REVISTA TÓPICOS
ISSN 2965-6672 | Qualis A2

GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS DO ATERRO SANITÁRIO DE ITUIUTABA-MG: ANÁLISE TÉCNICA, ECONÔMICA E DO MARCO LEGAL

POWER GENERATION FROM BIOGAS AT THE SANITARY LANDFILL OF ITUIUTABA-MG: TECHNICAL, ECONOMIC AND LEGAL FRAMEWORK ANALYSIS

Ciências Biológicas, Engenharias, Ciências Sociais Aplicadas •

21/11/2026

REGISTRO DOI: 10.70773/revistatopicos/795003226

Etiene Faustino Maia[1]

Alexandre Porato Guimarães[2]

Eleusa Maria Ferreira Rocha[3]

Rosa Betânia Rodrigues de Castro[4]

Marcilio Alves de Souza Filho[5]

Viviane Araújo Arantes[6]

RESUMO

Cactos e suculentas são plantas adaptadas à baixa disponibilidade de água, mas sensíveis ao excesso de irrigação, que provoca o apodrecimento das raízes muitas vezes sem sinais externos visíveis. No cultivo doméstico, a rega manual sem critério é uma das principais causas de perda dessas plantas e de desperdício de água. Este artigo reúne o referencial teórico e o estado da arte que fundamentam o desenvolvimento de um sistema automatizado de irrigação para essas espécies, baseado no microcontrolador ESP32 e em sensor de umidade do solo. Trata-se de pesquisa qualitativa, exploratória e descritiva, desenvolvida por meio de revisão bibliográfica de artigos científicos, trabalhos acadêmicos, documentos técnicos e relatórios institucionais. Foram analisados seis trabalhos que descrevem sistemas de irrigação automatizada de pequeno porte, comparados quanto ao tipo de sensor, à automação do acionamento, ao uso do ESP32, aos recursos de Internet das Coisas e à aplicação. Todos utilizam sensores de umidade do solo como base da decisão de irrigar, em geral do tipo resistivo, sujeito a corrosão, e nenhum é direcionado às necessidades hídricas de cactos e suculentas. A literatura indica que sensores capacitivos calibrados para o substrato e plataformas de baixo custo como o ESP32 são adequados a essa aplicação. Conclui-se que há espaço para uma solução específica, simples e de baixo custo, a ser implementada e avaliada na etapa seguinte da pesquisa.

Palavras-chave: Irrigação automatizada; Sensor de umidade do solo; ESP32; Cactos e suculentas; Uso racional da água.

ABSTRACT

Cacti and succulents are adapted to low water availability but are sensitive to overwatering, which causes root rot, often without visible external signs. In home cultivation, unsystematic manual watering is

one of the main causes of plant loss and water waste. This article gathers the theoretical background and the state of the art underlying the development of an automated irrigation system for these species, based on the ESP32 microcontroller and a soil moisture sensor. It is a qualitative, exploratory and descriptive study carried out through a literature review of scientific articles, academic works, technical documents and institutional reports. Six works describing small-scale automated irrigation systems were analyzed and compared regarding sensor type, automatic activation, use of the ESP32, Internet of Things features and application. All of them use soil moisture sensors as the basis for the irrigation decision, generally of the resistive type, which is prone to corrosion, and none addresses the specific water requirements of cacti and succulents. The literature indicates that capacitive sensors calibrated for the substrate and low-cost platforms such as the ESP32 are suitable for this application. There is room for a specific, simple and low-cost solution, to be implemented and evaluated in the next stage of the research.
Keywords: Automated irrigation; Soil moisture sensor; ESP32; Cacti and succulents; Rational water use.

1. INTRODUÇÃO

O cultivo de cactos e suculentas tem se tornado cada vez mais popular em ambientes residenciais, em razão de sua resistência, da baixa necessidade de água e da variedade de formas e cores. Por sobreviverem com pouca quantidade de substrato, essas plantas podem ser cultivadas em vasos de diversos tamanhos e formatos. Algumas espécies preferem sol e outras, sombra, e essa condição interfere diretamente na necessidade de água: um vaso exposto ao

sol perde água mais rapidamente, pela absorção da planta e pela evaporação do substrato, do que um vaso à sombra.

Quando a água fornecida excede a necessidade, essas plantas podem morrer sem que o problema seja percebido a tempo: permanecem aparentemente intactas por fora enquanto as raízes apodrecem. A falta de água também é fatal, com murchamento das folhas e redução do tamanho dos cactos até a morte da planta. Sem o conhecimento da quantidade adequada de rega, é comum que ocorram desperdício de água, perda de plantas e gasto de tempo com a rega manual (Moro; Rodrigues; Simão, 2023).

Sistemas automatizados capazes de monitorar a umidade do substrato e irrigar apenas quando necessário são uma resposta a esse problema. Ainda são poucas, porém, as soluções voltadas especificamente a essas espécies. Daí a pergunta que orienta a pesquisa: como desenvolver um sistema automatizado, baseado em sensor de umidade do solo e microcontrolador ESP32, capaz de identificar a necessidade hídrica de cactos e suculentas e otimizar o uso da água?

Este artigo corresponde à primeira etapa dessa pesquisa e tem como objetivo reunir o referencial teórico e o estado da arte que fundamentam o desenvolvimento do sistema. Especificamente, busca-se descrever as características hídricas de cactos e suculentas, os princípios da irrigação automatizada, os tipos de sensores de umidade do solo, o microcontrolador ESP32 e a aplicação da Internet das Coisas (IoT) à irrigação, além de comparar trabalhos relacionados e identificar a lacuna que a proposta pretende preencher. As etapas seguintes, de calibração do sensor,

programação do ESP32 e testes em condições reais de cultivo, serão objeto de trabalho posterior.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Cactos e Suculentas

Os cactos e as suculentas formam um grupo de plantas reconhecido pela capacidade de adaptação a ambientes com baixa disponibilidade hídrica. Essas espécies desenvolveram mecanismos fisiológicos e estruturais que permitem armazenar água nos tecidos e sobreviver em regiões áridas e semiáridas, onde a precipitação é escassa e irregular. Segundo Moro, Rodrigues e Simão (2023), elas utilizam suas reservas hídricas durante períodos de estresse e mantêm as atividades metabólicas mesmo quando a água no ambiente é reduzida. Apresentam ainda características morfológicas que reduzem a perda de água por transpiração, como folhas espessas, revestimentos cerosos e redução da área foliar (Pérez-López; Lim; Cushman, 2023).

Os cactos pertencem à família Cactaceae e representam um grupo específico dentro das plantas suculentas: todo cacto é uma suculenta, mas nem toda suculenta é um cacto. Uma das principais características que os distinguem são as aréolas, estruturas das quais surgem espinhos, flores e novos brotos. Nos cactos, em geral, o caule suculento assume a função fotossintética, e as folhas foram modificadas em espinhos ao longo da evolução (Sema-Rs, 2023).

Outro mecanismo adaptativo importante é o metabolismo ácido das crassuláceas (CAM, do inglês *Crassulacean Acid Metabolism*). Nesse processo, os estômatos permanecem fechados durante o dia e se abrem à noite para as trocas gasosas, o que reduz a perda de água

por transpiração e confere maior eficiência hídrica em comparação com a fotossíntese convencional (Sema-Rs, 2023; Ogburn; Edwards, 2013).

Apesar da resistência à seca, essas espécies não dispensam a irrigação, e o excesso de água é uma das principais causas de apodrecimento das raízes. De acordo com Moro, Rodrigues e Simão (2023), muitos problemas no cultivo doméstico estão relacionados ao manejo incorreto da rega, o que torna o monitoramento da umidade do substrato uma alternativa eficiente para garantir condições adequadas ao desenvolvimento das plantas.

2.2. Irrigação Automatizada

A irrigação fornece a água necessária a processos fisiológicos como a fotossíntese, a absorção de nutrientes e o crescimento vegetal. Segundo Moura (2021), aplicar água na quantidade adequada e no momento correto favorece o desenvolvimento das culturas. Os métodos tradicionais, como aspersão, sulcos, infiltração, microaspersão e gotejamento, têm vantagens e limitações conforme a cultura, o solo e a disponibilidade hídrica (Vicente et al., 2021), e muitos dependem da intervenção humana, o que pode resultar em aplicação insuficiente ou excessiva de água.

A irrigação automatizada utiliza sensores, dispositivos eletrônicos e atuadores para monitorar as condições ambientais e irrigar de forma autônoma. O monitoramento contínuo do solo permite determinar o momento e a quantidade de água adequados, evitando tanto o déficit hídrico quanto o excesso (Sobenko, 2021). Há sistemas baseados em temporizadores, que irrigam em horários fixos independentemente da necessidade da planta, e sistemas baseados

em sensores, que monitoram variáveis como umidade do solo, temperatura e luminosidade. Os últimos são mais eficientes, pois irrigam apenas quando as condições indicam necessidade (Pramanik et al., 2022).

Além de economizar água, a automação reduz falhas humanas e mantém a irrigação durante a ausência do usuário, característica relevante para plantas sensíveis tanto ao excesso quanto à falta prolongada de água, como cactos e suculentas (Moro; Rodrigues; Simão, 2023). A evolução dos microcontroladores e da IoT tornou esses sistemas mais acessíveis: dispositivos como o ESP32 integram sensores, bombas e comunicação sem fio em uma única plataforma (Wijayakusuma; Hakim; Li, 2025).

2.3. Sensores de Umidade do Solo

O monitoramento da umidade do solo permite determinar a disponibilidade de água para as plantas e irrigar apenas quando necessário. As tecnologias mais empregadas em sistemas de baixo custo são os sensores resistivos e os capacitivos. Os resistivos medem a condutividade elétrica entre dois eletrodos, que varia com a quantidade de água no substrato; são baratos e simples, mas sofrem corrosão pelo contato contínuo com a umidade, o que reduz sua vida útil (Chowdhury; Sen; Janardhanan, 2022; Sousa et al., 2025). Os capacitivos medem a variação da capacitância associada à constante dielétrica do solo, que aumenta com o teor de água. Como não expõem eletrodos metálicos ao substrato, apresentam maior resistência à corrosão e maior estabilidade ao longo do tempo, sendo recomendados para monitoramento contínuo (Placidi et al., 2020; Abdelmoneim et al., 2025).

As leituras do sensor são processadas por um microcontrolador, que aciona bombas ou válvulas solenoides quando a umidade fica abaixo de um valor estabelecido (Pramanik et al., 2022; Abdelmoneim et al., 2025). Essa abordagem substitui a irrigação por horário fixo por uma decisão baseada nas condições reais do solo e reduz o desperdício de água (Placidi et al., 2020). Para cactos e suculentas, o monitoramento é ainda mais importante, pois evita o fornecimento excessivo de água e reduz o risco de apodrecimento radicular e de doenças associadas ao excesso de umidade (Moro; Rodrigues; Simão, 2023; Abdelmoneim et al., 2025). Sensores de baixo custo, contudo, precisam ser calibrados para o substrato em que serão usados, já que a relação entre o sinal e o teor de água varia com o material (Abdelmoneim et al., 2025).

2.4. Microcontrolador ESP32

Microcontroladores são dispositivos programáveis que recebem informações de sensores, processam os dados e controlam dispositivos externos, como relés, válvulas e bombas. Entre os mais utilizados em automação e IoT, o ESP32, desenvolvido pela Espressif Systems, destaca-se pela arquitetura de 32 bits, memória integrada, diversas interfaces de entrada e saída e suporte nativo a Wi-Fi e Bluetooth, que dispensa módulos de comunicação adicionais (Espressif Systems, 2024).

Na irrigação inteligente, o ESP32 tem sido empregado por sua facilidade de integração com sensores ambientais. Associado a sensores de umidade do solo, ele analisa continuamente os dados e controla bombas e válvulas, adequando o fornecimento de água às condições reais do substrato (Wijayakusuma; Hakim; Li, 2025; Correa-Quiroz; Toribio-Barrueto; Castro-Vargas, 2025). A conectividade

integrada também permite incorporar monitoramento remoto, armazenamento de dados, relatórios e notificações em dispositivos móveis (Morchid et al., 2024).

2.5. Internet das Coisas Aplicada à Irrigação

A Internet das Coisas refere-se à interconexão de dispositivos físicos por meio da internet, o que viabiliza a coleta, a transmissão e o processamento de dados em tempo real. Esses dispositivos, equipados com sensores, atuadores e recursos de comunicação, trocam informações e executam ações com mínima intervenção humana (Atzori; Iera; Morabito, 2010). Na agricultura, a IoT permite o monitoramento contínuo de variáveis ambientais, o que contribui para a eficiência produtiva e para o uso racional dos recursos naturais (Moretti et al., 2025).

Nos sistemas de irrigação inteligente, sensores coletam dados de umidade do solo, temperatura e luminosidade, que são processados para definir o momento de irrigar e podem ser disponibilizados ao usuário em aplicativos, páginas web ou serviços em nuvem (Brito et al., 2024; Simas et al., 2025). Microcontroladores com comunicação sem fio integrada, como o ESP32, facilitam a implementação dessas soluções (Wijayakusuma; Hakim; Li, 2025).

2.6. Uso Racional da Água e Sustentabilidade

O crescimento populacional, a expansão agrícola e as mudanças climáticas aumentam a preocupação com a disponibilidade de água e tornam necessárias tecnologias que reduzam desperdícios (UNESCO; ONU-Água, 2021). A agricultura está entre os setores que mais consomem água doce, e a irrigação inadequada pode causar perdas significativas e comprometer a sustentabilidade dos sistemas

produtivos (FAO, 2020; Ana, 2024). O uso racional da água envolve utilizá-la de forma eficiente e consciente, e o monitoramento das condições ambientais associado a tecnologias de controle é uma ferramenta importante para isso (Ana, 2024). Sistemas com sensores de umidade do solo, ao irrigar com base nas condições reais do substrato, evitam aplicações excessivas e aumentam a precisão do manejo (Brito et al., 2024; Simas et al., 2025).

3. METODOLOGIA

A pesquisa tem abordagem qualitativa e caráter exploratório e descritivo, e foi desenvolvida por meio de revisão bibliográfica narrativa. As fontes foram obtidas em bases e plataformas de acesso aberto ou institucional: periódicos indexados nas plataformas MDPI e ScienceDirect, o repositório arXiv, portais de periódicos nacionais em sistema OJS, repositórios institucionais de universidades e instituições federais (UFOP, UFAM, CEFET-MG e UFSM), anais de eventos científicos e sites de fabricantes, órgãos públicos e organismos internacionais, como Espressif Systems, ANA, FAO, UNESCO e SEMA-RS.

A busca utilizou termos em português e em inglês relacionados aos eixos do trabalho: irrigação automatizada (*automated irrigation*, *smart irrigation*), sensores de umidade do solo (*soil moisture sensor*, *capacitive sensor*), ESP32, Internet das Coisas (*Internet of Things*) e cultivo de cactos e suculentas. Foram priorizadas publicações recentes: das 29 referências utilizadas, 26 foram publicadas entre 2020 e 2025. Três obras anteriores foram mantidas por sua relevância conceitual ou por descreverem sistemas diretamente comparáveis ao proposto (Atzori; Iera; Morabito, 2010; Ogburn; Edwards, 2013; Medeiros, 2018). As consultas foram realizadas em junho de 2026, e a

seleção considerou a pertinência ao tema, a disponibilidade do texto completo e a confiabilidade da fonte.

Para o estado da arte, foram selecionados trabalhos que descrevem sistemas de irrigação automatizada de pequeno porte, com sensor de umidade do solo e microcontrolador, aplicados a plantas domésticas, hortas ou cultivos caseiros. Os trabalhos foram descritos e comparados segundo cinco critérios: uso de sensor de umidade do solo, acionamento automático da irrigação, uso do ESP32, recursos de IoT e tipo de aplicação. A comparação permitiu identificar as soluções existentes e a lacuna em relação ao cultivo de cactos e suculentas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Sistemas de Irrigação Automatizada

Medeiros (2018) desenvolveu um sistema para irrigação de plantas domésticas com sensores de umidade e temperatura do solo conectados a um microcontrolador e interface web acessível remotamente. O sistema monitorava o substrato e irrigava apenas quando necessário. Tarquinio e Silva (2024) construíram um irrigador automático para pequenas plantas com sensor de umidade, Arduino e bomba d'água, e demonstraram a viabilidade da automação em ambiente residencial. Veiga e Montanha (2021) desenvolveram uma horta vertical automatizada com Arduino, sensores e válvulas solenoides programadas para irrigar cada canteiro de acordo com o tempo e a quantidade de água necessários, mostrando a aplicabilidade da automação em cultivos verticais de pequeno porte.

Louro (2022) desenvolveu um sistema controlado por aplicativo para um quintal produtivo, com sensores de chuva e de radiação ultravioleta, banco de dados e comunicação sem fio com um aplicativo móvel, que permitia acompanhar e ajustar a irrigação remotamente. Soares et al. (2022) criaram o IoSeed, uma rede de sensores baseada em Arduino e módulo Wi-Fi ESP-8266 que monitorava a umidade do solo, o nível do reservatório e a luminosidade. A bomba era acionada quando a umidade caía abaixo de um limite mínimo e desligada ao atingir o limite máximo, e os dados eram enviados a uma plataforma em nuvem, com alarmes em caso de falta de água no reservatório. Henriques (2021) implementou um sistema com ESP32 que monitorava a umidade do solo e a temperatura ambiente em um plantio caseiro e enviava os dados, pelo protocolo MQTT, à plataforma TagoIO, onde podiam ser visualizados em um painel.

Em diferentes contextos, esses trabalhos obtiveram resultados satisfatórios quanto à automação do fornecimento de água, à redução da intervenção humana e à eficiência do manejo hídrico.

4.2. Sensores de Umidade nos Trabalhos Analisados

O sensor de umidade é o componente central de todos os sistemas analisados, mas a forma de usá-lo varia. Medeiros (2018) utilizou a condutividade elétrica do solo e classificou a tensão de saída em três faixas, correspondentes a solo úmido, intermediário e seco. Tarquinio e Silva (2024) usaram o módulo LM393 na entrada analógica do Arduino e compararam a leitura a um valor de referência para acionar a bomba. Veiga e Montanha (2021) combinaram sensores e válvulas solenoides para ajustar o tempo e a quantidade de irrigação de cada canteiro às espécies cultivadas. Louro (2022) acrescentou

sensores de chuva e de radiação ultravioleta, de modo que a irrigação considerasse também fatores climáticos. No IoSeed, Soares et al. (2022) usaram o LM393 com um multiplexador, o que permitiu ler vários sensores e definir faixas mínima e máxima de umidade configuráveis. Henriques (2021) associou a leitura de umidade à temperatura ambiente medida por um sensor DHT22.

A maioria desses trabalhos empregou sensores resistivos, escolhidos pelo baixo custo e pela simplicidade, embora sujeitos à corrosão dos eletrodos. Para cactos e suculentas, cujo substrato costuma ser mais arenoso e drenante e que devem permanecer secos por mais tempo entre as regas, esses dois pontos são críticos: um sensor que se degrada ou que não foi calibrado pode indicar umidade inexistente ou acionar a irrigação antes da hora. A literatura sobre sensores capacitivos de baixo custo aponta maior durabilidade e a necessidade de calibração específica (Placidi et al., 2020; Abdelmoneim et al., 2025).

4.3. Sistemas Baseados em ESP32 e Internet das Coisas

Três trabalhos incorporam recursos de IoT, com abordagens distintas. O IoSeed, desenvolvido em parceria entre a PUC-Campinas e a Unicamp, usou Arduino com módulo ESP-8266 e a plataforma em nuvem Blynk, com alarmes sonoros e visuais para situações críticas (Soares et al., 2022). Louro (2022) desenvolveu um aplicativo Android próprio, em Java, integrado ao banco de dados Firebase Realtime Database, com quatro telas para visualização dos sensores, informações do sistema e histórico de irrigações; a solução dispensou plataformas de terceiros, ao custo de maior complexidade de desenvolvimento. Henriques (2021) foi o único a usar diretamente o ESP32 como microcontrolador, com MQTT e

TagoIO, o que demonstra que essa plataforma já é empregada com sucesso em irrigação conectada, embora sem considerar as necessidades de espécies específicas.

Em relação ao ESP-8266, o ESP32 oferece maior capacidade de processamento e suporte nativo a Wi-Fi e Bluetooth em um único módulo (Espressif Systems, 2024). A conectividade amplia as possibilidades do sistema, mas também a complexidade de implementação e manutenção, pois exige configuração de serviços em nuvem e conhecimentos adicionais de programação.

4.4. Análise Comparativa

O Quadro 1 compara os trabalhos analisados e a proposta deste estudo segundo os critérios definidos na metodologia.

Quadro 1. Comparação entre trabalhos relacionados e a proposta deste estudo.

Trabalho	Sensor de umidade	Irrigação automática	ESP32	IoT	Aplica
Medeiros (2018)	Sim	Sim	Não	Não	Plant domés s
Henriques (2021)	Sim	Sim	Sim	Sim	Plant casei
Veiga e	Sim	Sim	Não	Não	Hort

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: https://revistatopicos.com.br/artigos/geracao-de-energia-a-partir-do-biogas-do-aterro-sanitario-de-ituiutaba-mg-analise-tecnica-economica-e-do-marco-legal?noblockage

Fonte: Autores, 2026.

Todos os trabalhos utilizam sensor de umidade do solo e acionamento automático, e as soluções mais completas acrescentam monitoramento remoto. Os resultados são satisfatórios, mas as aplicações são hortas, jardins ou cultivos caseiros em geral. Nenhum dos trabalhos trata das necessidades hídricas específicas de cactos e suculentas, que toleram longos períodos sem água e são particularmente sensíveis ao excesso de água.

4.5. Implicações para o Sistema Proposto

A revisão permite estabelecer as diretrizes do sistema a ser desenvolvido na próxima etapa. O ESP32 será a unidade central de processamento, responsável por ler o sensor, decidir sobre a irrigação e acionar a bomba d'água. A escolha se justifica pela combinação de capacidade de processamento, conectividade, facilidade de integração e baixo custo. O sensor de umidade deverá ser selecionado e calibrado para o substrato usado no cultivo, e a literatura favorece os sensores capacitivos pela durabilidade (Placidi et al., 2020; Abdelmoneim et al., 2025). A lógica de acionamento poderá adotar limites mínimo e máximo de umidade, como no IoSeed (Soares et al., 2022), ajustados para manter o substrato seco por mais tempo, como exigem essas espécies.

Diferentemente de Soares et al. (2022) e Louro (2022), a proposta não prevê, nesta etapa, uma interface completa de monitoramento

remoto. A prioridade é a simplicidade de implementação e o baixo custo, mais adequados ao cultivo doméstico de pequena escala, e a conectividade nativa do ESP32 mantém aberta a possibilidade de expansão.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão mostrou que cactos e suculentas, apesar de adaptados à seca, dependem de irrigação criteriosa, pois o excesso de água é uma das principais causas de sua perda. Os sistemas automatizados com sensor de umidade do solo e microcontrolador são uma alternativa consolidada para irrigar apenas quando necessário, com economia de água e de tempo.

A análise de seis trabalhos relacionados indicou que todos baseiam a decisão de irrigar no sensor de umidade, em geral resistivo, e que nenhum se dedica às necessidades dessas espécies. O ESP32 aparece como plataforma adequada pelo baixo custo e pela conectividade integrada.

Como continuidade, a pesquisa prevê selecionar e calibrar o sensor para o substrato, programar o ESP32 para o acionamento automático e testar o sistema em condições reais de cultivo, avaliando o comportamento da umidade do substrato, a frequência de irrigação e o consumo de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELMONEIM, A. A. et al. Calibration of low-cost capacitive soil moisture sensors for irrigation management applications. **Sensors,** v. 25, n. 2, p. 343, 2025. DOI: 10.3390/s25020343. Disponível em: https://www.mdpi.com/1424-8220/25/2/343. Acesso em: 23 jun. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023:** informe anual. Brasília: ANA, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/relatorio-conjuntura-dos-recursos-hidricos-no-brasil-atualiza-informacoes-sobre-aguas-do-pais. Acesso em: 22 jun. 2026.

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The Internet of Things: a survey. **Computer Networks,** v. 54, n. 15, p. 2787-2805, 2010. DOI: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.

BRITO, V. G. S. de et al. Sistema de irrigação inteligente: automação e eficiência utilizando tecnologias IoT. **Revista Brasileira de Estudos de Gestão e Desenvolvimento Regional,** v. 2, n. 1, p. 114-124, 2024. DOI: 10.30681/rbegdr.v2i1.12628. Disponível em: https://periodicos.unemat.br/index.php/rbedrpp/article/view/12628. Acesso em: 23 jun. 2026.

CHOWDHURY, S.; SEN, S.; JANARDHANAN, S. Comparative analysis and calibration of low cost resistive and capacitive soil moisture sensor. **arXiv,** 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2210.03019. Disponível em: https://arxiv.org/pdf/2210.03019. Acesso em: 22 jun. 2026.

CORREA-QUIROZ, J. J.; TORIBIO-BARRUETO, M. A.; CASTRO-VARGAS, C. IoT system with ESP32 for smart drip irrigation and climate monitoring in greenhouses. **Emerging Science Journal,** v. 9, n. 3, p. 1133-1157, 2025. DOI: 10.28991/ESJ-2025-09-03-01.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 series datasheet.** Versão 5.2. Shanghai: Espressif Systems, 2024. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 22 jun. 2026.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **The state of food and agriculture 2020:** overcoming water challenges in agriculture. Rome: FAO, 2020. Disponível em: https://www.fao.org/3/cb1447en/cb1447en.pdf. Acesso em: 23 jun. 2026.

HENRIQUES, L. F. A. **Implementação e monitoramento de um sistema de irrigação automatizado em IoT utilizando módulo ESP32 em plantio caseiro.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica – Telecomunicações) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2021. Disponível em: https://riu.ufam.edu.br/bitstream/prefix/6003/5/TCC_LuizHenriques.pdf. Acesso em: 23 jun. 2026.

LOURO, P. V. C. **Desenvolvimento de um sistema de irrigação automatizado e controlado por aplicativo para um quintal produtivo.** 2022. Monografia (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Divinópolis, 2022. Disponível em: https://www.eng-mecatronica.divinopolis.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/195/2022/03/TCC-PLouro-VersaoFinal.pdf. Acesso em: 24 jun. 2026.

MEDEIROS, P. H. S. **Sistema de irrigação automatizado para plantas caseiras.** 2018. Monografia (Graduação em Engenharia de Computação) – Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2018. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/1199/1/MONO

GRAFIA_SistemaIrriga%C3%A7%C3%A3oAutomatizado.pdf. Acesso em: 22 jun. 2026.

MORCHID, A. et al. IoT-based smart irrigation management system to enhance agricultural water security using embedded systems, telemetry data, and cloud computing. **Results in Engineering,** v. 23, p. 102829, 2024. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102829.

MORETTI, M. B. G. et al. O uso de IoT no monitoramento agrícola. **REMUNOM – Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro,** v. 17, n. 1, p. 1-11, 2025. DOI: 10.61164/fzg0bh66. Disponível em: https://remunom.ojsbr.com/multidisciplinar/article/view/4441. Acesso em: 24 jun. 2026.

MORO, J. dos S.; RODRIGUES, A. S.; SIMÃO, D. G. **Plantas suculentas:** cultivo e curiosidades. Santa Maria: UFSM, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/handle/1/34030. Acesso em: 20 jun. 2026.

MOURA, A. dos S. Métodos e sistemas de irrigação. In: VICENTE, L. de C. et al. **Hidráulica, irrigação e drenagem.** Porto Alegre: SAGAH, 2021. p. 117-132.

OGBURN, R. M.; EDWARDS, E. J. Repeated origin of three-dimensional leaf venation releases constraints on the evolution of succulence in plants. **Current Biology,** v. 23, n. 8, p. 722-726, 2013. DOI: 10.1016/j.cub.2013.03.029.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA (UNESCO); ONU-ÁGUA. **Relatório mundial das Nações Unidas sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos 2021:** valorizando a água. Paris: UNESCO, 2021. Disponível

em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751_por. Acesso em: 23 jun. 2026.

PÉREZ-LÓPEZ, A. V.; LIM, S. D.; CUSHMAN, J. C. Humboldt review: tissue succulence in plants: carrying water for climate change. **Journal of Plant Physiology,** v. 289, p. 154081, 2023. DOI: 10.1016/j.jplph.2023.154081.

PLACIDI, P. et al. Characterization of low-cost capacitive soil moisture sensors for IoT networks. **Sensors,** v. 20, n. 12, p. 3585, 2020. DOI: 10.3390/s20123585.

PRAMANIK, M. et al. Automation of soil moisture sensor-based basin irrigation system. **Smart Agricultural Technology,** v. 2, p. 100032, 2022. DOI: 10.1016/j.atech.2021.100032.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA DO RIO GRANDE DO SUL (SEMA-RS). **Guia de cultivo de cactos.** Porto Alegre: SEMA, 2023. Disponível em: https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/202312/04140933-guia-cultivo-de-cactos.pdf. Acesso em: 21 jun. 2026.

SIMAS, B. da S. et al. Aplicação de IoT na agricultura: protótipo de monitoramento de umidade do ar e solo para cultivo de alface em Parintins. **RGSA – Revista de Gestão Social e Ambiental,** v. 19, n. 5, e012040, 2025. DOI: 10.24857/rgsa.v19n5-010.

SOARES, Diana de Araujo; BATISTA, Bárbara Menegassi; YUJI, Felipe; SANTOS, Angela Alves dos; CARDOSO, Josué Marcos de Moura; GOMES, Gabriel; DIAS, Everton Oliveira. IoSeed – Sistema de Irrigação Automática baseado em IoT. In: BRAZILIAN TECHNOLOGY SYMPOSIUM (BTSYM), 2022, Campinas. **Anais** [...]. Campinas: PUC-

Campinas, 2022. Disponível em: https://lcv.fee.unicamp.br/wp-content/images/BTSym-22-Brasil/papers/BTSym2022_084.pdf. Acesso em: 24 jun. 2026.

SOBENKO, L. R. Manejo da irrigação. In: VICENTE, L. de C. et al. **Hidráulica, irrigação e drenagem.** Porto Alegre: SAGAH, 2021. p. 221-240.

SOUSA, G. P. et al. Comparação de sensores de umidade utilizando microcontrolador Arduino em solo de textura franco arenosa. **Revista DELOS,** v. 18, n. 65, e4449, 2025. DOI: 10.55905/rdelosv18.n65-097.

TARQUINIO, L. L.; SILVA, M. J. da. **Irrigador automático.** 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico em Mecatrônica) – Etec Professor Basilides de Godoy, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2024.

VEIGA, A. J. da S.; MONTANHA, G. K. Horta vertical com irrigação automatizada. **Tekhne e Logos,** Botucatu, v. 12, n. 1, p. 49-59, 2021. Disponível em: http://revista.fatecbt.edu.br/index.php/tl/article/view/676/436. Acesso em: 22 jun. 2026.

VICENTE, L. de C. et al. **Hidráulica, irrigação e drenagem.** Porto Alegre: SAGAH, 2021.

WIJAYAKUSUMA, P.; HAKIM, G. P. N.; LI, B. TerraGrow: integrated platform for real time plant monitoring and automated watering system with IoT and fuzzy Sugeno algorithm. **HardwareX,** v. 24, e00724, 2025. DOI: 10.1016/j.ohx.2025.e00724.

[1] Discente do curso de Engenharia da Computação da Universidade do Estado de Minas Gerais, Campus Ituiutaba. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[2] Discente do curso de Engenharia da Computação da Universidade do Estado de Minas Gerais, Campus Ituiutaba. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[3] Docente da Universidade do Estado de Minas Gerais, Campus Ituiutaba. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[4] Docente da Universidade do Estado de Minas Gerais, Campus Ituiutaba. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[5] Discente do curso de Engenharia de Computação da Universidade do Estado de Minas Gerais, Campus Ituiutaba. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[6] Graduada em Engenharia Elétrica. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail