

Controlador de Irrigação Estocástica para Aquisição de Dados para Treinamento de Modelos de Aprendizado de Máquina em Cultivos de Açaí

Anthony S. Santos, Jean G. de A. Figueiredo, Jhonata D. M. Martins, Renan C. de Barros, Gabryella R. R. da Silva, Jeferson B. N. Leite, Marcos E. C. Garcia e Gilvan S. Borges

Resumo—A expansão do cultivo do açaí em terra firme impulsiona o estudo de estratégias de irrigação baseadas em sensoriamento e aprendizado de máquina. O treinamento desses modelos requer bases de dados de medições de sensores obtidas sob diferentes condições hídricas da plantação. Como controladores de irrigação operam com lógicas estáticas, este trabalho propõe um controlador estocástico de irrigação baseado no ESP32. O sistema executa cronogramas diários, variando frequência, distribuição temporal e duração das irrigações de acordo com distribuições de probabilidade que induzem déficit, conforto e excesso hídrico. Testes de bancada validaram o sistema para futura aquisição de dados em campo.

Palavras-Chave—Automação Agrícola, Sistemas Embarcados, ESP32, Açaí.

Abstract—The expansion of açaí cultivation on terra firme drives the study of irrigation strategies based on sensing and machine learning. Training these models requires sensor measurement datasets collected under different soil water conditions. Since conventional irrigation controllers operate with static logic, this work proposes a stochastic irrigation controller based on the ESP32. The system executes daily schedules, varying the frequency, temporal distribution, and duration of irrigation events according to probability distributions that induce water deficit, comfort, and excess conditions. Bench tests validated the system for future field data acquisition.

Keywords—Agricultural Automation, Embedded Systems, ESP32, Açaí.

I. INTRODUÇÃO

A Internet das Coisas (IoT) tem ampliado o uso de sistemas embarcados, sensores e atuadores em aplicações agrícolas, permitindo o monitoramento e o controle automatizado de processos em campo [1]. No contexto da agricultura de precisão, essas tecnologias possibilitam que os sistemas e processos agrícolas sejam gerenciados e controlados de forma muito mais refinada e dinâmica, reduzindo custos com mão de obra, elevando a produção agrícola e melhorando a qualidade dos produtos [2].

Entre as culturas de relevância econômica, ambiental e cultural para a Amazônia, destaca-se o açaizeiro (*Euterpe oleacea*), espécie tradicionalmente associada a áreas de várzea,

onde a disponibilidade hídrica é naturalmente elevada. O termo açaí tem origem no tupi *yasa'y(i)*, que significa "palmeira de água", denominação diretamente relacionada ao ambiente úmido em que a espécie se desenvolve naturalmente [3].

A crescente demanda nacional e internacional pelo açaí tem impulsionado a expansão de sua cadeia produtiva, movimentando aproximadamente 700 milhões de reais e beneficiando cerca de 500 mil extrativistas, o que evidencia o interesse por estratégias capazes de ampliar a produção de forma sustentável [4]. Nesse cenário, o cultivo em terra firme surge como alternativa relevante para reduzir a dependência das áreas de várzea e viabilizar sistemas produtivos mais controlados [3]. Entretanto, essa transição exige estudos específicos sobre o comportamento do açaizeiro fora de seu ambiente naturalmente úmido, especialmente quanto à sua resposta a diferentes condições de disponibilidade hídrica [5].

A irrigação de precisão representa uma evolução significativa frente aos métodos tradicionais de manejo de cultivo em terra firme, pois permite substituir cronogramas fixos e decisões empíricas pela aplicação controlada de água no momento, na quantidade e no local adequados para cada estágio de desenvolvimento da cultura [6]. Essa abordagem busca maximizar a eficiência do uso da água, reduzir perdas por evaporação e escoamento superficial, e mitigar os efeitos do estresse hídrico sobre a produtividade, fatores de especial relevância em cultivos conduzidos em terra firme, onde a planta não conta com a disponibilidade hídrica natural das áreas de várzea.

A viabilização da irrigação de precisão em escala prática depende da integração de sensores, atuadores e sistemas de controle capazes de monitorar continuamente as condições da planta e do solo e de tomar decisões de irrigação de forma autônoma e adaptativa [7].

Nesse contexto, técnicas de aprendizado de máquina têm sido amplamente empregadas para a tomada de decisão autônoma no manejo hídrico, permitindo que modelos computacionais determinem o momento adequado para irrigação com base em dados coletados diretamente da planta e do solo [8]. Contudo, o treinamento desses modelos depende fundamentalmente da disponibilidade de bases de dados representativas, que cubram a resposta da cultura a diferentes condições hídricas.

Para viabilizar o treinamento desses modelos, é necessário dispor de cronogramas de irrigação que cubram cenários hídricos variados. Essa diversidade é obtida por meio de um plano

Anthony Silva Santos, Jean Gabriel de Andrade Figueiredo, Jhonata Daniel Maia Martins, Renan Castro de Barros, Gabryella Rocha Rodrigues da Silva, Jeferson Breno Negrão Leite, Marcos Eduardo Coelho Garcia e Gilvan Soares Borges, Laboratório de IA, IoT e Inovação na Amazônia, Instituto Federal do Pará, E-mails: {anthonyssantos4, jeanfig29314, jhonatadaniel34, renan081239}@gmail.com, {gabryella.silva, jeferson.leite, marcos.garcia, gilvan.borges}@ifpa.edu.br. Este trabalho foi financiado com o apoio do CNPq.

de irrigação estocástico, o qual pode ser definido como um cronograma em que os eventos de rega não seguem horários fixos, mas são determinados por distribuições de probabilidade parametrizáveis, permitindo expor a planta a diferentes perfis de disponibilidade de forma variada, porém estatisticamente controlada.

Os sistemas de irrigação automatizados comerciais disponíveis operam, em geral, com cronogramas fixos ou limiares de sensores pré-definidos, não sendo projetados para executar planos com comportamento estocástico controlado. Essa limitação dificulta a coleta sistemática de dados que exponham a planta a cenários variados de déficit, conforto e excesso hídrico de forma reproduzível. Sem essa diversidade de cenários, torna-se difícil construir uma base de dados adequada para o desenvolvimento de modelos de inteligência artificial capazes de apoiar o reconhecimento das condições hídricas ideais para o açaizeiro e a tomada de decisão sobre o momento de irrigar.

Visando suprir essa lacuna, este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação funcional de um protótipo de sistema de irrigação automatizado com plano estocástico, concebido como ferramenta experimental para expor a planta a diferentes cenários hídricos de forma controlada e reproduzível. O plano de irrigação que alimenta o protótipo foi gerado por meio de distribuições de probabilidade parametrizáveis. A execução física deste arranjo experimental foi realizada por um sistema embarcado baseado no microcontrolador ESP32, escolhido por sua combinação de baixo custo, eficiência energética, alto desempenho e versatilidade na integração com periféricos, características ideais para a prototipagem ágil de soluções *IoT* [9]. Em etapas futuras, os dados registrados pelo protótipo e por sensores a serem instalados subsidiarão o treinamento de um modelo de aprendizado de máquina capaz de reconhecer as condições hídricas adequadas e apoiar decisões autônomas de irrigação.

Este artigo está organizado nas seguintes seções: na Seção II detalha-se a metodologia, descrevendo a arquitetura de hardware do protótipo baseada no microcontrolador ESP32, os componentes utilizados, a formulação do plano de irrigação estocástico gerado e o funcionamento do *firmware* embarcado. A Seção III apresenta os resultados da validação funcional do protótipo, com base na comparação entre os eventos planejados e os eventos executados. Por fim, a Seção IV apresenta as conclusões e as perspectivas de continuidade do trabalho.

II. METODOLOGIA

Esta seção descreve a metodologia adotada para o desenvolvimento e a validação funcional do protótipo de irrigação com plano estocástico. Inicialmente, apresenta-se a arquitetura geral do sistema embarcado, composta por unidade de controle, módulos de temporização e armazenamento, interface de operação e circuito de acionamento hidráulico. Em seguida, descreve-se o processo de geração do plano de irrigação e sua conversão para o formato utilizado pelo *firmware*. Por fim, detalha-se a lógica de execução embarcada, o acionamento dos atuadores e o registro dos eventos em arquivo de *log*.

O protótipo emprega um plano de irrigação de natureza estocástica para expor a planta a cenários variados de déficit, conforto e excesso hídrico. A execução do plano é realizada por

um sistema embarcado baseado no microcontrolador ESP32. A Figura 1 apresenta o diagrama de blocos do sistema, indicando os módulos que compõem o protótipo e suas interações.

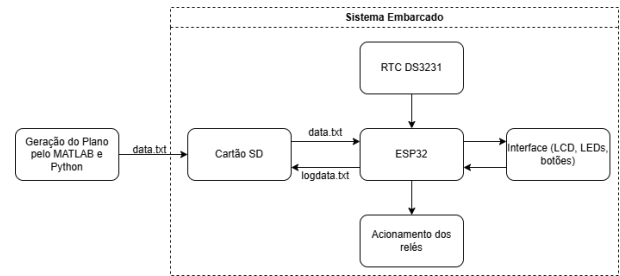


Fig. 1. Diagrama de blocos do sistema de irrigação estocástica.

A unidade de controle deste protótipo emprega o microcontrolador ESP32 DevKit V1, que centraliza o processamento e o controle de todos os periféricos. A temporização dos eventos é fornecida por um módulo RTC DS3231, responsável por manter a data e hora mesmo na ausência de alimentação. O plano de irrigação e os registros operacionais são armazenados em um módulo de cartão SD. A interface com o operador é composta por um display LCD 20x4 com comunicação I2C, quatro LEDs indicadores de estado e quatro botões de navegação e controle.

O sistema de alimentação e o acionamento hidráulico foram estruturados para operar de forma integrada, otimizados para o chaveamento de cargas indutivas em ambiente agrícola. A energia principal do sistema é fornecida por um transformador rebaixador de tensão de 127 V para 24 V AC. Essa malha de 24 V AC é utilizada diretamente para a alimentação das cargas de potência, enquanto a energia destinada ao circuito lógico é derivada dessa mesma fonte, passando por uma etapa de retificação de onda completa e por um conversor abaixador de tensão (*step-down*).

A arquitetura de comutação utiliza dispositivos de estado sólido, dispensando componentes eletromecânicos. Os sinais de controle provenientes dos GPIOs do ESP32 atuam sobre optoacopladores MOC3021, estabelecendo uma rigorosa isolamento galvânica entre a unidade de processamento e a malha de corrente alternada. A condução da potência para os atuadores é realizada por triacs BTA08. Para mitigar os efeitos da força eletromotriz reversa gerada pela bomba d'água e pela válvula solenoide, redes snubber foram projetadas e conectadas em paralelo aos terminais de comutação dos triacs. Visando a robustez e a modularidade na instalação em campo, a interface de saída do controlador foi consolidada em um arranjo de três bornes: um terminal de referência comum, uma saída dedicada à bomba d'água e uma terceira exclusiva para a válvula solenoide.

O circuito esquemático do protótipo, elaborado na plataforma KiCad 10.0, é ilustrado na Figura 2. A correspondente montagem física do sistema em *proto-board*, estruturada para a fase de desenvolvimento e validação inicial, é apresentada na Figura 3.

Três dos quatro botões são dedicados à navegação e ao controle do menu. O quarto botão ativa o bloqueio diário da irrigação: ao ser pressionado, os eventos agendados são

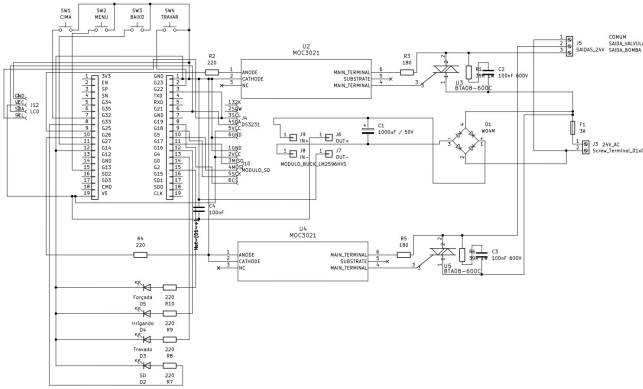
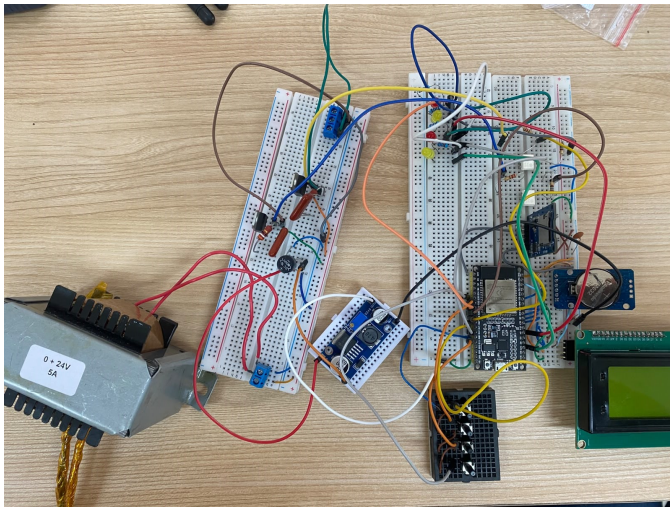


Fig. 2. Circuito esquemático do protótipo.


 Fig. 3. Montagem física do protótipo em *protoboard*.

mantidos no plano, porém, ao atingir o horário programado, o sistema não inicia a irrigação. Um novo acionamento desativa o bloqueio, que também é liberado automaticamente no início do dia seguinte.

Os quatro LEDs indicam o estado operacional do sistema: o primeiro sinaliza acesso ativo ao cartão SD, alertando o operador para não removê-lo durante a leitura; o segundo indica que o travamento de irrigação diária está ativo; o terceiro sinaliza que um evento de irrigação está em curso e o quarto indica que o modo de irrigação forçada está habilitado.

A. Cronograma de irrigação

O sistema foi desenvolvido segundo uma arquitetura em duas camadas desacopladas: uma camada de planejamento, executada previamente em ambiente computacional, responsável pela geração dos cronogramas estocásticos de irrigação, e uma camada de execução embarcada, na qual o ESP32 atua como executor autônomo das tarefas definidas no arquivo de cronograma armazenado em cartão de memória, realizando o acionamento dos atuadores. Após a geração do cronograma, o arquivo correspondente é transferido para o controlador embarcado, não havendo necessidade de conexão entre o ambiente computacional e o sistema de irrigação durante

a operação. Essa separação permite manter a complexidade associada à geração dos eventos fora do *firmware*, enquanto o controlador embarcado permanece dedicado à execução confiável das ações programadas.

Na camada de planejamento, o algoritmo de geração do cronograma de irrigação é responsável por produzir, para cada ciclo diário, uma sequência estocástica de eventos de irrigação. Essa sequência é definida a partir de três componentes fundamentais: a frequência diária de acionamentos, a duração de cada irrigação e o posicionamento temporal dos eventos ao longo do dia. Cada um desses componentes é modelado por uma distribuição de probabilidade específica, permitindo que uma nova sequência de eventos de irrigação seja produzida diariamente.

A frequência de irrigações realizadas em cada ciclo é determinada por uma distribuição Binomial, cuja parametrização define a frequência média esperada de acionamentos. O tempo de acionamento de cada evento é obtido por uma distribuição Triangular, permitindo definir uma duração mais provável e, simultaneamente, limitar os valores mínimo e máximo admissíveis. Por fim, os instantes de início das irrigações são modelados por meio de um processo pontual de Poisson unidimensional, cuja intensidade controla o espaçamento médio entre os eventos, introduzindo variabilidade temporal sem perder o comportamento estatístico desejado.

A partir dessa estrutura comum são definidos três planos de irrigação: *Comfort*, *Deficit* e *Excess*. Todos utilizam exatamente o mesmo algoritmo e as mesmas distribuições de probabilidade, diferindo apenas na parametrização de seus valores. No plano *Comfort*, os parâmetros das distribuições são ajustados para que os valores esperados coincidam com os valores de referência adotados para a irrigação da cultura. Nos planos *Deficit* e *Excess*, esses mesmos parâmetros são ajustados para produzir, respectivamente, condições de déficit e de excesso hídrico, deslocando os valores esperados das distribuições em relação aos valores de referência e gerando diferentes regimes de irrigação sem alterar a estrutura probabilística do algoritmo.

O cronograma de irrigação gerado pelo algoritmo estocástico é armazenado em um arquivo de texto estruturado, contendo uma entrada para cada dia do período experimental. Cada linha representa um ciclo diário de irrigação e contém a data correspondente, seguida pelos pares de horário de início e duração dos eventos programados. Dessa forma, o arquivo estabelece a interface entre a camada de planejamento e a camada de execução embarcada, permitindo que o controlador carregue diariamente as informações necessárias para a execução dos eventos de irrigação. A estrutura do arquivo foi definida para possibilitar a interpretação direta pelo *firmware* do ESP32, sendo organizada de modo que cada registro inicie com a data do ciclo, seguida sequencialmente pelos horários de início e respectivos tempos de acionamento das regas.

B. Lógica de execução

O *firmware* embarcado no ESP32 é responsável por executar o plano de irrigação armazenado no cartão SD de forma autônoma ao longo do período de validação. A cada ciclo

de operação, o sistema consulta o RTC para obter a data e hora atuais, verifica se há evento de irrigação agendado para o momento e, em caso afirmativo, aciona os triacs destinados à válvula solenoide e a bomba d'água pelo tempo prescrito no plano.

O acionamento dos atuadores segue uma sequência delibada, com o objetivo de proteger o sistema hidráulico do protótipo. Dois segundos antes de iniciar uma irrigação, a válvula solenoide é aberta e somente após esse tempo a bomba é ligada, evitando que esta opere contra uma linha fechada. De forma análoga, ao encerrar a irrigação, a bomba é desligada antes do fechamento da válvula, permitindo que a pressão residual na tubulação se dissipe antes do bloqueio do fluxo.

O sistema opera em dois modos distintos, selecionáveis pelo operador via interface de botões e o *display* LCD. No modo programado, os eventos de irrigação são inteiramente determinados pelo arquivo de plano carregado no cartão SD. No modo de irrigação forçada, o operador define manualmente o intervalo entre regas e a duração de cada evento, e o sistema passa a executar e reprogramar os acionamentos de forma autônoma com base nesses parâmetros, o que facilita a condução de testes de bancada e manutenções pontuais.

Antes de qualquer acesso ao cartão *SD*, o sistema verifica se o módulo está disponível e, caso não esteja, tenta reinicializá-lo automaticamente. Na inicialização, na troca de data, após recuperação de falha do cartão *SD* ou mediante acionamento do botão de releitura, o sistema lê o arquivo “data.txt” e carrega na memória todos os eventos de irrigação agendados para aquela data, evitando acessos repetidos ao cartão ao longo do dia. A leitura é feita linha por linha até localizar a entrada correspondente à data atual, extraíndo os horários e durações de cada evento.

Ao término de cada evento de irrigação, independentemente do modo, o sistema registra no cartão *SD* a data, o horário de início e a duração real da rega, compondo um arquivo chamado “logdata.txt”, que permite auditar a precisão temporal do protótipo e embasar a análise posterior do histórico hídrico aplicado à planta. Adicionalmente, durante cada evento de irrigação, o log é gravado no cartão *SD* a cada 10 segundos, limitando a perda de dados a no máximo 10 segundos de operação em caso de interrupção no fornecimento de energia.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para validar o sistema embarcado em condições operacionais, foi gerado um plano de teste contemplando cinco dias, com janelas de irrigação distribuídas no período diurno e durações variadas, conforme apresentado na Figura 4. Nesta etapa, não se buscou avaliar os perfis hídricos, mas exclusivamente verificar a fidelidade temporal do *firmware* na reprodução dos eventos agendados. Dessa forma, o protótipo permaneceu em operação durante o intervalo planejado, executando o plano de forma autônoma a partir do cartão *SD*.

A Tabela I apresenta a comparação entre os parâmetros planejados e os efetivamente executados pelo protótipo. Em todos os 10 eventos, os valores de hora de início e duração executados coincidem integralmente com os agendados, com erro nulo tanto na temporização quanto na duração dos even-

```
2026/04/29,13:11:15,4137
2026/04/30,11:49:50,1120,14:12:19,1512,16:48:01,0048
2026/05/01,13:17:40,1800,15:46:03,0591
2026/05/04,15:17:51,1426,16:32:46,0547
2026/05/05,12:05:45,0840,15:22:37,1520
```

Fig. 4. Plano de teste para o período de validação de cinco dias.

tos, comprovando a fidelidade do *firmware* na reprodução do plano de teste.

TABELA I

COMPARAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DE IRRIGAÇÃO PLANEJADOS E EXECUTADOS.

Data	Hora agendada	Hora executada	Tempo esperado (s)	Tempo executado (s)
29/04	13:11:15	13:11:15	4137	4137
30/04	11:49:50	11:49:50	1120	1120
30/04	14:12:19	14:12:19	1512	1512
30/04	16:48:01	16:48:01	48	48
01/05	13:17:40	13:17:40	1800	1800
01/05	15:46:03	15:46:03	591	591
04/05	15:17:51	15:17:51	1426	1426
04/05	16:32:46	16:32:46	547	547
05/05	12:05:45	12:05:45	840	840
05/05	15:22:37	15:22:37	1520	1520

Todos os 10 registros foram gravados com êxito no cartão *SD*, sem ocorrência de falhas de escrita ou corrupção de dados. O arquivo de *log* resultante, apresentado na Figura 5, registra os eventos executados e permite verificar a correspondência entre o plano carregado e a operação realizada pelo protótipo.

```
2026/04/29,13:11:15,4137
2026/04/30,11:49:50,1120
2026/04/30,14:12:19,1512
2026/04/30,16:48:01,0048
2026/05/01,13:17:40,1800
2026/05/01,15:46:03,0591
2026/05/04,15:17:51,1426
2026/05/04,16:32:46,0547
2026/05/05,12:05:45,0840
2026/05/05,15:22:37,1520
```

Fig. 5. Arquivo de *log* registrado no cartão *SD* ao término do período de validação.

Apesar dos resultados obtidos, o período analisado é insuficiente para caracterizar o comportamento do sistema em operação prolongada. A partir dos dados coletados, não é possível avaliar a ocorrência de falhas cumulativas, degradação das conexões ou efeitos associados à deriva do RTC ao longo de semanas ou meses de operação contínua. Além disso, a montagem em *proto-board*, embora adequada para a etapa de desenvolvimento e validação funcional, não garante a confiabilidade mecânica necessária para a operação contínua em ambiente de campo.

Dessa forma, os resultados validam a execução temporal do plano de teste e o registro dos eventos pelo sistema embarcado,

mas não permitem inferir o volume de água aplicado nem a resposta fisiológica da planta aos diferentes cenários hídricos. Como etapas futuras, destacam-se a migração para uma placa de circuito impresso dedicada, a incorporação de mecanismos de medição de vazão ou volume aplicado e a realização de testes agrônômicos com espécies reais de açaizeiro.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho desenvolveu e avaliou funcionalmente um protótipo *IoT* de irrigação estocástica, baseado no ESP32, para o manejo experimental do açaizeiro em terra firme. O arranjo de *hardware* demonstrou elevada estabilidade operacional, enquanto a lógica de intertravamento, implementada no *firmware* para proteger o sistema hidráulico na configuração completa, encontra-se pronta para uso nas etapas seguintes. A execução autônoma do plano gerado e o registro de *logs* asseguraram o controle temporal dos eventos de irrigação simulados.

Conclui-se que o protótipo constitui uma prova de conceito funcional e de baixo custo. Não se trata, contudo, de uma solução de manejo hídrico, uma vez que o sistema não avalia nem prescreve a quantidade ideal de água para o açaizeiro, cabendo-lhe exclusivamente executar planos estocásticos e registrar os eventos com precisão. Essa infraestrutura consolida a base experimental necessária para, em etapas futuras, conduzir experimentos agrônômicos com espécimes reais de açaizeiro e, a partir dos dados coletados, desenvolver um modelo de inteligência artificial capaz de apoiar decisões autônomas de irrigação, visando otimizar o manejo hídrico, a sustentabilidade e a produtividade desta cultura em terra firme.

AGRADECIMENTOS

Ao IFPA (Instituto Federal do Pará), campus Belém e à Coordenação de Telecomunicações pelo laboratório cedido, ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] L. D. Xu, W. He, and S. Li, "Internet of Things in Industries: A Survey," *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 10, no. 4, pp. 2233–2243, Nov. 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2300753.
- [2] J. Xu, B. Gu, and G. Tian, "Review of agricultural IoT technology," *Artificial Intelligence in Agriculture*, vol. 6, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.aiia.2022.01.001.
- [3] A. K. O. Homma, O. L. Nogueira, A. J. E. A. Menezes, J. E. U. Carvalho, C. M. L. Nicoli, and G. B. Matos, "Açaí: Novos desafios e tendências," *Amazônia: Ciênc. Desenvolv.*, vol. 1, no. 2, pp. 7–23, jan.-jun. 2006.
- [4] M. L. A. Silva and A. C. N. Tavares, "Bioeconomia Amazônica: Desafios do agronegócio com desenvolvimento sustentável," *Rev. Bras. Estud. Gestão Desenvolv. Reg.*, vol. 7, no. 3, pp. 1–13, 2026, doi: 10.30681/rbegdr.v7i3.14503.
- [5] J. T. de Farias Neto, "BRS Pai d'Égua: cultivar de açaí para terra firme com suplementação hídrica," Embrapa Amazônia Oriental, Belém, PA, Brasil, Comunicado Técnico 317, Nov. 2019.
- [6] E. Bwambale, F. K. Abagale, and G. K. Anornu, "Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review," *Agric. Water Manag.*, vol. 260, p. 107324, 2022, doi: 10.1016/j.agwat.2021.107324.
- [7] L. García, L. Parra, J. M. Jimenez, J. Lloret, and P. Lorenz, "IoT-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture," *Sensors*, vol. 20, no. 4, p. 1042, 2020, doi: 10.3390/s20041042.
- [8] L. Umutoni and V. Samadi, "Application of machine learning approaches in supporting irrigation decision making: A review," *Agric. Water Manag.*, vol. 294, p. 108710, 2024, doi: 10.1016/j.agwat.2024.108710.
- [9] M. Babiuch and J. Postulka, "Smart home monitoring system using ESP32 microcontrollers," *Internet of Things*, vol. 12, p. 100314, 2020.