



JOANA FILIPA MARQUES GIL

Licenciada em Ciências da Engenharia
Eletrotécnica e de Computadores

SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DO AR INTERIOR COM INTEGRAÇÃO EM PLATAFORMA LOW-CODE

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2025



SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DO AR INTERIOR COM INTEGRAÇÃO EM PLATAFORMA LOW-CODE

JOANA FILIPA MARQUES GIL

Licenciada em Ciências da Engenharia
Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Filipe de Carvalho Moutinho
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Júri

Presidente: Rui Miguel Henriques Dias Morgado Dinis
Professor Catedrático, Universidade NOVA de Lisboa

Arguente: Anikó Katalin Horvath da Costa
Professora Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Orientador: Filipe de Carvalho Moutinho
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Sistema de Monitorização da Qualidade do Ar Interior com Integração em Plataforma Low-Code

Copyright © Joana Filipa Marques Gil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa detêm o direito perpétuo e sem limites geográficos de arquivar e publicar esta dissertação em formato impresso ou digital, ou por qualquer outro meio existente ou que venha a ser criado, bem como de a divulgar através de repositórios científicos e permitir a sua cópia e distribuição para fins educacionais ou de investigação, não-comerciais, desde que seja dado o devido crédito ao autor e ao editor.

Este documento foi produzido com o sistema de composição (pdf/Xe/Lua)LaTeX e o modelo [NOVAtesis](#) (v7.8.0).

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Filipe de Carvalho Moutinho, por todo o apoio, disponibilidade e orientação ao longo deste trabalho.

Aos meus pais, que sempre privilegiaram a minha educação e me deram todo amor e carinho ao longo deste percurso. À minha irmã e ao meu namorado que nunca duvidaram de mim e não me deixaram desistir, que sempre me lembraram de respirar fundo quando a ansiedade dos próximos passos falava mais alto.

Aos meus amigos e colegas que partilharam comigo esta jornada. Nunca vou esquecer os momentos que passamos, desde as aulas, às horas de almoço passadas na cantina e no relvado da biblioteca, aos momentos de estudo passados.

Por último, obrigada a todos os professores desta nobre instituição, que me formaram e me prepararam para o futuro.

RESUMO

A Qualidade do Ar Interior (QAI) é uma temática cada vez mais relevante nos dias que correm, dado o impacto que a poluição atmosférica é para a saúde, associada a infeções respiratórias, doenças cardiovasculares e alterações no foro cognitivo. Têm-se observado mudanças nos hábitos quotidianos derivados de estilos de vida mais modernos e sedentários resultando numa permanência cada vez maior em ambientes interiores. Torna-se, portanto, essencial analisar e monitorizar a qualidade de ar destes ambientes fechados, mais limitados a nível de renovação do ar e dependentes de sistemas de ventilação.

Considerando este objetivo, foi desenvolvido um sistema de monitorização de alguns fatores ambientais impactantes na qualidade de ar, nomeadamente temperatura, humidade relativa e material particulado, como $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ e PM_{10} . O sistema é composto por um dispositivo de aquisição de dados sensoriais e uma aplicação desenvolvida na plataforma *low code* Blynk. O dispositivo de aquisição de dados recorre a sensores de baixo custo para efetuar medições em tempo-real ligados a um microcontrolador, que por sua vez, se comunica com um servidor na *cloud* através da Internet, utilizando uma ligação Wi-Fi ao router. Deste modo, o utilizador consegue visualizar a informação no momento e até uma semana. A aplicação emite alertas ao utilizador quando os fatores ambientais se encontram a níveis desaconselhados, via notificações de telemóvel.

Palavras-chave: DHT22 · ESP32 · Internet of Things (IoT) · Plataforma Blynk · QAI · SPS30

ABSTRACT

Air quality is an increasingly relevant subject, given the prevalent impact that air pollution has on people's health, associated with respiratory infections, cardiovascular diseases and cognitive changes. Changes have been observed in daily habits arising from more modern and sedentary lifestyles, leading to people spending more time indoors. It is therefore essential to analyze and monitor the air quality in these closed environments, characterized by limitations in terms of air renewal and dependent on ventilation systems.

With this goal in mind, a system was developed to monitor certain environmental factors that impact air quality, namely temperature, relative humidity and particulate matter, such as $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ and PM_{10} . The system consists of a sensory data acquisition device and an application developed on the Blynk low code platform. The data acquisition device uses low-cost sensors to take real-time measurements connected to a microcontroller, which in turn communicates them to a cloud server via the Internet, using Wi-Fi to connect to the router. This allows the user to view the information in real time and up to a week back. The application alerts the user when environmental factors reach undesirable levels via mobile phone notifications.

Keywords: DHT22 · ESP32 · Internet of Things (IoT) · Blynk Platform · QAI · SPS30

ÍNDICE

Siglas	x
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Descrição do documento	2
2 Estado de Arte	3
2.1 Poluição e qualidade de ar interior	3
2.1.1 Material particulado	4
2.1.2 Compostos Orgânicos Voláteis	5
2.1.3 Condições térmicas	6
2.2 Regulamentos e Orientações	7
2.3 Plataforma Blynk	7
2.4 Sistemas de monitorização em tempo real	9
2.5 Considerações finais	14
3 Arquitetura do Sistema	17
3.1 Dispositivo de aquisição de dados	18
3.1.1 Microcontrolador	19
3.1.2 Sensor de temperatura e humidade relativa	21
3.1.3 Sensor de material particulado	24
3.2 Transmissão e armazenamento	26
3.3 Interface gráfica do utilizador	29
4 Resultados	33
4.1 Monitorização Contínua	33
4.1.1 Alertas	33
4.1.2 Temperatura	34
4.1.3 Humidade	35

4.1.4	PM _{1.0}	36
4.1.5	PM _{2.5}	36
4.1.6	PM ₁₀	37
5	Conclusão	39
	Bibliografia	40

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Ilustração explicativa de como as partículas em suspensão entram no corpo, adaptado de [14].	5
2.2	Apresentação dos planos oferecidos pela plataforma Blynk	9
2.3	Diagrama de blocos da arquitetura do sistema concebido em [30].	10
2.4	Interface móvel do sistema proposto, retirado de [32].	11
2.5	Adaptação da arquitetura do sistema de monitorização apresentada em [32].	11
2.6	Montagem do sistema retirado de [33].	13
3.1	Arquitetura do sistema desenvolvido	18
3.2	Fluxograma do sistema desenvolvido	20
3.3	Módulo de aquisição de dados: 1. Sensor de material particulado, Sensirion SPS 30; 2. Sensor de temperatura e humidade relativa, DHT22; 3. Microcontrolador, ESP32; 4. Fonte de alimentação	21
3.4	Espressif ESP32 DevKitC VE.	22
3.5	Representação gráfica dos pinos do microcontrolador ESP32 retirado da documentação da Espressif, [37].	22
3.6	Sensor DHT22 utilizado com esquema de ligação ao microcontrolador. . . .	23
3.7	Representação gráfica da trama de comunicação do DHT22	23
3.8	Representação das entradas (1) e saídas (2) do fluxo de ar do sensor.	24
3.9	Ligação entre o sensor SPS30 da Sensirion e o microcontrolador.	25
3.10	Configuração de uma rede WiFi utilizando a biblioteca <i>WiFiManager.h</i> [42].	26
3.11	Excerto de código - Definição das constantes de identificação do template, do nome do projeto e do token de autenticação utilizados pela plataforma Blynk para conectar o dispositivo de aquisição de dados ao servidor e ao template do sistema.	27
3.12	Excerto de código - Função que lida com a perda do sinal de rede e perda da ligação ao servidor	28
3.13	Exemplo de criação de um datastream de pins Virtuais, neste caso, para receber medições de temperatura.	30

3.14	Visão do sistema de monitorização e alertas desenvolvido para computador	30
3.15	Interface gráfica web durante alertas dos níveis de materiais particulados .	31
3.16	Visão do sistema de monitorização e alertas desenvolvido na aplicação móvel.	32
4.1	Registos de temperatura de 26 de Outubro a 1 de Novembro.	35
4.2	Registos de humidade de 26 de Outubro a 1 de Novembro.	36
4.3	Registos de material particulado $PM_{1.0}$ de 26 de Outubro a 1 de Novembro.	37
4.4	Registos de material particulado $PM_{2.5}$ de 26 de Outubro a 1 de Novembro.	38
4.5	Registos de material particulado PM_{10} de 26 de Outubro a 1 de Novembro. .	38

ÍNDICE DE TABELAS

2.1	Limiar de proteção e margem de tolerância para os poluentes físico-químicos [27].	8
2.2	Limiar de proteção referente ao CO em condições específicas nas situações de excedência de curta duração [27].	8
2.3	Atividades humanas e fontes de poluição que contribuem para a degradação da qualidade do ar interior.	14
2.4	Fatores ambientais com influência na qualidade do ar interior e respetivos impactos na saúde humana.	15
3.1	Configurações do dispositivo	18
3.2	Precisão e desvio anual do sensor SPS30 para concentrações de massa de material particulado.	25
4.1	Alertas registados ao longo da semana.	33

SIGLAS

CO	Monóxido de carbono (<i>pp. 10, 14</i>)
COVs	Compostos orgânicos voláteis (<i>p. 5</i>)
ECHA	European Chemicals Agency - Agência Europeia dos Produtos Químicos (<i>p. 5</i>)
I2C	Inter-Integrated Circuit (<i>pp. 19, 24</i>)
I2S	Inter-IC Sound (<i>p. 19</i>)
O₃	Ozono troposférico (<i>p. 5</i>)
OMS	Organização Mundial de Saúde (<i>p. 5</i>)
PM_{1.0}	Material particulado com diâmetro aerodinâmico inferior ou igual a 1 μ m (<i>p. 18</i>)
PM₁₀	Material particulado com diâmetro aerodinâmico inferior ou igual a 10 μ m (<i>pp. 4, 8, 18</i>)
PM_{2.5}	Material particulado com diâmetro aerodinâmico inferior ou igual a 2.5 μ m (<i>pp. 4, 8, 18</i>)
QAI	Qualidade do Ar Interior (<i>pp. iii, 1</i>)
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter - Transmissor de receptor assíncrono universal (<i>pp. 19, 24</i>)

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e Motivação

Nas últimas décadas tem-se assistido a uma crescente consciencialização do impacto que o ar que respiramos tem na nossa saúde e conforto.

Estima-se que a poluição seja responsável pela morte prematura de 9 milhões de pessoas anualmente, sendo a principal causa a poluição do ar (atmosférico e doméstico) [1]. A poluição atmosférica, predominantemente devido à exposição de partículas em suspensão com diâmetro inferior a 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$), contribuiu significativamente para a mortalidade associada a AVCs, cardiomiopatia isquémica, cancro do pulmão, doenças pulmonares obstrutivas crónicas e infeções das vias respiratórias inferiores [2].

A qualidade do ar interior QAI (ou falta dela) não é exclusivamente determinada pelas condições do ambiente interior. Estudos demonstram que está dependente de três fatores [3]:

- i) Atividade humana no espaço.
- ii) Construção do edifício e os materiais usados na mesma, assim como o mobiliário e outros tipos de equipamento no espaço.
- iii) Qualidade do ar ambiente, incluindo fontes poluentes externas.

Em regra geral, as populações europeias e norte-americanas fazem o seu dia-a-dia em espaços interiores. Contabilizado o tempo passado nas suas habitações, locais de trabalho, edifícios (como escritórios, espaços de ensino, hospitais, etc) com o tempo passado em deslocações (veículo próprio ou transportes públicos) chega a totalizar entre 85-90% [4, 5].

Preocupações crescentes com os consumos energéticos têm levado à construção de edifícios *airtight*, os quais não permitem ao ar fluir entre o exterior e o interior. Adicionalmente, muitos edifícios dependem inteiramente da ventilação mecânica para recircular o ar interior, tendo este um nível de diluição de ar exterior muito reduzido. Isto leva à acumulação de poluentes no interior [6].

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de um sistema de monitorização de qualidade de ar interior (QAI) em tempo real de baixo custo.

Recorrendo a sensores de relativo baixo custo, propõe-se medir parâmetros influentes da QAI como temperatura, humidade relativa e partículas em suspensão (PM₁₀ e PM_{2,5}) em tempo-real. Os dados recolhidos são disponibilizados numa plataforma *low-code*, responsável pela visualização da informação e pela emissão de alertas aos utilizadores sempre que os valores medidos não respeitem os limiares de exposição recomendados.

1.3 Descrição do documento

O restante documento está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 2: Estado de Arte - Refere uma revisão bibliográfica sobre os principais fatores que influenciam a QAI, as suas fontes e o impacto que têm na saúde humana. Posteriormente, aborda um conjunto de sistemas de monitorização desenvolvidos e os sensores usados para este âmbito.
- Capítulo 3: Arquitetura do Sistema - Descreve a arquitetura do sistema desenvolvido, os componentes do dispositivo de aquisição de dados, aplicação de visualização e os métodos e protocolos utilizados na implementação do sistema.
- Capítulo 4: Resultados - Apresenta os resultados obtidos do sistema implementado.
- Capítulo 5: Conclusão - Aborda as conclusões do sistema desenvolvido e o levantamento de próximos passos para melhoria da solução implementada.

ESTADO DE ARTE

Neste capítulo são abordados os principais poluentes responsáveis pela degradação da qualidade do ar interior, seguido dos seus efeitos prejudiciais para a saúde e regulamentação dos mesmo. Posteriormente, são apresentados trabalhos semelhantes ao proposto.

2.1 Poluição e qualidade de ar interior

O conceito de qualidade de ar interior (QAI) refere-se às características ambientais em espaços interiores que podem influenciar a saúde e conforto dos utilizadores dos mesmos [7].

Considera-se que fatores como as concentrações de poluentes no ar, condições térmicas, iluminação e ruído influenciem a QAI, dando especial relevância às condições térmicas e concentrações de poluentes.

A qualidade do ar interior (ou falta dela) não é exclusivamente determinada pelas condições do ambiente interior. Estudos demonstram que está dependente de três fatores [3]:

- i) Atividade humana no espaço;
- ii) Construção do edifício e os materiais usados na mesma, assim como o mobiliário e outros tipos de equipamento no espaço;
- iii) qualidade do ar ambiente, incluindo fontes poluentes externas

Actividades domésticas como cozinhar, fumar, secar o cabelo, produtos de limpeza, aspirar, queimar velas ou lenha, entre outras actividades diárias humanas, geram quantidades consideráveis de partículas em ambientes fechados o que por sua vez causam poluição do ar interior [8, 9].

As fontes de combustão e as actividades de cozedura contribuem para as emissões de monóxido e dióxido de carbono, dióxido de azoto, dióxido de enxofre e partículas em suspensão (PM) para os ambientes de ar interior. Além disso, os equipamentos, como computadores, fotocopiadoras, impressoras e outras máquinas de escritório, emitem ozono e compostos voláteis [8].

Com o passar do tempo, materiais de construção e mobiliário podem libertar compostos tóxicos [8] (nomeadamente COVs) usados em tratamentos nos processos de manufacturação, tendo um particular agravamento na sua degradação.

2.1.1 Material particulado

Matéria particulada (PM) é uma mistura de partículas sólidas e gotículas suspensas no ar, de tamanho, forma e composição variadas. São classificadas consoante o seu tamanho:

- PM₁₀ - matéria particulada com diâmetro inferior a 10 μm . Estas podem ser inaladas durante a respiração e alcançar o trato respiratório inferior, demonstrado na ilustração 2.1 pelos números 1-3.
- PM_{2.5} - matéria particulada com diâmetro inferior a 2.5 μm . Esta apresenta o maior risco para a saúde. A sua dimensão permite-lhes serem depositadas nas estruturas mais pequenas dos pulmões, os alvéolos pulmonares, e serem absorvidas pela corrente sanguínea [10], ilustrado em 4 da figura 2.1.

A saúde pode ser prejudicada tanto pela exposição a curto prazo quanto a longo prazo às partículas PM_{2.5}.

Em [11, 12], é explorada a associação entre partículas PM_{2.5} com doenças neurodegenerativas como Alzheimer e Parkinson. Estas partículas têm a capacidade de penetrar no sistema nervoso central por meio de duas rotas principais: a barreira hematoencefálica e os neurónios olfativos [12].

A exposição a partículas PM_{2.5} promove processos de neuroinflamação [11]. Adicionalmente, exposição às PM_{2.5} tem sido associada com um aumento das expressões de marcadores de doenças neurodegenerativas, sugerindo uma possível contribuição no desenvolvimento das doenças neurodegenerativas, influenciando os mecanismos que levam à sua origem e progressão [11, 12].

Estudos epidemiológicos demonstram também que exposição a longo prazo de PM_{2.5} está associada a um aumento da prevalência de diabetes mellitus tipo 2 [13].

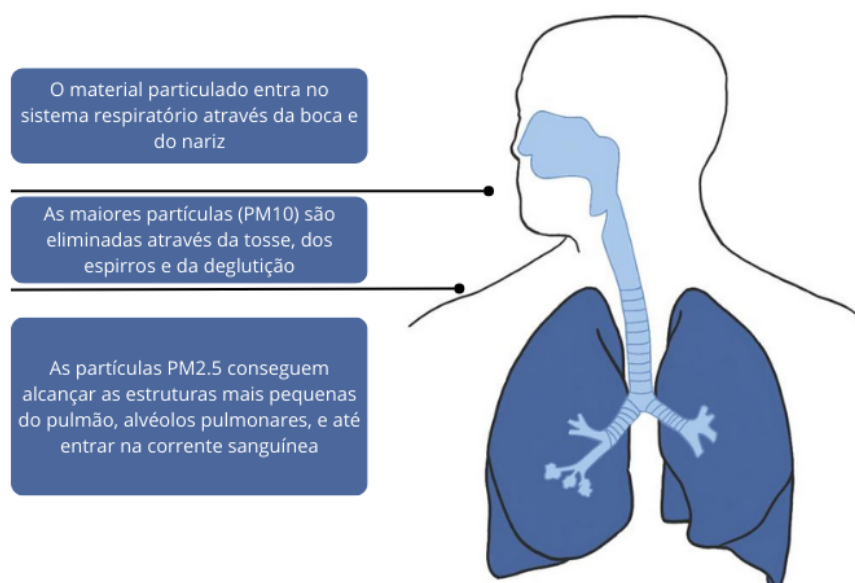


Figura 2.1: Ilustração explicativa de como as partículas em suspensão entram no corpo, adaptado de [14].

2.1.2 Compostos Orgânicos Voláteis

De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS), entende-se por compostos orgânicos voláteis, COVs, compostos orgânicos que possuem uma pressão de vapor igual ou superior a 0,01 kPa, a 293,15 K, ou com volatilidade equivalente nas condições de utilização específicas [15].

Estes compostos químicos são frequentemente libertados por materiais de construção, como tintas, decapantes, vernizes e acabamentos, e produtos de uso diário, como produtos de limpeza, desinfetantes, pesticidas, ambientadores, etc. [16]. Alguns COVs estão associados com sintomas de irritação ocular e das vias respiratórias [16, 17]. Substâncias como o benzeno e formaldeído são consideradas carcinogénicas pela agência europeia de produtos químicos (ECHA).

No meio ambiente, os COVs são fonte de preocupação devido ao seu papel na formação de ozono troposférico (O_3) através de reações com os óxidos de azoto. Embora este composto seja naturalmente ocorrente na natureza, o ozono existe sobretudo na camada estratosférica, onde desempenha um papel de barreira à radiação solar ultravioleta [18]. No entanto, devido à poluição atmosférica, o ozono está a ser formado na troposfera, onde apresenta um elevado risco para a saúde.

O seu impacto na saúde varia com o tempo de exposição. Exposições agudas ao ozono resultam em na irritação do sistema respiratório, causando sintomas de tosse, dores de garganta e sensação de ardor no peito [19]. A longo prazo, este composto está associado ao aumento da mortalidade devido a complicações cardiovasculares e doenças do fórum respiratório [19–21].

2.1.3 Condições térmicas

As condições térmicas são condicionadas pela circulação do ar, humidade relativa e temperatura do ar, assim como a roupa e produção de calor de cada indivíduo no espaço.

A temperatura e humidade têm um impacto significativo na percepção da QAI. Observou-se que, dada um nível constante de concentração de poluentes, o aumento de temperatura e humidade relativa levaram a uma percepção de degradação da qualidade do ar [22].

Adicionalmente, ambientes demasiado frios ou demasiado quentes são causa de desconforto, podendo resultar numa diminuição do bem-estar e do desempenho [23, 24]. A temperatura ótima varia de região para região, consoante a aclimatização dos indivíduos.

Para regiões de clima temperado a frio, o desempenho cognitivo e no trabalho foi considerado ótimo na faixa dos 22°C - 24°C [24]. O mesmo estudo [24] aponta que a humidade relativa do ar se deve encontrar entre os 40% - 60%. Teores baixos de humidade no ar promovem a suspensão de partículas (aerossóis) no ar durante mais tempo devido a processos de evaporação de gotículas de maiores dimensões.

Estas condições aparentam facilitar a transmissão de alguns vírus como a *influenza* assim como a sua sobrevivência em superfícies e objetos [25]. Níveis de humidade relativos elevados aumentam o risco de aparecimento e crescimento de fungos, como o bolor.

O aumento de compostos orgânicos voláteis e microorganismos está significativamente correlacionado com a humidade relativa e temperatura em ambientes anteriores, sendo a concentração de COVs presentes diretamente proporcional à humidade e temperatura registados [26].

2.2 Regulamentos e Orientações

Apesar de QAI ser reconhecida como um fator vital para o conforto e saúde dos utilizadores dos espaços, é importante destacar que existem regulamentos limitados específicos para a mesma.

Na EU entende-se que, garantindo a qualidade do ar ambiente e eliminando fatores de risco em ambientes laborais, nomeadamente através da aquisição de materiais de construção, mobiliário e equipamentos que não libertem substâncias prejudiciais para ambiente, é possível assegurar a qualidade do ar em espaços interiores [5].

Em Portugal, a regulamentação da qualidade do ar interior está estabelecido pela Portaria n.º 138-G/2021, de 1 de Julho [27], inserida no artigo 16º do Decreto-Lei nº101-D/2020, de 7 de Dezembro.

O mesmo estabelece os requisitos aplicáveis a edifícios no âmbito da otimização o seu desempenho energético e regula o Sistema de Certificações Energética dos Edifícios [28]. Para assegurar a qualidade do ar interior, o artigo 16º contempla que:

- i) Edifícios novos ou renovados estejam sujeitos a requisitos no âmbito da ventilação de espaços, de modo a garantir uma adequada filtragem e renovação do ar.
- ii) Todos os edifícios comerciais e de serviços tenham de cumprir limiares de proteção relativos a agentes físico-químicos e condições de referência para parâmetros microbiológicos.
- iii) GES e os edifícios de comércio e serviços em funcionamento que abranjam creches, estabelecimentos de educação (pré-escolar ao primeiro ciclo do ensino básico) e estruturas residenciais para pessoas idosas sejam sujeitos a avaliações simplificadas anuais de requisitos relacionados com qualidade do ar interior.

No caso das concentrações de CO medidas serem superiores aos limiares de proteção referidos na tabela 2.1, é necessário realizar a verificação de conformidade prevista na tabela 2.2.

2.3 Plataforma Blynk

A Blynk é uma plataforma *low code* de Internet das Coisas (IoT) baseada em *cloud*, que permite a monitorização e controlo remoto de dispositivos associados a cada *template*.

Tabela 2.1: Limiar de proteção e margem de tolerância para os poluentes físico-químicos [27].

Poluentes Físico-Químicos		Limiar de Proteção	Margem de tolerância [%]
PM_{10}	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	50	100
$PM_{2.5}$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	25	100
Compostos Orgânicos Voláteis	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	600	100
- Formaldeído	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	100	-
	ppmv	0,08	
Dióxido de carbono	mg/m^3	2250	30
	ppmv	1250	
Radão	Bq/m^3	300	-

Tabela 2.2: Limiar de proteção referente ao CO em condições específicas nas situações de excedência de curta duração [27].

Condição	Limiar de Proteção		Média Temporal
	mg/m^3	ppm	
$CO_{MED} <$	100	90	15min
$CO_{MED} \leq$	35	30	1h
$CO_{MED} \leq$	10	9	8h
$CO_{MED} \leq$	7	6	24h

A plataforma é composta por um ecossistema completo para desenvolvimento de sistemas IoT, desde aplicação móvel, interface gráfica web, bibliotecas próprias compatíveis com diversos microcontroladores, Arduino, ESP e Raspberry Pi, e uma infraestrutura em nuvem, permitindo a criação de *dashboards* proporcionando ao utilizador interação em tempo real com o sistema. Desta forma, o utilizador consegue monitorizar, receber alertas e interagir com o ambientes através de atuadores, caso estes estejam configurados.

A maior vantagem da Blynk é a sua acessibilidade e simplicidade de configurar. O armazenamento em nuvem garante ao utilizador acesso ao sistema independentemente de onde possa estar, desde que tenha acesso à internet. A construção da interface gráfica também é simples, a plataforma proporciona widgets que apenas precisam de ser configurados consoante a solução que se queira implementar. O ecossistema da Blynk permite também a consiguração de atuadores do sistema, como por exemplo, configuração de botões nas interfaces gráficas móveis e web, que permite ao utilizador, controlar remotamente o sistema.

A plataforma oferece três tipos de planos consoante a escala do projeto: um plano gratuito direcionado a consumidores individuais para uso pessoal, um plano profissional

para criação de protótipos comerciais e, por último, um plano empresarial. A versão gratuita permite a associação de até 10 dispositivos por utilizador, um por *template* e a configuração de 20 fluxos de dados por cada *template*. Este plano permite ainda 30 mil mensagens por mês e garante o armazenamento dos dados por uma semana [29].

The screenshot shows the Blynk pricing page with the following details:

FREE	PRO	ENTERPRISE
\$0	FROM \$99/MONTH	CUSTOM
For exploration	Commercial prototyping	White-label, complete IoT solution
<ul style="list-style-type: none"> ✓ 10 devices, 1 user ✓ 30,000 messages monthly ✓ 10 device templates ✓ Free widgets ✓ 20 datastreams per template ✓ 1 week historical data storage 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 50 or 200 or 500 devices/users ✓ Unlimited messages ✓ 50 device templates ✓ PRO widgets ✓ 200 datastreams per template ✓ 6 months historical data ✓ Customizable permissions ✓ Organization management 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Custom branded apps published to Google Play and App Store ✓ Private server in your domain ✓ Enterprise level data security and SLA ✓ Reseller and integrator flows ✓ App design services ✓ 12 months historical data storage ✓ Custom integrations ✓ Dedicated account manager ✓ Rule engine ✓ Local app to device OTA ✓ Mobile SDK ✓ Encryption at rest (add-on)
→ Try Free	→ Get Pro	→ Contact Sales

Figura 2.2: Apresentação dos planos oferecidos pela plataforma Blynk

2.4 Sistemas de monitorização em tempo real

Nesta secção serão apresentados trabalhos relacionados com o trabalho proposto, abordando os fatores ambientais estudados e os sensores usados para a análise dos mesmos. São também apresentados sensores de baixo custo que poderiam ser usados na implementação do protótipo.

Em [30] procurou-se desenvolver um sistema de monitorização autónomo e pouco dispendioso, capaz de recolher dados e alertas em tempo real.

Para esse efeito, foi concebida *WSN (Wireless Sensor Network)*, os dados são recolhidos pelo sistema de sensores (iAQ Sensor) que os transmite para o iAQ Gateway que regista a informação numa base de dados cujos dados podem ser acedidos através do portal iAQ Web 2.3. Para tal, o iAQ Sensor e Gateway foram implementados em IDE ARDUINO, enquanto o iAQ Web foi desenvolvido em PHP e a base de dados em MySQL, respetivamente.

Neste contexto, desenvolveu-se um sistema baseado na utilização do *Arduino Mega*, incorporado com um microcontrolador *Atmel AVR*. Optou-se por comunicação *wireless*

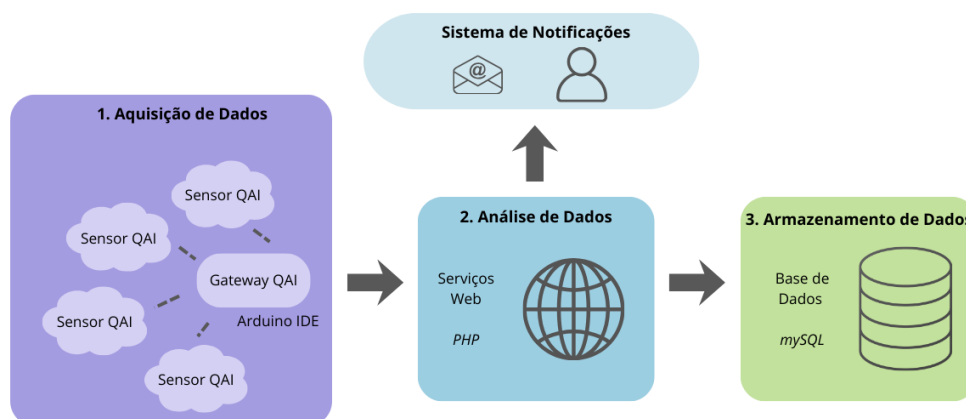


Figura 2.3: Diagrama de blocos da arquitetura do sistema concebido em [30].

implementada com recurso a módulos XBee, baseado no IEEE 802.15.4 e utiliza o protocolo *ZigBee*, que permite que os sistemas estejam ligados em *mesh* [31].

O dispositivo de aquisição de dados mede cinco parâmetros: temperatura, humidade relativa (HR), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono e luminosidade.

Para medir a temperatura e HR foi escolhido o sensor SHT10, que opera entre -40°C a 120°C (temperatura) e 0 a 100% (humidade). Para medir o CO foi utilizado o sensor MQ7, que requer calibração manual, e para as medições de CO_2 foi escolhido o T6615. Para obter informação sobre a luminosidade, foi utilizado o LDR 5 mm.

Para poder registar os dados recebidos do iAQ Sensor, o iAQ Gateway foi ligado à internet recorrendo ao *Arduino Ethernet Shield*.

O iAQ Web é responsável por notificar o utilizador, por e-mail, no caso de algum dos parâmetros avaliados se encontrar acima do limiar de concentração estabelecido.

Já em [32] os alertas de níveis excessivos de contaminantes são feitos a partir de uma aplicação móvel. A interface móvel, desenvolvida na plataforma Blynk, permite aos utilizadores facilmente visualizarem a informação numérica e graficamente, exemplificado na figura 2.4.

O sistema proposto é constituído por duas partes. O primeiro módulo é responsável pela aquisição de dados e pela comunicação dos mesmos. Este módulo é composto pelos sensores que adquirem informação sobre os fatores ambientais e pelo microcontrolador

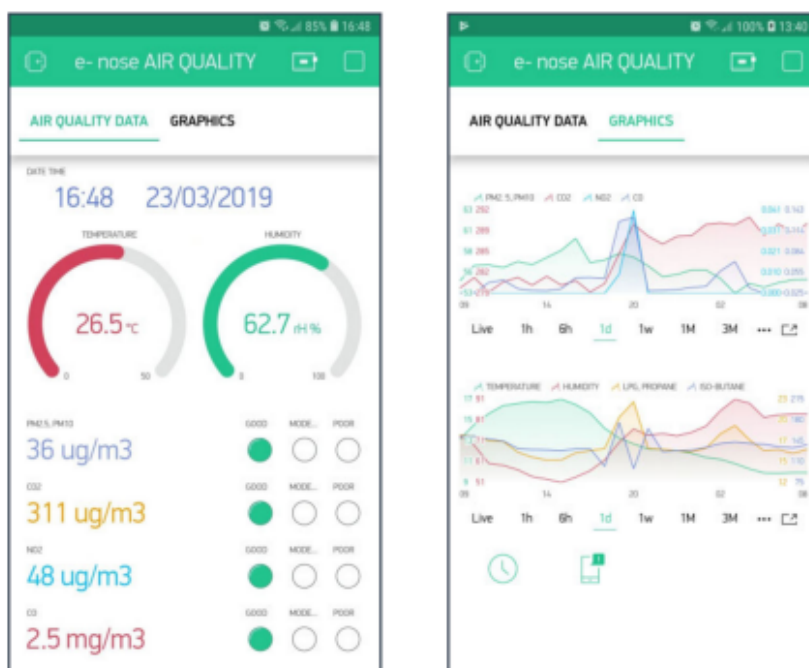


Figura 2.4: Interface móvel do sistema proposto, retirado de [32].

ESP32, unidade do controlo do sistema, equiparado com Wi-Fi e baseado no protocolo IEEE 802.11.

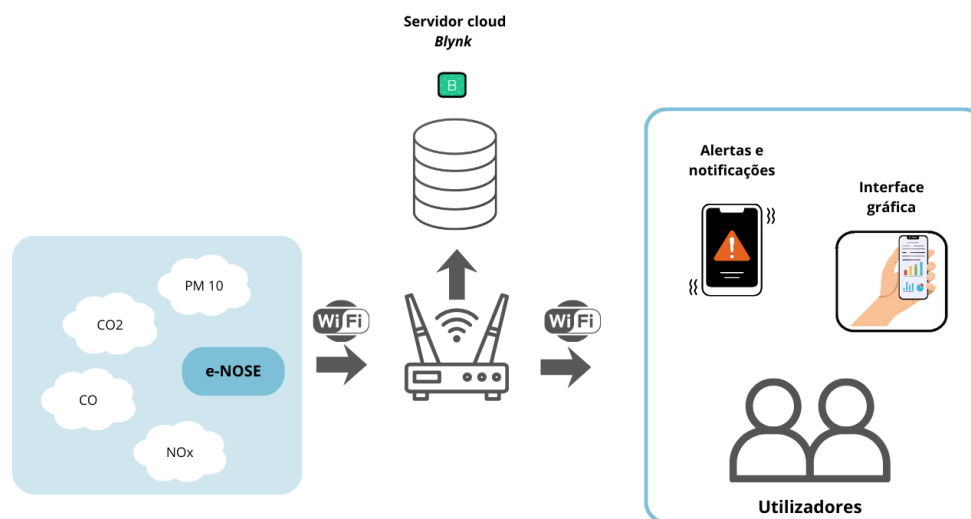


Figura 2.5: Adaptação da arquitetura do sistema de monitorização apresentada em [32].

Para avaliar o conforto térmico e as concentrações de CO₂, CO, PM₁₀ e dióxido de azoto, recorreu-se a sensores de baixo custo. A concentração de PM₁₀ é recolhido pelo sensor de poeira GP2Y1010AU. Os dados do CO₂ foram obtidos pelo MH-Z14A, enquanto os fatores térmicos (temperatura e humidade relativa) foram obtidos pelo DHT22.

O resto dos parâmetros foram recolhidos pelo MICS-4514, um sensor sensível a gases como o dióxido de azoto, monóxido de carbono e hidrocarbonetos.

Com o intuito de evitar erros de medição, os fatores ambientais e concentrações de gases são representados pelo valor médio obtido em 12 medições, realizadas com intervalos de 5 segundos. Os dados são posteriormente guardados diretamente no servidor *cloud* da Blynk. É verificada a conexão à internet antes de cada transmissão.

No caso de falha, os *data packets* são armazenados temporariamente com etiquetas temporais e transmitidos à posteriori quando a conexão for reestabelecida, evitando perda de informação.

Os utilizadores são notificados quando os fatores ambientais excedem os limites de segurança estabelecidos. Para evitar falsos alertas, as notificações comunicadas têm por base a média amostral a cada 5 minutos. O sistema considerado pode ser alimentado com recurso a uma *power bank*, tornando-o portátil.

Em [33] procurou-se validar o sensor de material particulado *HM-3301*, um sensor pouco dispendioso, usando um dispositivo de referência, o *LVS 3* da Comde-Derenda), sensor em conformidade com a norma EN 12341:2014. Para tal, o *HM-3301* foi integrado no sistema SEnviro [34]. Os sensores foram amostrados simultaneamente nas mesmas localizações. Os sistemas foram testados em ambientes interiores e ambientes externos, demonstrado em 2.6.

O estudo conclui que as medições do sensor de baixo custo estavam altamente correlacionadas com as medidas do sensor de referência, em particular para $PM_{2.5}$ e que, em geral, existiu uma relação positiva entre as duas medições, adequadamente ajustada por meio do modelo LOESS.



(a) Ambiente interior.



(b) Ambiente exterior.

Figura 2.6: Montagem do sistema retirado de [33].

2.5 Considerações finais

Ao longo deste capítulo, abordaram-se os principais fatores responsáveis pela degradação da qualidade do ar em ambientes interiores (QAI) e a forma como interagem entre si, destacando as fontes de poluição e os parâmetros ambientais que influenciam a percepção e o impacto que os mesmos têm na saúde humana.

A tabela 2.3 apresenta uma síntese das principais atividades humanas e fontes associadas à poluição do ar interior, identificando os poluentes libertados e o respetivo contributo para a degradação da QAI.

Tabela 2.3: Atividades humanas e fontes de poluição que contribuem para a degradação da qualidade do ar interior.

Atividade Humana / Fonte	Poluentes Emitidos / Problemas Associados	Contributo para a Degradação da QAI
Cozedura de alimentos com recurso a combustão	Monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO ₂), dióxido de azoto (NO ₂), dióxido de enxofre (SO ₂), partículas em suspensão (PM ₁₀ , PM _{2.5})	Emissão significativa de gases tóxicos e partículas para o ambiente interior
Consumo de tabaco, queima de velas ou lenha	PM _{2.5} , benzeno, formaldeído	Libertação de compostos tóxicos e compostos orgânicos voláteis (COVs) com efeitos nocivos para a saúde
Utilização de produtos de limpeza, ambientadores e pesticidas	Compostos orgânicos voláteis (COVs), irritantes diversos	Emissão de compostos potencialmente reativos, irritantes ou carcinogénicos
Atividades domésticas (ex.: secar o cabelo, aspirar)	Re-suspensão de partículas e geração de aerossóis	Aumento da concentração de partículas e poluentes no ar interior
Funcionamento de equipamentos eletrónicos (ex.: impressoras, fotocopiadoras)	Ozono (O ₃), COVs	Emissão de poluentes gasosos com potencial de reatividade química e impacto respiratório
Materiais de construção, mobiliário e acabamentos	Libertação contínua de COVs (ex.: formaldeído, tolueno)	Contribuição persistente para a poluição do ambiente interior ao longo do tempo
Intrusão de ar exterior contaminado	Poluentes atmosféricos como NO ₂ , SO ₂ , O ₃ , PM _{2.5}	Introdução de poluentes exteriores, agravando a QAI no interior dos edifícios

Por sua vez, a tabela 2.4 relaciona os fatores ambientais mais relevantes (como partículas em suspensão, compostos orgânicos voláteis, temperatura e humidade relativa) com os seus potenciais efeitos adversos na saúde humana. A análise demonstra que a exposição

prolongada a ambientes interiores com má qualidade do ar pode contribuir para o desenvolvimento de diversas patologias, incluindo doenças respiratórias, cardiovasculares e neurodegenerativas, bem como reduzir o conforto e o desempenho dos ocupantes.

Tabela 2.4: Fatores ambientais com influência na qualidade do ar interior e respetivos impactos na saúde humana.

Fator Ambiental	Problemas Associados	Impacto na Saúde
Partículas em suspensão (PM ₁₀ , PM _{2.5})	Penetram nas vias respiratórias e, no caso das PM _{2.5} , atingem os alvéolos pulmonares e a corrente sanguínea. Têm origem em fontes internas e externas.	Aumento do risco de doenças respiratórias, cardiovasculares, neurodegenerativas e diabetes mellitus tipo 2
Compostos Orgânicos Voláteis (COVs)	Emissão por materiais de construção, mobiliário e produtos domésticos. Participam em reações que originam ozono troposférico.	Efeitos carcinogénicos, irritações respiratórias e oculares, efeitos neurotóxicos
Ozono troposférico (O ₃)	Formado por reações fotoquímicas entre COVs e NO _x . Apresenta elevada reatividade e toxicidade ao nível do solo.	Irritação do trato respiratório, agravamento de patologias como a asma e aumento da mortalidade por causas respiratórias e cardiovasculares
Temperatura do ar interior	Temperaturas inadequadas podem intensificar a libertação de poluentes e comprometer o conforto térmico.	Redução do desempenho cognitivo, desconforto térmico, agravamento de doenças pré-existentes
Humidade relativa do ar	Valores <40% favorecem a suspensão de partículas e propagação de vírus. Valores >60% potenciam o crescimento de bolores e libertação de COVs.	Agravamento de alergias e doenças respiratórias, aumento da carga viral em suspensão, proliferação de fungos

Os dois sistemas de monitorização considerados [30, 32] são de baixo custo, realizam monitorização de dados em tempo real e providenciam alertas aos utilizadores aquando as condições do ar respirado apresentam uma dada degradação por efeito de um ou mais agentes ambientais responsáveis.

Em [30], a separação por módulos, sensor e gateway, permite que se liguem vários módulos de sensores simultaneamente a um único gateway, responsável por assegurar a transmissão dos dados adquiridos com o resto do sistema para que se processa à sua análise. Deste modo, assegura que se podem monitorizar divisões que não tenham conexão à internet. No entanto, o estudo não faz menção se a informação é perdida se, por algum motivo, o gateway desconectar da rede wi-fi.

O sistema elaborado por [32] efetua uma análise de qualidade de ar interior mais completo, fazendo medições de mais parâmetros como PM10. Este sistema assegura também, que em caso de falhas de transmissão, os dados não são perdidos.

Por último, o sensor verificado em [33] apresenta uma alta correlação com o sensor de referência relativamente às medições $PM_{2.5}$, um dos agentes poluentes com mais riscos de exposição associados. Graças à sua acessibilidade, pode ser uma mais valia para integrar no sistema a ser concebido no âmbito desta dissertação.

ARQUITETURA DO SISTEMA

Com o intuito de assegurar a qualidade do ar em espaços interiores, o sistema desenvolvido monitoriza três parâmetros ambientais: temperatura, humidade relativa e material particulado, nomeadamente $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ e PM_{10} . Foi idealizado com dois princípios principais base: facilidade de acesso à informação por parte dos utilizadores, de onde quer que se encontrassem, e assegurar que o custo total do sistema fosse menor de 100 euros.

Os fatores ambientais são recolhidos por dois sensores: o DHT 22, responsável pelas medições da temperatura e humidade relativa; e o SPS 30, responsável pelas medições do material particulado ($PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ e PM_{10}).

O microcontrolador, o ESP32, processa e transmite a informação recolhida pelos sensores para o servidor *cloud* da Blynk, por via wi-fi. O servidor armazena os dados até uma semana dos mesmos terem sido guardados.

Através da aplicação, o utilizador pode visualizar os fatores ambientais em tempo-real, assim como pode verificar informações históricas de variação dos mesmos até sete dias.

Por último, o sistema alerta o utilizador quando os indicadores ambientais se encontram a níveis desaconselháveis, emitindo notificações aviso para o telemóvel e na aplicação desktop, permitindo ao utilizador agir em conformidade para que a qualidade do ar não se degrade.

A arquitetura do dispositivo de aquisição de dados concebido é apresentada na figura 3.1 representa o seu diagrama de blocos.

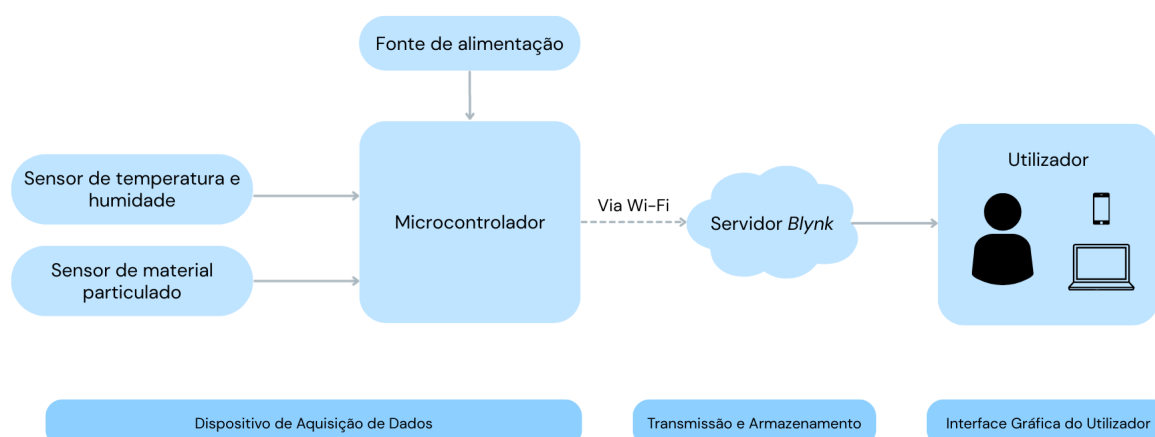


Figura 3.1: Arquitetura do sistema desenvolvido

3.1 Dispositivo de aquisição de dados

O sistema implementado, 3.3 , segue o fluxo descrito na figura 3.2. Numa primeira instância, configura-se o intervalo temporal entre medições, o intervalo entre autolimpezas do sensor de poeira e os valores recomendados dos fatores atmosféricos.

Tabela 3.1: Configurações do dispositivo

Variáveis	Valor
Intervalo temporal entre medições	10s
Intervalo temporal entre autolimpezas	4 dias
Temperatura mínima	18.00°C
Temperatura máxima	25.00°C
Humidade relativa mínima	40.00%
Humidade relativa máxima	60.00%
Nível PM _{1.0} crítico	25.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Nível PM _{2.5} crítico	25.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Nível PM ₁₀ crítico	50.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

É também nesta fase que ocorrem as quatro rotinas de inicialização do dispositivo:

- **Estabelecimento da ligação Wi-Fi** - Para evitar a codificação das credenciais da rede diretamente no código, usa-se o protocolo do WiFiManager.
- **Estabelecimento da ligação ao servidor** - Estabelecimento do canal de comunicação entre o dispositivo e a Blynk para envio das medições e de alertas.

- **Inicialização e configuração do sensor de material particulado SPS 30** - Verifica se o sensor é detetado e define o intervalo entre autolimpezas, ocorrem a cada quatro dias.
- **Inicialização do sensor de humidade e temperatura DHT22**

Após estas configurações e inicializações, o programa entra no ciclo principal. É nesta fase que o dispositivo verifica continuamente se mantém a ligação estabelecida com a rede e o servidor, realiza as medições dos fatores atmosféricos, atualiza os valores na plataforma, verifica se os mesmos estão dentro dos limites recomendados e efetua os alertas necessário. Sempre que o sistema perde a ligação com a plataforma ou com o Wi-Fi, inicia o seu processo de recuperação da mesma através da função `estabelece_ligacao()`.

Para comunicar os valores medidos, o dispositivo transmite ao servidor através da função `Blynk.virtualWrite()`. Os pinos virtuais são abstrações lógicas de canais de comunicação entre o dispositivo físico e os gráficos do *template*.

No caso das medições se encontrarem fora dos parâmetros considerados recomendados, apresentados na tabela 3.1, os alertas são comunicados com recurso à função `Blynk.logEvent()`. Para evitar sobrecarregar o sistema com alertas e exceder o número de mensagens mensais, são também utilizadas *flags* booleanas para evitar que o sistema esteja constantemente a emitir o alerta enquanto as condições se encontram desfavoráveis. Desta maneira, quando o valor medido se encontra fora dos valores ideais, é ativada a *flag* do alerta correspondente e é emitida uma notificação. O sistema então espera que o fator ambiente retorne a valores normais para a desativar. Assim, é evitado o envio de alertas constantes durante a duração do evento.

3.1.1 Microcontrolador

O ESP32 é um microcontrolador de baixo custo com Bluetooth e Wi-Fi integrados, eliminando a necessidade de módulos adicionais para fazer ligação à internet, como é o caso do sistema Arduino.

Possui um microprocessador Xtensa dual-core 32-bit LX6, cujos núcleos podem ser controlados individualmente. A frequência de relógio do CPU é ajustável de 80 Mhz a 240 MHz [35, 36].

O ESP 32 utilizado neste trabalho, ESP32 DevKitC VE, possui capacidade de memória Flash de 8MB, bem como uma PSRAM de 8MB. O seu módulo é capaz de suportar uma velocidade de dados até 150Mbps e uma potência de saída de 20dBm na antena, garantindo o maior alcance físico possível. Integra também um conjunto diversificado de periféricos como UART, I2S e I2C, entre outros [35, 36].

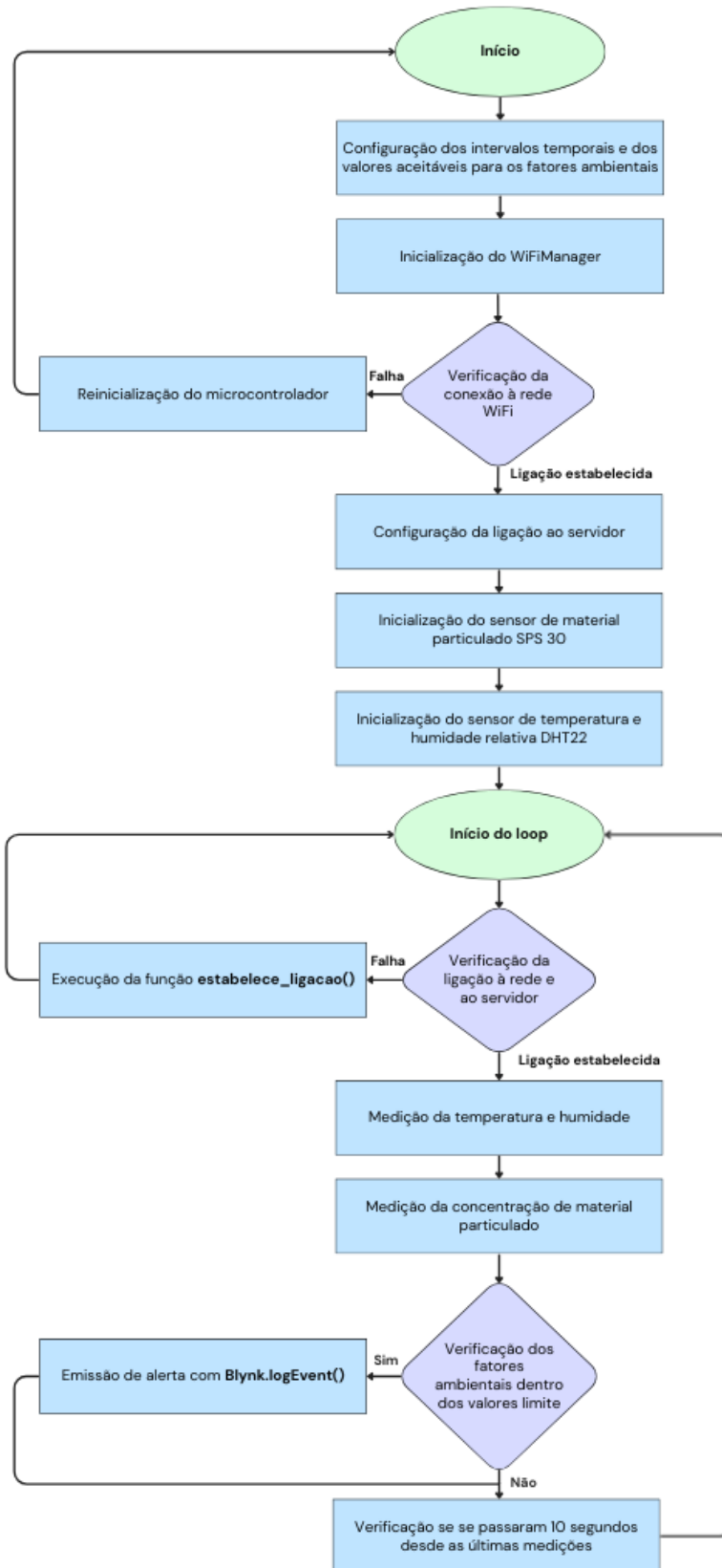


Figura 3.2: Fluxograma do sistema desenvolvido

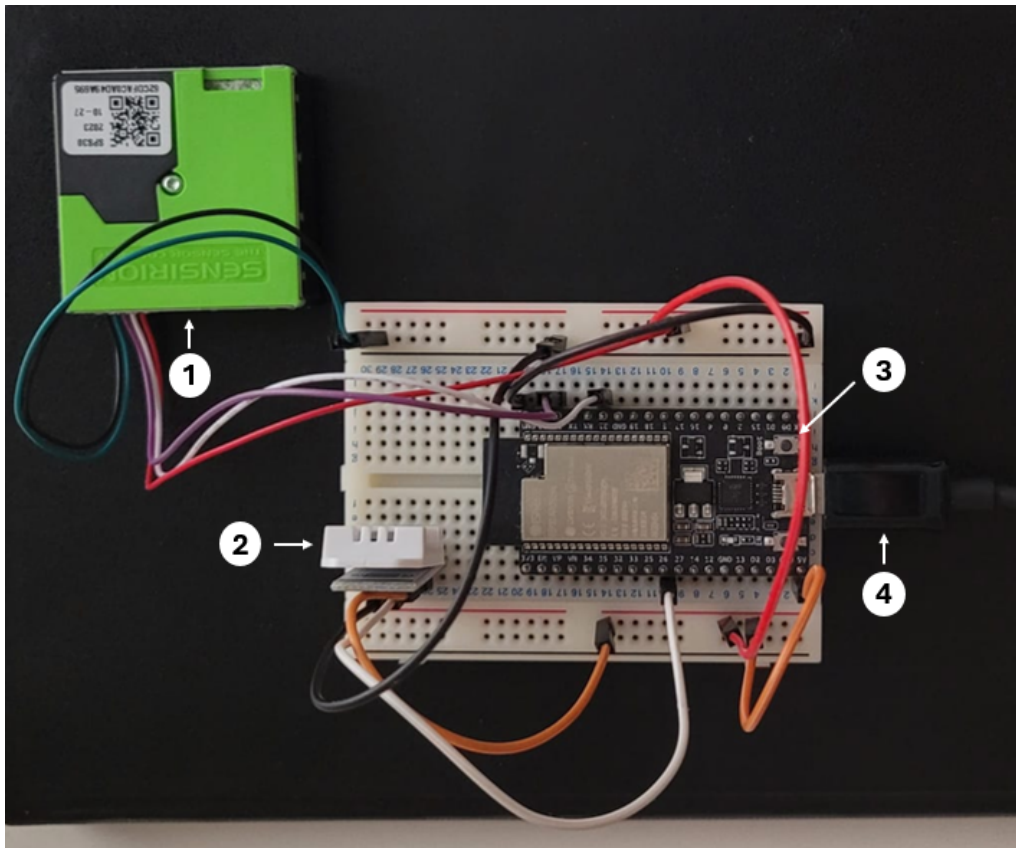


Figura 3.3: Módulo de aquisição de dados: 1. Sensor de material particulado, Sensirion SPS 30; 2. Sensor de temperatura e humidade relativa, DHT22; 3. Microcontrolador, ESP32; 4. Fonte de alimentação

3.1.2 Sensor de temperatura e humidade relativa

O DHT22, apresentado na figura 3.6, é um sensor de baixo custo de medição de temperatura e humidade relativa do ar. O sensor opera a tensões de alimentação de 3,3V a 5V e os valores medidos são comunicados em sinal digital por barramento único.

A humidade relativa é medida num intervalo de medição de 0-100% e com precisão aproximada de 2%. Já a temperatura é medida numa faixa entre -40 até 80 graus Celsius e com uma precisão de 0,5 graus. [38].

A comunicação entre o DHT22 e o microcontrolador é efetuada através de um barramento de dados único, ligado ao GPIO26 do ESP32. O sinal é comunicado em 40 bits, 3.7, com os primeiros 16 referentes à leitura da humidade relativa, seguidos de 16 bits de medição de temperatura e, por último, oito bits de soma de verificação para validação da correta transmissão do sinal. As medições da humidade relativa e temperatura são compostas por uma parte integral, os primeiros 8 bits, e uma parte decimal, os segundos 8 bits.



Figura 3.4: Espressif ESP32 DevKitC VE.

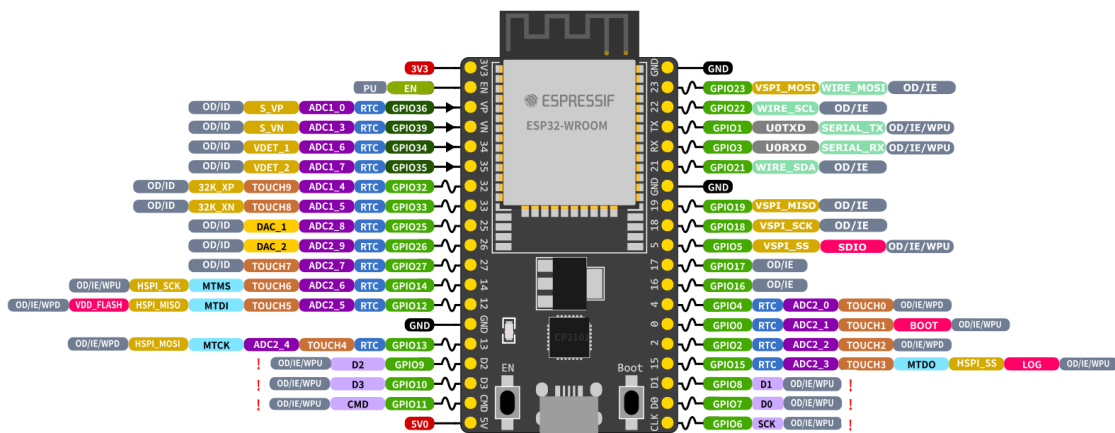


Figura 3.5: Representação gráfica dos pinos do microcontrolador ESP32 retirado da documentação da Espressif, [37].

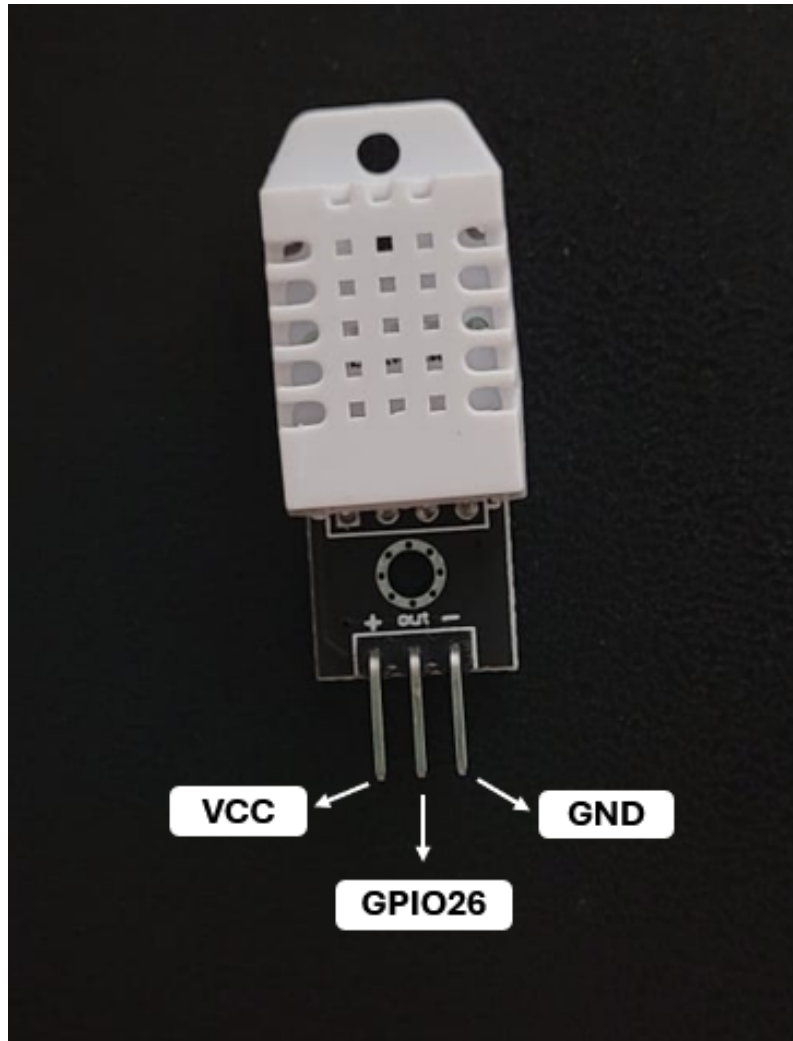


Figura 3.6: Sensor DHT22 utilizado com esquema de ligação ao microcontrolador.

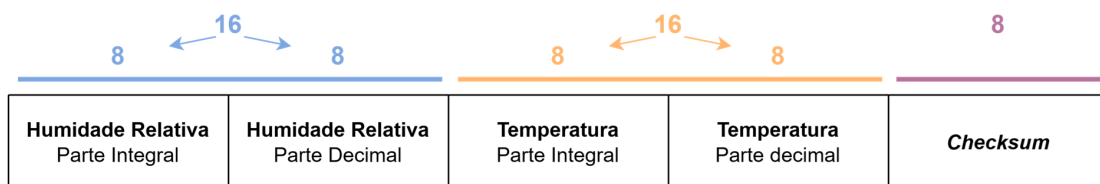


Figura 3.7: Representação gráfica da trama de comunicação do DHT22

A figura 3.6 ilustra a conexão entre o sensor e o ESP 32, alimentado a 5V pelo VCC, primeiro pin. O último pin do sensor foi conectado ao GND.

A implementação do protocolo de comunicação com o sensor DHT 22 foi elaborada com recurso à biblioteca *DHT Sensor Library*, desenvolvida pela Adafruit [39].

3.1.3 Sensor de material particulado

O SPS 30 da Sensirion é um sensor óptico de medição de material particulado de alta precisão, baseado no princípio de dispersão de laser, e com tecnologia inovadora resistente à contaminação. O sensor possui uma ventoinha interna que puxa o ar ambiente por três entradas, para um canal onde um feixe de luz ilumina as partículas e um sensor mede a luz dispersa pelas partículas, permitindo a determinação dos níveis de concentração e tamanho do material particulado amostrado [40], antes do ar ser expelido por duas saídas.



Figura 3.8: Representação das entradas (1) e saídas (2) do fluxo de ar do sensor.

A concentração mássica e concentração numérica de partículas até $2.5\mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$) vêm calibradas relativamente ao TSI DustTrak™ DRX 8533 em modo ambiente e ao TSI OPS 3330, respetivamente. Este sensor tem um tempo de vida útil projetada para mais de 10 anos em operação contínua, 24 horas/dia [40].

O SPS30 é alimentado a 5V e permite comunicação através dos protocolos UART e I2C, tendo sido escolhida a interface I2C para este sistema. Esta seleção foi feita ligando o SEL ao GND. Os valores medidos são comunicados em sinal digital via SDA, enquanto o SCL fornece o sinal de relógio emitido pelo dispositivo mestre (ESP32) para garantir a sincronização da transmissão entre o emissor e o recetor. O sensor dispõe de uma função

Tabela 3.2: Precisão e desvio anual do sensor SPS30 para concentrações de massa de material particulado.

Parâmetros	Condições	Valor
Intervalo de concentração de massa	PM _{1.0}	0.3 – 1.0 [μm]
	PM _{2.5}	0.3 – 2.5 [μm]
	PM ₄	0.3 – 4.0 [μm]
	PM ₁₀	0.3 – 10.0 [μm]
Precisão da concentração de massa para PM _{1.0} e PM _{2.5}	0–100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm [5 \mu\text{g}/\text{m}^3 + 5\% \text{ m.v.}]$
	100–1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 10\% \text{ m.v.}$
Precisão da concentração de massa para PM ₄ e PM ₁₀	0–100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$
	100–1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 25\% \text{ m.v.}$
Desvio máximo da precisão da concentração de massa anual	0–100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 1.25 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{ano}$
	100–1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 1.25\% \text{ m.v./ano}$

de auto limpeza, que ocorre a cada quatro dias, com o propósito de remover partículas depositadas na câmara interior do mesmo, de modo a evitar a degradação das medições.

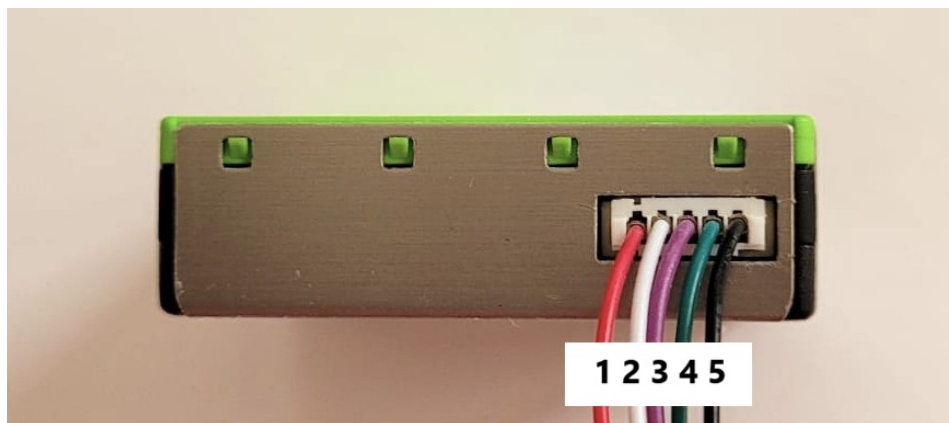


Figura 3.9: Ligação entre o sensor SPS30 da Sensirion e o microcontrolador.

A ligação entre o microcontrolador e o sensor está ilustrada na figura 3.9. A primeira ligação (1) refere-se ao VCC, as segundas e terceiras ligações são o SCL e o SDA, conectados aos pins GPIO21 e GPIO22 do microcontrolador, respetivamente. A quarta ligação, SEL, foi acoplada ao GND para escolher o protocolo de comunicação I2C. A quinta ligação refere-se ao GND.

A implementação foi realizada com recurso à biblioteca *sensirion_sps* [41].

3.2 Transmissão e armazenamento

Para que o utilizador consiga visualizar e avaliar os fatores ambientais em tempo real, o microcontrolador necessita de comunicar as medições realizadas pelo dispositivo de aquisição de dados com o servidor *cloud* da Blynk, usando Wi-Fi para acesso à Internet.

Em primeira instância, o microcontrolador precisa de estar ligado à rede Wi-Fi antes de estabelecer contacto com o servidor. Para tal, recorreu-se ao WiFiManager [42].

Configurou-se o ESP para estar em modo estação permitindo que se liga-se a outras redes existentes. No caso de não ter uma rede previamente guardada ou não ser possível conectar-se à mesma, é gerado um ponto de acesso com o ssid "ESP32-ConnectAP" e password "AutoConnect". Conectando-se a esse ponto de acesso, o utilizador pode configurar a rede Wi-Fi. As credenciais são guardadas e o dispositivo passa a ligar-se automaticamente à rede configurada. Esse processo é representado na figura 3.10.

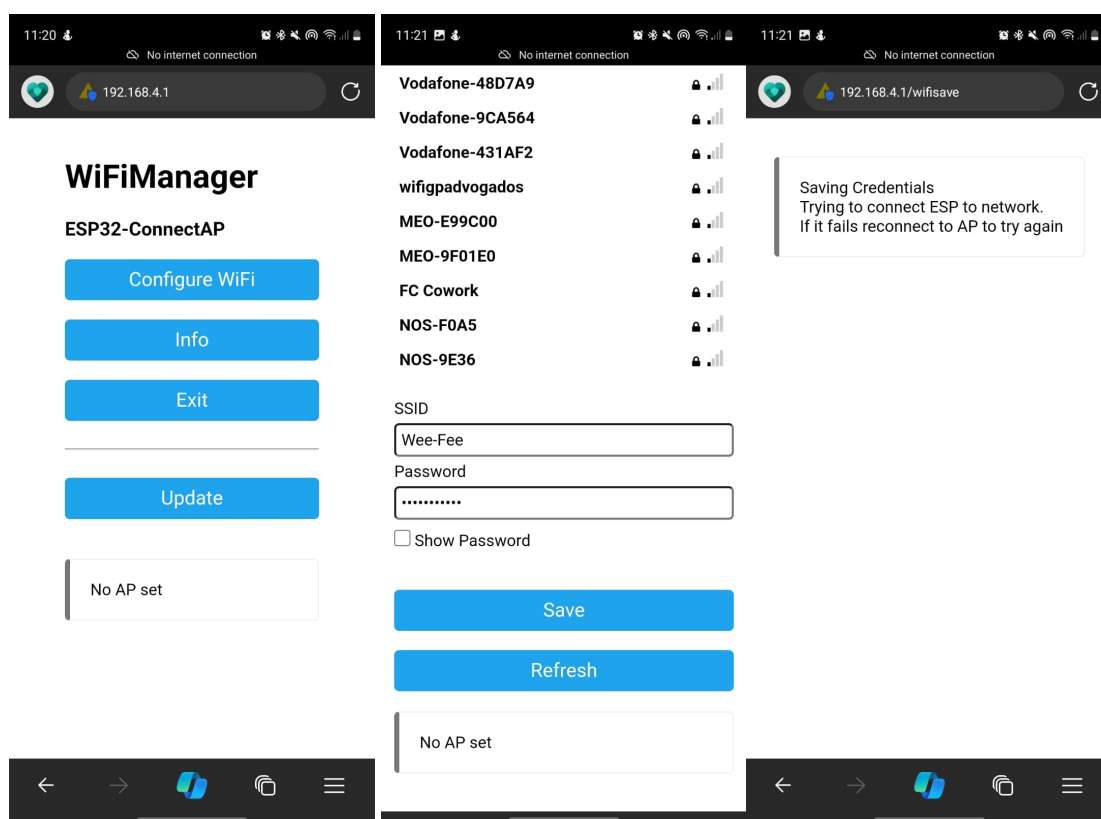


Figura 3.10: Configuração de uma rede WiFi utilizando a biblioteca *WiFiManager.h* [42].

Escolheu-se este método por evitar a necessidade de armazenar o identificador de conjunto de serviços (SSID) e a password da rede diretamente no código. Esta solução permite ao utilizador ter mais flexibilidade, podendo ligar o dispositivo a qualquer rede que tenha acesso sem a necessidade de reprogramar o sistema quando existe uma mudança de rede.

Estando o sistema ligado à rede, torna-se imperativo estabelecer a conexão à plataforma Blynk. Para tal, recorreu-se à *Blynk Library* [43]. Esta oferece os protocolos necessários para estabelecer o canal de comunicação entre o dispositivo sensorial e os serviços *cloud*.

- **BLYNK_TEMPLATE_ID** - Identificador atribuído pela plataforma a um *template*, composto pela configuração dos canais de comunicação e pelos *dashboards* associados para visualização dos dados.
- **BLYNK_TEMPLATE_NAME** - Nome atribuído ao *template*.
- **BLYNK_AUTH_TOKEN** - Token de autenticação do dispositivo associado ao *template*. Este código único é gerado pelo servidor e garante que apenas dispositivos autorizados possam interagir com os seus respetivos *templates*.

```
#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL5tNKSQtJK"  
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "QAI"  
#define BLYNK_AUTH_TOKEN "Place_Authentication_Token_Here"
```

Figura 3.11: Excerto de código - Definição das constantes de identificação do *template*, do nome do projeto e do token de autenticação utilizados pela plataforma Blynk para conectar o dispositivo de aquisição de dados ao servidor e ao *template* do sistema.

Após o microcontrolador estar ligado à rede, é configurada a comunicação com o servidor através do comando **Blynk.config(BLYNK_AUTH_TOKEN)** e é estabelecida uma conexão persistente com o servidor utilizando o protocolo TCP/IP através da porta 443 (ou em alternativa, a porta 9443) para ligações TLS. Para equipamentos que não suportem encriptação, as ligações são realizadas pela porta 80 (ou pela porta 8080, caso a primeira se encontre indisponível) [44].

Após este processo, é executado o comando **Blynk.run()** no loop para manter a ligação com o servidor ativa e o permitir que o sistema sensorial envie as medições dos fatores atmosféricos, com intervalos de 15 segundos.

As medições são transmitidas ao servidor através do comando **Blynk.virtualWrite(Pin_Virtual, Medição)**. Os pins virtuais são canais de comunicação lógica associados aos diferentes *widgets* do dashboard, sendo que o mesmo comando pode atualizar vários *widgets* simultaneamente, não sendo uma relação de um para um. As mensagens são convertidas e transmitidas de acordo com o protocolo binário próprio da aplicação [45].

As mensagens são compostas por um cabeçalho e um corpo com a seguinte estrutura:

- Cabeçalho

- Comando - 1 byte
 - ID da mensagem - 2 bytes
 - Tamanho da mensagem - 2 bytes
- Corpo
 - Corpo da mensagem tem tamanho variável até 2^{15} bytes

No caso de perda de rede, o microcontrolador tenta restabelecer com a mesma. Após a recuperação do sinal, procura restabelecer a ligação com o servidor através do comando `Blynk.connect()`. A figura 3.12 apresenta a função desenvolvida para lidar com esta situação.

```
void estabelece_ligacao() {  
  
    if(WiFi.status() != WL_CONNECTED) {  
        Serial.println("perda de rede...");  
  
        unsigned long tempoA = millis();  
  
        if(tempoA - ultimaTentativaReconexao >= intervalo) {  
            ultimaTentativaReconexao = tempoA;  
            Serial.println("Tentado ligar ao Wifi");  
  
            //Reconecta com o Wifi  
            WiFi.reconnect();  
  
            if(WiFi.status() == WL_CONNECTED) {  
                Serial.println("Ligacao recuperada...");  
                Blynk.connect();  
            }  
        }  
    } else {  
        if (!Blynk.connected()) {  
            Blynk.connect();  
        }  
    }  
}
```

Figura 3.12: Excerto de código - Função que lida com a perda do sinal de rede e perda da ligação ao servidor

A função começa por verificar se a conexão com a rede foi perdida usando a condição `WiFi.status() != WL_CONNECTED`. O sistema verifica quando foi a última tentativa de reconexão e se já passaram 10 segundos da mesma através da condição `tempoA - ultimaTentativaReconexao >= intervalo`. Após 10 segundos, o dispositivo tenta ligar-se à rede recorrendo à `WiFi.reconnect()`. Por último, o sistema tenta estabelecer a ligação ao servidor através do `Blynk.connect()`.

3.3 Interface gráfica do utilizador

A interface gráfica é onde o utilizador vai interagir com o sistema, monitorizando os fatores ambientais e avaliando se precisa de tomar alguma decisão consoante os valores apresentados, como abrir a janela caso os níveis de material particulado se encontrem demasiado elevados.

Com esta visão em mente, procurou-se criar um *template* que apresenta-se toda a informação necessária, assim como permitisse a realização de uma análise histórica, de uma maneira simples e acessível ao utilizador.

Começou-se por configurar os pinos virtuais designados para cada um *datastreams* dos fatores ambientais medidos, onde é indicado o tipo de informação recebida, as suas unidades, os valores máximos e mínimos assim como o formato decimal e, se se quer guardar dados históricos. A figura 3.13 apresenta a configuração efetuada para a temperatura.

Durante a realização de testes unitários ao sistema, verificou-se a ocorrência de picos pontuais muito elevados nos níveis de materiais particulados. Estas anomalias provocavam uma disrupção acentuada na escala dos eixos, dificultando a análise e comparação de variações quando estas se encontravam dentro dos limites normais. Para preservar a legibilidade da representação gráfica, foram definidos tetos máximos para os níveis de materiais particulados. Para $PM_{1,0}$, estabeleceu-se um máximo de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, enquanto para $PM_{2,5}$ e PM_{10} , o máximo designado foi de $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

O utilizador pode monitorizar o seu ambiente independentemente da sua localização, consultando o *dashboard* na plataforma da Blynk no computador, exemplificado na figura 3.14 ou pela aplicação móvel, demonstrado na figura 3.16.

Quando um alerta é acionado, pode ser visualização através de uma tag no canto superior direito do *dashboard* do computador como pode ser observado nas figuras 3.14, alerta de temperatura e humidade relativa, e 3.15, alertas do material particulado. Para auxiliar o utilizador na identificação de situações críticas, os valores que excedem os

Virtual Pin Datastream

General Expose to Automations

NAME: ALIAS:

PIN: DATA TYPE:

UNITS:

MIN: MAX: DECIMALS: DEFAULT VALUE:

Enable history data

Figura 3.13: Exemplo de criação de um datastream de pins Virtuais, neste caso, para receber medições de temperatura.

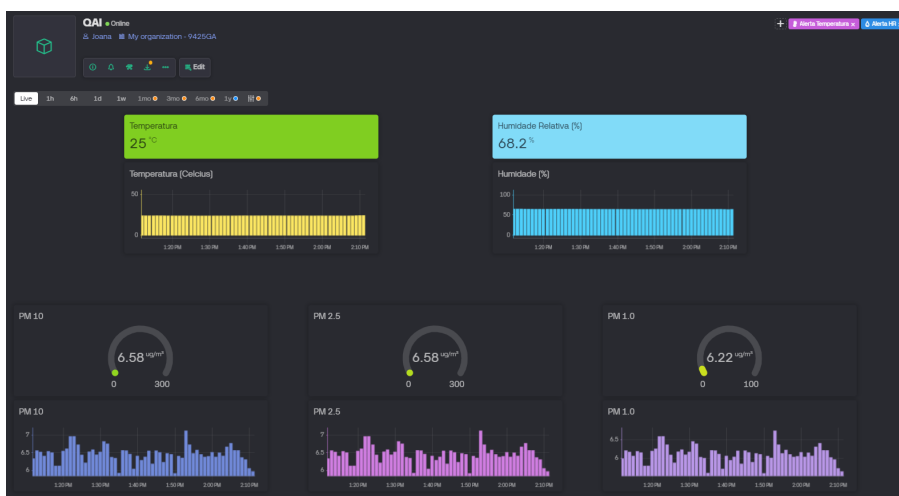


Figura 3.14: Visão do sistema de monitorização e alertas desenvolvido para computador limites recomendados são apresentados a vermelho, conforme ilustrado na figura 3.15, correspondente à interface gráfica da aplicação web.

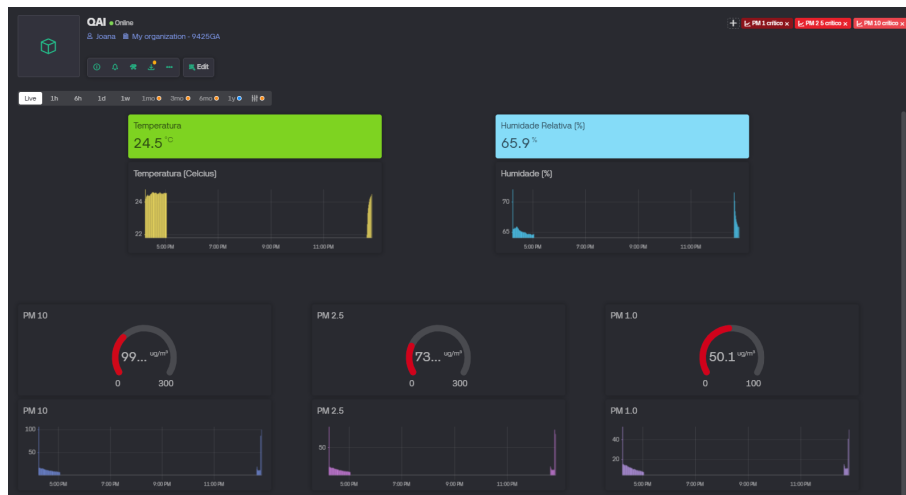
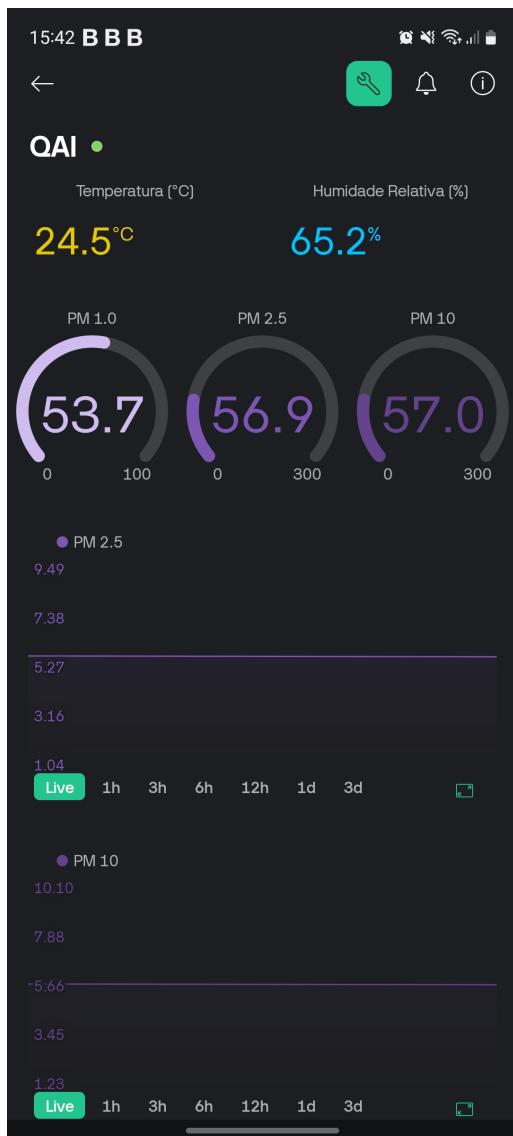
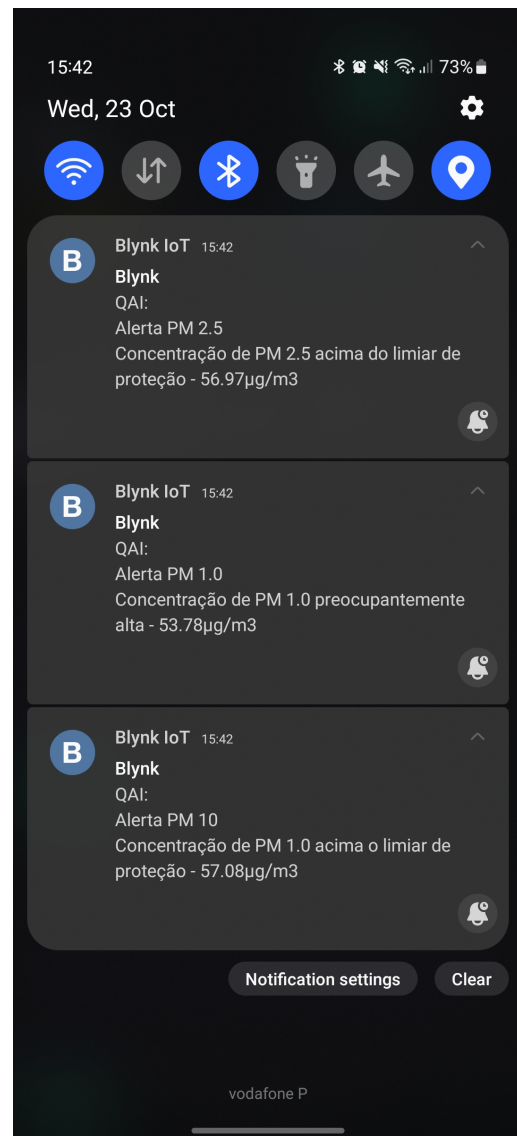


Figura 3.15: Interface gráfica web durante alertas dos níveis de materiais particulados



(a) Vista geral da interface



(b) Notificações de alertas

Figura 3.16: Visão do sistema de monitorização e alertas desenvolvido na aplicação móvel.

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos pelo sistema desenvolvido. O sistema monitorizou em tempo real a qualidade do ar de uma cozinha residencial, durante o período de uma semana, de dia 26 de Outubro ao dia 1 de Novembro de 2024. O dispositivo mediu os fatores ambientais em amostragens de 10 segundos.

4.1 Monitorização Contínua

4.1.1 Alertas

Ao longo do período de monitorização, foram emitidos alertas quando os parâmetros estabelecidos foram ultrapassados. Os alertas emitidos foram organizados na seguinte tabela 4.1, de acordo com os seguintes períodos diários:

- *Madrugada*: 00:00 às 06:00
- *Manhã*: 06:00 às 12:00
- *Tarde*: 12:00 às 18:00
- *Noite*: 18:00 às 00:00

Tabela 4.1: Alertas registados ao longo da semana.

Alertas	Temperatura	HR	PM _{1.0}	PM _{2.5}	PM ₁₀
26 de Outubro					
<i>Madrugada</i>	16	0	0	0	0
<i>Manhã</i>	12	1	0	0	0
<i>Tarde</i>	6	2	0	0	0

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

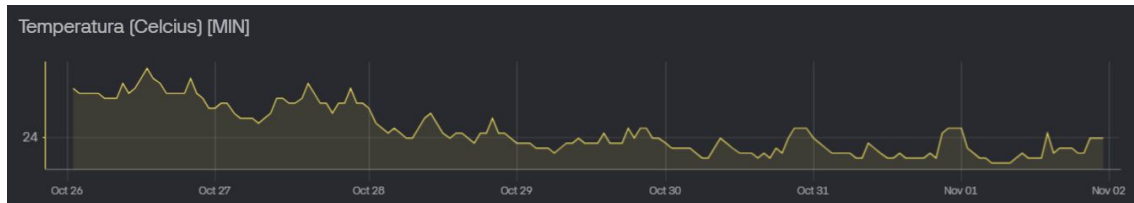
<i>Noite</i>	12	0	0	0	0
27 de Outubro					
<i>Madrugada</i>	0	0	0	0	0
<i>Manhã</i>	6	0	0	0	0
<i>Tarde</i>	9	0	1	3	1
<i>Noite</i>	6	2	1	10	3
28 de Outubro					
<i>Madrugada</i>	2	0	0	0	0
<i>Manhã</i>	5	0	0	1	0
<i>Tarde</i>	0	0	0	0	0
<i>Noite</i>	2	0	0	0	0
29 de Outubro					
<i>Madrugada</i>	0	0	0	0	0
<i>Manhã</i>	0	0	0	0	0
<i>Tarde</i>	0	1	0	0	0
<i>Noite</i>	0	4	0	0	0
30 de Outubro					
<i>Madrugada</i>	0	0	0	0	0
<i>Manhã</i>	0	0	0	0	0
<i>Tarde</i>	0	0	0	0	0
<i>Noite</i>	0	2	0	0	0
31 de Outubro					
<i>Madrugada</i>	0	0	0	0	0
<i>Manhã</i>	0	1	0	0	0
<i>Tarde</i>	0	0	0	0	0
<i>Noite</i>	0	6	0	0	0
1 de Novembro					
<i>Madrugada</i>	0	6	0	0	0
<i>Manhã</i>	0	15	0	0	0
<i>Tarde</i>	0	9	1	1	0
<i>Noite</i>	0	4	1	7	3
Total	76	53	4	22	7

4.1.2 Temperatura

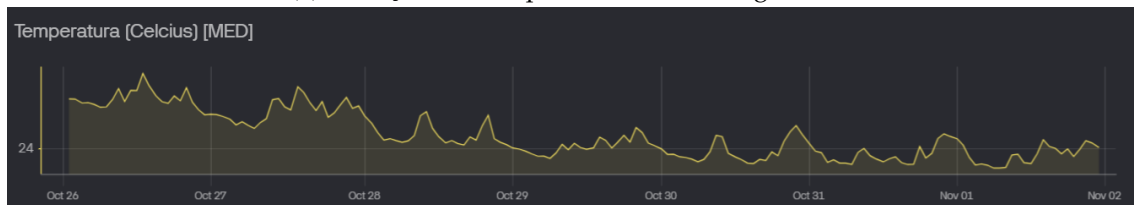
Os dias 26 e 27 de Outubro foram caracterizados por registarem temperaturas mais elevadas (mínimas, médias e máximas) comparativamente com o resto do período observado 4.1.

No dia 26 de Outubro verificou-se por 46 vezes que a temperatura registada ultrapassava os 25°C estabelecidos. No dia seguinte, o número de alertas foi reduzido para menos de metade, 21.

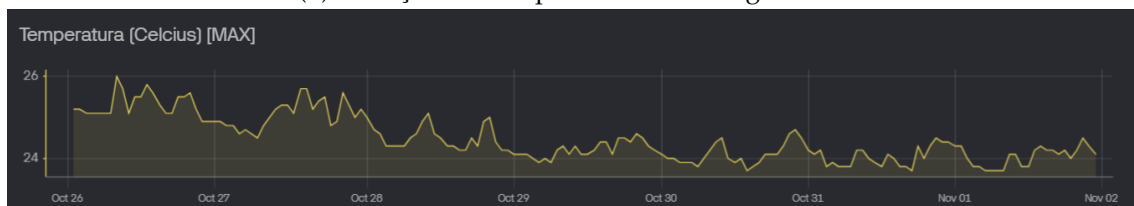
Através da figura 4.1c é possível observar apesar da temperatura ter começado a diminuir, a 28 de Outubro ainda houve momentos ao longo do dia em que a temperatura superou o valor máximo aconselhado, resultando em 9 alertas.



(a) Medições de temperatura mínima registadas.



(b) Medições de temperatura média registadas.



(c) Medições de temperatura máxima registadas.

Figura 4.1: Registos de temperatura de 26 de Outubro a 1 de Novembro.

4.1.3 Humidade

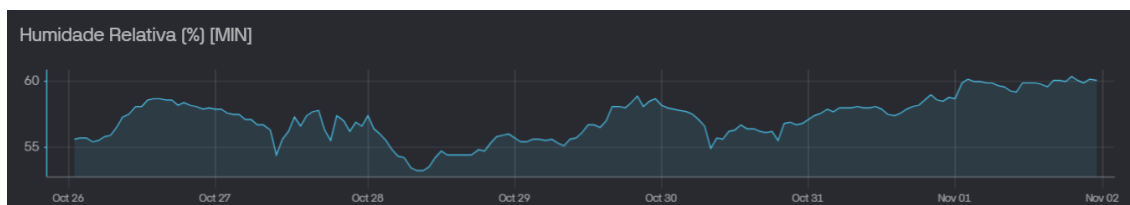
Ao longo da semana analisada, é possível verificar que a humidade encontrou-se entre os 50% e os 65%.

Observou-se que entre os dias 26 a 29 de Outubro, houve uma tendência de redução da humidade relativa, sendo possível verificar na figura 4.2c alguns picos em que a humidade relativa ultrapassou o limiar dos 60%.

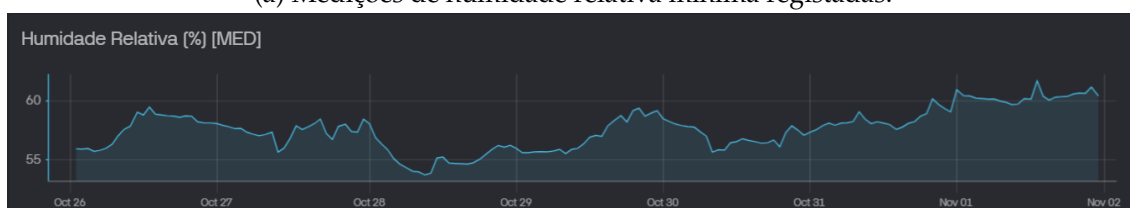
No entanto, a partir de 29 de Outubro, verifica-se um aumento geral da humidade em todos os parâmetros (mínimo, médio e máximo).

Verificou-se que no dia 1 de Novembro, a humidade relativa se encontrou particularmente alta. Os valores mínimos registados mantiveram-se constantemente próximos do

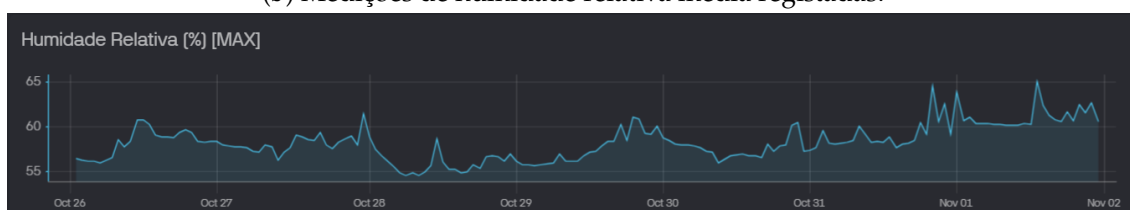
limite representado na figura 4.2a, e pode observar-se na figura 4.2c que os valores máximos registados ao longo do dia estiveram frequentemente acima do limite evidenciado pelos 34 alertas emitidos.



(a) Medições de humidade relativa mínima registadas.



(b) Medições de humidade relativa média registadas.



(c) Medições de humidade relativa máxima registadas.

Figura 4.2: Registos de humidade de 26 de Outubro a 1 de Novembro.

4.1.4 $PM_{1.0}$

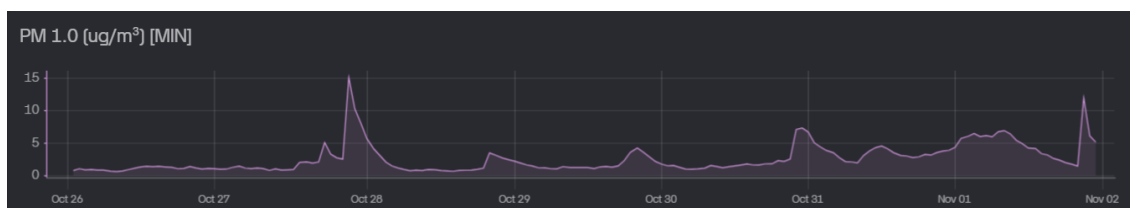
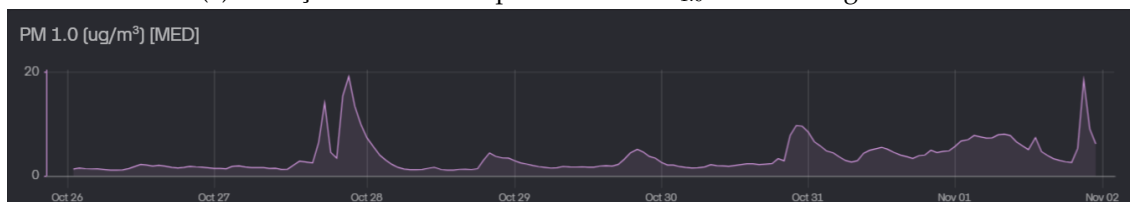
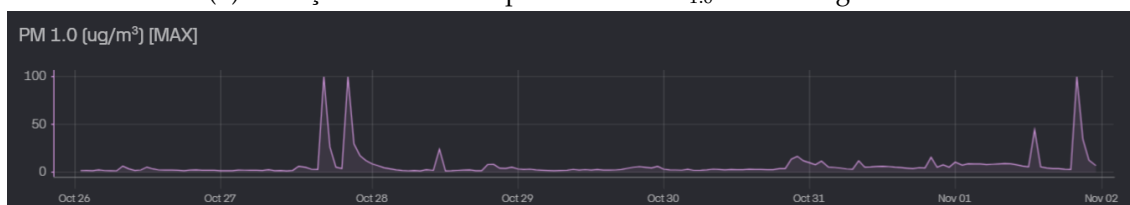
Na generalidade, os níveis de $PM_{1.0}$ encontram-se estáveis, com tendência a aumentar ao longo da semana.

Verificaram-se picos bastante significativos nos dias 27 de Outubro e 1 de Novembro, sendo que foram registados os valores de concentração máximos de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A figura 4.3c sugere a ocorrência de 3 eventos críticos ao longo da semana, sendo que a concentração de poluentes aumentou dramaticamente, acabando por estabilizar rapidamente.

4.1.5 $PM_{2.5}$

Comparando os níveis de concentração de $PM_{2.5}$, apresentados na figura 4.4, com os níveis de $PM_{1.0}$ analisados anteriormente, é possível observar semelhanças entre os mesmos. Este resultado era esperado dado a relação entre os dois parâmetros: que o $PM_{2.5}$ engloba o $PM_{1.0}$.

Durante o período analisado, verificaram-se, nos dias 27 de outubro e 1 de novembro, picos de concentração de $PM_{2.5}$ que atingiram o valor máximo designado $\mu\text{g}/\text{m}^3$,

(a) Medições de material particulado PM_{1,0} mínimas registadas.(b) Medições de material particulado PM_{1,0} médias registadas.(c) Medições de material particulado PM_{1,0} máximas registadas.Figura 4.3: Registos de material particulado PM_{1,0} de 26 de Outubro a 1 de Novembro.

conforme apresentado na figura 4.4c. Este facto é corroborado pelo número de alertas registados nesses mesmos dias, apresentados na tabela 4.1, que totalizaram 12 e 8 alertas, respetivamente.

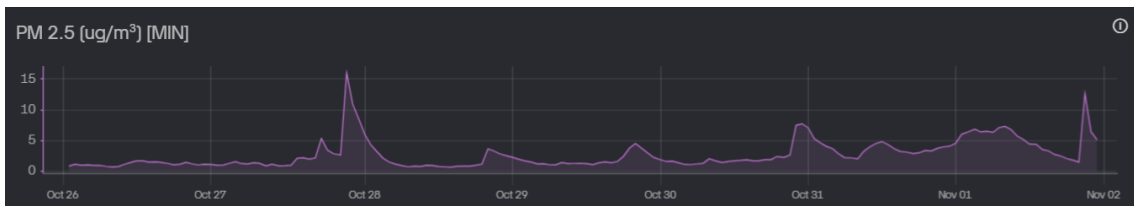
Na generalidade, a tendência ao longo da semana foi de crescimento.

4.1.6 PM₁₀

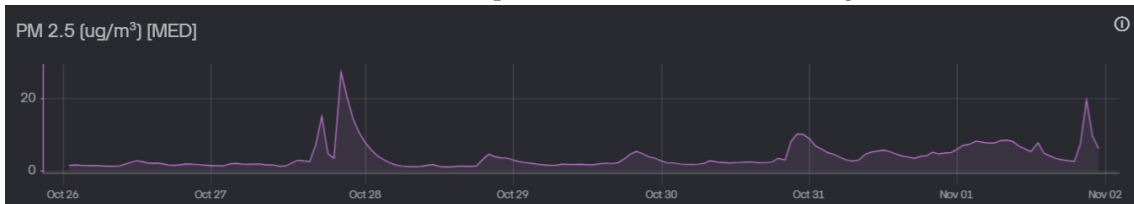
Dado que o PM₁₀, é o maior grupo de material particulado, englobando o PM_{2,5} e PM_{1,0}, a figura 4.5 apresenta fortes semelhanças às analisadas previamente.

É possível observar o mesmo padrão de aumento de concentração ao longo da semana monitorizada, assim como os picos máximo atingidos coincidentes, ocorridos nos dias 27 de Outubro e 1 de Novembro.

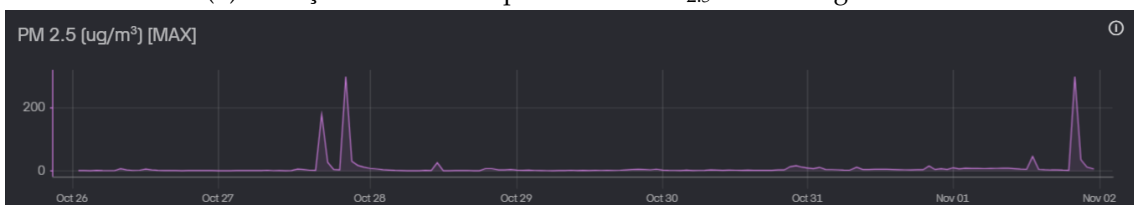
Deste modo, torna-se evidente que um único evento foi responsável por cada máximo atingido, observado nas figuras 4.5, 4.4 e 4.3.



(a) Medições de material particulado PM_{2.5} mínimas registadas.

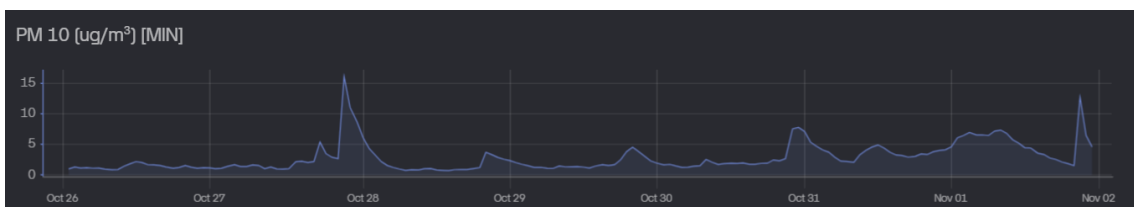


(b) Medições de material particulado PM_{2.5} médias registadas.

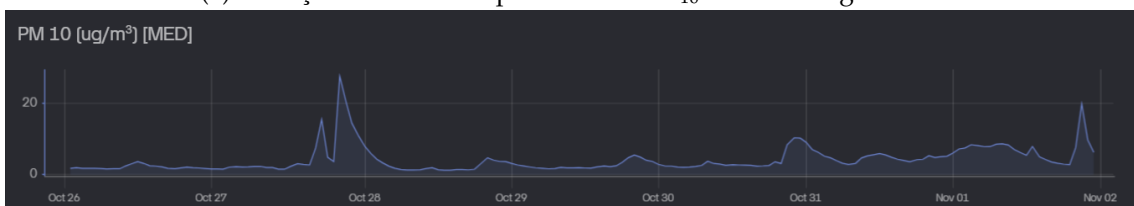


(c) Medições de material particulado PM_{2.5} máximas registadas.

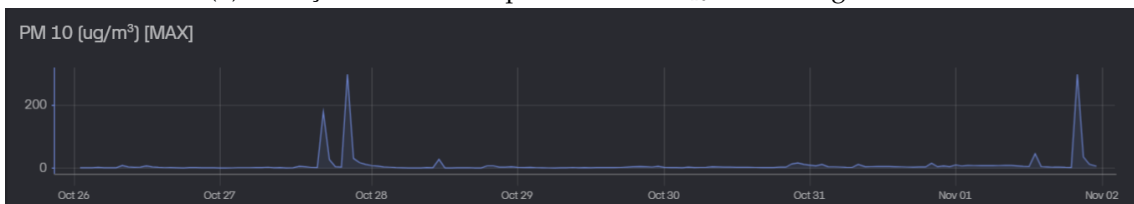
Figura 4.4: Registos de material particulado PM_{2.5} de 26 de Outubro a 1 de Novembro.



(a) Medições de material particulado PM₁₀ mínimas registadas.



(b) Medições de material particulado PM₁₀ médias registadas.



(c) Medições de material particulado PM₁₀ máximas registadas.

Figura 4.5: Registos de material particulado PM₁₀ de 26 de Outubro a 1 de Novembro.

CONCLUSÃO

O sistema desenvolvido permite monitorizar a qualidade do ar com base nas características ambientais escolhidas para este estudo: temperatura; humidade relativa; e material particulado, nomeadamente $PM_{1,0}$, $PM_{2,5}$ e PM_{10} .

O sistema é composto por um módulo de aquisição de dados que comunica com a plataforma Blynk através da Internet, sendo que o dispositivo de aquisição de dados se liga ao router via Wi-Fi. Os dados são armazenados em *cloud* até uma semana, permitindo que o utilizador possa fazer uma análise mais detalhada dos parâmetros ambientais.

Para garantir a segurança e bem-estar do utilizador, o dispositivo emite alertas quando os fatores ambientais se encontram fora dos limites estabelecidos com base no levantamento feito ao longo do capítulo 2. Os alertas são feitos na forma de notificações *push* no telemóvel e podem também ser observados na aplicação *web*.

Apesar de o trabalho realizado ter cumprido o seu objetivo, foram identificadas algumas melhorias.

Em primeira instância, a integração de mais sensores tornaria o sistema mais completo trazendo uma análise da qualidade do ar mais detalhada. Para tal, a solução poderia passar por fazer *upgrade* à plataforma Blynk, de modo a eliminar a limitação de apenas 5 *datastreams* por projeto.

Outra melhoria poderia passar por integrar atuadores no sistema, permitindo ao utilizador ter uma atitude mais passiva relativamente ao espaço interior e reduzindo a necessidade de intervir sempre que ocorre uma degradação da qualidade do ar. Por exemplo, quando a humidade relativa se encontrasse acima do limiar estabelecido, o sistema poderia ativar um desumidificador e desativar o mesmo quando os parâmetros se encontravam bem, prevenido o aparecimento de mofo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Fuller et al. «Pollution and health: a progress update». Em: *The Lancet Planetary Health* 6.6 (2022), e535–e547. ISSN: 2542-5196. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00090-0) (ver p. 1).
- [2] A. J. Cohen et al. «Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015». Em: *The Lancet* 389.10082 (2017), pp. 1907–1918. ISSN: 0140-6736. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6) (ver p. 1).
- [3] M. Marć et al. «Indoor air quality of everyday use spaces dedicated to specific purposes—a review». Em: *Environmental Science and Pollution Research* 25 (2018-01). DOI: [10.1007/s11356-017-0839-8](https://doi.org/10.1007/s11356-017-0839-8) (ver pp. 1, 3).
- [4] N. Klepeis et al. «The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A resource for assessing exposure to environmental pollutants». Em: *Journal of exposure analysis and environmental epidemiology* 11 (2001-03), pp. 231–52. DOI: [10.1038/sj.jea.7500165](https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165) (ver p. 1).
- [5] N. von Hahn. *Indoor air quality (IAQ)*. 2012-03. URL: <https://oshwiki.osha.europa.eu/en/themes/indoor-air-quality-iaq> (accedido em 2024-01-12) (ver pp. 1, 7).
- [6] J. González-Martín et al. «A state-of-the-art review on indoor air pollution and strategies for indoor air pollution control». Em: *Chemosphere* 262 (2021), p. 128376. ISSN: 0045-6535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128376> (ver p. 2).
- [7] B. L. Indoor Air Quality Scientific Findings Resource Bank. *Indoor Air Quality Overview*. <https://iaqscience.lbl.gov/indoor-air-quality-overview>. Accessed on 16 January 2024 (ver p. 3).
- [8] V. V. Tran, D. Park e Y.-C. Lee. «Indoor Air Pollution, Related Human Diseases, and Recent Trends in the Control and Improvement of Indoor Air Quality». Em: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17.8 (2020). ISSN: 1660-4601. DOI: [10.3390/ijerph17082927](https://doi.org/10.3390/ijerph17082927) (ver pp. 3, 4).

- [9] E. L. E. Afshari A Matson U. «Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: a study conducted in a full-scale chamber». Em: *Indoor Air* 15.2 (2005), pp. 141–150. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00332.x> (ver p. 3).
- [10] P. Thangavel, D. Park e Y.-C. Lee. «Recent Insights into Particulate Matter (PM2.5)-Mediated Toxicity in Humans: An Overview». Em: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19 (2022-06), p. 7511. DOI: [10.3390/ijerph19127511](https://doi.org/10.3390/ijerph19127511) (ver p. 4).
- [11] A. Cristaldi et al. «Possible association between PM2.5 and neurodegenerative diseases: A systematic review». Em: *Environmental Research* 208 (2021-12), p. 112581. DOI: [10.1016/j.envres.2021.112581](https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112581) (ver p. 4).
- [12] J. Wang et al. «The Impact of Air Pollution on Neurodegenerative Diseases». Em: *Therapeutic drug monitoring* 43.1 (2021-02), pp. 69–78. ISSN: 0163-4356. DOI: [10.1097/ftd.0000000000000818](https://doi.org/10.1097/ftd.0000000000000818) (ver p. 4).
- [13] D. He et al. «Association between Particulate Matter 2.5 and Diabetes Mellitus- a Meta-Analysis of Cohort Studies». Em: *Journal of Diabetes Investigation* 8 (2017-01). DOI: [10.1111/jdi.12631](https://doi.org/10.1111/jdi.12631) (ver p. 4).
- [14] F. N. S. Borough. *What is PM2.5?* <https://www.fnsb.gov/387/What-is-PM25>. Accessed on 30 January 2024 (ver p. 5).
- [15] W. H. Organization. «Indoor air quality: Organic pollutants». Em: *Environmental Technology Letters* 10.9 (1989), pp. 855–858 (ver p. 5).
- [16] A. L. Association. *Volatile Organic Compounds*. <https://www.lung.org/clean-air/indoor-air/indoor-air-pollutants/volatile-organic-compounds>. Accessed on 30 January 2024 (ver p. 5).
- [17] A. T. Tuula Putus e S. Rautiala. «Chemical and Microbial Exposures in a School Building: Adverse Health Effects in Children». Em: *Archives of Environmental Health: An International Journal* 59.4 (2004), pp. 194–201. DOI: [10.3200/AEOH.59.4.194-201](https://doi.org/10.3200/AEOH.59.4.194-201) (ver p. 5).
- [18] A. P. do Ambiente. *Ozono (O3)*. Accessed: 28-08-2025. URL: <https://apambiente.pt/ar-e-ruido/ozono-o3> (ver p. 5).
- [19] G. Donzelli e M. M. Suarez-Varela. «Tropospheric Ozone: A Critical Review of the Literature on Emissions, Exposure, and Health Effects». Em: *Atmosphere* 15.7 (2024). ISSN: 2073-4433. DOI: [10.3390/atmos15070779](https://doi.org/10.3390/atmos15070779) (ver p. 6).
- [20] C. Lin et al. «Associations between short-term ambient ozone exposure and cause-specific mortality in rural and urban areas of Jiangsu, China». Em: *Environmental Research* 211 (2022), p. 113098. ISSN: 0013-9351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113098> (ver p. 6).

- [21] G. Gopikrishnan, T. Ardra e J. Kuttippurath. «Exposure to surface ozone and its associated health effects and economic burden in India». Em: *Global Transitions* 7 (2025), pp. 148–158. ISSN: 2589-7918. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.glt.2025.03.002> (ver p. 6).
- [22] L. Fang, G. Clausen e P. O. Fanger. «Impact of Temperature and Humidity on the Perception of Indoor Air Quality». Em: *Indoor Air* 8.2 (1998), pp. 80–90. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1998.t01-2-00003.x> (ver p. 6).
- [23] R. F. Rupp, N. G. Vásquez e R. Lamberts. «A review of human thermal comfort in the built environment». Em: *Energy and Buildings* 105 (2015), pp. 178–205. ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047> (ver p. 6).
- [24] P. Wolkoff, K. Azuma e P. Carrer. «Health, work performance, and risk of infection in office-like environments: The role of indoor temperature, air humidity, and ventilation». Em: *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 233 (2021), p. 113709. DOI: "<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113709>" (ver p. 6).
- [25] J. M. Reiman et al. «Humidity as a non-pharmaceutical intervention for influenza A». Em: *PloS One* 13.9 (2018-09). ISSN: 1932-6203. DOI: [10.1371/journal.pone.0204337](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204337) (ver p. 6).
- [26] V. G. e G. Balaji. «Impact of Indoor Temperature and Humidity in IAQ of Health Care Buildings». Em: *Civil Engineering and Architecture* 11 (2023-05), pp. 1273–1279. DOI: [10.13189/cea.2023.110313](https://doi.org/10.13189/cea.2023.110313) (ver p. 6).
- [27] S. e Ambiente e Ação Climática. *Portaria n.º 138-G/2021, de 1 de julho*. 2021-07. URL: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/portaria/138-g-2021-166296490> (ver pp. 7, 8).
- [28] P. de Conselho de Ministros. *Decreto-Lei n.º 101-D/2020, de 7 de dezembro*. 2020-12. URL: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/101-d-2020-150570704> (ver p. 7).
- [29] Blynk. *Preço dos planos da plataforma Blynk*. Accessed: 28-09-2025. URL: <https://blynk.io/pricing> (ver p. 9).
- [30] R. Pitarma, G. Marques e B. R. Ferreira. «Monitoring Indoor Air Quality for Enhanced Occupational Health». Em: *Journal of Medical Systems* 41 (2017), pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10916-016-0667-2> (ver pp. 9, 10, 15).
- [31] PiEmbSysTech. *XBEE Protocol*. <https://piembsystech.com/xbee-protocol/>. Accessed on 24 January 2024 (ver p. 10).
- [32] M. Taştan e H. Gökozan. «Real-Time Monitoring of Indoor Air Quality with Internet of Things-Based E-Nose». Em: *Applied Sciences* (2019). DOI: <https://doi.org/10.3390/APP9163435> (ver pp. 10, 11, 15, 16).

- [33] S. Trilles et al. «Reliability Validation of a Low-Cost Particulate Matter IoT Sensor in Indoor and Outdoor Environments Using a Reference Sampler». Em: *Sustainability* 11.24 (2019). ISSN: 2071-1050. DOI: [10.3390/su11247220](https://doi.org/10.3390/su11247220) (ver pp. 12, 13, 16).
- [34] S. Trilles et al. «SEnviro: A sensorized platform proposal using open hardware and open standards». Em: *Sensors* 15.3 (2015), pp. 5555–5582 (ver p. 12).
- [35] Espressif. *ESP32 Series Datasheet Version 4.7*. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf (ver p. 19).
- [36] Espressif. *ESP32-WROVER-E & ESP32-WROVER-IE Datasheet*. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wrover-e_esp32-wrover-ie_datasheet_en.pdf (ver p. 19).
- [37] Espressif. *ESP32-DevKitC V4*. URL: https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/esp32/esp32-devkitc/user_guide.html (ver p. 22).
- [38] L. Aosong(Guangzhou)Electronics Co. *Digital-output relative humidity & temperature sensor/module AM2303* (ver p. 21).
- [39] Adafruit. *DHT Sensor Library*. Accessed: Sep. 11, 2025. 2023 (ver p. 24).
- [40] S. the sensor company. *Datasheet SPS30 - Particulate Matter Sensor for Air Quality Monitoring and Control* (ver p. 24).
- [41] J. Winkelmann. *Arduino-Sps*. Accessed: Sep. 11, 2025. 2023 (ver p. 25).
- [42] tzapu. *WiFiManager*. URL: <https://github.com/tzapu/WiFiManager> (ver p. 26).
- [43] Blynk. *Blynk Library*. URL: <https://github.com/blynkkk/blynk-library/releases/tag/v1.3.2> (ver p. 27).
- [44] Blynk. *Blynk.Cloud Security*. URL: <https://docs.blynk.io/en/blynk.cloud/security> (ver p. 27).
- [45] Blynk. *BlynkProtocol*. URL: <https://docs.blynk.io/en/blynk-library-firmware-api/blynk-protocol> (ver p. 27).



2025

Sistema de Monitorização da Qualidade do Ar Interior com Integração em Plataforma Low-Code
Joana Gil

