

Desenvolvimento de um protótipo de detecção e prevenção de incêndios para a agricultura familiar no sudeste do Pará

Bianca L. Soares, Maria L. F. Nascimento, Lais S. da Rocha, Vitória S. de Souza, Leslye E. C. Eras, Marcela A. Souza, Diego K. N. da Silva¹

¹ Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA)

Marabá - PA - Brasil

{biancalima, maria.ferreira, laissouroch, vitoriasoares, lecastro, marcela.alves, diegokasuo}@unifesspa.edu.br

Abstract. According to the NGO MapBiomas Fogo, 42.5% of the 200 million hectares burned in Brazil are concentrated in the Amazon biome, a loss that causes environmental, economic, and social impacts. With the goal of contributing to the reduction of these damages, this study proposes an IoT architecture focused on the detection and prevention of fires in small rural properties, combining environmental sensors, fuzzy logic, and LoRa communication. The solution classifies fire risk into three levels (low, medium, and high), automatically activating a water pump in case of danger. The system was validated in three scenarios (no fire, with flame, and at maximum range), and the results indicate an adequate system response in high-risk situations, as well as stable communication up to 400 meters, demonstrating the solution's potential for fire detection and mitigation in rural areas.

Resumo. Segundo a ONG MapBiomas Fogo, 42.5% dos 200 milhões de hectares queimados no Brasil concentram-se no bioma amazônico, o que resulta em impactos ambientais, econômicos e sociais. Com o objetivo de contribuir na redução desses danos, este estudo propõe uma arquitetura IoT voltada à detecção e prevenção de incêndios em pequenas propriedades rurais, combinando sensores ambientais, lógica fuzzy e comunicação LoRa. A solução classifica o risco de incêndio em três níveis (baixo, médio e alto), acionando automaticamente uma bomba d'água em caso de perigo. O sistema foi validado em três cenários (sem fogo, com chama e em alcance máximo), e os resultados indicam resposta adequada do sistema em situações de risco alto, além de comunicação estável até 400 metros, evidenciando o potencial da solução para a detecção e mitigação de incêndios em áreas rurais.

1. Introdução

A agricultura, especialmente a familiar, desempenha um papel fundamental no fornecimento de alimentos e na produção de matéria-prima para a indústria nacional, demonstrando competitividade mesmo em comparação com sistemas produtivos de maior intensidade [Correa et al. 2023]. No entanto, um problema crônico tem se intensificado nos últimos anos: o aumento das queimadas e dos incêndios florestais. Segundo dados da ONG MapBiomas Fogo, pelo menos 200 milhões de hectares foram devastados pelo fogo, sendo a região amazônica uma das mais prejudicadas, correspondendo a 42,5% da

área queimada no país. Além disso, mais da metade das áreas atingidas nesse bioma estão associadas a regiões agrícolas. [Plataforma MapBiomias Brasil 2025].

Essa perda não afeta somente o meio ambiente, mas também tem grande impacto econômico e social já que, de acordo com levantamento feito pela Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), incêndios causam prejuízos de mais de 14 bilhões de reais no campo. Em Marabá, cidade localizada no sudeste do Pará e inserida no bioma amazônico, o problema é ainda mais crítico. A cidade ocupa o 9º lugar no ranking estadual de queimadas, dos 334 focos registrados por satélites em 2023, 152 foram registradas em áreas de pastagens e regiões agrícolas, o que coloca em risco a produção local e a segurança das comunidades rurais [Correio de Carajás 2024].

Diante desse cenário, a busca por soluções tecnológicas se mostra necessária. No contexto de indústria 4.0, a Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT), refere-se a conexão de diversos objetos do cotidiano à internet, mostrando-se uma aliada na modernização de diversos setores da atualidade, incluindo a agricultura. A integração da tecnologia no campo visa otimizar métodos, como os de plantio e colheita, de modo a aumentar a produtividade e reduzir custos [Santos et al. 2023]. Nesse cenário, uma das soluções aplicáveis à prevenção e ao combate de incêndios é a integração de sensores via IoT, haja vista que o monitoramento em tempo real de variáveis ambientais, como temperatura e umidade, permite a identificação precoce de condições que favorecem à propagação do fogo [SENAR 2018]. Essa abordagem destaca-se por sua simplicidade e menor custo de estruturação e implementação, o que a torna vantajosa em áreas de difícil acesso e com infraestrutura limitada.

Considerando os problemas mencionados anteriormente e o potencial da IoT na prevenção de incêndios, este estudo propõe um sistema de detecção e prevenção de incêndios para pequenos produtores rurais do sudeste do Pará. O protótipo proposto é de baixo custo, integrando ferramentas como Internet das Coisas, lógica *fuzzy* e tecnologia de comunicação LoRa para monitoramento e classificação do risco de incêndio. Este artigo está dividido da seguinte maneira: na seção 2 apresenta-se os trabalhos correlatos. Na seção 3 descreve-se a metodologia e os materiais adotados para a construção do protótipo. Na seção 4 mostra-se os resultados e análises obtidos. Por fim, a seção 5 traz as conclusões e trabalhos futuros.

2. Trabalhos Correlatos

Esta seção tem como objetivo apresentar os principais estudos relacionados ao desenvolvimento de sistemas de detecção e prevenção de incêndios utilizando tecnologias de IoT, destacando suas contribuições e limitações.

Em [Abdul-Rahaman 2023], é proposto uma solução automatizada para detecção e alerta de incêndios baseado em IoT e Inteligência Artificial (IA). O sistema utiliza de sensores de temperatura, fumaça, gás e chamas, integrados a um microcontrolador Arduino Nano. Quando uma anomalia é detectada, consegue enviar notificações via SMS, além de cortar o fornecimento de energia da residência afetada, utilizando um relé. O projeto testado é mais indicado para ambientes residenciais e comerciais. O trabalho de [Alqourabah et al. 2021], propõe um sistema de detecção de incêndio residencial com *sprinklers* automáticos projetados para liberar água em caso de incêndio. O sistema utiliza sensores de temperatura, gás e chamas integrados ao microcontrolador Arduino Mega,

que envia dados em tempo real para a plataforma IoT Ubidots via módulo Wi-Fi. O sistema foi testado e demonstrou rapidez na detecção e ativação dos *sprinklers*.

A pesquisa do autor [Naing and Lai Thein 2023], apresenta um sistema de rede de comunicação sem fio (WSN), com monitoramento de temperatura, fumaça, chamas e condições climáticas. O sistema utiliza um Arduino ATmega 2560 para a conexão dos sensores e um módulo ESP8266 para o envio dos dados coletados para a nuvem. O sistema foi projetado para detecção precoce de incêndios e é mais indicado para monitoramento de grandes áreas florestais. Em [Gonçalves and Carvalho 2021] é proposto um sistema de sensoramento sem fio para detecção de incêndios florestais utilizando a tecnologia LoRa para comunicação de longa distância. Os sensores são integrados ao Arduino Mega, que coleta os dados e os transmite via módulo LoRa para um Gateway. Os dados são enviados para a plataforma *The Things Network* (TTN), uma rede nuvem que permite monitoramento em tempo real. Os testes de cobertura indicam um alcance de até 700 metros em áreas rurais.

O trabalho de [Castro et al. 2018] propõe um sistema de controle de incêndios florestais baseado em lógica *fuzzy* para lidar com a incerteza dos dados ambientais, e redes de sensores sem fio para melhorar a prevenção, detecção e combate ao problema. O sistema utiliza o controlador *fuzzy* para estimar o risco de incêndios e o método Analytic Hierarchy Process (AHP) é empregado para avaliar a propagação do fogo e determinar áreas vizinhas mais suscetíveis. O estudo de [Lopes and Kempner 2023] analisa a viabilidade econômica da implementação de redes de sensores sem fio (RSSFs) para detecção de incêndios e um sistema de aspersão automática para combate ao fogo em lavouras de algodão, com foco em uma fazenda hipotética de 4500 hectares no estado de Mato Grosso. O custo total estimado para a implementação do esquema de detecção é de R\$ 762.450,00, enquanto o sistema de combate automático custaria R\$ 1.302.450,00. Esses valores são baseados em equipamentos e serviços de fornecedores comerciais de alta qualidade, como Cisco para roteadores, e Anatel para comunicação de longa distância. Apesar do investimento inicial significativo, o estudo destaca o prejuízo de R\$ 170,1 milhões em um cenário de perda total da produção em caso de incêndio.

2.1. Análise comparativa

Todos os trabalhos selecionados foram analisados e comparados com a proposta deste projeto. A Tabela 1 mostra os resultados desta comparação, baseado nos seguintes parâmetros:

- C1: Parâmetros monitorados – Refere-se a variáveis ambientais e indicadores de incêndio monitorados (temperatura, umidade, gases e chamas).
- C2: Tecnologias utilizadas – Refere-se a microcontroladores e protocolos de comunicação (LoRa, Wifi, GSM).
- C3: Foco na agricultura familiar – Define se a solução faz adaptação específica para pequenos produtores rurais.
- C4: Uso de IA ou lógica fuzzy – Define se a solução aplica técnicas de inteligência artificial ou lógica *fuzzy* para a classificação do risco de incêndio.
- C5: Medidas de prevenção ativa – Indica se a proposta apresenta mecanismos para controle das chamas (ex.: bomba d'água, *sprinklers*).

A Tabela 1 evidencia que, no parâmetro C1, a maioria das propostas analisadas, com exceção de [Lopes and Kempner 2023], adotaram variáveis ambientais

parecidas com este trabalho, sendo temperatura e umidade fatores importantes para o monitoramento do risco de possibilidade de incêndio, enquanto o CO₂, e a presença de chama são fundamentais para a detecção de incêndio [SENAR 2018]. No parâmetro C2, os trabalhos de [Abdul-Rahaman 2023], [Naing and Lai Thein 2023] e [Alqourabah et al. 2021] restringiram-se ao uso de comunicação via Wi-Fi, o que limita a cobertura geográfica para o envio de dados dos sensores. Em contraste, a proposta de [Gonçalves and Carvalho 2021], assim como este estudo, optou pela tecnologia LoRa, que oferece comunicação de longo alcance e baixo consumo de energia, sendo para áreas remotas e de difícil acesso, como as utilizadas na agricultura familiar. Adicionalmente, o trabalho de [Castro et al. 2018], assim como esta pesquisa, empregou a lógica *fuzzy* para interpretar os dados das variáveis monitoradas e classificar o risco de incêndio.

Por fim, de acordo com os parâmetros C3 e C4 e C5, pode-se destacar o diferencial deste trabalho, sendo a única proposta que se adapta para pequenos produtores rurais, que implementa lógica *fuzzy* para a classificação do risco de início de incêndio e que ao mesmo tempo integra um mecanismo de prevenção ativa, o acionamento de bombas hidráulicas para o controle das chamas.

Tabela 1. Comparação entre os trabalhos relacionados e a proposta atual.

Trabalho	C1	C2	C3	C4	C5
[Abdul-Rahaman et. al 2023]	Temperatura, fumaça, chamas, GPS	GSM, WiFi, Arduino Nano	Não	Sim	Corte de energia (parcial)
[Naing et. al 2023]	CO ₂ , chamas, temperatura, umidade	WiFi, Arduino Mega, ESP8266	Não	Não	Não
[Alqourabah et. al 2021]	Temperatura, gases, chamas	Wifi, Ubidots, Arduino Mega, sprinkler automático	Não	Não	Sim (sprinkler)
[Gonçalves and Carvalho 2020]	Temperatura, chama, gás	LoRa, The Things Network	Não	Não	Não
[Castro et. al 2018]	Temperatura, umidade, velocidade do vento, chuva, gases	Arduino, rede 4G, WiFi direct, criptografia AES-CBC, Lógica Fuzzy	Não	Sim	Não
[Lopes and Kempner 2023]	Temperatura	RSSF, comunicador Anatel, roteador, repetidor, alarme	Não	Não	Sim (aspersores)
Este trabalho	Temperatura, umidade, CO ₂ , chamas	LoRa, WiFi, ESP32, Lógica Fuzzy	Sim	Sim	Sim (bomba para irrigação)

3. Materiais e métodos

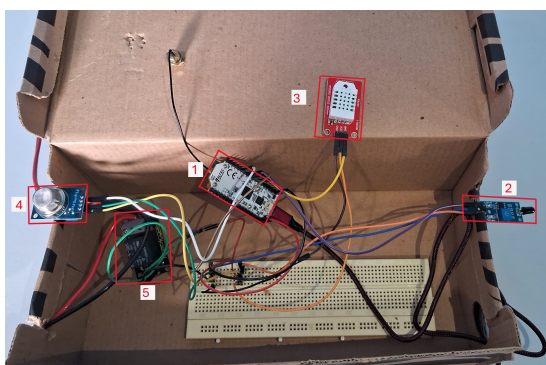
3.1. Materiais

Para o desenvolvimento do protótipo de detecção e prevenção de incêndios, foram utilizados diversos componentes eletrônicos e sensores que permitem o monitoramento ambiental e a atuação em casos de risco. Sistemas comerciais, como o Controlador Platypus, ativam a irrigação apenas com base na temperatura ambiente [Platypus Sprinkler USA 2023] possuindo preços pouco acessíveis (o modelo Sprinkler 12 volts 3G/4G custa aproximadamente R\$ 21.355,00). Portanto, a seleção dos materiais para o desenvolvimento do protótipo considerou fatores como baixo custo e compatibilidade com a tecnologia LoRa. A Figura 1 ilustra cada um dos principais itens descritos a seguir:

- Heltec WiFi LoRa 32 (V3) (número 1 na figura): Dois módulos foram utilizados no sistema, um transmissor e um receptor. O transmissor coleta os dados dos

sensores e controla o acionamento do módulo relé, enquanto o receptor recebe essas informações e as encaminha para a nuvem.

- Sensor de chama (LM393) (número 2 na figura): Dispositivo baseado em um sensor infravermelho sensível ao comprimento de onda emitido pelo fogo, empregado para detectar a presença de chamas. A calibração foi realizada por meio de testes com a chama de uma vela, ajustando a sensibilidade do sensor para detectar o fogo a uma distância de 50 centímetros.
- Módulo AM2302 (DHT22) (número 3 na figura): Sensor que mede temperatura e umidade relativa do ar.
- Sensor de gás (MQ-135) (número 4 na figura): Dispositivo capaz de identificar gases tóxicos e poluentes no ambiente, como dióxido de carbono (CO₂). Antes do uso, o sensor permaneceu ligado por 24 horas para estabilização da leitura dos dados.
- Módulo relé (V2.3) (número 5 na figura): Responsável pelo acionamento da bomba submersa.
- Bomba submersa (BS-160) (Figura 1b): Simula o funcionamento de um sistema de irrigação automatizado.



(a) Protótipo completo



(b) Bomba submersa

Figura 1. Microcontrolador com sensores e bomba submersa.

A seleção dos componentes considerou a necessidade de um sistema acessível e adaptado às condições das propriedades rurais no sudeste do Pará, onde as temperaturas médias diárias costumam atingir 30° C ao longo do ano, e a umidade relativa varia frequentemente [AccuWeather 2025]. Os sensores utilizados possibilitam um monitoramento preciso das condições ambientais, enquanto o módulo relé e a bomba submersa garantem que o sistema possa atuar ativamente na prevenção e controle de incêndios. Dessa forma, o protótipo desenvolvido detecta incêndios em estágios iniciais e atua automaticamente para minimizar danos, tornando-se uma solução viável para pequenos produtores rurais.

3.2. Tecnologia de comunicação: LoRa

Para a comunicação do protótipo de detecção e prevenção de incêndios, foi adotada a tecnologia LoRa, uma solução pertencente à categoria de redes de área ampla e baixo consumo energético (*Low Power Wide Area Network*- LPWAN). A escolha do LoRa foi fundamentada em uma análise comparativa entre as principais tecnologias LPWAN disponíveis, como NB-IoT e SigFox, considerando critérios como custo, cobertura e viabilidade de implementação em regiões de infraestrutura limitada.

Diferentemente do NB-IoT, que depende de redes celulares 4G e está sujeito a custos de assinatura e cobertura variável, o LoRa opera em faixas de frequência não licenciadas, eliminando custos com assinaturas mensais e permitindo a configuração de redes independentes [Bor et al. 2016]. Essa característica é vantajosa para aplicações em áreas remotas, como as regiões agrícolas do sudeste do Pará, onde a infraestrutura de telecomunicações é escassa. Já a SigFox é uma tecnologia proprietária de banda estreita, que consome pouca energia e funciona bem para dispositivos que transmitem dados em baixas taxas de bits [Ray 2018]. No entanto, sua cobertura está restrita às capitais e principais rodovias do Brasil, inviabilizando sua aplicação em regiões afastadas.

Além disso, o LoRa utiliza modulação por espalhamento espectral (*Chirp Spread Spectrum* - CSS) que oferece maior resistência a interferências e perdas de sinal, garantindo a confiabilidade da comunicação mesmo em cenários de menor potência de transmissão [Bor et al. 2016]. Dessa forma, o protótipo deste estudo pode operar de forma contínua, sem a necessidade de infraestrutura complexa ou custos adicionais.

3.3. Lógica fuzzy e regras fuzzy do sistema

O código utilizado neste projeto empregou lógica *fuzzy* para avaliar o risco de incêndio com base nos valores dos sensores e enviar os dados via LoRa para um sistema remoto. A justificativa para o uso da lógica *fuzzy* é o fato de que sensores podem apresentar variações e incertezas, dificultando a definição de limites fixos para cada condição. Em vez de definir limites rígidos, uma lógica *fuzzy* permite modelar a incerteza e interpretar os valores de forma mais próxima ao julgamento humano [De Barros et al. 2016]. O uso da lógica *fuzzy* neste sistema possibilita a identificação de diferentes níveis de risco (baixo, médio e alto) de forma mais flexível e intuitiva. Além disso, o relé acionado pelo sistema, que controla dispositivos de segurança, pode ser ativado com base em decisões que levam em conta não apenas os dados absolutos, mas também as interações sutis entre diferentes entradas. A lógica *fuzzy* do sistema é baseada em quatro variáveis de entrada e uma variável de saída (Tabela 2).

Tabela 2. Variáveis de entrada e saída.

Variáveis de Entrada		Variáveis de saída	
Temperatura Baixa	0 a 25 graus Celsius	Risco Baixo	(0-30%)
Temperatura Média	25 a 35 graus Celsius	Risco Médio	(30-70%)
Temperatura Alta	35 a 50 graus Celsius	Risco Alto	(70-100%)
Umidade Baixa	0 a 30%		
Umidade Média	30 a 60%		
Umidade Alta	60 a 100%		
CO2 Baixo	0 a 300 ppm		
CO2 Médio	300 a 1000 ppm.		
CO2 Alto	900 a 2000 ppm.		
Sem Chama	0 (zero)		
Com Chama	1 (um)		

As regras *fuzzy* definem como as entradas (temperatura, umidade, CO2 e presença de chama) interagem para influenciar a saída (risco de incêndio). A seguir estão alguns exemplos de regras configuradas para o sistema:

- Regra 1: Se a temperatura é alta, a umidade é alta, a concentração de CO2 é alta e não há chama, então o risco é médio.
- Regra 2: Se a temperatura é alta, a umidade é alta, a concentração de CO2 é alta e há chama, então o risco é alto.

- Regra 3: Se a temperatura é alta, a umidade é média, a concentração de CO2 é média e não há chama, então o risco é médio.
- Regra 4: Se a temperatura é média, a umidade é média, a concentração de CO2 é baixo e há chama, então o risco é alto.
- Regra 5: Se a temperatura é baixa, a umidade é baixa, a concentração de CO2 é baixo e não há chama, então o risco é baixo.

Desse modo, as regras são programadas no sistema fuzzy, e a inferência fuzzy as combina, para determinar um nível de risco de incêndio baseado nas medições dos sensores.

3.4. Esquema do protótipo desenvolvido

O protótipo foi desenvolvido para validar a integração entre hardware e software, dividindo-se em três etapas principais: transmissão, recepção e envio dos dados para a nuvem. Conforme a Figura 2a, o primeiro estágio, os sensores de temperatura e umidade (DHT22), chama (LM393) e gás CO2 (MQ-135) coletam informações ambientais, que são processadas pela placa Heltec WiFi LoRa 32 (V3). Esse microcontrolador também gerencia o módulo relé, responsável por acionar a bomba submersa do sistema de irrigação quando um risco elevado de incêndio é detectado. Na segunda etapa, os dados são transmitidos via rede LoRa para um receptor distante, também baseado no micro controlador da Heltec. Esse receptor, por sua vez, encaminha as informações para a nuvem por meio de protocolo HTTP, onde são armazenadas e visualizadas no ThingSpeak.

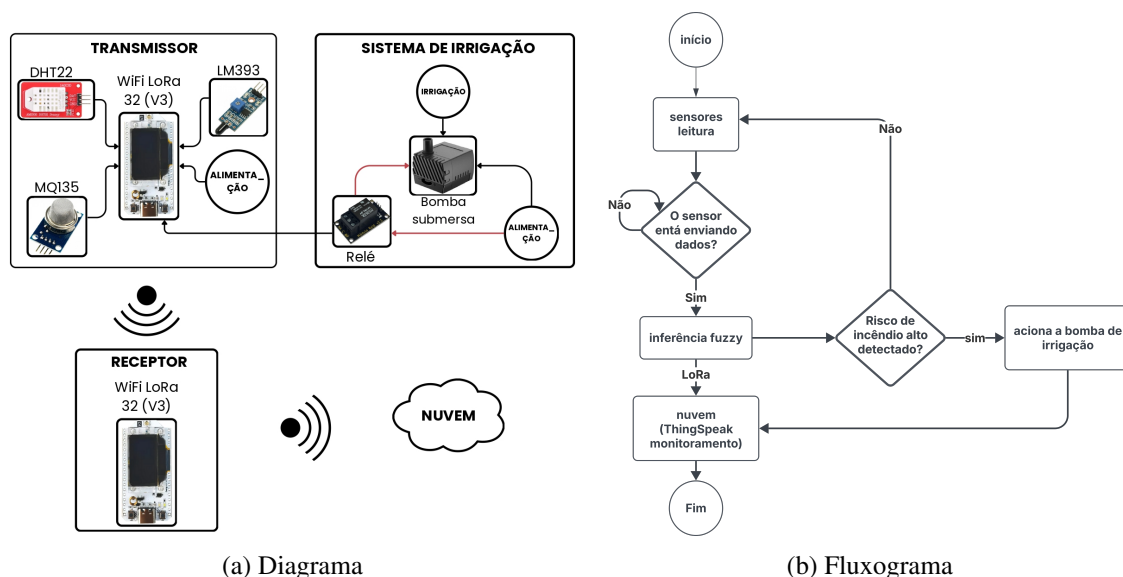


Figura 2. Diagrama esquemático e fluxograma de funcionamento do sistema.

O fluxograma de funcionamento do sistema (Figura 2b), ilustra cada etapa desse processo, desde a coleta de dados pelos sensores até a execução automatizada de ações. O sistema monitora continuamente os sensores e o envio correto dos dados. as informações recebidas são processadas pelo micro controlador, que utiliza lógica *fuzzy* para avaliar riscos. Essa etapa define os níveis de risco com base em regras pré-configuradas. Caso a avaliação indique valores altos de risco, o sistema aciona automaticamente a bomba de irrigação via módulo relé, conforme representado no diagrama esquemático. Por fim,

todos os dados são transmitidos para a plataforma ThingSpeak, permitindo acompanhamento remoto e histórico de eventos.

3.5. Proposta de implementação em Ambiente Real

Abaixo, a Figura 3 ilustra um dos possíveis posicionamentos dos componentes do sistema em um ambiente real. Os sensores são posicionados estrategicamente nos aceiros, faixas de terra onde a vegetação é removida para criar uma barreira física contra a propagação do fogo, com o objetivo de coletar dados ambientais, como temperatura, umidade e presença de fumaça. Essa prática é amplamente utilizada em áreas agrícolas e florestais, auxiliando a reduzir o risco de incêndios descontrolados.

Além disso, as informações coletadas são enviadas ao módulo Heltec WiFi LoRa 32, que processa os dados e os transmite para a nuvem, possibilitando o monitoramento remoto do ambiente. Caso seja identificado um risco de incêndio, o sistema aciona automaticamente um módulo relé, encarregado de ligar a bomba conectada ao sistema de irrigação local, como um poço artesiano.

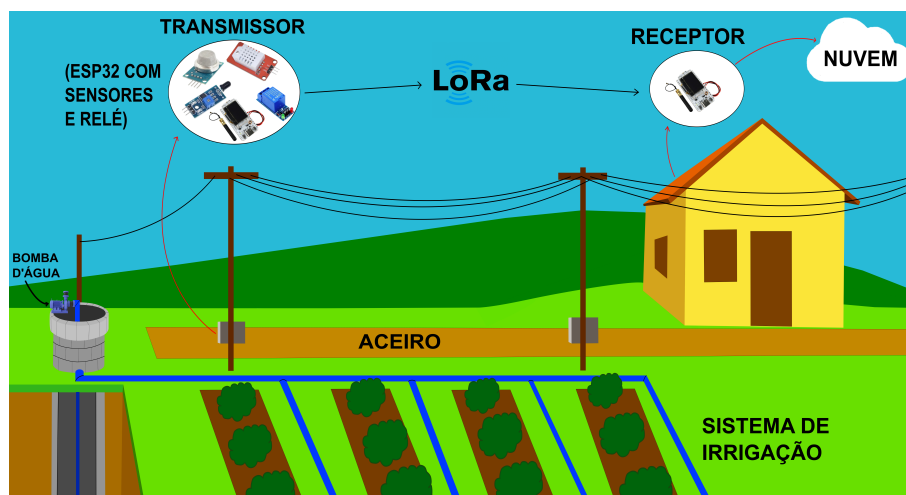


Figura 3. Possível implementação em ambiente real.

4. Resultados e análises

O local escolhido para avaliação da proposta é o Campus II da UNIFESSPA, selecionado para avaliar o desempenho do protótipo em testes iniciais de diferentes condições ambientais e de comunicação. O propósito desses testes é validar e aprimorar o sistema antes de sua implementação em condições reais, que podem apresentar variáveis imprevisíveis e desafios adicionais. Dessa forma, foram definidos três cenários principais:

- S1 (Local 2 - Laboratório de Telecomunicações): monitoramento sem presença de fogo, com o objetivo de validar o funcionamento inicial do sistema.
- S2 (Local 1 - Galpão de laboratórios): monitoramento com presença de fogo, para verificar a ativação automática da bomba.
- S3 (Local 3 - Condomínio Ipiranga Ecoville): avaliação do alcance máximo de comunicação, em um ambiente externo com vegetação e obstáculos naturais.

A Tabela 3 traz um resumo dos cenários de avaliação. Os resultados obtidos serão detalhados nas subseções seguintes.

Tabela 3. Resumo dos cenários de testes.

Cenário	Local	Condições	Objetivo do teste	Tempo de monitoramento
S1	(2)	Sem presença de fogo	Validação inicial	30 minutos
S2	(1)	Com presença de fogo	Verificação da ativação da bomba	15 minutos
S3	(3)	Sem presença de fogo	distância máxima do sistema	15 minutos

4.1. Testes iniciais e de ativação da bomba

Conforme ilustrado na Figura 4a, que apresenta os dados de temperatura, é possível observar que para o cenário sem a presença de fogo (S1), o maior valor de temperatura registrada foi de 30.9 °C, sendo o menor, 30.1 °C, não havendo variações maiores que 0.8 °C. Para o cenário com a presença de chama (S2), a temperatura manteve-se relativamente constante em torno de 28.7 °C, sem grandes flutuações. Esse comportamento pode ser explicado devido às condições ambientais dos dias em que os testes foram realizados. No caso do cenário S2, a temperatura média ambiente na cidade de Marabá, no sudeste do Pará foi de 28°C, em um dia nublado [AccuWeather 2025], o que contribuiu para a estabilidade observada. Além disso, a chama utilizada no teste não apresentava grandes proporções, e os componentes do sistema não foram expostos diretamente a altas temperaturas, limitando a quantidade de calor irradiado. Como resultado, não houve uma variação significativa na temperatura registrada, mesmo na presença de fogo.

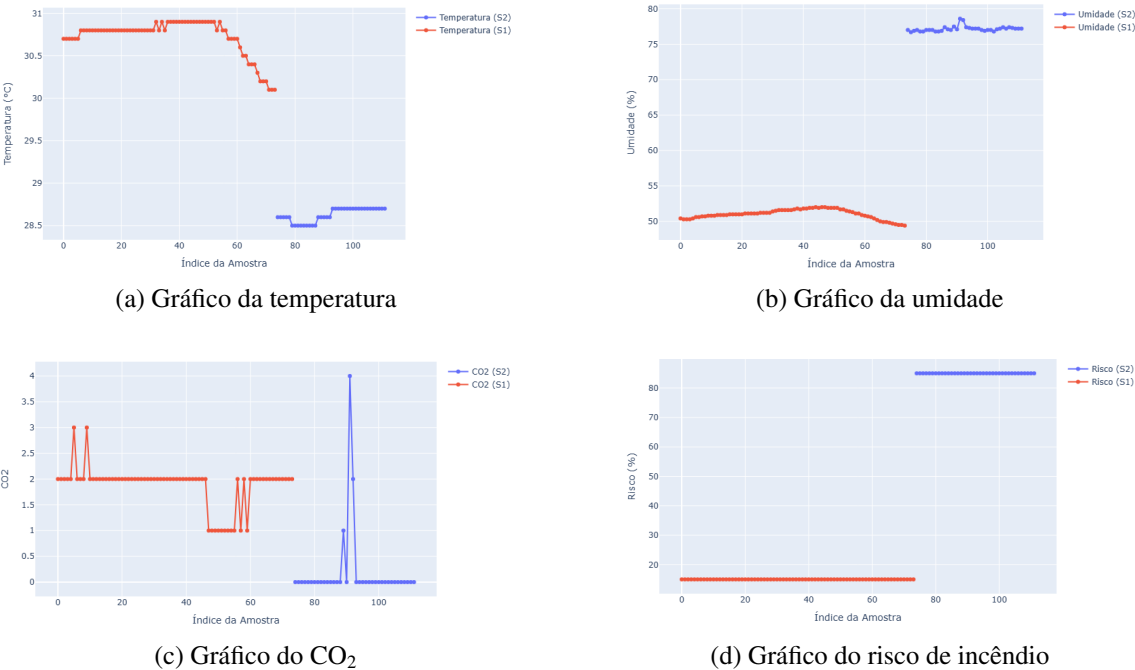


Figura 4. Resultados dos monitoramentos em dois cenários distintos.

No caso da Figura 4b, nota-se constância em ambos os cenários, com o pico de umidade sendo de 52% e 78.6% para os cenários S1 e S2, respectivamente. Assim como para a temperatura, as condições climáticas nubladas no dia do teste, também contribuíram para o aumento da umidade no cenário S2. Para o CO₂, cujos resultados são apresentados na Figura 4c, observa-se uma baixa concentração dos níveis de dióxido de

carbono em ambos os casos. No caso do cenário S1, a estabilidade e constância dos dados eram esperadas, uma vez que não houve fontes significativas de emissão de CO₂ no ambiente. Já no cenário S2, registrou-se um pico de concentração de 4 ppm, devido a uma pequena produção de fumaça durante o teste, realizada com o objetivo de avaliar a sensibilidade do sensor MQ135. Esse pico, embora discreto, demonstra a capacidade do sistema de identificar variações em condições controladas.

Por fim, na Figura 4d é ilustrado o risco de incêndio calculado pela inferência fuzzy, que classifica o cenário S1 com 15% de chances de incêndio, enquanto no cenário S2, o risco foi de 85%. Para o sistema, 85% de risco equivale a um princípio de incêndio de baixas proporções, já que a presença de chama é indicativo suficiente de perigo. Durante os 15 minutos em que o risco de incêndio foi classificado como alto, o sistema de ativação da bomba se manteve ligado, jorrando água para o local direcionado pela mangueira, demonstrando que o sistema é eficaz em responder a situações críticas, ativando-se de forma adequada quando necessário.

Diante da análise dos gráficos gerados, embora todas as variáveis monitoradas (temperatura, umidade, CO₂ e presença de chama) contribuam para a avaliação do risco de incêndio, o sensor de chama é o de maior relevância, pois sua detecção direta de fogo é o principal indicador de perigo, no entanto, as outras variáveis também desempenham um papel importante: caso os valores de temperatura, umidade ou CO₂ atingssem níveis críticos, o sistema também se ativaria, e a classificação do risco de incêndio seria significativamente maior. Essa abordagem garante uma resposta confiável do sistema em diferentes cenários, aumentando sua eficácia na prevenção e combate a incêndios em regiões agrícolas.

4.2. Testes de distância máxima

Nesses testes, a qualidade do sinal foi avaliada por meio da Relação Sinal Ruído, ou *Received Signal Noise* (RSN), e do indicador da força do sinal, ou *Received Signal Strenght Indicator* (RSSI), que é a potência com a qual o sinal está sendo recebido. Conforme apresentado na Tabela 4, que contém os valores médios obtidos para o RSSI e a SNR em diferentes distâncias, observa-se que a atenuação do sinal aumenta progressivamente à medida que a distância entre o transmissor (Tx) e o receptor (Rx) se eleva. Essa tendência é evidenciada pela redução nos valores de RSSI e SNR, especialmente entre os cenários S2 e S3. No entanto, mesmo com essa queda, os valores registrados permaneceram dentro de limites aceitáveis, garantindo o estabelecimento da comunicação e o funcionamento adequado do protótipo. A distância máxima de comunicação obtida foi de 400 metros, no cenário S3, sem a utilização de repetidores ou amplificadores de sinal. Nessa distância, registrou-se a maior queda no valor da SNR, atingindo -3.68 dB, o que indica uma degradação significativa na qualidade do sinal. Após esse limite, a comunicação foi perdida, demonstrando que 400 metros representa o alcance máximo operacional do sistema nas condições testadas.

Um parâmetro técnico que influencia diretamente a comunicação em relação à distância é o fator de espalhamento, ou *Spreading Factor* (SF), que representa um compromisso entre a distância de comunicação e a taxa de transmissão de dados. No presente estudo, o SF foi mantido em 7 para todos os cenários, visando otimizar a taxa de transmissão.

Tabela 4. Valores coletados baseados na distância entre transmissor e receptor.

Cenário	Distância (m)	Média RSSI (dBm)	Média SNR (dB)	SF
S1	2	-32	13.83	7
S2	10	-47	12.41	7
S3	400	-104	-3.68	7

5. Conclusão e trabalhos futuros

Este estudo propõe o desenvolvimento de um protótipo para prevenção e detecção de incêndios, baseado em quatro parâmetros ambientais: temperatura, umidade, presença de chama e concentração de CO₂. Utilizando um sistema inteligente de lógica *fuzzy*, a solução monitora e classifica o risco de incêndio, acionando automaticamente a irrigação quando necessário. A solução proposta emprega dispositivos IoT de baixo custo e a tecnologia LoRa para comunicação de longo alcance e baixo consumo de energia, garantindo maior eficiência no uso dos sensores. Além disso, a integração com a plataforma ThingSpeak permite o armazenamento em nuvem e o processamento dos dados coletados, agilizando a gestão do monitoramento. Os resultados obtidos indicam que o sistema classifica o risco de incêndio em diferentes cenários, com destaque para a importância do sensor de chama na detecção de foco de incêndio, ativa automaticamente a bomba de irrigação como medida preventiva nos cenários onde ocorreram alto risco de incêndio e possui comunicação estável até 400 metros, dentro dos limites operacionais estabelecidos.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a otimização do algoritmo *fuzzy* para incorporar mais variáveis ambientais e melhorar a precisão da classificação do risco de incêndio. Como o presente estudo manteve fixo o SF em 7, com o objetivo de priorizar a taxa de transmissão, estudos futuros poderão explorar outros valores desse parâmetro, avaliando seu impacto no alcance da comunicação e na viabilidade de expansão do sistema para áreas maiores. Por fim, a validação da proposta em condições reais, com diferentes cenários climáticos e topográficos é essencial para analisar a eficácia do sistema em larga escala.

Referências

- Abdul-Rahaman, A. (2023). An automated fire detection and reporting system based on ai and iot technologies. *International Journal of Scientific Research and Engineering Trends*, 9(5):1411–1416.
- AccuWeather (2025). Meteorologia mensal em marabá, Pará, Brasil. Disponível em: <https://www.accuweather.com/pt/br/mara%C3%A1/34591/february-weather/34591>. Acesso em: 22 fev. 2025.
- Alqourabah, H., Muneer, A., and Fati, S. M. (2021). A smart fire detection system using iot technology with automatic water sprinkler. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 11(4):2994.
- Bor, M., Vidler, J., and Roedig, U. (2016). Lora for the internet of things. In *International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*, pages 361–366.
- Castro, T. J., Caballero, G. P., Rodríguez, P. N., et al. (2018). Forest fire prevention, detection, and fighting based on fuzzy logic and wireless sensor networks. *Complexity*, 2018(1).

- Correa, A. T., Filgueiras, G. C., Carvalho, A. C., and Lopes, M. L. B. (2023). Caracterização da agricultura familiar na produção agropecuária paraense a partir do censo agropecuário 2017. *Amazônia, Organizações e Sustentabilidade*, 12(1):21.
- Correio de Carajás (2024). Marabá está em 9º lugar no ranking estadual de queimadas. Disponível em: <https://correiodecarajas.com.br/maraba-esta-em-9o-lugar-no-ranking-estadual-de-queimadas/>. Acesso em: 4 fev. 2025.
- De Barros, L. C., Bassanezi, R. C., and Lodwick, W. A. (2016). *A First Course in Fuzzy Logic, Fuzzy Dynamical Systems, and Biomathematics: Theory and Applications*. Springer.
- Gonçalves, L. S. and Carvalho, C. B. (2021). Sistema de sensoriamento sem fio aplicável à detecção de incêndios florestais. <https://arxiv.org/abs/2111.12209>. Acesso em: 14 mar. 2025.
- Lopes, G. T. and Kempner, T. R. (2023). Sistemas de automação na agricultura: Um estudo sobre a detecção e o combate a incêndios em lavouras de algodão. In *Anais da XII Escola Regional de Informática de Mato Grosso (ERI-MT 2023)*. Sociedade Brasileira de Computação - SBC. Disponível em: <https://doi.org/10.5753/eri-mt.2023.236599>. Acesso em: 14 mar. 2025.
- Naing, Y. and Lai Thein, T. L. (2023). Forest fire detection and warning system for disaster prevention. In *2023 IEEE Conference on Computer Applications (ICCA)*. IEEE. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/icca51723.2023.10182015>. Acesso em: 4 fev. 2025.
- Plataforma MapBiomias Brasil (2025). Hotsite fogo. Disponível em: <https://platafsmorma.brasil.mapbiomas.org/hotsite-fogo>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- Platypus Sprinkler USA (2023). Platypus controller bare 12volt 3g/4g. Disponível em: <https://www.platypussprinklerusa.com/product/platypus-controller-bare-12volt-3g-4g-no-temp-sensor-or-antenna-w-fuse-powerpack/>. Acesso em: 1 mar. 2025.
- Ray, B. (2018). Nb-iot vs. lora vs. sigfox. Acesso em: 9 mar. 2025. Disponível em: <https://wwlink-labscom/blog/nbiot-vs-lora-vs-sigfox>.
- Santos, E. A. G. D., Barros Ferreira, G., and Ferreira, M. (2023). Agricultura 4.0: estudo de caso sobre a eficiência da indústria 4.0 aplicada ao agronegócio. *Ciência & Tecnologia*, 15(1):e1517.
- SENAR (2018). *Fogo: prevenção e controle no meio rural*. Senar, Brasília. 88 p.; il.; 21 cm. (Coleção SENAR, 227).