

Lucas Lopes da Silva Sachetti

**Desenvolvimento de um sensor de baixo custo
para monitoramento da qualidade do ar**

Vitória, ES

2019

Lucas Lopes da Silva Sachetti

Desenvolvimento de um sensor de baixo custo para monitoramento da qualidade do ar

Monografia apresentada ao Curso de Ciência da Computação do Departamento de Informática da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Ciência da Computação.

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Centro Tecnológico

Departamento de Informática

Orientador: Prof. Dr. Vinícius Fernandes Soares Mota

Vitória, ES

2019

Lucas Lopes da Silva Sachetti

Desenvolvimento de um sensor de baixo custo para monitoramento da qualidade do ar/ Lucas Lopes da Silva Sachetti. – Vitória, ES, 2019-
49 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Vinícius Fernandes Soares Mota

Monografia (PG) – Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
Centro Tecnológico
Departamento de Informática, 2019.

1. Palavra-chave1. 2. Palavra-chave2. I. Mota, Vinícius Fernandes Soares. II. Universidade Federal do Espírito Santo. IV. Desenvolvimento de um sensor de baixo custo para monitoramento da qualidade do ar

CDU 02:141:005.7

Lucas Lopes da Silva Sachetti

Desenvolvimento de um sensor de baixo custo para monitoramento da qualidade do ar

Monografia apresentada ao Curso de Ciência da Computação do Departamento de Informática da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Ciência da Computação.

Trabalho aprovado. Vitória, ES, 5 de dezembro de 2019:

**Prof. Dr. Vinícius Fernandes Soares
Mota**
Orientador

Prof. Dr. José Gonçalves Pereira Filho
Convidado 1

Prof. Dr. Roberto Colistete Júnior
Convidado 2

Vitória, ES
2019

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter me colado neste caminho que, apesar das dificuldades, tem sido muito proveitoso e gratificante vendo os resultados colhidos pelas batalhas travadas ao longo deste.

Agradeço a minha família pela minha criação e pelo apoio e suporte dado que me fez superar muitos desafios nesta vida.

Agradeço aos meus amigos do curso pelas convivências e risadas ao longo dos períodos e por me darem forças de continuar seguindo o meu sonho, em especial a Nathânia por conviver comigo em quase todas as aulas e por compartilhar comigo escolhas e momentos.

Agradeço aos meus companheiros LAR que me acolheram e me passaram conhecimentos durante 3 anos, e aos meus companheiros do LabOtim e do LPRM.

Agradeço também ao Exército Brasileiro e aos amigos que conheci naquela época, onde me ensinaram a dar valor as coisas e a ter disciplina. Apesar do início sofrido, os conhecimentos e valores adquiridos lá são incríveis e inesquecíveis, são ensinamentos que posso e vou levar para a vida toda.

Agradeço também aos professores do curso de Ciência da Computação, pelo aprendizado e conhecimento adquirido, em especial meu orientador Vinícius.

*Time will devour
all things.*

Resumo

Monitorar os níveis de poluição do ar é um grande desafio e possui impacto direto na saúde das pessoas. Fazer este monitoramento preciso requer o uso de equipamentos específicos, e muitas das vezes com custos elevados, o que leva ao pouco número de estações de monitoramento. No âmbito de Internet das Coisas é possível monitorar ambientes, em larga escala, e muitos destes com poucos recursos financeiros, portanto é possível unir as duas áreas para encontrar uma solução. Esta solução é o desenvolvimento de um sensor de baixo custo para o monitoramento da qualidade do ar, em particular o Material Particulado devido à localidade em que o projeto foi desenvolvido na qual reside uma empresa mineradora que faz aumentar a concentração de material particulado suspenso no ar.

Para o desenvolvimento deste sensor foi utilizado o sensor de material particulado Samyoung DSM501 por ter um baixo custo. O microcontrolador ESP8266 que também possui baixo custo e conexão Wi-Fi que facilita o envio de dados, e foi utilizado a plataforma online ThingSpeak que é voltada para projetos sobre Internet das Coisas, na qual é possível fazer o envio e armazenamento destes dados via rede e análises gráficas em tempo real, além de ser gratuita. A eficácia do sensor foi validada com a comparação de seus dados com os dados das estações de monitoramento do governo. Após a validação foram feitos monitoramentos em vários locais da cidade onde as análises mostram que os níveis de material particulado são maiores nas regiões próximas à mineradora.

Palavras-chaves: Internet das Coisas, Poluição do Ar, Material Particulado, ESP8266, DSM501, MQTT, ThingSpeak.

Lista de ilustrações

Figura 1 – ESP8266 Wemos D1 Mini	16
Figura 2 – Tabela de índice de qualidade do ar	18
Figura 3 – Tabela de efeitos à saúde em relação à qualidade do ar	18
Figura 4 – Leitura de partículas do sensor	19
Figura 5 – Cálculo do taxa de opacidade	19
Figura 6 – Gráfico <i>Low ratio</i> [% x quantidade de partículas	20
Figura 7 – Arquitetura do sensor DSM501	21
Figura 8 – Equações para concentração de partículas	21
Figura 9 – Primeira Arquitetura	25
Figura 10 – Segunda Arquitetura	26
Figura 11 – Protótipo do sensor desenvolvido pelo projeto	29
Figura 12 – Protótipo do sensor desenvolvido pelo projeto	30
Figura 13 – Canais de monitoramento na plataforma <i>ThingSpeak</i>	31
Figura 14 – Visualização do dado bruto em um canal do ThingSpeak	31
Figura 15 – Mapa dos locais de monitoramento	32
Figura 16 – Gráfico de monitoramento no Ibes	33
Figura 17 – Gráfico de monitoramento Enseada do Suá	34
Figura 18 – Gráfico de monitoramento na Enseada do Suá	35
Figura 19 – Gráfico de <i>Low ratio</i>	36
Figura 20 – Gráfico de Concentração de partículas em pcs/L	36
Figura 21 – Gráfico de Concentração de partículas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$	37
Figura 22 – Mapa do local onde o sensor foi instalado	38
Figura 23 – Gráfico de Concentração de partículas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (UFES)	38
Figura 24 – Gráfico de Concentração de partículas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Aribiri)	39
Figura 25 – Gráfico de Concentração de partículas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Jardim Camburi (1)	40
Figura 26 – Gráfico de Concentração de partículas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Jardim Camburi (2)	40
Figura 27 – Gráfico de Concentração de partículas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Jardim Camburi (2)	41
Figura 28 – Gráfico de Concentração de partículas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Jardim da Penha	42
Figura 29 – Gráfico de Concentração de partículas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Jardim da Penha	42

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela dos trabalhos relacionados	23
Tabela 2 – Tabela dos dados monitorados	43

Lista de abreviaturas e siglas

IoT	Internet das Coisas, do inglês <i>Internet of Things</i>
MQTT	do inglês <i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
CoAP	Protocolo de Aplicação Restrita, do inglês <i>Constrained Application Protocol</i>
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
PM	Material Particulado, do inglês <i>Particulate Matter</i>
HTTP	Protocolo de Transferência de Hipertexto, do inglês <i>HyperText Transfer Protocol</i>
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado, do inglês <i>Integrated Development Environment</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	12
1.2	Método de Desenvolvimento do Trabalho	12
1.3	Organização do Texto	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Internet das Coisas	14
2.2	Protocolos de Comunicação	14
2.3	Dispositivos ESP8266	15
2.4	Poluição do Ar	16
2.5	Samyoung DSM501	17
2.6	ThingSpeak	21
2.7	Trabalhos Relacionados	22
3	PROJETO, MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1	Arquitetura	24
3.2	Materiais	25
3.3	Metodologia	26
3.3.1	Topologia	27
3.3.2	Softwares Utilizadas	27
3.3.3	Bibliotecas Utilizadas	28
3.3.4	Experimentos e Testes	28
3.3.5	Implementação e Implantação	29
4	RESULTADOS E ANÁLISES	33
4.1	Validação	33
4.2	Monitoramento	35
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
5.1	Conclusões	44
5.2	Limitações e Perspectivas Futuras	46
	REFERÊNCIAS	47

1 Introdução

A poluição atmosférica tem se tornado cada vez mais preocupante para a população nos últimos tempos. Em 2012, uma a cada 9 mortes no mundo estava relacionada com a poluição da atmosfera doméstica e do ambiente, e dessas mortes cerca de 3 milhões foram causadas unicamente pela poluição de ar do ambiente. Por conta disso, dados sobre a qualidade do ar tem aumentado gradativamente e a ciência subjacente aos impactos relacionados a saúde também está evoluindo rapidamente. (WHO, 2016).

Existem vários poluentes atmosféricos, os mais comuns são Monóxido de Carbono (CO), Ozônio (O₃), Dióxido de Nitrogênio (NO₂), Dióxido de Enxofre (SO₂) e Material Particulado (PM₁₀ e PM_{2.5}). Este último são partículas muito finas de materiais sólidos ou líquidos suspensas no ar e quanto menor as partículas mais profundamente elas adentram no sistema respiratório e os danos causados à saúde é influenciado pela composição do material particulado. Entre essas composições, as mais comuns são: Sulfatos, Nitratos, Amônia, Cloreto de Sódio, Carbono Negro, Pó de Minério e Água (WHO, 2016).

O monitoramento destes poluentes geralmente é feito em macro-escala por estações meteorológicas espalhadas em pontos estratégicos nas cidades, ou seja, as variações que acontecem no ambiente doméstico ainda são desconhecidas (HEIMANN, 2015). O avanço no desenvolvimento de redes de sensores sem fio (RSSF) de baixo custo e de baixo consumo energético possibilitou o monitoramento distribuído e dinâmico de diversas áreas e pode ser aplicado neste contexto.

A coleta de dados sobre os poluentes é feita através de sensores individuais e com esses dados em mãos é possível fazer uma análise sobre a quantidade de poluentes que está circulando no ambiente. Dentre esses poluentes, o que será destacado neste projeto é o Material Particulado por causa da localidade em que este projeto foi feito, Vitória-ES, onde encontra-se um porto da maior produtora de minério de ferro do mundo, a empresa Vale S.A.

Estes sensores precisam de um microcontrolador para poder enviar os dados para o banco de análise, que é feita utilizando protocolos de comunicação. O microcontrolador utilizado neste projeto foi o ESP8266, que possui um baixo custo e têm capacidade de comunicação por Wi-Fi, que facilita o envio de dados a distância.

Existem diversos protocolos de comunicação para sensores, mas o foco do projeto será o protocolo *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT), que é um protocolo de mensagens leve e otimizado para redes TCP/IP, que utiliza o esquema de troca de mensagens Publicador-Subscritor (SHINDE, 2016). Este protocolo é bastante utilizado para fazer comunicação utilizando sensores, visto que a transferência de mensagens é feita

com baixo consumo energético.

Este projeto de graduação explora o uso de sensores de baixo custo para medir a quantidade de partículas no ambiente doméstico, a fim de verificar a eficácia desses sensores, além de prover dados sobre a poluição do ar, de vários pontos da cidade, para a população por meio de uma aplicação de visualização.

1.1 Objetivos

O objetivo deste projeto de graduação é desenvolver um sensor de baixo custo para monitorar material particulado no ambiente doméstico, em microescala, e medir seu desempenho em relação ao monitoramento feito pelas estações meteorológicas em macro escala. Os objetivos específicos deste projeto são:

- Analisar o problema e propor uma solução de baixo custo e consumo para fazer o monitoramento de material particulado;
- Definir a arquitetura geral do projeto, incluindo a arquitetura do sensor, microcontrolador, protocolos de comunicação, servidores e banco de dados;
- Implementar o sistema em geral de acordo com a documentação da arquitetura estabelecida;
- Fazer a análise dos dados coletados e levantar os resultados obtidos.

1.2 Método de Desenvolvimento do Trabalho

As seguintes atividades foram realizadas para atingir os objetivos:

1. Revisão bibliográfica: Estudo de Redes de Sensores Sem Fio, Internet das Coisas, Protocolos de Comunicação para Microcontroladores, Poluição do Ar, Material Particulado, entre outros;
2. Estudo de tecnologias: Nesta atividade foi realizado o estudo de tecnologias utilizadas para o desenvolvimento do projeto, tais como linguagens de programação C/C++, Python, ambiente de desenvolvimento *Arduino IDE*, microcontroladores *ESP8266 NodeMCU* e *Wemos D1*, sensores de monitoramento de material particulado *DSM501A* e *Sharp's GP2Y1010AU0F*, entre outros;
3. Elaboração da arquitetura: Produção da arquitetura geral do sensor, identificando os componentes e funcionalidades.

4. Implementação e testes: Etapa de desenvolvimento e calibração do sensor e criação do servidor web para coleta de dados dos ambientes acompanhada de testes a fim de encontrar e solucionar possíveis erros.
5. Implantação e análise dos dados: Constitui na implantação do sensor em ambientes domésticos para coleta de dados para serem analisados identificando os níveis de material particulado nos ambientes;
6. Redação da monografia: Elaboração da monografia em LaTeX¹ atendendo aos requisitos das normas ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

1.3 Organização do Texto

Esta monografia é organizada em cinco partes e contém, além deste capítulo introdução, os seguintes capítulos:

- **Capítulo 2** – Referencial Teórico: apresenta a revisão da literatura sobre os temas relevantes ao contexto deste projeto, a saber: Redes de Sensores Sem Fio, Internet das Coisas, Protocolos de Comunicação para Sensores, Poluição do Ar;
- **Capítulo 3** – Projeto, Materiais e Métodos: capítulo sobre o desenvolvimento do projeto, identificando a arquitetura, os materiais e métodos utilizados para a construção do sensor e do ambiente de comunicação para transferência e armazenamento dos dados;
- **Capítulo 4** – Resultados e Análises: apresenta os resultados e as análises feitas a partir dos dados obtidos;
- **Capítulo 5** – Considerações Finais: apresenta as conclusões do trabalho, as limitações e dificuldades encontradas, e propostas de trabalhos futuros.

¹ <<https://www.latex-project.org/>>.

2 Referencial Teórico

2.1 Internet das Coisas

Internet das coisas (do inglês: *Internet of Things, IoT*) é um novo paradigma que vem crescendo nesse cenário de telecomunicações sem fio. Sua ideia básica é conectar vários objetos através de uma rede, na qual estes objetos se comunicam entre si transmitindo e reunindo dados para um objetivo em comum (ASHTON et al., 2009). O termo "Internet das Coisas" foi utilizado pela primeira vez por Kevin Ashton, no contexto de gestão da cadeia de abastecimento (ASHTON et al., 2009). Hoje em dia essa definição está mais inclusiva, abrangendo temas como cuidados com a saúde, utilidades, transportes, etc (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010).

Na IoT, os objetos além de se comunicarem entre si, também fornecem comunicação com o usuário, implicando numa nova gama de aplicações como monitoramento e coleta de dados de pacientes, sensoriamento de ambientes inóspitos e de difícil acesso, entre outros (SUNDMAEKER et al., 2010). Entretanto existem algumas restrições para conectarmos estes objetos à Internet, tais como processamento, memória, energia e comunicação (LOUREIRO et al., 2003).

A IoT também é vista como uma combinação de diversas tecnologias atuando em conjunto para levar informações do meio físico ao mundo virtual. As principais tecnologias são: Unidades de processamento, como microcontroladores e processadores na qual são responsáveis por executar os algoritmos associados ao objeto, e também são responsáveis pelo armazenamento e encaminhamento dos dados; Sensores, na qual coletam os dados no contexto do objeto, que junto com a unidade de processamento podem ter atuadores na qual respondem e reagem de acordo com os dados obtidos; Comunicação, no que diz respeito à técnicas e protocolos utilizados para fazer a comunicação e envio dos dados, as mais comuns sendo IEEE 802.15.4, WiFi, Bluetooth, além de protocolos de comunicação como COAP e MQTT. A partir da obtenção destas tecnologias já é possível criar seu próprio objeto inteligente.

2.2 Protocolos de Comunicação

Um protocolo é um sistema de regras na qual possibilita uma comunicação e transferência de dados entre sistemas computacionais. também são definidos como "as regras que regem" a sintaxe, semântica e sincronização da comunicação. Os protocolos podem ser implementados pelo hardware, software ou por uma combinação dos dois.

O HTTP é um protocolo de nível de aplicação para sistemas de informação distribuídos e colaborativos (FIELDING et al., 1999). É usado na Internet para acessar informações seguindo a estratégia requisição/resposta no paradigma cliente/servidor. O HTTP foi desenvolvido para fazer comunicação entre redes com computadores do tipo *desktop*. Os dispositivos utilizados em IoT possuem uma menor capacidade computacional, na qual limita a utilização de alguns protocolos como o HTTP neste contexto. Devido a este problema, dois protocolos foram desenvolvidos na camada de aplicação justamente para facilitar a comunicação de informações de dispositivos com este baixo poder computacional, estes protocolos são o CoAP e MQTT.

O Constrained Application Protocol (CoAP) é baseado no modelo *Representational State Transfer* (REST) e portanto utiliza funcionalidades similares ao do HTTP como GET, POST, PUT, DELETE. Um dos principais objetivos do CoAP é projetar um protocolo Web genérico para os requisitos especiais de ambientes restritos, em especial considerando o consumo energético (SHELBY; HARTKE; BORMANN, 2014).

No modelo REST padrão os servidores são capazes de gerenciar muitas requisições e os clientes geralmente são mais simples por estarem interessados apenas na obtenção de informações por isso o conceito de cliente/servidor é mais rígido neste modelo. No entanto no CoAP os dispositivos podem assumir o papel de cliente ou servidor a cada transmissão (BAHIA; CAMPISTA, 2017), que é uma característica importante de dispositivos IoT, chamado de comunicação M2M (*Machine-to-Machine*).

O Message Queue Telemetry Transport (MQTT) é um protocolo de mensagens projetado para dispositivos com restrições e redes de baixa largura de banda, alta latência ou não confiáveis que utiliza a estratégia de publicador/subscritor (*publisher/subscriber*) (OASIS, 1999). Os principais objetivos do MQTT são minimizar a largura de banda da rede e os requisitos de recursos do dispositivo, além de tentar garantir confiabilidade e garantia de entrega das mensagens. Um exemplo de uma implementação de código aberto do MQTT é o Mosquitto (LIGHT et al., 2017).

O MQTT possui três componentes básicos: o *subscriber*, o *publisher* e o *broker*. Primeiro os dispositivos se conectam ao *broker*, em seguida os *publishers* criam canais de comunicação onde serão enviadas mensagens de acordo com o tema especificado pelo canal. Os *subscribers* então se inscrevem nos canais com os temas nas quais têm interesse, a partir do *broker*. Deste modo, toda vez que um *publisher* enviar mensagens sobre um determinado tema, todos os *subscribers* inscritos naquele tema receberão as mensagens.

2.3 Dispositivos ESP8266

Fabricado pela Espressif, o ESP8266 vem ganhando muita força no contexto de IoT por ser um microcontrolador de baixo custo, com bom poder de processamento e possui

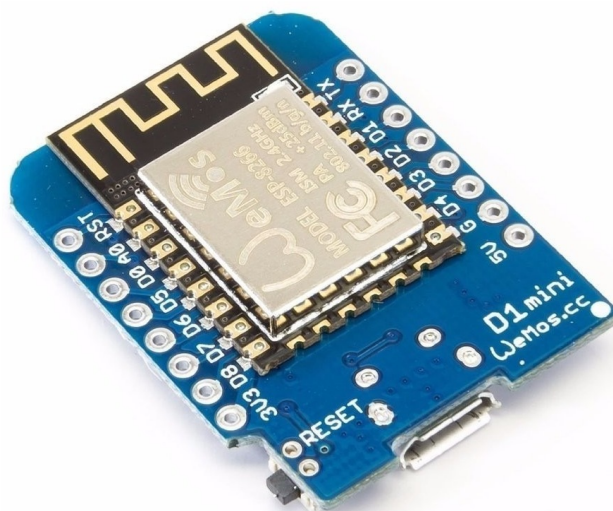


Figura 1 – ESP8266 Wemos D1 Mini

um baixo consumo energético. Neste dispositivos pode-se definir uma periodicidade de transferência de dados, e nos momentos ociosos ele pode dormir, diminuindo ainda mais seu consumo energético. Uma de suas características mais marcantes é o módulo de Wi-Fi embutido, que facilita a transferência de dados em ambientes urbanos por conta do avanço tecnológico nessas regiões.

Uma das facilidades de desenvolver projetos com estes dispositivos é a possibilidade de uso de IDE's conhecidas na área de IoT, como a do próprio Arduino, e vasta gama de bibliotecas feitas pela comunidade para estes dispositivos visto que eles são um bom recurso para o desenvolvimento de aplicações na área.

2.4 Poluição do Ar

A rápida urbanização constatada em todo o globo terrestre gerou um aumento grotesco no consumo de energia e na emissões de poluentes oriundos da queima combustíveis fósseis tanto nas indústrias como em veículos automotores. Este avanço gera empregos e faz com que as pessoas movam-se para estes centros, tanto que atualmente, aproximadamente 50% da população mundial vivem em cidades e centros urbanos e ficam expostas à esses poluentes (COUTO; CORTE; ARAUJO, 2019).

O interesse nos efeitos da poluição do ar relacionados a saúde tornaram-se mais expressivo depois que dois estudos de um grupo dos EUA sugeriram que a exposição a partículas finas no ar estava associada ao encurtamento da vida das pessoas (DOCKERY et al., 1993) (POPE et al., 1995). Outro estudo encontrou efeitos significativos de material particulado com diâmetro inferior a $10\mu\text{m}$ (PM_{10}) nas mortes respiratórias não malignas

em homens e mulheres e na mortalidade por câncer de pulmão em homens não fumantes (ABBEY et al., 1999).

Estudos realizados em vários locais diferentes mostraram que a mortalidade diária geral aumenta à medida que a concentração de pequenas partículas no ar aumenta (SCHWARTZ, 1994) (BATES, 1992). Além disso, existem também evidências ligando a poluição do ar particulado a ataques de asma (DOCKERY et al., 1989) e outras doenças respiratórias (III et al., 1991) (ROEMER et al., 1993).

No Brasil, os principais poluentes monitorados são óxidos de nitrogênio (NO₂ ou NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂), ozônio (O₃) e o Material Particulado (MP, ou do inglês *Particulated Matters - PM*). O PM varia em número, tamanho, formato e composição química, dependendo do local de sua produção e da fonte emissora (COUTO; CORTE; ARAUJO, 2019). Os efeitos causados à saúde das pessoas oriundos de material particulado dependem de sua composição química e de seu tamanho.

Em Vitória-ES encontra-se uma grande mineradora onde diariamente faz o carregamento de minérios para navios. Além disso as esteiras que fazem o transporte do material são abertas, o que faz com que os ventos carreguem vestígios de minério tanto para o ar quanto para o mar. O transporte e armazenamento destes materiais gera muitas reclamações dos moradores da região e várias reportagens locais já abordaram este tema ao longo dos anos, como (G1 ESPÍRITO SANTO, 2016) e (A GAZETA, 2019).

PM é classificado de acordo com o seu tamanho em partículas totais em suspensão: partículas com até 30 μm (micrometro) de diâmetro; partículas com diâmetro de até 10 μm (PM₁₀); partículas com diâmetro inferior a 2.5 μm (PM_{2.5}) e partículas com diâmetro menor que 1 μm (PM_{1.0}). O Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA) do Espírito Santo disponibiliza uma tabela do índice de qualidade do ar, no qual possui o índice de qualidade para PM₁₀ e PM_{2.5} e pode ser visto na Figura 2. Os valores das concentrações estão em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (micrograma por metro cúbico). Além disso cada faixa do índice possui uma correlação com os efeitos à saúde, tabelados na Figura 3.

Este projeto utiliza os conceitos de Internet das Coisas para monitorar em específico o Material Particulado em ambientes domésticos. Para isso é utilizado um sensor de baixo custo e consumo para verificar sua eficiência visto que uma análise mais profundo deste tema requer sensores mais potentes que possuem custos muito elevados.

2.5 Samyoung DSM501

O módulo de sensor de poeira DSM501 é um sensor de densidade de partículas de baixo custo e de tamanho compacto, fabricado pela empresa coreana Samyoung Electronics. Ele detecta poeira, partículas e pólen no ar em ambientes fechados. Este sensor não conta

Classificação ¹	Concentração*					
	MP ₁₀ 24h	MP _{2,5} 24h	SO ₂ 24h	NO ₂ 1h	O ₃ 8h	CO 8h
BOA	0 - 50	0 - 25	0 - 20	0 - 200	0 - 100	0 - 10.000
MODERADA	>50 - 120	>25 - 60	>20 - 60	>200 - 240	>100 - 140	>10.000 - 13.000
RUIM	>120 - 150	>60 - 125	>60 - 365	>240 - 320	>140 - 160	>13.000 - 15.000
MUITO RUIM	>150 - 250	>125 - 210	>365 - 800	>320 - 1.130	>160 - 200	>15.000 - 17.000
PÉSSIMA	>250	>210	>800	>1.130	>200	>17.000

Figura 2 – Tabela de índice de qualidade do ar
 Fonte: <<https://iema.es.gov.br/qualidadedoar>>

Qualidade	Significado
Bom	Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população, em geral, não é afetada.
Moderada	
Ruim	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar efeitos mais sérios na saúde.
Muito Ruim	Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas).
Péssima	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

Figura 3 – Tabela de efeitos à saúde em relação à qualidade do ar
 Fonte: <<https://iema.es.gov.br/qualidadedoar>>

as partículas individualmente, ao invés disso ele conta a quantidade de tempo em que uma partícula é detectada pelo sensor.

Primeiro ele aplica um filtro na qual elimina partículas pequenas e ruídos. Este filtro pode ser regulado dependendo do tamanho das partículas que quer-se detectar, na qual varia entre 2,5 μm e 1 μm . Na Figura 4 o filtro é representado pela linha vermelha e as partículas são representadas pelos espigões, e quanto maior for o espigão maior é o tamanho da partícula. O filtro é regulado pela voltagem do sensor, assim partículas menores podem ser detectadas com uma alta sensibilidade. O sensor ainda possui um LED e um aquecedor (resistor) para gerar calor. O calor cria corrente de ar ascendente que atrai o ar externo para o módulo. A arquitetura do sensor pode ser vista na Figura 7.

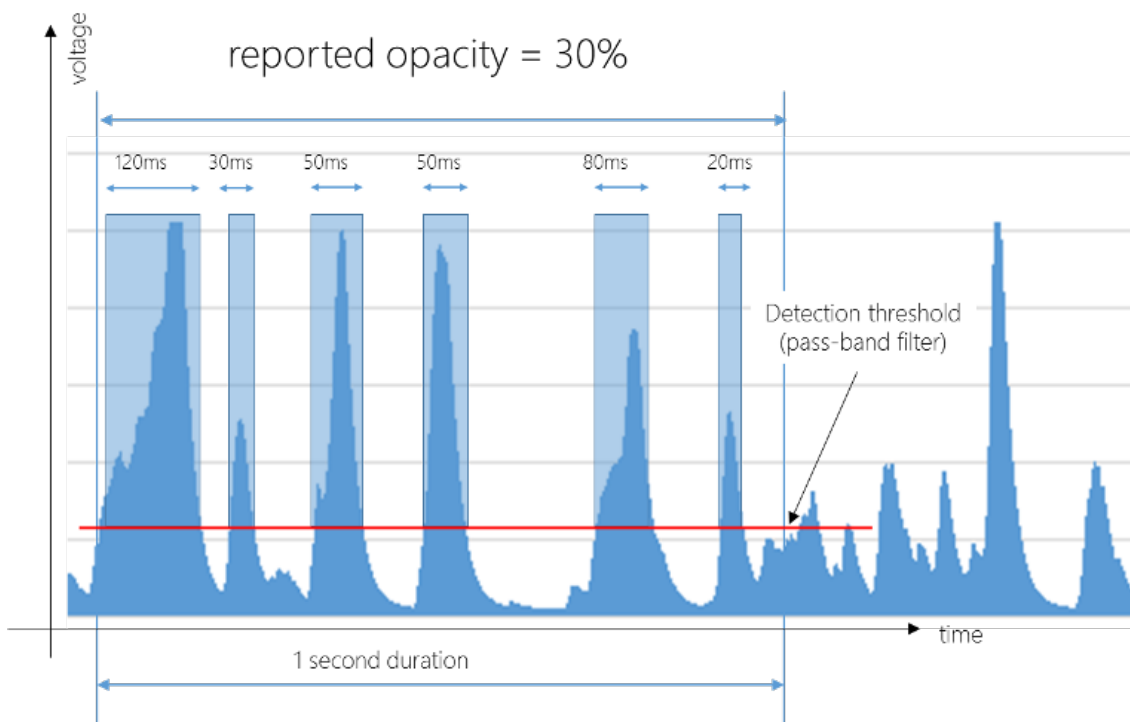


Figura 4 – Leitura de partículas do sensor
 Fonte: <<https://aqicn.org/sensor/shinyei/pt/>>

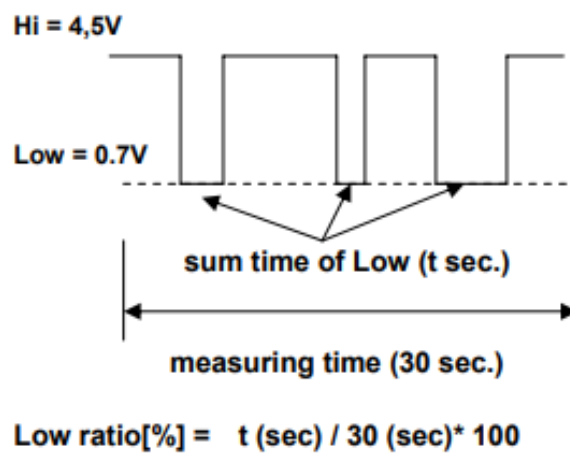


Figura 5 – Cálculo do taxa de opacidade
 Fonte: Samyoung DSM501 *datasheet*

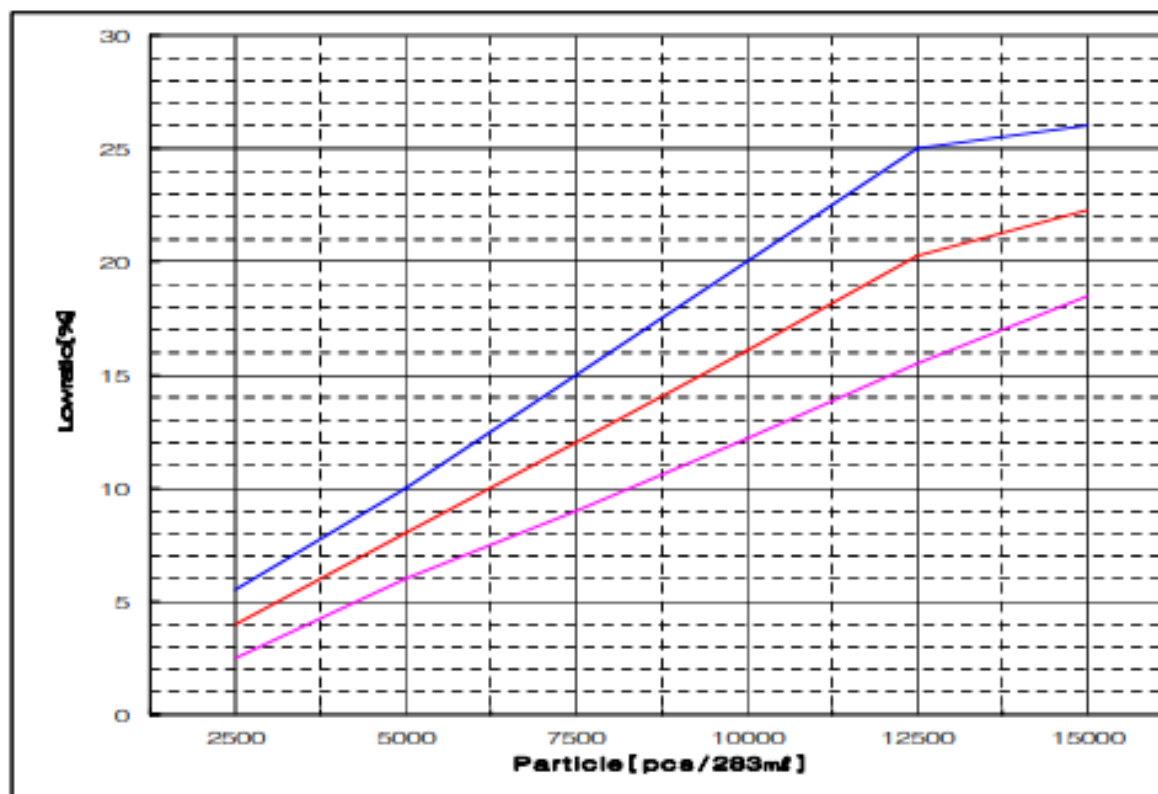


Figura 6 – Gráfico *Low ratio* [% x quantidade de partículas
 Fonte: Samyoung DSM501 *datasheet*

O sensor então detecta a quantidade de tempo em que cada partícula é visualizada, ao final tem-se uma soma dos tempos de todas as partículas, dependendo da lacuna de tempo que quer-se medir (*gap*). Essa quantidade de tempo é chamada de *Low Pulse Occupancy* que pode ser vista também como a porcentagem de opacidade do ar que circula pelo sensor. Na Figura 4, por exemplo, em um *gap* de 1 segundo foi reportado uma taxa de 30% de opacidade. Essa taxa, chamada de *Low ratio* [%], é calculado pela soma dos tempos das partículas sobre o *gap*, exemplificado na Figura 5, e é necessária para obter a quantidade de partículas que circula pelo sensor.

A quantidade de partículas é obtida pelo *datasheet* do sensor, onde o fornecedor disponibiliza um gráfico, Figura 6, que dado a taxa de ocupação obtém-se a quantidade de partículas em partículas por litro (pcs/L) ou partículas por 0.01 pés cúbicos (pcs/0.01 cf). Com a curva é possível obter uma fórmula, interpolando os dados, para ser usada na conversão de dados detectados pelo sensor. Porém ainda é preciso de mais alguns recursos para se obter o tipo de dado medido pelos Índices de Qualidade do Ar (IQA), que é quantidade de partículas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para converter pcs/L em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ é preciso saber a massa da partícula. (ROY; BOSE; SARDDAR, 2017) assume que todas as partículas são esféricas e possuem densidade igual a 1.65×10^{12} e que o raio de cada partícula, no caso PM2.5, é igual a $0.44 \mu\text{m}$. A massa

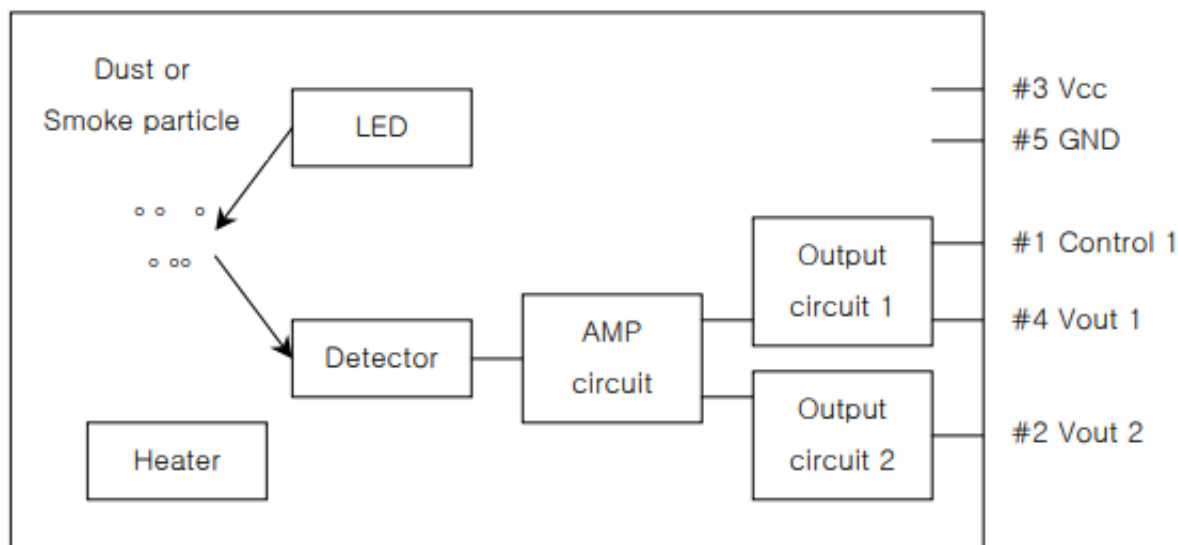


Figura 7 – Arquitetura do sensor DSM501

Fonte: Samyoung DSM501 *datasheet*

$$\text{Particle}_{\text{Mass}} = \text{Density} \times \text{Volume} \quad (1)$$

$$\text{PM}_{\text{Concentration}} (\mu\text{g}/\text{m}^3) = \text{Number_Of_Particle} \times 3531.5 \times \text{Particle}_{\text{Mass}} \quad (2)$$

Figura 8 – Equações para concentração de partículas

Fonte: (ROY; BOSE; SARDDAR, 2017)

então é composta pela multiplicação da densidade pelo raio. Um fator de 3531.5 é usado para converter 0.01 pés cúbicos em m^3 . Com isso temos que a concentração de partículas desejada nas medidas dos padrões utilizados pelos IQA fica sendo a multiplicação do número de partículas, obtida pela equação interpolada do gráfico, pelo fator de conversão em m^3 e pela massa das partículas, como é visto na Figura 8.

2.6 ThingSpeak

O *ThingSpeak* é uma plataforma de serviços analíticos sobre IoT da empresa MathWorks. Possui código aberto e é comumente utilizado para armazenar e recuperar dados coletados por sensores utilizando os protocolos HTTP e MQTT. Permite também agregar, visualizar e analisar fluxos de dados ao vivo na nuvem. Por fazer parte da MathWorks, a plataforma executa código em MATLAB fornecendo análise e processamento online dos dados à medida que entram. Pode-se utilizar essa ferramenta para criar gráficos personalizados de acordo com os dados de entrada de seus sensores.

Para sistemas de IoT de pequeno a médio porte, o ThingSpeak fornece uma solução hospedada que pode ser usada para criar sistemas de IoT sem a necessidade de

configurar servidores ou desenvolver software da web. A plataforma cria e atualiza os gráficos automaticamente quando os dados são recebidos, com isso pode-se remotamente monitorar seus dispositivos e equipamentos de qualquer lugar, tanto por navegadores *web* ou dispositivos *mobile*.

2.7 Trabalhos Relacionados

Muitos pesquisadores já estão trabalhando neste tema de Internet das Coisas com monitoramento da qualidade de vida, principalmente quando se fala de Cidades Inteligentes (do inglês: *Smart Cities*). (LIMA; SILVA, 2015) desenvolveram um sensor de baixo custo para monitorar a qualidade do ar enviando as informações via comunicação Bluetooth para um celular rodando o sistema Android. Eles mediram NH₃, NO_x, Benzeno, Fumaça e CO₂. No trabalho (LIU et al., 2015) foram utilizadas bicicletas públicas para coletar dados de poluição na cidade medindo gases e partículas.. Além disso utilizaram um módulo Bluetooth (FBT06M) para enviar os dados coletados para uma estação base.

Já em (SANTOS et al., 2018) utilizaram um kit de sensores em ônibus da cidade para avaliar as regiões com maior índice de poluição. Nele mediram gases O₃, NO₂, CO₂, além dos valores de temperatura e umidade. Além disso construíram um mapa da cidade com a intensidade da poluição em cada ponto que o ônibus com o sensor passava.

O (AL-ALI; ZUALKERNAN; ALOUL, 2010) criaram um sistema com um dispositivo possuindo sensores que mediam a qualidade do ar de uma cidade, enviaram os dados via rede mobile para o servidor e fizeram um Mapa da poluição. Eles monitoraram CO, NO₂ e SO₂. O microcontrolador utilizado se comunica com um GPRS-modem usando uma interface serial RS-232, e esse GPRS-modem que envia os dados via *wireless* para o servidor que utiliza uma API do Goolge Maps.

Outro importante trabalho a ser citado é o (SIREGAR; NASUTION; FAHMI, 2016) que utilizaram sensores para monitorar luminosidade, umidade, poeira e som. No entanto não houveram testes em um domínio real, foi tudo feito em laboratório. Diferente dos demais, este utilizou uma comunicação baseada em um módulo 3G (SIM 5218E module). A Tabela 1 especifica os trabalhos correlatos.

Neste trabalho é medido apenas o Material Particulado, a princípio na escala PM_{2,5}. A UFES e o IEMA possuem sensores de alta qualidade capazes de medir o Material Particulado, entre eles o PM_{2,5}, na qual é possível utilizá-los como base para validação do sensor desenvolvido comparando os dados entre eles.

Trabalhos Relacionados			
Autor e Ano	Medição	Sensores	Microcontrolador
(LIMA; SILVA, 2015)	NH ₃ , NO _x , Benzeno, Fumaça e CO ₂	MQ 135	Arduino Mini
(KHADEM; SGÂRCIU, 2014)	Partículas/Poeira	Sharp GP2Y1010AU0F e Shinyei PPD4NS	ATmega328
(LIU et al., 2015)	Gases e Partículas	Shinyei PPD42NS TGS 2201	Não especificado
(SANTOS et al., 2018)	O ₃ , NO ₂ , CO ₂ , Temperatura e Umidade	Utilizaram um kit pronto com varios sensores	MSP430F149
(CHUNG; OH, 2006)	Temperatura, Umidade, Poeira e CO ₂	Não especificaram	AT89S8253 (Intel 8051)
(AL-ALI; ZUALKER-NAN; ALOUL, 2010)	CO, NO ₂ , SO ₂	Não especificaram	16-Bit Single-Chip Microcontroller
(SIREGAR; NASUTION; FAHMI, 2016)	Luminosidade, Umidade, Poeira e Som	GPY21010AU0F, 808H5V5, LDR e Microfone (dBA)	Wasmote 802.15.4 PRO SMA 5 dB

Tabela 1 – Tabela dos trabalhos relacionados

3 Projeto, Materiais e Métodos

3.1 Arquitetura

Para desenvolver o sensor que fará as devidas medições de material particulado e enviará os dados para um servidor, precisa-se pensar na arquitetura deste sensor e quais componentes irão compô-lo. Desenvolver esta arquitetura depende da escolha do ambiente de sensoriamento. No início do projeto foram trabalhadas várias ideias de ambientes, desde um sensor ambulante que ficariam nos ônibus da cidade até um sensor embutido nas bicicletas compartilhadas que estão pela cidade em parceria com a prefeitura. Mas devido às várias reportagens e reclamações dos moradores de Vitória sobre a incidência de "pó preto" em suas casas, por conta de uma grande mineradora instalada na cidade, foi decidido que o ambiente de medição seria um ambiente doméstico.

Outro motivo que levou a escolha deste tipo de ambiente foi por conta da existência de estações de monitoramento do governo estadual que fazem apenas medições em macro-escala. Estas estações são do Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA) e ficam em pontos estratégicos das cidades. o IEMA também disponibiliza os dados ao público, o que facilita a validação do sensor desenvolvido no sentido de comparação dos dados entre a estação e o sensor. Esta validação foi feita em casas próximas as estações e, como as estações possuem uma macro-escala, pode-se então comparar suas médias com as das casas monitoradas.

Foram desenvolvidas duas arquiteturas neste projeto: uma para validar os sensores com as estações e outra arquitetura definitiva para monitorar os ambientes domésticos. As estações providas pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e pelo IEMA ficam em um ambiente aberto, propício à chuvas, ventos, sol, entre outros fatores que não é possível controlar e que podem influenciar na leitura dos dados. Já no ambiente doméstico esses fatores são mais fáceis de serem controlados.

Nestes ambientes externos não era possível ter acesso a rede internet, então o envio de dados por rede ficou comprometido. A solução foi utilizar a memória interna do microcontrolador escolhido para armazenar os dados. Por ser de baixo custo, este microcontrolador não possui muita memória, mas era o suficiente para coletar os dados por pelo menos 1 final de semana (72 horas). Na Figura 9 é ilustrado a arquitetura utilizada neste ambiente externo.

Já a segunda arquitetura que foi elaborada para ser instalada em ambientes domésticos, foi considerado o envio de dados pela rede para um servidor web, assim então utilizando uma conexão Wi-Fi do proprietário do local. O envio destes dados é feito

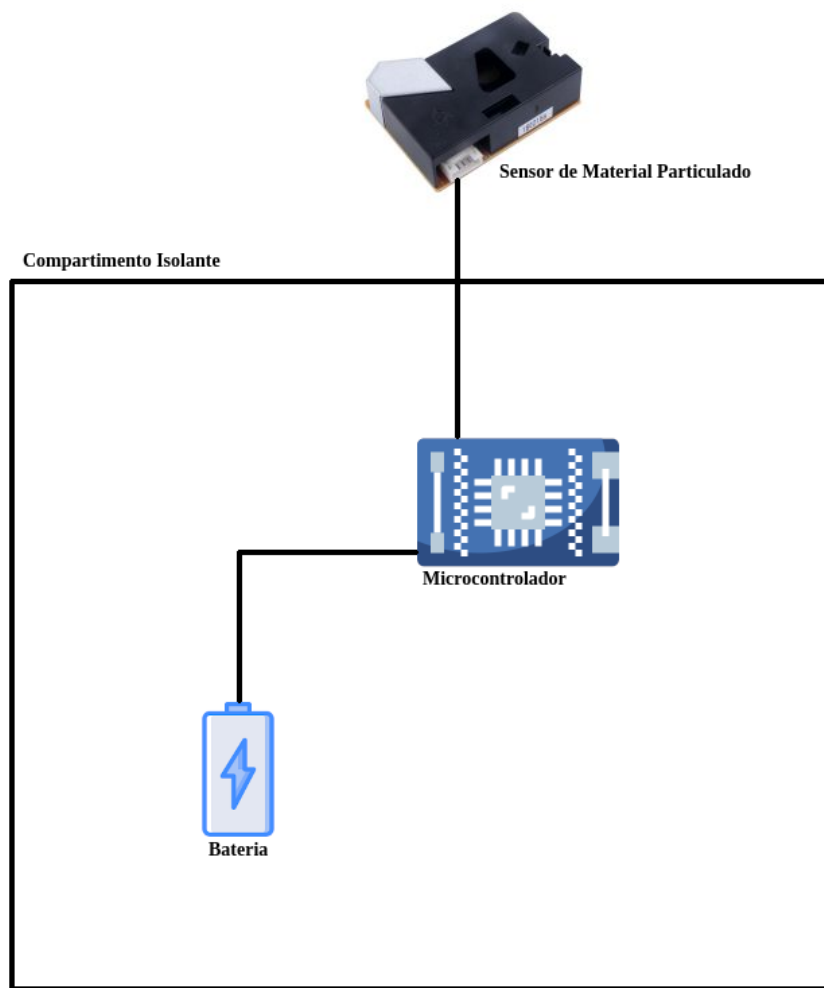


Figura 9 – Primeira Arquitetura

utilizando a biblioteca da plataforma ThingSpeak, onde nesta será feito o armazenamento de dados e a elaboração dos gráficos analíticos. Esta segunda arquitetura é ilustrada na Figura 10.

3.2 Materiais

Para o desenvolvimento do sensor foram levados em conta materiais de baixo custo e que tenham um baixo consumo energético. Foi escolhido como microcontrolador o ESP8266, que possui tais características, além também das vastas bibliotecas já implementadas pela comunidade que minimiza o tempo de implementação de projetos. O sensor escolhido de material particulado foi o Samyoung DSM501, que consegue captar dados sobre $PM_{2,5}$, que já é monitorado por instituições e por isso facilita a validação e comparação de dados, e $PM_{1,0}$ que ainda não é muito monitorado e possui poucos estudos, mas é mais perigoso para a saúde. Um computador foi usado para programação do código do microcontrolador e para realização de testes. Segue a lista dos materiais utilizados:

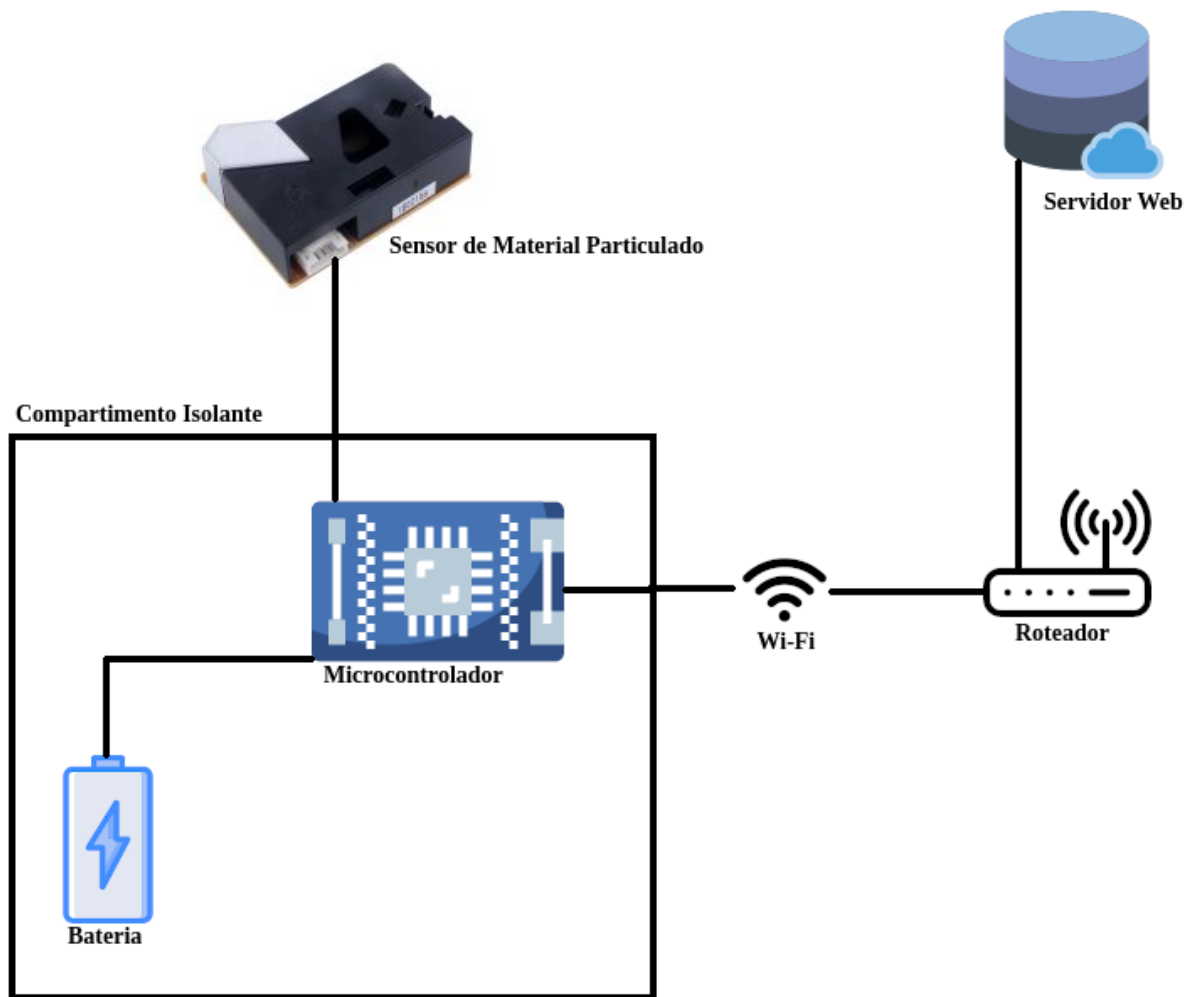


Figura 10 – Segunda Arquitetura

- 3 dispositivos ESP8266 Wemos D1 mini;
- 3 sensores de material particulado Samyoung DSM501A;
- Uma caixa isolante;
- Um computador notebook Dell Inspiron I14-3442-A30, com processador Intel Core i5-4210U 1.7 GHz, 4 GB de memória RAM com conexão *Wireless*.

3.3 Metodologia

Para realizar o monitoramento do material particulado em micro-escala e analisar o desempenho deste sensor em comparação com sensores de macro-escala, foram utilizados os componentes da seção anterior para realizar a coleta de dados. Os dados coletados foram enviados pelo microcontrolador para a plataforma ThingSpeak, onde foram armazenados e houvera a criação de gráficos personalizados que eram atualizados de acordo com os

dados recebidos. Os dados coletados foram comparados com os dados dos sensores de macro-escala e foram classificados de acordo com o Índice de Qualidade do Ar do IEMA, na qual diz se o ambiente analisado possui condições adversas à saúde. Abaixo uma descrição mais detalhada da metodologia.

3.3.1 Topologia

A topologia utilizada no projeto vai de encontro com as arquiteturas definidas na seção 3.1, onde num primeiro momento foi utilizado a arquitetura de ambiente externo, Figura 9, na qual foram coletados dados de locais próximos aos sensores de macro-escala da UFES e do IEMA. Posteriormente fora utilizado a arquitetura voltada para ambientes domésticos, Figura 10, que por sua vez tinha como objetivo deixar os sensores hospedados nas casas onde haviam reclamações de muita poeira e também em algumas casas em pontos distintos da cidade para medir o nível de qualidade do ar, em relação ao material particulado. A topologia da arquitetura doméstica é a topologia final e definitiva do produto oriundo do projeto, um sensor de baixo custo para monitorar material particulado em micro-escala.

Uma topologia de teste de envio de dados via rede utilizando o protocolo MQTT foi elaborada no início do projeto. Tinha como objetivo testar a comunicação via rede e como os dispositivos ESP8266 se comportariam com o protocolo MQTT. Essa topologia consiste em um sensor de material particulado conectado ao microcontrolador ESP8266 na qual enviava os dados via rede para um servidor MQTT, na rede interna, que estava hospedado no notebook utilizado.

3.3.2 Softwares Utilizadas

Segue abaixo a lista de softwares utilizados para a realização do projeto:

- Sistema Operacional Ubuntu 16.04 LTS;
- Arduíno IDE 1.8.9, utilizado para programar o ESP8266;
- Eclipse Mosquitto 1.6.7, usado para implementar o servidor do protocolo MQTT;
- Python 2.7.12, para programação de código de armazenamento de dados na topologia de teste inicial, com mais detalhes na seção 3.3.4;
- MATLAB 9.7 R2019b, para programação de gráficos analíticos na plataforma ThingSpeak;
- Thingview 1.7.2, aplicativo *mobile* para visualização em tempo real dos gráficos no ThingSpeak.

3.3.3 Bibliotecas Utilizadas

O ESP8266 possui várias bibliotecas prontas para utilizar em projetos de IoT, e algumas dessas bibliotecas foram utilizadas neste trabalho. Para realizar testes do protocolo MQTT com o sensor foi utilizado uma bastante conhecida para os dispositivos ESP8266, a PubSubClient (O'LEARY, 2018). Esta biblioteca foi utilizada apenas nos testes e experimentos, realizados em rede interna, pois o produto final do projeto possui a característica de enviar dados para a plataforma *ThingSpeak* por ser uma plataforma gratuita, e hospedar um servidor MQTT na internet elevaria os custos do sensor.

Por conta disso houve a necessidade do uso da biblioteca do ThingSpeak (MATHWORKS, 2017), na qual habilita a comunicação entre o ESP8266 e a plataforma online que será usada para armazenar e analisar os dados coletados pelo sensor. Ambas as bibliotecas foram escritas em C/C++ e podem ser importadas no ambiente de programação utilizado, Arduino IDE.

3.3.4 Experimentos e Testes

No primeiro teste implementado o microcontrolador enviava os dados via Wi-Fi para um servidor MQTT instalado no notebook. Este servidor possuía um endereço IP da rede interna para facilitar a comunicação e diminuir as interferências oriundas da internet. O notebook servia como um *broker* e um *subscriber*, onde ele como *subscriber* se inscrevia no tópico referente ao *publisher* do sensor, e essa inscrição era feita pelo *broker* que era ele próprio. Para armazenar os dados recebidos no *subscriber*, foi necessário criar um *script*, em Python, que ficava ouvindo na porta do *subscriber* e armazenava as mensagens escutadas.

O teste deu um resultado satisfatório apesar de num primeiro momento não haver uma visualização clara do que os dados recebidos representavam em termos de qualidade do ar. Outro teste realizado foi a duração de uma bateria instalado no sensor, por conta da validação de dados ser feita em locais de terceiros talvez seria necessário o uso de uma bateria para fornecer energia ao sensor durante a coleta de dados nestes locais. A bateria utilizada para o teste foi um *Power Bank* modelo XTRP-P10WT da empresa XTRAX com capacidade de 10000 *mAh* (miliampere-hora). No teste foi constatado que a duração da coleta de dados com esta bateria foi maior que 48h, o que era suficiente para uma possível validação de dados externo na qual teria um tempo mínimo de 24h.

Um empecilho foi registrado durante uma das coletas experimentais, a posição do sensor em relação a luz solar influenciava nos valores dos dados coletados. Isto se deve ao fato do sensor possuir um detector sensível à luz, por conta disso o sensor não deve ser instalado com a lente do detector voltada para a luz. É necessário instalar o sensor na posição vertical, como sugere o *datasheet* do sensor de material particulado, no qual evita que contato de luz externa com a lente já que num contexto de coleta ao ar livre o sensor



Figura 11 – Protótipo do sensor desenvolvido pelo projeto

fica sujeito à luz do sol que muda de direção com o passar do tempo.

3.3.5 Implementação e Implantação

Com os materiais em mãos e seguindo as arquiteturas elaboradas, a Figura 11 mostra o protótipo que foi desenvolvido, e a Figura 12 mostra o protótipo internamente, o sensor foi construído primeiro para a realização de validação de dados. Esta validação foi feita comparando os dados coletados pelo sensor com os dados dos sensores em macro-escala da UFES e do IEMA. Mas para esta comparação ocorrer é preciso ter primeiro os dados em formato padronizado utilizado pelas organizações. O dado bruto obtido pelo sensor foi o *Low Pulse Occupation* que foi convertido para a taxa *Low ratio [%]*, na qual é utilizado na fórmula:

$$Concentration = 1.1 \times (Low\ ratio^3) - 3.8 \times (Low\ ratio^2) + 520 \times Low\ ratio + 0.62 \quad (3.1)$$

Esta equação é derivada do gráfico fornecido pelo *datasheet* do sensor de material particulado. Com essa concentração é possível obter o dado no formato padronizado, ver Figura 8, e assim a comparação dos dados pode ser feita. O dado bruto é enviado pelo microcontro-

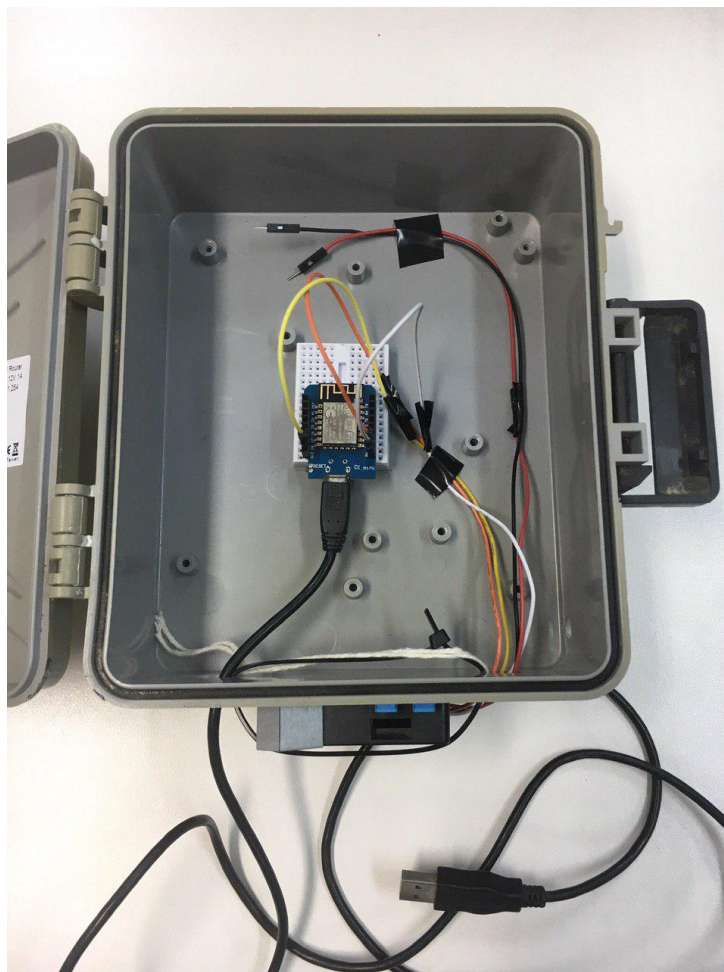


Figura 12 – Protótipo do sensor desenvolvido pelo projeto

lador para a plataforma ThingSpeak onde foi armazenado. Nesta plataforma foram criados canais nas quais os microcontroladores podem ler e escrever dados. Alguns canais criados podem ser vistos na Figura 13. A versão gratuita da plataforma disponibiliza apenas 4 canais de monitoramento, portanto alguns canais foram reutilizados para monitorar um número maior de locais.

Cada canal possui uma identificação, chamada de *Channel ID*, e suas *API Keys* que são chaves de leitura e escrita no canal. A chave de escrita no canal foi utilizada no código do microcontrolador, que precisa da chave para escrever no canal os dados obtidos pelo sensor. A chave de leitura é utilizada nos gráficos personalizados criados na plataforma, utilizando a linguagem MATLAB embutida, para transformar o dado bruto em um dado padronizado e mais simples de ser lido.

A taxa de envio dos dados para a plataforma foi de 30 segundos, entretanto os dados disponibilizados pelo IEMA são a cada 60 minutos, e por conta disso foi necessário obter uma média dos dados em formato padronizado coletados pelos sensores a cada 30 minutos. Nos canais criados na plataforma é possível visualizar os dados chegando na taxa desejada, no caso 30 segundos, e também a quantidade de dados que já foram coletadas

My Channels

New Channel

Name	Created	Updated
Teste Private Public Settings Sharing API Keys Data Import / Export	2019-10-04	2019-10-04 13:48
lprm Private Public Settings Sharing API Keys Data Import / Export	2019-10-15	2019-10-15 17:26
Casa do Enzo Private Public Settings Sharing API Keys Data Import / Export	2019-10-16	2019-11-18 23:57
Casa Private Public Settings Sharing API Keys Data Import / Export	2019-11-27	2019-11-27 15:42

Figura 13 – Canais de monitoramento na plataforma *ThingSpeak*

Channel Stats

Created: [about a month ago](#)
Last entry: [about a month ago](#)
Entries: 829

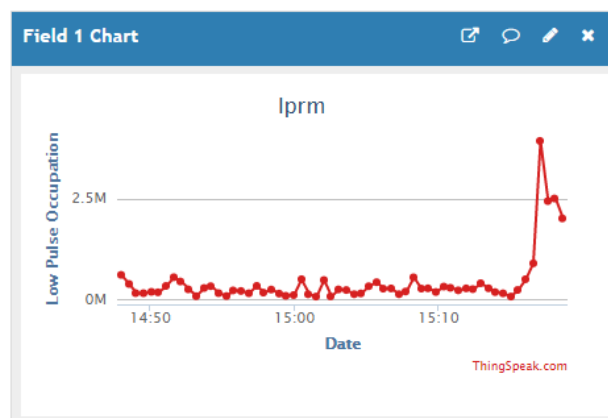


Figura 14 – Visualização do dado bruto em um canal do ThingSpeak

e armazenadas. A Figura 14 é possível ver o gráfico que é criado automaticamente pela plataforma a partir dos dados brutos coletados.

Após a implantação dos sensores, eles foram colocados em pontos da cidade, alguns nos bairros próximos à empresa de mineração na qual os moradores reclamam da emissão de pó de minério. Na Figura 15 é possível visualizar os locais onde os sensores foram instalados para a coleta de dados.

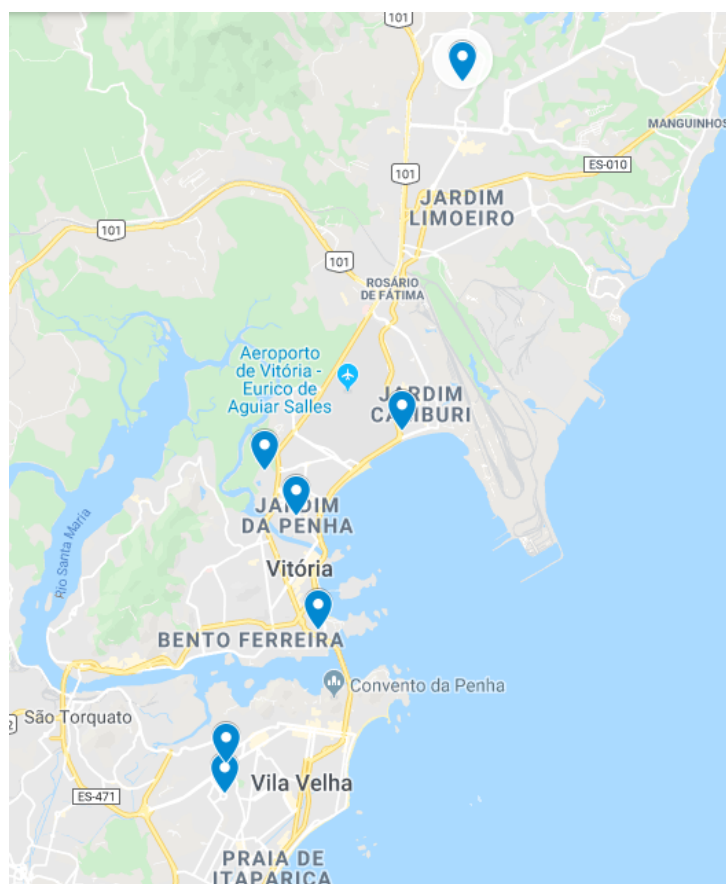


Figura 15 – Mapa dos locais de monitoramento

4 Resultados e Análises

A análise dos resultados obtidos é descrito abaixo separado pela parte da validação dos dados seguido dos resultados monitorados nos locais escolhidos. Os resultados foram avaliados e classificados de acordo com o Índice de Qualidade do Ar disponibilizado pelo IEMA.

4.1 Validação

Nesta etapa os sensores foram colocados em casas próximos às estações de monitoramento do IEMA para serem validados no mês de novembro pois o instituto disponibiliza os resultados do mês atual no início do mês seguinte. O primeiro teste de validação ocorreu no mês de maio de 2019 (28/05/2019) na localidade próxima ao sensor de macro-escala do IEMA no bairro Ibes em Vila Velha. Os dados foram coletados durante a madrugada para não incomodar os anfitriões da casa em que foi instalado. Na Figura 16 é mostrado o gráfico dos dados coletados pelo sensor construído em microescala em comparação com os dados do sensor macroescala do IEMA.

A linha azul no gráfico representa a média dos dados coletados pelo sensor do projeto no formato padronizado de qualidade do ar, e a linha vermelha representa os

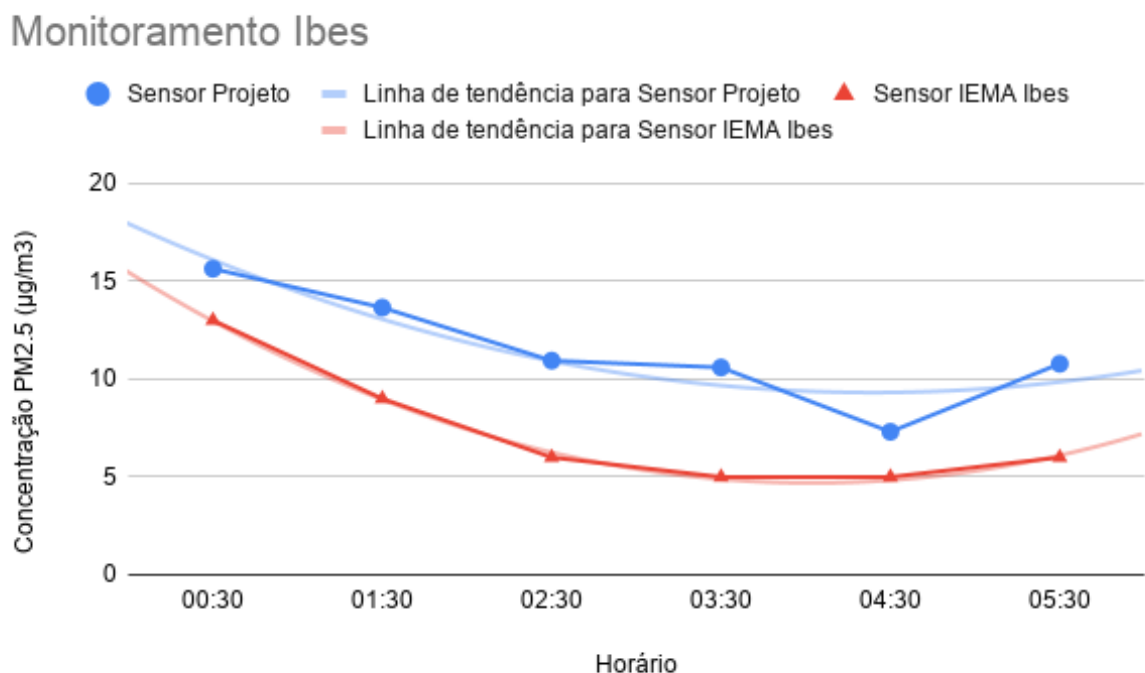


Figura 16 – Gráfico de monitoramento no Ibes

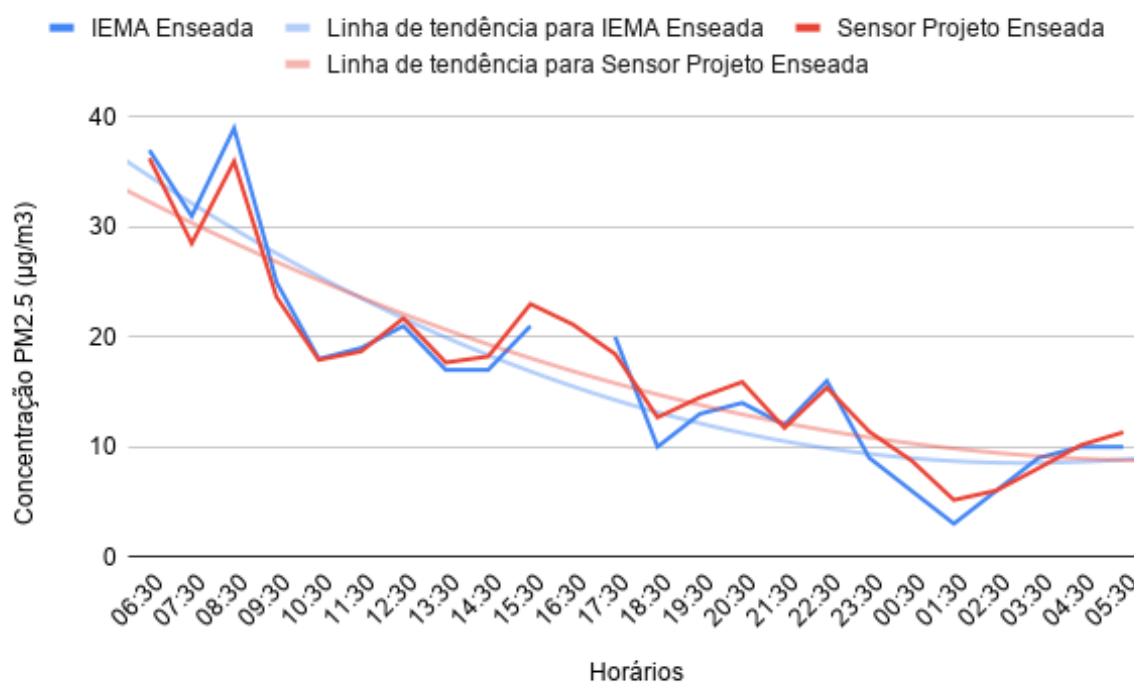


Figura 17 – Gráfico de monitoramento Enseada do Suá

dados medidos pela estação do IEMA. No gráfico é possível notar que os valores são bem próximos. As curvas de tendências de ambos também próximas no nivelamento, estão representadas pelas retas de cor mais clara. Esta validação foi feita salvando os dados no próprio microcontrolador, sem utilizar ainda a comunicação com a plataforma *ThingSpeak*.

Uma validação também foi feita nas proximidades da estação do IEMA na Enseada do Suá em Vitória. Esta teve uma duração de 24h e ocorreu entre os dias 04 e 05 de Outubro de 2019. O sensor foi instalado em uma varanda de um apartamento do sexto andar de um prédio ao lado do corpo de bombeiros onde o sensor do IEMA estava instalado. A Figura 17 é referente a um gráfico feito a partir dos dados obtidos do sensor do projeto e da planilha de monitoramento do IEMA referente àquele dia. Um dos dados do sensor no bombeiros, 16:30, não constava na planilha, por isso houve uma descontinuidade da curva dos dados do IEMA neste ponto. É notório a proximidade dos dados mesmo com a descontinuidade, e as curvas de tendência coincidem entre si. A média do erro relativo entre os dados do IEMA e os dados coletados pelo sensor desenvolvido foi de 12.15% e foi calculado com a média dos erros obtidos em cada medição. Este erro individual foi calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$erro_{relativo}(\%) = \frac{|valor_{IEMA} - valor_{Sensor}|}{valor_{IEMA}} \times 100 \quad (4.1)$$

Outra validação feita instalando o sensor no mesmo local ocorreu posteriormente. Este foi um pouco mais curto para validar também os envios de dados via Wi-Fi para o *ThingSpeak* pois o anterior foi feito utilizando a memória interna do microcontrolador. O

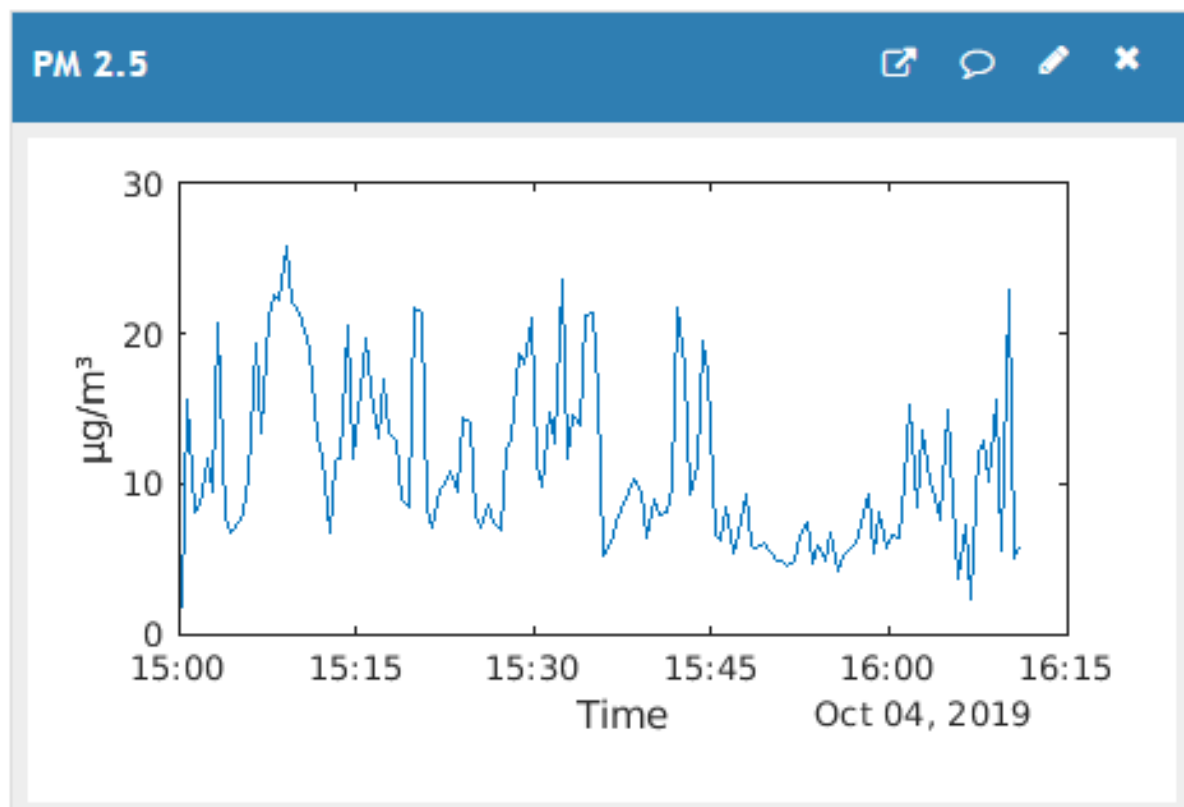


Figura 18 – Gráfico de monitoramento na Enseada do Suá

teste ocorreu no dia 04 de Outubro de 2019 no período da tarde. O gráfico da Figura 18 é um gráfico personalizado criado com código MATLAB a partir dos dados de entrada recebido pelo sensor do projeto. Estes dados já estão no padrão utilizado pelo IEMA. A média de concentração do material particulado durante este tempo foi de $10,04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e neste nos período de 15:30 e 16:30 do sensor do IEMA foram medidos uma média de $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, de acordo com a planilha dos dados monitorados do mês de Outubro de 2019 disponibilizados pelo IEMA em seu site.

4.2 Monitoramento

Após validar a eficácia do sensor do projeto comparado-o com os sensores de macro-escala do IEMA, é possível finalmente monitorar ambientes domésticos para verificar o nível de qualidade do ar, principalmente em locais onde houvera reclamações de muita incidência de poeira e pó de minério. Infelizmente nestes locais com mais reclamações não há monitoramento por parte do IEMA ou de outras partes sobre o material particulado $\text{PM}_{2.5}$, apenas o PM_{10} e outros componentes são monitorados. Porém o sensor construído não possui a capacidade de monitorar este PM_{10} , apenas $\text{PM}_{2.5}$ e $\text{PM}_{1.0}$ e portanto não houveram comparações a serem feitas nesta etapa, apenas o monitoramento e a classificação da qualidade do ar foram estabelecidas.

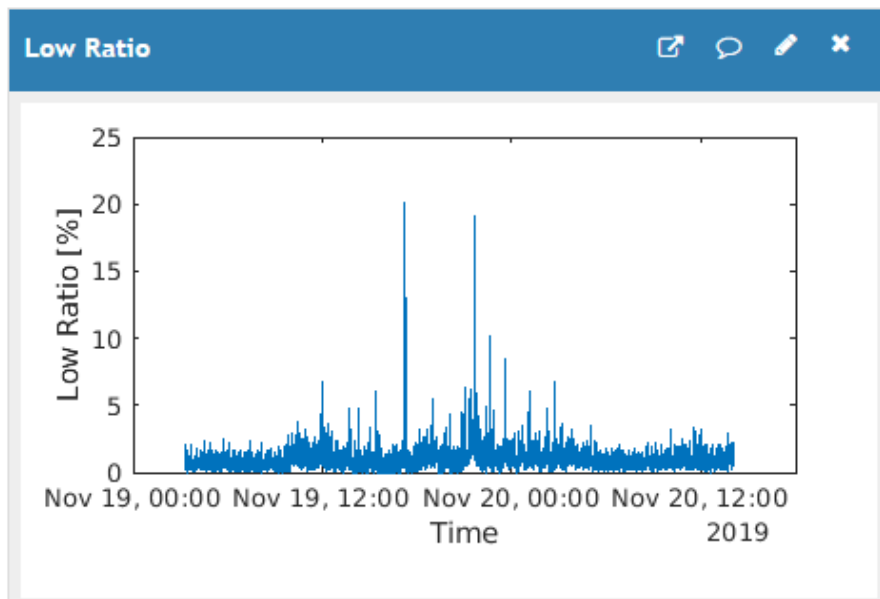
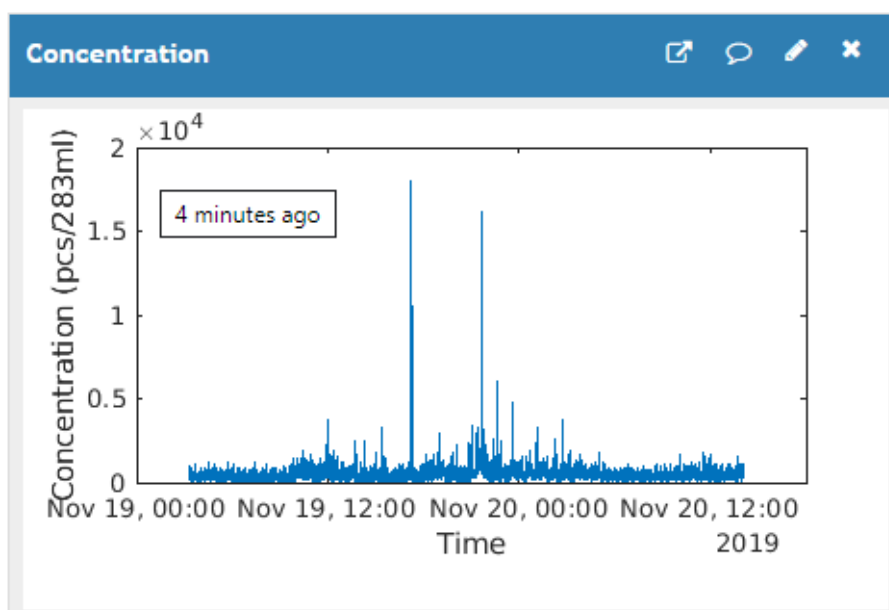
Figura 19 – Gráfico de *Low ratio*

Figura 20 – Gráfico de Concentração de partículas em pcs/L

Os locais de monitoramento podem ser vistos na Figura 15. Na plataforma foram criados 3 gráficos baseados nos dados de entrada. Este primeiro conjunto de gráficos foram feitos no monitoramento de uma casa no bairro Colina de Laranjeiras na Serra. No primeiro gráfico os dados de entrada bruto, *Low Pulse Occupation*, são transformados na taxa *Low ratio [%]*. Já na Figura 19 é visto o gráfico personalizado. Outro gráfico criado foi o de concentração de partículas em pcs/L, mostrado na Figura 20.

Por fim o último gráfico personalizado criado é o que é realmente usado para comparar os níveis de qualidade do ar daquele ambiente. Este gráfico mede o nível de

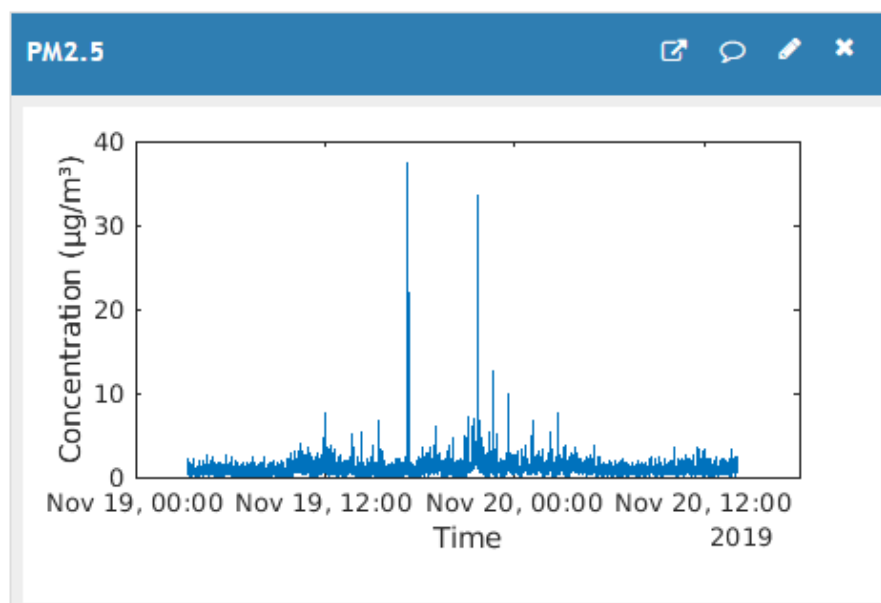


Figura 21 – Gráfico de Concentração de partículas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$

concentração de material particulado $\text{PM}_{2.5}$ em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no qual pode ser visualizado na Figura 21. Em relação ao índice de qualidade do ar, na média o ambiente teve uma avaliação BOA, apesar de ter alguns picos acima de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mas abaixo de 60 que é considerado MODERADO.

Além disso destes gráficos a plataforma do ThingSpeak ainda disponibiliza um mapa da localidade em que o sensor foi instalado para facilitar a visualização do local em que o sensor está hospedado. A Figura 15 mostra como o mapa é visualizado na plataforma, que possui interação com usuário onde pode-se arrastar e dar *zoom* no mapa. Infelizmente ainda não é possível fazer a integração dos mapas de cada sensor em um único mapa, o que seria interessante como trabalho futuro um local de visualização geral de monitoramento.

Na UFES foi medido o material particulado no ambiente de laboratório, onde várias pessoas utilizam. Pela Figura 23 foi constatado que o índice de qualidade do ar neste ambiente foi avaliado como BOA por ter obtido na média uma concentração abaixo de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. É importante medir-se a qualidade nestes ambientes pois muita gente estuda o dia todo neles, e existem pessoas com condições sensíveis como doenças respiratórias. Ter uma avaliação negativa no monitoramento pode acarretar em sérios problemas à saúde desse grupo de pessoas, e quanto mais negativo for a avaliação maior é o número de pessoas afetadas.

No bairro Aribiri em Vila Velha também foi medido o nível de material particulado $\text{PM}_{2.5}$ em um ambiente doméstico. Este foi próximo a uma rodovia e em horários de pico no trânsito foi constatado um aumento nos níveis de concentração fazendo com que sua avaliação naquele instante seja considerado MODERADO, mas na média geral as condições foram avaliadas como BOA, como pode ser visto na Figura 24. Isto mostra que



Figura 22 – Mapa do local onde o sensor foi instalado

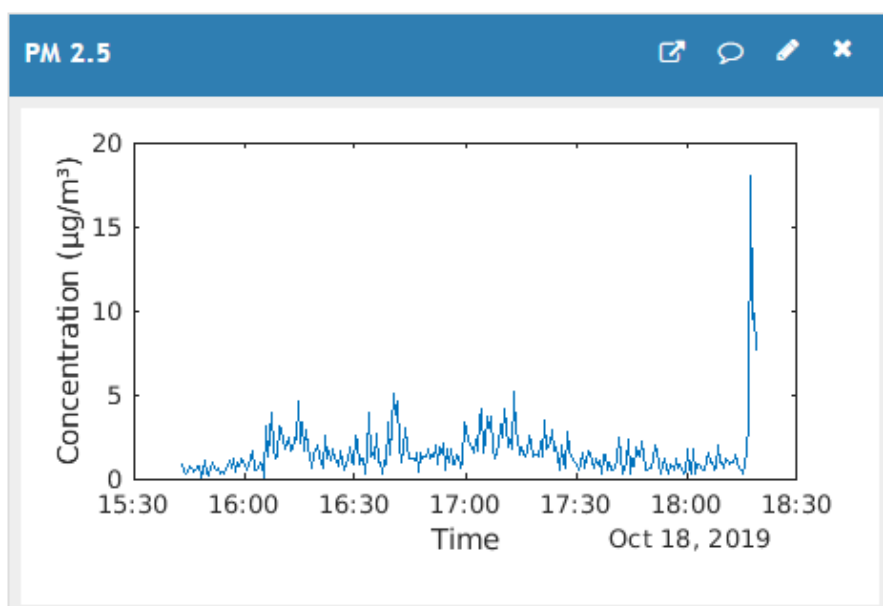


Figura 23 – Gráfico de Concentração de partículas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (UFES)

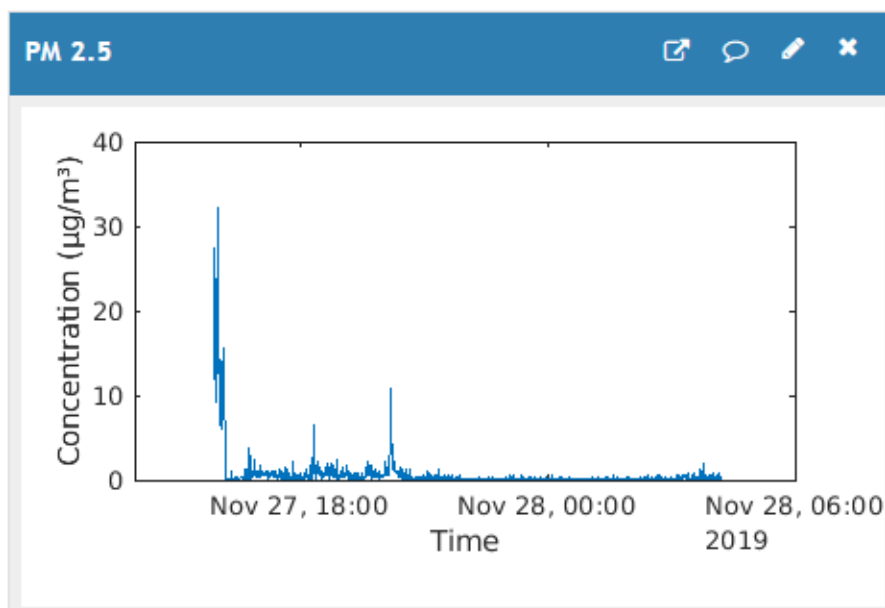


Figura 24 – Gráfico de Concentração de partículas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Aribiri)

apesar da média ser boa é importante analisar não apenas a média de um período de 24h, como é feito no índice disponibilizado pelo IEMA, pois existem períodos durante o dia em alguns locais que os níveis podem ser muito altos e que podem acarretar sérios problemas à saúde.

Em jardim camburi foram feitas duas medições em locais distintos do bairro. O primeiro local fica localizado mais próximo a praia e a coleta foi feita durante algumas horas do dia. A Figura 25 representa o monitoramento deste local no dia 16 de outubro de 2019. É extremamente alarmante o alto nível de concentração de material particulado detectado pelo sensor. O IQA neste período de tempo foi considerado RUIM, tendo alguns picos de MUITO RUIM e PÉSSIMA. Vale ressaltar que o local fica de frente para o mar, portanto este lugar sofre consequências da maresia e dos ventos que carregam vestígios de areia da praia. Mas, de acordo com a planilha dos dados monitorados pelo IEMA do mesmo dia em Jardim Camburi, dados elevados de PM_{10} foram detectados no mesmo período neste bairro, sendo que a estação de monitoramento fica mais no centro da região. Infelizmente esta estação não monitora os níveis de $\text{PM}_{2.5}$.

O segundo local fica um pouco mais pro centro do bairro e foram feitas medições durante 6 dias. A Figura 26 mostra os níveis de material particulado nos primeiros dias de medição. A média por dia nesta parte foi de $27.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$, o que é considerado MODERADO no IQA. Na Figura 27 a média diária subiu para $29.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que também é considerado MODERADO. Também é possível ver que houve um pico de algumas horas acima de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que é MODERADO ainda e poucos picos acima de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ já é considerado RUIM no IQA.

Em Jardim da Penha foram feitas medições ao mesmo tempo do segundo local de

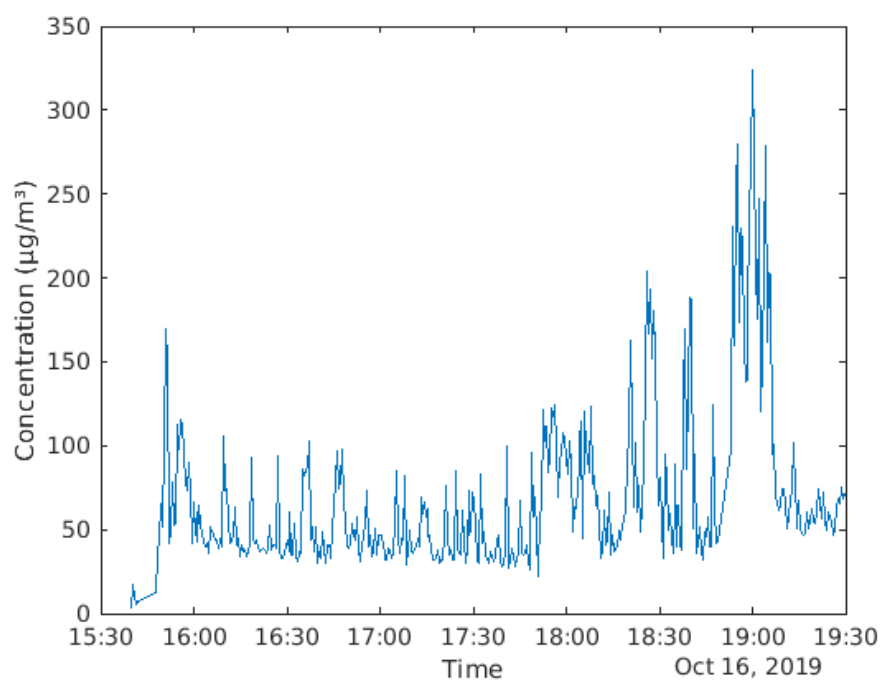


Figura 25 – Gráfico de Concentração de partículas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Jardim Camburi (1)

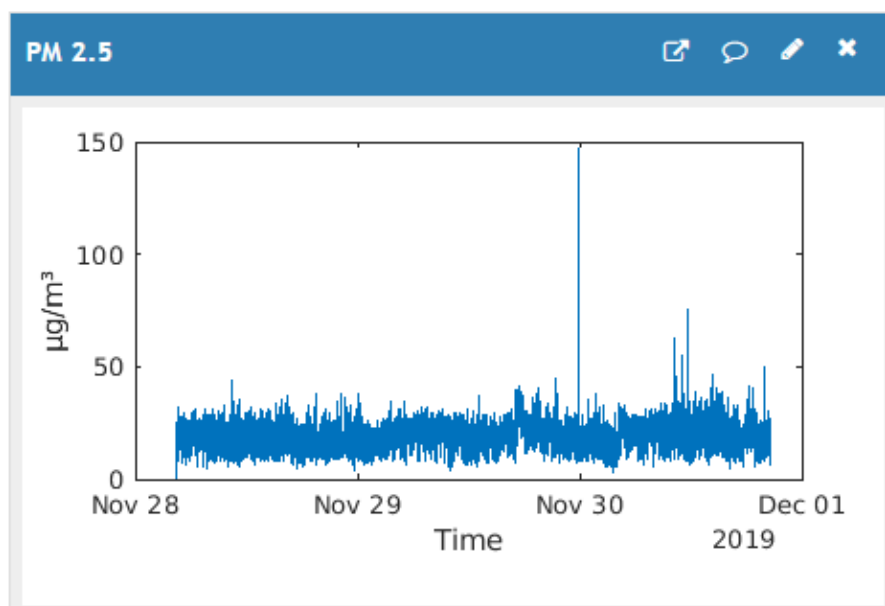


Figura 26 – Gráfico de Concentração de partículas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Jardim Camburi (2)

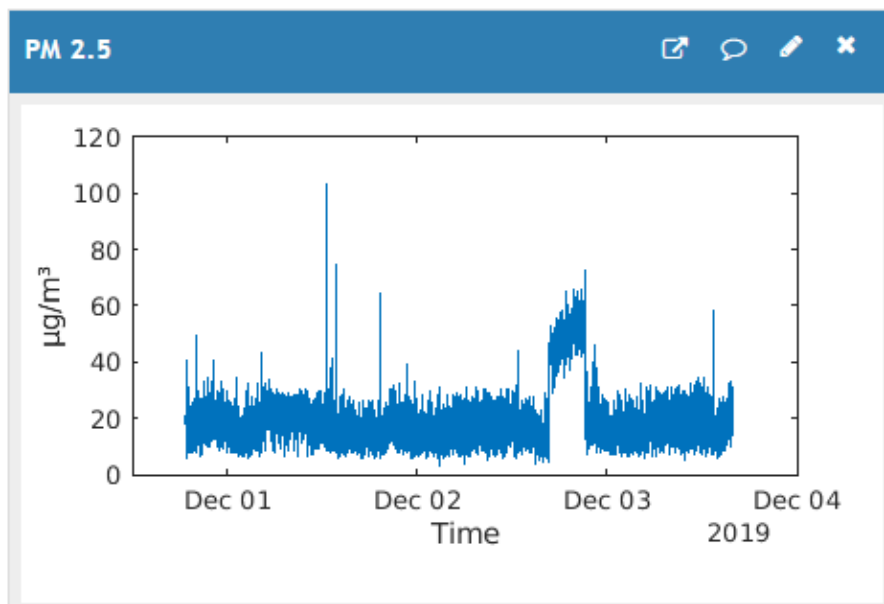


Figura 27 – Gráfico de Concentração de partículas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Jardim Camburi (2)

Jardim Camburi com finalidade de comparar os dois locais no mesmo espaço de tempo. A Figura 28 mostra os 3 primeiros dias, onde a média diária de concentração foi de $3.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e a Figura 29 mostra a concentração dos outros 3 dias onde a média diária recebeu um leve aumento, subiu para $4.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ com poucos picos acima de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Apesar dos picos o IQA neste local foi considerado BOA.

Em comparação dos dois locais é nítido a diferença das médias de concentração, enquanto um local o IQA foi sempre constante se mantendo em qualidade BOA, no outro o índice se manteve MODERADO com picos severos de qualidade RUIM. Houve uma diferença média de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentração de material particulado entre os bairros. Vale ressaltar neste caso que Jardim Camburi que obteve as maiores médias é o bairro mais próximo à mineradora onde há reclamações por parte dos moradores dos altos índices de pó preto em suas casas que são oriundos da empresa mineradora.

Uma tabela foi criada para melhor visualização do nível de qualidade do ar monitorado em cada local. Vale ressaltar que o monitoramento foi feito em ambientes domésticos e não deve ser generalizado para a região inteira.

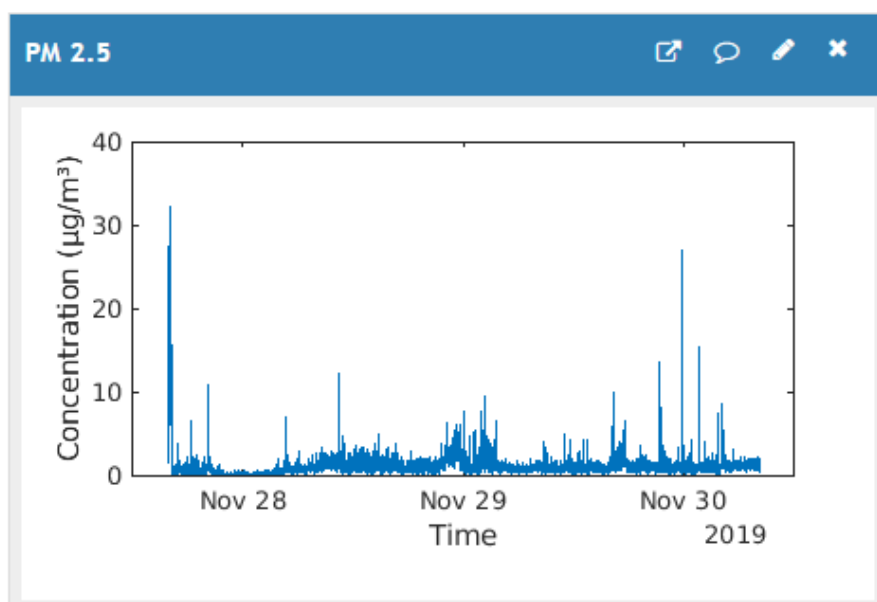


Figura 28 – Gráfico de Concentração de partículas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Jardim da Penha

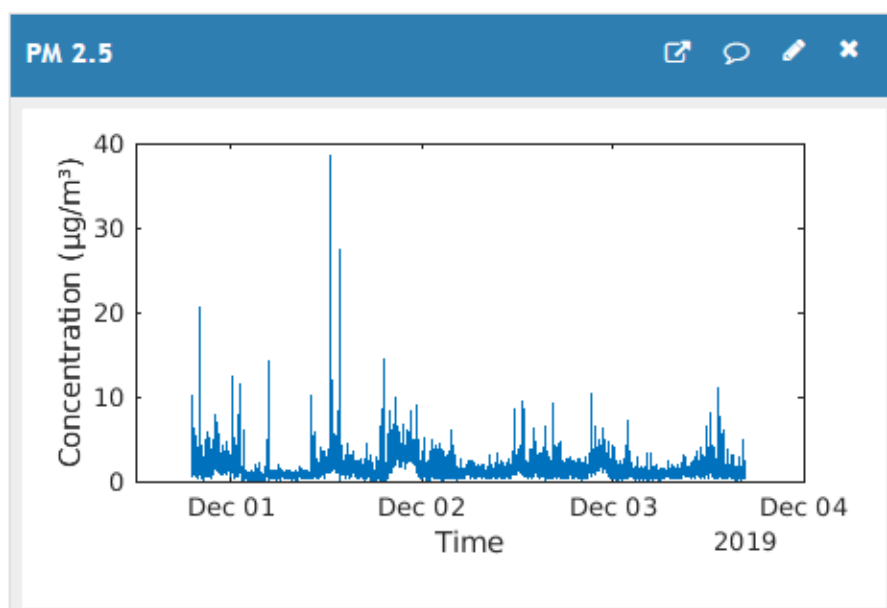


Figura 29 – Gráfico de Concentração de partículas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Jardim da Penha

Local	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	IQA
Aribiri	3.224	BOA
Colina de Laranjeiras	1.042	BOA
Enseada do Suá	17.178	BOA ¹
Ibes	11.369	BOA
Jardim Camburi(1)	68,006	RUIM ²
Jardim Camburi(2)	28.745	MODERADA
Jardim da Penha	3.920	BOA
UFES	1.515	BOA

¹ A média em um dos períodos do dia foi avaliada como MODERADA.

² Média por hora em frente à praia.

Tabela 2 – Tabela dos dados monitorados

5 Considerações Finais

Este trabalho buscou construir um sensor de baixo custo para monitorar os níveis de material particulado em ambientes domésticos e analisar a qualidade do ar neste quesito. Neste capítulo será abordado as conclusões do trabalho e por fim quais foram suas limitações e perspectivas de trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

Com o crescimento de casos de saúde relacionado à poluição da atmosfera houve a necessidade de obter dados sobre a qualidade do ar para monitorar os ambientes e tentar controlar o nível de poluição quando estes locais se veem em condições agravantes. Mas para que este monitoramento seja feito é necessário o uso de estações meteorológicas que chegam a custar meio milhão de reais. Estas estações possuem monitoramento principalmente de gases poluentes, temperatura, umidade, pressão e materiais particulados. Por conta deste alto custo estas estações ficam em pontos estratégicos das cidades, possuindo apenas uma macroescala de monitoramento. A cidade de Vitória possui algumas destas estações e possui uma grande produtora de minério de ferro, onde há alto índice de material particulado suspenso no ar. Devido ao custo elevado de se fazer este monitoramento e devido as condições especiais da cidade de Vitória surgiu a necessidade de construir um sensor de baixo custo por meio deste projeto.

Todos os objetivos citados na Seção 1.1 foram alcançados, começando pelos estudos feitos principalmente na parte sobre poluição do ar e seus tipos de monitoramento. Como esta monografia faz parte de um projeto do curso de Ciência da Computação, o conhecimento acerca deste assunto era mínimo e por isso foi necessário obter conhecimentos de outras áreas, como por exemplo da Engenharia Ambiental que possuem conhecimento sobre. Além disso no curso também não há muitas disciplinas na grade sobre Sistemas Embarcados e Internet das Coisas e também foi necessário a busca por conhecimento por fora da universidade.

Após os estudos e análise do problema foi proposto uma solução com alguns sensores de material particulado. Entre estes estão o *Samyoung DSM501* e o *Sharp's GP2Y1010AU0F*. Infelizmente apenas o primeiro foi levado pra frente no projeto, apesar de que foram comprados ambos dos sensores e os testes preliminares funcionaram em ambos. Como alguns autores já utilizaram o segundo sensor, foi proposto a utilização do primeiro, a priori, para verificar sua eficácia. Este sensor fez parte da arquitetura geral do projeto, citado no Capítulo 3.1, na qual foi definido, além do sensor, o microcontrolador, o protocolo de comunicação utilizado e onde foram armazenado os dados coletados.

A escolha do ESP8266 como microcontrolador foi essencial devido ao seu baixo custo e sua possibilidade de se comunicar via Wi-Fi pois facilitou a comunicação com a plataforma ThingSpeak. A escolha da plataforma também foi um importante por ser uma plataforma gratuita voltada para projetos em IoT e possuir bibliotecas para facilitar a implementação destes projetos.

Para verificar que os dados que os sensores coletaram são válidas foi necessário uma etapa de validação, Seção 4.1, na qual foram feitas comparação dos dados coletados nos arredores das estações e comparados com os dados das mesmas. As comparações apresentaram resultados positivos e esperados, apesar do pouco tempo dado a esta etapa. Apenas 2 estações do IEMA monitoraram $PM_{2.5}$, e as validações foram feitas em cima destas estações.

As arquiteturas elaboradas foram implementadas tanto na etapa de validação quanto na etapa de monitoramento em si. Ambas tiveram suas importâncias devido às condições de comunicação nos locais serem diferentes. Mas no contexto de produto apenas a arquitetura que utiliza a comunicação Wi-Fi para enviar e armazenar os dados é válida, isto se deve ao fato do microcontrolador não ter muita memória de armazenamento e como ele possui comunicação Wi-Fi é importante usufruir de todos os recursos que um sistema lhe oferece, aumentando assim seu custo-benefício.

Na etapa de monitoramento é notável que locais mais próximos à empresa mineradora que transporta minério objetivaram resultados mais expressivos. Também é importante ressaltar que material particulado não é só poluição, partículas de areia de praia por exemplo também influenciam no monitoramento como foi analisado. No entanto os níveis médios de qualidade do ar detectado pelos sensores nos locais próximos à mineradora são maiores do que nos outros locais monitorados. Isso levou o levantamento de algumas questões como o porquê da estação de monitoramento deste local não possuir dados sobre $PM_{2.5}$, que são mais agravantes pra a saúde do que PM_{10} na qual é o único tipo de material particulado monitorado pela estação. Outra questão gira em torno do que pode ser feito quando altos níveis de poluição forem detectados pelos sensores, o que a população deve fazer nestes momentos e quais protocolos a serem seguidos pelas autoridades. Outra dúvida levantada foi o porquê dos dados monitorados de um mês serem só publicados no mês seguinte, dados ao vivo para a população poderia ser um meio mais eficiente de se comunicar e evita possíveis fraudes.

É importante destacar o grande desafio que foi integrar diferentes áreas da Computação com outras áreas relacionadas ao problema. No desenvolvimento físico do sensor foram utilizados conceitos das disciplinas Eletricidade Aplicada e Interface e Periféricos. O desenvolvimento de códigos embarcados foi relacionado com as disciplinas de Programação, Linguagens de Programação, Estruturas de Dados, Sistemas Operacionais e Banco de dados. Na parte de comunicação foi essencial os conhecimentos das disciplinas de Redes

de Computadores e Redes de Sensores sem fio. E na análise dos dados foram utilizados os conceitos de Algoritmos Numéricos. Além disso para a escrita da monografia e para as buscas por referências a disciplina de Metodologia de Pesquisa foi de suma importância.

É de muito proveito a experiência adquirida neste trabalho visto que foi possível colocar em prática os conteúdos estudados em sala de aula além do aprendizado de novas ferramentas e tecnologias que se mostraram úteis para o desenvolvimento de um sensor de baixo custo que contribui positivamente tanto na economia quanto na saúde de pessoas e entidades.

5.2 Limitações e Perspectivas Futuras

O desenvolvimento de um sensor de baixo custo possui certas limitações principalmente no poder computacional envolvido, na qual não possui muita memória e poder de processamento quanto um computador normal ou até mesmo dispositivos de Arduino. O uso do ESP8266 utilizando sua comunicação via Wi-Fi é interessante porém é necessário ter por perto um roteador Wi-Fi com acesso à internet que com o crescimento da tecnologia tem se tornado cada vez mais comum nas casas dos cidadãos, mas ainda é uma restrição que deve ser colocada em pauta. Os poucos dados sobre $PM_{2.5}$ na região também limitou a validação do sensor desenvolvido, isso deve ao fato do IEMA possuir apenas 2 estações com este monitoramento e devido às chuvas intensas no período de validação não foi possível validar o sensor com a estação da UFES. O sensor Samyoung DSM501 possui também monitoramento de $PM_{1.0}$, que são mais agravantes para a saúde mas que não possui um padrão nacional e nem internacional para este tipo de monitoramento, além também de não haver muitos trabalhos acadêmicos sobre o assunto e por isso não foi abordado no projeto mas abre espaço para alguns trabalhos futuros, como listados abaixo:

- Validar o sensor com mais estações de monitoramento;
- Fazer o monitoramento de $PM_{1.0}$;
- Adicionar ao sensor o monitoramento conjunto de outras métricas como temperatura, umidade, pressão atmosférica, gases poluentes, entre outros;
- Desenvolver uma plataforma própria para melhor visualização dos dados;
- Monitorar com outros sensores de material particulado de baixo custo, como Sharp's GP2Y1010AU0F, e comparar o desempenho entre eles.

Referências

- A GAZETA. *Quantidade de pó preto aumenta em vários locais da Grande Vitória*. 2019. Disponível em: <<https://www.agazeta.com.br/es/gv/quantidade-de-po-preto-aumenta-em-varios-locais-da-grande-vitoria-0319>>. Acessado em: 26 de Nov. de 2019. Citado na página 17.
- ABBEY, D. E. et al. Long-term inhalable particles and other air pollutants related to mortality in nonsmokers. *American journal of respiratory and critical care medicine*, American Thoracic Society New York, NY, v. 159, n. 2, p. 373–382, 1999. Citado na página 17.
- AL-ALI, A.; ZUALKERNAN, I.; ALOUL, F. A mobile gprs-sensors array for air pollution monitoring. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 10, n. 10, p. 1666–1671, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- ASHTON, K. et al. That ‘internet of things’ thing. *RFID journal*, v. 22, n. 7, p. 97–114, 2009. Citado na página 14.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The internet of things: A survey. *Computer networks*, Elsevier, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010. Citado na página 14.
- BAHIA, J. G.; CAMPISTA, M. E. M. Um mecanismo de controle de demanda no provimento de serviços de iot usando coap. In: SBC. *Anais do XXII Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços (WGRS-SBRC 2017)*. [S.l.], 2017. v. 22, n. 1/2017. Citado na página 15.
- BATES, D. V. Health indices of the adverse effects of air pollution: the question of coherence. *Environmental research*, Elsevier, v. 59, n. 2, p. 336–349, 1992. Citado na página 17.
- CHUNG, W.-Y.; OH, S.-J. Remote monitoring system with wireless sensors module for room environment. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Elsevier, v. 113, n. 1, p. 64–70, 2006. Citado na página 23.
- COUTO, M. M.; CORTE, F. D.; ARAUJO, E. E. L. Estudo sobre a poluição atmosférica na cidade de João Monlevade, Minas Gerais. *Anais do Seminário Científico da FACIG*, n. 4, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- DOCKERY, D. W. et al. An association between air pollution and mortality in six us cities. *New England journal of medicine*, Mass Medical Soc, v. 329, n. 24, p. 1753–1759, 1993. Citado na página 16.
- DOCKERY, D. W. et al. Effects of inhalable particles on respiratory health of children 1-4. *Am Rev Respir Dis*, v. 139, p. 587–594, 1989. Citado na página 17.
- FIELDING, R. et al. *Hypertext transfer protocol-HTTP/1.1*. [S.l.]: RFC 2616, June, 1999. Citado na página 15.
- G1 ESPÍRITO SANTO. *Entenda o que é o pó preto que polui o ar e o mar de Vitória*

- há anos. 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/espírito-santo/noticia/2016/01/entenda-o-que-e-o-po-preto-que-polui-o-ar-e-o-mar-de-vitoria-ha-anos.html>>. Acessado em: 26 de Nov. de 2019. Citado na página 17.
- HEIMANN, I. Source attribution of air pollution by spatial scale separation using high spatial density networks of low cost air quality sensors. In: CHAN, P. C. K. (Ed.). *Atmospheric Environment*. 113. ed. [S.l.]: Elsevier, 2015. p. 10–19. Citado na página 11.
- III, C. A. P. et al. Respiratory health and pm10 pollution: a daily time series analysis. *American Review of Respiratory Disease*, American Lung Association, v. 144, n. 3_pt_1, p. 668–674, 1991. Citado na página 17.
- KHADEM, M. I.; SGÂRCIU, V. Smart sensor nodes for airborne particulate concentration detection. *UPB Sci. Bull. Ser. C*, v. 76, n. 4, p. 3–12, 2014. Citado na página 23.
- LIGHT, R. A. et al. Mosquitto: server and client implementation of the mqtt protocol. *J. Open Source Software*, v. 2, n. 13, p. 265, 2017. Citado na página 15.
- LIMA, A. L. da; SILVA, V. L. da. Micro sensor para monitoramento da qualidade do ar. In: *Workshop de Gestão, Tecnologia Industrial e Modelagem Computacional*. [S.l.: s.n.], 2015. v. 1, n. 1. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- LIU, X. et al. A bicycle-borne sensor for monitoring air pollution near roadways. In: IEEE. *2015 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan*. [S.l.], 2015. p. 166–167. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- LOUREIRO, A. A. et al. Redes de sensores sem fio. In: SN. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*. [S.l.], 2003. p. 179–226. Citado na página 14.
- MATHWORKS. *ThingSpeak Communication Library for Arduino, ESP8266 and ESP32*. 2017. Disponível em: <<https://github.com/mathworks/thingspeak-arduino>>. Acessado em: 26 de Nov. de 2019. Citado na página 28.
- OASIS. *MQ Telemetry Transport*. 1999. Disponível em: <<http://mqtt.org/>>. Acessado em: 26 de Nov. de 2019. Citado na página 15.
- O’LEARY, N. *PubSubClient: a library provides a client for doing simple publish/subscribe messaging with a server that supports MQTT*. 2018. Disponível em: <<https://github.com/knolleary/pubsubclient>>. Acessado em: 26 de Nov. de 2019. Citado na página 28.
- POPE, C. A. et al. Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of us adults. *American journal of respiratory and critical care medicine*, New York, NY: American Lung Association, c1994-, v. 151, n. 3, p. 669–674, 1995. Citado na página 16.
- ROEMER, W. et al. Effect of ambient winter air pollution on respiratory health of children with chronic respiratory symptoms. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, v. 147, n. 1, p. 118–124, 1993. Citado na página 17.
- ROY, S.; BOSE, R.; SARDDAR, D. Smart and healthy city protecting from carcinogenic pollutants. *Int. J. Appl. Environ. Sci*, v. 12, p. 1661–1692, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

- SANTOS, A. S. dos et al. Emprego de componentes móveis de iot para análises espaçotemporais de alta resolução para avaliar a qualidade do ar em cidades médias brasileiras. In: SBC. *Anais do II Workshop de Computação Urbana (COURB 2018)*. [S.l.], 2018. v. 2, n. 1/2018. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- SCHWARTZ, J. Air pollution and daily mortality: a review and meta analysis. *Environmental research*, Elsevier, v. 64, n. 1, p. 36–52, 1994. Citado na página 17.
- SHELBY, Z.; HARTKE, K.; BORMANN, C. The constrained application protocol (coap). 2014. Citado na página 15.
- SHINDE, S. A. MQTT - Message Queuing Telemetry Transport protocol. In: *International Journal of Research*. 3. ed. [S.l.]: International Conference on Research and Recent Trends in Engineering and Technology. (ICRRTET), 2016. p. 240–244. Citado na página 11.
- SIREGAR, B.; NASUTION, A. B. A.; FAHMI, F. Integrated pollution monitoring system for smart city. In: IEEE. *2016 International Conference on ICT For Smart Society (ICISS)*. [S.l.], 2016. p. 49–52. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- SUNDMAEKER, H. et al. Vision and challenges for realising the internet of things. *Cluster of European Research Projects on the Internet of Things, European Commission*, v. 3, n. 3, p. 34–36, 2010. Citado na página 14.
- WHO, W. H. O. *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*. 2016. Citado na página 11.