBYE, P. Polar Molecules. **New York: The Chemical Catalog Co.**, 1929.

DEL AGUILA, L. S. H.; DEL AGUILA; J. S.; THEISEN, G. Perdas na Colheita na Cultura da Soja. **Comunicado Técnico 271 - EMBRAPA**, Pelotas, dez. 2011. 12 p.

DNC, E. **Análise de Regressão e Coeficiente de Determinação: Guia Completo**. 2024. Disponível em:
<<https://www.escoladnc.com.br/blog/analise-de-regressao-e-coeficiente-de-determinacao-guia-completo/>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

DOMINGUES, A. N.; CANEPPELE, C.; CANEPPELE, M. A. B. **Armazenagem de Grãos a Granel e em Sacarias**. Cuiabá, 2005. 104 p.

EBAC. **Regressão Linear: teoria e exemplos**. 2023. Disponível em:
<<https://ebaonline.com.br/blog/regressao-linear-seo>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

FREITAS, Márcio de Campos Martins de. A cultura da soja no brasil: o crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, vol.7, n.12, 2011.

GEHAKA. **Manual de instruções - Medidor de umidade de grãos G610i**. São Paulo, 16 nov. 2016.

GEHAKA. **Medidor de umidade de grãos portátil G610i**. 2024. Disponível em:
<<https://www.gehaka.com.br/produtos/linha-agricola/medidor-de-umidade-de-graos-portatil/g610i>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

GOGONI, R. Como calcular desvio padrão no Microsoft Excel (DESVPAD.P). **Tecnoblog**, 2023. Disponível em:
<<https://tecnoblog.net/responde/como-calcular-desvio-padrao-no-microsoft-excel-desvpad-p/>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física - Eletromagnetismo**. Grupo Gen - LTC, v. 3, ed. 10, Rio de Janeiro, 2016.

INSTRUMENTS, T. **NA555, NE555, SA555, SE555 Precision timers**. June, 2006.

JENSEN, P. D. *et al.* Moisture content determination in solid biofuels by dielectric and NIR reflection methods. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, n. 11, p. 935–943, Nov. 2006.

JÚNIOR, M. L. L. **Desenvolvimento de um sistema capacitivo para medição de umidade de sementes embarcado em uma colhedora**. 2009. 178 f. Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

LEAL, J. G. T. Portaria SDA nº 532, de 14 de fevereiro de 2022. **Diário Oficial da União - Seção 1**, n. 35, p. 3, 18 fev. 2022.

LOPES, Maria Aparecida da Silva *et al.* Propriedades físicas dos grãos de soja, cotilédones e impurezas. **Revista de Ciências Agrárias**, Rio Verde, v. 42, n. 4, p. 962–970, 1 dez. 2019.

LUZ, Maria Laura Gomes Silva da. Medidores de umidade. **Revista Seed News**, ed. 6, jan. 2002.

MAKERHERO. **Sensor Óptico Reflexivo TCRT5000**. 2024. Disponível em: <<https://www.makerhero.com/produto/sensor-optico-reflexivo-tcrt5000/>>. Acesso em: 07 nov. 2024.

MAKIYAMA, M. IHM: o que é, para que serve e principais tipos [GUIA]. **Blog Victor Vision**, 2023b. Disponível em: <<https://victorvision.com.br/blog/ihm/>>. Acesso em: 15 jun. 2024.

MAKIYAMA, M. Placa ESP32: Descubra o que é, para que serve e muito mais! **Blog Victor Vision**, 2023a. Disponível em: <<https://victorvision.com.br/blog/placa-esp32/#:~:text=A%20ESP32%20%C3%A9%20uma%20placa%20de%20desenvolvimento%20de%20hardware%20aberto,vantagem%20em%20rela%C3%A7%C3%A3o%20ao%20Arduino>>. Acesso em: 15 jun. 2024.

MAKIYAMA, M. Tipos de PCB: o que são, para que servem e quais são seus tipos! **Blog Victor Vision**, 2024. Disponível em: <<https://victorvision.com.br/blog/tipos-de-pcb/#:~:text=PCB%20%C3%A9%20a%20sigla%20em,formando%20um%20circuito%20elet%C3%B4nico%20completo>>. Acesso em: 07 nov. 2024.

MANDARINO, José Marcos Gontijo. Origem e história da soja no Brasil. **Blog Canal Rural**, 05 abr. 2017. Disponível em: <<https://blogs.canalrural.com.br/embrapasoja/2017/04/05/origem-e-historia-da-soja-no-brasil/>>. Acesso em: 02 mai. 2024.

MARRARI. **Grãos e Sementes: A importância do controle da umidade**. 2023. Disponível em: <<https://www.marrari.com.br/gaos-e-sementes-pt/soja-como-medir-e-controlar-a-umidade-e-m-tempo-real/>>. Acesso em: 25 mai. 2024.

MATHEWS, J. The design of an electrical capacitance-type moisture meter for agricultural use. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 8, p. 17-30, 1963.

MATTEDE, H. Configurações básicas do CI 555. **Blog da Eletrônica**. 2022. Disponível em: <<https://www.blogdaeletronica.com.br/configuracoes-basicas-do-ci-555/#bio>>. Acesso em: 14 jun. 2024.

MELLO, M. Display LCD 16×2: Dicas e como usar no Arduino ou no Raspberry Pi. **Blog Victor Vision**, 13. dez. 2022. Disponível em: <<https://victorvision.com.br/blog/display-lcd-16x2/>>. Acesso em: 18 jun. 2024.

MOL, R. Entendendo o 555 – O canivete suíço da eletrônica. **Maker Hero**, 05 jun. 2020. Disponível em: <<https://www.makerhero.com/blog/entendendo-o-555-o-canivete-suico-da-eletronica/#:~:text=Na%20configura%C3%A7%C3%A3o%20ast%C3%A1vel%2C%20temos%20o,se%20obter%20o%20circuito%20ast%C3%A1vel>>. Acesso em: 14 jun. 2024.

MORITZ, Aline *et al.* Comparação de métodos para a determinação do teor de umidade em grãos de milho e de soja. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v. 5, n. 2, p. 145-154, 2012.

MOTOMCO. **Perguntas frequentes**. 2024. Disponível em: <https://motomco.com.br/faq/>. Acesso em: 02 mai. 2024.

MOURA, Eros Estevão de. **Proposta computacional para medição on-line do teor de água de grãos de sorgo**. 2012. 156 f. Tese de doutorado em Produção Vegetal - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, dez. 2012.

NELSON, S. O. Dielectric properties of agricultural products. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, v. 26, n. 5, p. 845-869, Oct. 1991.

NELSON, S. O. Measurement and application of dielectric properties of agricultural products. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 41, n. 1, p. 116-122, Feb. 1992.

NELSON, S. O. Using cereal grain permittivity for sensing moisture content. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 49, n. 3, p. 470-475, June 2000.

NELSON, S. O.; TRABELSI, S.; KRASZEWSKI, A. W. RF sensing of grain and seed moisture content. **IEEE Sensors Journal**, v. 1, n. 2, p. 119-126, Aug. 2001.

NETHERCOTT, J. Capacitance Meter MK II. **Pic Tutorials – Electronic and programming simplified**, 25 Jan. 2014. Disponível em: <<https://wordpress.codewrite.co.uk/pic/2014/01/25/capacitance-meter-mk-ii/>>. Acesso em: 30 mai. 2024.

OLIVEIRA, J. A.; ROSA, S. D. V. F. da ; CARVALHO, E. R. Secagem de sementes. In: **Processamento pós-colheita de sementes: abordagem agrônômica visando aprimorar a qualidade**, ed. 1, Editora: Ufla, p. 68-93, 2021.

OLIVIO, T. E. **Determinação da umidade da soja por medida capacitiva**. 2010. 78 f. Dissertação - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

ONETTA, Jennifer de Souza. **Propriedades Físicas de Grãos de Soja em Diferentes Safras**. 2018. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Faculdade de Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Sinop, 2018.

ONETTA, Jennifer de Souza; RUFFATO, Solenir. Propriedades físicas de grãos de soja em diferentes safras. **Anais - VII Conferência Brasileira de Pós-Colheita**, p. 593-599, 2018.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C. **Análises de materiais biológicos**. 21 f. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

PAWLOWSKI, M. de O. P. *et al.* Desenvolvimento de um sensor de umidade para grãos de café utilizando o método capacitivo. **XXII Congresso Brasileiro de Automática**, 2018.

PHELPS. **Medidor de umidade de grãos portátil milho trigo soja café**. 2024. Disponível em:

<https://www.phelpsequipamentos.com.br/medidor-de-umidade-de-gros-portatil-milho-trigo-soja-cafe/p/MLB25901816?pdp_filters=seller_id%3A243984962#polycard_client=search-nordic-mshops&position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=a4166ba1-2d78-4001-bebd-02ffba44f20a&wid=MLB5163694116&sid=search>. Acesso em: 20 nov. 2024.

RAMALHO, J. T.; RODRIGUES, R. da S.; Oliveira, A.C.B. de. Composição Química de Diferentes Genótipos de Soja Convencionais. **7º Simpósio de Segurança Alimentar - Inovação com Sustentabilidade**, out. 2020.

RESENDE, Osvaldo *et al.* Forma, Tamanho e Contração Volumétrica do Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) durante a secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.7, n.1, p. 15-24, 2005.

SCHIFFMANN, R. F. Microwave and dielectric drying. In: Mujumdar, A. S. (org.) **Handbook of Industrial Drying**, ed. 3, Taylor & Francis Group, p. 307-327, 2006.

SEMADESC. 5 fatos para entender tudo sobre os medidores de umidade de grãos. **Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Desenvolvimento, Ciência, Tecnologia e Inovação (SEMADESC) - Governo de Mato Grosso do Sul**. 23 dez. 2016. Disponível em:

<<https://www.semadesec.ms.gov.br/5-fatos-para-entender-tudo-sobre-os-medidores-de-umidade-de-graos/>>. Acesso em: 02 mai. 2024.

SILVA, J. de S. e. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Ed. 2, Viçosa, MG, Editora Aprenda Fácil, 2008. 560 p.

STMICROELECTRONICS. **L7800 Series**. Nov. 2004.
SYSTEMS, E. **ESP32 Series - Datasheet**. 2019.

TEIXEIRA, G. Projeto ESP32 com display 16x2. **Usinainfo Eletrônica e Robótica**, 09 jul. 2019. Disponível em:

<<https://www.usinainfo.com.br/blog/esp32-projeto-com-display/#:~:text=O%20adaptador%20I2C%20nos%20fornece,outros%20displays%20caso%20seja%20necess%C3%A1rio>>. Acesso em: 18 jun. 2024.

TOLEDO, T. C. F. de *et al.* Composição, digestibilidade protéica e desaminação em cultivares brasileiras de soja submetidas à radiação gama. **Ciência Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 27, n. 4, p. 812-815, out. / dez. 2007.

VASILE, Irina *et al.* Comparative study on biochemical particularities of several soybean varieties used in animal nutrition. **Scientific Papers Animal Science and Biotechnologies**, v. 41, n. 1, p. 581–585, 1 Jan. 2008.