

Desenvolvimento de um Sistema de Irrigação Autônomo e Modular com uso de Inteligência Artificial e ESP8266

Douglas E. P. A. Silva¹, Hilquias R. Oliveira¹, Davi F. Santana¹, Ivan da S. B. Junior¹, Daniel dos Anjos Costa¹ e Flávio Pereira da Silva¹

¹Instituto Federal da Bahia (IFBA) – Santo Amaro – BA – Brasil

douglasevertonev@gmail.com, hilquiasro10@gmail.com, davidico13@gmail.com, ivanbispojnr@gmail.com, daniel.anjos@ifba.edu.br e flavio.pereira@ifba.edu.br

Abstract. *The Brazilian Caatinga faces significant water challenges due to the scarcity and irregularity of rainfall, making efficient water management in agriculture crucial. To address this issue, a modular, scalable, and low-cost irrigation system was developed to reduce installation costs for both large farms and small properties, such as those in family farming. Its modular structure provides flexibility and adaptation to different needs, while its energy autonomy eliminates the need for wires and cables, significantly reducing costs, especially on large rural properties.*

Resumo. *A Caatinga Nordestina enfrenta sérios desafios hídricos devido à escassez e irregularidade das chuvas, tornando crucial a gestão eficiente da água na agricultura. Para enfrentar esse cenário, foi desenvolvido um sistema de irrigação modular, escalável e de baixo custo, com o objetivo de reduzir os custos de implantação, tanto para grandes fazendas quanto para pequenas propriedades, como as da agricultura familiar. Sua estrutura modular oferece flexibilidade e adaptação às diferentes necessidades, enquanto a autonomia energética elimina a necessidade de fios e cabos, reduzindo os custos, especialmente em grandes propriedades.*

1. Introdução

A região semiárida da Caatinga Nordestina enfrenta um dos maiores desafios relacionados à escassez hídrica. Com chuvas limitadas e distribuídas de forma irregular, a gestão eficiente dos recursos hídricos é crucial para sustentar a agricultura, uma das principais atividades econômicas da região [INSA 2025]. Métodos tradicionais de irrigação, frequentemente baseados em operação manual e cronogramas generalizados, podem resultar em um grande desperdício de água e baixos rendimentos agrícolas. Além disso, o alto custo e a complexidade dos sistemas de irrigação automatizados existentes os tornam inacessíveis para pequenos agricultores, agravando vulnerabilidades econômicas e limitando a produtividade.

O mercado de irrigação oferece uma variedade de soluções, desde sistemas manuais básicos até plataformas automatizadas sofisticadas. Embora os sistemas avançados proporcionem maior eficiência, precisão e análise de dados, seus altos custos e a necessidade de conhecimento especializado criam barreiras significativas à adoção, especialmente para agricultores em regiões em desenvolvimento, como a Caatinga. Além disso, muitas soluções existentes carecem de flexibilidade para se adaptar aos desafios específicos de ambientes semiáridos, tipos de solo variados e diferentes padrões de cultivo.

Outra questão importante é que a umidade do solo desempenha um papel crucial na sua fertilidade, influenciando diretamente a atividade microbiana essencial para a

decomposição da matéria orgânica e a liberação de nutrientes [Rogério 2024]. Quando os níveis de umidade são adequados, esses processos ocorrem de forma eficiente, beneficiando o crescimento das plantas. Por outro lado, a falta de umidade reduz a disponibilidade de nutrientes, comprometendo o desenvolvimento das culturas e impactando negativamente a produtividade.

Considerando os desafios apresentados, este trabalho propõe uma solução para tornar a irrigação mais eficiente e acessível por meio de um sistema inteligente e autônomo, baseado nos princípios da Internet das Coisas (IoT) desenvolvido para suprir as demandas de pequenos e médios produtores do semiárido. Para isso, os objetivos específicos deste estudo são: (I) projetar um sistema de irrigação modular com controle automatizado baseado em Inteligência Artificial; (II) garantir a autonomia energética do sistema com o uso de painéis solares; (III) viabilizar a comunicação remota dos módulos por meio de tecnologias de baixo custo como o SIM800L; e (IV) validar a viabilidade técnica e econômica da solução em ambiente controlado. Com isso, esta proposta visa reduzir a vulnerabilidade hídrica e promover maior sustentabilidade e produtividade na agricultura local.

2. Fundamentação Teórica

Esta seção descreve as tecnologias de *hardware* e *software* utilizadas no projeto. Para o desenvolvimento dos módulos de *hardware* para coleta e atuação no ambiente, inteligência artificial, APIs e sistema supervisório foram utilizados os materiais e tecnologias mencionados na Tabela 1.

Tabela 1. Itens e Tecnologias usadas para construção do sistema.

Item	Definição
ESP8266 NodeMCU	O ESP8266 NodeMCU é uma placa de desenvolvimento de código aberto que integra o microcontrolador ESP8266, um chip de baixo custo com capacidades de conectividade <i>Wi-Fi TCP/IP</i> completas. Esta plataforma foi projetada para facilitar o desenvolvimento de projetos de Internet das Coisas (IoT), permitindo que dispositivos se conectem à internet de forma simples e eficiente. Seu funcionamento baseia-se na execução de <i>firmware</i> customizado (como o NodeMCU Lua ou programado via IDE Arduino), que gerencia a comunicação Wi-Fi, processa dados de sensores e controla atuadores. O ESP8266 NodeMCU atua como um <i>hub</i> central, recebendo e enviando informações através de redes sem fio, o que o torna ideal para monitoramento remoto, automação residencial e sistemas conectados [Nodemcu Team (S.D.); Makerhero (S.D.)]. Ele oferece uma gama versátil de pinos e interfaces para interação com o ambiente. Ele possui 17 pinos GPIO (<i>General-Purpose Input-Output</i> , em português de propósito geral de entradas e saída) que podem ser configurados para diversas finalidades. Possui também um pino de entrada analógica (ADC), fundamental para ler dados de sensores que fornecem uma tensão variável. Em termos de conectividade, a placa integra um conversor USB-serial, que simplifica a programação e a comunicação com o computador. Além disso, suporta protocolos de comunicação serial como UART, SPI e I2C, permitindo a interconexão com uma vasta gama de módulos e periféricos, consolidando sua posição como uma ferramenta poderosa e flexível para o desenvolvimento de soluções IoT [Make-It Nodemcu 2022].
SIM800L	É um módulo GSM/GPRS compacto desenvolvido pela <i>SIMCom</i> , que oferece funcionalidades de comunicação móvel, como transmissão de voz, envio e

	<p>recebimento de mensagens SMS e dados via GPRS. Operando nas quatro bandas de frequência 850/900/1800/1900 MHz, é compatível com redes GSM globalmente. O módulo suporta comandos AT para configuração e controle, facilitando sua integração em diversos projetos eletrônicos [Simcom Wireless 2019].</p> <p>Em termos de detalhes técnicos, o SIM800L opera com uma faixa de tensão restrita de 3.4V a 4.4V, sendo crucial uma fonte de alimentação estável capaz de fornecer picos de corrente de até 2A, especialmente durante a transmissão. Ele possui pinos essenciais como VCC e GND para alimentação, RXD e TXD para comunicação serial, RST para reinício, e conexões para antena externa, além de entradas para microfone (MIC\pm) e saídas para alto-falante (SPK\pm). O consumo de energia é otimizado, com um modo de <i>sleep</i> que reduz drasticamente a corrente para menos de 1mA. Essas características fazem do SIM800L uma escolha eficiente para projetos que exigem funcionalidades de comunicação móvel com restrições de espaço e energia [Simcom Wireless 2019].</p>
Mini Painel Solar Fotovoltaico	São pequenos painéis fotovoltaicos para projetos que necessitam de baixa produção energética. Geralmente conseguem produzir entre 5V e 6V com 200mA por hora.
Sistema de Gerenciamento de Baterias (<i>Battery Management System</i> ou BMS)	É um circuito eletrônico projetado para monitorar e gerenciar o funcionamento de baterias recarregáveis, garantindo sua operação dentro de parâmetros seguros e otimizando seu desempenho e vida útil. Os BMS são classificados quanto a quantidade de baterias que consegue alimentar, por exemplo se o BMS for projetado para 3 baterias de lítio ele será chamado de BMS 3S. Suas principais funções incluem: Monitoramento de Tensão e Temperatura; Equilíbrio de Carga (Balanceamento); Proteção contra Sobrecarga e Descarga Excessiva; e Controle de Corrente [Autocore Robótica 2025].
Angular	É um framework <i>JavaScript</i> de código aberto desenvolvido pelo <i>Google</i> , projetado para facilitar a criação de aplicações web dinâmicas e interativas. Ele utiliza o padrão MVC (<i>Model-View-Controller</i>) para organizar o código de forma modular, permitindo um desenvolvimento mais eficiente e estruturado [Google 2022].
Huawei ModelArts	O <i>Huawei ModelArts</i> é uma plataforma de inteligência artificial baseada em nuvem que permite o desenvolvimento, treinamento e implementação de modelos de aprendizado de máquina e <i>deep learning</i> de forma automatizada. Projetada para simplificar o ciclo de vida da IA, a tecnologia oferece suporte a diversas estruturas, como <i>TensorFlow</i> , <i>PyTorch</i> e <i>MindSpore</i> , e possibilita a criação de modelos sem a necessidade de experiência avançada em programação [Huawei 2025].

3. Desenvolvimento

Nesta seção, detalharemos os principais aspectos da implementação do sistema, com ênfase no módulo de controle de irrigação. O sistema é composto por quatro componentes principais: 1) o Módulo de Controle de Irrigação, 2) APIs para coleta e processamento de dados, 3) um Sistema Supervisório Web para controle centralizado e 4) um Módulo de Inteligência Artificial, responsável por automatizar as decisões sobre o tempo de irrigação.

O diagrama da Figura 01 ilustra a arquitetura geral do sistema de irrigação. Este sistema é composto por múltiplos Módulos de Controle de Irrigação, estrategicamente distribuídos pelo campo, que estabelecem comunicação sem fio. Essa conectividade é viabilizada pela tecnologia 2G, por meio de uma Torre de Comunicação 2G. Essa infraestrutura permite o estabelecimento de um *link* direto com a internet, facilitando a troca de dados com a API central do sistema.

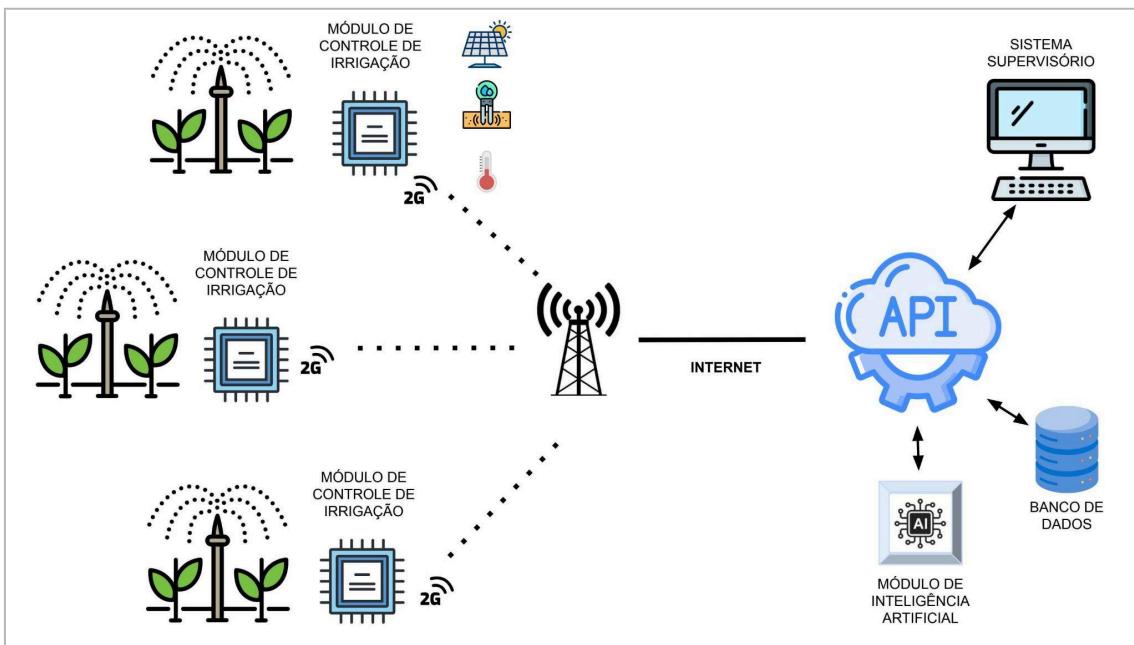


Figura 01 - Ilustração dos módulos do sistema.

É fundamental ressaltar que a escolha da tecnologia 2G para a comunicação foi uma decisão estratégica, pautada na sua capacidade de comunicação a longa distância e baixo custo. Essa abordagem está diretamente alinhada a uma das premissas essenciais do projeto: tornar a tecnologia de irrigação mais acessível e econômica para pequenos e médios agricultores nordestinos, removendo barreiras financeiras e promovendo a sustentabilidade em suas operações. Outras versões do mesmo sistema poderão ser desenvolvidas com tecnologias mais atuais, que obviamente implica nos custos de implantação.

A API para coleta e processamento de dados atua como um *hub* de comunicação, interagindo com os módulos de irrigação, o banco de dados, o módulo de Inteligência Artificial (IA) e o Sistema Supervisório. O banco de dados armazena informações essenciais do sistema, enquanto o módulo de IA processa esses dados para otimizar o agendamento da irrigação.

Os usuários interagem com o sistema por meio do Sistema Supervisório desenvolvido com a tecnologia Angular, que oferece uma interface intuitiva para monitoramento, controle e visualização de dados. Esse sistema integrado possibilita um gerenciamento inteligente e automatizado da irrigação, baseado em dados em tempo real e nas análises da IA.

3.1. Módulo de Controle de Irrigação

O Módulo de Controle de Irrigação é o componente responsável pela execução da irrigação em campo e pode operar de forma autônoma para garantir a distribuição eficiente da água. Equipado com sensores para medir variáveis ambientais como umidade do solo, temperatura, umidade do ar e luminosidade, ele coleta dados essenciais para a tomada de decisão sobre a necessidade de irrigação.

Além disso, utiliza um ESP8266 NodeMCU como microcontrolador principal e um SIM800L para comunicação via rede 2G, permitindo o envio das informações

coletadas para as APIs de coleta e a recepção de comandos de controle remoto. A Figura 02 ilustra as principais funcionalidades disponibilizadas pelo módulo.

O módulo também conta com um sistema de alimentação autônomo, composto por baterias recarregáveis e painéis solares, assegurando seu funcionamento contínuo sem depender da rede elétrica. Um dos grandes problemas de sistemas convencionais é a necessidade de rede elétrica próximo dos locais de implementação dos sistemas ou módulos de irrigação. Para grandes fazendas esse requisito torna a implantação cara e demorada.

O módulo utiliza três baterias de lítio 18650 que têm a capacidade de serem recarregadas e geram um pouco mais de 12 volts. Para o processo de recarregamento utilizamos a placa eletrônica conhecida como BMS 3S (*Battery Management System*) que monitora e gerencia o recarregamento dentro de parâmetros seguros e o que otimiza a vida útil das baterias [Autocore Robótica 2025]. O circuito BMS 3S garante o balanceamento de carga para as três baterias sem impedir que as cargas das mesmas sejam utilizadas na alimentação do sistema.

No canto inferior direito da Figura 02 o sistema de irrigação incorpora a capacidade de controlar válvulas elétricas de 12V CC, cuja função é essencial para abrir ou fechar o fluxo de irrigação em cada setor de atuação do módulo. Embora o mercado ofereça diversas opções de válvulas de 12V CC com variadas vazões, incluindo as solenoides e as de esfera, a escolha ideal para este projeto recai sobre as válvulas esfera elétricas. A preferência pelas válvulas esfera se justifica por sua superior economia energética: elas demandam energia apenas nos breves momentos de abertura e fechamento, ao contrário das válvulas solenóides que exigem um consumo contínuo para permanecerem abertas. Esta característica é crucial para o sistema, dado que o projeto opera com limitações energéticas inerentes ao uso de uma fonte de energia renovável, garantindo assim uma operação mais eficiente e sustentável.

Em termos de consumo energético, cada módulo foi projetado para operar de maneira eficiente mesmo sob limitações de geração solar. O ESP8266 apresenta um consumo médio de 70 mA em operação ativa e pode chegar a menos de 20 mA em modo de economia de energia (*deep sleep*). O módulo SIM800L tem picos de consumo de até 2A durante a transmissão de dados, mas mantém média inferior a 20 mA em modo *idle*. Já os sensores utilizados, como os de umidade do solo, luminosidade e temperatura, consomem entre 0,5 mA a 5 mA, dependendo do modelo. O sistema foi dimensionado para operar de forma estável com três baterias 18650 (3.7V, 2500mAh cada), garantindo autonomia média de dois a três dias mesmo em condições de baixa luminosidade, o que é reforçado pelo uso de válvulas esferas elétricas que consomem energia apenas nos momentos de abertura e fechamento.

E por fim, do lado direito da Figura 02 encontra-se o módulo de inteligência artificial que foi projetado para atuar em uma API na nuvem. Esse módulo foi treinado para receber dados do ambiente (como umidade do ar e do solo, temperatura e luminosidade) e retornar o tempo de irrigação.

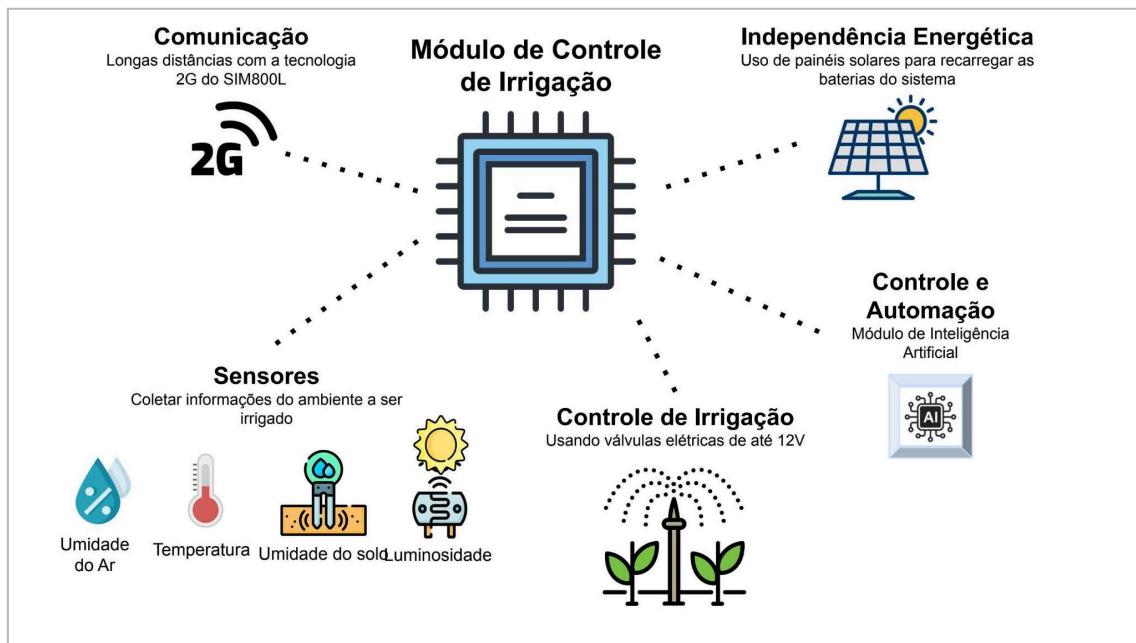


Figura 02 - Funcionalidades do Módulo de Controle de Irrigação.

O Módulo Controle de Irrigação executa seis operações essenciais, conforme ilustrado no diagrama de atividades apresentado na Figura 03:

- **Operação 1 (Coleta de dados do Dispositivo)** - Essa operação reúne informações específicas do próprio dispositivo de irrigação, como nível da bateria, taxa de fluxo de água e possíveis erros detectados. Esses dados são essenciais para monitorar o desempenho e a integridade do sistema de irrigação.
- **Operação 2 (Coleta de dados dos sensores)** - Essa função ativa sensores para coletar dados do ambiente ao redor. Os sensores medem fatores como umidade do solo, temperatura do ar, umidade relativa e intensidade da luz. Esses dados são fundamentais para determinar a necessidade de irrigação. Após a coleta, as informações são enviadas para a API de coleta de dados para processamento e armazenamento.
- **Operação 3 e 4 (Ligar/Desligar manualmente a irrigação)** - Permite ligar ou desligar do sistema de irrigação. Esse controle manual é útil para situações que exigem irrigação imediata, fora do cronograma automatizado. Embora essa operação ative diretamente a irrigação, os sensores continuam coletando dados, que são enviados para a API de coleta de dados.
- **Operação 5 (Ativar Irrigação Automática)** - Esta operação inicia o ciclo de irrigação automatizado. O sistema consulta a API integrada ao módulo de inteligência artificial (IA) para definir o tempo de irrigação ideal. O processo é dividido em duas etapas, de acordo com a resposta recebida do módulo de IA.
 - Se [Tempo > 0]: Se o valor do tempo de irrigação (retornado pela IA) for maior que zero, o sistema ativa ou mantém a irrigação em funcionamento pelo tempo determinado pela IA.

- Se [Tempo = 0]: Se o valor do tempo de irrigação (retornado pela IA) for igual a zero, o sistema desativa ou mantém a irrigação desligada por um tempo pré-determinado e em seguida realiza nova consulta a IA.
- **Operação 6 (Desativar irrigação automática)** - Permite ao usuário desabilitar o modo de irrigação automática. Ao executar esta operação, o indicador interno "Irrigação_auto" é definido como False, impedindo que o sistema continue a consultar a API de IA e a tomar decisões autônomas de irrigação. O controle pode então ser reassumido manualmente ou o sistema pode aguardar um novo acionamento automático.

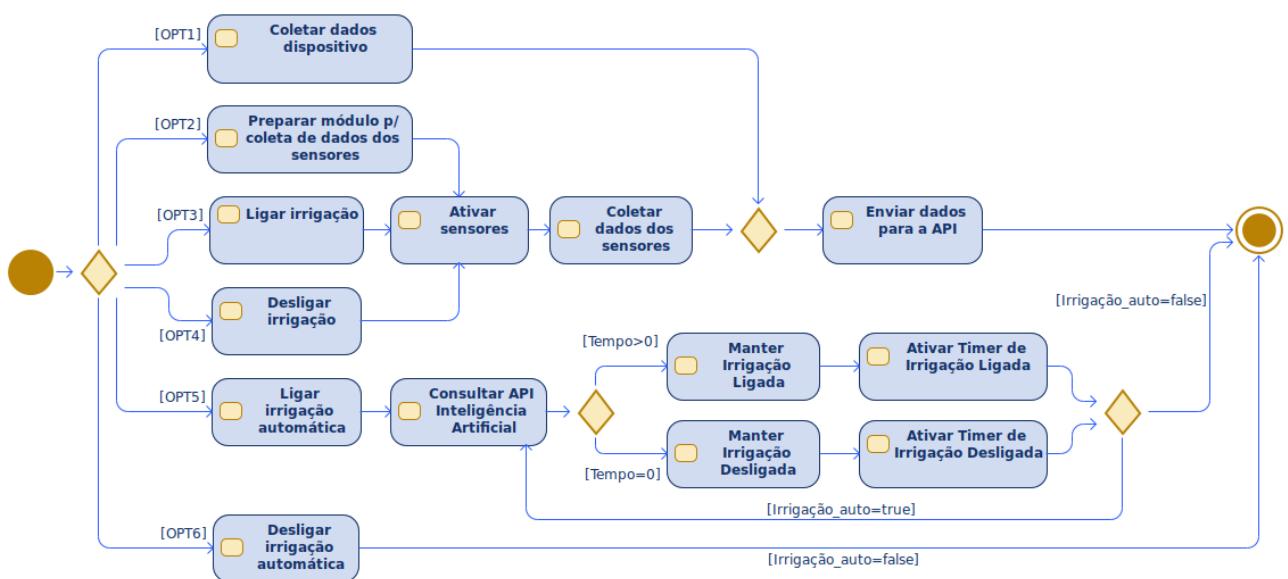


Figura 03 - Diagrama de atividades do módulo de controle de irrigação.

3.2. APIs de coleta de dados e Módulo de IA

O sistema de irrigação integra duas APIs essenciais, desenvolvidas para otimizar a eficiência e a inteligência do controle de água. A primeira API encarregando-se da coleta e do fornecimento de todos os dados enviados pelos Módulos de Controle de Irrigação. Essas informações são armazenadas e organizadas em um banco de dados, servindo como base para análises futuras e para a tomada de decisões fundamentadas.

A segunda API é dedicada ao cálculo do tempo de irrigação. Para isso, emprega um modelo de IA desenvolvido na plataforma *ModelArts* da *Huawei* [Huawei 2025]. Esta plataforma, baseada em nuvem, automatiza o desenvolvimento, o treinamento e a implementação de modelos de aprendizado de máquina e *deep learning*, simplificando o ciclo de vida da IA e suportando diversas estruturas.

O processo de treinamento do modelo de IA (baseado em Regressão Linear) inclui as etapas de carregamento e pré-processamento dos dados, seguida pela avaliação de sua performance, utilizando o *Mean Squared Error* (MSE) e visualização dos resultados. Uma vez treinado, este modelo é salvo em formato .pkl, permitindo sua reutilização para inferência. Assim, por meio de técnicas de aprendizado de máquina, o módulo de IA da segunda API estima o tempo de irrigação com base de dados coletados em tempo real pelos sensores em campo do módulo controlador de irrigação.

Para o treinamento do modelo de IA, responsável pela estimativa do tempo de irrigação, foi desenvolvido um conjunto de dados sintéticos. A geração desses dados baseou-se em índices de umidade do solo para uma determinada cultura, considerando suas diversas fases de desenvolvimento (do plantio à colheita), além de variáveis ambientais como temperatura e luminosidade. Essa abordagem foi necessária devido à dificuldade em encontrar bancos de dados públicos na internet com informações tão específicas e detalhadas.

Embora não sejam dados reais de campo, eles fornecem uma base controlada para o treinamento inicial do modelo, que pode ser posteriormente refinada com dados observacionais gerados pelo próprio sistema, para uma adaptação ainda maior às condições de campo.

Ao avaliar a performance do modelo de IA para estimar o tempo de irrigação, o *Mean Squared Error* (MSE) obtido foi de 4.07. Traduzido para a mesma unidade da variável de saída, o *Root Mean Squared Error* (RMSE) é de aproximadamente ± 2 minutos. Este valor indica que, em média, as previsões do modelo desviam em torno de 2 minutos do tempo de irrigação real. A relevância deste desvio deve ser contextualizada pela faixa de variação dos tempos de irrigação observados, indicando o grau de precisão alcançado pelo modelo e apontando possíveis áreas para otimização futura, dependendo da criticidade da estimativa para o controle do sistema.

É fundamental compreender que, em um ambiente de produção agrícola com irrigação em campo, um desvio de tempo médio de aproximadamente 2 minutos é considerado aceitável. A distribuição de água por sistemas de aspersão, por exemplo, nem sempre é perfeitamente uniforme, o que pode levar a áreas com umedecimento inconsistente e, consequentemente, impactar as leituras dos sensores, gerando variações que podem ser maiores do que o desvio do modelo.

3.3. Sistema Supervisório

O último componente é o sistema supervisório web, que é uma interface centralizada, que permite aos usuários monitorar e controlar remotamente todos os módulos atuadores. Por meio de um painel intuitivo, os usuários podem visualizar informações como: 1) Estado de todos os módulos instalados e seus sensores; 2) Nível de carga das baterias e status de carregamento; 3) Conectividade GSM e intensidade do sinal do módulo SIM800L; e 4) Status de comunicação com a operadora de telefonia móvel.

Além disso, o sistema permite o controle remoto dos módulos de irrigação ativando ou desativando qualquer uma das seis operações descritas na seção 3.1.

4. Discussões e Resultados

Os testes operacionais do sistema de irrigação foram integralmente conduzidos em um ambiente controlado de laboratório, com o objetivo primordial de validar a comunicação entre os módulos e a funcionalidade global do sistema. Durante esses testes, o módulo de controle de irrigação, que integra o ESP8266 NodeMCU, demonstrou consistentemente sua capacidade de acionar e interromper o fluxo de água com precisão, seguindo os parâmetros e comandos estabelecidos. A comunicação bidirecional entre os sensores de campo, a rede 2G (via módulo SIM800L) e o sistema foi rigorosamente testada, comprovando sua eficiência e confiabilidade na transmissão de dados em tempo real, um requisito fundamental para a automação proposta.

Um dos pontos mais significativos e distintivos do sistema desenvolvido reside no seu foco intrínseco na acessibilidade e no baixo custo. Essa característica permite que pequenos e médios produtores, muitas vezes excluídos de soluções tecnológicas avançadas, possam adotar um sistema sofisticado de gestão hídrica. Com um custo de implementação aproximado de apenas \$60 USD por módulo de controle de irrigação (incluindo a hospedagem da API em nuvem), o sistema se posiciona como uma alternativa altamente competitiva. Em contraste, sistemas de irrigação automatizada disponíveis no mercado, que frequentemente não oferecem a mesma granularidade de controle ou a integração de IA para otimização, apresentam um preço médio superior a \$380 USD, evidenciando a proposta de valor do presente trabalho.

Apesar do desempenho satisfatório demonstrado em ambiente controlado, é imperativo reconhecer algumas limitações inerentes à fase atual do projeto. A principal delas reside na dependência do módulo SIM800L, que opera exclusivamente em redes 2G. Embora essa escolha tenha sido motivada pelo seu baixo custo e adequação para o volume de dados transmitidos, a infraestrutura 2G está em declínio em diversas regiões e pode apresentar baixa cobertura ou instabilidade em áreas rurais remotas, impactando diretamente a conectividade e a autonomia do sistema em campo.

O modelo de inteligência artificial empregado ainda enfrenta desafios consideráveis a serem aperfeiçoados. Mesmo com o desvio de 2 minutos, o modelo demonstra um grau de precisão que, frente às variabilidades intrínsecas ao processo físico de irrigação, é prático e aplicável. Isso, ao mesmo tempo, aponta para potenciais áreas de otimização futura, tanto no aprimoramento do algoritmo de predição quanto na melhoria da uniformidade da aplicação hídrica para um controle ainda mais refinado do sistema.

Para superar as limitações identificadas e maximizar o potencial do sistema, o projeto prevê um roteiro claro de melhorias futuras. Um foco significativo será direcionado ao refinamento do módulo de inteligência artificial, buscando aumentar sua adaptabilidade e precisão através da inclusão de conjuntos de dados mais diversos e da exploração de algoritmos avançados de aprendizado de máquina. Paralelamente, será explorada a integração de alternativas de comunicação mais robustas e economicamente viáveis, como NB-IoT ou LoRaWAN.

5. Conclusão

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a validação de um sistema de irrigação inteligente de baixo custo, projetado especificamente para atender às necessidades de pequenos e médios agricultores em regiões como o semiárido nordestino, onde a escassez hídrica e os altos custos de soluções convencionais são desafios prementes.

Os resultados obtidos em testes laboratoriais confirmaram a eficácia do protótipo e a robustez da comunicação sem fio 2G entre os Módulos de Controle de Irrigação e a API central. A integração do ESP8266 NodeMCU para processamento embarcado, do SIM800L para conectividade celular, de um sistema de alimentação solar autônomo e de um módulo de Inteligência Artificial para otimização do tempo de irrigação demonstra um grande potencial para o gerenciamento inteligente e automatizado dos recursos hídricos, oferecendo uma alternativa significativamente mais acessível em comparação com as soluções de mercado existentes.

Apesar do desempenho promissor, foram identificadas áreas para aprimoramento que serão foco de trabalhos futuros. A dependência da rede 2G, embora estratégica para o baixo custo, pode apresentar limitações de cobertura em zonas rurais mais remotas. Adicionalmente, o modelo de Inteligência Artificial requer refinamento para interpretar com maior precisão dados climáticos em tempo real, umidade do solo e as especificidades de diversas culturas, tornando-se mais adaptável às variações regionais e culturais.

Nesse sentido, os próximos passos incluem a exploração de alternativas de comunicação mais resilientes e a evolução da IA para garantir uma tomada de decisão ainda mais otimizada. Além disso, como trabalho futuro, será importante incorporar e descrever os mecanismos de segurança e autenticação do sistema, assegurando que a comunicação entre os módulos de irrigação, a API e o sistema supervisório seja protegida contra acessos não autorizados. A inclusão de práticas como criptografia de dados, autenticação via tokens ou chaves API, bem como o monitoramento de acessos, contribuirá para garantir a integridade e confiabilidade do sistema, especialmente em contextos com conectividade remota.

Referências Bibliográficas

- Autocore Robótica (2025) “Módulo BMS de proteção para bateria 18650 3S 20A” Disponível em: <https://www.autocorerobotica.com.br/modulo-bms-de-protectao-para-bateria-18650-3s-20a>. Acesso em: 11 mar. 2025.
- Google (2022). “AngularJS: Developer Guide” Disponível em: <https://docs.angularjs.org/guide>. Acesso em: 12 mar. 2025.
- Huawei (2025). “ModelArts: Descrição do Produto”. Disponível em: https://support.huaweicloud.com/intl/pt-br/productdesc-modelarts/01_000_1.html. Acesso em: 12 mar. 2025.
- INSA (2025). “Instituto Nacional do Semiárido do Brasil”. Disponível em: <https://www.gov.br/insa/pt-br/semiarido-brasileiro>. Acesso em: 11 mar. 2025.
- Make-It Nodemcu (2022). “Especificações do NodeMCU”. Disponível em: <https://www.make-it.ca/nodemcu-details-specifications>. Acesso em: 11 mar. 2025.
- Nodemcu Team (S.D.). *NodeMCU Documentation*. Disponível em: <https://nodemcu.readthedocs.io/en/master/>. Acesso em: 21 jun. 2025.
- Makerhero (S.D.) “Guia do Usuário do ESP8266”. Disponível em: <https://www.makerhero.com/blog/guia-do-usuario-do-esp8266/>. Acesso em: 21 jun. 2025.
- Rogério, T. (2024) “O que é umidade do solo” Disponível em: <https://www.bienaldaagricultura.com.br/glossario/o-que-e-umidade-do-solo/>, Acesso em: 11 mar. 2025.
- Simcom Wireless (2019). “SIM800L SPEC170914”. Disponível em: <https://simcom.ee/documents/SIM800L/SIM800L%20SPEC170914.pdf> . Acesso em: 11 mar. 2025.