



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

KAIO DOS SANTOS SOBREIRA

O USO E APLICAÇÃO DE SENSORES BASEADOS EM ARDUINO PARA
ANÁLISES AMBIENTAIS MULTIPARAMÉTRICAS: UMA REVISÃO
BIBLIOMÉTRICA

FORTALEZA

2025

KAIO DOS SANTOS SOBREIRA

O USO E APLICAÇÃO DE SENSORES BASEADOS EM ARDUINO PARA ANÁLISES
AMBIENTAIS MULTIPARAMÉTRICAS: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

Monografia apresentada ao Curso de Ciências Ambientais do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Cientista Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Nuto Nóbrega

FORTALEZA

2025

Página reservada para ficha catalográfica.

Utilize a ferramenta *online* [Catalog!](#) para elaborar a ficha catalográfica de seu trabalho acadêmico, gerando-a em arquivo PDF, disponível para download e/ou impressão.

(<http://www.fichacatalografica.ufc.br/>)

KAIO DOS SANTOS SOBREIRA

O USO E APLICAÇÃO DE SENSORES BASEADOS EM ARDUINO PARA ANÁLISES
AMBIENTAIS MULTIPARAMÉTRICAS: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

Monografia apresentada ao Curso de Ciências Ambientais do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Cientista Ambiental.

Aprovada em: xx/xx/xxxx.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gabriel Nuto Nóbrega (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Rivelino Cavalcante
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Tommaso Giarrizzo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Natalia Beloto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Williams e Francisca.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais, que tanto fizeram por mim e nunca deixaram faltar nada em minha vida. Ao meu pai, que passou toda a sua vida trabalhando longe de casa, pelos diversos cantos deste país, com o objetivo de me educar. À minha mãe, pelo companheirismo, carinho e preocupação, por todas as noites em que orou pela minha vida e pelo meu sucesso. Ao meu irmão, por sempre me incentivar em tudo o que desejei fazer e por abrir o caminho que hoje percorro.

Aos meus amigos e familiares — Pedro Urano, Pedro Vitor, Dias, Elton, Matheus, Anny, Erica, Duarte, Baltazar, Angelo, Luis, Leo e Tonny — por todos os momentos vividos, pelos dias que compartilhamos, e por cada orientação e palavra que recebi de vocês.

Aos amigos da Cobio — Carol Matos, Giovanna, Carol Viana, Ruan, Nayrisson, Valdir, Thais, Camila, Lucas, Vanessa e Patrícia — por todos os dias que marcaram meu último ano de graduação, pelos ensinamentos, projetos, incentivos e elogios. A Carol Matos, Nayrisson e Ruan, minha gratidão especial: nunca conheci pessoas como vocês. Nossas conversas ficarão para sempre vivas em minha memória.

À banca examinadora, Dra. Natália por me incentivar a seguir nesse projeto, Prof. Dr. Rivelino, que me inseriu nesse universo ao professor Tommaso por se interessar em meus projetos desde o início.

À Natalia Beloto, por tudo o que me ensinou, pelas orientações e, especialmente, pela indicação ao professor Gabriel. Ao professor Gabriel Nuto, minha sincera admiração: ainda me surpreendo ao perceber que o senhor é real. Sua paciência, amizade e sabedoria foram um verdadeiro presente de Deus em minha vida. Tenho certeza de que seus filhos irão amá-lo incondicionalmente e se orgulharão profundamente do pai que têm.

Hoje, tenho plena certeza de que sou o homem mais sortudo do mundo. Tive sorte com meus pais, meus amigos, minha família e todos os amigos e colegas de profissão.

Também, presto meus agradecimentos ao INCT em Agricultura Sustentável no Semiárido Tropical-INCTAGriS (CNPq/Funcap/Capes), processos 406570/2022-1 (CNPq) e Processo INCT-35960-62747.65.95/51 (Funcap)

“O que observamos não é a própria natureza,
mas a natureza exposta ao nosso método de
questionamento.”

(HEISENBERG, 1958, p. 58)

RESUMO

O monitoramento ambiental multiparamétrico desempenha um papel essencial na gestão de recursos naturais e na mitigação de impactos ambientais. Com o avanço da tecnologia, sistemas baseados em Arduino têm se destacado como ferramentas acessíveis e versáteis para coleta de dados ambientais. Este trabalho tem como objetivo analisar a produção científica global relacionada à aplicação de sensores conectados a plataformas Arduino no monitoramento ambiental, utilizando técnicas de revisão bibliométrica para identificar tendências, lacunas e os principais atores envolvidos. A pesquisa foi conduzida por meio de uma busca sistematizada na base de dados Scopus, com foco em palavras-chave relacionadas a Arduino, sensores e monitoramento ambiental. Foram analisados 3.084 documentos, considerando aspectos como evolução temporal das publicações, países, autores, instituições e periódicos mais produtivos, além da análise de co-ocorrência de palavras-chave e redes de colaboração científica. Os resultados evidenciam o crescimento contínuo da temática, com um aumento significativo de publicações a partir de 2013 e pico em 2024, com mais de 869 artigos científicos e 2044 artigos de conferências publicados. Destacam-se os países asiáticos, com a Índia liderando a produção de artigos de conferência com 1004 publicações, seguida pela Indonésia com 194 e a Malásia com 120. A maior parte dos documentos analisados são artigos de conferência (cerca de 63%) com predominância da língua inglesa. Assim, sistemas baseados em Arduino representam uma alternativa promissora para aplicações ambientais, com vasto potencial de inovação e democratização tecnológica em contextos diversos.

Palavras-chave: monitoramento multiparamétrico; sensores de baixo custo; Internet das Coisas (IoT).

ABSTRACT

Multiparametric environmental monitoring plays a crucial role in the management of natural resources and the mitigation of environmental impacts. With technological advances, Arduino-based systems have emerged as accessible and versatile tools for environmental data collection. This study aims to analyze the global scientific production related to the application of sensors connected to Arduino platforms for environmental monitoring, using bibliometric review techniques to identify trends, gaps, and key actors involved in the field. The research was conducted through a systematic search in the Scopus database, focusing on keywords related to Arduino, sensors, and environmental monitoring. A total of 3,084 documents were analyzed, considering aspects such as the temporal evolution of publications, most productive countries, authors, institutions, and journals, as well as keyword co-occurrence and scientific collaboration networks. The results indicate continuous growth in the topic, with a significant increase in publications from 2013 onward and a peak in 2024, including over 869 scientific articles and 2,044 conference papers. Asian countries stand out, with India leading in conference papers (1,004), followed by Indonesia (194) and Malaysia (120). Most of the documents are conference papers (approximately 63%), and English is the predominant language. Therefore, Arduino-based systems represent a promising alternative for environmental applications, offering vast potential for innovation and technological democratization in diverse contexts.

Keywords: multiparameter monitoring; low-cost sensors; Internet of Things (IoT).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Placa Arduino UNO com microcontrolador convencional	19
Figura 2	– Sensor DS18B20 com circuito em pull-up	24
Figura 3	– Sensor DHT11 com placa adaptadora de conexões	26
Figura 4	– Método de medição analógico não convencional de nível d'água em tanques	27
Figura 5	– Diagrama de emissão de ondas de medição de distância do sensor HCSR04	28
Figura 6	– Uso do HCSR04 para monitoramento de nível d'água	29
Figura 7	– Papel Tornassol usado em análises de pH tradicionais	30
Figura 8	– Módulo de leitura pH-4502C e o eletrodo pH E201-C	30
Figura 9	– Gravity Analog Dissolved Oxygen sen0237-A	32
Figura 10	– Sensor de turbidez da água Gravity Analog Turbidity Sensor SEN0189	33
Figura 11	– Sensor Gravity Analog TDS Sensor com placa de conversão de sinal	35
Figura 12	– 18650 Battery Shield	39
Figura 13	– Data logger Shield com RTC DS1307	41
Figura 14	– Fluxograma de pares e transferências entre dispositivos	42

Figura 15	– Módulo Xbee com adaptação de cabo coaxial para antena RP-SMA	43
Figura 16	– Interface Arduino IDE	45
Figura 17	– Bloco de código na IDE	46
Figura 18	– Bloco de código sem o uso da biblioteca NewPing (A) e bloco de código utilizando a biblioteca NewPing (B)	47
Figura 19	– Bloco de código lúdico da plataforma Tinkercad	48
Figura 20	– Produção científica anual por país	56
Figura 21	– Distribuição de termos em bigramas por publicação	64
Figura 22	– Rede de co-ocorrência	65
Figura 23	– Rede de colaboração científica	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Produção científica por ano	54
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Conjunto de sensores químicos MQ e seus parâmetros de medição	36
Tabela 2	– Sensores de uso pontual e específico	38
Tabela 3	– Tipos de protocolo por par de conexão e alcance	43
Tabela 4	– Relação entre operador booleano e termos de busca	49
Tabela 5	– Distribuição de documentos por área temática	52
Tabela 6	– Número de documentos por tipo	53
Tabela 7	– Instituições com maior número de publicações e relevância	56
Tabela 8	– Fontes mais relevantes de publicações por número de documentos	57
Tabela 9	– Trabalhos mais relevantes por citações e área temática	59
Tabela 10	– Número de publicações por autor	62
Tabela 11	– Artigos com aplicação de tecnologias de refino	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PA	Placa de Arduino
PAs	Placas de Arduino
IoT	Internet of Things
AO	Saída analógica
DO	Saída digital
VCC	Alimentação
GND	Terra
pH	Potencial Hidrogeniônico
mV	Milivolt
MΩ	Mega Ohms
OD	Oxigênio Dissolvido
TSS	Sólidos Dissolvidos Suspensos
mA	Miliampere
V	Volt
ms	Milisegundo
NTU	Unidade Nefelométrica de Turbidez
TDS	Sólidos Dissolvidos Totais
AC	Corrente Alternada
DC	Corrente Contínua

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivos Gerais	16
2.2	Objetivos Específicos	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	Arduino como um sistema embarcado	17
3.2	Sensores: A interface com o meio físico	20
3.3	Componentes para análise ambiental usando Arduino	21
3.3.1	<i>Sensores de Temperatura e Umidade</i>	22
3.3.1.1	Sensores de Temperatura Isolados	22
3.3.1.2	Sensores de Umidade e Temperatura Conjugados	24
3.3.2	<i>Sensores de Distância</i>	25
3.3.3	<i>Analisadores de Fluidos</i>	28
3.3.3.1	Sensores de pH	28
3.3.3.2	Sensores Oxigênio Dissolvido	31
3.3.3.3	Sensor de Turbidez da Água	32
3.3.3.4	Sensores de Condutividade Elétrica	33
3.3.4	<i>Sensores de Gás</i>	34
3.3.5	<i>Sensores de uso pontual</i>	36
3.3.6	<i>Gestão Energética</i>	38
3.4	Armazenamento de dados, Marcadores Temporais e Telemetria	39
3.4.1	<i>Dataloggers e marcadores de tempo</i>	40
3.4.3	<i>Telemetria com Arduino</i>	41
3.4.3.1	Protocolos de Comunicação	42
3.5	Algoritmo e Auxílio a Programação	44
3.5.1	Linguagem de Programação	44
3.5.2	<i>Apoio à Programação</i>	46
4	MATERIAIS E MÉTODOS: ANÁLISE CIENCIOMÉTRICA	49
4.1	Delineamento da pesquisa	49
4.2	Estratégia de busca e seleção dos dados	49
4.3	Processamento e análise dos dados	50

4.4	Análise complementar dos sensores	50
4.5	Apresentação dos resultados	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1	Características das publicações científicas	52
5.2	Evolução temporal e produção por países	53
5.3	Relevância de fontes, publicações e pesquisadores	56
5.4	Rede de colaboração científica	63
5.5	Termos e rede de co-ocorrência	64
5.6	Avanços na temática	66
5.7	Perspectivas Futuras	70
6	CONCLUSÃO	72
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

A aquisição de dados em projetos científicos e industriais foi, por muito tempo, dependente de sistemas de hardware e software proprietários. Essa dependência gera altos custos relacionados à importação, ao pagamento de royalties e à necessidade de manutenção especializada, limitando a democratização do monitoramento ambiental (Schmidt, 2015). Com o surgimento de plataformas de código aberto, como o Arduino, tornou-se possível desenvolver soluções acessíveis para prototipagem eletrônica, integrando sensores, atuadores e sistemas de coleta de dados de maneira simples e eficaz em sistemas agrícolas (Mohankumar e Gowtham, 2024; Ardiansah et al., 2020; Pane et al., 2025), em estudo ecológicos (Lewis et al., 2016; Ferdoush e Li, 2014), em áreas de mineração (Jo et al., 2017; Kim et al., 2020), oceanografia física, entre outros.

Empresas como Arduino e Espressif Systems contribuíram para essa transformação ao disponibilizarem microcontroladores versáteis e de baixo custo, capazes de realizar medições em tempo real (Kim et al., 2020; Priyadarsini et al., 2018). Uma única placa Arduino pode ser equipada com sensores diversos, permitindo o monitoramento de parâmetros como pH da água, temperatura da água, temperatura do ar, umidade do ar, umidade do solo, radiação solar, turbidez e nível d'água (Farouk et al., 2023; Havlik et al., 2022; Méndez-Barroso et al., 2020). Além disso, essas plataformas oferecem suporte à integração com módulos de comunicação sem fio, facilitando o envio remoto de dados e reduzindo a necessidade de intervenção humana em regiões de difícil acesso (Farouk et al., 2023; Havlik et al., 2022, Ferdoush et al., 2014).

Estudos demonstram que, apesar de apresentarem menor precisão que sensores laboratoriais de alta performance, os sensores utilizados com Arduino oferecem resultados comparáveis em aplicações práticas de campo, especialmente quando se busca um equilíbrio entre custo, viabilidade técnica, potência e funcionalidade. Essa abordagem se mostra particularmente relevante para o monitoramento ambiental em unidades de conservação — áreas que demandam vigilância constante, mas frequentemente enfrentam limitações orçamentárias e operacionais.

Dessa forma, a adoção de tecnologias alternativas e de baixo custo, como os sensores conectados a plataformas abertas, representa uma estratégia promissora para ampliar a capacidade técnica de instituições de ensino, órgãos ambientais e projetos de pesquisa. Além de facilitar a coleta de dados, essas ferramentas incentivam a formação prática de estudantes e fomentam a inovação nas ciências ambientais. Neste sentido, este trabalho teve por objetivo

avaliar a produção científica publicada com o uso de arduínos para monitoramento ambiental, por meio de uma análise cienciométrica, visando identificar lacunas e oportunidades para o desenvolvimento novos produtos e substituição de equipamentos obsoletos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

- Analisar a produção científica global referente à aplicação de sistemas baseados em Arduino no monitoramento ambiental, por meio de uma análise bibliométrica, a fim de identificar tendências, lacunas e os principais atores (autores, instituições e periódicos) neste campo de pesquisa.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar e descrever o funcionamento dos sensores comumente utilizados em sistemas Arduino.
- Identificar e selecionar a produção científica relevante em bases de dados bibliográficas utilizando uma estratégia de busca sistematizada com palavras-chave pertinentes a Arduino, monitoramento ambiental e termos relacionados.
- Caracterizar o perfil da produção científica, analisando a evolução temporal do número de publicações, os tipos de documentos (artigos, trabalhos de conferência, etc.), e as línguas predominantes.
- Mapear as principais áreas de aplicação e tendências temáticas dos sistemas de Arduino no monitoramento ambiental, por meio da análise de co-ocorrência de palavras-chave e do conteúdo dos resumos e títulos.
- Identificar os autores, instituições e periódicos mais produtivos e influentes no campo, analisando suas redes de colaboração.
- Detectar lacunas e oportunidades de pesquisa na literatura existente, sugerindo direções para estudos futuros e aplicações inovadoras de sistemas baseados em Arduino para desafios ambientais.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Arduino como um sistema embarcado

Os sistemas embarcados são definidos como computadores especializados, projetados para executar uma ou poucas funções dedicadas, inseridos em um sistema maior e frequentemente operando sob restrições rigorosas de custo, tamanho, potência e recursos computacionais (Vahid e Givargis, 2001). Sua principal característica reside na capacidade de interagir diretamente com o mundo físico, coletando dados por meio de sensores e controle de atuadores para influenciar o ambiente, muitas vezes exigindo respostas em tempo real (Marwedel, 2021; Mendez-Barroso et al., 2020). Exemplos cotidianos abrangem desde eletrodomésticos, como máquinas de lavar e micro-ondas, até sistemas automotivos, dispositivos médicos e infraestruturas industriais, demonstrando a ubiquidade e a diversidade dessas soluções computacionais dedicadas (Marwedel, 2021; Bhunia e Tehranipoor, 2018).

Nesse contexto, o Arduino emerge como uma plataforma de hardware e software livre que se alinha perfeitamente à concepção de sistema embarcado, especialmente para fins de prototipagem e desenvolvimento de projetos eletrônicos interativos (Monk, 2012). Desde sua concepção na Itália, o Arduino (www.arduino.cc) foi idealizado para simplificar o acesso à eletrônica e à programação para designers, artistas e entusiastas, democratizando a criação de dispositivos que interagem com o mundo físico (Banzi; Shiloh, 2022).

Uma placa Arduino, como o popular Arduino Uno, é construída em torno de um microcontrolador (por exemplo, o ATmega328; Figura 1), que atua como o "cérebro" do sistema. Esse componente opera com base na arquitetura AVR RISC, que é um tipo de arquitetura de processador baseada em um conjunto reduzido de instruções (*Reduced Instruction Set Computing*) e barramentos separados para dados e programas. A família AVR é explicitamente descrita como baseada na arquitetura RISC aprimorada, sendo capaz de executar a maioria das instruções em um único ciclo de clock, o que permite desempenhos da ordem de 1 MIPS por MHz (Atmel, 2025; Pereira et al., 2022).

Além disso, o modelo Harvard adotado assegura a separação física entre os barramentos de código e dados, viabilizando a pré-busca de instruções enquanto outras são executadas simultaneamente — característica que favorece a implementação de pipelines de instruções, mesmo em microcontroladores de 8 bits. Essa sobreposição de fases ("fetch" e "execute") contribui para o aumento da eficiência computacional, fundamental em sistemas embarcados com recursos limitados.

A filosofia RISC, projetada para instruções simples e rápidas, prioriza a eficiência do hardware e a previsibilidade temporal, aspectos especialmente úteis para aplicações

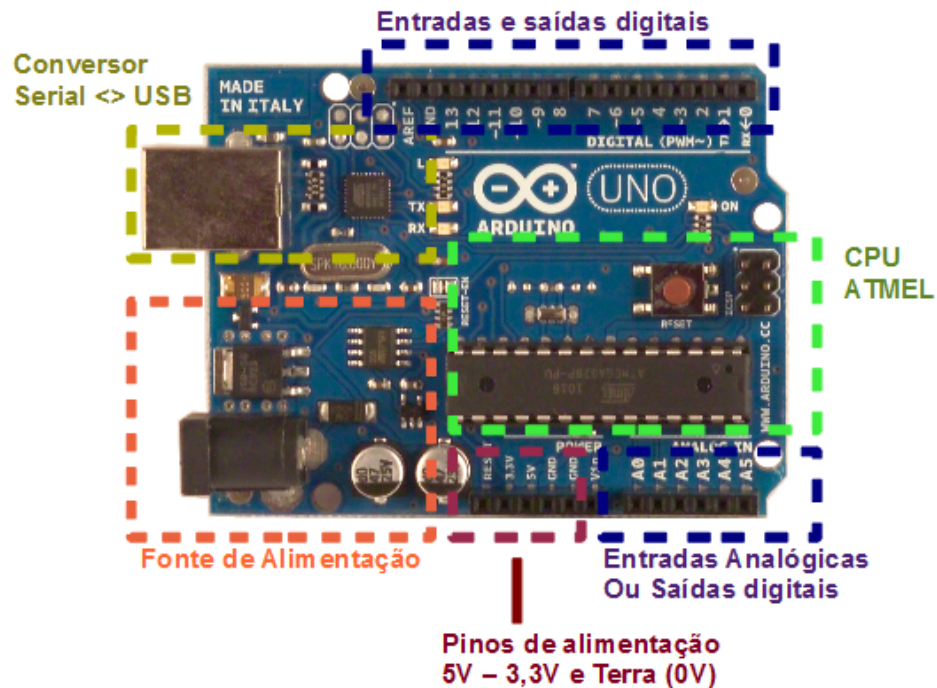
embarcadas que exigem resposta em tempo real (Patterson; Hennessy, 2016). Em microcontroladores como o ATmega328, essa abordagem resulta em processos determinísticos e energeticamente eficientes, tornando-os ideais para plataformas como o Arduino, voltadas à coleta de dados ambientais e automação de baixo custo.

Assim, o Arduino é um sistema embarcado dedicado à medida que é configurado para uma aplicação particular, como a coleta de dados de umidade do solo ou a medição da qualidade do ar. Além do modelo original criado pela Arduino em 2005, diversos protótipos alternativos ganharam destaque, visando reduzir custos e ampliar a acessibilidade da plataforma. Dispositivos como o Arduino Uno, Mega, Nano, LilyPad e versões genéricas compartilham arquiteturas de hardware e microeletrônica similares, adaptadas a diferentes aplicações e faixas de custo (Banzi; Shiloh, 2022). Esse ecossistema de placas de código aberto facilitou não apenas o uso de sensores e atuadores, mas também o aperfeiçoamento técnico por meio da documentação pública e da comunidade de desenvolvedores (Monk, 2012).

Conseqüentemente, variáveis de complexidade podem ser ajustadas conforme o nível de abstração desejado: desde modificações em nível microeletrônico, como alteração de componentes internos e personalização de placa, até abordagens mais elevadas, com interface gráfica e bibliotecas de alto nível. A natureza aberta do Arduino permite aos usuários consultarem diagramas elétricos e datasheets dos microcontroladores e sensores, permitindo a criação de sistemas próprios, com componentes de terceiros, cristais de oscilação, reguladores, trilhas de cobre, entre outros.

Essa flexibilidade técnica também possibilita a replicação rápida, por meio de processos como Burning the Bootloader ou chip cloning, utilizando ferramentas como a IDE Arduino. Tais métodos viabilizam a padronização de milhares de unidades com um único projeto, promovendo escalabilidade e autonomia tecnológica para projetos experimentais e educacionais. A figura 1 ilustra uma placa de Arduino UNO com o microcontrolador da Atmel.

Figura 1 – Placa Arduino UNO com microcontrolador convencional.



Fonte: IFSC (2022).

A capacidade do Arduino de operar como um sistema embarcado é amplificada por sua flexibilidade e pela riqueza de suas interfaces de entrada/saída (Blackstock et al., 2019). Ele permite a conexão direta com uma vasta gama de sensores (temperatura, umidade, luminosidade, gases, etc.) para captar informações do ambiente e com atuadores (relés, LEDs, motores) para executar ações (Blackstock et al., 2019). A programação é realizada em uma linguagem simplificada, baseada em C/C++, por meio de um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE), o que facilita o processo de desenvolvimento e depuração do código que será carregado no microcontrolador (Cavalcante et al., 2011). Além disso, as diversas opções de comunicação (Serial, I2C, SPI) e a integração com módulos de conectividade (Wi-Fi, Bluetooth, LoRa) permitem que os sistemas baseados em Arduino transmitam dados para outras plataformas, como a nuvem, ou se comuniquem com outros dispositivos, estabelecendo as bases para aplicações de Internet das Coisas (IoT) no monitoramento (Prakash et al., 2023).

As vantagens do Arduino para o desenvolvimento de sistemas embarcados são notáveis, especialmente em ambientes de pesquisa e prototipagem. Seu baixo custo e ampla disponibilidade o tornam acessível para estudantes e pesquisadores, enquanto a robusta comunidade de usuários e a vasta quantidade de tutoriais, bibliotecas e exemplos online aceleram a curva de aprendizado e o processo de desenvolvimento (Cavalcante et al., 2011;

Blackstock et al., 2019). Essa facilidade permite a prototipagem rápida de soluções complexas de monitoramento ambiental, testando ideias e conceitos antes de se investir em soluções mais dispendiosas ou personalizadas.

Contudo, é importante reconhecer que, embora versátil, o Arduino pode apresentar limitações para aplicações que exigem performance computacional extrema, gerenciamento de energia altamente otimizado ou resposta em tempo real estrito (*hard real-time*), cenários nos quais microcontroladores industriais ou plataformas embarcadas mais avançadas podem ser mais adequados. No contexto do monitoramento ambiental, um sistema embarcado com Arduino tipicamente integra a placa (Uno, Mega, ou ESP32/ESP8266 para conectividade), sensores específicos para as variáveis a serem monitoradas, módulos de comunicação para transmissão de dados, e, em alguns casos, fontes de energia autônomas como baterias ou painéis solares para operação remota (Blackstock et al., 2019).

3.2 Sensores: A interface com o meio físico

Os sensores constituem a espinha dorsal de qualquer sistema de monitoramento, funcionando como a interface essencial entre o ambiente físico e o sistema eletrônico de processamento de dados. Em sua essência, um sensor é um dispositivo capaz de detectar e responder a um tipo específico de estímulo físico do ambiente, seja ele luz, calor, movimento, pressão, gases, umidade, ou outras grandezas, e converter essa informação em um sinal elétrico que pode ser lido, interpretado e processado por um sistema eletrônico ou computacional (Méndez-Barroso et al., 2020). Essa capacidade de traduzir fenômenos do mundo real em dados quantificáveis é o que permite que sistemas como os baseados em Arduino possam “perceber” as condições ao seu redor e, conseqüentemente, realizar o monitoramento ambiental (Méndez-Barroso et al., 2020; Droujko et al., 2023; Kelley et al., 2014; Blackstock et al., 2019; Dominguez-Brito et al., 2020)

A relevância dos sensores no contexto do monitoramento ambiental é inquestionável. Eles permitem a coleta contínua e em tempo real de parâmetros cruciais para a avaliação da saúde de ecossistemas, o controle de poluição, a agricultura de precisão, a previsão meteorológica, e a gestão de recursos hídricos, entre outros (Méndez-Barroso et al., 2020; Droujko et al., 2023; Kelley et al., 2014; Blackstock et al., 2019; Dominguez-Brito et al., 2020). A seleção do sensor adequado é um passo crítico no design de qualquer sistema de monitoramento, pois a precisão, a faixa de medição, a sensibilidade, a estabilidade e a durabilidade do sensor influenciam diretamente a qualidade e a confiabilidade dos dados coletados (Méndez-Barroso et al., 2020; Droujko et al., 2023).

O funcionamento geral de um sensor envolve um transdutor que converte a energia do fenômeno físico em um sinal elétrico, que pode ser uma variação de voltagem, corrente, resistência ou capacitância. Esse sinal elétrico é então tipicamente condicionado, amplificado, filtrado ou convertido de analógico para digital, para que possa ser lido e interpretado por um microcontrolador, como os presentes nas placas Arduino (Pallás-Areny e Webster, 2012).

A integração de sensores com plataformas de microcontroladores é facilitada por interfaces padronizadas (como I2C, SPI, ou entradas analógicas/digitais), permitindo que os dados sejam facilmente adquiridos e processados para análise, armazenamento ou transmissão. Essa modularidade e a vasta disponibilidade de bibliotecas de software específicas para cada tipo de sensor simplificam o desenvolvimento de sistemas de monitoramento complexos e personalizados (Pallás-Areny e Webster, 2012).

Para garantir a confiabilidade dos dados de monitoramento, aspectos como a calibração periódica dos sensores e a compreensão de suas limitações são fundamentais. Sensores podem ser suscetíveis a ruídos, desvio (drift) ao longo do tempo, e influências de fatores ambientais não-alvo, o que pode comprometer a precisão das medições. Portanto, a implementação de técnicas de compensação, redundância de sensores e algoritmos de processamento de sinal robustos são práticas comuns para mitigar essas questões e assegurar que os dados reflitam com fidelidade as condições ambientais monitoradas. A evolução contínua da tecnologia de sensores, incluindo o desenvolvimento de sensores inteligentes com maior capacidade de processamento embarcado e conectividade, promete sistemas de monitoramento cada vez mais eficientes e autônomos para os desafios ambientais futuros (Pallás-Areny e Webster, 2012).

3.3 Componentes para análise ambiental usando Arduino

A plataforma Arduino é compatível com uma ampla variedade de componentes eletrônicos voltados para medições ambientais, sendo muitos deles desenvolvidos especificamente para a plataforma e outros adaptados a partir de circuitos convencionais. A flexibilidade do microcontrolador permite sua integração com diferentes sensores e atuadores, atendendo a diversas aplicações no campo ambiental.

Dentre os sensores físicos mais utilizados, destacam-se os que realizam medições de temperatura, umidade, condutividade elétrica, turbidez e altura da maré ou distância. Já entre os sensores químicos, encontram-se exemplares destinados à medição de pH, concentração de gases e oxigênio dissolvido (Kelley et al., 2014; Dominguez-brito et al., 2020; Hong et al., 2021; Sharipov et al., 2025; Hilal et al., 2022).

Além da coleta de dados, a transmissão da informação é essencial para sistemas distribuídos ou de difícil acesso. Nesse contexto, módulos de comunicação são utilizados conforme a infraestrutura disponível: Wi-Fi (em placas como ESP32 ou ESP8266) para redes locais; LoRa para comunicação de longa distância e baixo consumo energético; GSM/GPRS para envio de dados via telefonia celular; Bluetooth para conexões de curto alcance; e Ethernet para sistemas cabeados mais estáveis (Chataut et al., 2023).

A alimentação do sistema, especialmente em ambientes remotos, é garantida por baterias recarregáveis (LiPo ou Li-ion), sendo possível estender a autonomia com o uso de painéis solares. Esses painéis recarregam as baterias durante o dia, tornando o sistema energeticamente autossuficiente. Para isso, são empregados circuitos de gerenciamento de carga, como controladores solares e reguladores de tensão, que otimizam o consumo e prolongam a vida útil dos componentes eletrônicos (Pereira; Ramos, 2022).

Para prevenir a perda de dados por falhas de energia ou conexão, é comum o uso de módulos de armazenamento local, como leitores de cartão SD. Esses dispositivos registram as informações coletadas e permitem sua posterior recuperação (Chataut et al., 2023). Finalmente, o uso de invólucros resistentes a intempéries é fundamental para assegurar a durabilidade e a operação confiável do sistema em ambientes externos (Santos et al., 2022).

3.3.1 Sensores de Temperatura e Umidade

Os sensores de temperatura e umidade são utilizados de forma isolada, como uma sonda ou componente de circuito individual, ou de forma conjugada a depender da aplicação ou metodologia utilizada no monitoramento sistêmico. Assim, é possível dispor sensores isolados na porção aquática do meio, bem como utilizar separadamente para análise do compartimento atmosférico (Dominguez-brito et al., 2020; Hilal et al., 2022).

3.3.1.1 Sensores de Temperatura Isolados

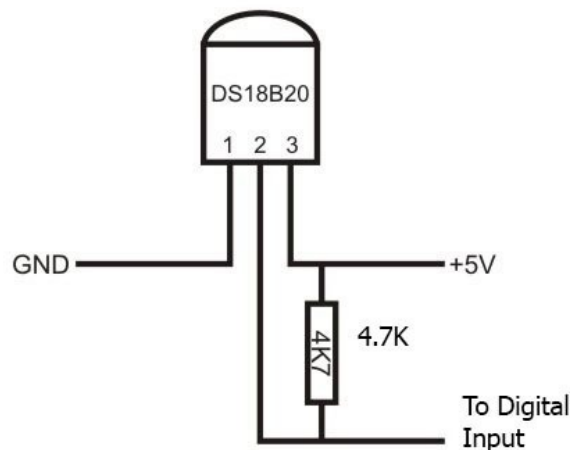
Os componentes capazes de realizar análises de temperatura de forma isolada estão disponíveis para os três compartimentos ambientais (água, solo e ar), havendo ampla diversidade de exemplares. Parte desses dispositivos são comumente conhecidos por LM35DZ, com variações como LM335 e LM34, TMP36, LM75, DS18B20, MCP9808, MLX90614 GY-906 e sensores baseados em NTC (*Negative Temperature Coefficient*). A aplicação de cada componente em relação ao compartimento ambiental varia de acordo com o seu invólucro, podendo ser adaptado para ambientes aquáticos por meio de encapsulamento estanque com resinas ou metais de sacrifício, acoplados a carcaças metálicas ou plásticas para

análises atmosféricas, bem como utilizados de forma livre e exposta para monitoramento térmico no solo (Schwambach et al., 2023). Esses sensores se diferenciam quanto à precisão, faixa de operação, tempo de resposta e protocolo de comunicação, o que permite ao projetista selecionar o modelo mais adequado à realidade do experimento ou aplicação ambiental.

Ainda, dos sensores de melhor custo benefício, o DS18B20 da Dallas Semiconductor em sua forma de sonda, ambos os sensores medem em faixas de -55°C até $+125^{\circ}\text{C}$ com resolução de pelo menos <750 ms, contudo, a sonda é reforçada com cabo emborrachado e com um corpo de aço inoxidável, garantindo a homogeneidade térmica do corpo metálico e sua respectiva medição.

O DS18B20 é fabricado com o protocolo de comunicação *1-Wire*, que permite a transmissão e conexão da saída lógica por um único fio. Desse modo, para garantir a correta leitura dos dados, é necessário confeccionar um circuito *pull-up* (figura 2), que consiste em ligar um resistor entre a linha de dados e a tensão positiva de alimentação (geralmente 5V). Esse resistor mantém a linha em nível lógico alto quando o barramento não está sendo ativamente puxado para baixo pelo sensor ou pelo microcontrolador, assegurando estabilidade no sinal e prevenindo leituras incorretas devido a flutuações indesejadas.

Figura 2 – Sensor DS18B20 com circuito em *pull-up*.



Fonte: Raisa (2022).

Além do uso do circuito em *pull-up*, boa parte dos sensores de temperatura funcionam em dois métodos de medição, sendo chamados de método por deflexão e por compensação. (Skultety, 2018). No caso do DS18B20, além do uso do protocolo *1-wire* e circuito em *pull-up*, o sensor funciona com a variação de temperatura por compensação, em que o

microcontrolador, junto a ponte de *Wheatstone* realiza a emissão de corrente controlada e contínua e monitora sua variação em relação ao material do ponteiro físico do sensor, dada sua variação é possível monitorar a variação de temperatura do meio e aferir medidas exatas (Skultety, 2018).

No caso de sensores como o LM35DZ e suas variações, é comumente utilizado o princípio baseado na variação linear da tensão de saída com a temperatura, operando por meio da dissipação térmica direta em semicondutores sensíveis (Horowitz, 2015). Já os sensores NTC (Negative Temperature Coefficient) e PTC (Positive Temperature Coefficient) funcionam a partir da variação da resistividade elétrica em resposta à temperatura, sendo classificados como termistores. Esses componentes integram circuitos com corrente contínua e respondem à temperatura com mudança na resistência, o que permite seu uso em diversas aplicações ambientais e industriais.

O método de deflexão térmica adotado por esses dispositivos têm semelhanças com o funcionamento de termômetros analógicos de mercúrio ou álcool, nos quais há expansão ou contração de um fluido em um tubo capilar transparente, em resposta direta à variação de temperatura no ambiente. Ainda que os sensores eletrônicos adotem mecanismos distintos, baseados em propriedades elétricas de materiais, o princípio físico subjacente é o mesmo: a conversão da variação térmica em uma grandeza mensurável.

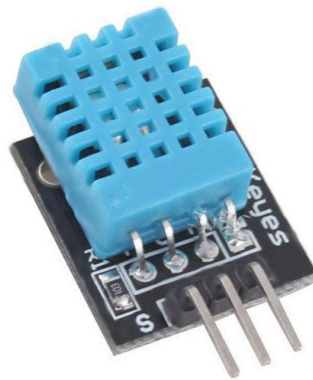
3.3.1.2 Sensores de Umidade e Temperatura Conjugados

Sensores de umidade necessitam do apoio de analisadores de temperatura, pois a capacidade do ar ou do solo de reter umidade depende diretamente da temperatura ambiente. Isso ocorre porque o ar mais quente consegue armazenar mais vapor de água, alterando a leitura da umidade relativa, que é uma função da razão entre a quantidade de vapor presente e o máximo que poderia estar presente naquela temperatura específica. Assim, a leitura da umidade sem a correção ou conhecimento da temperatura pode levar a interpretações equivocadas sobre as condições ambientais.

No monitoramento do solo, a análise exclusiva da umidade relativa é realizada por sensores como YL-69, HL-69 e FC-28, que consistem em sondas metálicas que medem a resistência elétrica entre dois pólos. Quanto maior a umidade no solo, menor a resistência elétrica entre as hastes. O sinal é então enviado a um comparador como o LM393, que converte o valor analógico para um nível digital interpretável pelo microcontrolador (Singh et al., 2016).

Em relação aos sensores combinados de umidade e temperatura para uso atmosférico, destacam-se modelos como DHT11, DHT22, GY-213V HDC1080, SHT31 e BME280. O DHT11, demonstrado na figura 3, por exemplo, monitora a temperatura na faixa de 0°C a 50°C e umidade relativa entre 20% e 90%, com precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$ e $\pm 1\%$ sob alimentação de 5V. Já sensores como o SHT31 oferecem maior precisão e estabilidade em medições ambientais críticas, com margens de erro inferiores a 1%, sendo utilizados em projetos com alto controle de qualidade e calibração contínua (Ada, 2025).

Figura 3 – Sensor DHT11 com placa adaptadora de conexões.



Fonte: Dangrach (2021).

De forma simplificada, os sensores de umidade, e os conjugados aos de temperatura, funcionam essencialmente por três métodos, sendo eles a medição da variação da resistividade, da capacitância ou pela atenuação de micro-ondas. No caso da resistividade e da capacitância, o sensor costuma possuir um objeto interno feito de material higroscópico, que costuma agregar gotículas de água suspensas no ar, assim variando sua resistividade ou capacitância e variando a corrente emitida no circuito (Dangrach, 2021).

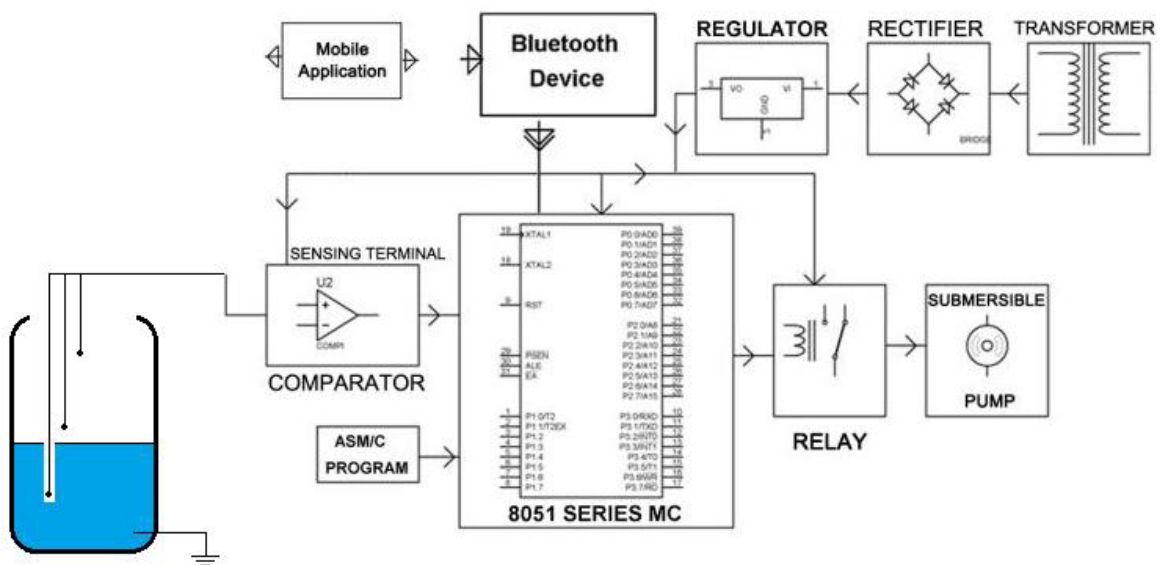
3.3.2 Sensores de Distância

Os sensores de distância são comumente utilizados para medir deslocamentos de objetos ou como uma forma primitiva de visão computacional, como uma alternativa ao uso de câmeras e bibliotecas baseadas em Python. Ainda, existe uma utilização menos convencional e que contorna um problema existente em outro tipo de sensor, o caso se dá pelos atuadores que funcionam como “ladrão” de reservatórios domésticos ou industriais de água, como tanques e caixas d’água. Nesse sentido, os atuadores funcionam como uma alavanca ou “interruptor”, em que o nível da água tem uma delimitação máxima e se utiliza

desses mecanismos para a abertura de comportas ou tubos de extravasamento de líquidos, como ilustrado na figura 4.

Contudo, esse tipo de abordagem não permite o monitoramento variável do nível de líquidos, já que sua atuação ocorre em um limite esperado. Para contornar isso, é possível utilizar sensores de distância para medir a variação de uma superfície líquida, espelho d'água ou camada limite da coluna d'água.

Figura 4 – Método de medição analógico não convencional de nível d'água em tanques



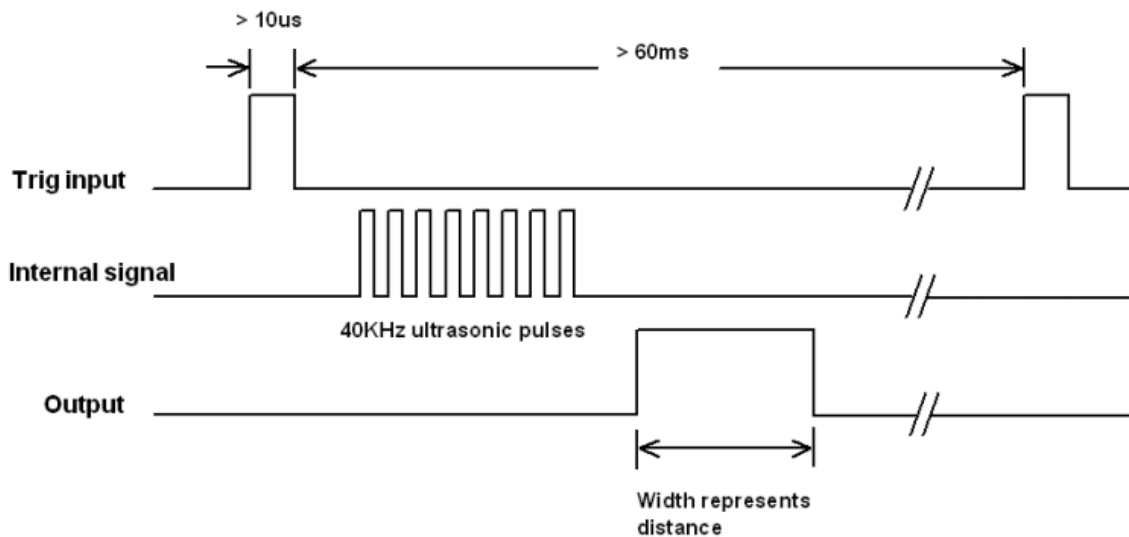
Fonte Gowri (2015).

Desse modo, para medir os diferentes níveis de altura do mar é preciso considerar a camada limite da coluna d'água como um corpo pontual. Assim, é possível utilizar um sensor que faça medidas de uma superfície em constante movimento e com certa transparência. Dessa forma, sensores baseados em medições em infravermelho ou em sistemas de interrupção de luz são descartados. Desse modo, o sensor HCSR04 se enquadra como o componente com melhor aplicabilidade e custo, este sensor mede a distância de um corpo por meio de ondas de ultrassom, garantindo que mesmo corpos translúcidos como a água possam ser monitorados, diferente de outros modelos de sensores que utilizam infravermelho ou desarme mecânico.

Por ser um sensor que utiliza o som como instrumento de medida de distância e não a luz, como é de costume, é necessário aplicar um cálculo lógico para converter as medidas mecânicas em saídas digitais e numéricas que façam equivalência a distância de um ponto a

outro. Assim, o fabricante do componente disponibiliza no “Datasheet” o diagrama de tempo que deve ser seguido para evitar medidas imprecisas. Assim, a figura 5 demonstra o diagrama de emissão de ondas de medição de distância e seus intervalos.

Figura 5 – Diagrama de emissão de ondas de medição de distância do sensor HCSR04.

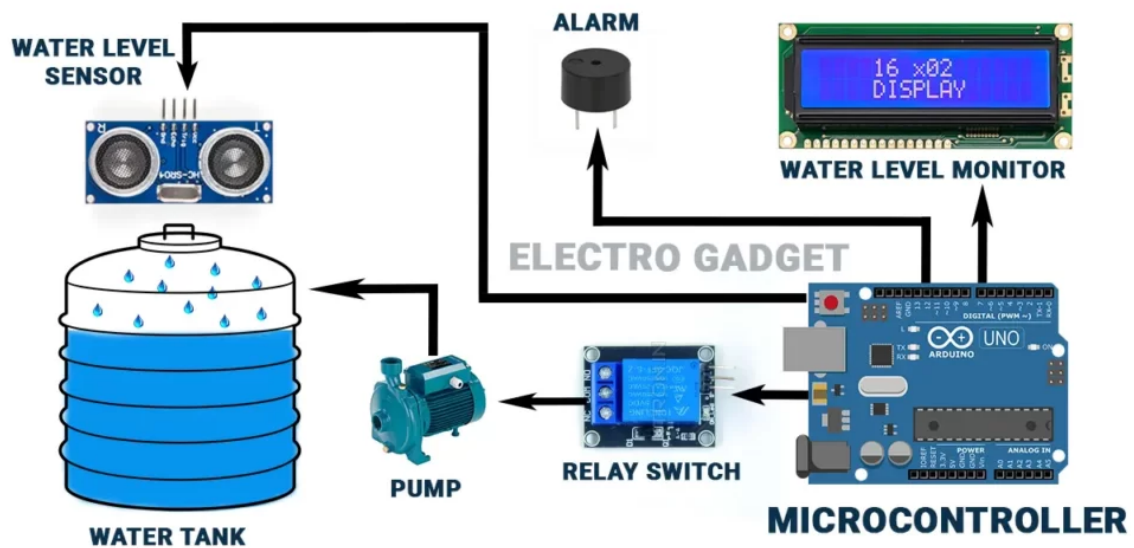


Fonte Sharma (2020).

Dessa maneira, o microcontrolador da PA fornece uma corrente de 5v para o sensor que inicialmente é estabilizado em *HIGH*, em seguida, o controlador, a depender da lógica, pode interferir no estado do sensor, trocando seu estado de *HIGH* para *LOW*, fazendo com que o primeiro sensor de gatilho emita uma onda com frequência que seja pelo menos superior a $10\mu s$, logo em seguida, o controlador da PA emite 8 pulsos de pelo menos 40 KHz, por fim, o leitor, ou a parte do sensor responsável por receber os pulsos refletidos no corpo entra em estado *HIGH* e libera a entrada da onda mecânica no diafragma do sensor, o que corresponde a distância do corpo até o sensor e assim termina o ciclo.

Assim, cada ciclo deve respeitar o intervalo de 60 ms, o que faz a resolução temporal do HCSR04 se manter em níveis de pelo menos 60 ms de cadência entre uma medição ou ciclo. Além do diagrama de tempo, o sensor possui margem de erro de 3 mm, com uma faixa de medição entre o mínimo de 4 cm e máximo de 400 cm. Desse modo, pelo seu funcionamento não necessitar de grandes instruções ou metodologia complexa, é possível utilizar o sensor HCSR04 como instrumento de medição de nível d'água e não somente como de distância, como é tradicionalmente feito, como ilustrado na figura 6.

Figura 6 – Uso do HCSR04 para monitoramento de nível d 'água.



Fonte Kundu (2025).

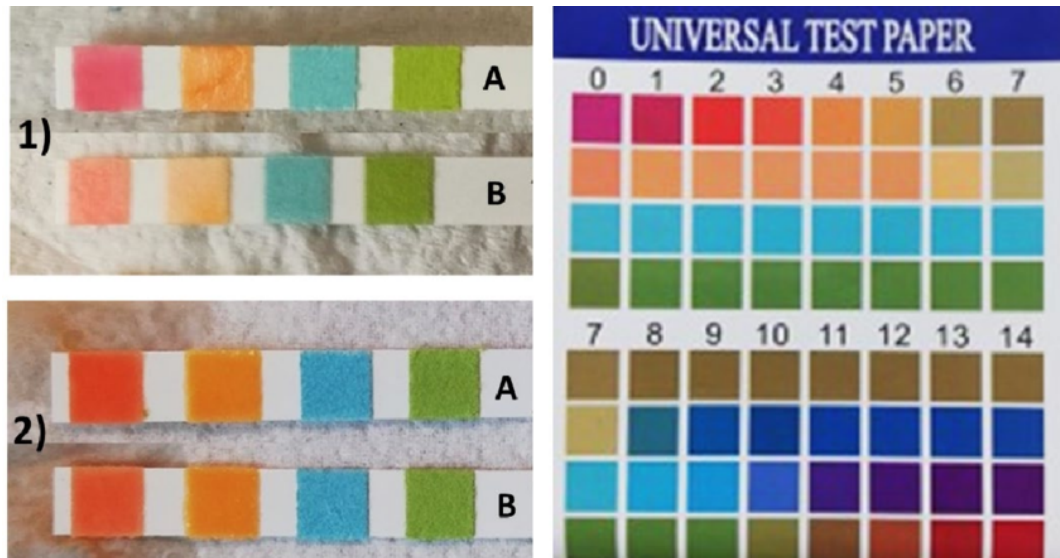
3.3.3 Analisadores de Fluidos

A análise de fluidos se restringe a parâmetros que podem ser contabilizados em análises contínuas e sem a necessidade de métodos laboratoriais, no sentido de serem aferidos pela microeletrônica, alguns dados, como DBO e DQO de efluentes líquidos fogem dessa possibilidade. Desse modo, é possível realizar medições, de líquidos, em relação a condutividade elétrica do meio, pH, oxigênio dissolvido e turbidez da água, além dos parâmetros supracitados. A porção atmosférica é contemplada por uma diversidade maior de sensores. Assim, é possível realizar medidas de diversos gases, bem como temperatura e umidade.

3.3.3.1 Sensores de pH

O uso de sensores de pH se fazem necessários quando o estudo necessita da análise do potencial hidrogeniônico do meio, isto é, da concentração de íons H^+ da amostra ou ambiente analisado. Desse modo, um dos métodos tradicionais de análise de pH se dava pelo uso de um pequeno sistema analógico de medição, que necessitava apenas da amostra, de um reagente artificial, como a fenolftaleína, timolftaleína, alaranjado de metila, azul de bromotimol e de um papel tornassol para identificação dos níveis de pH da amostra em relação a uma escala de cores (figura 7) (Gomes, 2020).

Figura 7 – Papel Tornassol usado em análises de pH tradicionais.



Fonte: Orazi (2023).

Com o avanço das técnicas de análises laboratoriais e com o desenvolvimento de técnicas eletroanalíticas, foi possível a criação de instrumentos mais precisos para análise desse parâmetro. Assim, a partir da técnica de potenciometria, foram adaptados sensores que mediam o pH de uma amostra com apenas um único eletrodo de vidro, variando apenas seu formato, podendo ser esférico, cilíndrico, cônico ou plano (Neto, 2021).

Nesse sentido, para confecção de sensores de pH compatíveis com a plataforma Arduino, foram desenvolvidos circuitos análogos aos sistemas de potenciometria dos métodos eletroanalíticos, porém condensados em um único sistema e com apenas um eletrodo de análise. Dessa forma, é comum a utilização de dois componentes para efetuar análises de potencial hidrogeniônico, sendo o módulo de leitura pH-4502C e o eletrodo pH E201-C como ilustrado na figura 8.

Figura 8 – Módulo de leitura pH-4502C e o eletrodo pH E201-C.



Fonte: Putra (2024)

O módulo PH-4502C, quando utilizado em conjunto com o eletrodo E201-C, forma um sistema acessível e funcional para a medição do potencial hidrogeniônico (pH) de soluções aquosas. Este sistema é amplamente adotado em aplicações com microcontroladores como o Arduino, em especial pela simplicidade de conexão, baixo custo e resposta confiável em condições ambientais controladas. O módulo é responsável pela conversão do sinal de alta impedância, gerado pelo eletrodo de vidro, em uma saída analógica compatível com o Arduino, além de fornecer uma saída digital com limiar ajustável (Seeed Studio, 2023).

A interface entre os componentes é feita por meio de um conector BNC, que liga o eletrodo ao módulo amplificador. A conexão entre o módulo e o Arduino utiliza as saídas analógica (AO) e digital (DO), além dos terminais de alimentação (VCC e GND), operando em 5 V. O sinal analógico lido pelo Arduino pode então ser convertido em valores de pH por meio de uma curva de calibração baseada em soluções de referência, normalmente pH 4, 7 e 10, utilizando água destilada e tampões certificados (Dfrobot, 2025).

O eletrodo E201-C, por sua vez, é um sensor de pH do tipo bulbo de vidro, com faixa de medição de pH entre 0 e 14, resistência interna de aproximadamente 250 M Ω e tempo de resposta inferior a 5 segundos. Para manter a precisão e a durabilidade do sensor, recomenda-se armazená-lo em solução de KCl, mantendo a membrana úmida quando fora de uso. O eletrodo não é destinado à exposição prolongada a altas temperaturas ou a soluções altamente viscosas, que podem comprometer a integridade da membrana sensora.

O sistema combinado apresenta um bom desempenho para aplicações como monitoramento de qualidade da água, controle de processos em hidroponia e experimentos didáticos. Entretanto, ressalta-se a necessidade de calibração periódica, limpeza do eletrodo

com água deionizada e verificação do ajuste de offset para garantir a confiabilidade das medições (Cimpleo, 2020; Seeed Studio, 2023).

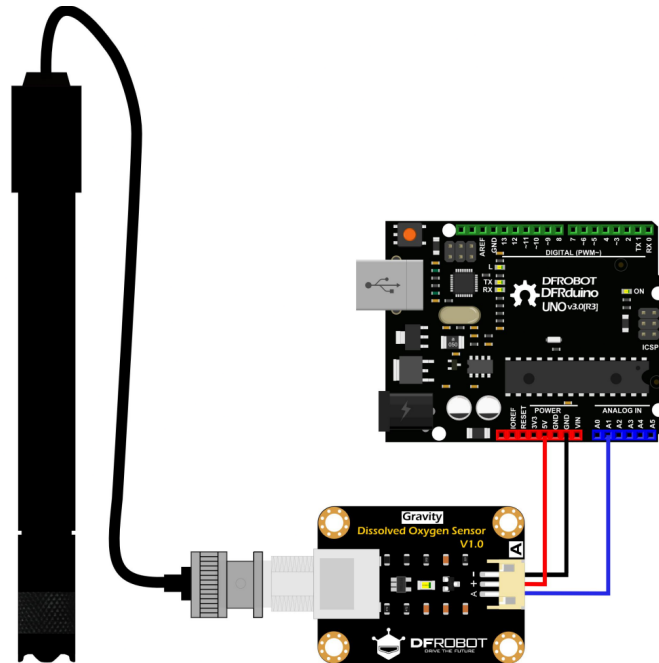
3.3.3.2 Sensor Oxigênio Dissolvido

Segundo Manoj (2022), o oxigênio dissolvido é o parâmetro mais importante em análises de qualidade de água para aquicultura. Assim, o seu monitoramento pode prevenir a morte de peixes, tanto no cultivo, quanto em ambientes naturais. Desse modo, o sensor comumente utilizado para análises de oxigênio dissolvido na plataforma arduino é o Gravity Analog Dissolved Oxygen sen0237-A.

Desse modo, este sensor, ilustrado na figura 9, é um dispositivo desenvolvido para medir a concentração de oxigênio dissolvido (OD) em soluções aquosas, sendo especialmente indicado para aplicações com Arduino, devido à sua compatibilidade com tensões de operação de 5 V e saída analógica de 0 a 3 V. Esse sensor utiliza uma sonda galvânica, que gera uma corrente elétrica proporcional à quantidade de oxigênio presente na água. Essa corrente é convertida em um sinal analógico, o qual pode ser facilmente interpretado pela porta analógica de um microcontrolador como o Arduino (Dfrobot, 2025).

Para obter medições precisas, o sensor exige calibração periódica, podendo ser feita em um ou dois pontos. A DFRobot recomenda realizar a calibração em água saturada com oxigênio para garantir leituras confiáveis. Além disso, é necessário realizar manutenção da membrana e da solução eletrolítica, que devem ser trocadas conforme o ambiente de uso: mensalmente para a solução de NaOH (0,5 mol/L) e a cada 1 a 2 meses para a membrana, em ambientes com água turva. Por não exigir tempo de aquecimento (ou polarização), o SEN0237-A pode ser utilizado de forma imediata após a energização. Isso o torna ideal para projetos de automação, aquaponia, monitoramento ambiental e sistemas de controle de qualidade da água usando plataformas como o Arduino Uno ou Mega (Dfrobot, 2025).

Figura 9 – Gravity Analog Dissolved Oxygen sen0237-A.



Fonte: Dfrobot (2025).

3.3.3.3 Sensor de Turbidez da Água

O sensor Gravity Analog Turbidity Sensor SEN0189 (Figura 10), que é especialmente projetado para funcionar com plataformas como o Arduino Uno, operando com tensão de alimentação de 5 V e fornecendo saída analógica (0-4,5 V), compatível com as portas ADC do Arduino. Também, o dispositivo utiliza um emissor e receptor de luz infravermelha para medir a turbidez da água, isto é, partículas em suspensão provocam atenuação e dispersão da luz, resultando em variação da tensão de saída proporcional à quantidade de sólidos suspensos (TSS) (Dfrobot, 2025) . O tempo de resposta é rápido (< 500 ms) e o consumo de energia é baixo (40 mA).

Além da saída analógica, o SEN0189 conta com uma saída digital configurável via potenciômetro na placa, que permite ajustar um limiar de turbidez e gerar sinal digital (*HIGH/LOW*), ideal para aplicações que exigem indicação binária. Para integrar ao Arduino, é possível conectar o pino analógico (A0–A5) à saída “A” do sensor e o terra e VCC da PA (5 V) aos correspondentes do sensor. A leitura pode ser convertida em tensão e, via fórmula desenvolvida na IDE ou curva de calibração do potenciômetro da placa, em unidades de NTU (*Nephelometric Turbidity Units*) (Dfrobot, 2025) .

Para calibração, recomenda-se utilizar água com turbidez conhecida (por exemplo, $< 0,5$ NTU) para ajustar leitura máxima ($\sim 4,1 \pm 0,3$ V a $10\text{--}50$ °C), e uma solução-padrão para definir o ponto baixo da escala.

Figura 10 – Sensor de turbidez da água Gravity Analog Turbidity Sensor SEN0189.



Fonte: Dfrobot (2025).

3.3.3.4 Sensores de Condutividade Elétrica

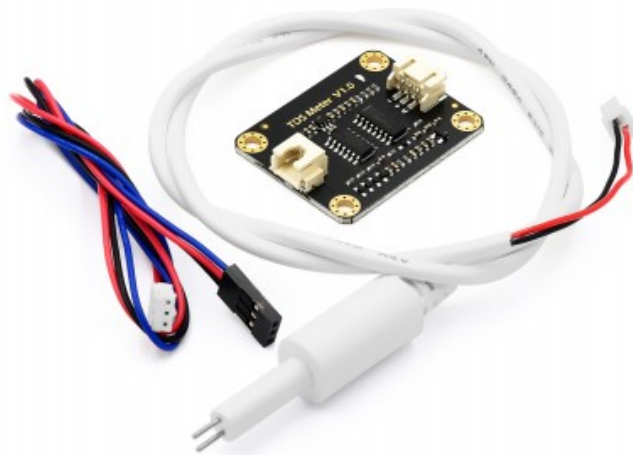
O sensor Gravity Analog TDS Sensor / Meter SEN0244 (figura 11), desenvolvido pela DFRobot, é um dispositivo amplamente utilizado em projetos de monitoramento da qualidade da água com microcontroladores como o Arduino. Ele permite a medição indireta da salinidade, da condutividade elétrica e da concentração de sólidos totais dissolvidos (TDS), fornecendo uma estimativa da quantidade de íons presentes na solução aquosa. O funcionamento do sensor baseia-se na excitação de eletrodos por um sinal de corrente alternada (AC), o que evita o processo de polarização comum em sensores baseados em corrente contínua (DC), prolongando a vida útil da sonda e garantindo maior estabilidade nas medições (Dfrobot, 2025).

A corrente resultante do fluxo de elétrons, estimulada pela presença de partículas carregadas no líquido, é processada por um circuito eletrônico que converte a condutividade medida em um sinal de tensão analógica proporcional. Esse sinal varia entre 0 V e aproximadamente 2,3 V e pode ser lido diretamente pelas portas analógicas de um microcontrolador, como as disponíveis no Arduino Uno. A faixa operacional do sensor abrange leituras entre 0 e 1000 ppm com precisão de $\pm 10\%$ em relação ao valor de escala total

a 25 °C, o que o torna adequado para aplicações como hidroponia, monitoramento ambiental, aquarismo e controle de processos industriais leves (Dfrobot, 2025).

Fisicamente, o sistema é composto por uma sonda submersível conectada a uma placa de interface, a qual realiza a conversão do sinal e fornece uma saída analógica. A comunicação elétrica entre a placa e o Arduino é realizada por meio de conector PH2.0-3P, enquanto a conexão entre a sonda e a placa utiliza o conector XH2.54-2P. Para obter os valores de TDS em ppm, é necessário aplicar uma equação de calibração, normalmente baseada em um polinômio de 3ª ordem, que relaciona a tensão de saída com a concentração de sólidos dissolvidos. A DFRobot fornece uma biblioteca de código para Arduino que facilita essa conversão, incluindo compensação térmica padrão assumida em 25 °C, embora o sensor permite ajustes caso seja utilizado um sensor de temperatura externo (Dfrobot, 2025).

Figura 11 – Sensor Gravity Analog TDS Sensor com placa de conversão de sinal.



Fonte: Dfrobot (2025).

3.3.4 Sensores de Gás

A série MQ é composta por sensores eletroquímicos amplamente utilizados em PAs para a detecção de gases na porção atmosférica. Esses sensores funcionam com base na variação da resistência elétrica de um material semiconductor (geralmente dióxido de estanho, SnO_2), cuja condutividade muda conforme a concentração do gás-alvo presente no ambiente. Essa característica os torna componentes ideais para projetos de monitoramento ambiental de baixo custo utilizando plataformas como Arduino. Cada modelo da série MQ é projetado para detectar gases específicos. Por exemplo, o MQ135 pode ser utilizado na detecção de ozônio, material particulado, monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO_2) e óxidos de

nitrogênio (NO_x), sendo útil em medições da qualidade do ar urbano e industrial. Já o MQ2 é sensível a gases combustíveis como GLP, hidrogênio e metano, frequentemente utilizado em projetos de segurança doméstica.

O MQ3 e o MQ303A são sensores dedicados à detecção de vapores de álcool, aplicados em etilômetros ou controle de ambientes industriais. Modelos como o MQ4 (metano), MQ5 (LPG, hidrogênio, álcool), MQ6 (butano e propano), e MQ7 (CO) são especialmente relevantes para aplicações de detecção de vazamentos e controle de atmosferas perigosas.

Sensores mais específicos como o MQ8 (hidrogênio), MQ131 (ozônio), MQ136 (gás sulfídrico), MQ137 (amônia), MQ138 (COVs como tolueno, acetona e hidrogênio), e MQ216 (GLP, metano, álcool) permitem análises mais detalhadas de poluentes atmosféricos e gases tóxicos. Além disso, modelos como o MQ214 e o MQ309A são voltados à detecção de metano, propano e monóxido de carbono, importantes para o controle ambiental em estações de tratamento de resíduos, confinamentos de animais ou áreas industriais.

Esses sensores possuem um tempo de resposta relativamente rápido, são de fácil calibração, e apresentam boa durabilidade. Contudo, exigem atenção quanto à temperatura, umidade e interferência de gases cruzados, sendo recomendada a utilização conjunta com sensores de temperatura para maior precisão. A tabela 1 demonstra a relação do modelo de sensor mais utilizado nos trabalhos acadêmicos e seu respectivo parâmetro de medição. Desse modo, a tabela 1 demonstra a relação entre modelo de sensor e parâmetro de medição.

Tabela 1 – Conjunto de sensores químicos MQ e seus parâmetros de medição.

Nome do sensor	Parâmetro de medição
MQ135	Ozônio, material particulado, monóxido de carbono, dióxido de enxofre e óxido nitroso.
MQ2	Gás combustível (GLP, propano, hidrogênio, metano).
MQ3	Vapor de álcool
MQ4	Metano
MQ5	H ₂ , LPG, CH ₄ , CO, Álcool.
MQ6	Propano, Butano e GLP
MQ7	Monóxido de Carbono
MQ8	Gás Hidrogênio

MQ9	Gás Monóxido de Carbono
MQ131	Gás Ozônio
MQ135	Amônia, Benzeno e Álcool
MQ136	Gás Sulfídrico
MQ137	Amônia
MQ138	Tolueno, Acetona, Álcool e Hidrogênio (COVs)
MQ214	Metano GLP, Butano e Propano
MQ216	GLP, Butano, Propano, Metano e Álcool
MQ303A	Álcool
MQ309A	Monóxido de Carbono e Metano

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

3.3.5 Sensores de uso pontual

Apesar da crescente utilização de sensores em sistemas de monitoramento ambiental e automação, alguns sensores disponíveis para uso com Arduino ainda permanecem com aplicações pontuais e menos recorrentes em projetos científicos, sobretudo por fatores como baixa precisão, limitação de escopo, sensibilidade a ruídos ambientais ou ausência de padronização em medições. Desse modo, conforme apresentado na tabela 2, são exemplos de sensores, como o sensor de chuva YL-83, por exemplo, que é comumente utilizado apenas para detectar a presença ou ausência de gotas d'água, sem realizar medições precisas do volume de precipitação. Essa limitação o torna pouco adequado para estudos hidrológicos mais robustos, sendo mais utilizado em sistemas de irrigação automatizada e dispositivos residenciais .

O sensor de luminosidade baseado em LDRs (Light Dependent Resistors) apresenta resposta não linear à luz e sofre influência significativa da temperatura e do envelhecimento do material fotossensível, o que compromete sua precisão em aplicações científicas. Por isso, seu uso é geralmente restrito a sistemas simples de automação, como acionamento de lâmpadas ou persianas.

O sensor de fluxo de fluido YF-S201, baseado em rotor, apresenta boa resposta em medições básicas de vazão de líquidos, mas sua calibração depende do tipo de fluido, temperatura e viscosidade, tornando-o mais apropriado para uso didático ou sistemas fechados com baixa variação.

No caso de sensores de peso, como os módulos com HX711 e células de carga, há forte demanda por estrutura física e calibração adequada, o que limita seu uso a aplicações onde o hardware esteja bem protegido e estabilizado, como em balanças ou controle de dosagem, mas pouco utilizado em campo aberto por conta de interferências mecânicas e climáticas.

Sensores como o SW-420, que detecta vibração, são sensíveis a pequenos movimentos mecânicos, mas carecem de uma unidade de medida padronizada, sendo mais adequados para sistemas binários (ativado ou desativado), como alarmes ou monitoramento de equipamentos.

Da mesma forma, o tilt switch, usado para detectar inclinação, responde a variações simples de posição angular e é aplicado principalmente em brinquedos ou alarmes de tombamento, não sendo utilizado para análise precisa de orientação espacial. O sensor capacitivo de toque TTP223, apesar de útil em interfaces discretas, encontra pouca aplicação em projetos ambientais, já que depende de interação humana direta e não coleta dados ambientais passivos.

Por fim, os sensores de som, como KY-038 ou MAX9814, têm uso limitado em aplicações ambientais devido à suscetibilidade ao ruído externo, baixa seletividade de frequência e dificuldade em distinguir fontes sonoras, o que exige tratamentos de sinal mais avançados. Nesse sentido, tais sensores, embora relevantes em contextos específicos, não possuem a mesma abrangência ou confiabilidade dos sensores amplamente utilizados em análises ambientais multiparamétricas, sendo comumente relegados a funções auxiliares ou protótipos simples.

Tabela 2 – Sensores de uso pontual e específico.

Sensor	Modelos	Exemplos de Uso
Sensor de Chuva	YL-83	Irrigação, fechamento automático de janelas
Sensor de Luminosidade	LDR	Acionamento de lâmpadas, economia de energia
Sensor de Fluxo de Fluido	YF-S201	Medição de consumo de água, controle de bomba

Sensor de Peso	HX711 + célula de carga	Balanças, dosagem automática, controle de estoque
Sensor de Vibração	SW-420	Alarmes, monitoramento de máquinas, anti-roubo
Sensor de Inclinação	Tilt Switch	Alarmes, brinquedos, sistemas anti-queda
Sensor de Toque	TTP223	Painéis sensíveis ao toque, botões eletrônicos invisíveis
Sensor de Som	KY-038, MAX9814	Monitoramento de ruído, ativação por som

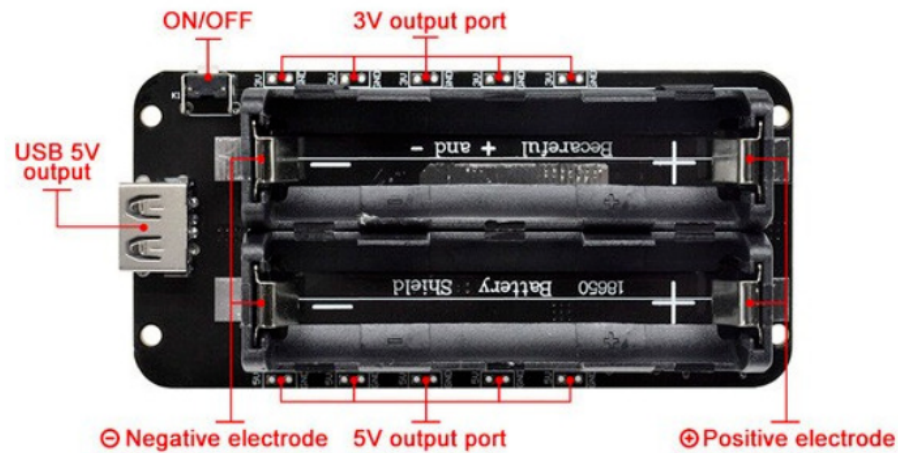
Fonte: elaborada pelo autor (2025).

3.3.6 *Gestão Energética*

O funcionamento de todos os componentes e principalmente da placa de arduino necessitam de uma fonte de energia. Assim, é possível utilizar fontes de alimentação contínua, como a fonte de plug P4 de 220V que se conecta à porta Jack da PA. Também é possível utilizar a alimentação de fonte contínua pela entrada USB-B da PA conectada a uma fonte de aparelho móvel ou de notebook e computadores de mesa. Nesse sentido, a utilização de PAs e seus sensores em sistemas de monitoramento remoto em áreas remotas ou em locais ao ar livre, fora de ambientes domésticos ou laboratórios necessitam de baterias ou uma fonte de energia recarregável.

Em outro sentido, é comum a utilização de células de carga de lítio, como as Bateria Íon-Lítio ICR18650, conjugadas a placas de recarga como as 18650 Battery Shield que suportam a alimentação reversa das células de carga, podendo haver ciclos de alimentação e recarga com fontes renováveis de energia limpa, utilizando placas fotovoltaicas de Silício Policristalino da Star Solar. Além disso, é possível utilizar pilhas AA e baterias de manganês ou relés conectados a fontes de alta tensão.

Figura 12 – 18650 Battery Shield.



Fonte: Souza (2025).

Dessa forma, a utilização da fonte de energia, sendo de 110V/220V ou 3.5V/9V de baterias é direcionada a PA e convertida em uma corrente de 3.5V e outra de 5V, tendo seu excedente regulado pelo módulo VRM ou regulador de tensão, que pode ser anexado a um relé ou terceirizado por um módulo separado de regulação de tensão como o LM2596 Step Down.

3.4 Armazenamento de dados, Marcadores Temporais e Telemetria

Para que ocorra uma medição eficiente dos parâmetros ambientais, os sensores baseados em Arduino realizam a coleta de dados do meio ou da amostra e os enviam ao microcontrolador por meio de dois tipos principais de sinais: analógico ou digital. Sensores analógicos convertem grandezas físicas em variações contínuas de tensão, enquanto sensores digitais processam internamente o sinal e enviam um valor já convertido em dados binários (Pallás-areny; Webster, 2012).

Contudo, os sensores não armazenam dados de forma permanente, pois geralmente possuem apenas uma pequena memória do tipo *Flash*, usada apenas para operações internas e de curto prazo, como calibração ou comunicação básica (Monk, 2016). Dessa forma, a retenção e o processamento dos dados dependem do microcontrolador da plataforma Arduino, cuja memória é limitada, por exemplo, o ATmega328P possui apenas 32 KB de memória *Flash* e 2 KB de *SRAM* (Atmel, 2025).

Para possibilitar a análise histórica ou em tempo real, torna-se necessário o uso de componentes auxiliares para o armazenamento sólido dos dados, como cartões SD ou

módulos EEPROM externos. Além disso, os sensores geralmente não possuem sistema interno de marcação de tempo, o que demanda a utilização de módulos de relógio de tempo real (RTC), como o DS1307 ou DS3231, que permitem associar uma marca temporal precisa a cada medição realizada.

Dessa forma, sistemas de monitoramento eficientes baseados em Arduino integram sensores, módulos de armazenamento, RTC e um componente de comunicação ou transmissão de dados, responsável por transferir os dados armazenados para um computador, servidor ou nuvem. Essa comunicação pode ocorrer de forma física (via USB ou cartão SD) ou remota (por módulos como ESP8266, LoRa, GPRS ou satélite), viabilizando a chamada telemetria ambiental em tempo real ou em lotes.

3.4.1 Dataloggers e marcadores de tempo

Além dos sensores e da própria placa Arduino, é necessário contar com um sistema de armazenamento externo para registrar os dados coletados por cada sonda e componente. Para isso, utiliza-se comumente o Data Logger Shield, que normalmente vem equipado com o módulo RTC (Real Time Clock) DS1307.

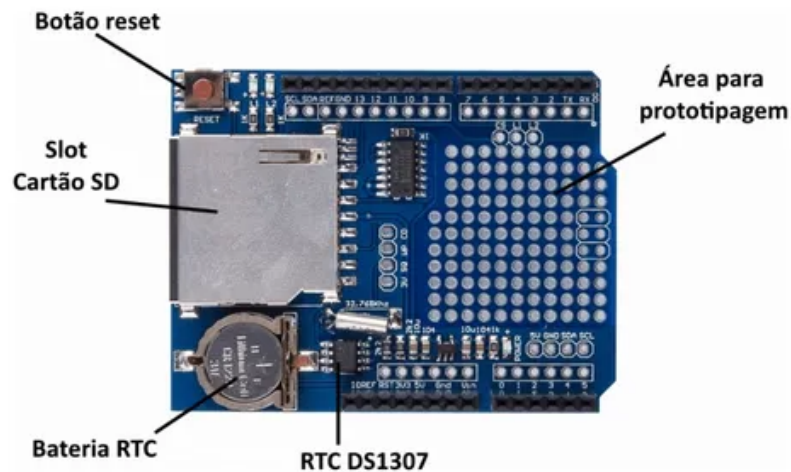
O Data Logger atua como um expensor dos terminais de comunicação do microcontrolador da plataforma Arduino (PA), permitindo a conexão simultânea com múltiplos sensores e, principalmente, a gravação dos dados em um cartão de memória SD, uma vez que o Arduino não possui memória de massa integrada. Suas memórias internas – Flash, SRAM e EEPROM – são bastante limitadas, sendo a Flash a maior delas, com apenas 32 KB no modelo ATmega328P, o que inviabiliza o armazenamento contínuo de grandes volumes de dados.

Esse shield suporta cartões microSD formatados em FAT16 ou FAT32, sendo o sistema FAT32 o utilizado neste projeto por permitir maior capacidade de armazenamento e melhor compatibilidade com sistemas modernos de leitura em computadores.

Acoplado ao shield, o módulo RTC DS1307 tem a função de registrar informações temporais precisas (dia, mês, ano, hora, minuto e segundo) junto aos dados captados pelos sensores, como ilustrado na figura 14. Isso é fundamental para análises ambientais, pois permite associar cada medição ao exato momento em que foi realizada. O DS1307 funciona com comunicação I²C e armazena as informações de tempo mesmo quando o Arduino está desligado, graças ao uso de uma bateria de lítio CR2032 de 3V, que mantém o funcionamento do relógio interno e evita a perda das informações temporais em caso de interrupção da alimentação principal (Monk, 2012).

Embora não seja um RTC de altíssima precisão (podendo apresentar desvios de alguns segundos após semanas de uso), o DS1307 é amplamente utilizado em projetos de baixo custo e prototipagem por sua simplicidade, confiabilidade e compatibilidade com a IDE do Arduino.

Figura 13 – Data logger Shield com RTC DS1307.



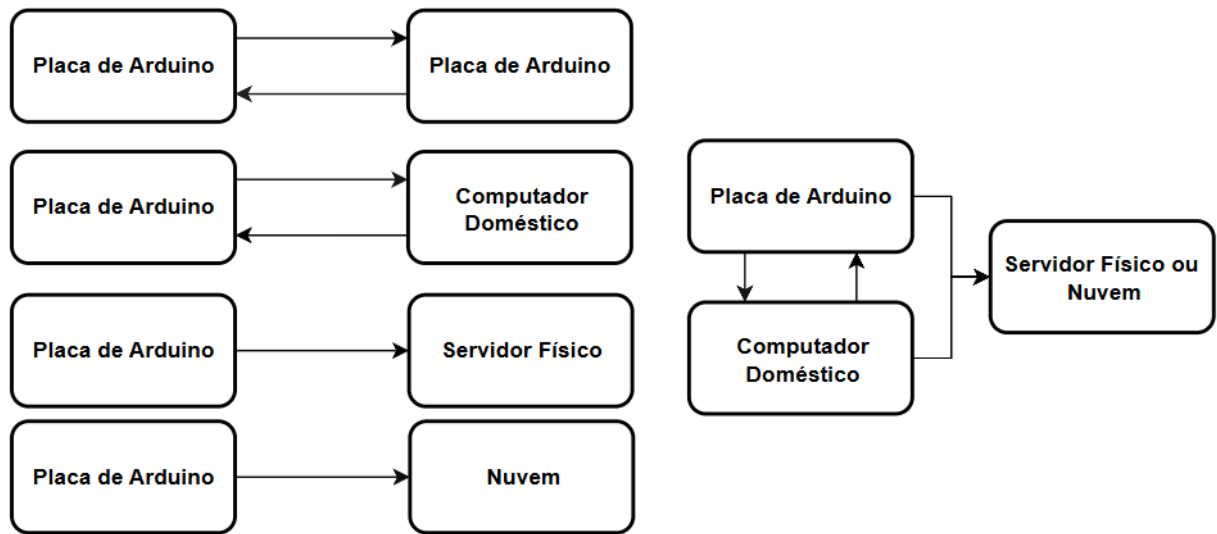
Fonte: Datacombr (2025).

3.4.3 Telemetria com Arduino

A utilização de sensores para o monitoramento de sistemas ambientais não se limita a conexões de fios entre pares de dispositivos. Desse modo, a maior parte das aplicações que necessitam desse tipo de conexão são restritas a testes laboratoriais e ensaios. Assim, é necessária a utilização de dispositivos que se comunicam sem a necessidade de conexões físicas e que garantam uma transferência e medição de dados em ambientes remotos e sem amparo de tecnologias domésticas como Wifi ou cabos de rede RJ45.

A utilização desses sistemas de transferência de dados se dá pela telemetria entre placas de arduino, computadores e servidores, podendo ser utilizados em pares ou em redes de multiponto, variando seu protocolo de comunicação e área de cobertura. Assim, é comum o emprego de redes como PAN, LAN, WAN, LPWAN e ponto a ponto, bem como protocolos UART, I2C, RF 433 MHz, LoRa, ZigBee, Bluetooth, USB Serial, Ethernet, Wi-Fi, GSM, GPS e LoRaWAN, de modo a realizar sistemas de ponto entre PA e PA, PA e computador doméstico, PA e servidor físico ou PA e nuvem.

Figura 14 – Fluxograma de pares e transferências entre dispositivos.



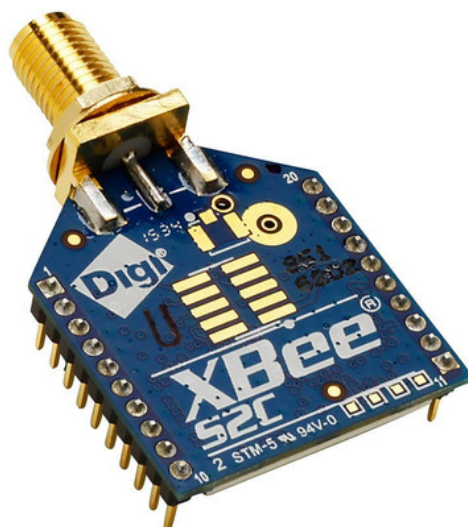
Fonte: elaborada pelo autor (2025).

3.4.3.1 Protocolos de Comunicação

A relação entre o armazenamento e transferência de dados entre os dispositivos é regida pela tecnologia ou protocolo de comunicação, que muda em relação à abordagem, como na tabela 3, em que há a possibilidade de sistemas de dois pontos, como a ramificação dessas conexões e seus fluxos.

Desse modo, fluxos que ocorrem exclusivamente entre PAs se utilizam de protocolos como UART, I2C, frequências de rádio (como a 433 MHz), LoRa, ZigBee/Xbee ou bluetooth. Parte desses protocolos contém o nome de forma redundante a seu dispositivo, como LoRa ou ZigBee/Xbee (figura 16) que recebem o mesmo nome de seus módulos.

Figura 15 – Módulo Xbee com adaptação de cabo coaxial para antena RP-SMA.



Fonte: Pereira (2020).

No caso de fluxos de dados entre PAs e computadores domésticos, é possível utilizar protocolos como USB Serial, Ethernet, Wi-fi e Bluetooth, variando seu alcance e ruído de transmissão. Em aplicações mais robustas e com alcance maior, é possível utilizar protocolos que permitam acesso a transferências diretas entre servidores físicos ou nuvem em redes WAN ou LPWAN entre o servidor, nuvem e as PAs, podendo haver a utilização de tecnologias como Wi-Fi em rede WAN, GSM ou GPRS, LoRaWAN e GPS.

Tabela 3 - Tipos de protocolo por par de conexão e alcance.

Pares	Protocolo	Tipo de Rede	Alcance Máximo (m)
PA para PA	UART	P2P	5
PA para PA	I2C	P2P	<1
PA para PA	RF 433 MHz	PAN	500
PA para PA	LoRa	LPWAN	>2 e <10000
PA para PA	ZigBee / Xbee	Mesh ou PAN	<100
PA para PA	Bluetooth	PAN	<100
PA para CD	USB Serial	P2P	<3
PA para CD	Ethernet	LAN	<100
PA para CD	Wi-Fi	WLAN ou LAN	<100

PA para CD	Bluetooth	PAN	<20
PA para Servidor	Wi-Fi	WLAN e WAN	<100
PA para Servidor	GSM	WAN	Indeterminado
PA para Servidor	LoRaWAN	LPWAN	<10000
GPS para PA	GPS	Variável	Indeterminado

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Protocolos como LoRa e LoRaWAN variam suas capacidades de comunicação pela infraestrutura disponível no sistema de comunicação, bem como o módulo GSM que varia de acordo com a operadora que disponibiliza o chip de acesso à rede. Já o protocolo de GPS permite o fluxo de dados de um ponto único, sem a possibilidade de retorno, pois se utiliza do sistema de geolocalização por satélite em grupos triplos de referência, sem a possibilidade de retorno do dado em relação às PAs.

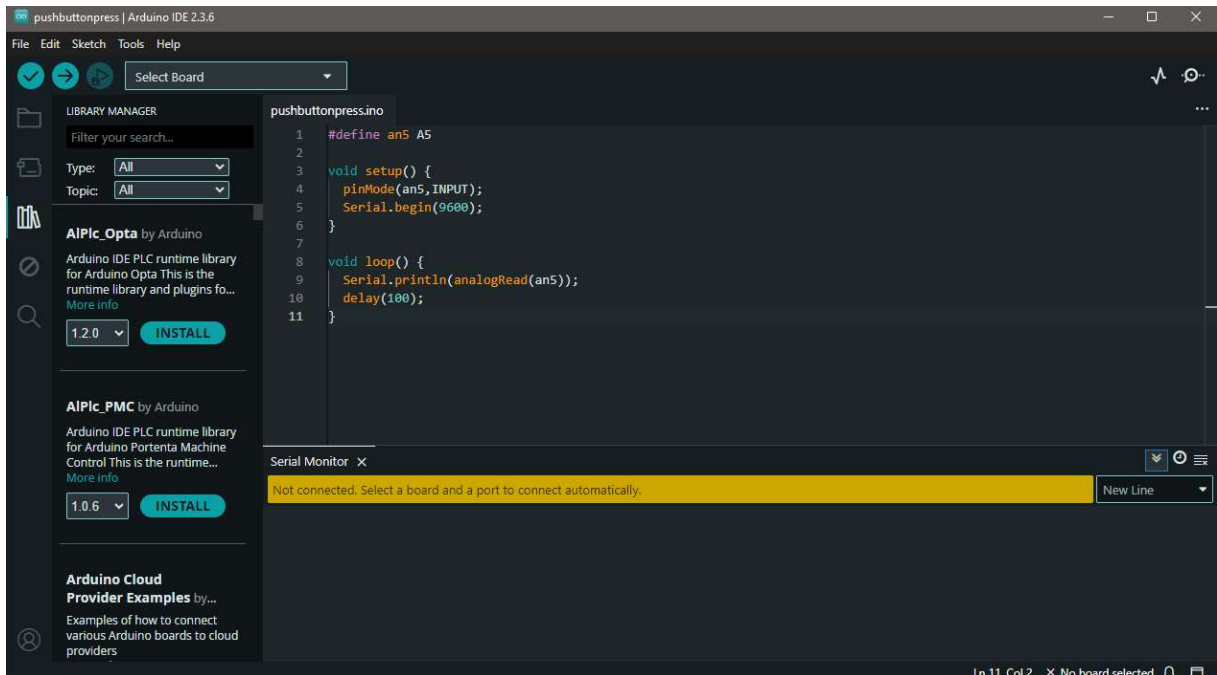
3.5 Algoritmo e Auxílio a Programação

3.5.1 Linguagem de Programação

A configuração da placa de arduino, do microcontrolador e dos sensores e sua calibração são feitas normalmente por meio de uma interface gráfica de desenvolvimento (IDE) que compila e envia códigos em INO baseados na linguagem C++. Desse modo, a IDE desenvolvida pela Arduino oferece ao usuário uma alternativa de configuração dos sensores e atuadores de forma simplificada e com auxílio de correções, bibliotecas e compiladores para ajustar o funcionamento de cada componente.

Assim, a interface de desenvolvimento utiliza como base uma linguagem de médio nível, que pode tanto integrar comandos de baixo nível como orientações de alta abstração. Dessa forma, a grande capacidade e popularidade da linguagem permite a utilização de bibliotecas específicas para cada sensor, otimizando ensaios e encurtando linhas de código sem a necessidade do uso de metodologias como a Clean Code, além de disponibilizar ferramentas como monitor serial, compilador e serial plotter, além da possibilidade de conexão de diversas placas de forma simultânea.

Figura 16 – Interface Arduino IDE.



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Os blocos de código ou a estrutura de algoritmo comumente utilizada para configuração dos sensores se dá em quatro etapas, sendo a última variável para cada sensor. A primeira é a declaração de variáveis, início de fórmulas com declarações de variáveis e carregamento de bibliotecas. A segunda parte do código normalmente é reservada para a definição de alguns parâmetros, chamada *void setup* em que deve ser atribuído códigos como o estado inicial de cada componente, de modo que sensores de distância devem ser declarados como desligados ou os módulos RTC e de displays que necessitam de uma requisição anterior a inicialização dos ciclos de funcionamento.

Já a terceira parte, se dá pelo ciclo de funcionamento ou loop, que costuma manter as voltas de interpretação do interpretador da IDE ou conversão de sinais pelo microcontrolador, sendo utilizado para armazenar códigos como a requisição dos sinais analógicos ou digitais dos sensores, o momento de análise pelos módulos de marcação de tempo e impressão de valores ou variáveis em telas, cartões de armazenamento ou circuitos de transmissão ou recepção de antenas.

Por fim, a quarta parte é normalmente reservada a porção lógica do código, como a utilizada pelo sensor HCSR04, em que a última parte do código é reservada para a conversão do sinal de amplitude temporal em milissegundos para centímetros ou metros.

Figura 17 – Bloco de código na IDE.

```

1  #include <DHT.h>
2  #include <RTClib.h>
3  #include <SD.h>
4  #define DHTPIN 3
5  #define DHTTYPE DHT11
6  DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
7  RTC_DS1307 rtc;
8  File dataFile;
9
10 void setup() {
11   Serial.begin(9600);
12   dht.begin();
13
14   if (!rtc.begin()) {
15     Serial.println("Não foi possível encontrar o RTC");
16     while (1);
17   }
18   if (!SD.begin(10)) {
19     Serial.println("Falha ao inicializar o cartão SD");
20     return;
21   }
22   if (!rtc.isrunning()) {
23     Serial.println("RTC não está funcionando!");
24   }
25
26   dataFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);
27   if (dataFile) {
28     dataFile.println("Data, Hora, Temperatura_ar, Umidade_ar");
29     dataFile.close();
30   } else {
31     Serial.println("Erro ao abrir o arquivo datalog.csv");
32   }
33 }
34
35 void loop() {
36   delay(2000);
37   DateTime now = rtc.now();
38   float temperature = dht.readTemperature();
39   float humidity = dht.readHumidity();
40   dataFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);
41   if (dataFile) {
42     dataFile.print(now.year(), DEC);
43     dataFile.print('/');
44     dataFile.print(now.month(), DEC);
45     dataFile.print('/');
46     dataFile.print(now.day(), DEC);
47     dataFile.print(",");
48     dataFile.print(now.hour(), DEC);
49     dataFile.print(':');
50     dataFile.print(now.minute(), DEC);
51     dataFile.print(':');
52     dataFile.print(now.second(), DEC);
53     dataFile.print(",");
54     dataFile.print(temperature);
55     dataFile.print(",");
56     dataFile.print(humidity);
57     dataFile.close();
58   } else {
59     Serial.println("Erro ao abrir o arquivo datalog.csv");
60   }
61   delay(1000);
62 }

```

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

3.5.2 Apoio à Programação

O desenvolvimento de algoritmos para calibrar, configurar e mensurar parâmetros a partir de sensores de arduino são uma facilidade em comparação a instrumentos tradicionais.

Contudo, a programação em C++ é dificultosa por conta da idade da linguagem e dos desafios em relação à lógica de programação. Dessa forma, alguns autores como Adafruit, Burton, Studt e outros contribuíram ao desenvolvimento de algoritmos na IDE para configuração das PAs por meio de bibliotecas que encurtam e otimizam processos em relação aos métodos de configuração dos sensores

Assim, o desenvolvimento e o emprego de algoritmos avaliados pela comunidade científica e otimizados pelos usuários e autores recebe o nome de biblioteca e é disponibilizado na interface de desenvolvimento e em repositórios de códigos e projetos de software, podendo ser utilizados por qualquer desenvolvedor, seja para aplicações ao meio ambiente ou áreas distintas.

Figura 18 – Bloco de código sem o uso da biblioteca NewPing (A) e bloco de código utilizando a biblioteca NewPing (B)

The image shows two code snippets side-by-side, labeled A and B. Both snippets are in C++ and use a dark-themed IDE background. A central vertical toolbar with icons for file, list, close, and search is visible between the two code blocks.

Snippet A (Left): Shows manual configuration of a sensor. It defines pins TRIG (9) and ECHO (10). The setup function initializes the serial port at 9600 baud, sets TRIG as an output pin and ECHO as an input pin. The loop function sends a high pulse to TRIG, waits 2 microseconds, then sends a low pulse. It then reads the pulse width on ECHO, calculates the distance using the formula $distancia = duracao * 0.034 / 2$, prints the distance, and delays for 1000ms.

```

1  #define TRIG 9
2  #define ECHO 10
3
4  void setup() {
5      Serial.begin(9600);
6      pinMode(TRIG, OUTPUT);
7      pinMode(ECHO, INPUT);
8  }
9
10 void loop() {
11     digitalWrite(TRIG, LOW);
12     delayMicroseconds(2);
13
14     digitalWrite(TRIG, HIGH);
15     delayMicroseconds(10);
16     digitalWrite(TRIG, LOW);
17
18     long duracao = pulseIn(ECHO, HIGH);
19     float distancia = duracao * 0.034 / 2;
20
21     Serial.print("Distância: ");
22     Serial.print(distancia);
23     Serial.println(" cm");
24     delay(1000);
25 }

```

Snippet B (Right): Shows the same functionality using the NewPing library. It includes the <NewPing.h> header and defines the same pins and MAX_DIST (200). The setup function is identical to snippet A. The loop function is significantly shorter, using `sonar.ping_cm()` to get the distance, which is then printed.

```

1  #include <NewPing.h>
2
3  #define TRIG 9
4  #define ECHO 10
5  #define MAX_DIST 200
6
7  NewPing sonar(TRIG, ECHO, MAX_DIST);
8
9  void setup() {
10     Serial.begin(9600);
11 }
12
13 void loop() {
14     delay(50);
15     int distancia = sonar.ping_cm();
16
17     Serial.print("Distância: ");
18     Serial.print(distancia);
19     Serial.println(" cm");
20 }

```

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

O emprego da biblioteca NewPing elaborada por Tim Eckel em 2015 encurta o código do sensor HCSR04 normalmente utilizado para medir distâncias, altura da maré e níveis d'água em cinco linhas, além de otimizar a declaração de variáveis e a definição de valores.

Além da utilização de bibliotecas, empresas como a Tinkercad desenvolveram plataformas de ensino lúdico com aulas em vídeo e sistemas que gameficam o aprendizado e

configuração de sensores em PAs, facilitando ensaios e viabilizando a simulação de sensores, evitando erros e problemas lógicos para cada sensor. Assim, plataformas como Tinkercad possibilitam o desenvolvimento de sistemas de sensores em PAs, circuitos eletrônicos empregados em alguns sensores e modelos tridimensionais para objetos que auxiliem o uso prático desses projetos com PAs.

Figura 19 – Bloco de código lúdico da plataforma Tinkercad



Fonte: Sankhla (2023).

Nesse sentido, esse tipo de ensino lúdico, junto às facilidades das bibliotecas da IDE projetadas para os sensores e o auxílio de tecnologias como inteligências artificiais, como ChatGPT da OpenAI, Gemini da Google ou DeepSeek de Liang Wenfeng reduzem a barreira de entrada para aspirantes a desenvolvedores de sondas multiparamétricas baseadas em Arduino.

4. MATERIAIS E MÉTODOS: ANÁLISE CIENCIOMÉTRICA

4.1 Delineamento da pesquisa

Este trabalho se configura como uma pesquisa de natureza quantitativa, com abordagem descritiva e exploratória, utilizando como método principal a análise bibliométrica. A opção por essa metodologia se justifica pela capacidade de mapear e quantificar tendências em campos científicos específicos, identificar autores, instituições e periódicos relevantes, bem como detectar lacunas e oportunidades de pesquisa. A bibliometria tem sido amplamente utilizada em estudos voltados à avaliação da produção científica em diferentes áreas, como demonstram Santos e Quadros (2024), Cerqueira et al. (2024) e Dias et al. (2023), cujos procedimentos metodológicos inspiraram o presente trabalho.

4.2 Estratégia de busca e seleção dos dados

Os dados foram coletados na base de dados Scopus (Elsevier), reconhecida internacionalmente por sua abrangência e qualidade editorial. A busca foi realizada entre os períodos de 2009 a 2024, utilizando operadores booleanos e truncamentos (tabela 4) que permitiram delimitar os termos mais representativos das temáticas relacionadas ao uso de sensores baseados em Arduino no monitoramento ambiental.

Tabela 4 – Relação entre operador booleano e termos de busca.

Operador Booleano	Termo de Busca
AND	"sensor*" OR "sensing device*" OR "low-cost sensor*" OR "environmental sensor*" OR "data logger" OR "monitoring system*" OR "embedded system"
AND	"Arduino" OR "Arduino-based" OR "Arduino board" OR "open-source hardware"
AND	"water quality" OR "air quality" OR "soil monitoring" OR "pollution" OR "climate" OR "climate change" OR "environmental monitoring" OR "agriculture" OR "greenhouse" OR "microclimate" OR "forest" OR "ecosystem" OR "waste" OR "urban environment"
AND NOT	"Giovanni Arduino" OR "G. Arduino"
AND	PUBYEAR > 2005 TO PUBYEAR < 2025

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Os resultados foram exportados no formato .csv, contendo metadados completos como título, resumo, palavras-chave, autores, instituições, periódicos, ano de publicação e referências citadas.

4.3 Processamento e análise dos dados

A análise foi conduzida no software RStudio, com uso da biblioteca Bibliometrix e sua interface gráfica Biblioshiny (Aria; Cuccurullo, 2017), que permite gerar análises estatísticas, redes de coautoria e mapas temáticos de forma acessível e padronizada. O arquivo contendo os dados brutos foi importado no ambiente R, e a partir disso, foram gerados gráficos, tabelas e mapas bibliométricos com base nas variáveis de interesse.

O processo metodológico adotado segue o modelo utilizado por Santos e Quadros (2024), no estudo sobre capacidades dinâmicas e transformação digital; por Cerqueira et al. (2021), na análise descritiva da produção científica de um periódico nacional; e por Dias et al. (2022), que aplicaram a análise bibliométrica à temática dos créditos de carbono. A utilização de tais referências oferece respaldo técnico ao método adotado, fortalecendo a confiabilidade dos resultados apresentados.

4.4 Análise complementar dos sensores

Como etapa complementar, procedeu-se à descrição técnico-científica dos sensores utilizados nos sistemas Arduino identificados na literatura. Essa etapa visa caracterizar os sensores quanto aos princípios físico-químicos de funcionamento, tipos de sinais emitidos (digitais ou analógicos), parâmetros monitorados (temperatura, umidade, pH, condutividade, gases, entre outros) e sua adequação a distintos compartimentos ambientais (ar, solo e água). Foram utilizadas como base tanto as informações extraídas dos artigos identificados na base Scopus quanto literatura técnica adicional (Kelley et al., 2014; Blackstock et al., 2019; Dominguez-Brito et al., 2020; Hilal et al., 2022; Sharipov et al., 2025).

4.5 Apresentação dos resultados

Os resultados são apresentados por meio de gráficos, tabelas e quadros explicativos, com a finalidade de facilitar a visualização das principais tendências observadas. As visualizações geradas via Biblioshiny incluem o número de publicações por ano, países e instituições mais produtivos, palavras-chave mais recorrentes, redes de coautoria e co-ocorrência, além dos periódicos mais influentes.

Os dados apresentados permitem compreender a evolução do tema e o estado atual da pesquisa relacionada ao uso de plataformas abertas de baixo custo para o monitoramento ambiental. Os resultados foram discutidos à luz dos referenciais teóricos e metodológicos citados anteriormente, buscando uma análise crítica sobre os avanços, os desafios e as perspectivas futuras da área.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Características das publicações científicas

A busca sistemática na plataforma Scopus (Elsevier) por publicações sobre sensores ambientais baseados em Arduino resultou em 3.084 documentos entre os anos de 2009 a 2024, sendo distribuídos em áreas temáticas como ciência da computação (26,6%), engenharia (22,8%), física e astronomia (8,6%), matemática (8,2%), ciências de decisão (7%), energia (6,1%), ciências ambientais (3,4%), medicina (2,9%), ciências sociais (2,9%), ciência de materiais (2,4%) e outros (9,2%). Dentre as áreas destacadas, ciências da computação e engenharia contemplam a maior parte das publicações, contendo 2050 e 1756 documentos, respectivamente. Ainda, cada área temática pode ser conjugada, fazendo com que trabalhos publicados em periódicos de física reportam o uso de PAs como ferramenta para o monitoramento ambiental de baixo custo, o que explica o volume de documentos por área, bem como sua recorrência.

Tabela 5 – Distribuição de documentos por área temática.

Área Temática	Documentos	Percentil
Ciência da computação	2050	26,6%
Engenharia	1756	22,8%
Física e Astronomia	661	8,6%
Matemática	631	8,2%
Ciências de Decisão	541	7,0%
Energia	469	6,1%
Ciências Ambientais	259	3,4%
Medicina	226	2,9%
Ciências Sociais	226	2,8%
Ciência de Materiais	183	2,4%
Outros	712	9,2%

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

A distribuição dos documentos em relação ao seu tipo de publicação é dividida majoritariamente entre artigos de conferência (contemplando 66,3%) e artigos científicos (28,2%; Tabela 5).

Tabela 6 – Número de documentos por tipo.

Tipo de Documento	Número de documentos
Artigo de Conferência	2044
Artigo Científico	869
Capítulo de Livro	101
Revisão de Conferência	44
Revisão	13
Retratado	6
Livro	2
Artigo de Dados	2
Editorial	1

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

5.2 Evolução temporal e produção por países

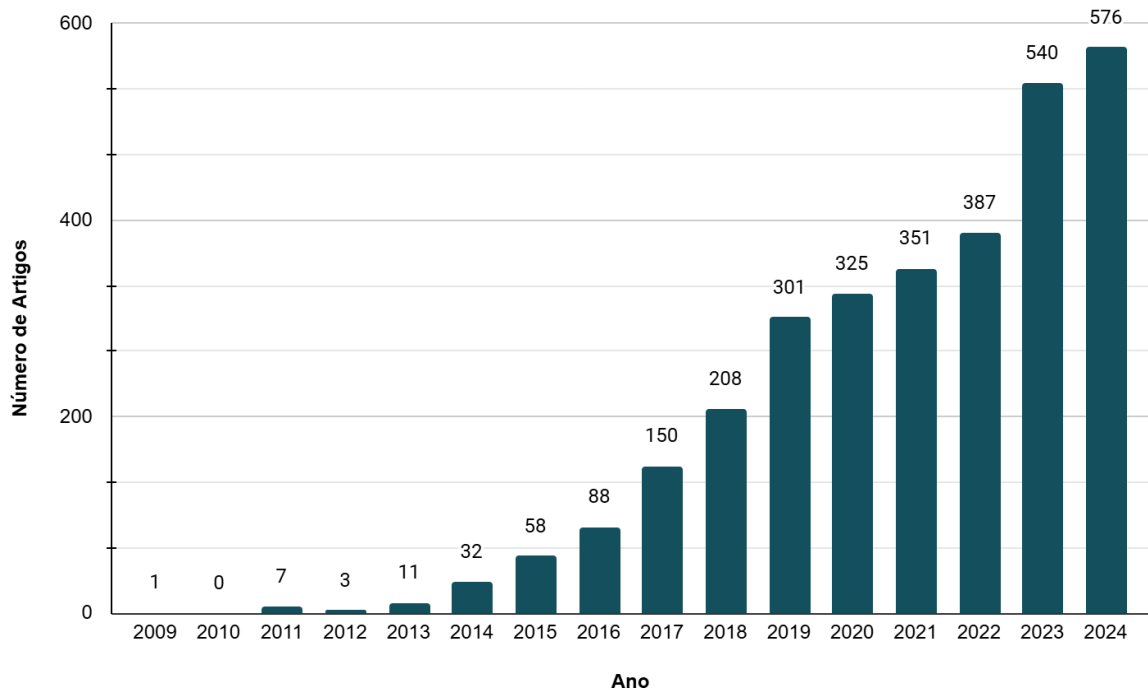
A análise temporal da produção científica entre 2011 e 2024 revela um crescimento expressivo no interesse pelo uso de Arduino no monitoramento ambiental. Entre 2011 e 2017, o número de publicações foi modesto, somando 349 documentos. A partir de 2018, esse cenário mudou, com um salto para 1793 publicações até 2024.

Dividindo o período em três fases, nota-se uma evolução clara: de 2011 a 2015, foram 87 trabalhos; entre 2016 e 2020, esse número subiu para 670; e de 2021 a 2024, o volume cresceu para 1287 publicações. Esse avanço não só indica uma expansão quantitativa, mas também uma possível consolidação e diversificação das metodologias aplicadas.

Nos anos iniciais, como 2009 e 2010, praticamente não houve produção (apenas 1 artigo em 2009). A partir de 2011, o crescimento foi gradual, ganhando força em 2017 com 150 publicações, chegando a 208 em 2018 e saltando para 301 artigos em 2019, sinalizando o início de uma trajetória mais robusta no campo.

Esse avanço se intensifica ainda mais na década de 2020, com 325 publicações em 2020, 351 em 2021, 387 em 2022 e 540 em 2023. Em 2024, o número atingiu seu ápice, com 576 artigos publicados, representando um aumento de mais de 160 vezes em relação à produção de 2011. Esses dados indicam uma consolidação do tema como campo de interesse científico, refletindo avanços tecnológicos, maior disponibilidade de sensores de baixo custo e crescimento das aplicações da Internet das Coisas (IoT) em contextos ambientais e agrícolas.

Gráfico 1 – Produção científica por ano.



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

No que diz respeito à distribuição geográfica da produção científica, observa-se uma ampla participação internacional, com autores provenientes de 88 países diferentes. Os países com maior número de publicações em artigos de conferência são: Índia (1.004), seguida por Indonésia (194), Malásia (120), Estados Unidos (90), Bangladesh (80), Filipinas (55), China (52), Iraque (30) e Itália (29). Esse panorama revela o protagonismo de países asiáticos no cenário das pesquisas analisadas, especialmente na última década, refletindo tanto o fortalecimento de seus sistemas nacionais de ciência e tecnologia quanto a ampliação de suas redes colaborativas internacionais.

A Índia, em especial, apresenta um crescimento extraordinário: de 0 publicações em 2011 e 2012, passa para 5 em 2013, e atinge 2199 publicações em 2024. Esse salto coloca o país como o líder absoluto em número de artigos, com uma curva de crescimento acentuada a partir de 2017 (140 artigos), e um avanço exponencial a partir de 2020, com 579 artigos, praticamente dobrando a produção ano a ano até 2024.

A Indonésia seguiu um padrão semelhante, ainda que em menor escala, saindo de apenas 1 publicação em 2013, para 408 em 2024, com crescimento estável e constante, principalmente a partir de 2017. Já a Malásia acompanha essa tendência, com evolução de 1

artigo em 2013 para 354 publicações em 2024, reforçando a centralidade do Sudeste Asiático na produção científica do tema.

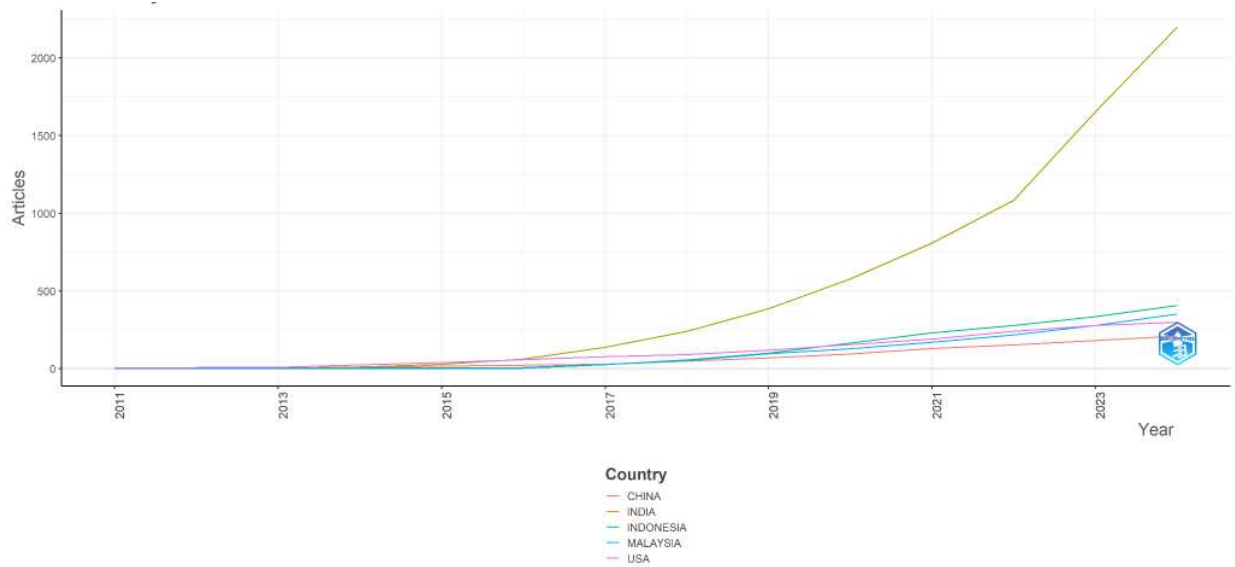
A China, por sua vez, apresenta um crescimento moderado e constante, saltando de 5 publicações em 2013 para 211 em 2024, enquanto os Estados Unidos demonstram uma presença mais constante e linear, com aumento progressivo de 7 artigos em 2011 para 301 em 2024. Ainda que não apresentem um crescimento exponencial como o da Índia, os EUA se mantêm entre os países mais produtivos desde o início da série histórica.

Esse panorama indica um deslocamento geográfico do eixo da produção científica, com países asiáticos emergentes assumindo protagonismo no desenvolvimento e aplicação de tecnologias ambientais, especialmente em contextos de agricultura de precisão, monitoramento da qualidade da água e do ar, e soluções baseadas em IoT.

A produção científica está concentrada em um conjunto específico de instituições, majoritariamente localizadas na Ásia Meridional e Sudeste Asiático, com destaque para universidades indianas e malaias. As instituições com maior número de publicações são a Universiti Teknologi MARA (Malásia) e o SRM Institute of Science and Technology (Índia), ambas com 45 publicações. Em seguida, destacam-se o Sri Sairam Engineering College, Chennai (38), o Vellore Institute of Technology (35) e o Sathyabama Institute of Science and Technology (31), todas localizadas na Índia.

Desse modo, o cenário institucional destaca a relevância de centros universitários tecnicamente orientados na produção e aplicação de tecnologias inteligentes voltadas a desafios ambientais, urbanos e produtivos, especialmente em contextos de países emergentes que têm investido em inovação e formação de mão de obra especializada.

Figura 20 – Produção científica anual por país.



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Tabela 7 - Instituições com maior número de publicações e relevância.

Instituição	Publicações
Universiti Teknologi MARA (Malásia)	45
SRM Institute of Science and Technology (Índia)	45
Sri Sairam Engineering College, Chennai (Índia)	38
Vellore Institute of Technology (Índia)	35
Sathyabama Institute of Science and Technology (Índia)	31

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

5.3 Relevância de fontes, publicações e pesquisadores

A análise das fontes de publicação revela uma forte concentração em anais de conferência e séries especializadas, o que reforça o caráter aplicado e em desenvolvimento contínuo das pesquisas sobre tecnologias ambientais e Internet das Coisas (IoT). A principal fonte identificada foi a AIP Conference Proceedings, com 100 publicações, seguida por Lecture Notes in Networks and Systems (71), Lecture Notes in Electrical Engineering (62), e o Journal of Physics: Conference Series (57). Essas séries são amplamente utilizadas para

divulgação de estudos que envolvem sistemas inteligentes, automação e integração tecnológica.

Outras fontes de destaque incluem as séries da IOP Conference Series, voltadas a áreas específicas como Earth and Environmental Science (30 artigos) e Materials Science and Engineering (30 artigos), além dos periódicos Sensors (29 artigos) e Sensors (Switzerland) (28 artigos), que apresentam elevado fator de impacto e abrangência internacional. Também merece menção o ACM International Conference Proceeding Series, com 27 publicações, evidenciando a relevância da comunidade da ciência da computação aplicada no contexto da pesquisa analisada.

Esse panorama confirma a predominância de veículos voltados à divulgação de estudos técnicos e experimentais, favorecendo a rápida circulação de resultados e a troca de experiências entre diferentes setores acadêmicos e industriais.

Tabela 8 – Fontes mais relevantes de publicações por número de documentos.

Fonte (Periódico/Série de Conferência)	Número de Documentos
Anais da Conferência AIP (AIP Conference Proceedings)	100
Lecture Notes in Networks and Systems	71
Lecture Notes in Electrical Engineering	62
Journal of Physics: Conference Series	57
Advances in Intelligent Systems and Computing	34
IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	30
IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	30
Sensors	29
Sensors (Switzerland)	28
ACM International Conference Proceeding Series	27

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Desse modo, as publicações com maior número de citações e relevância científica pertencem às categorias mais recorrentes na Scopus, fugindo a regra apenas o trabalho de Saini (2020), publicado como uma revisão (Tabela 9). Desse modo, os trabalhos com maior relevância em relação às áreas temáticas se destacaram no uso de redes de sensores na área de internet das coisas (IoT), integração de placas variadas, como Raspberry Pi, Arduino e ESP, uso de sensores para integração de sistemas na agricultura e qualidade do ar, restritos às áreas de ciência da computação, engenharia, medicina e meio ambiente, publicados entre os anos de 2014 a 2021, por universidades do Estados Unidos, Portugal, Índia e Vietnã, com predominância da língua inglesa.

Tabela 9 – Trabalhos mais relevantes por citações e área temática.

Tipo de documento	DOI	Citações	Autores	Instituição	Título	Área Temática	Ano de Publicação
Conference Paper	10.1016/j.procs.2014.07.059	359	Ferdoush et al.	Department of Electrical Engineering, University of North Texas	Wireless sensor network system design using Raspberry Pi and Arduino for environmental monitoring applications	Ciências da Computação	2014
Article	10.1109/JIOT.2019.2903821	293	Dhingra et al.	Business Intelligence and Analytics, Stevens Institute of Technology	Internet of things mobile-air pollution monitoring system (IoT-Mobair)	Ciências da Computação e Engenharia	2019
Conference Paper	10.1016/j.procs.2014.07.090	204	Abraham e Li	Department of Electrical Engineering, University of North Texas	A cost-effective wireless sensor network system for indoor air quality monitoring applications	Ciências da Computação	2014
Conference Paper	10.1109/WISPNET.2018.8538702	174	Sushanth e Sujatha	Department of ECE, Christ University	IOT Based Smart Agriculture System	Ciências da Computação	2018
Article	10.1007/s10916-016-0667-2	152	Pitarma et al.	Polytechnic Institute of Guarda – Research Unit for Inland Development	Monitoring Indoor Air Quality for Enhanced Occupational Health	Ciência da Computação e Medicina	2017

Conference Paper	10.1109/TENCO N.2016.7848162	152	Sathish Kumar et al.	Sri Ramakrishna Engineering College, Coimbatore TamilNadu	IOT based smart garbage alert system using Arduino UNO	Ciências da Computação e Engenharia	2016
Article	10.26599/BDMA.2020.9020018	143	Mabrouki e et al.	Laboratory of Spectroscopy Molecular Modelling Materials, Nanomaterial, Water and Environment, CERNE2D, Faculty of Science	IoT-based data logger for weather monitoring using arduino-based wireless sensor networks with remote graphical application and alerts	Ciências da Computação; Engenharia e Ciência de Materiais.	2021
Conference Paper	10.1109/ACC.2017.0075	130	Raju et al.	Dept. of CSE, SRKR Engineering College	Knowledge based real time monitoring system for aquaculture Using IoT	Ciências da Computação e Engenharia	2017
Article	10.3390/ijerph13111152	158	Marques e Pitarma	Unit for Inland Development, Polytechnic Institute of Guarda	An indoor monitoring system for ambient assisted living based on internet of things architecture	Meio Ambiente	2016
Article	10.1007/s10661-018-6914-x	151	Saravanan et al.	VNU Information Technology Institute, Vietnam National University	Real-time water quality monitoring using Internet of Things in SCADA	Meio Ambiente	2018

Review	10.3390/ijerph17144942	137	Saini et al.	Instituto de Telecomunicações, Universidade da Beira Interior	Indoor air quality monitoring systems based on internet of things: A systematic review	Meio Ambiente	2020
Conference Paper	10.1109/R10-HTC.2016.7906792	88	Singh e Saikia	Department of Electronics and Communication, JSS Academy of Technical Education	Arduino-based smart irrigation using water flow sensor, soil moisture sensor, temperature sensor and ESP8266 WiFi module	Meio Ambiente	2016
Article	10.3390/environments8010006	74	Hong et al.	Faculty of Integrated Technologies, Universiti Brunei Darussalam, Jalan Tungku Link	Water quality monitoring with arduino based sensors	Meio Ambiente	2021

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Por fim, os autores com maior volume de publicações sobre aplicações de Internet das Coisas (IoT) e sistemas embarcados em contextos ambientais e agrícolas. O autor Marques, G. se destaca como o mais produtivo, com 10 publicações no tema. Em seguida, aparece Sung, W.T., com 8 trabalhos, e Klym, H. e Mutiara, G.A., ambos com 7 publicações. Outros autores como Hsiao, S.J., Lloret, J., Pitarma, R., Sajak, A.A.B. e Salamone, F. também figuram entre os mais ativos, cada um com 6 artigos publicados.

Esses autores concentram sua produção científica em áreas como Ciência da Computação (11 documentos), Engenharia (5) e Ciências Ambientais (3), além de contribuições pontuais em Medicina, Ciências da Decisão, Energia, Gestão e Negócios, Ciências Sociais e Profissões da Saúde. Tal diversidade temática indica uma interdisciplinaridade crescente na abordagem de tecnologias inteligentes aplicadas ao monitoramento ambiental, sustentabilidade e automação de processos.

Tabela 10 - Número de publicações por autor.

Autor	Publicações
Marques, G.	10
Sung, W.T.	8
Klym, H.	7
Mutiara, G.A.	7
Hsiao, S.J.	6
Lloret, J.	6
Pitarma, R.	6
Sajak, A.A.B.	6
Salamone, F.	6
Abdul-Rahaim, L.A.	5

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

5.5 Termos e rede de co-ocorrência

A partir da busca realizada na base de dados Scopus, foi possível extrair os termos mais frequentes nos títulos das publicações, representados em forma de bigramas (pares de palavras que aparecem juntas com maior recorrência). Esses termos foram organizados em um mapa de árvore (Gráfico 1) que evidencia as principais abordagens temáticas presentes nos trabalhos analisados.

Destacam-se expressões como “*monitoring system*” (470 ocorrências), “*IoT based*” (223), “*quality monitoring*” (193), “*air quality*” (188), “*water quality*” (159) e “*irrigation system*” (104), o que indica uma forte ênfase em sistemas de monitoramento ambiental apoiados por tecnologias de Internet das Coisas (IoT). Outros termos relevantes, como “*machine learning*” (96), “*wireless sensor*” (92) e “*sensor network*” (78), reforçam a presença de soluções baseadas em automação, inteligência computacional e redes sensoriais distribuídas.

Essa distribuição revela uma predominância de aplicações voltadas à monitorização de qualidade ambiental, especialmente em contextos como qualidade do ar e da água, agricultura de precisão, irrigação inteligente e gestão de resíduos, sinalizando as áreas de maior interesse e desenvolvimento técnico entre os estudos analisados.

Figura 21 – Distribuição de termos em bigramas por publicação.



Fonte: elaborada pelo autor, (2025).

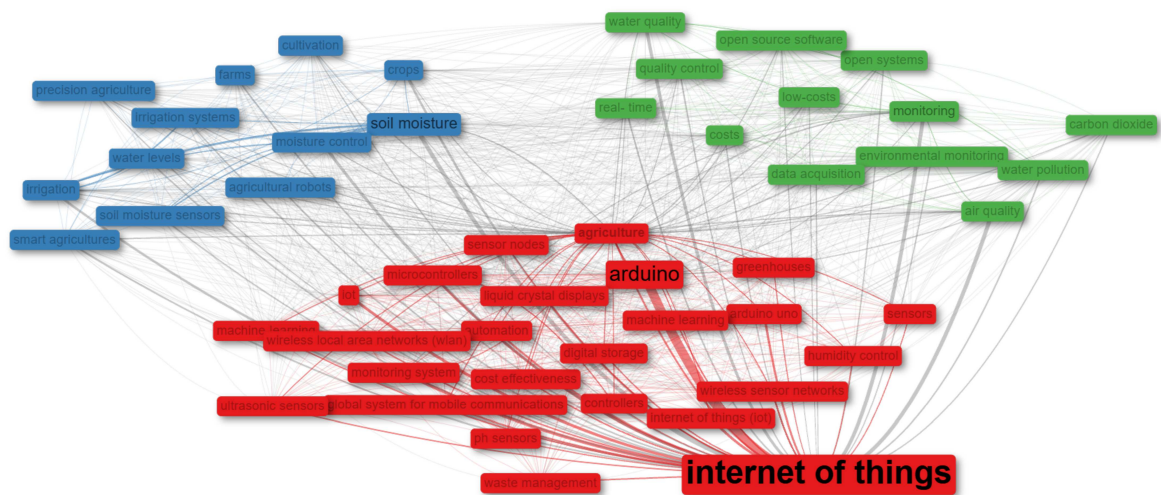
Complementando a análise dos termos mais frequentes nos títulos das publicações, foi construída uma rede de co-ocorrência com base nos termos técnicos presentes nos resumos dos trabalhos. O grafo gerado foi estruturado a partir de medidas de centralidade como *Betweenness*, *Closeness* e *PageRank*, e organizado por clusters temáticos, representando comunidades conceituais dentro do campo analisado.

Observa-se que o Cluster 1, liderado pelo termo “*Internet of Things*”, agrupa conceitos como “*arduino*”, “*monitoring system*”, “*wireless sensor networks*”, “*automation*” e “*machine learning*”, indicando uma forte convergência entre tecnologias embarcadas e soluções inteligentes de monitoramento. Já o Cluster 2 está relacionado à agricultura inteligente e irrigação, reunindo termos como “*soil moisture*”, “*precision agriculture*”, “*irrigation systems*” e “*agricultural robots*”, o que aponta para a consolidação de sub temas voltados ao uso de sensores em ambientes agrícolas.

Por fim, o Cluster 3 envolve tópicos ligados à qualidade ambiental, destacando “*air quality*”, “*water quality*”, “*environmental monitoring*” e “*data acquisition*”, sinalizando a preocupação com aspectos ambientais e sistemas de controle de qualidade automatizados.

A análise da rede revela uma estrutura temática dividida em três grupos temáticos: tecnologias IoT e microcontroladores, aplicações em agricultura inteligente, e monitoramento de qualidade ambiental, os quais dialogam entre si através de conceitos transversais como automação, sensores e eficiência de custos.

Figura 22 – Rede de co-ocorrência.



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

5.6 Avanços na temática

A análise bibliométrica revelou que, embora muitos estudos defendam o uso de sensores de baixo custo com plataformas como o Arduino como alternativa viável para o monitoramento ambiental, grande parte da literatura carece de rigor metodológico quanto à padronização técnica, reprodutibilidade dos sistemas desenvolvidos e documentação apropriada. Diversos trabalhos destacam o potencial dessas tecnologias pela acessibilidade, facilidade de uso e manutenção, principalmente em contextos com restrições orçamentárias (Kelley et al., 2014; Hong et al., 2021), mas não avançam em propor práticas sistematizadas que assegurem durabilidade, robustez ou reprodutibilidade.

Muitos dos artigos analisados falham em apresentar uma documentação completa dos circuitos, códigos-fonte, métodos de calibração ou estratégias de replicação. Por exemplo, sensores como o DS18B20 — amplamente utilizados para medir temperatura — podem ser

programados de dezenas de formas diferentes em C/C++, o que compromete a comparabilidade entre estudos e dificulta a construção de padrões técnicos comuns. A ausência de metodologias padronizadas para calibração, validação em campo e gestão de erros também aparece como um problema recorrente (exceto em artigos de sensores químicos para gases no ar, que utilizam metodologias padronizadas da instrumentação química).

No que se refere à engenharia dos protótipos, observa-se que poucos autores detalham mecanismos adequados de ancoragem física, invólucros resistentes ou estruturas de proteção que assegurem a estabilidade dos sensores em condições ambientais adversas — elementos fundamentais para o uso prolongado em campo (Santos et al., 2022). Muitos dispositivos são apresentados apenas como protótipos laboratoriais sem qualquer discussão sobre manutenção, reposição de componentes ou testes de resistência.

Do ponto de vista computacional, a ausência de boas práticas de programação é evidente. A maioria dos códigos compartilhados nos artigos e repositórios de códigos, como Github, possuem baixa legibilidade, lógica fragmentada e falta de modularização, contrariando princípios fundamentais como os do clean code, que facilitariam a reutilização e a colaboração técnica. Essa falta de padronização contribui para a baixa replicabilidade dos estudos, dificultando sua integração em bases de dados ou reuso por comunidades científicas e técnicas (Chataut et al., 2023).

Além disso, as formas de coleta, transmissão e armazenamento de dados são frequentemente limitadas e pouco robustas. Muitos projetos utilizam armazenamento local por cartão SD sem mecanismos de backup ou segurança de dados. Quando há telemetria, geralmente ela se limita a conexões ponto-a-ponto, como transmissão via antenas para um computador pessoal. Ferramentas modernas como dashboards interativos, plataformas de nuvem, protocolos seguros de comunicação e automação com inteligência artificial, como o uso de LLMs ou bibliotecas como PyTorch, raramente são incorporadas, mesmo em estudos recentes. Em geral, o uso de planilhas locais ainda predomina como forma final de análise e visualização.

Desse modo, a tabela 11 demonstra os trabalhos mais relevantes, em relação ao número de citações e data recente de publicação, além do número de acessos e downloads dos artigos, que utilizam tecnologias que refinam a utilização das PAs e resultados.

Tabela 11 - Artigos com aplicação de tecnologias de refino.

Título	Autor(es)	Ano	Tecnologias Utilizadas	DOI
<i>An Indoor Monitoring System for Ambient Assisted Living Based on Internet of Things Architecture</i>	Gonçalo Marques, Rui Pitarma	2016	Conexão em nuvem, transferência de dados sem fio, aplicativo para divulgação de dados, invólucro para comportar o hardware, aplicativo mobile para amostragem de dados	10.3390/ijerph13111152
<i>Open-source electronics Arduino platform for soil water measurement with the dual-probe heat-pulse (DPHP) method</i>	Shinsuke Aoki, Tamir Kamai	2024	Invólucro para comportar o hardware, esquema elétrico divulgado no artigo	10.1016/j.atech.2024.100637
<i>IoT-enabled effective real-time water quality monitoring method for aquaculture</i>	Rupali P. Shete, Anupkumar M. Bongale, Deepak Dharrao	2024	Invólucro para comportar o hardware, conexão em nuvem, transferência de dados sem fio, dashboard para visualização pública dos dados	10.1016/j.mex.2024.102906
<i>A Cost-Effective Wireless Sensor Network System for Indoor Air Quality Monitoring Applications</i>	Sherin Abraham, Xinrong Li	2014	Conexão em nuvem, transferência sem fio, rede de nós de sensores em hierarquia	10.1016/j.procs.2014.07.090

<i>E-agriculture of hydroponic farming with nutrient film technique (NFT) using internet of thing</i>	Agus Suheri, Sri Widaningsih, Uniq Fadilah Awalia	2014	Explicação do algoritmo, conexão em nuvem, transferência de dados sem fio, sistema de monitoramento conectado a um servidor remoto	10.1051/bioconf/202414601022
---	---	------	--	---

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Nesse sentido, a tabela 11 apresenta uma seleção de estudos que, além de possuírem alto impacto acadêmico, incorporam práticas metodológicas que ampliam a eficiência, a confiabilidade e a aplicabilidade dos sensores conectados a plataformas Arduino. Embora o uso de tecnologias como dashboards públicos, sistemas de transmissão sem fio, armazenamento em nuvem, aplicativos móveis, invólucros protetores e algoritmos otimizados não seja estritamente obrigatório para a operação básica dos sensores, sua presença nos projetos analisados demonstra um esforço contínuo de refinamento técnico.

Tais recursos agregam valor científico ao possibilitar maior reprodutibilidade, acessibilidade remota, integridade na coleta e segurança dos dados, elementos fundamentais para o uso profissional e acadêmico das plataformas embarcadas. Além disso, o uso de documentação detalhada, como esquemas elétricos e protocolos de comunicação, favorece a replicação dos projetos, contribuindo para a padronização e disseminação das boas práticas no desenvolvimento de sistemas de monitoramento ambiental. Assim, evidencia-se que a adoção dessas tecnologias complementares não apenas qualifica os estudos, mas também aproxima as soluções baseadas em Arduino de um nível mais robusto de validação científica e aplicação no mundo real.

5.7 Perspectivas Futuras

A análise dos trabalhos mais relevantes revela que há um esforço crescente na incorporação de boas práticas que tornam o uso de sensores com plataformas Arduino mais robusto e profissional. Tais práticas incluem a implementação de sistemas de telemetria, armazenamento em nuvem, invólucros adequados à exposição ambiental, aplicativos para visualização pública de dados, documentação do hardware e esquemas elétricos acessíveis, além da integração com dashboards online. Esses elementos, embora não sejam requisitos obrigatórios para o funcionamento básico dos sensores, representam avanços significativos no sentido de transformar projetos experimentais em soluções aplicáveis a longo prazo e em escala.

No entanto, observa-se que muitos trabalhos ainda não avançaram para uma padronização metodológica, especialmente em relação à estruturação dos códigos, à calibração dos sensores e à gestão dos dados obtidos. A ausência de boas práticas de desenvolvimento, como o uso de clean code, modularização dos scripts, validação cruzada com sensores comerciais e a replicabilidade dos procedimentos, compromete a confiabilidade e a expansão dessas soluções para contextos mais exigentes, como políticas públicas, pesquisa acadêmica em larga escala e aplicação em áreas remotas. Em muitos estudos, sensores que

possuem calibração por potenciômetros acoplados às placas de processamento são utilizados com abordagens de codificação muito distintas, tanto pelo hardware, quanto pelo software na IDE, o que dificulta a comparação entre resultados e o desenvolvimento de soluções integradas.

Assim, sugere-se que futuros trabalhos priorizem a adoção de diretrizes de desenvolvimento padronizado, com códigos bem documentados e calibrações validadas, de modo a fortalecer o caráter científico e replicável dos experimentos. A adoção de estratégias como burning the bootloader, uso de bibliotecas estáveis, invólucros com proteção IP, integração com dashboards interativos (como Looker Studio), e até mesmo automação por ferramentas baseadas em LLMs, como Python com bibliotecas de IA, podem ampliar significativamente a eficácia, o alcance e a sustentabilidade dos sistemas.

A difusão dessas práticas poderá consolidar as PAs como uma solução de baixo custo não apenas acessível, mas também tecnicamente sofisticada e alinhada às exigências das ciências ambientais contemporâneas, como os países asiáticos e os Estados Unidos têm feito desde a primeira década dos anos 2000.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar a produção científica global relacionada à aplicação de sensores conectados a sistemas baseados em Arduino no monitoramento ambiental, destacando o papel desses dispositivos no avanço da pesquisa ambiental acessível, de baixo custo e com potencial de aplicação em contextos diversos. A partir de uma análise bibliométrica realizada na base de dados Scopus — com o uso da biblioteca Bibliometrix no RStudio.

O aumento no número de publicações ao longo dos anos é evidente, com destaque para o período entre 2013 e 2024, que apresenta um crescimento constante e consolidado. O ano de 2024 registrou o maior número de publicações da série histórica, o que mostra que o uso de tecnologias abertas e acessíveis continua em expansão. Em termos geográficos, a liderança da produção científica se concentra nos países asiáticos, com a Índia despontando com 1.004 artigos de conferência, seguida por Indonésia (194) e Malásia (120), revelando não apenas o crescimento acadêmico nesses países, mas também a adoção prática dessas ferramentas em contextos sociais e ambientais diversos, especialmente onde há carência de equipamentos laboratoriais de alto custo.

Ao longo da revisão, foi possível identificar que os sensores mais utilizados são aqueles que permitem medições básicas, mas essenciais, como temperatura, umidade, condutividade elétrica, pH e concentração de gases. Sensores como o DS18B20, DHT22, FC-28, YL-69, MQ-135 e BME280 apareceram com frequência nos estudos, muitos deles conectados diretamente às placas Arduino UNO, MEGA ou ESP32. A escolha por esses sensores reflete uma tentativa de equilibrar custo, aplicabilidade e facilidade de implementação. No entanto, também foi possível notar a ausência de metodologias padronizadas nos projetos analisados. Mesmo quando se utilizam os mesmos sensores, os códigos-fonte, estratégias de calibração, técnicas de fixação e estruturas de armazenamento variam consideravelmente — algo que dificulta a replicabilidade e validação dos dados gerados.

A análise qualitativa dos trabalhos mais citados e recentes evidencia que, embora muitos estudos reconheçam a importância de sensores baseados em Arduino como soluções duráveis, econômicas e de fácil manutenção, poucos autores se preocupam em detalhar práticas que garantam essas qualidades na prática. São raros os artigos que apresentam técnicas de fixação por solda ou encapsulamento dos componentes, sistemas de backup de dados, visualização pública por dashboards, uso de clean code, ou até mesmo algum grau de automação na coleta e envio dos dados. O armazenamento frequentemente depende de cartões

SD sem redundância e a transferência de dados ainda ocorre, na maioria dos casos, para computadores pessoais via antenas sem fio, em vez de servidores remotos ou bancos de dados públicos.

Além disso, tecnologias que poderiam potencializar o impacto desses sistemas — como redes LoRa, conexões GSM/GPRS, dashboards com Google Looker Studio, e integração com ferramentas de IA para interpretação dos dados — ainda são subutilizadas. Em suma, o potencial transformador do Arduino ainda encontra barreiras, principalmente quando pensamos em uma aplicação mais estruturada, confiável e de longo prazo.

A sistematização dessas boas práticas se torna ainda mais importante em um cenário em que os dados ambientais são fundamentais para a gestão de recursos naturais, políticas públicas e educação ambiental. Em tempos de mudanças climáticas, crises hídricas, poluição do ar e degradação do solo, construir ferramentas confiáveis, abertas e replicáveis é também um compromisso ético e científico.

Assim, conclui-se que o uso de sensores e microcontroladores como o Arduino tem grande potencial para democratizar a coleta de dados ambientais, especialmente em contextos de pesquisa aplicada, educação técnica e monitoramento participativo. No entanto, para que esse potencial seja plenamente aproveitado, é urgente fortalecer práticas que garantam qualidade, durabilidade e reprodutibilidade, por meio de metodologias bem descritas, códigos padronizados, estratégias de armazenamento seguras e visualizações acessíveis.

O Arduino, enquanto ferramenta, já provou sua capacidade; cabe agora à ciência e à comunidade de desenvolvedores garantir que ele seja usado com o mesmo rigor com que se exigem as grandes tecnologias laboratoriais. Além disso, é necessário o entendimento e facilitação no que diz respeito ao aprendizado de tecnologias alternativas no meio acadêmico, como uma forma de inserir ferramentas modernas e didáticas, como as PAs. Desse modo, é importante identificar as dificuldades comuns no aprendizado desse tipo de ferramenta e traçar soluções para tais problemas, como o aprendizado da linguagem C++, que é algo quase exclusivo das graduações de programação, ciências da computação e áreas afins.

REFERÊNCIAS

- ABRAHAM, Sherin; LI, Xinrong. A cost-effective wireless sensor network system for indoor air quality monitoring applications. **Procedia Computer Science**, v. 34, p. 165-171, 2014. DOI: 10.1016/j.procs.2014.07.090. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050914009454>. Acesso em: 20. jun. 2025.
- ADA, L. Adafruit. **Adafruit SHT31-D Temperature & Humidity Sensor Breakout**. 2025. Disponível em: <https://learn.adafruit.com/adafruit-sht31-d-temperature-and-humidity-sensor-breakout>. Acesso em: 01 jun. 2025.
- AOKI, Shinsuke; KAMAI, Tamir. Open-source electronics Arduino platform for soil water measurement with the dual-probe heat-pulse (DHP) method. **Smart Agricultural Technology**, v. 9, p. 100637, 2024. DOI: 10.1016/j.atech.2024.100637. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375524002429>. Acesso em: 20. jun. 2025.
- ARDIANSAH, Irfan et al. Greenhouse monitoring and automation using Arduino: a review on precision farming and internet of things (IoT). **Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol**, v. 10, n. 2, p. 703-709, 2020. DOI: 10.18517/IJASEIT.10.2.10249. Disponível em: <https://core.ac.uk/outputs/325990265/>. Acesso em: 10 maio 2025.
- ARIA, Massimo; CUCCURULLO, Corrado. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of informetrics*, v. 11, n. 4, p. 959-975, 2017. DOI: 10.1016/j.joi.2017.08.007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1751157717300500>. Acesso em: 25 mai. 2025.
- ATMEL (Califórnia). **8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash**: datasheet. San José: Atmel, 2025. 294 p. Disponível em: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf. Acesso em: 03 jun. 2025.
- AUTODESK TINKERCAD. Mukesh Sankhla. Basics of Arduino (TINKERCAD). *In: AUTODESK TINKERCAD. Projects*. 25 fev. 2023. Disponível em: <https://www.tinkercad.com/projects/ELR3AR7LEBEG2MD>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- BANZI, Massimo; SHILOH, Michael. **Getting started with Arduino**: the open source electronics prototyping platform. 4. ed. Santa Rosa: Make Community, 2022. 285 p.
- BLACKSTOCK, Joshua M. et al. Monitoring atmospheric, soil, and dissolved CO₂ using a low-cost, Arduino monitoring platform (CO₂-LAMP): Theory, fabrication, and operation. **Frontiers in Earth Science**, v. 7, p. 313, 2019. DOI: 10.3389/feart.2019.00313. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2019.00313/full>. Acesso em: 10 jan. 2025.

BHUNIA, Swarup; TEHRANIPOOR, Mark M. Hardware security: a hands-on learning approach. **Morgan Kaufmann**, 2018. DOI: 10.1016/B978-0-12-812477-2.00007-1.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128124772000071?via%3Dihub>.

Acesso em: 20. fev. 2025.

CAVALCANTE, Marisa Almeida; TAVOLARO, Cristiane Rodrigues Caetano; MOLISANI, Elio. Física com Arduino para iniciantes. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, p. 4503-4503, 2011. DOI: 10.1590/S1806-11172011000400018. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbef/a/rrPFbrjsDdtkKKRPDPTJXnn/?lang=pt>. Acesso em: 20. jun. 2025.

CERQUEIRA, Bruno Pellozo et al. Estudo descritivo do Brazilian Journal of Transplantation: uma análise bibliométrica. **Brazilian Journal of Transplantation**, v. 27, p. e2524, 2024.

DOI: 10.53855/bjt.v27i1.579_PORT. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/bjt/a/sWLg58YFLx8DVbHz9Zv7sNP/>. Acesso em: 20. jun. 2025.

CHATAUT, Robin; PHOUMMALAYVANE, Alex; AKL, Robert. Unleashing the power of IoT: A comprehensive review of IoT applications and future prospects in healthcare, agriculture, smart homes, smart cities, and industry 4.0. **Sensors**, v. 23, n. 16, p. 7194, 2023.

DOI: 10.3390/s23167194. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/16/7194>.

Acesso em: 20 jun. 2025.

CIMPLEO (Hong Kong). **Arduino pH-meter using PH-4502C**. 2020. Disponível em:

<https://cimpleo.com/blog/arduino-ph-meter-using-ph-4502c/>. Acesso em: 09 jun. 2025.

DANGRACH, Meeral et al. IOT Based Fire System. **Journal of Applied Engineering & Technology (JAET)**, v. 5, n. 1, p. 19-30, 2021. DOI: 10.55447/jaet.05.01.31. Disponível em:

<https://jae-tech.com/index.php/jaet/article/view/31>. Acesso em: 20. jun. 2025.

DATACOMBR (Brasil). **Shield Data Logger Arduino**. DatacomBR, 2025. Disponível em:

https://datacombr.com.br/index.php?route=product/product&product_id=185. Acesso em: 9 jul. 2025.

DFROBOT. **Gravity: Analog Dissolved Oxygen / DO Sensor Meter Kit for Arduino**.

2025. Disponível em: <https://www.dfrobot.com/product-1628.html>. Acesso em: 09 jun. 2025.

DFROBOT. **Gravity: Analog Turbidity Sensor for Arduino**. 2025. Disponível em:

<https://www.dfrobot.com/product-1394.html>. Acesso em: 09 jun. 2025.

DHINGRA, Swati et al. Internet of Things mobile–air pollution monitoring system

(IoT-Mobair). **IEEE Internet of Things Journal**, v. 6, n. 3, p. 5577-5584, 2019. DOI:

10.1109/JIOT.2019.2903821. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8663367>.

Acesso em: 20. jun. 2025.

DIAS, F. D. O. et al. Bibliometric analysis of scientific production on carbon credits

(2012-2021). **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 17, n. 1, 2023. DOI:

10.24857/rgsa.v17n1-026. Disponível em:

<https://www.proquest.com/openview/e817680094a9f364b489b8db3d0cf027/1?pq-origsite=scholar&cbl=2031968>. Acesso em: 20. jun. 2025.

DOMÍNGUEZ-BRITO, Antonio C. et al. A DIY low-cost wireless wind data acquisition system used to study an arid coastal foredune. **Sensors**, v. 20, n. 4, p. 1064, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20041064>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/4/1064>. Acesso em: 20. jun. 2025.

DROUJKO, Jessica; KUNZ JR, Felix; MOLNAR, Peter. Ötz-T: 3D-printed open-source turbidity sensor with Arduino shield for suspended sediment monitoring. **HardwareX**, v. 13, p. e00395, 2023. DOI: 10.1016/j.ohx.2023.e00395. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067223000020>. Acesso em: 20. jun. 2025.

ECKEL, Tim. **NewPing Arduino Library for Arduino**. 2015. Disponível em: <https://bitbucket.org/teckel12/arduino-new-ping/wiki/Home>. Acesso em: 09 jun. 2025.

ELECTRO GADGET. **Water Tank Level Controller Using Arduino**. Tanmoy Kundu, 30 mai. 2025. Disponível em: <https://circuitdiagrams.in/water-tank-level-controller-using-arduino/>. Acesso em: 17. mai. 2025.

FAROUK, Muhammad Izz Hakimi Zaidi; JAMIL, Zadariana; LATIP, Mohd Fuad Abdul. Towards online surface water quality monitoring technology: A review. **Environmental research**, v. 238, p. 117147, 2023. DOI: 10.1016/j.envres.2023.117147. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935123019515>. Acesso em: 20. jun. 2025.

FERDOUSH, Sheikh; LI, Xinrong. Wireless sensor network system design using Raspberry Pi and Arduino for environmental monitoring applications. **Procedia Computer Science**, v. 34, p. 103-110, 2014. DOI: 10.1016/j.procs.2014.07.059. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050914009144>. Acesso em: 20. jun. 2025.

GOMES, Lara Poliana Melo. **Análise do uso de indicador natural de pH à base de betalaína em comparação com a fenolftaleína para a avaliação da profundidade de carbonatação do concreto**. 2020. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/e64b967f-fc69-43e2-89de-e3055ae5d64f>. Acesso em: 09 jun. 2025.

GOWRI, S.; PRANATHI, Pola; SRAVYA, Kodali. Automated water tank overflow control unit integrated with mobile application. **International Journal on Information Sciences and Computing**, v. 9, n. 2, 2015. DOI: 10.18000/ijisac.50155. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/304548969_Automated_Water_Tank_Overflow_Control_Unit_Integrated_with_Mobile_Application. Acesso em: 20. jun. 2025.

HAVLIK, Ivo et al. On-line monitoring of biological parameters in microalgal bioprocesses using optical methods. **Energies**, v. 15, n. 3, p. 875, 2022. DOI: 10.3390/en15030875. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/3/875>. Acesso em: 20. jun. 2025.

HILAL, Yousif Yakoub et al. Automatic water control system and environment sensors in a greenhouse. **Water**, v. 14, n. 7, p. 1166, 2022. DOI: 10.3390/w14071166. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/7/1166>. Acesso em: 20. jun. 2025.

HONG, Wong Jun et al. Water quality monitoring with arduino based sensors. **Environments**, v. 8, n. 1, p. 6, 2021. DOI: 10.3390/environments8010006. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3298/8/1/6>. Acesso em: 20. jun. 2025.

HOROWITZ, Paul; HILL, Winfield. **THE ART OF ELECTRONICS**. 3. ed. New York: Cambridge University Press, 2015. 1224 p.

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA (Brasil). **AULA 2 - Microcontroladores - Engenharia**. Santa Catarina: MediaWiki IFSC, [2025]. Disponível em: https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA_2_-_Microcontroladores_-_Engenharia. Acesso em: 9 jul. 2025.

JO, Byung Wan; KHAN, Rana Muhammad Asad. An event reporting and early-warning safety system based on the internet of things for underground coal mines: A case study. **Applied Sciences**, v. 7, n. 9, p. 925, 2017. DOI: 10.3390/app7090925. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/7/9/925>. Acesso em: 20. jun. 2025.

KELLEY, Christopher D. et al. An affordable open-source turbidimeter. **Sensors**, v. 14, n. 4, p. 7142-7155, 2014. DOI: 10.3390/s140407142. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/14/4/7142>. Acesso em: 20. jun. 2025.

KIM, Sung-Min; CHOI, Yosoon; SUH, Jangwon. Applications of the open-source hardware Arduino platform in the mining industry: A review. **Applied Sciences**, v. 10, n. 14, p. 5018, 2020. DOI: doi.org/10.3390/app10145018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/14/5018>. Acesso em: 20. jun. 2025.

KUMAR, N. Sathish et al. IOT based smart garbage alert system using Arduino UNO. In: **2016 IEEE region 10 conference (TENCON)**. IEEE, 2016. p. 1028-1034. DOI: 10.1109/TENCON.2016.7848162. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7848162>. Acesso em: 20. jun. 2025.

LEWIS, Andrew J.; CAMPBELL, Michael; STAVROULAKIS, Petros. Performance evaluation of a cheap, open source, digital environmental monitor based on the Raspberry Pi. **Measurement**, v. 87, p. 228-235, 2016. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.03.023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224116001871>. Acesso em: 20. jun. 2025.

MABROUKI, Jamal et al. IoT-based data logger for weather monitoring using arduino-based wireless sensor networks with remote graphical application and alerts. **Big Data Mining and Analytics**, v. 4, n. 1, p. 25-32, 2021. DOI: 10.26599/BDMA.2020.9020018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9321200>. Acesso em: 20. jun. 2025.

MANOJ, M. et al. State of the art techniques for water quality monitoring systems for fish ponds using iot and underwater sensors: A review. **Sensors**, v. 22, n. 6, p. 2088, 2022. DOI: 10.3390/s22062088. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/6/2088>. Acesso em: 20. jun. 2025.

MARQUES, Gonçalo; PITARMA, Rui. An indoor monitoring system for ambient assisted living based on internet of things architecture. **International journal of environmental research and public health**, v. 13, n. 11, p. 1152, 2016. DOI: 10.3390/ijerph13111152. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/13/11/1152>. Acesso em: 20. jun. 2025.

MARWEDEL, Peter. Embedded system design: embedded systems foundations of cyber-physical systems, and the internet of things. **Springer Nature**, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-60910-8. Disponível em: <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/46817>. Acesso em: 20. jun. 2025.

MOHANKUMAR, A.; GOWTHAM, R. Revolutionizing automated agriculture: a brief overview of an advanced smart agricultural system using Arduino UNO. **Ir. Interdiscip. J. Sci. Res.(IIJSR)**, v. 8, n. 1, p. 13-23, 2024. DOI: 10.46759/IIJSR.2024.8103. Disponível em: <https://iijrs.com/data/uploads/48373.pdf>. Acesso em: 20. jun. 2025.

MONK, Simon. **30 Arduino Projects for the Evil Genius**. 2. ed. New York: McGraw Hill Tab, 2012. 224 p.

MONK, Simon. **Programming Arduino: Getting Started with Sketches, Second Edition**. 2. ed. New York: McGraw Hill Tab, 2016. 192 p.

MESAS-CARRASCOSA, F. J. et al. Open source hardware to monitor environmental parameters in precision agriculture. **Biosystems engineering**, v. 137, p. 73-83, 2015. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.07.005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511015001208>. Acesso em: 20. jun. 2025.

MÉNDEZ-BARROSO, L. A. et al. Design and implementation of a low-cost multiparameter probe to evaluate the temporal variations of water quality conditions on an estuarine lagoon system. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 11, p. 710, 2020. DOI: 10.3389/feart.2019.00221. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-020-08677-5>. Acesso em: 20. jun. 2025.

NETO, Valmir Gonçalves Campos. **Estudo do eletrodo de vidro para o seu reaproveitamento em medições de íons Pb(II)**. 2021. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Química, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Inhumas, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ifg.edu.br/handle/prefix/817>. Acesso em: 09 jun. 2025.

ORAZI, L. et al. UV picosecond laser processing for microfluidic applications. **Materials Research Proceedings**, v. 35, 2023. DOI: 10.21741/9781644902714-40. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/373681687_UV_picosecond_laser_processing_for_microfluidic_applications. Acesso em: 20. jun. 2025.

PALLÁS-ARENY, Ramón; WEBSTER, John G.. **Sensors and signal conditioning**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2012. 608 p.

PANE, Muhammad Akbar Syahbana; SALEH, Khairul. Measuring Soil Moisture in Real-Time: Arduino Uno Based Tool Innovation. **Journal of Information Systems and**

Technology Research, v. 4, n. 1, p. 37-43, 2025. DOI: 10.55537/jistr.v4i01.1035. Disponível em: <https://journal.aira.or.id/index.php/jistr/article/view/1035>. Acesso em: 15. mai. 2025.

PAPADIMITROPOULOS, N.; DALACOSTA, K.; PAVLATOU, E. A. Teaching chemistry with Arduino experiments in a mixed virtual-physical learning environment. **Journal of Science Education and Technology**, v. 30, n. 4, p. 550-566, 2021. DOI: 10.1007/s10956-020-09899-5. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10956-020-09899-5>. Acesso em: 20. mai. 2025.

PEREIRA, Pedro F.; RAMOS, Nuno MM. Low-cost Arduino-based temperature, relative humidity and CO2 sensors-An assessment of their suitability for indoor built environments. **Journal of Building Engineering**, v. 60, p. 105151, 2022. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.105151. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710222011585>. Acesso em: 20. jan. 2025.

PEREIRA, S. X.; ARAÚJO, RCC. Desenvolvimento de módulos das Estações móveis para Aplicação ao Sistema Telemétrico RailBee. **Engenharia Elétrica e de Computação: Atividades Relacionadas com o Setor Científico e Tecnológico**, v. 3, p. 49-62, 2020. DOI: 10.22533/at.ed.6032006105. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/344943319_Desenvolvimento_de_Modulos_das_Estacoes_Moveis_para_Aplicacao_ao_Sistema_Telemetrico_RailBee. Acesso em: 20. jun. 2025.

PITARMA, Rui; MARQUES, Gonçalo; FERREIRA, Bárbara Roque. Monitoring indoor air quality for enhanced occupational health. **Journal of medical systems**, v. 41, n. 2, p. 23, 2017. DOI: 10.1007/s10916-016-0667-2. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10916-016-0667-2>. Acesso em: 20. jun. 2025.

PATTERSON, David; HENNESSY, John L. **Computer Organization and Design Arm Edition: The Hardware Software Interface**. Burlington: Morgan Kaufmann, 2016. 720 p.

PRAKASH, Chander et al. Advancements in smart farming: A comprehensive review of IoT, wireless communication, sensors, and hardware for agricultural automation. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 362, p. 114605, 2023. DOI: 10.1016/j.sna.2023.114605. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924424723004545?via%3Dihub>. Acesso em: 23 fev. 2025.

PRIYADARSINI, Viswasmayee et al. LabVIEW BASED REAL TIME MONITORING SYSTEM FOR COAL MINE WORKER. **i-Manager's Journal on Digital Signal Processing**, v. 6, n. 4, 2018. Disponível em: https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Aagcd%3A7%3A9879447/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Aagcd%3A137650486&crl=c&link_origin=scholar.google.com. Acesso em: 9 jul. 2025

PUTRA, Fauzan Prasetyo Eka et al. Application of Internet of Things Technology in Monitoring Water Quality in Fishponds. **Brilliance: Research of Artificial Intelligence**, v. 4, n. 1, p. 356-361, 2024. DOI: 10.47709/brilliance.v4i1.4231. Disponível em: <https://jurnal.itscience.org/index.php/brilliance/article/view/4231>. Acesso em: 20. abr. 2025.

RAISA (Brasil). **DS18B20: Sensor de Temperatura à Prova d'Água , Funcionamento e suas Aplicações**. Blog Raisal, 2023. Disponível em:

<https://blog.raisa.com.br/ds18b20-sensor-de-temperatura-a-prova-dagua-funcionamento-e-sua-s-aplicacoes/>. Acesso em: 9 mai. 2025.

RAJU, K. Raghu Sita Rama; VARMA, G. Harish Kumar. Knowledge based real time monitoring system for aquaculture using IoT. In: **2017 IEEE 7th international advance computing conference (IACC)**. IEEE, 2017. p. 318-321. DOI: 10.1109/IACC.2017.0075. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7976809>. Acesso em: 20. mar. 2025.

SANTOS, Daniel Moraes et al. The use of Arduino as a safe alternative in the handling of machines in the rural environment, especially the forage shredder. **International Journal of Geoscience, Engineering and Technology**, v. 5, n. 1, p. 40-44, 2022. DOI:10.70597/ijget.v5i1.472 . Disponível em: <https://revistas.ufvjm.edu.br/ijget/article/view/472>. Acesso em: 18. jun. 2025.

SANTOS, Glicia Vieira Dos; QUADROS, Ruy. Capacidades dinâmicas para a transformação digital: uma análise bibliométrica exploratória com VOSviewer. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 15, n. 7, p. e3970-e3970, 2024. DOI: /10.7769/gesec.v15i7.3970. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/3970>. Acesso em: 22. jun. 2025.

SARAVANAN, Krishnann et al. Real-time water quality monitoring using Internet of Things in SCADA. **Environmental monitoring and assessment**, v. 190, n. 9, p. 556, 2018. DOI: 10.1007/s10661-018-6914-x. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-018-6914-x>. Acesso em: 10. jun. 2025.

SAINI, Jagriti; DUTTA, Maitreyee; MARQUES, Gonçalo. Indoor air quality monitoring systems based on internet of things: A systematic review. **International journal of environmental research and public health**, v. 17, n. 14, p. 4942, 2020. DOI: 10.3390/ijerph17144942. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/14/4942>. Acesso em: 16. jun. 2025.

SEED STUDIO. **Grove - PH Sensor Kit (E-201C-Blue)**. 2023. Disponível em: <https://wiki.seeedstudio.com/Grove-PH-Sensor-kit/>. Acesso em: 15 jun. 2025.

SCHMIDT, Maik. **Arduino: A Quick-Start Guide**. Raleigh: The Pragmatic Bookshelf, 2015. 324 p. Disponível em: <https://digital.casalini.it/9781680505238>. Acesso em: 15 jun. 2025.

SCHWAMBACK, Dimaghi et al. Automated low-cost soil moisture sensors: trade-off between cost and accuracy. **Sensors**, v. 23, n. 5, p. 2451, 2023. DOI: 10.3390/s23052451. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/5/2451>. Acesso em: 20. jun. 2025.

SHARIPOV, Mirkomil et al. Recent progress in Arduino-and smartphone-based sensors for biochemical and environmental analysis. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 183, p. 118103, 2025. DOI: 10.1016/j.trac.2024.118103. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165993624005867>. Acesso em: 15. jun. 2025.

SHARMA, Sunil Kumar; PHAN, Haidang; LEE, Jaesun. An application study on road surface monitoring using DTW based image processing and ultrasonic sensors. **Applied Sciences**, v. 10, n. 13, p. 4490, 2020. DOI: 10.3390/app10134490. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/13/4490>. Acesso em: 20. jun. 2025.

SHETE, Rupali P.; BONGALE, Anupkumar M.; DHARRAO, Deepak. IoT-enabled effective real-time water quality monitoring method for aquaculture. **MethodsX**, v. 13, p. 102906, 2024. DOI: 10.1016/j.mex.2024.102906. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215016124003583?via%3Dihub>. Acesso em: 20. jun. 2025.

SINGH, Pushkar; SAIKIA, Sanghamitra. Arduino-based smart irrigation using water flow sensor, soil moisture sensor, temperature sensor and ESP8266 WiFi module. In: **2016 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)**. IEEE, 2016. p. 1-4. DOI: 10.1109/R10-HTC.2016.7906792. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7906792>. Acesso em: 13. abr. 2025.

SKULTETY, Emil; PIVARČIOVÁ, Elena; KARRACH, Ladislav. The comparing of the selected temperature sensors compatible with the Arduino platform. **Management Systems in Production Engineering**, 2018. DOI: 10.1515/mspe-2018-0027. Disponível em:

<https://sciendo.com/article/10.1515/mspe-2018-0027>. Acesso em: 12. abr. 2025.

SOUZA, Vitor OT et al. Method and System for Heart Rate Estimation Using Linear Prediction Filtering. *Signals*, v. 6, n. 2, p. 15, 2025. DOI: 10.3390/signals6020015. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2624-6120/6/2/15>. Acesso em: 16. abr. 2025.

SUHERI, Agus; WIDANINGSIH, Sri; AWALIA, Uniq Fadilah. E-agriculture of hydroponic farming with nutrient film technique (NFT) using internet of thing. In: **BIO Web of Conferences**. EDP Sciences, 2024. p. 01022. DOI: 10.1051/bioconf/202414601022.

Disponível em:

https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2024/65/bioconf_btmic2024_01022/bioconf_btmic2024_01022.html. Acesso em: 10. abr. 2025.

SUSHANTH, G.; SUJATHA, S. IOT based smart agriculture system. In: **2018 international conference on wireless communications, signal processing and networking (WiSPNET)**. IEEE, 2018. p. 1-4. DOI: 10.1109/WiSPNET.2018.8538702. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8538702>. Acesso em: 20. mar. 2025.

USINAINFO (Brasil). **Medidor de TDS Sensor de Condutividade da Água Analógico**. Rio Grande do Sul: USINAINFO, [2025]. Disponível em:

<https://www.usinainfo.com.br/outros-sensores-arduino/medidor-de-tds-sensor-de-condutivida-de-da-agua-analogico-8184.html>. Acesso em: 19 abr. 2025

VAHID, Frank; GIVARGIS, Tony D.. **Embedded System Design: A Unified Hardware / Software Introduction**. New York: Wiley, 2001. 352 p.