

# Monitoramento Ambiental com Redes de Sensores sem Fio: Revisão de Aplicações

Bárbara Cássia Florentino Rosa

Mestranda em Telecomunicações

barbararosa@inatel.br

Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL

Matheus Ferreira Silva

Mestrando em Telecomunicações

matheus.f@inatel.br

Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL

**Resumo** - Este trabalho apresenta uma pesquisa sobre aplicações de Redes de Sensores sem Fio (WSN, do inglês *Wireless Sensor Networks*) no monitoramento ambiental, área estratégica para a prevenção de desastres naturais, conservação de ecossistemas e melhoria da qualidade de vida. Em conjunto com a Internet das Coisas (IoT), as WSNs possibilitam a coleta contínua e distribuída de dados ambientais com granularidade espacial e temporal sem precedentes. Foram analisados cinco estudos revisados por pares que contemplam diferentes cenários: sistemas de alerta de enchentes, detecção precoce de incêndios florestais, rastreamento de fauna silvestre, monitoramento de poluição atmosférica e gestão de dados espaço-temporais em redes ambientais. A síntese destaca as metodologias, os objetivos e os resultados obtidos em cada caso, além de descrever como as redes podem ser implementadas e quais sensores são empregados. Os achados evidenciam que a integração de sensores heterogêneos, protocolos de comunicação de baixo consumo, técnicas de aprendizado de máquina e arquiteturas escaláveis de processamento contribuem para sistemas mais precisos, resilientes e sustentáveis.

**Palavras-Chave**—*Internet das Coisas, monitoramento ambiental, poluição, redes de sensores sem fio, sensores ambientais*

**Abstract** - This work presents a study on applications of Wireless Sensor Networks (WSN) in environmental monitoring, a strategic area for the prevention of natural disasters, ecosystem conservation and improvement of quality of life. Together with the Internet of Things (IoT), WSNs enable continuous and distributed collection of environmental data with unprecedented spatial and temporal granularity. Five peer-reviewed studies were analyzed, covering different scenarios: flood early warning systems, early detection of forest fires, wildlife tracking, air pollution monitoring and spatiotemporal data management in environmental networks. The synthesis highlights the methodologies, objectives and results obtained in each case, while also describing how such networks can be implemented and which sensors are employed. The findings show that the integration of heterogeneous sensors, low-power communication protocols, machine learning techniques and scalable processing architectures contributes to more accurate, resilient and sustainable systems.

**Keywords**—*Internet of Things, environmental monitoring, Pollution, Wireless Sensor Networks, environmental sensors*.

## I. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com desastres naturais e a degradação ambiental motivam o desenvolvimento de sistemas de monitoramento capazes de detectar e prever eventos

Este documento refere-se à primeira entrega de TP546 - *Internet das Coisas e Redes Veiculares*, disciplina referente ao curso de Mestrado em Telecomunicações pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), ministrada pelo Prof. Dr. Samuel Baraldi Mafra. O trabalho faz parte dos requisitos básicos para aprovação em tal matéria.

adversos de forma proativa. As Redes de Sensores sem Fio (WSN, do inglês *Wireless Sensor Networks*) consistem em um conjunto de dispositivos autônomos equipados com sensores e módulos de comunicação que medem grandezas físicas e químicas e enviam os dados a uma estação central ou à nuvem. Como exemplo, os sensores de pressão, ultrassônicos e os transdutores de nível permitem medir a altura da água em rios e represas, enquanto os sensores de umidade e dióxido de carbono indicam condições de saturação do solo e potenciais precursores de enchentes [1].

Uma WSN é composta por nós alimentados por baterias ou painéis solares, microcontroladores, transceptores e *software* de coleta de dados, que podem ser organizados em topologias em estrela, árvore ou malha, de acordo com o cenário de aplicação. Essas redes operam com orçamentos energéticos restritos, pois os microcontroladores e transceptores devem funcionar por longos períodos sem substituição de baterias. Para minimizar o consumo, os nós empregam técnicas de economia de energia como ciclos de sono, ajuste dinâmico de potência de transmissão e escalonamento de comunicação [2], [3].

As tecnologias de comunicação empregadas em redes de sensores variam de acordo com o alcance e a taxa de dados desejados. O ZigBee é um protocolo baseado no padrão IEEE 802.15.4, projetado para redes em malha de baixo consumo, muito usado em automação residencial e aplicações de sensoriamento. O Wi-Fi, por sua vez, oferece altas taxas de transmissão (Mbps), mas com maior gasto energético, sendo adequado a cenários em que a disponibilidade de energia não é um fator crítico. O Bluetooth, especialmente em sua versão de baixo consumo (BLE), viabiliza conexões ponto a ponto ou em malha em curtas distâncias, sendo comum em dispositivos portáteis e de saúde. Já o LoRaWAN é uma tecnologia LPWAN que possibilita comunicação em longas distâncias (até dezenas de quilômetros) com baixíssima taxa de transmissão, adequada para monitoramento ambiental em áreas extensas. O Sigfox, por fim, também classificado como LPWAN, fornece conectividade global por meio de uma rede proprietária, transmitindo pequenas quantidades de dados com consumo mínimo de energia. Em muitos casos, as redes são auto-organizadas e resilientes, permitindo que os nós adaptem sua topologia a falhas de *hardware* ou às condições do meio [1], [4].

A calibração e a manutenção dos sensores são cruciais para garantir a confiabilidade das medições, uma vez que o

ruído ambiental, a temperatura e o envelhecimento podem distorcer os valores. Nesses cenários, técnicas de filtragem e aprendizado de máquina são aplicadas para compensar variações e extrair informações relevantes de sinais ruidosos. Além dos sensores instalados no solo, imagens de satélite e veículos aéreos não tripulados complementam a observação, fornecendo cobertura espacial mais ampla, ainda que com menor resolução temporal [5].

Outro desafio inerente aos sistemas de monitoramento ambiental é a gestão dos dados. O grande volume de medições geradas pelas WSNs exige estratégias eficientes de armazenamento e consulta para possibilitar análise em tempo real. Para isso, são aplicados métodos de compressão temporal, indexação espacial e integração com bancos de dados de séries temporais, reduzindo o consumo de memória e acelerando consultas. Alguns trabalhos recentes já propõem métodos específicos de inserção e recuperação de dados espaciotemporais de sensores, detalhados nas próximas seções, o que reforça a necessidade de arquiteturas otimizadas [6].

O emprego de redes de sensores no contexto ambiental é amplo, abrangendo o monitoramento de queimadas, a qualidade do ar, a gestão de recursos hídricos e a proteção da fauna. Na detecção precoce de incêndios florestais, os sensores de temperatura, umidade relativa, luminosidade e gases como monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) são fundamentais [7]. Para o rastreamento de animais em ambientes naturais, os módulos de posicionamento global (GPS) podem ser combinados com acelerômetros, barômetros e termômetros em etiquetas de baixo consumo energético, integradas a redes de longa distância como o *Sigfox* [8].

No monitoramento da qualidade do ar urbano, os sensores de matéria particulada (PM1.0, PM2.5, PM10) e gases poluentes como ozônio ( $\text{O}_3$ ), dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ) e compostos orgânicos voláteis são empregados em redes que utilizam microcontroladores de baixo custo e protocolos de comunicação como o de Transporte de Telemetria por Enfileiramento de Mensagens (MQTT, do inglês *Message Queueing Telemetry Transport*) [5]. Já em sistemas de monitoramento meteorológico, os sensores coletam dados sobre temperatura, luminosidade, pressão e som, que são processados em servidores para permitir consultas espaciotemporais complexas [6].

Este trabalho apresenta, portanto, um panorama de cinco aplicações representativas de redes de sensores sem fio para monitoramento ambiental. Cada subseção descreve um estudo selecionado, resumindo sua metodologia, objetivos e resultados, além de discutir a implementação da rede e os sensores empregados. Ao final, uma análise comparativa evidencia tendências emergentes e desafios atuais.

## II. Paper 1 - MONITORAMENTO DE ENCHENTES COM SENsoRES E VISÃO COMPUTACIONAL

### A. Visão Geral

Este trabalho apresenta uma revisão sistemática sobre sensores e técnicas de visão computacional aplicadas ao monitoramento e mapeamento de enchentes. Foram analisados estudos publicados entre 2009 e 2019, com foco na detecção precoce de inundações, modelagem hidrológica e desenvolvimento de sistemas de alerta.

### B. Objetivo

A meta central é avaliar como câmeras e sensores de IoT podem ser utilizados em conjunto para aumentar a precisão das previsões de enchentes e melhorar a eficácia de sistemas de alerta em tempo real.

### C. Sensores e Tecnologias

A revisão identificou o uso de transdutores de pressão, capazes de medir o nível da água com precisão de milímetros, e sensores ultrassônicos, que emitem pulsos sonoros e calculam o tempo de retorno para estimar a lâmina d'água. Também foram considerados sensores ópticos e radares de micro-ondas. Os primeiros apresentam baixo custo, mas são limitados pela cobertura de nuvens, enquanto os radares conseguem estimar a extensão de áreas alagadas mesmo sob condições atmosféricas adversas. Além disso, destacaram-se sensores de umidade do solo e de dióxido de carbono como precursores de enchentes. Na comunicação, foram utilizadas plataformas como *ZigBee*, *GSM* e *Wi-Fi* [1].

Entre os dispositivos mais empregados destaca-se o microcontrolador ESP8266 *NodeMCU*, amplamente usado pela conectividade *Wi-Fi* integrada, facilidade de programação e baixo custo. O sensor ultrassônico HC-SR04 mede distâncias por meio da emissão e recepção de pulsos sonoros e o sensor de vazão YF-S201 gera pulsos proporcionais à vazão de água em tubos e canais [1]. A Fig. 1 apresenta as imagens desses componentes frequentemente citados em arquiteturas de monitoramento de enchentes.

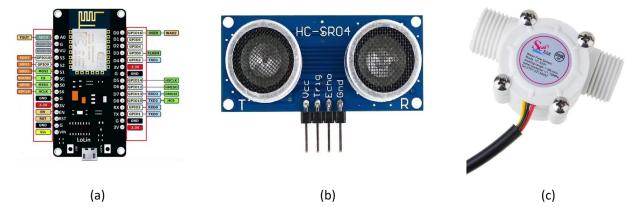


Figura 1: Dispositivos empregados em sistemas de monitoramento de enchentes: (a) microcontrolador ESP8266 NodeMCU e suas pinagens, (b) sensor ultrassônico HC-SR04 e (c) sensor de vazão YF-S201. Adaptados de [9]–[11].

### D. Implementação típica

Uma rede de monitoramento de enchentes costuma ser composta por estações com sensores ultrassônicos, transdutores de pressão e sensores de umidade integrados a microcontroladores alimentados por baterias ou painéis solares. A comunicação ocorre via *ZigBee*, *GSM* ou redes *Wi-Fi* e os dados são encaminhados para um servidor central ou plataforma em nuvem para análise em tempo real. A inclusão de módulos de GPS permite o georreferenciamento das medições. Os sensores ópticos e de radar satelital complementam, por sua vez, os dados locais, fornecendo uma visão global das áreas inundadas [1].

### E. Exemplos de estudos e protótipos

A revisão destaca diversas arquiteturas *IoT* aplicadas ao problema. Um dos trabalhos analisados propôs uma rede inteligente de sensores para otimização da gestão de inundações, combinando sensores de nível e de vazão com algoritmos que estimam o tempo e a localização de enchentes iminentes [2]. Nesse sistema, múltiplos sensores instalados ao longo de um rio medem simultaneamente o nível ( $L_i$ ) e a taxa de escoamento ( $R_i$ ). Os valores são comparados a parâmetros de referência armazenados em banco de dados e, quando ultrapassam um limiar, o sistema calcula o tempo e o local da enchente e envia um alerta à estação base. Para isso, utilizou-se o sensor de vazão em conjunto com sensores de nível.

Outro protótipo implementou um sistema de notificação de enchentes baseado no microcontrolador ESP8266 *NodeMCU* e no envio de mensagens via aplicativo *Telegram* [12]. O dispositivo utilizou o sensor ultrassônico para medir o nível da água e transmitia periodicamente as leituras para uma plataforma em nuvem. Quando a lâmina d'água ultrapassava os limites pré-definidos, um alerta era disparado aos moradores via mensagens instantâneas. O *NodeMCU* foi escolhido pelo baixo custo, pela conectividade *Wi-Fi* integrada e pela facilidade de programação, características que viabilizam sua adoção em comunidades com recursos limitados.

### F. Resultados

Os experimentos de campo mostraram que o aumento simultâneo de  $\text{CO}_2$  e da umidade do solo pode indicar risco de inundaçāo. As redes de sensores integradas a algoritmos de aprendizado de máquina reduziram significativamente alarmes falsos. Outros sistemas empregaram lógica *fuzzy* para acionar alarmes quando o nível da água ultrapassava limiares definidos, alcançando um erro máximo de 5%. Também foram relatadas implementações com microcontroladores *NodeMCU* associados a sensores ultrassônicos, transmitindo dados a servidores e telefones celulares para alertar moradores por mensagens de texto [1].

### G. Conclusão

A revisão conclui que a combinação de diferentes sensores (pressão, ultrassônicos, ópticos e de radar) associada a técnicas de aprendizado de máquina e de lógica *fuzzy* pode aumentar significativamente a confiabilidade dos sistemas de monitoramento de enchentes. Os estudos analisados demonstram que a integração de sensores locais com imagens de satélite, bem como o uso de plataformas de comunicação de baixo custo, são estratégias promissoras para reduzir alarmes falsos e ampliar a precisão das previsões. Apesar dos avanços, permanecem desafios relacionados à autonomia energética dos nós, à escalabilidade das redes em cenários de larga escala e à padronização da integração entre diferentes tecnologias.

## III. Paper 2 - DETECÇÃO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS COM ABORDAGEM DE CONFIANÇA

### A. Visão Geral

Este estudo apresenta um modelo de confiança para aprimorar a detecção precoce de incêndios florestais em redes

de sensores sem fio inteligentes. O foco principal é superar limitações de métodos tradicionais, como observações humanas e imagens de satélite, que muitas vezes apresentam baixa resolução temporal e não conseguem detectar rapidamente os focos iniciais de incêndio.

### B. Objetivo

O objetivo do trabalho foi reduzir o tempo de detecção e aumentar a confiabilidade dos sistemas de monitoramento, utilizando aprendizado de máquina aliado a um modelo de confiança que avalia a qualidade dos dados recebidos de cada nó sensor.

### C. Sensores e Tecnologias

A rede proposta compreende nós de sensores esféricos equipados para medir temperatura, umidade relativa do ar, intensidade luminosa e concentração de monóxido de carbono (CO). Esses nós incluem microcontroladores Arduino Nano, baterias de íon-lítio, painéis solares e módulos de rádio nRF24L01 para comunicação sem fio. A estação base, localizada em área habitada, combina um computador pessoal, um Arduino Nano e um módulo de comunicação celular para processar os dados [7]. A Fig. 2 apresenta as imagens desses componentes frequentemente citados em arquiteturas de detecção de incêndios.

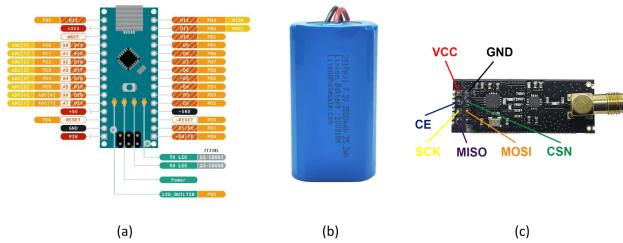


Figura 2: Dispositivos empregados em sistemas de detecção de incêndios: (a) microcontrolador Arduino Nano e suas pinagens, (b) bateria de íon-lítio e (c) módulo de rádio nRF24L01. Adaptados de [13]–[15].

### D. Implementação típica

Os nós sensores são distribuídos na floresta e alimentados por baterias recarregáveis com energia solar. Cada nó integra um processador de baixo consumo e um transceptor de rádio, organizando-se em uma topologia hierárquica em *clusters*. Nessa configuração, apenas as cabeças de grupo realizam transmissões de longa distância, otimizando o consumo energético. Os dados coletados são enviados à estação base, que pode estar conectada à rede elétrica e à *Internet*, permitindo a emissão de alertas por SMS ou integração com plataformas de monitoramento remoto. O modelo de confiança pode ser executado diretamente na estação base ou em um servidor remoto [7].

### E. Exemplos de estudos e protótipos

A Fig. 3 ilustra o processo de detecção de incêndios florestais e a indicação de sua localização geográfica. O protótipo descrito no estudo organiza os nós em *clusters*, nos quais cada cabeça de grupo agrega as informações coletadas e as transmite à estação base. Essa, por sua vez, realiza a fusão de dados utilizando um modelo de confiança capaz de identificar nós defeituosos ou com leituras inconsistentes. O sistema também é responsável por acionar alertas, que podem ser enviados via SMS para autoridades locais, possibilitando respostas rápidas em campo [7].



Figura 3: Detecção de incêndios florestais e indicação de sua localização. Reproduzido de [7].

### F. Resultados

Nos experimentos, foram coletadas aproximadamente sete mil amostras contendo medições reais de campo. O conjunto de dados foi dividido em 80% para treinamento e 20% para teste do modelo de aprendizado de máquina. O sistema emitiu alertas por mensagem de texto quando detectava padrões indicativos de incêndio, possibilitando uma resposta imediata das autoridades. Os resultados demonstraram que o uso do modelo de confiança reduziu significativamente os falsos alarmes e aumentou a precisão da detecção, principalmente devido à exclusão de nós defeituosos e à análise inteligente dos dados ambientais [7].

### G. Conclusão

O estudo evidencia que a combinação de sensores ambientais (temperatura, umidade, luz e CO) com algoritmos de aprendizado de máquina e mecanismos de confiança resulta em sistemas mais rápidos e confiáveis para detecção de incêndios florestais. A topologia em *clusters*, aliada ao uso de energia solar, prolonga a autonomia dos nós, enquanto a integração com comunicação celular e SMS garante a disseminação eficiente de alertas.

Os principais desafios ainda envolvem a escalabilidade da rede em áreas extensas, a manutenção dos nós em ambientes hostis e a necessidade de modelos mais robustos para diferentes tipos de biomas. Assim, o modelo de confiança mostra-se promissor para integrar sistemas de monitoramento ambiental em larga escala, contribuindo para políticas de prevenção e mitigação de incêndios florestais.

### IV. Paper 3 - RASTREAMENTO DE VIDA SELVAGEM COM REDE *Sigfox*

#### A. Visão Geral

Este estudo avalia a utilização da rede *Sigfox*, uma tecnologia LPWAN de longo alcance e baixo consumo energético para o rastreamento de animais em vida livre. A rede opera em bandas de rádio estreitas e é projetada para transmitir pequenas quantidades de dados com alta eficiência energética, alcançando distâncias de vários quilômetros. A pesquisa analisa sua viabilidade em cenários reais de monitoramento da fauna, destacando a escalabilidade e o custo reduzido em comparação a sistemas tradicionais de telemetria.

#### B. Objetivo

O objetivo principal foi demonstrar a aplicabilidade da *Sigfox* no rastreamento de múltiplas espécies em diferentes ambientes, quantificando métricas de desempenho como alcance de comunicação, taxa de sucesso na entrega de mensagens, atraso e consumo energético.

#### C. Sensores e Tecnologias

Foram implantados 312 dispositivos em 30 espécies distribuídas por 12 países, abrangendo desde morcegos de apenas 25 gramas até elefantes de 3 toneladas. Os dispositivos incorporavam sensores de posicionamento (GPS), acelerômetros, barômetros e termômetros, permitindo monitorar movimento, altitude e temperatura corporal. Foi ainda desenvolvida uma plataforma modular que combina diferentes placas eletrônicas, antenas e fontes de energia, incluindo soluções baseadas em coleta de energia cinética e solar [8]. A Fig. 4 apresenta as imagens desses componentes frequentemente citados em arquiteturas de rastreamento de vida selvagem.

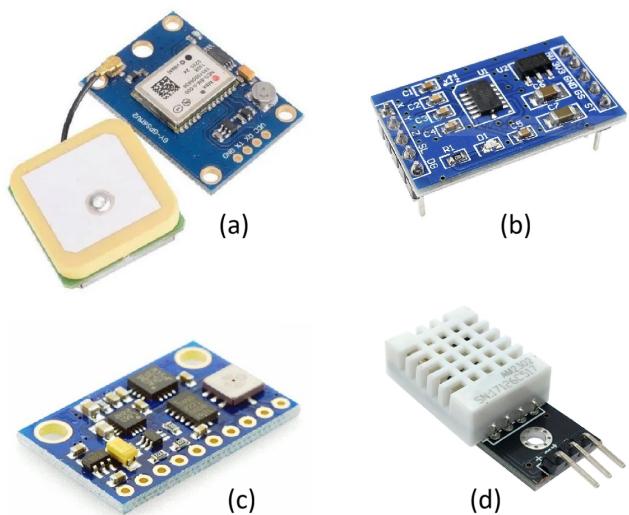


Figura 4: Dispositivos empregados em sistemas de rastreamento de vida selvagem: (a) módulo GPS GY-NEO6MV2, (b) módulo acelerômetro MMA7361, (c) módulo barômetro BMP085 e (d) módulo de temperatura DHT-22. Reproduzidos de [16]–[19].

#### D. Implementação Típica

Os dispositivos foram integrados a coleiras, mochilas e etiquetas auriculares de diferentes tamanhos, viabilizando o monitoramento de espécies com perfis morfológicos distintos, como rinocerontes brancos, búfalos africanos e aves migratórias. A comunicação foi bidirecional: além do envio de dados, era possível transmitir comandos para reconfiguração de parâmetros ou acionamento de alarmes [8].

A rede *Sigfox* depende de uma infraestrutura de estações base conectadas à *Internet*. Em áreas remotas, a cobertura foi ampliada com microestações alimentadas por energia solar, permitindo a coleta de dados em locais de difícil acesso e com baixa infraestrutura de telecomunicações [8]. A Fig. 5 apresenta a infraestrutura típica de uma rede *Sigfox* aplicada ao rastreamento de fauna.

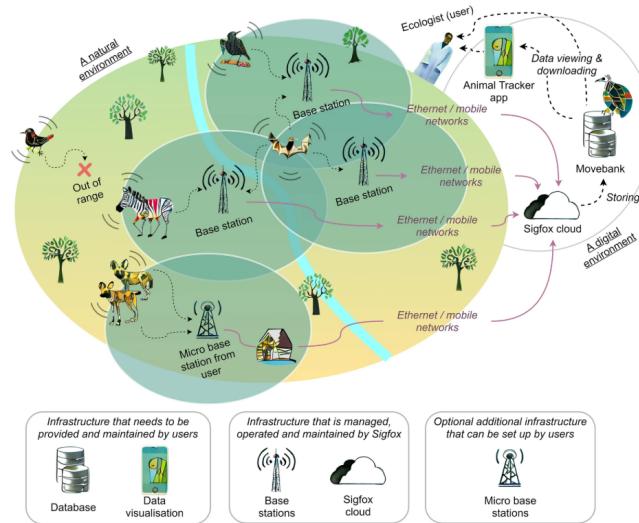


Figura 5: Infraestrutura de uma rede *Sigfox* para rastrear animais de vida livre. Dispositivos acoplados aos animais transmitem mensagens para estações base próximas. Cada estação base requer acesso permanente à *Internet* e envia os dados recebidos para a nuvem da *Sigfox*, que realiza armazenamento temporário antes de encaminhá-los ao *Movebank* para registro persistente. Reproduzido de [8].

#### E. Exemplos de Estudos e Protótipos

A avaliação prática incluiu a análise do vetor de aceleração dinâmica do corpo e da temperatura de animais monitorados. A Fig. 6 ilustra o caso de um impala, no qual medições de temperatura e aceleração foram registradas a cada 10 minutos e transmitidas via *Sigfox*. Esse exemplo evidencia a capacidade da rede de suportar aplicações em tempo quase real, mesmo com restrições de largura de banda [8].

#### F. Resultados

O estudo registrou distância máxima de comunicação de até 280 km em linha de visada, alcançada em experimentos com um abutre-do-cabo, estabelecendo um recorde mundial em transmissão digital de animais. A taxa média de sucesso na entrega de mensagens foi de 68,3% para espécies voadoras e 54,1% para espécies terrestres. Essa diferença é atribuída principalmente à presença de obstáculos físicos, como relevo

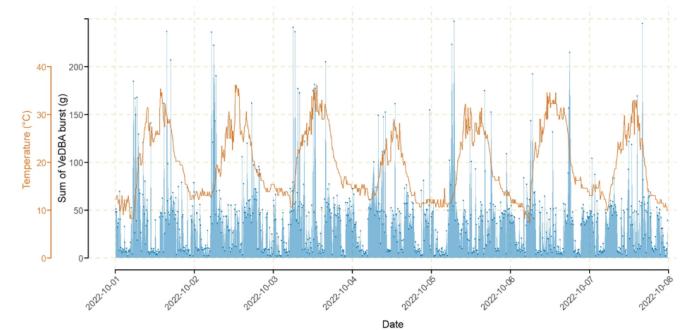


Figura 6: Exemplo de dados coletados em um impala: vetor da aceleração dinâmica do corpo e medições de temperatura registradas em intervalos de 10 minutos e transmitidas via *Sigfox*. Reproduzido de [8].

irregular e cobertura vegetal densa, que atenuam o sinal em ambientes terrestres [8].

O atraso mediano na comunicação foi de 1,49 s, enquanto o consumo de energia chegou a apenas 5,8  $\mu$ Ah por byte transmitido. A geolocalização oferecida pela própria rede apresentou erro mediano de 12,89 km, valor considerado aceitável para rastreamento em larga escala [8].

#### G. Conclusão

A pesquisa evidencia que a rede *Sigfox* constitui uma alternativa promissora para o rastreamento de animais em vida livre, combinando baixo consumo energético, longo alcance e custo acessível. O uso de dispositivos modulares, aliados a fontes de energia renovável, aumenta a autonomia das operações e reduz a necessidade de manutenção em campo.

Os principais desafios incluem a limitação da taxa de dados, a dependência da infraestrutura de estações base e a precisão limitada do serviço de geolocalização. Ainda assim, os resultados obtidos reforçam o potencial da *Sigfox* como ferramenta para conservação da biodiversidade e combate a ameaças como caça ilegal e enredamento de espécies. Esse estudo amplia o escopo do monitoramento ambiental, mostrando que tecnologias IoT de baixo consumo podem ser aplicadas não apenas em cenários urbanos, mas também em ecossistemas complexos e de difícil acesso.

### V. Paper 4 - MONITORAMENTO DE POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA COM REDES DE BAIXO CUSTO E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

#### A. Visão Geral

Este estudo propõe uma rede de monitoramento atmosférico voltada para auxiliar cidadãos com problemas respiratórios. A iniciativa baseia-se no uso de sensores de baixo custo e técnicas de inteligência artificial para previsão de concentrações de poluentes em áreas urbanas. Embora esses sensores não atendam aos padrões de precisão regulatória, a combinação com algoritmos de calibração e modelos de aprendizado de máquina permite gerar informações úteis e previsões confiáveis.

## B. Objetivo

O objetivo principal foi desenvolver uma rede urbana de alta densidade espacial de amostragem, utilizando sensores econômicos para estimar níveis de poluição e prever sua evolução com até 24 horas de antecedência.

## C. Sensores e Tecnologias

A arquitetura proposta utiliza nós de sensoriamento baseados em microcontroladores ESP32 ou módulos comerciais *FiPy*, conectados ao módulo ZPHS01B. Esse módulo integra sensores para matéria particulada (PM1.0, PM2.5, PM10), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), formaldeído (HCHO), ozônio ( $\text{O}_3$ ), dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), compostos orgânicos voláteis (COVs), além de temperatura e umidade relativa. Os nós também possuem relógios em tempo real, cartões de memória e mecanismos de *watchdog* [5].

A Fig. 7 apresenta as imagens desses componentes frequentemente citados em arquiteturas de monitoramento de poluição.

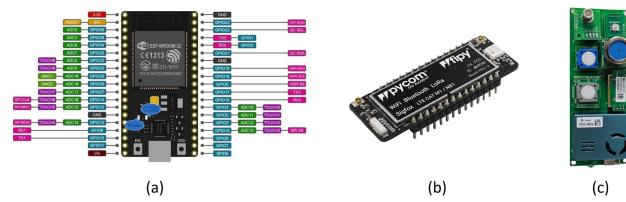


Figura 7: Dispositivos empregados em sistemas de monitoramento de poluição: (a) microcontrolador *NodeMCU* ESP32 e suas pinagens, (b) módulo comercial *FiPy* e (c) módulo sensor de gás ZPHS01B. Reproduzidos de [20]–[22].

A Fig. 8 ilustra um nó *IoT* genérico com suporte de comunicação para monitoramento da qualidade do ar.

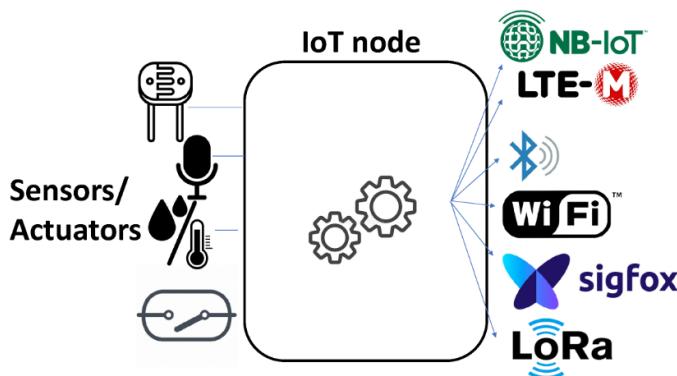


Figura 8: Proposta de um nó *IoT* genérico para monitoramento da qualidade do ar e suporte de comunicação. Reproduzido de [5].

A comunicação ocorre por diferentes tecnologias, como LTE-M, NB-IoT, LoRa, Sigfox, WiFi ou Bluetooth. O protocolo MQTT é empregado para transmissão dos dados com garantia de entrega e autenticação baseada em usuário e senha. No servidor, os dados são armazenados em banco de dados de séries temporais (InfluxDB) e visualizados via Grafana [5].

## D. Implementação Típica

Cada nó é instalado próximo a estações oficiais de monitoramento para calibração diária, compensando deriva e envelhecimento dos sensores. Os sensores apresentam vida útil de 12 a 15 meses e consumo em torno de 200 mA a 5 V, permitindo operação com fonte fixa ou baterias recarregáveis. A arquitetura facilita a integração de novos nós, com criação automática de tópicos MQTT [5].

A Fig. 9 apresenta exemplos de sensores de baixo custo utilizados nos nós de monitoramento.



Figura 9: Sensores de baixo custo empregados em sistemas de monitoramento de poluição atmosférica: (a) módulo MiCS5524 para monitoramento da qualidade do ar, (b) módulo Plantower PM2.5 para verificação de material particulado e (c) sensor MHZ19B de  $\text{CO}_2$ . Reproduzidos de [5].

## E. Exemplos de Estudos e Protótipos

Foram desenvolvidos protótipos para monitoramento tanto em ambientes internos quanto externos, adaptados para diferentes condições de operação. A Fig. 10 mostra modelos de protótipos testados no estudo.



Figura 10: Protótipos de monitoramento de qualidade do ar de baixo custo para ambientes (a) internos e (b) externos. Reproduzidos de [5].

## F. Resultados

As leituras brutas alimentaram modelos de aprendizado de máquina, incluindo arquiteturas densas, convolucionais e com memória de longo e curto prazo (LSTM, do inglês *Long-Short Term Memory*). O modelo LSTM apresentou o melhor desempenho, com erro médio de 7,2%, chegando a apenas 0,1% para  $\text{CO}_2$  e 2,4% para PM10. Esses resultados mostram que, apesar das limitações dos sensores de baixo custo, o

processamento inteligente garante previsões robustas e úteis para a saúde pública [5].

### G. Conclusão

O estudo demonstra que redes de baixo custo, integradas a técnicas de inteligência artificial, podem ampliar significativamente a cobertura espacial do monitoramento atmosférico. Essa abordagem representa um caminho promissor para cidades inteligentes, permitindo previsões confiáveis e geração de alertas acessíveis à população. Os desafios incluem a necessidade de calibração constante, a vida útil limitada dos sensores e a dependência de conectividade estável em áreas urbanas densas.

Assim, o uso combinado de sensores de baixo custo e IA mostra-se promissor não apenas para redes urbanas inteligentes, mas também para ampliar a capacidade preditiva de sistemas ambientais em escala global.

## VI. Paper 5 - GESTÃO DE DADOS ESPACIOTEMPORAIS EM REDES AMBIENTAIS

### A. Visão Geral

Este estudo apresenta um sistema de monitoramento ambiental voltado para a gestão eficiente de fluxos de dados espaciotatemporais em redes de sensores. A motivação decorre da necessidade de aplicações ambientais, como monitoramento meteorológico e prevenção de desastres, de armazenar leituras históricas e responder a consultas temporais e espaciais em tempo real. Técnicas tradicionais de processamento de fluxos não oferecem suporte adequado a esse tipo de demanda, resultando em altos custos de armazenamento e baixa eficiência nas consultas.

### B. Objetivo

O objetivo central foi desenvolver métodos de inserção e consulta capazes de reduzir o volume de dados armazenados sem comprometer a precisão das leituras, garantindo consultas contínuas e eficientes em larga escala.

### C. Sensores e Tecnologias

Embora o foco do trabalho seja a gestão de dados, a arquitetura considera uma rede de sensores sem fio típica, com nós distribuídos equipados com sensores de temperatura, luminosidade, som e pressão. Esses nós transmitem os dados para uma estação base, que realiza o gerenciamento dos fluxos [6].

Vale destacar que os sensores utilizados são modelos simples e amplamente encontrados em aplicações didáticas e de baixo custo, como o DHT-22 para temperatura e umidade, o LDR KY-018 para luminosidade, o KY-038 para captação de som e o BMP085 para pressão atmosférica. Nessa proposta, entretanto, a relevância do estudo não está na instrumentação em si, mas na forma como os dados coletados são processados e otimizados para armazenamento e consultas espaciotaemporiais [6].

A Fig. 11 apresenta as imagens desses componentes frequentemente citados em arquiteturas de gestão de dados espaciotaemporiais em redes ambientais.

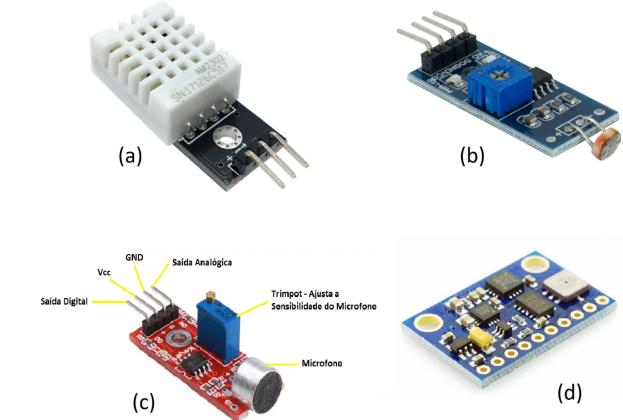


Figura 11: Dispositivos empregados em sistemas de gestão de dados espaciotaemporiais em redes ambientais: (a) módulo de temperatura DHT-22, (b) módulo de luminosidade LDR KY-018, (c) módulo sensor de som KY-038 e suas pinagens e (d) módulo barômetro BMP085. Reproduzidos de [18], [19], [23], [24].

A Fig. 12 mostra uma visão genérica da aplicação de redes de sensores no monitoramento ambiental.

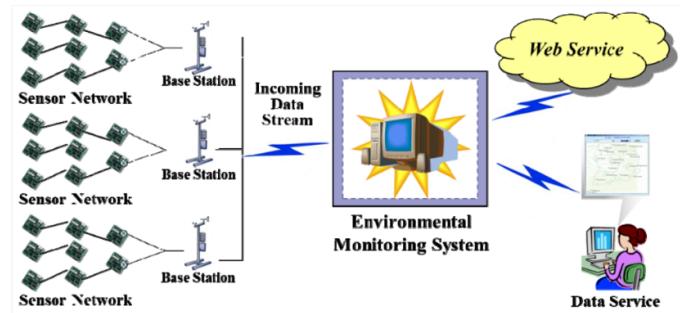


Figura 12: Visão genérica da aplicação de redes de sensores ao monitoramento ambiental. Reproduzido de [6].

### D. Implementação Típica

Os sensores foram organizados em uma grade fixa, permitindo identificar suas localizações espaciais. Essa organização facilita filtrar sensores irrelevantes antes de executar operações de junção, reduzindo o custo computacional [6]. A estação base concentra o armazenamento e o processamento, suportando consultas como:

- Retornar a temperatura média de todos os sensores no último mês;
- Retornar a temperatura na região A a cada dez minutos.

### E. Resultados

Dois métodos de inserção temporal foram propostos. O primeiro com inserção por segmento de tempo, armazenando intervalos correspondentes ao período em que um valor permanece constante. Já o segundo, com inserção por ponto

de tempo, registra apenas novos valores quando ocorrem mudanças [6].

Ambos reduziram em cerca de 30% o número de tuplas gerenciadas em comparação com um método ingênuo, diminuindo significativamente o tempo de consulta sem perda de informações. Essa otimização tem impacto direto em cenários ambientais críticos, nos quais consultas rápidas, como identificar regiões com aumento súbito de temperatura ou pressão atmosférica, são essenciais para a prevenção de desastres. Dessa forma, o sistema mostra-se adequado não apenas para armazenamento de longo prazo, mas também para análise em tempo real, conciliando escalabilidade e eficiência [6].

#### F. Conclusão

O trabalho demonstra que a gestão de dados é um elemento tão essencial quanto sensores e comunicação em redes ambientais. Ao reduzir custos de armazenamento e acelerar consultas, as técnicas propostas ampliam a escalabilidade dos sistemas de monitoramento, possibilitando análises históricas e em tempo real de forma mais robusta. Essa abordagem reforça a importância de integrar soluções de sensoriamento com arquiteturas otimizadas de processamento de dados.

Em síntese, o estudo evidencia que a verdadeira inteligência das redes de sensores ambientais não está apenas na coleta de dados, mas na sua gestão eficiente, capaz de transformar medições brutas em conhecimento acionável para a preservação ambiental.

## VII. CONCLUSÃO

As cinco aplicações analisadas evidenciam a versatilidade e o impacto das redes de sensores sem fio no monitoramento ambiental. No contexto de enchentes, a integração de transdutores de pressão, sensores ultrassônicos, sensores de umidade e técnicas de visão computacional possibilita o acompanhamento contínuo e a implementação de sistemas de alerta mais precisos.

Para a detecção de incêndios, arquiteturas em *clusters* que combinam sensores de temperatura, umidade, luminosidade e gases, aliadas a modelos de confiança e aprendizado de máquina, demonstram capacidade de reduzir falsos alarmes e acelerar a resposta em campo.

O rastreamento de vida selvagem, por sua vez, tem se beneficiado de tecnologias de longa distância como a *Sigfox*, que viabilizam o monitoramento de animais de diferentes portes por meio de dispositivos compactos equipados com GPS e sensores iniciais, alcançando grande cobertura com baixo consumo energético.

No caso do monitoramento da poluição atmosférica, a adoção de sensores de baixo custo, combinados a módulos de comunicação heterogêneos e algoritmos de previsão, amplia a densidade espacial da rede e antecipa informações relevantes para a população.

Finalmente, a gestão de dados espaciotemporais em redes ambientais, aplicada ao monitoramento meteorológico, demonstra que estratégias de banco de dados e processamento de fluxos são indispensáveis para consultas complexas e armazenamento otimizado.

De forma sintética, os resultados analisados confirmam que a eficácia das redes de sensores sem fio no monitoramento ambiental depende da integração de múltiplos elementos: diversidade de sensores, arquiteturas de comunicação adequadas ao alcance desejado, algoritmos de detecção e previsão robustos e mecanismos eficientes de gestão de dados. Os avanços em microcontroladores, tecnologias de comunicação e inteligência artificial vêm expandindo o potencial dessas redes, tornando-as ferramentas essenciais para cidades inteligentes, conservação ambiental e mitigação de desastres.

As futuras pesquisas devem aprofundar a interoperabilidade entre diferentes tecnologias, explorar soluções de autonomia energética para os nós e integrar plataformas de computação em borda, de modo a viabilizar processamento local e respostas em tempo quase real.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. B. B. P. N. V. Bilal Arshad, Robert Ogie and P. Perez, "Computer Vision and IoT-Based Sensors in Flood Monitoring and Mapping: A Systematic Review," *Sensors*, vol. 19, no. 22, p. 5012, 2019.
- [2] H. A. Alfarrar and M. H. Alsibai, "A Wireless Smart Sensor Network for Flood Management Optimization," *International Journal of Engineering Technology and Sciences*, vol. 7, no. 1, pp. 1–6, 2017.
- [3] Y. S. Ian F. Akyildiz, Weilian Su and E. Cayirci, "Wireless Sensor Networks: A Survey," *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [4] A. Z. Marco Centenaro, Lorenzo Vangelista and M. Zorzi, "Long-Range Communications in Unlicensed Bands: The Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 5, pp. 60–67, 2016.
- [5] J. J. P. R. F. A. S. Santiago Felici-Castell, Jaume Segura-Garcia and J. M. Alcaraz-Calero, "AI-IoT Low-Cost Pollution-Monitoring Sensor Network to Assist Citizens with Respiratory Problems," *Sensors*, vol. 23, no. 23, p. 9585, 2023.
- [6] T. H. N. V. Y. J. J. Su Wook Ha, Yang Koo Lee and K. H. Ryu, "An Environmental Monitoring System for Managing Spatiotemporal Sensor Data over Sensor Networks," *Sensors*, vol. 12, no. 4, pp. 3997–4015, 2012.
- [7] B. S. B. K. A. A. M. G. Tayyab Khan, Karan Singh and B. O. Soufiene, "Trust-Driven Approach to Enhance Early Forest Fire Detection Using Machine Learning," *Scientific Reports*, vol. 15, p. 14480, 2025.
- [8] P. V. G. H. N. R. B. V. J. C. K. D. K. N. D. W. R. J. P. N. L. T. V. T. G. R. W. H. K. M. A. D. M. W. K. W. F. R. K. V. O. E. M. M. Timm A. Wild, Louis van Schalkwyk and M. Wikelski, "A Multi-Species Evaluation of Digital Wildlife Monitoring Using the Sigfox IoT Network," *Animal Biotelemetry*, vol. 11, p. 13, 2023.
- [9] J. Morais, "O que é ESP8266 – A Família ESP e o NodeMCU," 2017, available online: <https://portal.vidadesilicio.com.br/o-que-e-esp8266-nodemcu/>.
- [10] Eletrogate, "Sensor Ultrassônico HC-sr04 com Arduino – Entenda e aprenda a usar," 2017, available online: <https://blog.eletrogate.com/sensor-ultrassonico-hc-sr04-com-arduino/>.
- [11] MFGRobots, "YF-s201 — Pinagem, recursos e aplicações do sensor de água de efeito Hall," 2018, available online: <https://pt.mfgrobots.com/mfg/it/1004029969.html>.
- [12] B. U. Dwi Novianto Nugroho, Arif Setiabudi and P. D. Widayaka, "Flood Notification System Using NodeMCU with Telegram Monitoring," *Indonesian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 9–12, 2023.
- [13] HWLibre, "Nano Arduino — Especificações, uso e projeto," 2018, available online: <https://pt.hwlibre.com/nano-arduino/>.
- [14] C. Batteries, "Baterias recarregáveis de íons de lítio — histórico, tipos e perguntas frequentes," 2024, available online: [pt.cmbatteries.com](https://pt.cmbatteries.com).
- [15] VladControl, "Arduino Avançado: nRF24L01 — funcionamento e uso prático," 2017, available online: <http://www.vladcontrol.com.br/arduino-avancado/nrf24l01/>.
- [16] A. Robótica, "Aprenda a utilizar o módulo GPS com Arduino," 2018, available online: <https://autocorerobotica.blog.br/aprenda-utilizar-o-modulo-gps-com-arduino/>.

- [17] A. . Cia, “Ligando acelerômetro mma7361 com Arduino,” 2017, available online: <https://arduinoecia.com.br/ligando-acelerometro-mma7361-arduino/>.
- [18] ——, “Sensor GY-80 para Arduino: acelerômetro, bússola e barômetro,” 2017, available online: <https://arduinoecia.com.br/sensor-gy-80-arduino-acelerometro-bussola-barometro/>.
- [19] VladControl, “Sensor DHT22 — temperatura e umidade com Arduino,” 2017, available online: <http://www.vladcontrol.com.br/sensores/dht22/>.
- [20] Xukyo, “Visão geral do microcontrolador NodeMCU ESP32,” 2024, available online: <https://www.aranacorp.com/pt/visao-geral-do-microcontrolador-nodemcu-esp32/>.
- [21] C. Electronics, “Pycom FiPy Overview,” 2022, available online: <https://core-electronics.com.au/guides/pycom-fipy-overview/>.
- [22] W. Electronics, “Integrated Gas Sensor Module ZPHS01B — Módulo multifunção para qualidade do ar,” 2021, available online: [https://www.winsentech.com/Integrated\\_Gas\\_Sensor\\_Module\\_ZPHS01B.html](https://www.winsentech.com/Integrated_Gas_Sensor_Module_ZPHS01B.html).
- [23] ArduinoOmega, “Interruptor Crepuscular e Indicação da Intensidade Luminosa com Arduino,” 2021, available online: <https://blog.arduinoomega.com/interruptor-crepuscular-e-indicacao-da-intensidade-luminosa-com-arduino/>.
- [24] Eletrogate, “Módulo Sensor de Som — descrição e aplicações,” 2022, available online: <https://blog.eletrogate.com/modulo-sensor-de-som-descricao-e-aplicacoes/>.