

Plataforma de Baixo Custo e com Hardware Aberto para Monitoramento da Qualidade do Ar

Low-cost and Open Hardware Platform for Air Quality Monitoring

Jean Poffo

Universidade do Estado de Santa Catarina
Ibirama - SC - Brasil
jean.poffo0@gmail.com

Fernando Santos

Universidade do Estado de Santa Catarina
Ibirama - SC - Brasil
fernando.santos@udesc.br

ABSTRACT

Air quality monitoring plays a fundamental role in preserving the health of the population. Despite its importance, it is a practice little exercised in different regions of the country, becoming an unfilled gap in public health. This paper proposes a low-cost platform built with open *hardware* to collect data on air quality and make it publicly available on the internet. The low cost of the platform can encourage volunteers to collect and disseminate climate data. The platform's *hardware* uses the NodeMCU microcontroller and sensors from the MQ, DSM and DHT families to measure the concentration of pollutants carbon monoxide, ozone and particulate matter, as well as temperature and humidity. These pollutants are indicated as harmful by the National Environmental Council. The platform also consists of *software* that provides *web* services to receive the collected data and a graphical interface to display the data in tabular and graphical format. Validation of the platform demonstrated its viability, being capable of collecting and displaying air quality data.

CCS Concepts

Hardware → *Sensor applications and deployments*;
Software and its engineering → *Designing software*;

Keywords

Air Quality; Internet of Things; Sensing Devices; NodeMCU

RESUMO

O monitoramento da qualidade do ar tem papel fundamental para preservar a saúde da população. Apesar da importância, é uma prática pouco exercitada nas diversas regiões do país, se tornando uma lacuna não preenchida na saúde pública. Este artigo propõe uma plataforma de baixo custo construída com *hardware* aberto para coletar dados

sobre a qualidade do ar e disponibilizá-los publicamente na internet. O baixo custo da plataforma pode incentivar voluntários na coleta e divulgação de dados climáticos. O *hardware* da plataforma utiliza o microcontrolador NodeMCU e sensores das famílias MQ, DSM e DHT para medir a concentração dos poluentes monóxido de carbono, ozônio e material particulado, bem como temperatura e umidade. Estes poluentes são indicados como nocivos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente. A plataforma também é composta por um *software* que disponibiliza serviços *web* para receber os dados coletados e uma interface gráfica para exibir os dados em formato tabular e gráfico. A validação da plataforma evidenciou sua viabilidade, sendo capaz de coletar e exibir os dados de qualidade do ar.

Palavras-Chave

Qualidade do Ar; Internet das Coisas; Dispositivos de Sensoriamento; NodeMCU

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento da qualidade do ar possui um papel fundamental na sociedade atual. Conforme Sant'anna et al. [17], a poluição do ar é um grande desafio para cidades e estados em todo o Brasil, sendo responsável por mais de 51 mil mortes anuais.

O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), criado em 1982, é um órgão consultivo e deliberativo, que tem como objetivo, conforme descrito na lei n° 6.938 de 31 de agosto de 1981, "assessorar, estudar e propor ao Conselho de Governo, diretrizes de políticas governamentais para o meio ambiente e os recursos naturais". A resolução CONAMA número 491/2018 estabelece limites de concentrações de poluentes que, quando ultrapassados, podem comprometer a qualidade do ar e, conseqüentemente, afetar a saúde, segurança e o bem-estar da população. Ainda conforme a resolução, existem várias partículas que compõem este conjunto de poluentes, entre elas estão: material particulado de 10 μm (MP₁₀), material particulado de 2,5 μm (MP_{2,5}), dióxido de enxofre (SO₂), dióxido de nitrogênio (NO₂), ozônio (O₃) e monóxido de carbono (CO) [5].

No estado de Santa Catarina, questões ambientais são reguladas pelo Instituto do Meio Ambiente (IMA). Porém,

Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. To copy otherwise, or republish, to post on servers or to redistribute to lists, requires prior specific permission and/or a fee.

segundo Amorim [1], “Santa Catarina não possui uma rede automática de monitoramento do ar”.

Existem diversos equipamentos para monitoramento da qualidade do ar, desde equipamentos portáteis até estações de monitoramento de grande estrutura em formato de torres, possuindo alto custo de aquisição. Ainda dentre os exemplos, os maiores equipamentos, com a finalidade de medir e transmitir os dados, podem ser extremamente complexos na sua implantação, exigindo grande planejamento e gastos em infraestrutura. Segundo diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil, “uma estação de monitoramento automática que contemple os poluentes regulamentados, custaria em torno de US\$350.000,00, sem incluir construção de abrigos, computadores, mão de obra, etc.”[9].

Soluções baseadas em Internet das Coisas (IoT) e construídas com plataformas abertas, começam a se tornar viáveis dentro do contexto do monitoramento da qualidade do ar, seja pela facilidade de implantação ou até mesmo pelo baixo custo de aquisição. O IoT, que nada mais é do que uma rede de dispositivos interconectados, já está amplamente popularizado no Brasil. Segundo Logicalis [11], cerca de 42% das empresas do país pretendem investir em IoT nos próximos 18 meses e 33% das empresas entrevistadas o consideram como um item da mais alta importância para os negócios no Brasil. Isso demonstra como esse movimento já está amplamente difundido no país.

Este artigo descreve a construção de uma plataforma de monitoramento do ar baseada em IoT. O objetivo é permitir o monitoramento dos dados climáticos e de poluentes descritos na resolução 491/2018 CONAMA, e disponibilizá-los publicamente. A plataforma é composta por um *hardware* aberto e de baixo custo, além de um sistema para processamento dos dados da qualidade do ar e disponibilização deles através de um *website*. A plataforma é capaz de coletar dados de temperatura, umidade, material particulado MP_{2,5}, monóxido de carbono (CO) e ozônio (O₃). No *website* os dados são informados em formato de boletim, trazendo a informação sobre a quantidade e a classificação das medições. Por ser de baixo custo, pessoas interessadas em serem voluntárias na coleta e divulgação dos dados climáticos podem adquirir e instalar a plataforma em suas casas.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A seção 2 apresenta a fundamentação teórica sobre qualidade do ar, os componentes utilizados para construção do *hardware* da plataforma proposta, e trabalhos relacionados. A seção 3 descreve o desenvolvimento da plataforma, contemplando o projeto do *software* e *hardware* envolvidos. A seção 4 apresenta a operacionalidade do sistema *web* que compõe a plataforma. Já a seção 5 apresenta a validação prática da plataforma. Por fim, a seção 6 apresenta conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Qualidade do Ar

Com o advento da industrialização, a produção em massa obteve toda a prioridade, enquanto a saúde da atmosfera e do planeta ficaram em segundo plano. Conforme Teixeira et al. [21], cada ser humano respira mais de 11.000 litros de ar todos

os dias, e muitas vezes a qualidade do ar é tratada como menos importante do que outros recursos.

Com o passar do tempo, a qualidade do ar foi comprometida e a poluição atmosférica tornou-se uma das questões ambientais mais complexas e, conseqüentemente, uma preocupação global. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS) [15], a poluição do ar aumenta em um ritmo alarmante, afetando as economias e a qualidade de vida das pessoas, tornando-se uma emergência de saúde pública.

No Brasil, a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) 491/2018 [5] determina quais devem ser as normas para a qualidade do ar e a responsabilidade dos estados pelo monitoramento do ar em seus territórios. Segundo essa resolução, um poluente atmosférico é:

“qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade” [5]

A resolução CONAMA 491/2018 estabelece os principais poluentes atmosféricos, e indica os níveis de nocividade de cada poluente em razão da sua quantidade presente no ar. Estes poluentes e níveis de nocividade são apresentados na Tabela 1.

Table 1: Poluentes e concentrações. Fonte: [5]

Nível	SO ₂	MP ₁₀	MP _{2,5}	CO	O ₃	NO ₂
Atenção	800	250	125	15	200	1130
Alerta	1600	420	210	30	400	2260
Emergência	2100	500	250	40	600	3000
Unidade medida	μg/m ³ (média 24h)	μg/m ³ (média 24h)	μg/m ³ (média 24h)	ppm (média móvel 8h)	μg/m ³ (média móvel 8h)	μg/m ³ (média 1h)

SO₂ = dióxido de enxofre. CO = monóxido de carbono.

O₃ = ozônio. NO₂ = dióxido de nitrogênio.

MP₁₀ = material particulado com diâmetro de 10μm. MP_{2,5} = material particulado com diâmetro de 2,5μm. ppm = partes por milhão.

Dentre os componentes que implicam a qualidade do ar, o dióxido de enxofre (SO₂) é um dos contribuintes para o fenômeno da chuva ácida, além de reagir com outros componentes e formar materiais particulados prejudiciais à saúde. O monóxido de carbono (CO), em quantidade elevada no ar pode comprometer a absorção de oxigênio e causar asfixia. O ozônio (O₃), em altas concentrações provoca irritações nos olhos e vias respiratórias. Por fim, o dióxido de nitrogênio (NO₂) que causa irritação nos pulmões e aumenta a sensibilidade à asma e à bronquite [7].

2.2 Plataforma NodeMCU

A Internet das Coisas (IoT) é um ecossistema que conecta objetos físicos, através de redes, para trocar, armazenar e coletar dados através de uma aplicação [4]. Para conexão desses dispositivos com a rede, se tornou cada vez mais comum o uso de microcontroladores, que são chips integrados capazes de efetuar processos lógicos com rapidez e precisão. Uma das

grandes vantagens de utilizar estes dispositivos é a sua possibilidade de programação, o que o torna adaptável a finalidade desejada [2]. Por fim, dentro das opções de microcontroladores existentes no mercado há o NodeMCU.

O conceito de NodeMCU surgiu em outubro de 2014, quase um ano após o lançamento do chip ESP8266 pela empresa Espressif. Basicamente, o dispositivo é um SoC (System-on-a-Chip), com a pilha do protocolo TCP/IP integrada. Ele pode ser definido como uma plataforma de IoT, de baixo custo e de código aberto [14]. O nome NodeMCU combina as palavras “node”, que significa nó, e “MCU”, um acrônimo comumente utilizado para microcontrolador [24]. A Figura 1 apresenta o modelo do NodeMCU V3 ESP8266.



Figure 1: NodeMCU. Fonte: [14].

O NodeMCU possui diversos pinos de conexão, entre eles: conectores de alimentação, conectores de aterramento, conectores digitais e analógicos. Entre os principais conectores, pode-se citar os de alimentação: 2 conectores de 3v, 1 conector VIN (*Voltage Input*) e 3 conectores GND (*Ground*). Já para conexões com dispositivos, a placa possui 11 conectores GPIO (*General Purpose Input or Output*), permitindo conectar com módulos, sensores e outros componentes eletrônicos. Por último, a placa possui somente 1 conector *Analog to Digital Converter* (ADC) [14]. A linguagem de programação utilizada no NodeMCU é a LUA, que apresenta algumas adaptações para a plataforma. Apesar de ser programada em LUA, a plataforma aceita diversas linguagens de programação, como MycroPython, C++ Toolchain e Arduino Programming Language, uma adaptação do C/C++ para o Arduino. Por suportar a linguagem de programação do Arduino, pode-se utilizar o *Arduino Integrated Development Environment* (IDE), que permite escrever o programa e enviar para o dispositivo.

Uma das vantagens em utilizar o NodeMCU é seu baixo custo de aquisição e seu ambiente multiplataforma. Possui facilidade em se conectar em redes *wi-fi*, pois é composto por um *chip* integrado e pronto para isso, tornando NodeMCU uma opção interessante para sistemas de IoT [25]. Além disso, possui um ambiente de desenvolvimento fácil de ser utilizado e pode ser programado utilizando-se apenas um cabo USB. Por fim, é um *hardware* e *firmware* de fonte aberta e possui um grande suporte da comunidade.

2.3 Sensores MQ

Com o advento do IoT, surgiram diversos sensores com a finalidade de coletar dados. Estes sensores convertem um estímulo qualquer para um sinal, para ser enviado a um circuito eletrônico. Os sensores podem ser de variados tipos e

de diferentes estímulos, como: acústico, elétrico, magnético, óptico, térmico e mecânico [16].

Os sensores de gás da família MQ são do tipo MOS (*Metal Oxide Semiconductor*), sensíveis a uma grande variedade de compostos que estão no ar. A saída do sinal destes sensores é analógica, podendo ser lida por uma entrada analógica [3]. Uma grande vantagem destes sensores é o custo acessível, comparado a outros tipos de sensores de gases presentes no mercado. Dentre os sensores MQ disponíveis, pode-se destacar o MQ-9 (sensor de monóxido de carbono CO), e também o MQ-131 (sensor de ozônio O₃).

2.4 Sensor DSM501A

O sensor DSM501A é um sensor de partículas que detecta partículas de fumaça e poeira. O sensor detecta partículas tão pequenas quanto 1 μm que flutuam em um espaço de até 30m³. O DSM501A é apresentado na Figura 2.



Figure 2: Sensor DSM501A. Fonte: [22].

Neste sensor, a detecção das partículas é realizada da seguinte forma: dentro do DSM501A há um resistor que gera calor para criar uma corrente ascendente de ar que extrai o ar exterior para dentro do compartimento. Neste compartimento há um led de luz infravermelha, fazendo com que a luz incida sobre as partículas dentro do compartimento. Por fim, a medição da dispersão de partículas é transformada em um pulso PWM (*Pulse Width Modulation*) [20].

Para conexão o DSM501A utiliza 5 pinos: VCC e GND para alimentação e aterramento, dois conectores com saída digital, sendo um fixo para trazer dados de material particulado de 1,0 μm , também conhecido como MP_{1,0}, e um configurável, podendo ser configurado para captar dados de material particulado entre 1,0 μm e 2,5 μm , sendo que de 2,5 μm é conhecido como MP_{2,5}, e por último um conector digital para potência do conector configurável. Através do conector VCC pode-se alimentar o sensor com 5v [20].

2.5 Sensor DHT22

O DHT22 é um sensor de umidade e temperatura, podendo efetuar medições de temperaturas entre -40 e 125 °C, e

umidade entre 0 e 100%. O seu funcionamento é baseado em dois componentes: um sensor de umidade capacitivo, e um termistor, que é um semiconductor sensível a temperatura que diminui a resistência com o aumento da temperatura [13]. A Figura 3 apresenta o sensor DHT22.

Este sensor possui 4 conectores, sendo que somente 3 deles são funcionais: VCC, DO, GND. Através do pino VCC podemos alimentar o dispositivo com tensões entre 3.3v e 6v. Por fim, o pino DO gera dados digitais que podem ser interpretados por diversas bibliotecas que fazem integração com o DHT22 [13].

2.6 Trabalhos Relacionados

Nesta seção são apresentados trabalhos relacionados que realizaram alguma análise da qualidade do ar utilizando plataformas de IoT. Foram considerados trabalhos com a pro-



Figure 3: Sensor DHT22. Fonte: [22].

posta de analisar alguma característica do ar, através de sensores acoplados a placas com algum microcontrolador.

No trabalho de Krieger [10], foi proposta a criação de um precipitador eletrostático. O sistema é composto por um funil de vidro, contendo uma grade metálica e uma haste de cobre, onde ao final do funil está um sensor de partículas acoplado a uma placa Arduino, que mede a quantidade de material particulado no ar. O trabalho é baseado no princípio do efeito corona, onde o material particulado do ar é carregado por uma alta tensão, ficando ionizado, e assim, sendo atraído para a grade metálica carregada positivamente.

O trabalho desenvolvido por da Silva [6] apresenta um sistema que mede a concentração de poluentes no ar e disponibiliza os dados publicamente. O sistema é composto por monitores, que contém sensores de gases conectados a um microcontrolador Arduino, que transmite os dados pela internet, para então serem disponibilizados em um sistema *web*. Quanto aos poluentes medidos, apesar de ser citada a resolução 003/1990 CONAMA (gases considerados prejudiciais a qualidade do ar), o trabalho coleta somente dados de dióxido de carbono e compostos carbônicos voláteis.

No trabalho de Voss and Júnior [23], é apresentada a construção de um nariz eletrônico para aplicações voltadas a agricultura. O dispositivo consegue detectar compostos voláteis que possam prejudicar a qualidade do ar e afetar diretamente toda espécie orgânica. O dispositivo é construído dentro de um recipiente cuja base é formada por um microcontrolador Arduino, onde são conectados diversos sensores de gases MQ e um sensor de temperatura e umidade DHT.

O trabalho proposto por Machado [12] tem como proposta criar uma rede de monitoramento da qualidade do ar na cidade de Londrina (PR). O dispositivo construído consegue monitorar

diversos poluentes presentes no ar e disponibiliza os dados em uma plataforma pública. O dispositivo foi construído sobre um microcontrolador Arduino, com um sensor de umidade DHT, um sensor de partículas DSM e sensores de gases MQ. Para conectividade com a internet, também foi acoplado um módulo *wi-fi*. O trabalho segue a legislação da qualidade do ar prevista pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, que define o índice da qualidade do ar baseado na quantidade dos componentes MP₁₀, MP_{2,5}, fumaça, O₃, CO, NO₂ e SO₂.

No trabalho de Strelow and Mendes [19], foi proposta a criação de um equipamento de monitoramento de gases obtidos a partir do processo de fermentação anaeróbica. A partir dos dados coletados, realizou-se um estudo sobre os resultados apresentados e a eficiência da medição dos dispositivos com relação as suas curvas de calibração. O sistema é montado com sua base um microcontrolador Arduino Uno, onde são acoplados sensores para monitorar a quantidade de gás metano, hidrogênio e dióxido de carbono.

Como pode-se verificar, há diversos sistemas que se propõem a fazer o monitoramento da qualidade do ar. Apesar de existir bastante semelhança de propósito entre eles, há diferenças pontuais nas coletas e análise de dados. O diferencial do trabalho de Krieger [10] é não se limitar a medição da quantidade de matéria particulado, mas também propor um dispositivo para remoção dele. Já o trabalho de da Silva [6] se caracteriza por fazer a medição da concentração de diversos poluentes presentes no ar e disponibilizar as informações em uma plataforma *web*. A ressalva é que a quantidade de poluentes monitorados na plataforma não atende a resolução do CONAMA. O trabalho de Voss and Júnior [23] se caracteriza por ter um sistema com maior variedade de gases que possam ser monitorados, por ter uma variedade maior de dispositivos sensoriais. Assim como o trabalho de da Silva [6], ele também não atende a todos os requisitos do CONAMA. Por sua vez, o trabalho de Machado [12] diz respeito a um monitoramento tanto de gases poluentes quanto a temperatura e a umidade. Todos os dados são disponibilizados em uma plataforma *web*. Como diretriz, o trabalho seguiu a legislação de qualidade do ar de Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Por fim, o trabalho de Strelow and Mendes [19] se propõe a monitorar os gases metano, hidrogênio e dióxido de carbono, obtidos através de fermentação aeróbica. Todos os trabalhos citados não seguem a resolução de qualidade do ar proposta pelo CONAMA. Com isso, o diferencial do projeto descrito neste artigo é agregar o máximo de sensores possíveis para conseguir medir a concentração dos poluentes dispostos na resolução 491/2018 CONAMA.

3. DESENVOLVIMENTO

Este trabalho propõe uma plataforma para monitoramento da qualidade do ar capaz de coletar dados de temperatura, umidade, material particulado MP_{2,5}, monóxido de carbono (CO) e ozônio (O₃). Esta seção descreve o desenvolvimento da plataforma, composta por uma estação (*hardware*) de coleta de dados da qualidade do ar, e por um sistema (*software*) para recepção e visualização dos dados. Inicialmente é descrito o processo de desenvolvimento do *software*, seus requisitos, casos de uso e diagramas de classe. Por fim, é especificado o processo de construção do *hardware*.

3.1 Especificação dos Requisitos

Esta seção apresenta os requisitos do projeto. Os requisitos são divididos em funcionais, não funcionais e regras de negócio. Os requisitos funcionais demonstram as funcionalidades do sistema. Os requisitos não funcionais demonstram as tecnologias e ferramentas utilizadas no projeto. Por último, as regras de negócio são diretrizes para os requisitos funcionais.

Requisitos Funcionais

- RF1. O sistema deve manter usuários.
- RF2. O sistema permitir o login dos usuários.
- RF3. O sistema deve manter estações de coleta de dados.
- RF4. O sistema deve manter dados coletados das estações.
- RF5. O sistema deve tratar e salvar os dados recebidos das estações em conformidade com a resolução CONAMA.

Requisitos Não Funcionais

- RNF1. O sistema deve utilizar arquitetura cliente-servidor.
- RNF2. O sistema deve utilizar ReactJS na plataforma web.
- RNF3. O sistema deve utilizar Node.js no servidor.
- RNF4. O sistema deve utilizar PostgreSQL para armazenar os dados coletados.

Regras de Negócio

- RN1. São dados de um usuário: nome, login e senha.
- RN2. São dados do login do usuário: login e senha.
- RN3. São dados de uma estação de coleta de dados: nome, latitude, longitude e se ela está ativa.
- RN4. São dados de monitoramento de um ponto de coleta: a estação associada, concentração de partículas respiráveis MP_{2,5}, concentração de monóxido de carbono, concentração de ozônio, temperatura e umidade.

3.2 Casos de Uso

O sistema é composto por dois atores, o usuário e a estação de coleta de dados. Para o usuário, existem dois tipos de acesso à plataforma: o acesso público, que apresenta todos os dados coletados das estações e o acesso mediante autenticação, que permite o gerenciamento das plataformas cadastradas no sistema. A estação utiliza um identificador previamente cadastrado no sistema para poder se conectar e enviar os dados. A Figura 4 apresenta o diagrama de casos de uso do sistema.

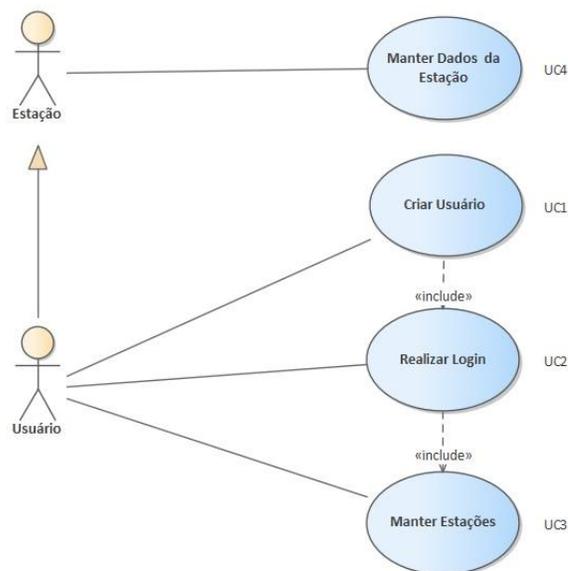


Figure 4: Diagrama de casos de uso

O caso de uso UC1, criar usuário, está relacionado com o requisito funcional RF1. O UC2, realizar login, está relacionado com o requisito funcional RF2. O UC3, manter estações, está relacionado com o requisito funcional RF3. Por fim, o UC4, manter dados da estação, está relacionado com os requisitos funcionais RF4, RF5 e RF6.

3.3 Projeto do Sistema

O sistema foi desenvolvido visando uma plataforma web, sendo projetado um back-end com uma estrutura de Application Programming Interface (API) de serviços, e um front-end composto por uma página web de dashboard. A API faz a coleta e distribuição dos dados, enquanto a página web é responsável por apresentar os dados coletados em conformidade com a resolução CONAMA.

A estrutura do sistema foi desenvolvida utilizando o paradigma de programação orientado a objetos, sendo que os objetos representam as entidades do sistema. O diagrama de classes da Figura 5 apresenta as entidades do sistema. Como são somente representações de entidades, são ilustrados somente os atributos delas.

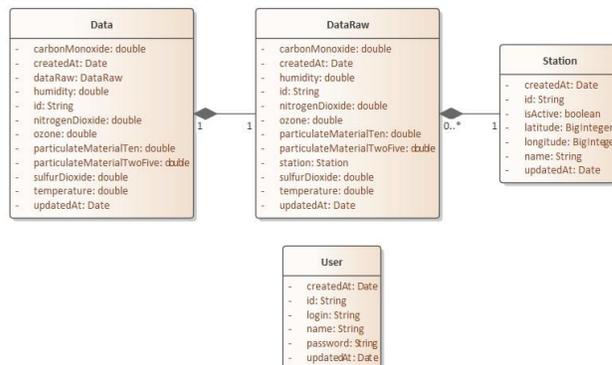


Figure 5: Diagrama de classes

A entidade *User* representa os usuários que podem acessar o sistema e executar operações restritas. *Station* é a

representação da estação de coleta de dados. *DataRaw* é a entidade que representa os dados sem tratamento, que são enviados diretamente das estações. E por último, *Data* representa os dados tratados conforme a resolução CONAMA e que são disponibilizados na plataforma *web*.

3.3.1 Back-end

O *back-end* foi desenvolvido desacoplado do restante do sistema, seguindo uma arquitetura de API de serviços, trazendo assim mais flexibilidade na distribuição dos dados, podendo ser reutilizada em diversas aplicações. O protocolo de comunicação adotado é o HTTP, utilizando o padrão REST. A Tabela 2 apresenta as rotas disponíveis na API de serviços. A rota de *data-raw* é utilizada pelas estações para envio dos dados. Essa rota também é responsável por fazer a conversão dos dados para as unidades de medida conforme a resolução CONAMA (ppm para $\mu\text{g}/\text{m}^3$). O restante das rotas são utilizadas pelo *front-end*.

Para a construção da API foi utilizado o Node.js, que é um ambiente de execução *server-side*. Foi utilizada esta tecnologia pela sua simplicidade para construir API, seu baixo uso de recursos computacionais e facilidade de integração com ferramentas Docker. A linguagem de programação escolhida foi a TypeScript, um super conjunto sintático estrito de JavaScript. Dentre as vantagens da TypeScript pode-se destacar a tipagem estática, apresentação de erros no momento da organização do código, amplo suporte da comunidade e uma empresa mantenedora de grande porte (Microsoft). Por fim, o banco de dados utilizado foi o PostgreSQL, um banco de dados relacional amplamente usado em aplicações *web*.

Table 2: Rotas da API de serviços.

Endpoint	Método	Descrição
/	GET	Retorna o status da API
/data-raw	POST	Cria os dados da leitura de uma estação
/dashboard	GET	Retorna os dados do dashboard
/session	POST	Cria uma sessão do usuário
/user	POST	Cria um usuário
/user/:id	DELETE	Exclui um usuário
/station	POST	Cria uma estação de coleta de dados
/station/:id	DELETE	Exclui uma estação de coleta de dados

3.3.2 Front-end

O *front-end* do sistema foi construído seguindo o modelo *Single Page Application* (SPA), concentrando todas as funcionalidades em uma única página *web*, o *Dashboard*.

Para desenvolvimento do *Dashboard*, foi utilizada a biblioteca ReactJS, prezando por uma arquitetura de componentes isolados, reaproveitáveis e de estado próprio. A utilização dessa biblioteca traz vantagens ao projeto, como a reutilização de componentes e a possibilidade de ter uma página *web* reativa. Como *system design*, foi utilizada a biblioteca Ant Design, trazendo uma estilização padrão para todo o sistema além de oferecer componentes prontos para serem usados com o ReactJS. A linguagem de programação utilizada no *front-end* também foi a TypeScript.

3.4 Projeto da Estação

O projeto da estação de coleta de dados é dividido em duas partes: projeto do *hardware* e projeto do *software* embarcado. No projeto do *hardware* é especificado a integração entre os componentes físicos, suas funcionalidades e soluções aos problemas encontrados. No projeto do *software* é descrito o sistema embarcado que executa no NodeMCU.

3.4.1 Projeto do Hardware

O projeto do *hardware* utiliza como base o microcontrolador NodeMCU, alimentado por uma fonte de energia de 9V, conectada à sua porta micro USB.

Uma das deficiências do NodeMCU é sua limitação de conectores *Analog to Digital Converter* (ADC), já que nos sensores MQ as saídas são geradas em formato analógico. Para suprir a necessidade de maior quantidade de portas analógicas, a estação proposta utiliza o conversor analógico digital ADS1015. O ADS1015 é capaz converter sinais analógicos em sinais digitais, aumentando assim o leque de sensores que podem ser acoplados ao NodeMCU.

A Figura 6 apresenta o projeto do circuito eletrônico da estação, com o microcontrolador NodeMCU, sensores e o conversor de sinal analógico. Não é necessário a utilização de resistores para integração dos componentes eletrônicos pois os sensores adotados estão prontos para serem acoplados diretamente a microcontroladores diversos. Já a Figura 7 exhibe como ficou uma estação construída.

Com a elaboração do projeto do *hardware*, foi possível avaliar o custo total de construção da plataforma considerando os componentes adicionais, conectores e outros gastos necessários. A Tabela 3 apresenta o custo para se construir a estação, considerando valores orçados em 2022 [22].

3.4.2 Projeto do Software Embarcado

Para o projeto e desenvolvimento do *software* embarcado no NodeMCU foi utilizado o Arduino IDE e a linguagem de programação C. O código fonte foi escrito de maneira procedural, dada a sua simplicidade. O código fonte é composto por dois métodos principais: *setup* e *loop*.

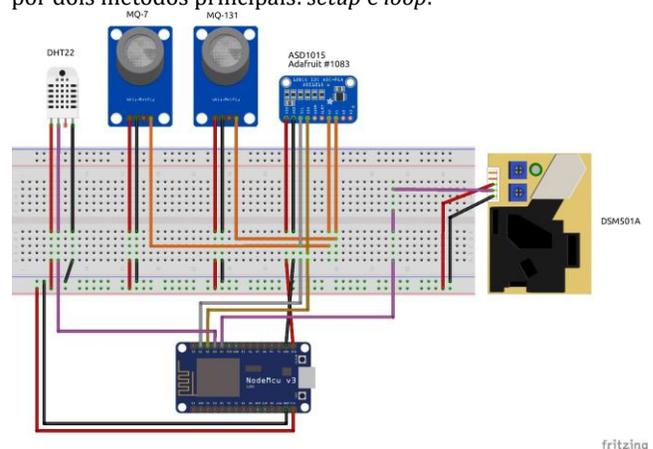


Figure 6: Projeto do *hardware* da estação de coleta.

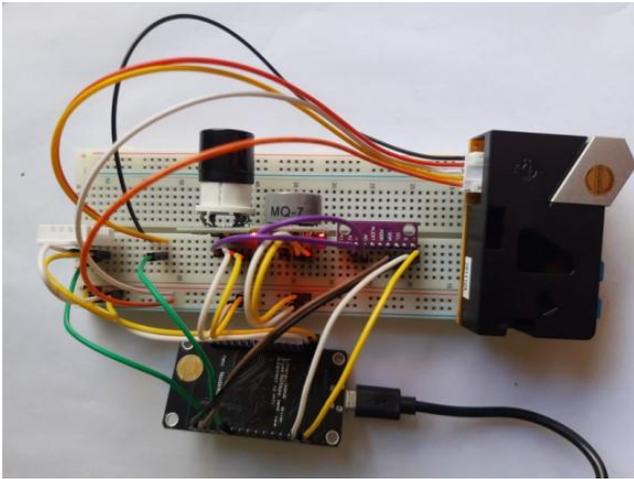


Figure 7: Estação de coleta de dados.

Table 3: Custo do *hardware* da estação.

Componente	Valor (R\$)
NodeMCU V3 ESP8266 ESP-12E	41,90
MQ-7	18,95
MQ-131	219,50
DSM501A	73,51
SHTC3 DHT22	38,90
ADS1015	76,60
Protoboard 830 pontos	19,90
Jumpers	2,00
Cabo Micro USB 1,2m	9,90
Total	501,16

O método *setup* é responsável por inicializar os componentes da estação (sensores, conversor analógico/digital e *wi-fi* do NodeMCU). Já o método *loop* faz a leitura dos sensores a cada 30 segundos, e envia esses dados para o sistema através de HTTP. A Figura 8 apresenta o código fonte deste método, que está relacionado ao caso de uso UC4.

Para verificar se os sensores estavam lendo valores e validar o código projetado, foram utilizados comandos para imprimir dados na porta serial do NodeMCU a fim de observá-los na Arduino IDE. Para estimular o sensor de CO, a estação foi posicionada próximo a queima de gás liquefeito de petróleo. Já para estimular o sensor de partículas, foram aplicadas dispersões de talco sobre o sensor. As verificações indicaram presença de gases e partículas no ar, evidenciando o funcionamento dos sensores e código fonte da estação.

```
void loop()
{
    duration = pulseIn(DSPIN, LOW);

    lowPulseOccupancy += duration;

    endTime = millis();
    if ((endTime - startTime) > sampleTime)
    {
        float ratio = lowPulseOccupancy / (sampleTime * 10.0);
        float pm25 = getParticleMgM3(ratio);
        float carbonMonoxide = ads.readADC_SingleEnded(0);
        float ozone = ads.readADC_SingleEnded(1) / 1000;
        float humidity = dht.readHumidity();
        float temperature = dht.readTemperature();

        sendData(pm25, carbonMonoxide, ozone, temperature, humidity);

        lowPulseOccupancy = 0;
        startTime = millis();
    }
}
```

Figure 8: Código para leitura e envio dos dados.

3.5 Disponibilização dos Projetos

Os projetos do sistema e da estação de coleta de dados foram disponibilizados em repositórios no Github, com acesso público. Os seguintes repositórios foram criados:

- aqm-server: contém o código do *back-end*, disponível em <https://github.com/JeanPoffo/aqm-server>.
- aqm-web: contém o código do *front-end*, disponível em <https://github.com/JeanPoffo/aqm-web>.
- aqm-hardware contém o código do *hardware*, disponível em: <https://github.com/JeanPoffo/aqm-hardware>.

4. OPERACIONALIDADE DO SISTEMA

Esta seção apresenta a operação do sistema *web* que permite visualizar os dados coletados e gerenciar as estações de coleta. A Figura 9 apresenta a tela principal do sistema, o *Dashboard*, que está relacionado com o caso de uso UC4. Além de exibir os dados agrupados por estação, é possível filtrar por período e por estações específicas.

A primeira tabela do *Dashboard* exibe os dados formatados dentro do padrão exigido pela resolução CONAMA, no caso: MP_{2,5} em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (média de 24h), CO em ppm (média móvel de 8h) e O₃ em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (média móvel de 8h). A segunda tabela (inferior/esquerda) apresenta os dados de temperatura e umidade. Os dados exibidos são a data e hora do registro, a temperatura em graus Celsius e a umidade em percentual. A terceira tabela (inferior/direita) apresenta os dados dos gases e material particulado. Os dados exibidos são a data e hora do registro, MP_{2,5} em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e os gases CO em ppm e O₃ em $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

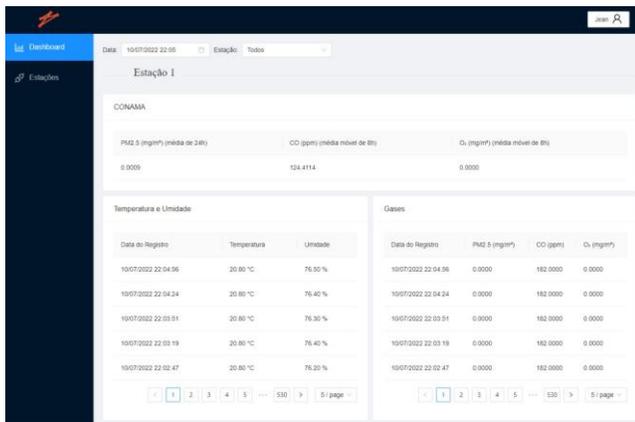


Figure 9: Dashboard do sistema.

O sistema permite gerenciar as estações de coleta de dados cadastradas. A Figura 10 apresenta a tela onde o sistema exibe as estações cadastradas, mostrando seu nome, localização, e se está ou não ativa. Esta tela está relacionada ao caso de uso UC3. O gerenciamento das estações é feito apenas mediante login no sistema, conforme caso de uso UC2. O sistema também oferece opção para criar usuários com acesso gerencial, atendendo ao caso de uso UC1.

Nome	Latitude	Longitude	Ativo?	Ações
Estação 1	-27.056692337255186	-49.53735186742745	Sim	Excluir
Estação 2	-27.03987162442284	-49.53332916588761	Sim	Excluir
Estação 3	-26.906128628335182	-49.09231592643938	Sim	Excluir

Figure 10: Gerenciador de estações ativas.

O sistema permite visualizar os dados coletados em gráficos, conforme apresentado na Figura 11. Através do gráfico mostrado na Figura 11(a) pode-se visualizar o nível de CO ao longo do tempo (eixo X, em horas) no período considerado. Já a partir do gráfico da Figura 11(b) visualiza-se o histórico de material particulado MP_{2,5} e gás O₃. Por fim, com os gráficos das Figuras 11(c) e 11(d) pode-se verificar os dados de temperatura e umidade coletados no período.

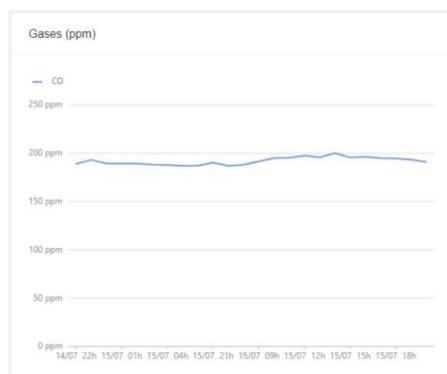
5. VALIDAÇÃO DA PLATAFORMA

Para validar a plataforma proposta, foram construídas duas estações e instaladas em pontos distintos na cidade de Ibirama/SC. A Figura 12 apresenta a estação 1, que foi posicionada em uma varanda, a uma altura aproximada de 7 metros, com pouca ventilação e abrigada de qualquer incidência direta do sol. Além disso, o local fica posicionado em frente a mata ciliar de um grande curso da água.

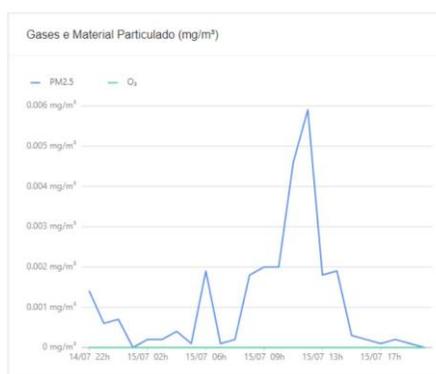
A estação 2 foi posicionada em um local aberto, a uma altura aproximada de 1 metro, com grande ventilação e uma leve incidência de raios solares. O local fica posicionado em frente a mata nativa. Essas estações coletam os dados em intervalos de 30 segundos, continuamente por 48 horas entre 09/07/2022 e 10/07/2022. Os dados coletados foram enviados diretamente para o servidor.



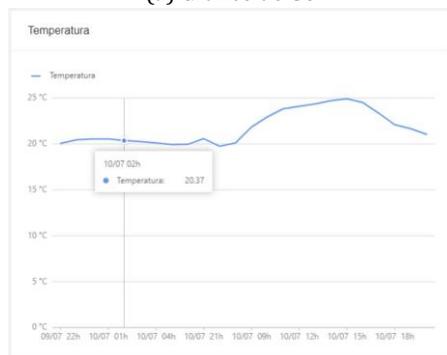
Figure 12: Estação 1 em avaliação.



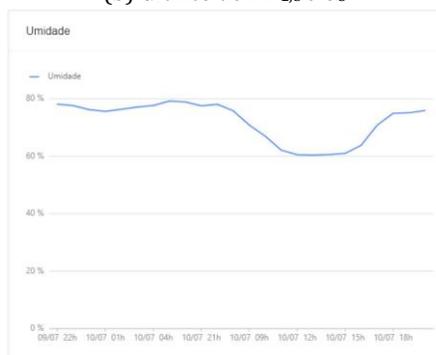
(a) Gráfico de CO



(b) Gráfico de MP_{2,5} e O₃



(c) Gráfico de Temperatura



(d) Gráfico de Umidade

Figure 11: Gráficos para visualização de dados coletados.

Para validar os dados de temperatura, foram coletados os dados provenientes do Google durante o período de 48 horas, pontualmente as 8:00, 12:00 e 20:00 horas. Já os dados provenientes da estação, foram verificados os que correspondem ao horário exato e as médias correspondentes a estes horários, sendo que a contagem se inicia no minuto 0 da hora até o minuto 59. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos. Como pode ser observado, a estação 1 teve divergência

dia pode ser explicada pelo fato de que a estação estar sujeita a incidência direta aos raios solares, aumentando assim seu aquecimento.

Para validar os dados de umidade, assim como na temperatura, foram coletados os dados provenientes do Google durante o mesmo período de 48 horas. Já os dados provenientes da estação, foram verificados os que correspondem ao horário exato e as médias correspondentes aos horários mencionados acima, sendo que a contagem se inicia no minuto 0 da hora até o minuto 59. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos.

Table 4: Dados de temperatura coletados (em °C).

Data	Hora	Google	Estação 1		Estação 2	
			Exato	Média	Exato	Média
09/07	08:00	16	20,10	20,26	17,50	18,46
09/07	12:00	23	23,00	23,35	25,90	25,84
09/07	20:00	16	20,50	19,90	17,70	17,10
10/07	08:00	18	19,80	20,11	18,40	19,28
10/07	12:00	24	23,90	24,10	33,40	30,22
10/07	20:00	17	21,40	19,89	18,60	18,00

Table 5: Dados de umidade coletados (em %).

Data	Hora	Google	Estação 1			Estação 2	
			Exato	Média	Exato	Média	
09/07	08:00	100	78,00	77,37	85,20	83,62	
09/07	12:00	64	63,00	62,65	51,30	47,85	
09/07	20:00	95	75,80	77,10	82,80	83,73	
10/07	08:00	90	76,90	75,83	82,00	77,86	
10/07	12:00	60	60,30	60,53	32,20	37,30	
10/07	20:00	96	75,20	75,93	83,10	84,77	

de temperatura ao longo do dia, se igualando a temperatura do Google somente ao meio-dia. Isso possivelmente se deve ao fato de ela estar em um ambiente mais isolado e com pouca ventilação. Já a estação 2 teve um desempenho melhor durante os períodos noturnos e matinais, em contrapartida, durante o horário do meio-dia houve divergência com as temperaturas do Google, atingindo até 6 C de diferença. Essa diferença ao meio-

Novamente, pode ser constatado que a estação 1 possui valores coerentes no período do meio-dia, porém apresenta divergência durante os períodos matinal e noturno. Assim como nos dados de temperatura, a umidade também teve uma divergência de valores em relação aos dados do Google na estação 1. Já na estação 2 todos os coletados foram diferentes daqueles apresentados pelo Google, sendo que no período do

meio-dia a diferença foi maior. Como já mencionado, a estação 2 recebe maior incidência de raios solares, possivelmente influenciando os dados de umidade, devido ao calor elevado.

Para validação dos gases, os dados coletados não foram comparados com dados de referência. O objetivo foi apenas verificar se as estações foram capazes de medir os gases em algum momento. Os dados são listados pela média na hora, sendo que a contagem se inicia no minuto 0 da hora até o minuto 59, em intervalos de 4 horas, dentro do período de 48 horas. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos.

Table 6: Dados de gases coletados.

Data	Hora	Estação 1		Estação 2	
		O ₃ (µg/m ³)	CO (ppm)	O ₃ (µg/m ³)	CO (ppm)
09/07	12:00	0,0000	196,0450	0,0000	269,3214
09/07	04:00	0,0000	183,6306	0,0000	246,5766
09/07	08:00	0,0000	181,0450	0,0000	249,1622
09/07	12:00	0,0000	184,8091	0,0000	232,6306
09/07	04:00	0,0000	205,1636	0,0000	232,1171
09/07	08:00	0,0000	190,6126	0,0000	231,5636
09/07	11:59	0,0000	190,9640	0,0000	238,2703
10/07	12:00	0,0000	189,6486	0,0000	237,9820
10/07	04:00	0,0000	186,9643	0,0000	232,4955
10/07	08:00	0,0000	183,7658	0,0000	228,8393
10/07	12:00	0,0000	185,0360	0,0000	229,4636
10/07	04:00	0,0000	187,0000	0,0000	232,7273
10/07	08:00	0,0000	183,6330	0,0000	227,1455
10/07	11:59	0,0000	180,6306	0,0000	225,0450

Como pode ser observado nas duas estações, os dados sofrem pequenas alterações ao longo do dia. Eles também se enquadram na especificação dos sensores, evidenciando que estes dados estão dentro dos limites esperados. Apesar disso, os valores captados pelos sensores não podem ser considerados totalmente coerentes pois não foram feitas comparação com dados de referência ou com algum sensor funcional.

Analisando os dados de CO, a estação 1 apresenta valores entre 180,6306 ppm e 205,1636 ppm e a estação 2 entre 225,0450 ppm e 269,3214 ppm. Estes valores indicam uma alta concentração do gás, sugerindo um nível de emergência de acordo com a resolução CONAMA. Contudo, como não foi feita uma comparação utilizando algum sensor de referência, e considerando que as pessoas que ocupavam os locais onde as estações foram instaladas não apresentaram problemas causados por elevada concentração de CO durante o período de avaliação, os dados coletados sugerem que pode ter ocorrido problemas na integração ou leitura deste sensor. Já com relação aos dados de O₃, verifica-se que eles permaneceram zerados durante o período considerado em ambas estações. Apesar de não ter sido realizada comparação com um sensor de referência, a região é ausente de emissores desse gás, sendo improvável a presença dele nas leituras.

Para validação dos materiais particulados, os dados são listados por hora, em intervalos de 4 horas, dentro do período de 48 horas. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos.

Como pode ser observado nas duas estações, a variação da quantidade de partículas durante o dia é baixa, havendo raros momentos em que houve maior concentração. A estação 1 apresenta dados com maiores quantidade de picos e somente três momentos em que o indicador de partículas ficou em zero.

Possivelmente a menor circulação de ar nessa estação faz com que as partículas no local se dispersem com maior dificuldade, deixando vestígios durante um longo período. A estação 2 apresentou dados em sua maioria aproximados de zero ou zerados. Possivelmente com a maior quantidade de ventilação presente na estação 2, a maioria das partículas suspensas no ar se dispersam mais rapidamente, não deixando vestígios a longo prazo.

Table 7: Dados de material particulado coletados.

Hora	MP _{2.5} (µg/m ³)	Estação 1 Estação 2 Data	
		MP _{2.5} (µg/m ³)	MP _{2.5} (µg/m ³)
09/07	00:00	0,0270	0,0000
09/07	04:00	0,0000	0,0001
09/07	08:00	0,0002	0,0124
09/07	12:00	0,0012	0,0358
09/07	16:00	0,0497	0,0015
09/07	20:00	0,0252	0,0006
09/07	23:59	0,0365	0,0001
10/07	00:00	0,0012	0,0000
10/07	04:00	0,0003	0,0000
10/07	08:00	0,0000	0,0001
10/07	12:00	0,0001	0,0000
10/07	16:00	0,0004	0,0173
10/07	20:00	0,0018	0,0018
10/07	23:59	0,0004	0,0000

6. CONCLUSÕES

Este artigo descreveu o desenvolvimento de uma plataforma aberta e de baixo custo para monitoramento da qualidade ar baseada em IoT. O objetivo da plataforma é permitir o monitoramento de poluentes indicados na resolução 491/2018 CONAMA [5]. A plataforma é composta por um *hardware* para coleta de dados e um *software* para disponibilizar publicamente e visualizar os dados coletados.

O *hardware* da plataforma foi construído utilizando o microcontrolador NodeMCU, sensores de gases da família MQ (especificamente o MQ-9 e MQ-131), sensor de partículas DSM501A, e o sensor de umidade e temperatura DHT22. Desta forma, a estação é capaz de coletar dados de monóxido de carbono (CO), ozônio (O₃), material particulado (MP_{2.5}), temperatura e umidade. Um sistema embarcado foi desenvolvido para o NodeMCU, que faz a leitura dos dados e envia para o servidor disponibilizá-los publicamente.

O *software* da plataforma é um sistema composto por um módulo *back-end*, que recebe e trata os dados coletados pela estação através de serviços, e um módulo *front-end*, que disponibiliza os dados coletados, em formato de tabelas e gráficos. Os dados disponibilizados seguem as unidades de medida e periodicidade indicados na resolução 491/2018 CONAMA para os poluentes coletados.

Para verificar o funcionamento da plataforma, duas estações foram construídas e instaladas na cidade de Ibirama (interior de SC). Os dados destas estações foram coletados por um período de 48 horas. Os resultados indicaram que a plataforma foi capaz de coletar e enviar os dados ao servidor, e que o sistema *web* foi capaz de disponibilizar os dados em tabelas e gráficos.

O custo para construção da plataforma de monitoramento ficou em R\$ 501,16 (em julho/2022). Este valor é significativamente inferior aos U\$ 350 mil apontado por

Instituto de Energia e Meio Ambiente (IMA) [9], evidenciando o baixo custo da plataforma.

Os dados coletados pela plataforma desenvolvida contemplam metade dos poluentes indicados na resolução 491/2018

CONAMA. É possível expandir a plataforma para contemplar os poluentes faltantes, mas isso implica em aumento do custo de construção. Para medir dióxido de nitrogênio (NO₂) é possível utilizar o sensor MICS 6814, que custa cerca de R\$ 328,18. Já para medir dióxido de enxofre (SO₂) há um sensor desenvolvido pela empresa DFRobot que custa U\$ 152,90 [8]. Para medir material particulado MP 10, pode-se utilizar um sensor disponível em Smart Prototyping [18] por U\$ 47,99. A expansão da plataforma com estes sensores e sua avaliação é sugerida como um trabalho futuro.

Outra sugestão de trabalho futuro é realizar uma avaliação da estação comparando os dados coletados com algum equipamento/sensor de referência. Isso permitirá uma avaliação mais assertiva, já que os dados provenientes do Google podem não ser suficientemente precisos e que muitas cidades não dispõem de estações de coleta de dados do ambiente e da qualidade do ar para enviar ao Google.

Por fim, para facilitar a implantação das estações por pessoas interessadas em serem voluntárias na coleta e divulgação de dados climáticos, sugere-se desenvolver maneiras de acessar o NodeMCU através de algum endereço estático e conectado a alguma rede aberta, para poder fazer a configuração do código da estação e outros dados dinâmicos, como o nome e senha da rede *wi-fi*. Isso eliminaria a especificação destes dados no código fonte do *software* embarcado.

7. AGRADECIMENTOS

Fernando Santos agradece a FAPESC pelo apoio financeiro recebido (TO2023TR246)

Referências

- [1] L. Amorim. Qualidade do ar melhorou em santa catarina durante a quarentena, mostra instituto, 2021. URL <https://ndmais.com.br/meio-ambiente/qualidadedo-ar-melhorou-em-santa-catarina-durante-aquarentena-mostra-instituto>.
- [2] P. D. K. B. Assis. *Microcontrolador*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da computação), UNIPAC, Barbacena, 2004.
- [3] M. Califa. MQSensorsLib, 2022. URL <https://github.com/miguel5612/MQSensorsLib>.
- [4] P. Carrion and M. Quaresma. Internet das coisas (IoT): Definições e aplicabilidade aos usuários finais. *Human Factors in Design*, 8(15):49–66, mar. 2019.
- [5] Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução N. 491 de 19 de Novembro de 2018, 2018. URL https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=766.
- [6] R. C. da Silva. *Rede de sensores de baixo custo para monitoramento da qualidade do ar na cidade de Porto Alegre*. Trabalho de Conclusão de Curso Superior (Tecnologia em Sistemas para Internet), IFRS, Porto Alegre, 2017.
- [7] A. C. C. de Lima. *Qualidade do ar na área de influência do polo industrial de Paulínia-SP*. Tese de Doutorado (Engenharia Química), UNICAMP, Campinas, 2002.
- [8] DFRobot. Gravity: Factory calibrated electrochemical SO₂ sensor (0-20ppm, i2c&uart), 2024. URL <https://www.dfrobot.com/product-2514.html>.
- [9] Instituto de Energia e Meio Ambiente (IMA). 1^o diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil, 2014. URL <http://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2014/01/1-diagnosticoda-rede-de-monitoramento-da-qualidade-do-ar-no-brasil.pdf>.
- [10] P. A. Krieger. *Uso de sensor de partículas na saída de um precipitador eletrostático utilizando hardware livre (Arduino)*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em engenharia ambiental), UTFPG, Medianeira, 2016.
- [11] Logicalis. IoT snapshot 2022, 2022. URL <https://imagine.la.logicalis.com/iot-snapshot-2022>.
- [12] B. L. F. Machado. *Sistema De Monitoramento Da Qualidade Do Ar Por Meio De Micro Sensores Aplicado Ao Conceito De Cidade Inteligente*. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental), UTFPR, Londrina, 2017.
- [13] A. Mota. DHT11 e DHT22 sensor de umidade e temperatura com arduino, 2017. URL <https://portal.vidadesilicio.com.br/dht11dht22-sensor-de-umidade-e-temperatura/>.
- [14] NodeMCU. NodeMCU 3.0.0, 2022. URL <https://github.com/nodemcu/nodemcu-firmware>.
- [15] Organização Mundial da Saúde (OMS). Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease, 2016. URL <https://www.who.int/publications/i/item/9789241511353>.
- [16] R. Roth. IoT – sensores que facilitam a vida, 2020. URL <https://blog.novus.com.br/artigo-iotsensores-que-facilitam-a-vida/>.
- [17] A. Sant’anna, A. Alencar, B. Pinheiro, C. Araújo, E. Vormittag, H. Witcher, K. Borges, M. Faria, M. d. F. Andrade, P. Porto, P. Artaxo, R. Rocha, T. Esturba, and W. F. De Simoni. O estado da qualidade do ar no Brasil. In *WRI Brasil*, 2021. URL <https://wribrasil.org.br/sites/default/files/wri-oestado-da-qualidade-do-ar-no-brasil.pdf>.
- [18] Smart Prototyping. Air quality sensor for PM1.0, PM2.5 and PM10.0 with breakout board, 2024. URL <https://www.smart-prototyping.com/PM-1-02-5-and-10-0-Sensor>.

- [19] F. H. Strelow and R. S. Mendes. *Monitoramento De Gases Por Meio De Rede De Sensores Controlados Com Arduino*. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental), UTFPR, Medianeira, 2015.
- [20] D. Suhanko. Sensor de poeira e fumaça DSM501A, 2023. URL <https://www.manualdomaker.com/article/sensor-de-poeira-e-fumaca-dsm501a/>.
- [21] L. S. Teixeira, S. B. Bressane, and M. d. J. R. da Nóbrega. Monitoramento da qualidade do ar-diagnóstico das tecnologias e da rede de monitoramento da região metropolitana do rio de janeiro. *Revista Tecnológica da Universidade Santa Ursulá*, 2(1):73–86, 2019.
- [22] USINAINFO. USINAINFO eletrônica e informática, 2023. URL <https://www.usinainfo.com.br>.
- [23] H. G. J. Voss and S. L. S. Júnior. Desenvolvimento de um nariz eletrônico aplicado à detecção da qualidade do ar. In *Anais do IX SULCOMP*, 2018.
- [24] M. Yoan. Getting to know NodeMCU and its DEVKIT board, 2017. URL <https://developer.ibm.com/tutorials/iot-nodemcu-open-why-use>.
- [25] A. Zait. NodeMCU - a perfect board for IoT, 2018. URL <https://www.circuito.io/blog/nodemcu-esp8266>.