



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS DE CHAPADINHA
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA



WILKE OLIVEIRA LIMA

**AUTOMAÇÃO DE UM MINILISÍMETRO DE PESAGEM DE BAIXO CUSTO PARA
ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA.**

CHAPADINHA - MA

2024

WILKE OLIVEIRA LIMA

**AUTOMAÇÃO DE UM MINILISÍMETRO DE PESAGEM DE BAIXO CUSTO PARA
ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
coordenação de Engenharia Agrícola da
Universidade Federal do Maranhão, como
requisito para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Agrícola.

Orientador (a): Prof.º Dr. Marcus Willame
Lopes Carvalho.

CHAPADINHA - MA

2024

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Lima, Wilke Oliveira.

AUTOMAÇÃO DE UM MINILISÍMETRO DE PESAGEM DE BAIXO CUSTO
PARA ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA / Wilke
Oliveira Lima. - 2024.
58 f.

Orientador(a): Marcus Willame Lopes Carvalho.
Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do
Maranhão, Centro de Ciências de Chapadinha, 2024.

1. Microcontrolador. 2. Manejo Hídrico. 3. Célula de
Carga. 4. . 5. . I. Carvalho, Marcus Willame Lopes. II.
Título.

WILKE OLIVEIRA LIMA

**AUTOMAÇÃO DE UM MINILISÍMETRO DE PESAGEM DE BAIXO CUSTO PARA
ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA**

Monografia submetida ao corpo docente da Universidade Federal do
Maranhão / Centro de Ciências de Chapadinha, como parte dos requisitos necessários à
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Data de aprovação: 17 de setembro de 2024

Nota: 10

Aprovado por:

Prof. Dr. Marcus Willame Lopes Carvalho (Orientador)
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Jordânio Inácio Marques
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Washington Da Silva Sousa
Universidade Federal do Maranhão

Dedico este trabalho aos meus inestimáveis pais, Carlos Teixeira e Maria do Socorro Oliveira. Eles não mediram esforços para que eu pudesse concluir minha jornada acadêmica, sempre estando ao meu lado e me auxiliando em todas as etapas. Minha profunda gratidão a eles é imensurável.”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela minha vida, aos meus guias e às minhas proteções, por me iluminarem e me guiarem nessa jornada acadêmica e na vida pessoal, dando-me força, sabedoria e fé para superar os desafios e alcançar os meus objetivos.

Agradeço aos meus pais, Carlos Teixeira e Maria do Socorro, e ao meu irmão, Edvan Oliveira, por estarem sempre ao meu lado, dando-me amor, carinho e confiança para seguir em frente. À minha irmã, que mesmo distante, apoiou-me nessa jornada. Também quero agradecer ao Prof. Dr. Marcus Willame Lopes Carvalho, por ter me aceitado como seu orientando neste trabalho. Muito obrigado.

Expresso minha gratidão às minhas famílias de Chapadinha - MA, que me acolheram quando cheguei nesta cidade. Dona Orlanilda, minha mãezona, sempre pronta para me ajudar no que eu precisar, e que tem um papel muito importante na minha vida. E Dona Jesus Dutra, minha segunda mãe, que me recebeu como seu filho e me deu bons conselhos, carinho e disponibilidade para tudo. Sei que vivo perturbando o seu juízo, mas é porque gosto muito de você. Vocês são pessoas maravilhosas que Deus colocou na minha vida, e eu amo muito vocês. Jamais esquecerei vocês duas.

Sou muito grato aos meus amigos-irmãos de Chapadinha - MA, que são Lucas Aragão, Ivo Aguiar e Ludberg Araújo. Vocês me ajudaram e me apoiaram no momento mais difícil da minha vida, sempre ao meu lado para o que der e vier. Agradeço a Deus por ter colocado vocês no meu caminho e peço que os abençoe sempre. Vocês são parte da minha família e estarão comigo para sempre, em todas as etapas da minha vida.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu querido amigo e irmão, Tiago Alves. Mesmo estando distante em Rondon do Pará, sua presença constante e apoio incondicional têm sido fundamentais para mim. Sua amizade e apoio têm sido uma fonte de força e inspiração e todos meus amigos de Rondon.

Também gostaria de agradecer aos meus professores, que têm sido meus guias nessa jornada de aprendizado. Eles têm me acompanhado de perto, fornecendo orientação valiosa e feedback construtivo que têm sido essenciais para o aprimoramento da minha pesquisa. Sua amizade e o conhecimento que compartilharam comigo são inestimáveis.

Agradeço também a uma pessoa muito especial, a Prof.^a Dra. Samy Emanuelle Almeida Sousa Cavalcante, que me proporcionou grandes aprendizados na minha formação e

pela amizade fora da universidade, vários sorrisos e, como sempre falo, “o seu estresse diário”. Muito obrigado por me fazer parte da sua empresa, o Texas Hamburgueria e Petiscaria.

Quero agradecer de coração ao meu grupo Quarteto Bobó, formado por Luiziane, a Lulu do Pará, Adriana Costa, a Maloka, e Elinalva, a Penélope que adora rosa. Vocês foram essenciais na minha vida, nos momentos de tristeza, de estresse da universidade e da vida pessoal. Nossa amizade começou em 2018 e vai durar para sempre. Só tenho lembranças boas e divertidas das nossas aventuras e do nosso apoio mútuo. Como diz a frase “Amigos são bênçãos que Deus coloca nas nossas vidas para facilitar as caminhadas e alegrar os nossos corações” (Sebastião Wanderley).

Agradeço à minha irmãzinha e amiga, Brenda Silva, que veio junto comigo. Moramos juntos desde o início que chegamos aqui na cidade. Muito obrigado por tudo, minha baixinha, te amo. E aos meus amigos da turma 2018.1, agradeço por tudo. Acredito que foi a turma mais unida, com um ajudando o outro em tudo. Obrigado, Gleicy Ciara e Daniel Lobo, por me ajudarem no trabalho. Adriana Costa, muito obrigado por me ajudar a montar meu trabalho no sol quente, pegando poeira e peso no sol quente e ouvindo eu mandando fazer as coisas. Sabe que te amo, gata. Ao grupo de pesquisa LAGES, no qual tive a oportunidade de conhecer e fazer parte neste período.

Quero expressar minha gratidão à Universidade Federal do Maranhão por me conceder a chance e a honra de fazer este curso e a todos os docentes do Centro de Ciências de Chapadinha pelos ensinamentos ao longo destes anos.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que fizeram parte da minha vida. Cada pessoa que cruzou meu caminho contribuiu de alguma forma para quem sou hoje. Seja pela amizade, pelo apoio ou pelos momentos compartilhados, cada interação foi valiosa e deixou uma marca em meu coração. Sou grato por todas as experiências e pelo crescimento que obtive ao longo do tempo. Obrigado a todos que estiveram ao meu lado, mesmo que não esteja mencionando nomes individualmente. Seu impacto foi significativo e sou grato por ter tido a oportunidade de compartilhar minha vida com vocês.

“Quanto mais te convences de que podes ser feliz, de que tens em ti os atributos da paz, ação, resistência e amor, mais as facilidades chegam a ti. No entanto, se preferes viver em lamentações, na recusa à prática do bem ou no cultivo de vícios, ergues, desnecessariamente, barreiras a ti mesmo.” (**Chico Xavier**).

RESUMO

A crescente demanda por tecnologias de monitoramento agrícola sustentável impulsionou o desenvolvimento de ferramentas inovadoras para a gestão eficiente dos recursos hídricos. Este estudo teve como objetivo desenvolver um minilímetro de pesagem de baixo custo, utilizando o microcontrolador ESP32, para estimar a evapotranspiração na cultura da soja. O experimento utilizou células de carga formando uma ponte de Wheatstone conectadas ao módulo ESP32 configurado para monitorar a evapotranspiração da soja cultivadas em vasos no município de Chapadinha - MA. Os componentes foram protegidos em caixas herméticas e o sistema foi alimentado por energia solar. O código, desenvolvido em C++ na plataforma Arduino IDE, foi desenvolvido de forma a registrar e armazenar os dados de massa, a fim de monitorar diariamente a perda de água por evapotranspiração. Utilizou-se um código que incluiu a biblioteca HX711 para realizar a leitura do sinal do módulo com uma massa conhecida, ajustando-se o fator de calibração até que a balança fosse capaz de ler corretamente essa massa e, assim, realizar a calibração. A aferição foi realizada utilizando massas conhecidas de 1, 3, 7, 12 e 22 kg, garantindo a precisão das medições. Os resultados indicaram que o dispositivo foi capaz de monitorar a demanda hídrica das plantas ao longo do dia, observando-se a variação cíclica da massa de água, com perdas ao longo do dia devido à evapotranspiração e reposição ao final da tarde. As oscilações nas medições possivelmente foram influenciadas por fatores ambientais, como temperatura, vento e interferência magnética. O minilímetro de pesagem com ESP32 demonstrou ser eficaz no monitoramento do consumo hídrico da soja, revelando-se uma ferramenta valiosa na medição direta da evapotranspiração, porém há a realização de estudos futuros com a inclusão de sensores adicionais e ajustes nos parâmetros físicos do solo para aprimoramento do sistema.

Palavras-chave: Microcontrolador; Manejo Hídrico; Célula De Carga.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable agricultural monitoring technologies has driven the development of innovative tools for efficient water resource management. This study aimed to develop a low-cost mini-lysimeter for weighing, using the ESP32 microcontroller, to estimate evapotranspiration in soybean crops. The experiment used load cells forming a Wheatstone bridge connected to the ESP32 module configured to monitor the evapotranspiration of soybeans grown in pots in the municipality of Chapadinha - MA. The components were protected in airtight boxes and the system was powered by solar energy. The code, developed in C++ on the Arduino IDE platform, was developed to record and store mass data in order to monitor daily water loss by evapotranspiration. A code that included the HX711 library was used to read the signal from the module with a known mass, adjusting the calibration factor until the scale was able to correctly read this mass and thus perform the calibration. The measurement was performed using known masses of 1, 3, 7, 12 and 22 kg, ensuring the accuracy of the measurements. The results indicated that the device was able to monitor the water demand of the plants throughout the day, observing the cyclical variation of the water mass, with losses throughout the day due to evapotranspiration and replacement in the late afternoon. The oscillations in the measurements were possibly influenced by environmental factors, such as temperature, wind and magnetic interference. The ESP32 mini-lysimeter was shown to be effective in monitoring the water consumption of soybeans, proving to be a valuable tool in the direct measurement of evapotranspiration, but future studies are needed with the inclusion of additional sensors and adjustments in the physical parameters of the soil to improve the system.

Keywords: Microcontroller; Water Management; Load Cell.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Lisímetro de drenagem.....	21
Figura 2 - Lisímetro de lençol freático constante	22
Figura 3 - Lisímetro de pesagem de grande porte com 5,72 m ²	22
Figura 4 - ESP32 Devkit V1, com 30 pinos.....	25
Figura 5 - Módulo cartão micro SD.....	25
Figura 6 - Ponte de Wheatstone, exemplo resistência R _x	26
Figura 7 - Ponte de Wheatstone, exemplo em equilíbrio.	27
Figura 8 - Célula de carga 50 kg.....	28
Figura 9 - Módulo HX711.	29
Figura 10 - Placa de Expansão para Módulo ESP32.	29
Figura 11 - Ponte de Wheatstone para quadro células.	31
Figura 12 - Projeto de balança implementado no Wokwi.	33
Figura 13 - Fluxograma do painel solar.....	34
Figura 14 - Demonstração do projeto montado.	34
Figura 15 - Este código registra o peso de um vaso e a hora correspondente a cada 3 minutos.	37
Figura 16 - Realização da calibração.	37
Figura 17 - Aferição da calibração.....	39
Figura 18 - Variação da massa de água medida pelo minilísímetro ao longo de 5 dias.....	40
Figura 19 - Variação horária da evapotranspiração da cultura da soja medida pelo minilísímetro de pesagem ao longo de 5 dias.	41

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Tabela de esquema de ligação das células de carga baseada em Locatelli (2019). 32	
Tabela 2 - Tabela de esquema de ligação do módulo cartão SD no ESP32. 32	

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
2.	OBJETIVO	16
2.1.	Geral.....	16
2.2.	Específicos	16
3.	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	16
3.1.	Uso da água na agricultura.....	16
3.2.	Manejo Racional da Irrigação	17
3.3.	Evapotranspiração	19
3.4.	Coeficiente de cultivo	20
3.5.	Lisimetria.	21
3.6.	Utilização de microcontroladores na agricultura	23
3.7.	Módulos	24
3.7.1.	Microcontrolador ESP32.....	24
3.7.2.	Módulo de Cartão micro SD.	25
3.7.3.	Ponte de Wheatstone	25
3.7.4.	Célula de carga.....	27
3.7.5.	HX711.....	28
3.7.6.	Placa de Expansão para Módulo ESP32.	29
4.	MATERIAL E MÉTODOS	30
4.1.	Materiais.....	30
4.2.	Localização do projeto	30
4.3.	Procedimentos	31
4.4.	Montagem dos Vasos para Cultivo da Soja.....	34
4.5.	Software e Bibliotecas.....	35
4.6.	Código e Calibração.....	36
4.7.	Coleta de Dados	37
5.	RESULTADO E DISCUSÃO	38
6.	CONCLUSÃO	42
7.	BIBLIOGRAFIA.....	43
APÊNDICE A – Código para realizar a leitura de células de carga e armazenar os dados no cartão micro SD.		49
APÊNDICE B - Código para realizar a calibração da balança.		56

1. INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo da população mundial aumenta a demanda por alimentos e recursos. Para alcançar maior produtividade nas culturas, é necessário utilizar técnicas de manejo cada vez mais eficientes no uso de recursos hídricos, que resultem em menor utilização de insumos e menos impacto ambiental. Dentre estas práticas de manejo destaca-se o manejo racional da irrigação, que visa a aplicação precisa de água no solo com base nas necessidades das plantas e em parâmetros como a evapotranspiração da cultura (ETc) (Rodrigues *et al.*, 2022).

A ETc, por sua vez, representa a quantidade de água consumida por uma cultura específica durante seu ciclo de crescimento. A ETc é obtida multiplicando-se a evapotranspiração de referência (ETo) pelo coeficiente de cultivo (Kc), que varia conforme o tipo de planta, estágio de desenvolvimento e condições ambientais. A correta estimativa da ETc é fundamental para garantir que as plantas recebam a quantidade adequada de água, evitando tanto a falta quanto o excesso de irrigação, promovendo o crescimento saudável e possibilitando aos agricultores otimizarem o uso da água e contribuir para a sustentabilidade desse recurso natural (Carvalho *et al.*, 2011).

A ETo e a ETc são conceitos essenciais para o manejo eficaz da irrigação e do uso da água na agricultura. A ETo, originalmente conhecida como evapotranspiração potencial (ETp), é definida como a taxa de evapotranspiração de uma superfície coberta por vegetação baixa e de altura uniforme, como a grama, sob condições ideais de umidade. Este parâmetro serve como uma base padronizada para comparar a demanda hídrica de diferentes culturas e condições climáticas, permitindo ajustes precisos nas práticas de irrigação (Carvalho *et al.*, 2011).

Lira (2021) e Allen *et al.*, (1998) destacam a importância do coeficiente de cultura (Kc) no manejo da irrigação. Este fator é usado para calcular a evapotranspiração da cultura, permitindo determinar a quantidade de água necessária para atender às demandas das plantas em diferentes estágios de crescimento. O Kc leva em consideração as características individuais das plantas, seu estágio de desenvolvimento, suas necessidades hídricas, a taxa de evaporação da água do solo e a transpiração das plantas, tornando esse coeficiente uma ferramenta essencial para o manejo da água na agricultura. Essas informações são valiosas para o planejamento, precisão e gestão da irrigação.

Costa *et al.*, (2023) destacam que a evapotranspiração é crucial na agricultura irrigada, pois a quantidade de água no solo afeta diretamente o crescimento e a produtividade das culturas. O conhecimento preciso da evapotranspiração real das plantas permite ajustes eficazes

nos sistemas de irrigação, otimizando o uso da água e garantindo um suprimento adequado para as necessidades das plantas. Estudos recentes mostram que a medição precisa da evapotranspiração da cultura (ETc) é essencial para o manejo adequado da irrigação, promovendo o uso racional da água e aumentando a eficiência produtiva das culturas, tornando-se primordial compreender as necessidades hídricas das plantas para uma irrigação eficaz e sustentável (Carvalho *et al.*, 2011; Fernandes *et al.*, 2013).

Campeche *et al.*, (2011) afirmam que os lisímetros de pesagem são amplamente utilizados para medir a evapotranspiração devido à sua capacidade de determinar a variação de peso de um bloco de solo, causada pela entrada ou saída de água. Esse método permite medir a perda de água por evapotranspiração diretamente no nível da planta, possibilitando um ajuste preciso na quantidade de água a ser aplicada via irrigação. Os dados obtidos por meio dos lisímetros de pesagem são precisos e confiáveis, tornando essa ferramenta valiosa para os agricultores na gestão de seus recursos hídricos. Apesar dessa importância e eficácia, os lisímetros disponíveis no mercado geralmente têm um custo elevado, o que dificulta a sua adoção por muitos agricultores.

A automatização do minilímetro de pesagem permitirá não apenas a medição da ETc, mas também a análise de outros parâmetros relacionados ao estresse hídrico das plantas, como a taxa de transpiração e a taxa de evaporação do solo. Lima (2019) enfatizam que essas informações são fundamentais para compreender o comportamento hídrico das plantas e auxiliar no desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficazes.

O objetivo deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) é a criação de um minilímetro de pesagem de baixo custo. A solução foi baseada no microcontrolador ESP32, que serviu como plataforma para a coleta e armazenamento de dados sobre a cultura da soja como objeto de estudo, visando um método de manejo adequado da irrigação e a otimização do uso da água. Espera-se que essa solução contribua para a aplicação de práticas mais sustentáveis na agricultura, como a redução do consumo excessivo de água, mitigação de danos ao solo como salinização por excesso de água e o aumento da eficiência produtiva das culturas e consequentemente da produtividade.

2. OBJETIVO

2.1. Geral

Desenvolver um minilísímetro de pesagem automatizado utilizando o microcontrolador ESP32 para estimativa da evapotranspiração da cultura.

2.2. Específicos

- Projetar e montar o minilísímetro de pesagem de baixo custo, com quatro célula de carga de 50kg.
- Realizar a interconexão do minilísímetro com o prototípico ESP32 para coleta de dados.
- Implementar o armazenamento dos dados coletados no módulo SD.
- Calibrar o sistema de medição de peso para obter leituras precisas.
- Coletar dados de evapotranspiração.

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1. Uso da água na agricultura

A agricultura é uma das atividades humanas que mais demandam recursos hídricos, representando aproximadamente 70% do consumo mundial de água doce (Brasil, 2021). A utilização da água na agricultura é essencial para a irrigação das culturas, especialmente em regiões onde a precipitação é insuficiente para atender às necessidades hídricas das plantas (Rodrigues *et al.*, 2022).

A demanda de água na agricultura varia conforme o tipo de cultura, clima e métodos de irrigação utilizados. Culturas como arroz e algodão requerem grandes volumes de água, enquanto outras, como milho e trigo, têm necessidades hídricas menores, tornando o uso eficiente da água imprescindível para garantir a sustentabilidade, principalmente em regiões com escassez hídrica (Silva; Pereira, 2019). A água, além de ser usada para irrigação, desempenha um papel crucial no transporte de nutrientes e na manutenção da umidade do solo (Cuba *et al.*, 2015).

Existem diferentes métodos de irrigação, cada um com suas características e eficiências específicas, que variam em termos de adequação a diferentes tipos de solo e culturas. A irrigação por superfície, incluindo métodos como inundação e sulcos, é tradicionalmente utilizada em culturas como arroz. Embora simples, pode ser ineficiente devido à evaporação e ao escoamento superficial. A irrigação por aspersão, que imita a chuva natural, é adequada para

uma ampla variedade de culturas e terrenos, mas pode resultar em perdas significativas de água por evaporação (Coelho *et al.*, 2014).

A escolha do método de irrigação deve ser baseada em vários fatores, incluindo o tipo de cultura, sua fase de desenvolvimento, as condições topográficas da região (planas, suaves ou inclinadas), aspectos climáticos (ventos, temperatura, umidade relativa, precipitação, etc.) e as características do solo (drenagem, capacidade de armazenamento, salinidade, velocidade de infiltração, presença de lençol freático, etc.). O nível de tecnificação da produção (altamente tecnificada ou sem tecnificação) também influencia a escolha do método de irrigação mais adequado, como aspersão, superfície, localizada e subsuperfície ou subterrânea (Santos *et al.*, 2022).

Cada método de irrigação pode ser subdividido em vários sistemas, proporcionando uma ampla gama de opções que devem ser avaliadas pelos produtores rurais com o auxílio de especialistas, visando maximizar a produção e garantir uma gestão eficiente da água. Os principais sistemas de irrigação por aspersão incluem a aspersão convencional, pivô central e carretel autopropelido, onde a água é distribuída sobre as plantas e o solo em forma de chuva (Santos *et al.*, 2022). Na irrigação por superfície, os sistemas mais comuns são a inundação e o sulco, adequados para terrenos planos, onde a água é aplicada utilizando a gravidade (Santos *et al.*, 2022). Na irrigação por subsuperfície ou subterrânea, destacam-se o gotejamento subterrâneo, a elevação do lençol freático e as mesas de irrigação, que aplicam água abaixo da superfície do solo diretamente nas raízes das plantas (Santos *et al.*, 2022).

Outros sistemas de irrigação amplamente utilizados são o gotejamento e a microaspersão, ambos pertencentes ao método de irrigação localizada. Neste método, a água é aplicada em áreas específicas da superfície do solo, preferencialmente na área sombreada pela copa das plantas. A escolha do sistema de irrigação adequado para cada situação produtiva (tipo de cultura, região, solo, clima, nível de manejo, etc.) é fundamental para maximizar a produção agrícola, garantindo que a água seja fornecida na quantidade e qualidade necessárias para atender à demanda das plantas e minimizando desperdícios. Uma gestão hídrica eficiente é essencial para uma agricultura sustentável, onde uma irrigação bem planejada, instalada e manejada corretamente pode resultar em inúmeros benefícios (Santos *et al.*, 2022).

3.2. Manejo Racional da Irrigação

A necessidade de utilizar a água de forma racional na agricultura é cada vez mais urgente, principalmente devido ao aumento da demanda por alimentos e às mudanças climáticas

que afetam a disponibilidade de recursos hídricos. A agricultura, sendo uma das atividades que mais consome água, precisa adotar técnicas que garantam a eficiência no uso desse recurso vital. O manejo racional da irrigação busca essa eficiência através da aplicação da quantidade de água necessária no momento certo e de forma uniforme, evitando o desperdício e maximizando a produtividade das culturas. Práticas conservacionistas, como a irrigação deficitária controlada e a utilização de sensores de umidade do solo, são fundamentais para alcançar essa eficiência (Santos *et al.*, 2022).

A irrigação de precisão, uma das principais inovações no manejo conservacionista da água, destaca-se por utilizar tecnologias avançadas para monitorar e controlar a aplicação de água de acordo com as necessidades específicas de cada cultura e parcela do terreno. Essa abordagem contrasta com os métodos tradicionais de irrigação, que frequentemente aplicam água de forma uniforme sem considerar as variações no solo e no microclima. A irrigação de precisão utiliza sensores, sistemas de GPS e ferramentas de análise de dados para fornecer informações em tempo real sobre as condições do solo e das plantas. Com isso, é possível ajustar a irrigação de maneira precisa, economizando água e energia e reduzindo o impacto ambiental (Gutierrez; Neves, 2021).

Práticas de manejo conservacionista da água para irrigação incluem também a utilização de sistemas de irrigação por gotejamento, que entregam água diretamente na zona radicular das plantas, minimizando perdas por evaporação e percolação. Além disso, a integração de sistemas de automação permite o controle remoto e a programação de horários de irrigação baseados em dados meteorológicos e de umidade do solo. Esses sistemas ajustam automaticamente a quantidade de água aplicada, assegurando que as plantas recebam apenas o necessário para o seu desenvolvimento, o que é fundamental para uma agricultura sustentável e resiliente (Silva, 2018).

A diferença entre o manejo racional da irrigação e os métodos tradicionais está na precisão e na eficiência do uso da água. Enquanto os métodos tradicionais podem resultar em desperdício e menor eficiência hídrica, o manejo racional, apoiado por tecnologias de irrigação de precisão e práticas conservacionistas, garante uma utilização mais eficaz e sustentável dos recursos hídricos. Isso não apenas promove a sustentabilidade ambiental, mas também contribui para a melhoria da produtividade agrícola e a redução dos custos operacionais (Campos; Alcantara, 2018).

3.3. Evapotranspiração

A evapotranspiração é o processo de transferência de água do solo e das plantas para a atmosfera, resultante da combinação da evaporação do solo e da transpiração das plantas. Este fenômeno é crucial para a agricultura, pois determina a quantidade de água necessária para o crescimento adequado das culturas. Para estimar e gerenciar a água no sistema agrícola, são empregados diferentes conceitos como a evapotranspiração de referência (ET_o) e a evapotranspiração da cultura (ET_c), entre outros (Santos *et al.*, 2020).

A agricultura desempenha um papel significativo na economia nacional, gerando empregos e exportações, tornando o país o quarto maior produtor de alimentos do mundo. Embora o sistema convencional de cultivo tenha baixo custo inicial, enfrenta desafios como condições climáticas adversas, pragas e doenças que reduzem a produtividade e a qualidade. Em contrapartida, o cultivo protegido, apesar do maior investimento inicial, oferece aumento da produtividade, melhor qualidade dos produtos e controle ambiental mais preciso, permitindo cultivo durante todo o ano. O monitoramento de variáveis como temperatura, umidade, radiação solar e concentração de gases é crucial para o sucesso deste sistema. Portanto, é fundamental desenvolver sensores de baixo custo que sejam acessíveis para agricultores com menor capacidade de investimento e tecnologia (Silva, 2023).

Além da ET_o e ET_c, outros conceitos importantes incluem a evapotranspiração real (ET_r) e a evapotranspiração potencial (ET_p). A ET_r refere-se à evapotranspiração em condições reais de campo, incluindo limitações de água no solo, enquanto a ET_p representa a evapotranspiração máxima que poderia ocorrer se a água no solo não fosse um fator limitante (Gutierrez; Neves, 2021). O cálculo e monitoramento desses diferentes tipos de evapotranspiração são cruciais para a gestão eficiente da água na agricultura, permitindo o planejamento adequado das práticas de irrigação e a maximização da produtividade agrícola.

Para determinar com precisão a ET_o, são utilizados métodos empíricos e físicos, sendo a equação de Penman-Monteith um dos métodos mais aceitos globalmente. Este método integra dados meteorológicos como radiação solar, temperatura, umidade e velocidade do vento para calcular a ET_o de forma precisa. Para a estimativa da ET_c, a aplicação de coeficientes de cultivo específicos para cada fase fenológica das plantas é essencial, ajustando-se a ET_o conforme as necessidades hídricas considerando a sua variação ao longo do ciclo de crescimento das culturas (Furquim; Abdala, 2019). O uso de tecnologias de sensoriamento remoto e sistemas automatizados de monitoramento tem contribuído significativamente para a precisão na estimativa da evapotranspiração e na gestão da irrigação (Rocha; Guimarães; Oliveira, 2024).

3.4. Coeficiente de cultivo

O coeficiente de cultivo (K_c) é uma medida crucial para determinar as necessidades hídricas das culturas, representando a relação entre a evapotranspiração da cultura (E_{Tc}) e a evapotranspiração de referência (E_{To}). Este coeficiente varia conforme a fase de desenvolvimento da planta, refletindo mudanças na cobertura do solo, fenologia e condições ambientais específicas de cada cultivo. Segundo Andrade Junior *et al.*, (2018), o K_c é fundamental para ajustar a quantidade de água aplicada na irrigação, garantindo que as culturas recebam o volume adequado para um crescimento saudável e produtivo.

No estudo realizado por Avilez *et al.*, (2020), a determinação dos coeficientes de cultivo para a cana-de-açúcar foi efetuada utilizando o modelo SAFER, que integra dados de sensoriamento remoto para estimar a evapotranspiração real (E_{Tr}). Este método permite uma avaliação mais precisa das necessidades hídricas, especialmente em regiões com escassez de dados meteorológicos. A pesquisa demonstrou que a aplicação de coeficientes de cultivo específicos para cada fase do desenvolvimento da cana-de-açúcar pode melhorar significativamente a eficiência da irrigação, otimizando o uso da água e aumentando a produtividade agrícola.

Além disso, o uso de tecnologias avançadas, como sensores de solo e sistemas automatizados de monitoramento, tem se mostrado eficaz na obtenção de dados precisos sobre o K_c . Gutierrez e Neves (2021) destacam que esses sistemas permitem ajustar automaticamente a irrigação com base nas condições reais do solo e da planta, evitando tanto a subirrigação quanto a superirrigação. Estudos recentes também apontam para a importância do manejo adequado do solo e da adoção de práticas conservacionistas, como a cobertura do solo com palha, que pode reduzir a evaporação e manter a umidade por mais tempo, influenciando diretamente o valor do K_c (Campos e Alcantara, 2018).

Outro estudo relevante, realizado por Párraga *et al.*, (2020), analisou a relação entre a evapotranspiração real e os coeficientes de cultivo para o feijão-caupi, utilizando lisímetros de drenagem. Os resultados indicaram que a adoção de coeficientes de cultivo ajustados às condições específicas do solo e do clima local pode levar a uma gestão mais eficiente da água, promovendo uma irrigação mais sustentável e produtiva. Este tipo de pesquisa é essencial para desenvolver estratégias de manejo da água adaptáveis a diferentes condições agrônômicas e ambientais.

3.5. Lisimetria.

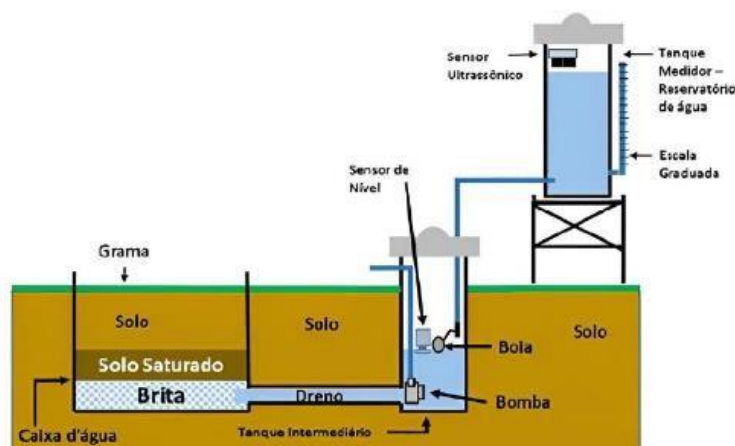
A lisimetria é uma técnica essencial para medir a evapotranspiração (ET) e compreender o balanço hídrico em sistemas agrícolas. Existem diversos tipos de lisímetros, como os de drenagem, de lençol freático constante e de pesagem, cada um com suas características e aplicações específicas (Campeche *et al.*, 2011). Os lisímetros de drenagem, por exemplo, coletam a água que percola através do solo (Figura 1), enquanto os lisímetros de lençol freático constante mantêm um nível de água constante para medir a evapotranspiração de uma cultura específica como podemos analisar na (Figura 2). Cada tipo de lisímetro tem sua utilidade dependendo do objetivo do estudo e das condições ambientais (Carvalho *et al.*, 2020).

Figura 1 - Lisímetro de drenagem.



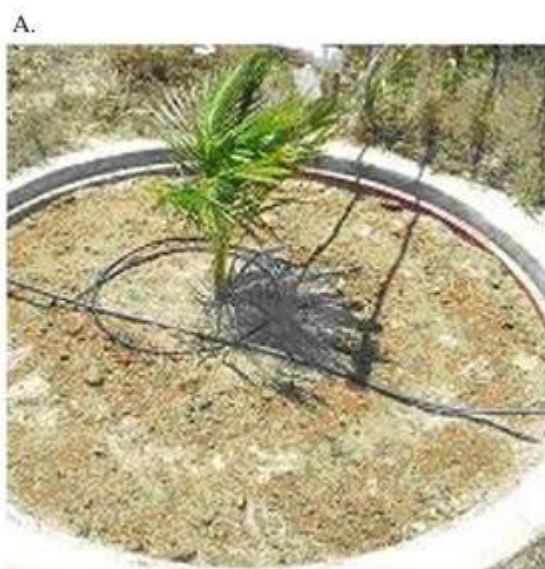
Fonte: Sulino *et al.*, (2019).

Figura 2 - Lisímetro de lençol freático constante.



Fonte: Pellison *et al.*, (2023).

Figura 3 - Lisímetro de pesagem de grande porte com 5,72 m².



Fonte: Campeche *et al.*, (2011).

Os lisímetros de pesagem são considerados o padrão-ouro para a medição precisa da evapotranspiração. Esses dispositivos medem a variação de massa de um volume definido de solo e plantas, permitindo calcular a quantidade exata de água que é perdida por evaporação e transpiração. Eles são compostos por um tanque que contém solo e plantas como mostra na (Figura 3), instalado sobre uma balança de alta precisão, capaz de detectar mudanças de massa muito pequenas, correspondentes à perda de água. A precisão dos lisímetros de pesagem faz deles uma ferramenta valiosa para a calibração de modelos de estimativa da evapotranspiração e para a validação de outros métodos de medição (Amaral *et al.*, 2018).

No entanto, os lisímetros de pesagem apresentam algumas restrições, principalmente relacionadas aos altos custos de instalação e manutenção. A construção desses dispositivos

requer materiais de alta qualidade e tecnologia avançada, o que pode ser economicamente inviável para muitos projetos de pesquisa ou para agricultores individuais. Além disso, a calibração e operação desses sistemas exigem conhecimento técnico especializado, o que pode limitar sua aplicação prática em áreas rurais com poucos recursos (Venancio *et al.*, 2019). Outra limitação é a necessidade de manutenção constante para garantir a precisão das medições, pois qualquer desvio pode comprometer a validade dos dados obtidos (Carvalho *et al.*, 2020).

3.6. Utilização de microcontroladores na agricultura

A aplicação de microcontroladores na agricultura tem se mostrado uma abordagem promissora para aumentar a eficiência e precisão nas atividades agrícolas. Estes dispositivos são capazes de automatizar processos e coletar dados essenciais, ajudando os agricultores a tomar decisões mais assertiva. Por exemplo, a utilização de microcontroladores em hortas automáticas pode beneficiar especialmente os agricultores familiares. Maia (2023) demonstraram a eficácia de um sistema de irrigação automatizado baseado na plataforma Arduino, que proporciona controle preciso sobre a irrigação, economizando água e aumentando a produtividade das hortas.

Sistemas de monitoramento agrometeorológico em casas de vegetação são essenciais para manter condições ideais de cultivo. Um exemplo bem-sucedido é o desenvolvimento de um sistema utilizando o microcontrolador ESP32, conhecido por sua capacidade de processamento e conectividade. Esse microcontrolador integrou diversos sensores, como o sensor de concentração de CO₂ (MH-Z19B), o sensor de temperatura e umidade relativa do ar (BME 280) e o sensor de radiação fotossinteticamente ativa (RY-GH). Adicionalmente, foram acoplados um módulo de relógio DS1307, um módulo de cartão de memória SD e um visor OLED, permitindo a coleta, armazenamento e visualização dos dados em tempo real. O uso do ESP32 demonstrou ser bem-sucedido, proporcionando monitoramento contínuo e preciso das variáveis ambientais, crucial para otimizar as condições de cultivo e aumentar a produtividade (Silva, 2023).

O ESP32 tem sido explorado em sistemas de monitoramento ambiental, demonstrando sua eficiência na coleta e transmissão de dados ambientais. Souza (2023), desenvolveram um protótipo utilizando o ESP32 para coletar dados de temperatura e umidade em tempo real, comprovando a viabilidade dessa tecnologia no monitoramento agrícola.

Outro exemplo de aplicação é o controle de motores para diversas funções na agricultura, como automação de sistemas de irrigação e operação de veículos agrícolas

autônomos. Duarte *et al.*, (2023), demonstraram a utilização do periférico MCPWM do ESP32 para o controle preciso de motores CC, evidenciando o potencial dessa tecnologia para melhorar a eficiência e a automação na agricultura.

A integração de sistemas de irrigação de precisão com estações meteorológicas de baixo custo é uma inovação significativa na agricultura. Lima (2024), desenvolveu um sistema utilizando o microcontrolador NodeMCU ESP8266 para processar dados climáticos e aplicar comandos de irrigação baseados no método Penman-Monteith-FAO. Através dessa abordagem, foi possível automatizar o controle da água, contribuindo para a sustentabilidade agrícola ao evitar o desperdício hídrico, aumentando a eficiência na gestão da irrigação e permitindo uma aplicação precisa dos recursos.

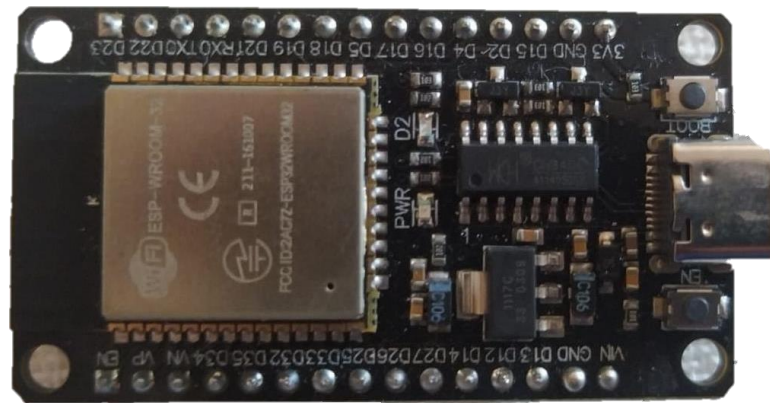
Nos projetos de microcontroladores na agricultura, destacam-se várias tecnologias importantes, como o ESP32 que é amplamente utilizado em projetos de monitoramento ambiental e controle de motores devido à sua alta capacidade de processamento e conectividade (Souza, 2023). O módulo SD é essencial para o armazenamento de grandes volumes de dados coletados por sensores (Silva, 2023). O amplificador de sinal HX711, utilizado em conjunto com células de carga, é crucial para medir peso e pressão em aplicações de monitoramento de solo e colheita (Duarte *et al.*, 2023). A placa de expansão para módulo ESP32 facilita a integração de múltiplos sensores e atuadores, enquanto a célula de carga de meia-ponte é fundamental para medir pressão e peso, essenciais na pesagem de frutos e no monitoramento do crescimento das plantas.

3.7. Módulos

3.7.1. Microcontrolador ESP32

O ESP32 é um protótipo de placa de desenvolvimento que se destaca por seu microcontrolador de alto desempenho, otimizado para aplicações que requerem baixo consumo de energia. Este microcontrolador é equipado com um processador dual-core de 32 bits e dispõe de 30 GPIOs (General Purpose Input Output), que funcionam como portas de entrada e saída. O ESP32 tem ganhado destaque em uma ampla gama de aplicações. Sua versatilidade e eficiência tornam o ESP32 uma escolha popular entre os entusiastas da tecnologia e profissionais da indústria (Random Nerd Tutorials, 2024).

Figura 4 - ESP32 Devkit V1, com 30 pinos.

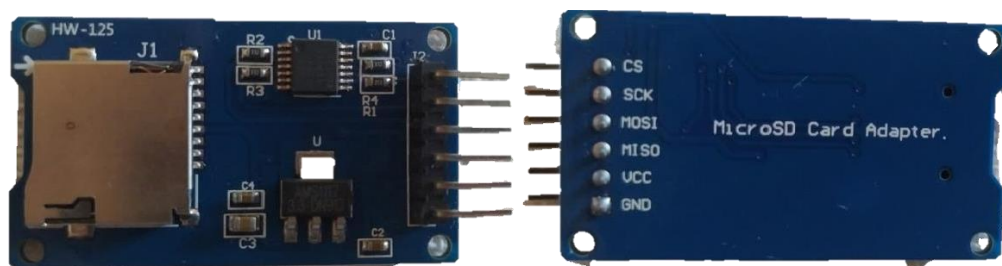


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.7.2. Módulo de Cartão micro SD.

O módulo SD (Secure Digital) é uma forma de memória não volátil, projetada para o armazenamento de dados digitais. Este módulo é amplamente empregado em uma variedade de dispositivos eletrônicos portáteis, como câmeras digitais, telefones celulares e PDAs, devido ao seu design compacto e à sua capacidade substancial de armazenamento. No contexto dos sistemas de automação, o módulo SD desempenha um papel crucial, sendo comumente aplicado para armazenar dados coletados por sensores. Outra vantagem é a alimentação de 5 V, que é padrão na maioria das placas de controle, além da compatibilidade com diferentes níveis de sinal. Isso permite o uso tanto em placas como o Arduino Uno e Mega, que operam com sinal de 5V, quanto em módulos como o ESP32 e ESP8266, que utilizam sinal de 3,3 V. (Lousada, 2021).

Figura 5 - Módulo cartão micro SD.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

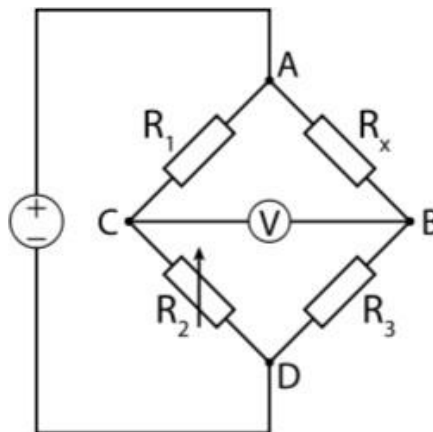
3.7.3. Ponte de Wheatstone.

A ponte de Wheatstone é um circuito essencial para a medição precisa de resistências desconhecidas, desenvolvido por Samuel Hunter Christie em 1833 e popularizado por Charles Wheatstone dez anos depois. O circuito básico consiste em uma fonte de tensão, um voltímetro

e uma rede de quatro resistores, sendo três conhecidos e um ajustável. Quando ajustado corretamente, a leitura do voltímetro se torna zero, indicando que a ponte está em equilíbrio e permitindo o cálculo da resistência desconhecida R_X através da fórmula $R_2 \cdot R_X = R_1 \cdot R_3$ (Zuim, 2023).

Para determinar a resistência R_X , ajusta-se R_2 até que a tensão medida no voltímetro seja zero (Figura 6). Esse estado de equilíbrio é alcançado quando a relação $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_X}$ são obedecidas. Em um exemplo prático, com resistores de 5k, 2k e 3k ohms, a resistência R_X foi determinada como sendo aproximadamente 3.333k ohms. Além de medir resistências desconhecidas, a ponte de Wheatstone é amplamente utilizada em instrumentos de medição como medidores de resistência, termômetros e luxímetros (Zuim, 2023).

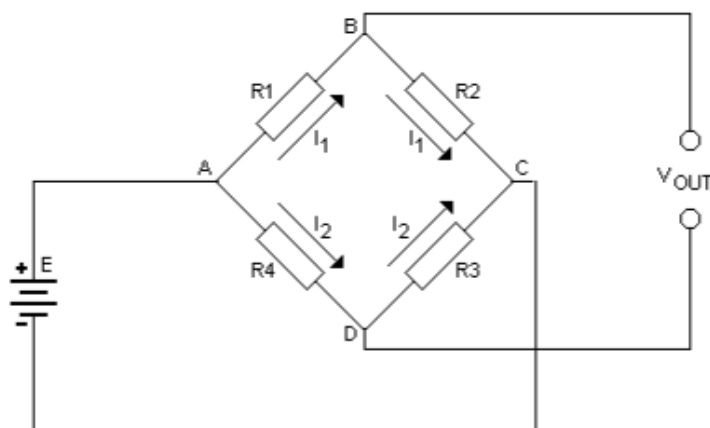
Figura 6 - Ponte de Wheatstone, exemplo resistência R_X .



Fonte: Edga Zuim, (2023).

O equilíbrio da ponte de Wheatstone ocorre quando a tensão de saída (V_{out}) é zero, indicando que a relação entre os resistores está correta (Figura 7). Quando qualquer valor de resistor é alterado, a ponte se desequilibra, resultando em uma tensão de saída positiva ou negativa, dependendo da referência. Isso mostra a sensibilidade do circuito a pequenas mudanças de resistência, tornando-o útil para aplicações precisas (Zuim, 2023).

Figura 7 - Ponte de Wheatstone, exemplo em equilíbrio.



Fonte: Edga Zuim, (2023).

O uso prático da ponte de Wheatstone envolve montagens experimentais onde resistores são ajustados e medições são feitas para verificar o equilíbrio. Por exemplo, com um circuito de teste usando resistores de 10k, 4.7k, e 3.3k ohms e uma fonte de 18V, ajustes finos no trimpot permitem a obtenção de uma saída zero (equilíbrio) ou outros valores para experimentos de desequilíbrio. Essas práticas são cruciais para entender o comportamento do circuito em situações reais (Zuim, 2023).

Para avaliar a precisão do ajuste, medições de tensão são feitas entre vários pontos do circuito, e as correntes são calculadas. A resistência ajustada é então comparada com os valores calculados. Essas etapas práticas não apenas confirmam a teoria por trás da ponte de Wheatstone, mas também ajudam a identificar quaisquer discrepâncias entre valores medidos e calculados, reforçando o aprendizado sobre a precisão e a aplicação deste método de medição (Zuim, 2023).

3.7.4. Célula de carga.

Uma célula de carga é um sensor eletrônico projetado para medir o peso aplicado sobre sua meia-ponte. Para funcionar, ela precisa estar integrada a uma plataforma de prototipagem, como um ESP32, Arduino, ou outros controladores semelhantes. As células de carga são amplamente utilizadas na construção de balanças, sendo que existem modelos com diferentes capacidades, podendo medir desde pequenas até grandes cargas. No entanto, é possível aumentar a capacidade total combinando várias células em uma configuração de ponte de Wheatstone. A região central da célula de carga possui uma área especialmente sensível,

responsável por captar o peso, mas é possível obter medições precisas mesmo que o peso não seja aplicado exatamente nesse ponto.

O funcionamento da célula de carga baseia-se em uma ponte resistiva, que sofre variações na resistência à medida que uma força é aplicada. Quando um peso é colocado sobre a célula, há uma mudança na tensão elétrica, que é enviada ao microcontrolador. Essa variação de tensão, proporcional ao peso aplicado, permite que o sistema calcule com precisão o valor do peso. Devido à sua precisão e confiabilidade, as células de carga são indispensáveis em uma ampla gama de aplicações de medição de peso.

Figura 8 - Célula de carga 50 kg.



Fonte: usinainfo.com

3.7.5.HX711.

O HX711 é um conversor analógico-digital (ADC) de precisão de 24 bits projetado para balanças e aplicações de controle industrial. Ele é um tipo de conversor A/D e amplificador de 24 Bits muito utilizado para fazer integração de células de carga com microcontroladores. O HX711 é um conversor AD com amplificação interna, tendo sido feito especificamente para esse tipo de aplicação de leitura de células de carga (Microcontrollers Lab, 2024).

Figura 9 - Módulo HX711.



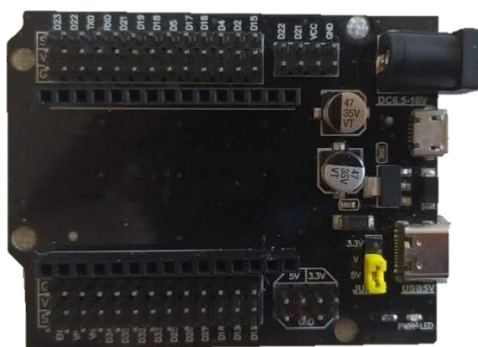
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.7.6. Placa de Expansão para Módulo ESP32.

A Placa de Expansão para Módulo ESP32 é uma base de expansão projetada especificamente para o Módulo ESP32-WROOM-32 ou outros módulos ESP32 de 30 pinos (Eletrogate, 2024). Ela proporciona maior facilidade de conexão de componentes e módulos externos. Além de duplicatas dos pinos já existentes no ESP32-WROOM-32, esta base de expansão também inclui um conector P4 para alimentação externa e um regulador de tensão que permite ligações de 6 a 16V DC (Mamute Eletrônica, 2024).

A importância da Placa de Expansão para Módulo ESP32 em evitar o travamento do ESP32 reside na sua capacidade de fornecer a tensão correta para o ESP32 (Mamute Eletrônica, 2024). Isso é crucial para o funcionamento eficiente e estável do ESP32. Além disso, a placa de expansão permite uma maior flexibilidade na conexão de componentes e módulos externos, o que pode ser benéfico em muitos projetos que utilizam o ESP32 (Eletrogate, 2024).

Figura 10 - Placa de Expansão para Módulo ESP32.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Materiais

Os materiais utilizados neste projeto incluem:

- Microcontrolador ESP32.
- Placa de expansão para módulo ESP32.
- Balança Digital de capacidade de 200 kg.
- Kit Painel Placa 10w + Bateria 12v 7ah + Controlador 10A.
- Protoboard 830 Furos.
- Módulo Conversor HX711.
- Módulo Leitor de Cartão SD.
- 9 vasos.
- Duas caixas hermética.

4.2. Localização do projeto

O projeto foi realizado no campus da UFMA, especificamente no Centro de Ciência de Chapadinha (CCCh). Este está localizado na BR 222, km 4, s/n, bairro Boa Vista, em Chapadinha, MA, Brasil. As coordenadas geográficas do local são 3°44'6"S e 43°19'7"W. A região apresenta precipitação pluviométrica anual entre 1600 a 2000 mm e temperatura média anual variando de 26°C a 27°C (De Azevedo; Bueno, 2017).

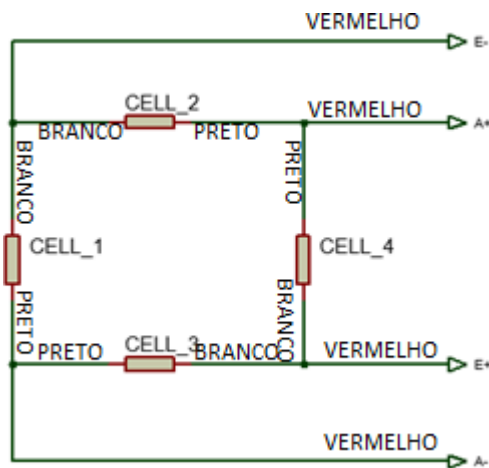
4.3. Valor do equipamento

EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	PREÇO (R\$)
Microcontrolador ESP32	48,99
Placa de expansão para módulo ESP32	32,27
Balança Digital	44,99
Kit Painel Placa 30w + Bateria 12v 7ah + Controlador 10a	499,99
Protoboard 830 Furos	25,00
Módulo Conversor Hx711	14,00
Modulo Leitor Cartão SD	13,00
10 vasos	150,00
Duas caixas hermética	143,82
Total	R\$ 972,06

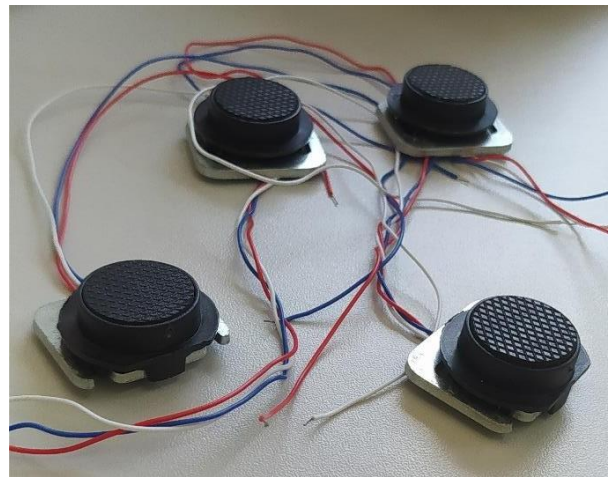
4.4. Procedimentos

As células de carga foram conectadas seguindo as orientações da Locatelli (2019), formando uma ponte completa de Wheatstone, conforme ilustrado na (Figura 11). A ligação detalhada pode ser observada na (Tabela 1). Além disso, a configuração dos pinos foi realizada de acordo com as especificações indicadas no código. O módulo do cartão micro SD foi instalado seguindo as instruções fornecidas por Magalhães (2024), como pode ser observado no esquema de ligação apresentado na (Tabela 2), detalhadas no manual de uso, como podemos ver na (Figura 12).

Figura 11 - Ponte de Wheatstone para quadro células.



Fonte: Locatelli, 2019.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 1 - Tabela de esquema de ligação das células de carga baseada em Locatelli (2019).

ESP32	HX711	Célula 1	Célula 2	Célula 3	Célula 4
D26	(in) DT				
D25	(in) SCK				
5V	(in) VCC				
GND	(in) GND				
		branco	branco		
				branco	branco
		Azul		Azul	
			Azul		Azul
	(out) E-	vermelho			
	(out) A-		vermelho		
	(out) A+			vermelho	
	(out) E+				vermelho

in= input (entrada) out= output (saída).

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

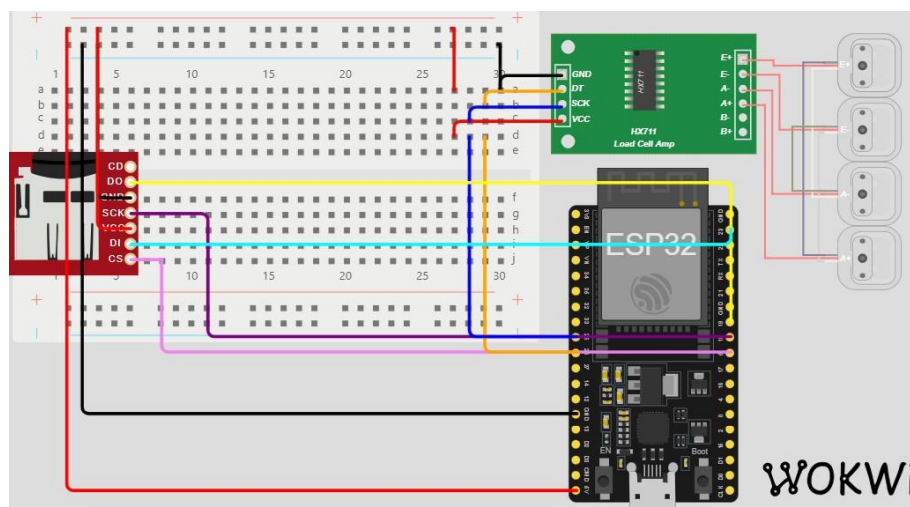
Tabela 2 - Tabela de esquema de ligação do módulo cartão SD no ESP32.

Mod. Cart. SD	ESP32
CS	D5
SCK	D18
MOSI	D23
MISO	D19
VCC	5V
GND	GND

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Adicionalmente, foi utilizada uma Placa de Expansão para Módulo ESP32 para facilitar a conexão dos componentes e módulos externos. Esta placa, projetada especificamente para o Módulo ESP32-WROOM-32, oferece maior flexibilidade na integração dos componentes, além de fornecer a tensão correta ao ESP32, o que minimiza travamentos e garante um funcionamento mais eficiente e estável do projeto. Todos os componentes foram instalados dentro de uma caixa plástica hermética com dimensões (24 x 18 x 9,5 cm), adequadas, servindo como proteção para que os sensores não fossem expostos ao ambiente.

Figura 12 - Projeto de balança implementado no Wokwi.

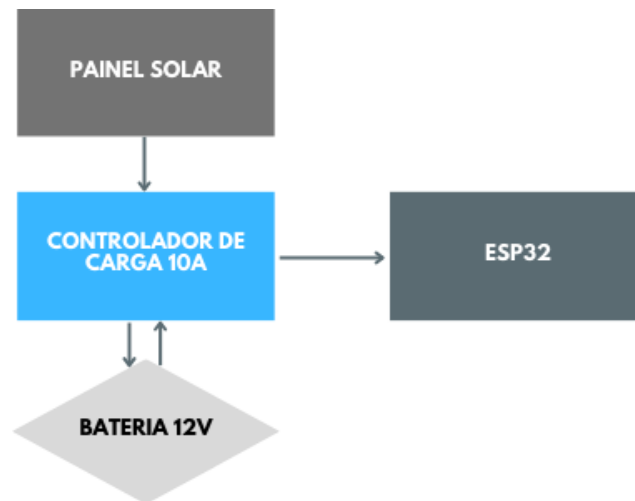


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O Pannel Solar de 10W foi conectado a uma Bateria de 12V com 7Ah, utilizando um Controlador de Carga de 10A. Inicialmente, o painel solar foi ligado ao controlador de carga, conectando seus fios positivo (+) e negativo (-) aos terminais de entrada correspondentes no controlador, respeitando a polaridade correta. Em seguida, o controlador de carga foi conectado à bateria, também respeitando a polaridade, com os terminais positivo (+) e negativo (-) do controlador conectados aos terminais correspondentes da bateria. Esses componentes foram instalados dentro de uma caixa plástica hermética com dimensões (24 x 18 x 9,5cm), garantindo proteção da chuva e do sol.

Finalmente, o ESP32 e seus módulos foram alimentados usando um cabo Micro USB-B. O cabo foi conectado à porta USB-B da placa de expansão do ESP32 e a outra extremidade foi conectada na porta USB do controlador de carga, como mostra no fluxograma na (Figura 13).

Figura 13 - Fluxograma do painel solar.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

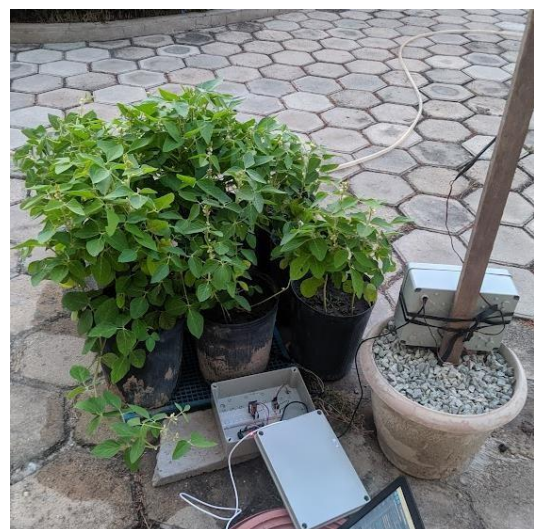
4.5. Montagem dos Vasos para Cultivo da Soja.

O solo foi coletado no terreno do Campus de Ciências de Chapadinha (CCCh) da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) e distribuído em nove vasos com capacidade de 10 litros cada, deixando uma margem de 5 cm no topo de cada vaso, sem compactação. Os vasos foram dispostos em uma formação 3x3, conforme ilustrado na (Figura 14). Após a distribuição do solo, cada vaso foi irrigado, e sementes de soja foram semeadas.

Figura 14 - Demonstração do projeto montado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).



Para o início das leituras o vaso foi submetido à saturação e após ocorrer a drenagem da água gravitacional (situação de capacidade de campo) as leituras foram iniciadas. Realizou-se

o monitoramento da perda de água por evapotranspiração 24 horas por dia durante 5 dias no estágio de desenvolvimento V5.

A verificação foi realizada às 6 h e às 18 horas, sendo a diferença de massa dos horários correspondente ao volume de água evapotranspirado no dia. A massa de água correspondente a perda pela evapotranspiração foi pesada e repostada diariamente, sendo suficiente para suprir as necessidades diárias de água da cultura.

4.6. Software e Bibliotecas

O código para este projeto foi desenvolvido em C++ utilizando a plataforma Arduino IDE e foi executado na ESP32. As bibliotecas utilizadas incluem:

- HX711.h: Esta biblioteca, criada por Bogdan Neca, é usada para interface com a célula de carga HX711. Ela fornece funções para ler e calibrar a célula de carga.
- SPI.h: A biblioteca SPI, mantida pela equipe do Arduino, é usada para comunicação SPI (Serial Peripheral Interface), um protocolo de comunicação comumente usado para trocar dados entre microcontroladores e pequenos periféricos.
- SD.h: A biblioteca SD, também mantida pela equipe do Arduino, fornece funções para ler e escrever em cartões SD.
- FS.h: A biblioteca FS (File System) é usada para trabalhar com sistemas de arquivos. Ela é mantida pela Espressif e permite que você trabalhe com arquivos e diretórios em um sistema de arquivos, como o do cartão SD.
- WiFi.h: A biblioteca WiFi, mantida pela Espressif, é usada para conectar o ESP32 a uma rede WiFi. Ela fornece funções para gerenciar a conexão WiFi.
- NTPClient.h: Esta biblioteca, criada por Fabrice Weinberg, é usada para conectar a um servidor NTP (Network Time Protocol) e obter a hora atual. Ela fornece funções para gerenciar a conexão NTP e obter a hora.
- WiFiUdp.h: A biblioteca WiFiUdp, mantida pela equipe do Arduino, é usada para enviar e receber dados UDP (User Datagram Protocol) sobre WiFi.
- esp_task_wdt.h: A biblioteca esp_task_wdt é usada para o cão de guarda de tarefas do ESP32. Ela é mantida pela Espressif e fornece funções para gerenciar o cão de guarda de tarefas, que pode reiniciar o ESP32 se ele não for “alimentado” dentro de um determinado período.

4.7. Código e Calibração

O código em questão desempenha múltiplas funções de maneira eficiente. Inicialmente, ele se encarrega de inicializar tanto a célula de carga quanto o cartão SD. Posteriormente, a cada intervalo de 3 segundos, o código coleta dados da célula de carga. O valor coletado passa por um ajuste, onde é subtraído o peso de 4.274 kg. Este valor corresponde ao peso do vaso quando está na capacidade de campo, conforme ilustrado na (Figura 15). Esse ajuste é necessário devido à ausência da tara da balança no processo. A cada intervalo de 3 minutos, o código registra o último peso obtido. Este registro inclui também o horário exato da obtenção do peso. Todos esses dados são armazenados de forma segura no cartão micro SD para futuras consultas e análises. O código utilizado para esta análise está detalhado no (APÊNDICE A).

Além disso, o código desenvolvido por Seidle (2014), (APÊNDICE B), inclui um processo de calibração para garantir que as leituras de peso da célula de carga sejam precisas. O fator de calibração é aplicado à escala. Uma leitura de peso é obtida, que retorna a média de 10 leituras da célula de carga, convertidas em unidades de peso usando o fator de calibração. Se houver dados disponíveis na porta serial (ou seja, se o usuário pressionou uma tecla), o fator de calibração é ajustado para cima ou para baixo, dependendo da tecla pressionada.

A calibração é um processo iterativo que envolve ajustar o fator de calibração até que as leituras de peso correspondam ao peso conhecido de um objeto. Neste caso, o ajuste é feito manualmente pelo usuário, pressionando as teclas ‘+’ ou ‘-’ para aumentar ou diminuir o fator de calibração. O valor ajustado do fator de calibração é então usado para converter as leituras brutas da célula de carga em unidades de massa.

Aqui está uma descrição simplificada de como o fator de calibração pode ser calculado:

Zero da Balança: Primeiro, a balança é zerada. Isso é feito com a balança vazia, para que qualquer leitura possa ser atribuída ao peso do objeto que será colocado na balança.

Peso Conhecido: Em seguida, um objeto de peso conhecido é colocado na balança. O valor deste peso é conhecido e preciso, como foi feito na (Figura 16).

Leitura Bruta: A leitura bruta da balança é então tomada. Esta é a leitura diretamente da célula de carga, sem qualquer calibração aplicada.

Cálculo do Fator de Calibração: O fator de calibração é então calculado dividindo a leitura bruta pelo peso conhecido. Isso dá um fator que pode ser usado para converter futuras leituras brutas em unidades de peso.

A fórmula para calcular o fator de calibração é:

$$\text{Fator de Calibração} = \frac{\text{Leitura Bruta}}{\text{Peso Conhecido}} \quad (1)$$

Figura 15 - Este código registra o peso de um vaso e a hora correspondente a cada 3 minutos.

```
// Inicia a contagem do tempo
unsigned long tempoInicial = millis();
// Enquanto o tempo decorrido for menor ou igual a 3 minutos
while (millis() - tempoInicial <= 3 * 60 * 1000){
    // Lê o peso da célula de carga
    ultimoPeso = (scale.get_units(10) - 4.274);
    // Imprime o peso atual
    Serial.print("Peso atual: ");
    Serial.print(ultimoPeso, 3);
    Serial.println(" kg");

    // Obtém a hora atual
    timeStamp = timeClient.getFormattedTime();
    // Imprime a hora atual
    Serial.print("HORA: ");
    Serial.println(timeStamp);

    // Aguarda 3 segundos
    delay(3000);
}
```

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 16 - Realização da calibração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.8. Coleta de Dados

A coleta dos dados foi realizada durante cinco dias, com os dados armazenados no cartão micro SD e transferidos para o computador diariamente às 18h.

A leitura da balança às 18h correspondia à quantidade de água que havia evapotranspirado ao longo do dia. Por exemplo, se a diferença da leitura das 6 horas com a última leitura registrada às 18:00 foi 0,600 kg, a irrigação realizada corresponderia a esta massa. Esta quantidade exata de água era então cuidadosamente repostada no vaso, garantindo que o nível de água permanecesse constante.

Este procedimento permitiu que as leituras do dia seguinte fossem realizadas sob as mesmas condições iniciais, garantindo a consistência e a precisão dos dados coletados.

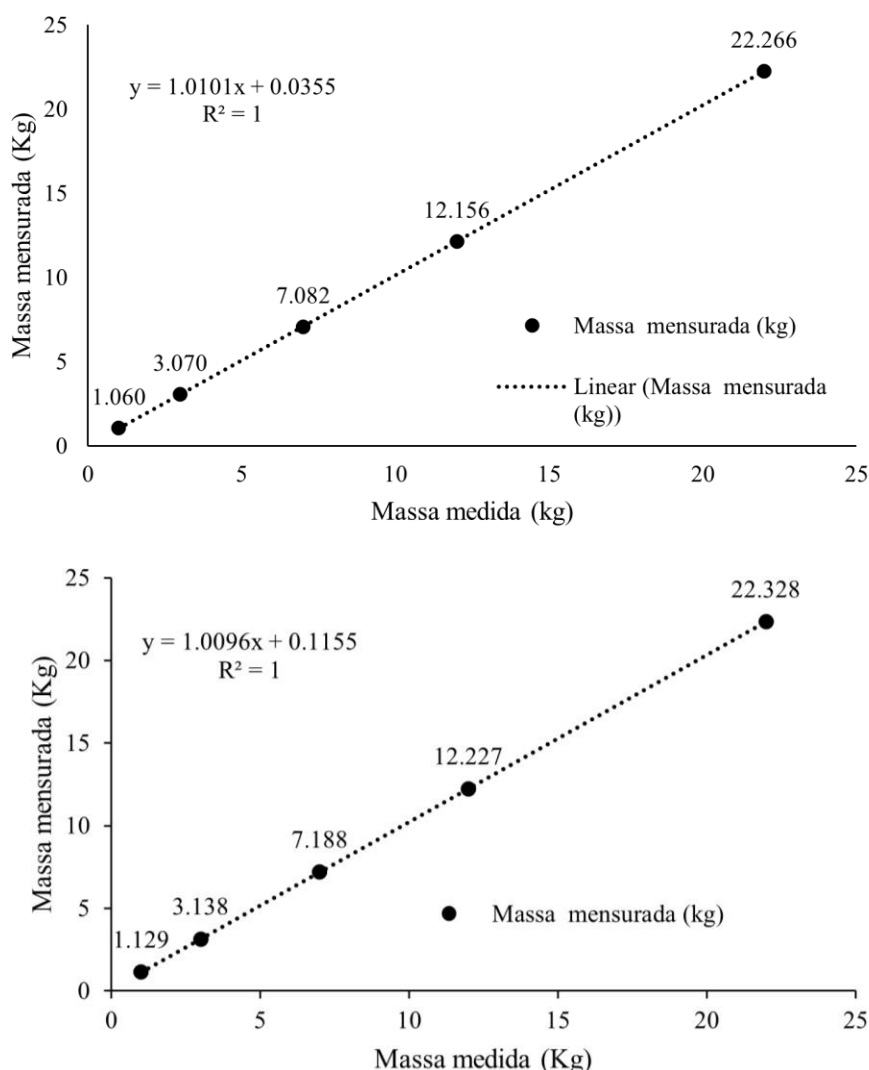
Após a coleta, os dados foram transferidos para um computador para uma análise mais aprofundada. A partir desses dados, foi possível gerar um gráfico detalhado para visualizar a evapotranspiração ao longo do dia. Este gráfico forneceu insights valiosos sobre a quantidade de água que as plantas estavam consumindo e perdendo através da evapotranspiração.

5. RESULTADO E DISCUSSÃO

A calibração de células de carga é um procedimento fundamental para garantir medições precisas de força ou peso em diversas aplicações industriais e científicas. Neste trabalho, utilizou-se um código de calibração desenvolvido por Seidle (2014), conforme apresentado no (Apêndice B). Após a calibração, foi realizada uma aferição utilizando massas conhecidas de 1, 3, 7, 12 e 22 kg, para garantir a precisão do procedimento.

As massas conhecidas foram representadas no eixo x, enquanto as leituras da célula de carga foram plotadas no eixo y (Figura 17). Com base na análise estatística, revelou-se uma relação linear significativa entre os pesos aplicados nas medições da célula de carga.

Figura 17 - Aferição da calibração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com um coeficiente de determinação $R^2=1$ em ambos os gráficos, observa-se uma correlação perfeita entre as massas medidas e as massas mensuradas. Esse resultado demonstra que a calibração foi realizada com extrema precisão, uma vez que os dados estão completamente alinhados ao padrão esperado, garantindo a confiabilidade do procedimento. Vilela *et al.* (2015) destacam que a acurácia do minilímetro de pesagem eletrônica de baixo custo foi fundamental para garantir medições confiáveis em condições práticas.

Esses resultados são cruciais para validar e aferir instrumentos de medição utilizados em contextos agrícolas e ambientais, contribuindo não apenas para a conformidade com padrões de qualidade exigidos, mas também para a otimização de processos e a redução de custos associados a medições imprecisas.

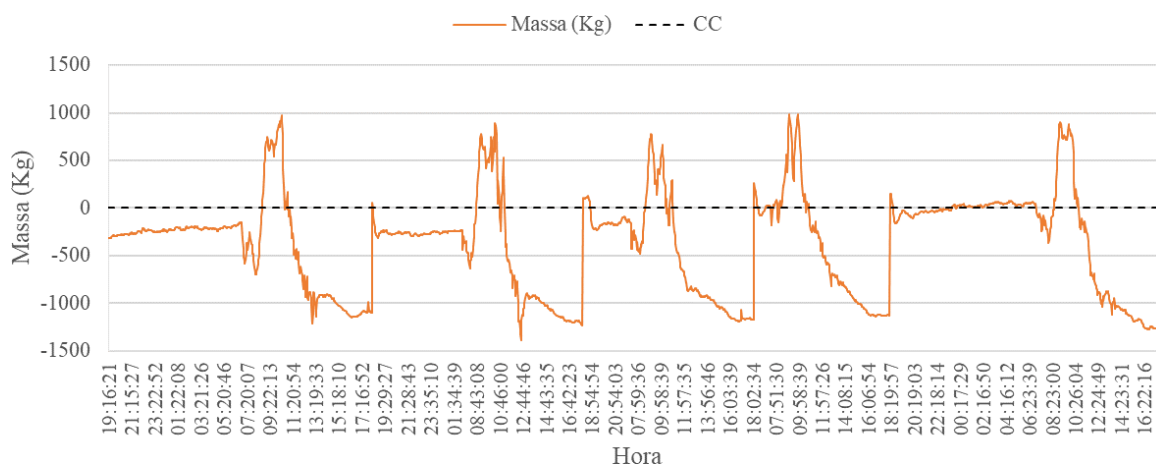
Além disso, a confiabilidade dos minilísímetros de baixo custo é extremamente vantajosa em contextos de recursos limitados, onde soluções mais sofisticadas e dispendiosas podem não ser viáveis. A possibilidade de obter dados precisos e consistentes sobre evapotranspiração e outras medições ambientais usando equipamentos acessíveis promove a democratização do acesso a tecnologias de monitoramento ambiental, essencial para o manejo sustentável de recursos hídricos.

A Figura 18 mostra a variação de massa em relação a capacidade de campo correspondente ao nível zero. Observa-se que as perdas de água para a atmosfera ocorreram entre as 6:00 e as 18:00, correspondendo ao período de incidência da radiação solar ao longo do dia e que a massa se manteve constante durante a noite correspondendo ao período sem radiação incidente.

A linha de massa oscila entre valores positivos e negativos, com picos que sugerem aumento de massa durante o período das 7:20h às 12:00h. Essas oscilações podem estar relacionadas com fatores ambientais como: temperatura, vento, interferência magnética, dentre outros. Segundo Costa (2023), o *Strain Gauge* (extensômetros) pode sofrer variações devido à temperatura, o que altera suas dimensões físicas e, consequentemente, suas propriedades elétricas, especialmente a resistência dos fios, que pode também explicar essa alteração positiva que ocorreu. Os valores negativos indicam a perda de massa ao longo do dia, conforme a água no solo é utilizada pela cultura ou perdida por evapotranspiração.

Um padrão cíclico é claramente observado, com a massa diminuindo durante o dia e sendo restaurada à Capacidade de Campo (CC) por volta das 18h, quando a água é adicionada ao sistema, trazendo os valores próximos a zero.

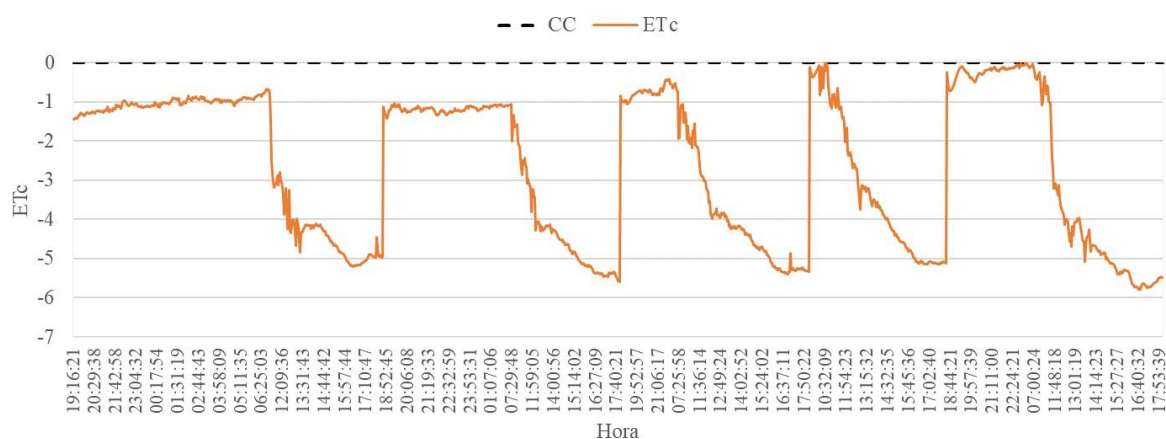
Figura 18 - Variação da massa de água medida pelo minilísímetro ao longo de 5 dias.



Na Figura 19, analisou-se o comportamento da evapotranspiração da cultura (ETc) em relação à Capacidade de Campo (CC). A ETc utilizada neste trabalho foi calculada com base no estudo de Miranda *et al.* (1999), onde cada 1000 g de massa registrada pelo lisímetro corresponde a uma lâmina de 0,453 mm de água. Observa-se que as quedas abruptas no valor de ETc durante o dia são seguidas por uma recuperação gradual ao final da tarde, após a reposição de água no solo. Esse comportamento cíclico, com alta evapotranspiração durante o dia e reidratação do solo ao final da tarde, evidencia a dinâmica de manejo hídrico adotada, que visa manter o solo na Capacidade de Campo por meio da irrigação diária.

De acordo com Rossatto *et al.*, (2022), a evapotranspiração média diária ao longo do ciclo de desenvolvimento da soja em condições irrigadas foi de aproximadamente 4,30 mm dia⁻¹. Nos estágios críticos de desenvolvimento, como R1 (início da floração) e R5 (enchimento de grãos), a demanda hídrica da cultura é mais elevada, com evapotranspiração alcançando 6,9 mm dia⁻¹, como mostrado na (Figura 19). Já os menores valores de ETc foram registrados no início do ciclo e na fase de enchimento pleno dos grãos (R6) (Rossatto *et al.*, 2022).

Figura 19 - Variação horária da evapotranspiração da cultura da soja medida pelo minilísímetro de pesagem ao longo de 5 dias.



6. CONCLUSÃO

O minilímetro de pesagem utilizando o módulo ESP32 foi capaz de realizar o monitoramento do consumo de água da cultura da soja. Porém há uma grande oscilação em horário específico que precisa ser analisado em estudos futuros com instalação de outros sensores como o de temperatura e umidade do solo.

O minilímetro foi capaz de medir diretamente a evapotranspiração da cultura utilizando um fator de ajuste, porém há necessidade da utilização de parâmetros específicos para as características físicas do solo.

7. BIBLIOGRAFIA

ABREU, M. C.; DELGADO, R. C.; LYRA, G. B. **CAPÍTULO 12.**

EVAPOTRANSPIRAÇÃO. Apostila de Meteorologia Básica - IF 143 – 2022 – DCA/IF/UFRRJ. Disponível em:

<https://www.bing.com/ck/a?!&&p=08e41c8eef4869e3JmltdHM9MTcyNDcxNjgwMCZpZ3VpZD0zOWRkYTlZOC0zY2E0LTZhZjUtMWM0Zi1iNjlmZ2QwMDZiYjEmaW5zaWQ9NTwNQ&ptn=3&ver=2&hsh=3&fclid=39dda2383ca46af51c4fb69c3d006bb1&psq=Evapotranspiracao%3a7%3a3o.+In%3a+Apostila+de+Meteorologia+B%3a1sica.+Serop%3a9dica%3aDCA%2fIF%2fUFRRJ%2c+2022.+Cap.+12%2c+p.+200230.&u=a1aHR0cHM6Ly9hc nF1aXZvcy51ZnJyai5ici9hcnF1aXZvcy8yMDIzMTM1MTQ2MzY2NjMjRiZDgzYT AxMWM2MWQvQXBvc3RpbGFfQ2FwdHVsb18xMl9FdmFwb3RyYW5zcGlyYW8ucGR m&ntb=1>. Acesso em: 25 jun. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada.** 2. ed. Brasília: ANA, 2021. Livro. (127 p.), il. ISBN 9788588101100. Disponível em:

https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/acervo/detalhe/88090. Acesso em: 27 ago. 2024.

ALLEN, Richard G.; PEREIRA, Luis S.; HOWELL, Terry A.; JENSEN, Marvin E. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56.** Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 1998. Disponível em:

https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/pdf/Allen_FAO1998.pdf. Acesso em: 11 mai. 2024.

AMARAL, A. M.; VELLAME, L. M.; TEIXEIRA, M. B. **Construção e calibração de lisímetros de pesagem em ambiente protegido.** Revista Brasileira de Agricultura Irrigada v.12, n°.4, p. 2740 – 2748, 2018. Disponível em:

https://www.researchgate.net/profile/Ancelmo-Cazuza-Neto/publication/327276374_CONSTRUCAO_E_CALIBRACAO_DE_LISIMETROS_DE_PESAGEM_EM_AMBIENTE_PROTEGIDO/links/5bd9edc04585150b2b94520c/CONSTRUCAO-E-CALIBRACAO-DE-LISIMETROS-DE-PESAGEM-EM-AMBIENTE-PROTEGIDO.pdf. Acesso em: 27 jun. 2024.

ANCHESQUI, Lucas Dias. **Desenvolvimento de um sistema inteligente de irrigação baseado em IoT para agricultura de precisão.** Monografia (Graduação) - Curso Superior de Engenharia Elétrica, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2023. Acesso em:

https://repositorio.ifes.edu.br/bitstream/handle/123456789/3978/TCC_Desenvolvimento_Sistema_Inteligente_Irigacao%3a7%3a3o_IoT.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 27 jun. 2024.

ANDRADE JUNIOR, A. S. de; BASTOS, E. A.; MONTEIRO, M. M. S. **Evapotranspiração e coeficiente de cultura do feijão-caupi sob sistema de cultivo convencional e plantio direto.** 2018. Disponível em:

<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1101630/1/26370diagramado07.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2024.

AVILEZ, A. M. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; GALVÃO, I. M.; TEIXEIRA, A. H. C.

Determinação dos coeficientes de cultivo e a evapotranspiração real da cana-de-açúcar com o uso do modelo SAFER. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.28, e026831, 2020. Disponível em:

https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/fitossanidadeengenhariaruralesolos715/irrigacao5868/agrometeoros_safer_alberto_mario.pdf. Acesso em: 27 jun. 2024.

CAMPECHE, L. F. M. de S.; AGUIAR NETTO, A. O.; SOUSA, I. F.; FACCIOLI, G. G.; SILVA, V. P. R. da; AZEVEDO, P. V. de. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte I: desenvolvimento e calibração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 1, p. 1-10, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/9shRkDMhxsNfXSWLsFFtKLR/>. Acesso em: 2 jul. 2024.

CAMPECHE, Luís Fernando de Souza Magno. **Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida 'Tahiti' (Citrus latifolia Tan.)**. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002. doi:10.11606/T.11.2002.tde-05082002-160324. Disponível: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-05082002-160324/pt-br.php>. Acesso em: 15 jul. 2024.

CAMPECHE, Luiz F. M. de S., NETTO, Antenor O. Aguiar; SOUSA, Inajá F.. Lisímetro de pesagem de grande porte.: desenvolvimento e calibração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 5, p. 519–525, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000500013>. Acesso em: 15 jul. 2024.

CAMPOS, M. S.; ALCANTARA, L. D. S. Sistema de bombeamento fotovoltaico para irrigação na agricultura familiar. **Braz. J. Anim. Environ. Res.**, Curitiba, v. 1, n. 1, p. 205-214, 2018. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/download/742/635>. Acesso em: 27 jun. 2024.

CARVALHO, L. G. de; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; NETO, P. C. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA: UMA ABORDAGEM ATUAL DE DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456–465, 2011. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/pat/article/view/12760>. Acesso em: 2 jul. 2024.

CARVALHO, Renata Cuba de; MOTA, Flávia Diniz; GABRIEL FILHO, Luís Roberto Almeida; KLAR, Antonio Evaldo; GRASSI FILHO, Hélio. Lisímetro para medida da evapotranspiração na cultura do pimentão em sistema hidropônico com substrato1. **IRRIGA**, [S. l.], v. 25, n. 2, p. 361–376, 2020. DOI: 10.15809/irriga.2020v25n2p361-376. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3830>. Acesso em: 27 ago. 2024.

COELHO, E. F; SILVA, A. J. P; PQRIZOTTO, I; SILVA, T. S. M. Sistemas e manejo de irrigação de baixo custo para agricultura familiar. Cruz das Almas, Bahia: **Embrapa Mandioca e Fruticultura**, 2014. Disponível em: <https://bibliotecasemiarios.ufv.br/jspui/handle/123456789/360>. Acesso em: 15 jul. 2024.

COSTA, Pedro Alcântara. **Desenvolvimento de uma balança de baixo custo com compensação de temperatura e interface IoT**. 2023. 52 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/5622>. Acesso em: 25 jun. 2024.

COSTA, Pedro Alcântara. **Desenvolvimento de uma balança de baixo custo com compensação de temperatura e interface IoT**. 2023. 52 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/5622>. Acesso em: 23 ago. 2024.

CUBA, R. S.; CARMO, J. R. do; SOUZA, C. F. Potencial de efluente de esgoto doméstico tratado como fonte de água e nutrientes no cultivo hidropônico de alface. **Rev. Ambient. Água**, vol. 10 n. 3 Taubaté – Jul. / Sep. 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/WZJppVKzFyZT7gmFj7wWyny/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 15 jul. 2024.

DE AZEVEDO, James Ribeiro; BUENO, Célia Regina Paes. POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES AGRÍCOLAS DE SOLOS EM ASSENTAMENTO DE REFORMA AGRÁRIA NO MUNICÍPIO DE CHAPADINHA-MA. *Scientia Agraria*, [S.l.], v. 17, n. 3, p. 1-13, mar. 2017. ISSN 1983-2443. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/agraria/article/view/46841>>. Acesso em: 26 set. 2024.

DUARTE, J. P. de A.; CHAVES, J. M. A.; LARA, M. E. V.; Ortmann, M. S.; Eckstein, R. F. Controle de motor CC utilizando periférico do microcontrolador ESP32 para futura aplicação em RPA híbrido. In: ANAIS DO 9º SEMINÁRIO DE ENSINO, PESQUISA, EXTENSÃO E INOVAÇÃO DO IFSC, 2023, Joinville. **Anais eletrônicos**. Campinas, Galoá, 2023. Disponível em: <https://proceedings.science/sepei-2023/trabalhos/controle-de-motor-cc-utilizando-periferico-do-microcontrolador-esp32-para-futura?lang=pt-br>. Acesso em: 1 jul. 2024.

Eletrogate, 2024. Placa de Expansão para ESP32 30 Pinos - com Terminais de Alimentação. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/placa-de-expansao-para-esp32-30-pinos-com-terminais-de-alimentacao>. Acesso em: 22 ago. 2024.

FERNANDES, Douglas Alvaristo; GOBBO, Sâmia D'Ângelo Alcuri; SUHET, Maria Isabel; AMARAL, Atanásio Alves do. Uso da água e sustentabilidade da agricultura. **Revista Verde** (Mossoró – RN - BRASIL), v. 8, n. 5, p. 101-107, dez. 2013. Disponível em: <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/1987/2137>. Acesso em: 14 jul. 2024.

FURQUIM, M. G. D.; ABDALA, K. de O. Sustentabilidade e expansão da agricultura irrigada: um olhar para o setor no estado de Goiás. **Natural Resources**, 2019. Disponível em: <https://www.sustenere.inf.br/index.php/naturalresources/article/download/CBPC2237-9290.2019.001.0006/1484>. Acesso em: 26 jun. 2024.

GUTIERRES, M. I. de A.; NEVES, E. A importância do monitoramento da umidade do solo através de sensores para otimizar a irrigação nas culturas. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, Centro Científico Conhecer – Jandaia-GO, v.18 n.35; p. 2021. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/3819/3709>. Acesso em: 27 jun. 2024.

LIMA, Antônio Suassuna de. **Necessidade hídrica e coeficiente de cultivo de variedades de plantas forrageira no semiárido do Brasil**. 2019. 110 fl. (Tese de Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais,

Universidade Federal de Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2019. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/28893>. Acesso em: 22 jul. 2024.

LIMA, Janneson José Ferreira de. **Processamento de dados de estações meteorológicas de baixo custo aplicado na agricultura de precisão**. 2024. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/10802>. Acesso em: 1 jul. 2024.

LIRA, Maira Farias de Andrade. **Prototipagem de um sistema inteligente autônomo de irrigação**. 2020. 88 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021. disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/48350>. Acesso em: 20/05/2024.

LIRA, R. M.; DOS SANTOS, A. N.; DA SILVA, J. S. A utilização de águas de qualidade inferior na agricultura irrigada. **Revista GEAMA**, v.1, n.3, dezembro - 2015. Disponível em: <https://www.journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/download/514/1438>. Acesso em: 15 jul. 2024.

LOCATELLI, Caroline. **Curto Circuito**, 2019. Balança com Célula de Carga e HX711. Disponível em: <https://curtocircuito.com.br/blog/Categoria%20Arduino/balanca-com-celula-de-carga-e-hx711>. Acesso em: 22 ago. 2024.

LOUSADA, Ricardo. **Blog Eletrogate**, 2021. Tutorial Definitivo: Módulo SD Card. Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/tutorial-definitivo-modulo-sd-card/>. Acesso em: 22 ago. 2024.

MAGALHÃES, Roberto. **Compraco**, 2024. MicroPython: como escrever e ler arquivos de texto em um cartão MicroSD usando ESP32. Disponível em: <https://compraco.com.br/blogs/tecnologia-e-desenvolvimento/micropython-como-escrever-e-ler-arquivos-de-texto-em-um-cartao-microsd-usando-esp32>. Acesso em: 22 ago. 2024.

MAIA, Fellipe Renny Carlos. **Concepção de uma horta automática com a plataforma Arduino® para beneficiar agricultores familiares de hortaliças**. 2023. 12 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Centro de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstreams/2db96d78-2e4f-4fc1-b7a8-4f2bf29491ab/download>. Acesso em: 1 jul. 2024.

Mamute Eletronica, 2024. Placa Shield Expansão de Módulo ESP32 WROOM-32 Wifi e Bluetooth - 30 Pinos e USB Micro/Tipo C. Disponível em: <https://www.mamuteeletronica.com.br/placa-shield-expansao-de-modulo-esp32-wroom-32-wifi-e-bluetooth-30-pinos-e-usb-micro-tipo-c-22386>. Acesso em: 22 ago. 2024.

MICROCONTROLLERS LAB, 2024. HX711 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales. Disponível em: <https://microcontrollerslab.com/hx711-adc-weigh-scales/>. Acesso em: 05 jun. 2024.

MIRANDA, F. R. DE .; YODER, R. E.; SOUZA, F. DE . INSTALAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE UM LISÍMETRO DE PESAGEM NO PROJETO DE IRRIGAÇÃO CURU-PARAIPABA, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 1, p.

107–110, jan. 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v3n1p107-110>. Acesso em: 25 jun. 2024.

PÁRRAGA, J. E. C.; PEÑATE, M. U.; GARCÍA, A. R. S. Necesidades hídricas del frijol caupí (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) calculadas con el coeficiente de cultivo utilizando lisímetro de drenaje. **Ciencia y Agricultura**, 17(3), 111–121, 2020. <https://doi.org/10.19053/01228420.v17.n3.2020.11746>. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/5600/560064435010/560064435010.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2024.

PELLISON, A. T.; FRANCO, J. R.; STUCCHI, G.; SILVA, M. V. C.; OLIVEIRA, M. R.; DAL PAI, A. Sistema automático de aquisição de dados de evapotranspiração de referência acoplado a um lisímetro de mesa maior constante. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, [S. l.], v. 12, n. 5, p. e19412541720, 2023. DOI: 10.33448/rsd-v12i5.41720. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/41720>. Acesso em: 27 jun. 2024.

RANDOM NERD TUTORIALS, 2024. ESP32: Guide for MicroSD Card Module using Arduino IDE. Disponível em: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-microsd-card-arduino/>. Acesso em: 05 jun. 2024.

ROCHA, L. O. de S.; GUIMARÃES, C. R. R.; OLIVEIRA, R. A. P. de. Exploração Do Uso Eficiente De Recursos Hídricos Na Agricultura: Investigação De Técnicas De Irrigação E Tecnologias Para A Minimização Do Desperdício De Água. **Revista Foco**, [S. l.], v. 17, n. 4, p. e4950, 2024. DOI: 10.54751/revistafoco.v17n4-128. Disponível em: <https://ojs.focopublicacoes.com.br/foco/article/view/4950>. Acesso em: 4 jul. 2024.

RODRIGUES, L. N.; ALVES, M. E. B.; ZOBY, J. L. G.; BELEM, F. C.; ITABORAHY, C. R.; AUGUSTO, V. A. **Uso Eficiente de Água na Agricultura Irrigada: Bases para Elaboração de Estratégias e Programas**. Brasília, DF. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), 2022. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1149177>. Acesso em: 27 jun. 2024.

ROSSATTO, Antônio Augusto Pinto; KIRCHNER, Jardel Henrique; MARTINS, Juliano Dalcin; SANDER, Leonardo Seibel; AMARAL, William Nathaniel Battu do; PETRY, Mirta Teresinha. PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DA SOJA EM DIFERENTES CULTIVARES EM CADA ESTÁDIO FENOLÓGICO. **IRRIGA**, [S. l.], v. 27, n. 3, p. 477–492, 2022. DOI: 10.15809/irriga.2022v27n3p477-492. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4230>. Acesso em: 21 agos. 2024.

SANTOS, B. P. dos.; SIQUEIRA, R. A. G.; VILLAR, J. A. de A.; FREITAS, M. A. V. . Agricultura e Irrigação no Brasil no cenário das Mudanças Climáticas. **Revista de Tecnologia & Gestão Sustentável**, [S. l.], v. 1, n. 2, 2022. DOI: 10.17271/rtgs.v1i2.3158. Disponível em: <https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/rtgs/article/view/3158>. Acesso em: 14 jul. 2024.

SANTOS, Eduardo Nogueira Dos. **Construção e calibração de sistema eletromecânico utilizado em lisímetro de pesagem**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ensino de stricto sensu, 2020. Disponível em:

<https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/33491/1/EDUARDO%20NOGUEIRA%20DOS%20SANTOS.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2024.

SILVA, J. F. A.; PEREIRA, R. G. **Panorama global da distribuição e uso de água doce**. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.10, n.3, p.263-280, 2019. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC21796858.2019.003.0023>. Acesso em: 15 jul. 2024.

SILVA, Jocássia Reis. **Desenvolvimento de sistema de monitoramento agrometeorológico para casa de vegetação**. 2023. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Engenharia Agrícola e Ambiental - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2023. Disponível em: <https://locus.ufv.br/items/d135a591-371c-4de6-b4f9-01cba369fc82>. Acesso em: 1 jul. 2024.

SILVA, Tamires Lima Da. QUALIDADE DA ÁGUA RESIDUÁRIA PARA REUSO NA AGRICULTURA IRRIGADA. **IRRIGA**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 101–111, 2018. DOI: 10.15809/irriga.2018v1n1p101-111. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3545>. Acesso em: 26 jun. 2024.

SOUZA, Fabio da Silva. **Um protótipo de sistema de monitoramento ambiental para agricultura**. 2023. 11 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência da Computação, Centro de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/home>. Acesso em: 1 jul. 2024.

SULINO, A. L.; GIONGO, P. R.; GERONUTTI, J. A.; BRUM, D. S.; SANTOS, D. de M. Construção e desempenho de lisímetros de drenagem para determinação do balanço hídrico no solo. **Brazilian Applied Science Review**, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 1193–1205, 2019. DOI: 10.34115/basr.v3i2.1238. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BASR/article/view/1238>. Acesso em: 8 jul. 2024.

VENANCIO, Luan Peroni; DA CUNHA, Fernando França; MANTOVANI, Everardo Chartuni; DO AMARAL, Cibele Hummel; DOS REIS, Edvaldo Fialho. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE CULTURA: UMA ABORDAGEM DOS PRINCIPAIS MÉTODOS APLICADOS ÀS PESQUISAS CIENTÍFICAS E NA AGRICULTURA. **IRRIGA**, [S. l.], v. 24, n. 4, p. 719–746, 2019. DOI: 10.15809/irriga.2019v24n4p719-746. Disponível em: <http://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/2888>. Acesso em: 22 jul. 2024.

VILELA, Marcio da Silva; CABRAL FILHO, Fernando Rodrigues; TEIXEIRA, Marconi Batista; AMARAL, Alisson Macendo; VELLAME, Lucas Melo; SOARES, Frederico Antonio Loureiro. ACURÁCIA DE UM MINI-LISÍMETRO DE PESAGEM ELETRÔNICA DE BAIXO CUSTO. **IRRIGA**, [S. l.], v. 1, n. 2, p. 158–167, 2015. DOI: 10.15809/irriga.2015v1n2p158. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/2056>. Acesso em: 18 jul. 2024.

ZUIM, Edgar. **Ponte de Wheatstone: Teoria e Laboratório**. 2023. Disponível em: https://www.ezuim.com/pdf/pte_whts.pdf. Acesso em: 25 jun. 2024.

APÊNDICE A – Código para realizar a leitura de células de carga e armazenar os dados no cartão

micro SD.

```
#include <HX711.h> // Biblioteca para a célula de carga HX711
#include <SPI.h> // Biblioteca para comunicação SPI
#include <SD.h> // Biblioteca para trabalhar com o cartão SD
#include <FS.h> // Biblioteca para o sistema de arquivos
#include <WiFi.h> // Biblioteca para WiFi
#include <NTPClient.h> // Biblioteca para cliente NTP (Network Time Protocol)
#include <WiFiUdp.h> // Biblioteca para UDP (User Datagram Protocol) sobre WiFi
#include <esp_task_wdt.h> // Biblioteca para o cão de guarda de tarefas do ESP32

#define LED_BUILTIN 2 // Defina o pino do LED para o seu ESP32. Geralmente é o pino 2.

// Substitua pelas credenciais da sua rede
const char* ssid = "WP001";
const char* password = "wp001@ufma.br";

// Define o cliente NTP para obter o tempo
WiFiUDP ntpUDP;
NTPClient timeClient(ntpUDP);
String timeStamp;

const int LOADCELL_DOUT_PIN = 26;
const int LOADCELL_SCK_PIN = 25;
const int SD_CS_PIN = 5;

int periodos = 0; // contador de períodos

HX711 scale; // Cria um objeto HX711 chamado scale
File file; // Cria um objeto File chamado file

// Função para conectar ao Wi-Fi
void connectToWiFi() {
```

```

Serial.print("Conectando-se ao Wi-Fi");
WiFi.begin(ssid, password);
unsigned long startTime = millis();
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
    // Se não conseguir conectar ao Wi-Fi em 30 segundos, reinicia o ESP32
    if (millis() - startTime > 30000) {
        Serial.println("Falha ao conectar ao Wi-Fi. Reiniciando...");
        ESP.restart();
    }
}
Serial.println(" Conectado!");
}

// Função setup() é chamada uma vez quando o ESP32 é inicializado
void setup() {
    // Configura o cão de guarda para um tempo limite de 240 segundos, o que vale 4 minutos.
    esp_task_wdt_init(240, true);

    // Adiciona a tarefa loop() ao cão de guarda
    esp_task_wdt_add(NULL);

    // Inicializa a comunicação serial a 115200 bps
    Serial.begin(115200);
    // Configura o pino do LED como saída
    pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
    // Acende o LED
    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
    // Aguarda a porta serial ser aberta
    while (!Serial) {
        ;
    }
}

```

```

// Inicializa o cartão SD
if (!SD.begin(SD_CS_PIN)) {
    // Se a inicialização falhar, imprime uma mensagem de erro
    Serial.println("Falha de inicializacao do cartao");
    // Reinicia o ESP32 até que a conexão com o cartão seja estabelecida
    while (!SD.begin(SD_CS_PIN)) {
        Serial.println("Reiniciando...");
        ESP.restart();
        delay(5000); // Aguarda 5 segundos para o ESP32 reiniciar completamente
    }
}

// Se a inicialização for bem-sucedida, imprime uma mensagem de confirmação
Serial.println("Cartao inicializado");

// Escreve no arquivo "Peso.txt" no cartão SD
writeFile(SD, "Peso.txt", "\r\n");

// ...
connectToWiFi(); // Chama a função para conectar ao Wi-Fi
// ...

// Imprime o endereço IP local e inicia o servidor
Serial.println("");
Serial.println("WiFi conectado.");
Serial.println("Endereço IP: ");
Serial.println(WiFi.localIP());

// Apaga o LED
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);

// Inicializa um cliente NTP para obter o tempo
timeClient.begin();
//Defina o tempo de deslocamento em segundos para ajustar o seu fuso horário, por exemplo:

```

```

// GMT +1 = 3600
// GMT +8 = 28800
// GMT -1 = -3600
// GMT -3 = -10800 Brasil região nordeste.
// GMT 0 = 0
// Configura o deslocamento de tempo em segundos para ajustar para o seu fuso horário
timeClient.setTimeOffset(-10800);

// Inicializa a célula de carga
scale.begin(LoadCell_DOUT_PIN, LoadCell_SCK_PIN);
// Calibra a célula de carga com o peso de um objeto conhecido
scale.set_scale(-30340.9);
//scale.tare();
}

// Função loop() é chamada repetidamente enquanto o ESP32 está ligado
void loop() {
    // Cria uma string vazia
    String dataString = "";

    // Variável para armazenar o último peso lido
    float ultimoPeso = 0;

    // Força a atualização do cliente NTP
    while(!timeClient.update()) {
        timeClient.forceUpdate();
    }

    // Inicia a contagem do tempo
    unsigned long tempoInicial = millis();
    // Enquanto o tempo decorrido for menor ou igual a 3 minutos
    while (millis()- tempoInicial <= 3 *60 * 1000){
        // Lê o peso da célula de carga

```

```

ultimoPeso = (scale.get_units(10)- 4.274);
// Imprime o peso atual
Serial.print("Peso atual: ");
Serial.print(ultimoPeso, 3);
Serial.println(" kg");

// Obtém a hora atual
timeStamp = timeClient.getFormattedTime();
// Imprime a hora atual
Serial.print("HORA: ");
Serial.println(timeStamp);

// Aguarda 3 segundos
delay(3000);
}

// Escreve o último peso no arquivo
if(dataString){
    // Alimenta o cão de guarda para evitar o reinício
    esp_task_wdt_reset();
    // Formata a string com o último peso e a hora
    dataString += String("Último peso: ");
    dataString += String(ultimoPeso, 3);
    dataString += String(" kg");
    dataString += String(" Hora: ");
    dataString += String(timeStamp);
    dataString += "\r\n";
    // Imprime a string
    Serial.println(dataString);
    // Anexa a string ao arquivo "Peso.txt"
    appendFile(SD, "/Peso.txt", dataString.c_str());
    // Imprime uma mensagem de confirmação
    Serial.println("Último peso salvo no arquivo PESO.txt com o horário");
}

```

```

    }
    else {
        // Se houver um erro ao abrir o arquivo, imprime uma mensagem de erro
        Serial.println("Erro ao abrir o arquivo PESO.TXT");
    }
}

// Função para escrever no arquivo
void writeFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message) {
    // Abre o arquivo para escrita
    File file = fs.open(path, FILE_WRITE);
    if (!file) {
        // Se o arquivo não puder ser aberto para escrita, imprime uma mensagem de erro
        Serial.println("Falha ao abrir arquivo para gravação");
        return;
    }
    // Escreve a mensagem no arquivo
    if (file.print(message)) {
        // Se a mensagem for escrita com sucesso, imprime uma mensagem de confirmação
        Serial.println("Arquivo escrito");
    } else {
        // Se a escrita falhar, imprime uma mensagem de erro
        Serial.println("Falha na gravação");
    }
    // Fecha o arquivo
    file.close();
}

// Função para anexar ao arquivo
void appendFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message) {
    // Abre o arquivo para anexação
    File file = fs.open(path, FILE_APPEND);
    if (!file) {

```

```
// Se o arquivo não puder ser aberto para anexação, imprime uma mensagem de erro
Serial.println("Falha ao abrir arquivo para anexo");
return;
}
// Anexa a mensagem ao arquivo
if (file.print(message)) {
    // Se a mensagem for anexada com sucesso, imprime uma mensagem de confirmação
    Serial.println("Mensagem anexada");
} else {
    // Se a anexação falhar, imprime uma mensagem de erro
    Serial.println("Anexação falhou");
}
// Fecha o arquivo
file.close();
}
```

APÊNDICE B - Código para realizar a calibração da balança.

/*Exemplo usando a placa SparkFun HX711 com uma balança

Por: Nathan Seidle

SparkFun Electronics

Data: 19 de novembro de 2014

Licença: Este código é de domínio público, mas você me compra uma cerveja se usá-lo e nos encontrarmos algum dia (Licença Beerware).

Este código de exemplo usa a excelente biblioteca de bogde: <https://github.com/bogde/HX711>

A biblioteca de bogde é lançada sob uma LICENÇA PÚBLICA GERAL GNU

*/

#include "HX711.h" // Inclui a biblioteca HX711 para a balança

#define DOUT 26 // Define o pino de saída de dados para 26

#define CLK 25 // Define o pino de clock para 25

HX711 scale; // Cria um objeto scale da classe HX711

float weight; // Variável para armazenar o peso

float calibration_factor = -30340.9; // Fator de calibração para a balança

void setup() {

Serial.begin(115200); // Inicia a comunicação serial a 115200 bps

scale.begin(DOUT, CLK); // Inicia a balança com os pinos DOUT e CLK

// Imprime as instruções para a calibração

Serial.println("Espaço de calibração do HX711");

Serial.println("Remover todo o peso da balança");

Serial.println("Após o início das leituras, coloque o peso conhecido na balança");

Serial.println("Pressione + ou a para aumentar o fator de calibração");

Serial.println("Pressione - ou z para diminuir o fator de calibração");

```

scale.set_scale(); // Define a escala da balança
scale.tare(); // Zera a balança

long zero_factor = scale.read_average(); // Obtém uma leitura base

// Imprime o fator zero, que pode ser usado para remover a necessidade de zerar a balança
Serial.print("fator zero: ");
Serial.println(zero_factor);
}

void loop() {
    scale.set_scale(calibration_factor); // Ajusta o fator de calibração

    Serial.print("Leitura: ");
    weight = scale.get_units(10); // Obtém o peso em unidades (neste caso, 10 leituras são feitas
    e a média é retornada)

    // Imprime o peso em quilogramas
    Serial.print("Kilograma:");
    Serial.print( weight, 4);
    Serial.print(" Kg");

    // Imprime o fator de calibração atual
    Serial.print(" calibration_factor: ");
    Serial.print(calibration_factor);
    Serial.println();

    // Se houver dados disponíveis na serial
    if(Serial.available())
    {
        char temp = Serial.read(); // Lê o caractere

        // Se o caractere for '+' ou 'a', aumenta o fator de calibração
    }
}

```

```
if(temp == '+' || temp == 'a')
    calibration_factor += 10;

// Se o caractere for '-' ou 'z', diminui o fator de calibração
else if(temp == '-' || temp == 'z')
    calibration_factor -= 10;
}
```