

Sistema Automatizado de Irrigação com Arquitetura IoT Baseado no Método Hargreaves Samani e Avaliação de Usabilidade

Felipe D. M. Oliveira¹, Lucas R. S. Andrade¹, Lucas V. F. Borba¹,
Ingrid K. B. Ferreira¹, Nathália N. S. França¹, Joeberly D. N. Sales¹,
João L. L. Silva¹, Raul B. Paradedá²

¹LUMEN – Departamento de Ciência da Computação
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN) – Natal – Brasil

²Laboratório de Aprendizagem Robótica – Departamento de Ciência da Computação
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN) – Natal – Brasil

`felipeoliveira@uern.br`

Abstract. *This article presents an end-to-end, IoT-based automated irrigation system using ESP32, soil moisture, and air temperature/humidity sensors, transmitting data via MQTT. A web platform enables monitoring and management, with an automatic mode guided by Hargreaves–Samani evapotranspiration and crop coefficient, offering more precise irrigation management than fixed moisture thresholds. A user-centered evaluation ($N_{pre} = 116$, $N_{pos} = 97$) showed high perceived usability (SUS: $M = 87.27$) and usefulness (TAM Mean: $M = 4.74$), with a strong preference (89.7%) for automation with manual override.*

Resumo. *Este artigo apresenta um protótipo fim a fim de um sistema automatizado de irrigação baseado em IoT (ESP32, sensores de umidade do solo e ar), com dados via MQTT. Uma plataforma web permite monitoramento e controle, com modo automático guiado pela evapotranspiração de referência (Hargreaves–Samani) e coeficiente de cultura, oferecendo um manejo mais preciso do que limiares fixos. Uma avaliação centrada no usuário ($N_{pre} = 116$, $N_{pos} = 97$) indicou alta usabilidade (SUS: $M = 87,27$) e utilidade percebida (TAM Mean: $M = 4,74$), com forte preferência (89,7%) pela automação com opção de acionamento manual.*

1. Introdução

A ineficiência da rega manual na agricultura, maior consumidora de água doce, agrava a escassez hídrica [Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2026, Allen et al. 1998]. Soluções baseadas em Internet das Coisas (IoT) integram sensores e plataformas para monitoramento e acionamento remoto [Atzori et al. 2010]. Porém, sua adoção depende de fatores de Interação Humano-Computador (IHC), como usabilidade e utilidade percebida [Brooke 1996, Davis 1989].

Apesar dos avanços em protótipos IoT para irrigação, existem lacunas importantes a serem consideradas: (i) predominância de controle por limiares fixos de umidade do

solo, sem considerar a demanda atmosférica; e (ii) pouca ênfase em avaliações centradas no usuário. O método de Hargreaves–Samani permite estimar a evapotranspiração de referência (ET_o) a partir de temperatura e radiação, sendo adequado para sensoriamento limitado [Hargreaves and Samani 1985].

Este trabalho apresenta o projeto, implementação e avaliação centrada no usuário de um sistema de irrigação IoT. A decisão de irrigação é orientada pela estimativa da evapotranspiração de referência (Hargreaves–Samani) e coeficiente de cultura (K_c). O sistema utiliza ESP32, sensores de umidade do solo e temperatura/umidade do ar, comunicação MQTT e uma aplicação web. A avaliação, realizada em evento público, investigou usabilidade (SUS), utilidade percebida (TAM) e preferência entre automação com *override* manual e controle manual informativo.

As perguntas de pesquisa são: (RQ1) Qual é a usabilidade percebida do protótipo, após a interação com as duas variantes, medida pela SUS? (RQ2) Após experimentar duas variantes de interação (Sistema 1 e Sistema 2), qual é a variante preferida pelos usuários e quais justificativas explicam essa preferência?

2. Trabalhos Relacionados

Sistemas de irrigação IoT combinam sensoriamento, conectividade e acionamento remoto. Pereira et al. [Pereira et al. 2023] e Tamilmalar e Vaishnavi [Tamil Malar and Vaishnavi 2022] demonstram a viabilidade de arquiteturas de baixo custo com ESP32 e integração em nuvem. Iniciativas como SWAMP [Kamienski et al. 2019] propõem arquiteturas em camadas para irrigação de precisão. Juca et al. [Juca et al. 2018] descrevem um sistema IoT com interface web para acompanhamento e configuração de limites de umidade.

Embora a viabilidade técnica seja demonstrada, a maioria foca na descrição do protótipo, com menor ênfase em medidas centradas no usuário [Brooke 1996, Davis 1989]. O presente artigo se diferencia por integrar uma implementação fim a fim (MQTT, web) e comparar dois modos de interação (automação com *override* manual vs. manual informativo), analisando preferência e usabilidade.

3. Metodologia

A metodologia incluiu (i) desenvolvimento do protótipo IoT e (ii) avaliação centrada no usuário. A avaliação comparou dois modos de operação e utilizou questionários pré e pós-uso. Devido ao contexto de evento, as amostras pré ($N_{pre} = 116$) e pós ($N_{pos} = 97$) foram analisadas de forma não pareada.

3.1. Desenvolvimento do Protótipo IoT

O protótipo utilizou um microcontrolador ESP32 para leitura de sensores (umidade do solo MH-Series e DHT11 para temperatura/umidade do ar) e publicação de dados via MQTT. Um módulo relé aciona uma mini bomba para irrigação. Uma montagem de simulação com um segundo recipiente foi usada para demonstração em evento (Figura 1). O sensor de umidade do solo foi calibrado empiricamente.

A comunicação entre ESP32 e a aplicação web usou MQTT¹ via broker

¹MQTT Standard: <https://mqtt.org/>

Mosquitto². O ESP32 publica telemetria (irrigacao/dados), escuta comandos (irrigacao/comandos) e publica status (irrigacao/status) a cada 60 segundos. O *payload* das mensagens é codificado em JSON. O sistema agrega leituras diárias para T_{max} , T_{min} e T_{med} (às 8h), que subsidiam o cálculo de ET_o pelo método de Hargreaves–Samani [Hargreaves and Samani 1985]. A evapotranspiração da cultura (ET_c) é $K_c \cdot ET_o$ [Allen et al. 1998]. No protótipo, K_c e R_a são fixos em 1,0 e 24,5 MJ/m²/dia, respectivamente.

O sistema web possui um *backend* em Django³ para consumir mensagens MQTT, persistir dados em SQLite e disponibilizar recursos. O *frontend* em React⁴ oferece telas de autenticação, monitoramento e histórico (Figura 2). Dois modos de operação foram avaliados: o Sistema 1 (automático + manual), com irrigação automática baseada em leituras e parâmetros e opção de acionamento manual; e o Sistema 2 (manual informativo), que exibe parâmetros e histórico, sendo a irrigação apenas com acionamento manual.

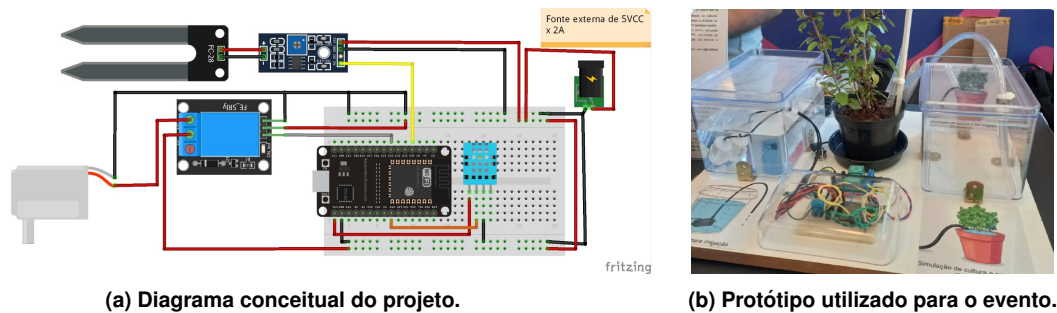


Figura 1. Diagrama de ligação e protótipo utilizado na avaliação.

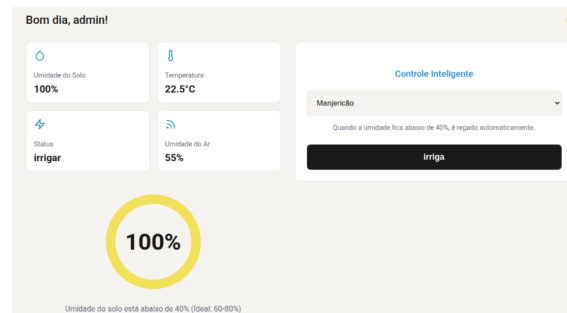


Figura 2. Tela inicial do sistema.

3.2. Avaliação Centrada no Usuário

A avaliação foi realizada em evento público, com recrutamento por conveniência. Cada participante interagiu com as duas variantes (ordem randomizada). O procedimento incluiu convite/consentimento, pré-questionário, interação e pós-questionário.

O pré-questionário coletou dados demográficos, experiência com tecnologia e irrigação, e percepções iniciais. O pós-questionário incluiu a *System Usability Scale*

²Mosquitto MQTT Broker: <https://mosquitto.org/>

³Django Web Framework: <https://www.djangoproject.com/>

⁴React JavaScript Library: <https://react.dev/>

(SUS) [Brooke 1996], 8 itens de utilidade percebida (TAM) [Davis 1989], percepção de simplificação e preferência entre Sistema 1 e Sistema 2 com justificativa aberta. O SUS foi calculado (0-100), e o TAM como média (1-5). A preferência foi por contagem. As respostas abertas foram inspecionadas qualitativamente.

4. Resultados

4.1. Amostra e caracterização dos participantes

Foram analisadas 116 respostas válidas. O perfil demográfico revelou predominância de participantes de 18 a 25 anos (60; 51,7%), seguido por faixas etárias de 26 a 35 anos e 36 a 45 anos (ambas com 18; 15,5%), menos de 18 anos (9; 7,8%) e 46 anos ou mais (11; 9,5%). A distribuição de gênero foi equilibrada, com 57 (49,1%) participantes femininos, 58 (50,0%) masculinos e 1 (0,9%) não-binário. Quanto à escolaridade, a maioria possuía Ensino Superior (68; 58,6%) ou Pós-graduação (21; 18,1%), com Ensino Médio (22; 19,0%) e Fundamental (5; 4,3%) completando a amostra.

Em relação às medidas em escala (1–5), a experiência relatada foi maior para uso geral de computadores/tablets (Média=4,02; DP=0,79; Mediana=4) e menor para sistemas automatizados de irrigação/controle climático (Média=1,81; DP=1,05; Mediana=1). A experiência com programação de computadores foi de 2,91 (DP=1,42; Mediana=3) e com sensores ambientais de 2,14 (DP=1,19; Mediana=2). A dificuldade percebida do processo de irrigação foi 3,28 (DP=0,88; Mediana=3), e a dificuldade de manter plantas bem irrigadas foi 3,55 (DP=0,96; Mediana=4). A confiança em sistemas automatizados foi 3,97 (DP=0,93; Mediana=4). Os desafios mais citados na irrigação foram “monitorar o clima/solo” (55; 47,4%), “quanto de água usar” (38; 32,8%) e “saber quando irrigar” (21; 18,1%). A maioria já enfrentou problemas por irrigar demais ou de menos (71; 61,2%) e preferiu que o sistema decida automaticamente (93; 80,2%) (Tabela 1).

Tabela 1. Tecnologia no cultivo e atitudes iniciais ($N = 116$).

Variável / categoria	n (%)	Variável / categoria	n (%)
Problemas por irrigar demais/de menos		Preferência inicial	
Sim	71 (61,2)	Automático	93 (80,2)
Não	31 (26,7)	Manual	23 (19,8)
Não sei	14 (12,1)		
Uso prévio de irrigação automatizada		Quando controle manual é melhor	
Sim	15 (12,9)	Plantas sensíveis	67 (57,8)
Não	99 (85,3)	Poucas plantas	39 (33,6)
Não sei	2 (1,7)	Falta de confiança na tecnologia	10 (8,6)
Uso de apps/ferramentas digitais no cultivo		Uso diário se funcionar bem	
Sim	12 (10,3)	Sim	100 (86,2)
Não	104 (89,7)	Talvez	14 (12,1)
		Não	2 (1,7)

4.2. Usabilidade percebida (RQ1)

A usabilidade percebida do protótipo foi mensurada pelo escore SUS (System Usability Scale) após a interação com o sistema ($N = 97$). O SUS médio obtido foi de 87,27 (DP=10,05), com valores variando de 60,00 a 100,00. Este resultado indica uma alta usabilidade percebida, posicionando o sistema em um patamar considerado excelente na literatura de IHC. A consistência interna da escala foi moderada ($\alpha = 0,602$), o que é aceitável considerando a natureza da escala e o contexto da avaliação.

4.3. Utilidade percebida (TAM) e simplificação percebida

A utilidade percebida foi estimada pela média agregada de itens inspirados no Technology Acceptance Model (TAM), em uma escala de 1 a 5. O valor médio de TAM_Mean foi de 4,74 (DP=0,38; mínimo=2,75; máximo=5,00; $N = 97$), com uma consistência interna adequada ($\alpha = 0,794$). Este alto valor sugere que os participantes consideraram o sistema extremamente útil. Em convergência com essa percepção, a simplificação do processo de irrigação após o uso do protótipo foi quase unânime, com 96 participantes (99,0%) respondendo “Sim” e apenas 1 (1,0%) respondendo “Não”.

4.4. Preferência entre variantes (RQ2) e justificativas

A preferência entre as duas variantes de interação (Sistema 1: automação com opção de acionamento manual; Sistema 2: acionamento manual com suporte informacional) foi um dos focos da RQ2. Após experimentar ambas as variantes, a grande maioria dos participantes, 87 (89,7%), indicou preferência pelo Sistema 1. Apenas 10 (10,3%) preferiram o Sistema 2. No campo de justificativa aberta, 59 respostas (60,8%) foram fornecidas. Uma inspeção qualitativa exploratória dessas justificativas revelou padrões como a valorização da praticidade e otimização de tempo proporcionadas pela automação, a redução de erros ou esquecimento, e a confiança em decisões baseadas em parâmetros ambientais e da cultura.

5. Discussão

Este trabalho avaliou um protótipo IoT de irrigação, combinando caracterização pré-uso, avaliação pós-uso (SUS e TAM) e preferência entre automação com *override* manual (Sistema 1) e controle manual informativo (Sistema 2).

Apesar da familiaridade digital, a baixa experiência com automação de irrigação e os desafios reportados (monitoramento, dosagem) reforçam a necessidade de sistemas de apoio à decisão. A atitude inicial favorável à automação alinha-se a modelos de aceitação [Davis 1989, Venkatesh et al. 2003].

O SUS médio (87,27) e TAM_Mean (4,74) indicam alta usabilidade e utilidade percebidas, respectivamente, superando médias da literatura [Brooke 1996, Bangor et al. 2008, Davis 1989]. A percepção quase unânime de simplificação (99%) reforça o valor prático.

A preferência pelo Sistema 1 (89,7%) sugere que usuários valorizam a automação com *override* manual, consistente com a literatura de automação centrada no humano para controle e confiança [Parasuraman et al. 2000, Lee and See 2004]. Justificativas abertas reforçam praticidade, tempo e redução de erros.

As implicações de design incluem: (i) priorizar interfaces claras e que reduzam o esforço; (ii) oferecer controle manual e explicações simples para construir confiança; e (iii) integrar recomendações e limiares configuráveis, mantendo a transparência.

6. Conclusão

Este trabalho contribui com um protótipo IoT de irrigação fim a fim, documentando a integração replicável de sensoriamento, MQTT e aplicação web. Adicionalmente, contrasta dois modos de interação (automação com *override* manual vs. manual informativo),

oferecendo um desenho reutilizável para investigar interação e adoção de automação agrícola. A avaliação centrada no usuário, com medidas padronizadas, é aplicável a protótipos em estágios iniciais.

As limitações incluem a amostra de conveniência, o que pode limitar a generalização para agricultores reais. O atrito amostral e a ausência de identificador único impediram análises pareadas.

Trabalhos futuros devem incluir: (i) estudos de campo com usuários-alvo; (ii) coleta pareada de dados; (iii) métricas objetivas (tempo, erros, consumo de água); e (iv) maior parametrização agronômica (ajuste de K_c), mantendo a explicabilidade do sistema.

Referências

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- Atzori, L., Iera, A., and Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey. *Computer networks*, 54(15):2787–2805.
- Bangor, A., Kortum, P., and Miller, J. (2008). An empirical evaluation of the system usability scale. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 24(6):574–594.
- Brooke, J. (1996). Sus: A “quick and dirty” usability scale. In Jordan, P. W., Thomas, B., Weerdmeester, B. A., and McClelland, I. L., editors, *Usability Evaluation in Industry*, pages 189–194. Taylor & Francis.
- Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, 13(3):319–340.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2026). Aquastat – fao’s global information system on water and agriculture. <https://www.fao.org/aquastat/en/>. Acesso em: 21 de maio de 2026.
- Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2):96–99.
- Juca, S. C. S., Rabelo, S. L., Gonçalves, D. L. C., et al. (2018). Construction of soil moisture and irrigation iot monitoring system using project based learning. *International Journal for Innovation Education and Research*, 6(8):99–111.
- Kamienski, C., Soininen, J.-P., Taumberger, M., Dantas, R., Toscano, A., Cinotti, T. S., Maia, R. F., and Neto, A. T. (2019). Swamp: An iot-based smart water management platform for precision irrigation in agriculture. *Sensors*, 19(2):311.
- Lee, J. D. and See, K. A. (2004). Trust in automation: Designing for appropriate reliance. *Human Factors*, 46(1):50–80.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., and Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 30(3):286–297.
- Pereira, G. P., Chaari, M. Z., and Daroge, F. (2023). Iot-enabled smart drip irrigation system using esp32. *IoT*, 4(3):221–243.
- Tamil Malar, J. E. and Vaishnavi, M. (2022). Iot based smart irrigation system using esp32. In *2022 3rd International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*. IEEE.
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., and Davis, F. D. (2003). User acceptance of information technology: Toward a unified view. *MIS Quarterly*, 27(3):425–478.