

Construção e Calibração de Sistema Eletromecânico Utilizado em Lisímetro de Pesagem

Construction and Calibration of Electromechanical System Used in Weighing Lysimeter

Osvaldo Alves Pereira^{*a}; Eduardo Nogueira dos Santos^a; Noel Fávio Costa Ferreira^a; Victor Hugo de Moraes Danelichen^a; Gustavo Santos Brito de Moraes^a

^aUniversidade de Cuiabá, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. MT, Brasil.

*E-mail: osvaldo.pereira@cogna.com.br

Resumo

A escassez de recursos hídricos no Planeta é um problema que preocupa cada vez mais a humanidade. Sendo a agricultura responsável pela maior fatia do consumo de água doce, o estudo da evapotranspiração é imprescindível para o manejo de culturas. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema eletromecânico para a automação de lisímetros de pesagem. A plataforma de desenvolvimento é o Arduino, de baixo custo e *open source*. Composto por estrutura de aço, célula de carga e um sistema de aquisição e armazenagem de dados, o sistema possibilita avaliar a evaporação do solo ou a evapotranspiração, tendo como referência uma dada cultura. Os dados do sistema, coletados automaticamente, permitem a avaliação em conjunto com as informações de variáveis climáticas obtidas em estações meteorológicas como umidade relativa do ar, temperatura, precipitação, velocidade do vento e radiação fotossinteticamente ativa. Os resultados deste estudo indicam claramente a variação de massa de amostras de solo pela evaporação da água contida conforme as variáveis do clima. Assim, pode-se concluir que os dados podem ser obtidos em tempo real pela leitura diretamente no *display* ou pelo conjunto armazenado em cartão SD, propiciando uma alternativa viável a estimativa da ET.

Palavras-chave: Arduino. Lisímetro. Evapotranspiração.

Abstract

The scarcity of water resources in the world is a problem that worries humanity more and more. As agriculture is responsible for the largest share of freshwater consumption, the study of evapotranspiration is essential for crop management. The objective of this work was to develop an electromechanical system for the automation of weighing lysimeters. The development platform is Arduino, low cost, and open source. Composed of a steel structure, load cell and a data acquisition and storage system, the system makes it possible to evaluate soil evaporation or evapotranspiration, using a given crop as a reference. The system data, collected automatically, allows the evaluation together with the information of climatic variables obtained in meteorological stations such as relative humidity, temperature, precipitation, wind speed and photosynthetically active radiation. The results obtained clearly indicate the variation in the mass of soil samples due to the evaporation of the water contained according to the climate variables. The data can be obtained in real time by reading directly on the display or by the set stored on an SD card.

Keywords: Arduino. Lysimeter. Evapotranspiration.

1 Introdução

A escassez de água demonstra ser um dos principais problemas a serem enfrentados pela agricultura, principalmente em regiões semiáridas (Ávila *et al.*, 2017; Araujo *et al.*, 2011; Ramos *et al.*, 2023). Isso pode ocasionar impacto na produção de culturas e sobrevivência dos ecossistemas, o que requer adaptação de diferentes métodos de desenvolvimento com o intuito de otimizar o uso da água (Halac, 2023; Oliveira *et al.*, 2005). A necessidade hídrica de uma cultura é dada pela evapotranspiração (ET), que é o processo de perda de água do solo pela evaporação e a perda de água pela transpiração, simultaneamente, para a atmosfera (Martinez, *et al.*, 2014).

Para Kumar *et al.* (2002), a evapotranspiração é um fenômeno bastante complexo, pois depende da interação entre diversas variáveis climáticas e do tipo e estágio de

desenvolvimento da vegetação. É de suma importância o conhecimento desse processo e uma das formas utilizadas como estratégia de manejo e dimensionamento de projetos de irrigação, baseada no monitoramento de elementos meteorológicos como radiação, temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento para estimar da ET (Alam *et al.*, 2024; Martinez *et al.*, 2014).

Entre os métodos para se estimar a ET, os de balanço de energia (Razão de Bowen) e aerodinâmicos (Penman-Monteith) são universalmente utilizados (Pereira *et al.*, 2019), mas não fornecem cálculos precisos da ET, uma vez que são calculados indiretamente por modelos matemáticos (Barros *et al.*, 2009). Outro método que vem sendo utilizado na agricultura de precisão é o sensoriamento remoto que obtém boas estimativas da ET com um custo reduzido (Silva *et al.*, 2014), mas o processo abrange uma calibração (validação dos

dados) e são necessárias para cada espécie.

Os métodos de lisimetria têm precisão maior, pois estes medem a ET sendo, portanto, instrumentos necessários na validação de modelos que estimam a ET (Alam *et al.*, 2024; Lemos Filho *et al.*, 2010).

Lisímetros são instrumentos destinados à medição quantitativa do consumo hídrico de plantas, além de serem um valioso instrumento na modelagem de dados de balanço hídrico do solo (Martinez *et al.*, 2014) e utilizado para calibração de sondas de umidade do solo. Os mais utilizados são os de pesagem, sistema que mede por diferença de massa a perda de água da planta e solo para atmosfera ao longo do tempo, que em conjunto com sistema de pesagem e aquisição de dados digitais são considerados de alta precisão (Carvajal *et al.*, 2017). Novas tecnologias devem ser utilizadas para alcançar uma modelagem/estimativa adequada, que é o principal determinante da qualidade e quantidade dos valores da ET (Carvajal *et al.*, 2017).

Nesse sentido, este trabalho apresenta o desenvolvimento e implementação de um sistema de instrumentação capaz de determinar com precisão o balanço hídrico durante utilização de um lisímetro de pesagem.

2 Material e Métodos

O experimento foi conduzido no campus da Universidade de Cuiabá (UNIC) estado de Mato Grosso, na qual se encontra instalada uma estação meteorológica com medições contínuas das variáveis meteorológicas (Figura 1). coordenadas S 15°37.1326', W 56°7.0550', altitude 156 m. O clima de Cuiabá é classificado, segundo Köppen, como Aw (Clima Tropical de Savana), caracterizado por estação seca de Inverno e temperatura média do mês mais frio do ano acima de 18 °C.

Figura 1 - Estação Meteorológica Automática do Campus de Universidade de Cuiabá



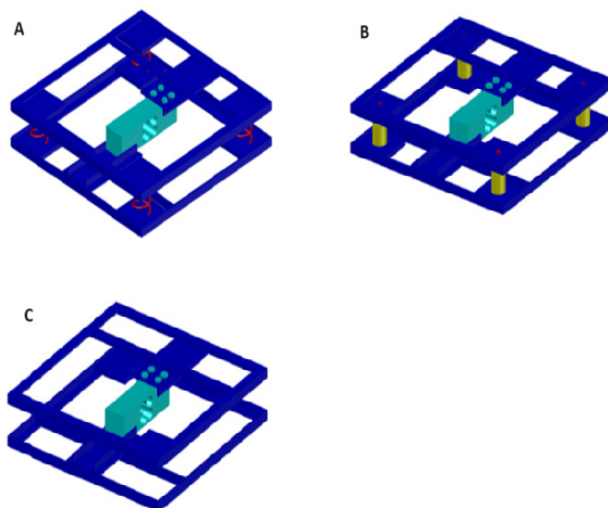
Fonte: os autores.

A estação meteorológica utilizada conta com os equipamentos necessários para comparar o desempenho dos lisímetros com os dados de temperatura, umidade do ar, radiação solar e velocidade do vento. É alimentada por sistema fotovoltaico ligado a uma bateria que alimenta um *datalogger* para aquisição dos dados meteorológicos. O *datalogger* utilizado na estação é da marca CAMPBELL SCIENTIFIC, modelo CR100, SN 10381. A radiação fotossintética ativa foi medida pelo sensor calibrado para a radiação solar PAR (LI-190SZ Quantum Sensor, LICOR, Inc.). Para medir a velocidade do vento se utilizou conjunto anemômetro de três copos hemisféricos leves. O modelo utilizado é o 03002-5 da marca YOUNG com precisão de velocidade do vento $\pm 0,5$ m/s e de direção de $\pm 5^\circ$. A temperatura e umidade relativa do ar foram obtidas com um termohigrômetro, modelo HC2S3-L, NS 61052865 (Pereira *et al.*, 2013).

A construção de estrutura metálica da base do lisímetro de pesagem foi confeccionada no laboratório de usinagem da faculdade de engenharia mecânica da Universidade de Cuiabá (UNIC), a construção de hardware e software para interface de célula de carga, bem como a calibração foram realizados no laboratório de instrumentação do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da UNIC.

Foram construídos três modelos de lisímetros de pesagem para verificar qual ofereceria a melhor estabilidade nas medidas. A estrutura de suporte dos três lisímetros foi construída com duas plataformas de cantoneiras metálicas de dimensões 40x40 cm cada (Figura 2). Essas plataformas foram fixadas diretamente na célula de carga, a qual fica localizada no centro da estrutura. As diferenças construtivas entre as três estruturas de suporte são: a primeira utiliza molas nos quatro cantos, Figura 2 (A), a segunda utiliza um guia cilíndrico nos quatro cantos, Figura 2 (B) e a terceira utiliza apenas a célula de carga entre as plataformas, Figura 2 (C).

Figura 2 - Vista do suporte para lisímetro de pesagem: com mola (A), com guia cilíndrico (B), somente com a célula de carga (C)



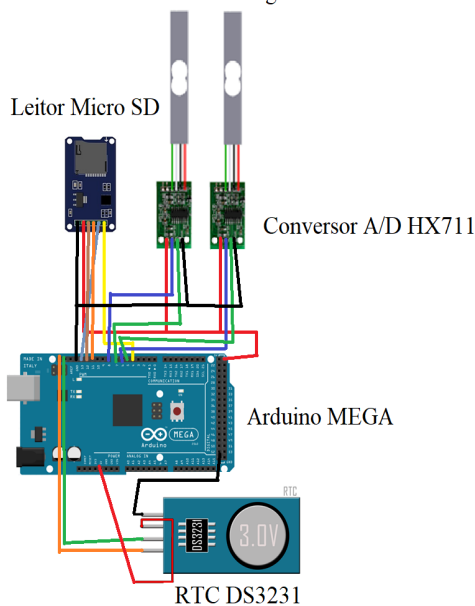
Fonte: os autores.

A massa total é registrada por células de carga modelo PLA, de capacidade de 300 kg, seladas contra umidade e com dispositivo para compensação contra variações de temperatura na faixa de -10 à +60 °C. Segundo o fabricante (Líder Balanças – Tecnologia em Pesagem, Araçatuba - SP), a sensibilidade das células de carga é de 2mV/V +/- 0,1% e a acuracidade é de 0,01% do fundo de escala.

A estrutura escolhida dentre as três apresentadas foi aquela representada pela Figura 2 (C), sem guias ou molas, pois durante os testes de calibração, os resultados ao colocar ou retirar os pesos, refletiram melhor nessa estrutura, ou seja, garantiu uma melhor estabilização. As guias promoveram um certo atrito, refletindo nos resultados de calibração e estabilização, já as molas também exerceram uma força contrária ao deslocamento em função de sua constante elástica, o que também interferiu na estabilização.

O projeto das estruturas foi realizado por meio do software Auto CAD Mechanical 2017 da Autodesk. Para interface de aquisição e armazenamento de dados, utilizou-se a placa Arduino Mega R3, que possui um microcontrolador ATMEGA2560 da empresa Atmel (Garcia *et al.*, 2015). Esta escolha se justifica pela necessidade de aliar um módulo conversor/amplificador A/D do tipo HX711 de 24 bits para aquisição de dados com uma interface SPI para comunicação com o Arduino (Torres *et al.*, 2015). Além disso, o Arduino por ser *open source*, possui variadas bibliotecas disponíveis na internet, entre essas uma biblioteca de gravação de dados em cartão de memória do tipo SD formatado em FAT32 com capacidade de até 4GB de memória. Na Figura 3 pode ser visto o Circuito Montado com a placa de desenvolvimento Arduino, Conversor A/D HX711, módulo cartão micro SD, e um RTC tipo DS3231.

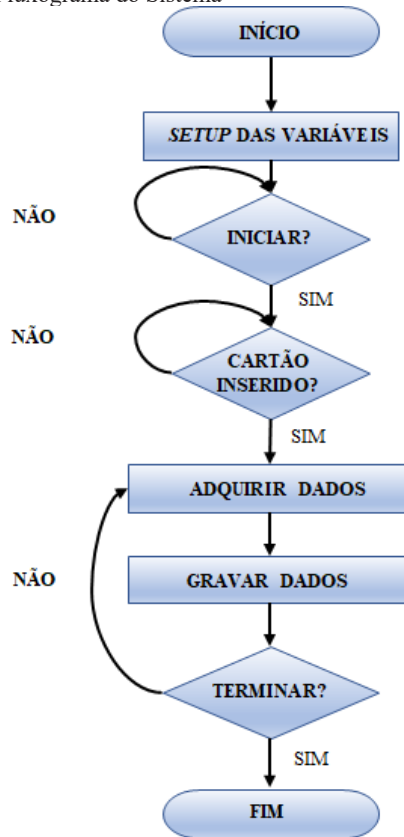
Figura 3 - Circuito de aquisição de dados Células de carga



Fonte: os autores.

A etapa de programação e gravação do microcontrolador foi realizada no software de código livre Arduino 1.8.5. O fluxograma utilizado pode ser visualizado na (Figura 4).

Figura 4 - Fluxograma do Sistema

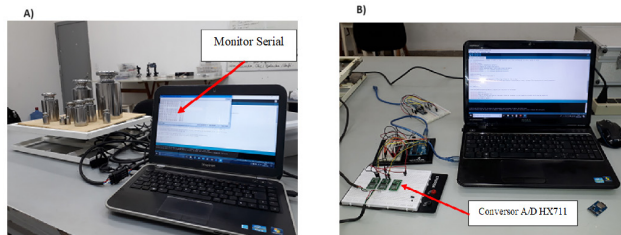


Fonte: os autores.

Foi desenvolvido um código (software) para automatizar as leituras e armazenar os resultados no cartão SD do Arduino, as leituras foram programadas para cada 5 minutos. A estrutura do código funciona da seguinte maneira: depois de iniciadas as variáveis, é verificado se o cartão está inserido no dispositivo, se sim, começa a gravar os dados no cartão SD até que o usuário desligue a fonte de alimentação para parar a gravação.

A calibração foi realizada em ambiente de laboratório para evitar interferência no registro da massa padrão, em função do efeito do vento durante o procedimento, utilizando-se vários pesos padrão, conforme Amaral *et al.* (2018). Iniciou-se o ensaio de calibração (Figura 5) com um código específico de calibração, o qual utiliza uma constante para a leitura A/D do conversor HX711 que é convertida para massa em quilogramas, então foi anotada essa constante quando valor registrado pelo Arduino no monitor serial da IDE (Tela do computador), ficasse igual à massa padrão colocada no lisímetro. A variação de massa foi obtida com a adição e retirada de várias massas individuais, sendo os acréscimos ou retiradas de massa, realizados a cada dois minutos aproximadamente, descartando-se da análise as leituras registradas durante o primeiro minuto, já que incluíam as oscilações provocadas pela variação de massa (Faria *et al.*, 2006).

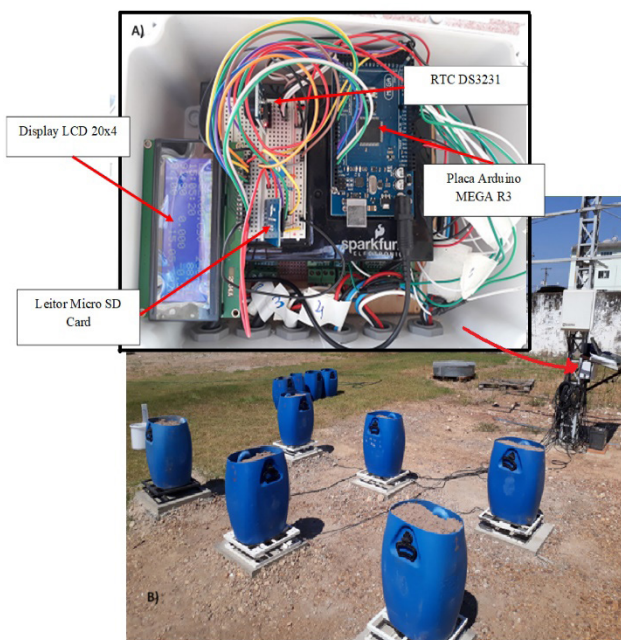
Figura 5 – Procedimento de calibração das balanças (A) e Procedimento de carregamento do código na placa Arduino (B)



Fonte: os autores.

O circuito de aquisição e armazenamento de dados foi montado adjacente à estação meteorológica do Campus da Universidade de Cuiabá (UNIC). O sistema foi conectado aos lisímetros de pesagem descritos anteriormente nas Figuras 6(A) e (B).

Figura 6 – Sistema de aquisição e armazenamento de dados - Datalogger (A) e Lisímetros de Pesagem com Células de Carga (B)



Fonte: os autores.

As amostras de solo para o experimento foram colhidas na fazenda experimental da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), na qual está instalada a estação meteorológica Padre Ricardo Remetter, no município de Santo Antônio de Leverger em Mato Grosso.

Foram escolhidas duas amostras aleatoriamente para a realização do experimento. Os recipientes tiveram sua massa inicial medida e, logo após, foram acrescentados 2,5 litros de água, uma única vez, para as análises comparativas da evaporação do solo e verificação do desempenho dos lisímetros.

3 Resultados e Discussão

Durante o processo de calibração foram obtidos valores para os fatores de conversão para seis lisímetros de acordo

com a estrutura escolhida, mostrados no Quadro 1.

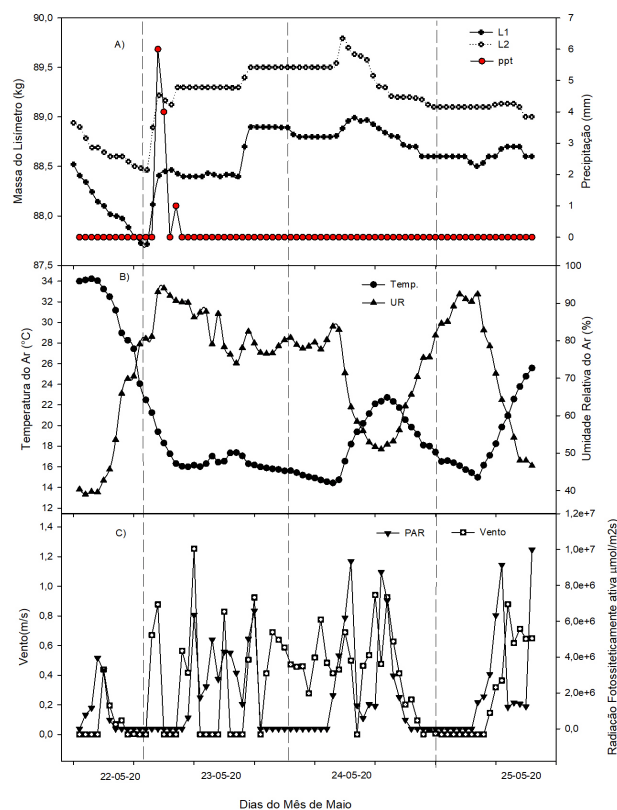
Quadro 1 – Fatores de Calibração

Lisímetro	Fator de Calibração
1	-14120
2	-13890
3	-13640
4	-13730
5	-13800
6	-13460

Fonte: dados da pesquisa.

Os resultados dos fatores, para cada lisímetro, foram inseridos no código para a leitura e processamento dos dados. A coleta de dados ocorreu em dois períodos diferentes. O primeiro ocorreu dos dias 22 a 25/05/20 e os resultados estão representados na (Figura 7).

Figura 7 – Variação de Massa dos Lisímetros, Temperatura, Umidade Relativa do Ar, Vento, Radiação e Precipitação (22 a 25/05/2020)



Fonte: dados da pesquisa.

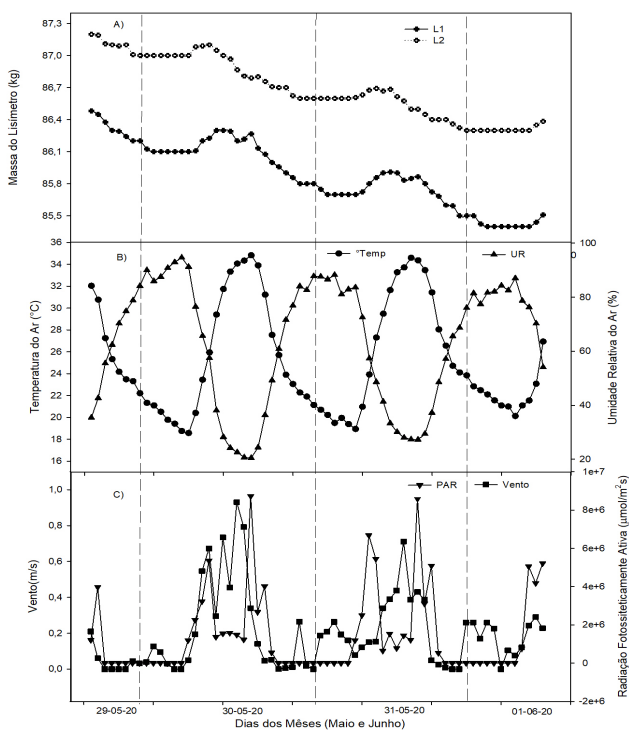
Houve decréscimo inicial na massa dos lisímetros Figura 7(A), enquanto a temperatura e umidade relativa do ar se mantiveram constantes Figura 7(B), porém a velocidade do vento variou aumentando a capacidade convectiva do sistema, o que justifica a evaporação Figura 7 (C). Logo após, a massa continuou a cair em uma menor taxa, enquanto a temperatura inicia uma queda brusca ocasionada por uma frente fria que se instalou na região, provocando a elevação da umidade relativa do ar, dia 22 de maio.

No início do dia 23 se observa uma variação na

precipitação, o que fez aumentar a massa dos lisímetros. Essa massa se manteve constante ao longo do dia com a umidade relativa do ar acima de 80%, chegando acima de 90%. Uma pequena variação na massa (200 g) ocorreu no dia 24/05/2020, o que pode ser atribuído a uma instabilidade na leitura, fato que pode ser explicado pela variação do vento e a precisão do sistema. Com a elevação da radiação solar e velocidade do vento, observa-se o decréscimo na massa dos lisímetros pelo aumento da evaporação. Essa tendência seguiu-se até o dia 25/05/2020.

No segundo período de avaliação, a massa nos lisímetros diminuiu, conforme Figura 8 (A), enquanto a temperatura e a umidade relativa do ar decresceram e aumentaram, respectivamente, conforme registra Figura 8(B), no dia 29/05/2020 e permaneceu constante em grande parte do dia 30/05/2020, com uma pequena variação nesse dia, possivelmente pela variação do vento, segundo demonstra a Figura 8(C) e instabilidade do sistema, o que é percebido também no dia 31/05/2020. Com a diminuição da temperatura e aumento da umidade relativa do ar se observa uma tendência de queda na taxa de evaporação.

Figura 8 – Variação de Massa dos Lisímetros, Temperatura e Umidade Relativa do Ar, Vento e Radiação (29/05/2020 a 01/06/2020)



Fonte: dados da pesquisa.

A influência do vento e da radiação solar, nesse período, também podem ser observadas. Com o aumento da radiação solar e velocidade do vento, a taxa de evaporação aumentou, fato percebido pelo decréscimo na massa dos lisímetros Figura 8(A).

Araújo, Reis e Moreira (2011), em seu estudo sobre

a evapotranspiração, relatam que a radiação global e a temperatura média do ar foram as variáveis de maior influência sobre a estimativa da evapotranspiração de referência, sendo a radiação global a variável de maior efeito direto. Lemos Filho *et al.* (2010), estudando a influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência, em Minas Gerais, destacam o déficit de pressão de vapor e a velocidade do vento, além da radiação solar, que foi o elemento meteorológico que mais influenciou a estimativa da ET_0 (Sousa; Drumond; Naldi, 2015).

4 Conclusão

No estudo realizado foi possível analisar o perfil de evaporação das amostras de um determinado solo, comparando com a variáveis climáticas como temperatura e umidade relativa do ar, radiação fotossinteticamente ativa, precipitação e velocidade do vento.

Com uma precisão de 100 gramas, pode-se dizer que o sistema de coleta e armazenagem de dados da massa analisada serve ao propósito de um aparato eletromecânico de baixo custo.

No presente estudo foi analisada apenas a evaporação do solo, porém é possível estender o estudo para a análise da evapotranspiração para uma determinada cultura de referência e determinar as necessidades hídricas. O sistema pode ser instalado em qualquer ambiente externo, pois demonstrou robustez e facilidade na coleta de dados. Estudos utilizando um microcontrolador Arduino, sensores de umidade do solo e válvulas solenoides para o controle da irrigação de uma casa de vegetação comprovaram a eficácia e viabilidade do sistema.

O uso da Plataforma Arduino traz uma ampla gama de versatilidade, quando se trata da aplicação em sistemas de aquisição de dados e extrapola o âmbito da agrometeorologia. O sistema como de produção de biodiesel já foi avaliado e testado com etapas de reação, separação e lavagem com o uso de materiais de baixo custo e controle através da placa de comando Arduino, sendo aplicado um sensor de fluxo para medir o consumo de combustível de máquinas agrícolas com base nessa plataforma, e foi observado um ótimo funcionamento do aplicativo.

Já consolidada em aplicações lúdicas e didáticas, fica claro que o Arduino pode trazer inúmeros benefícios na engenharia como um todo no uso profissional. Sistemas para controle de temperatura, deformações estruturais, automação, por exemplo, podem ter sua base nessa plataforma de forma segura com custos altamente acessíveis.

Referências

- ALAM, M. M. et al. A review of recent advances and future prospects in calculation of reference evapotranspiration in Bangladesh using soft computing models. *J. Environ. Manag.*, v. 351, 2024.
- AMARAL, A.M. et al. Construção e calibração de lisímetros de

- pesagem em ambiente protegido. *Rev. Bras. Agricul. Irrigada*, v.12, n.4, p.2740-2748, 2018.
- ARAUJO, G.; REIS E.; MOREIRA, G. Correlações entre variáveis climatológicas e seus efeitos sobre a evapotranspiração de referência. *Rev. Bras. Agricul. Irrigada*, v.5, p.96-104, 2011.
- ÁVILA, V.S. et al. Simulation of soil water balance and partitioning of evapotranspiration of maize grown in two growing seasons in Southern Brazil. *Ciênc. Rural*, v.47, n.12, 2017.
- BARROS, V.R. et al. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica- RJ, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. *Rev Bras. Ciênc. Agrár.*, v.4, n.2, p.198-203, 2009.
- CARVAJAL, C.J. Weighing lysimetric system for the determination of the water balance during irrigation in potted plants. *Agricul. Water Manag.*, v.183, p.78-85, 2017.
- FARIA, R.T.; CAMPECHE, F.S.M.; CHIBANA, E.Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. *Rev Bras. Eng. Agríc. Amb.*, v.10, n.1, p.237-242, 2006.
- GARCIA, R. F; DE LIMA, R. C; MANHÃES, C.M.C. Nota técnica: avaliação de um sensor de fluxo utilizando placa microcontroladora Arduino, v.23, n.2, p.162-168, 2015.
- HALAC – Historia Ambiental, Latinoamericana y Caribeña. Disponível em: <http://halacsolcha.org/index.php/halac>. v.13, n.3, p.353-357, 2023. doi: <https://doi.org/10.32991/2237-2717.2023v13i3.p353-357>.
- KUMAR, M. et al. Estimating evapotranspiration using artificial neural network. *J. Irrigation Drainage Eng.*, v.128, n.4, p.224-233, 2002.
- LEMOS FILHO, L.C.A. et al. Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Minas Gerais. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, v.14, p.1294-1303, 2010.
- MARTINEZ, S. et al. Soil water balance: Comparing two simulation models of different levels of complexity with lysimeter observations. *Agricu. Water Manag.* v.139, p.53-63, 2014
- OLIVEIRA, S.L.E; COELHO FILHO, M.A.; COELHO, E.F. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água. *Bahia Agríc.*, v.7, p.57-60, 2005.
- PEREIRA, O.A. et al. Study of CO2 Flow and Energy Balance in a Transition Forest in Southwestern Amazonia by the Modified Bowen Ratio Methods and Eddy Covariance. *Australian J. Basic Appl. Scie.*, p.12-18, 2019.
- PEREIRA, O.A. et al. Determinação do fluxo de CO2 no norte do Pantanal mato-grossense. *Rev. Bras. Meteorol.* v.28, p.341-352, 2013.
- RAMOS, A. L. S. et al. Uso sustentável da água: uma definição a partir dos conceitos de segurança hídrica, de eficiência e de sustentabilidade. In: MELGAREJO MORENO, J.; LÓPEZ ORTIZ, M.I.; FERNÁNDEZ ARACIL, P. Seguridad hídrica. Alacant: Universitat d'Alacant, 2023. p. 805-813. ISBN 978-84-1302-234-5
- SILVA, H.C.D. et al. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (Eto) na região de Petrolina-PE. *Ciênc. Nat.*, v. 36, p. 456-461, 2014.
- SOUSA, M.M; DRUMOND, L.C.D; NALDI, M.C. Sistema computacional para aquisição automática e disponibilização de dados meteorológicos. *Eng. Agríc.* v.35, n.3, p.606-612, 2015.
- TORRES, J.D. et al. Aquisição de dados meteorológicos através da plataforma Arduino: construção de baixo custo e análise de dados. *Sci. Plena*, v.11, n. 2, p.1–13, 2015.