



INSTITUTO
UNIVERSITÁRIO
DE LISBOA

SOLAR-IOT – IoT for Precision Agriculture – SoilAir monitoring

Roberto Filipe Cardoso Miguel

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

Dr. Octavian Adrian Postolache, Professor Catedrático
Iscte- Instituto Universitário de Lisboa

Co-Orientadora:

Dr. Mariana Jacob Rodrigues, Professora Auxiliar Convidada
Iscte- Instituto Universitário de Lisboa

Setembro, 2024

SOLAR-IOT – IoT for Precision Agriculture – SoilAir monitoring

Roberto Filipe Cardoso Miguel

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

Dr. Octavian Adrian Postolache, Professor Catedrático
Iscte- Instituto Universitário de Lisboa

Co-Orientadora:

Dr. Mariana Jacob Rodrigues, Professora Auxiliar Convidada
Iscte- Instituto Universitário de Lisboa

Setembro, 2024

Dedicatória

*Dedico esta dissertação a mim, à minha família,
Avó Lurdes e à Mariana Domingos.*

Agradecimento

Escrever os agradecimentos é uma tarefa difícil, não porque sinto que não há pessoas para agradecer, mas sim pela imensidão de apoio e incentivo que recebi ao longo desta jornada. Quero expressar a minha sincera gratidão ao meu orientador, Professor Octavian Postolache, e à minha co-orientadora, Professora Mariana Jacob Rodrigues, pela orientação valiosa e pelo apoio na realização desta dissertação. Agradeço também ao Iscte – Instituto Universitário de Lisboa e ao Instituto de Telecomunicações pelas experiências e conhecimentos adquiridos ao longo destes dois anos.

Aos meus pais, irmão, avó Lurdes, flor, íris, tios e primos, agradeço do fundo do coração pelo apoio inabalável e pelas contribuições ao longo do meu percurso académico. Estiveram sempre presentes nos momentos difíceis, incentivando-me a nunca desistir e a continuar a lutar pelos meus sonhos.

Um agradecimento muito especial à minha companheira de vida, Mariana Domingos, pelo grande amor, pela tremenda ajuda, pelo apoio incondicional, pela paciência e compreensão, por me ter dado forças para ultrapassar todos os obstáculos que a vida me colocava à frente e por ter caminhado sempre ao meu lado. Esta dissertação é tanto tua como minha.

Por fim, mas não menos importante, agradecer a todos os meus colegas de turma e amigos, especialmente Oleksandr Kobelyuk, Tiago Soeira, Rúben Bento, Pedro Arsénio, Filipe Gonçalves, Duarte Casaleiro, Miguel Romana, Rodrigo Guerreiro, Henrique Sousa e ao meu grande amigo André Corveira, pela ajuda, pelo conhecimento, pela amizade e acima de tudo, por me terem sempre acolhido e por serem sempre umas grandes pessoas para mim.

A todos vocês um enorme obrigado.

Resumo

Perante o crescimento populacional global e as mudanças climáticas, a agricultura moderna deve adotar tecnologias inovadoras para responder à crescente procura de alimentos. Este trabalho propõe e implementa a aplicação de tecnologias de Internet das Coisas em contextos agrícolas, com o objetivo de melhorar a gestão de recursos e fornecer informações essenciais sobre as culturas agrícolas. Ao implementar múltiplos sensores num único nó, os agricultores podem monitorizar e analisar em tempo real, a humidade e temperatura do ar e solo, possibilitando uma agricultura de precisão que otimiza a produção e minimiza o uso de recursos. Todos os dados são apresentados num painel de controlo do Node-RED, com diferentes separadores que exibem as informações fornecidas pelos sensores, uma previsão meteorológica, uma funcionalidade que indica o que o agricultor pode plantar naquele momento e local específicos, além de uma página de ajuda que oferece dicas sobre plantio e as precauções necessárias a tomar. Um sistema multisensor foi projetado e implementado para medição das condições do solo e do ar, fornecendo dados importantes que não podem ser facilmente obtidos sem alguma pesquisa prévia.

Palavras-Chave: Internet das coisas, agricultura de precisão, LPWAN, MQTT, Node-RED

Abstract

In order to meet the growing demand for food, which is being driven by global population growth and climate change, modern agriculture must adopt innovative technologies. This work proposes and implements the application of Internet of Things (IoT) technologies in agricultural contexts, with the objective of enhancing resource management and providing crucial information about agricultural crops. The deployment of multiple sensors on a single node enables farmers to monitor and analyse air and soil humidity and temperature in real time, thereby facilitating precision agriculture that optimises production and minimises the use of resources. The data is shown on a Node-RED dashboard, which includes tabs displaying information from the sensors, a weather forecast, planting recommendations based on the specific time and location, and a help page offering planting tips and precautions. A multi-sensor system has been designed and implemented to measure soil and air conditions, providing data that would otherwise be difficult to obtain.

Keywords: Internet of things, precision agriculture, LPWAN, MQTT, Node-RED

Tabela de Conteúdos

Dedicatória	ii
Agradecimento	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Tabela de Conteúdos	ix
Índice de Figuras	xi
Lista de Acrónimos	xiii
Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Perguntas de Pesquisa	2
1.4. Estrutura	3
1.5. Contribuições Científicas	3
Revisão da Literatura	4
2.1. Evolução da Agricultura	4
2.2. Internet das Coisas	6
2.3. IoT na Agricultura	7
2.4. Comunicação sem fios	8
2.5. Microcontroladores	13
2.6. Node-RED	15
Descrição Funcional	17
3.1. Hardware	17
3.2. Protocolos de Comunicação	23
3.3. Software	24
Ensaaios e Resultados	32
4.1. Validação do Sistema	32
Conclusões e Trabalhos Futuros	37
5.1. Conclusões	37
5.2. Trabalhos Futuros	38
Referências Bibliográficas	39
Apêndice 1 - Artigo Publicado	45

Índice de Figuras

Figura 1 - Estrutura geral de um Sistema de Suporte à Decisão Agrícola para gestão de pragas. [4].....	4
Figura 2 - Crescimento de produtos químicos agrícolas entre 1965 a 1991 nos EUA [6]	5
Figura 3 - Tipos e quantidades de pesticidas utilizados em plantações entre 1964 a 1992 [6]	5
Figura 4 - Internet of Things - Dispositivos ligados entre si [15]	6
Figura 5 - Arquitetura LoRaWAN [29].....	12
Figura 6 - JacobsParts ESP8266 Wifi [30].....	13
Figura 7 - User Interface do Node-RED [33].....	16
Figura 8 - Diagrama de Blocos do nó de LoRa	17
Figura 9 - Heltec WiFi LoRa 32 V2 [38]	18
Figura 10 - Velleman DHT22 [40].....	18
Figura 11 - Shelly DS18B20 [42].....	19
Figura 12 - Moisture Sensor and Pump [44]	19
Figura 13 - Sensor de Nivel de Água [46].....	20
Figura 14 - M5Stack GPS [48].....	21
Figura 15 - The Things Indoor Gateway [49]	21
Figura 16 – Diagrama de blocos do nó LoRa.....	22
Figura 17 - Protótipo do nó LoRa	22
Figura 18 - FlowChart do Sistema	23
Figura 19 – Exemplo de Código enviado para a rede LoRa.....	23
Figura 20 - uplink payload formatter	24
Figura 21 - Página Inicial da SOLAR-IoT	24
Figura 22 - Criação da tabela em MySQL.....	25
Figura 23 – Dashboard com a Informação dos Sensores.....	25
Figura 24 - Página de Recomendação de plantação	26
Figura 25 - Divisão de Portugal Continental em Zonas [50].....	26
Figura 26 - Página de Meteorologia.....	30
Figura 27 - Página de Ajuda.....	30
Figura 28 - Informação ao Selecionar Alface.....	31
Figura 29 - Horário dos Ensaios.....	32
Figura 30 - Variação da Humidade do Ar e Solo durante as Diferentes Fases do Dia.....	33
Figura 31 - Variação da temperatura do Ar e Solo durante as Diferentes Fases do Dia	34
Figura 32 - Consumo Energético dos Sensores Ativos no Microcontrolador	35
Figura 33 - Consumo Energético dos Sensores ligados ao Microcontrolador com a Bomba de Irrigação Desativada	36
 Tabela 1 - Comparação entre Microcontroladores	 14
Tabela 2 - Variáveis de cada Cultura	28
Tabela 3 - Registos de Valores de Humidade	33
Tabela 4 - Registos de Valores de Temperatura.....	35

Lista de Acrónimos

AES: *Advanced Encryption Standard*

API: *Application Programming Interface*

BLE: *Bluetooth Low Energy*

GPIO: *General Purpose Input / Output*

HTTP: *HyperText Transfer Protocol*

IDE: *Integrated Development Environment*

IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IoT: *Internet of Things*

LPWAN: *Low-Power Wide-Area Network*

LTE: *Long Term Evolution*

LTE-M: *Long Term Evolution for Machines*

MQTT: *Message Queuing Telemetry Transport*

RH: *Relative Humidity*

TCP: *Transmission Control Protocol*

TCP/IP: *Transmission Control Protocol/ Internet Protocol*

TLS: *Transport Layer Security*

TTN: *The Things Network*

UDP: *User Datagram Protocol*

Introdução

1.1. Motivação

Devido ao aumento contínuo da população global, é cada vez mais desafiador fornecer uma grande quantidade de alimentos. Além disso, com as constantes mudanças climáticas globais, torna-se cada vez mais difícil atender às necessidades do solo, como a irrigação de um solo árido. Estes desafios requerem a existência de novas abordagens tecnológicas, para ser possível mitigar ou até mesmo resolver de forma automática estes tipos de problemas. Neste contexto, a internet das coisas (IoT) emerge como uma ferramenta crucial para a solução deste desafio, pois com a sua capacidade de monitorizar e analisar os dados ambientais e do solo em tempo real, esta permite uma agricultura de precisão mais eficiente e sustentável.

O desenvolvimento de uma infraestrutura de agricultura de precisão baseada em IoT facilita bastante a vida diária dos agricultores. Para ser bem-sucedido, um agricultor deve maximizar o rendimento por hectare, reduzir a deterioração resultante da utilização inadequada ou excessiva de fertilizantes e minimizar os custos operacionais. A gestão eficaz dos recursos, como exemplo, água, fertilizantes, entre outros, é a chave para alcançar o sucesso. Muitas explorações agrícolas no mundo, sobretudo nos países em desenvolvimento, são pequenas, geralmente com poucos hectares de extensão. Muitos agricultores seguem práticas agrícolas tradicionais e enfrentam, frequentemente, a pressão de grandes perdas de colheitas, baixos rendimentos e baixa qualidade dos produtos agrícolas [1].

Muitas explorações agrícolas em todo o mundo, especialmente em países em desenvolvimento, que consistem em áreas relativamente pequenas, geralmente com apenas alguns hectares de extensão, em que muitos agricultores seguem práticas agrícolas convencionais e enfrentam frequentemente o peso de elevadas perdas de colheitas, baixos rendimentos e pouca qualidade dos produtos agrícolas [1].

Esta dissertação visa desenvolver um sistema capaz de fornecer informações essenciais aos utilizadores, utilizando sensores para monitorização em tempo real de parâmetros como humidade e temperatura do solo e do ar, geolocalização e sensor de deteção de água. O sistema será baseado na plataforma Node-RED, permitindo a análise contínua de dados e facilitando a tomada de decisões agrícolas de forma eficiente e acessível.

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é implementar um sistema IoT com integração de nós de medição para analisar as características do solo e do ar. Estes serão responsáveis pela captação de dados essenciais, como a humidade e temperatura do solo e do ar, com a respetiva localização geográfica dos sensores. Vão ser implementados também várias componentes de software, como por exemplo, uma ferramenta visual que permite a visualização das informações dos sensores instalados, que ajudará na decisão do utilizador sobre o que plantar, que demonstrará a meteorologia do local no momento, e a previsão meteorológica dos próximos 7 dias. Tudo o que for concebido tem como finalidade gerir, visualizar e ajudar na decisão do utilizador.

Além das funcionalidades mencionadas, este sistema IoT também armazenará todos os dados numa base de dados MySQL, o que facilitará a visualização do histórico de cada sensor através da interface Node-RED.

1.3. Perguntas de Pesquisa

Foram realizadas as seguintes perguntas de pesquisa que motivaram a criação desta dissertação:

- Com a grande evolução tecnológica, é possível realizar um dispositivo *low-cost* de IoT na área da agricultura de precisão capaz de ser utilizado por todo o tipo de pessoas com interesse em agricultura?
- Com a geolocalização do nó e os dados obtidos pelos sensores de temperatura e humidade do solo e do ar, é possível determinar que culturas podem ser plantadas numa zona agrícola específica?
- Qual a melhor rede de comunicação sem fios disponível para ser utilizada num terreno agrícola em Portugal?

1.4. Estrutura

Esta dissertação é composta por 5 capítulos:

1. Capítulo 1 (Introdução) – Introdução do tema e objetivos da dissertação.
2. Capítulo 2 (Revisão da Literatura) – Investigação sobre a evolução da agricultura ao longo do tempo, destacando a transição para práticas mais tecnológicas através da introdução de IoT. A implementação de IoT na agricultura, com foco na agricultura inteligente, é analisada, abordando tecnologias de comunicação sem fios, microcontroladores e software.
3. Capítulo 3 (Descrição Funcional) – Apresenta o hardware utilizado, sendo estes os sensores, microcontroladores e *gateways*, os protocolos de comunicação utilizados e o software para monitorização.
4. Capítulo 4 (Ensaio e Resultados) – São apresentados ensaios específicos de validação do sistema e interpretação dos resultados.
5. Capítulo 5 (Conclusões e Trabalhos Futuros) – São descritas as considerações finais sobre o desenvolvimento da dissertação e as possíveis melhorias ou adições que podem ser efetuadas em iterações futuras.

1.5. Contribuições Científicas

Os dados e conclusões obtidos neste estudo resultaram na origem de um artigo científico, o qual foi publicado e apresentado numa conferência de âmbito nacional e internacional:

R. Miguel, O. Postolache, and M. J. Rodrigues, “Soil and Air Characteristics Monitoring Base on IoT for Precision Agriculture”, *ISSI 2024 - 4th International Symposium on Sensing and Instrumentation in IoT Era*, Azores, Portugal, 2024.

CAPÍTULO 2

Revisão da Literatura

Este capítulo tem como base um estudo sobre tecnologias na Internet das Coisas, agricultura e aplicação da IoT, para apresentar dados relevantes para a dissertação.

Na secção 2.1 é apresentada as diferentes eras na agricultura de maneira a demonstrar a importância da evolução da agricultura. Na secção 2.2 é explicado o conceito de IoT e a sua origem. Na secção 2.3 é introduzida a importância e a relevância de utilizar IoT, na prática da agricultura. A secção 2.4 e 2.5 explica as tecnologias e a conectividade que ambas têm entre si, por fim na secção 2.6 explica como se pode monitorizar sensores e controlar atuadores remotamente utilizando todas as tecnologias mencionadas no relatório.

2.1. Evolução da Agricultura

As práticas agrícolas antigas estavam relacionadas à produção de alimentos em áreas cultivadas para a sobrevivência humana, bem como à criação de animais, sendo denominadas de agricultura tradicional 1.0 [2]. Esta era agrícola recorria principalmente ao uso de mão de obra humana e de animais, uma prática que exigia esforço físico significativo. O uso de ferramentas simples e rudimentares, eram fundamentais para a sobrevivência das comunidades, permitindo a produção de alimentos básicos. Como o trabalho era realizado principalmente através de trabalho manual, consequentemente, a produtividade era inferior. [3]

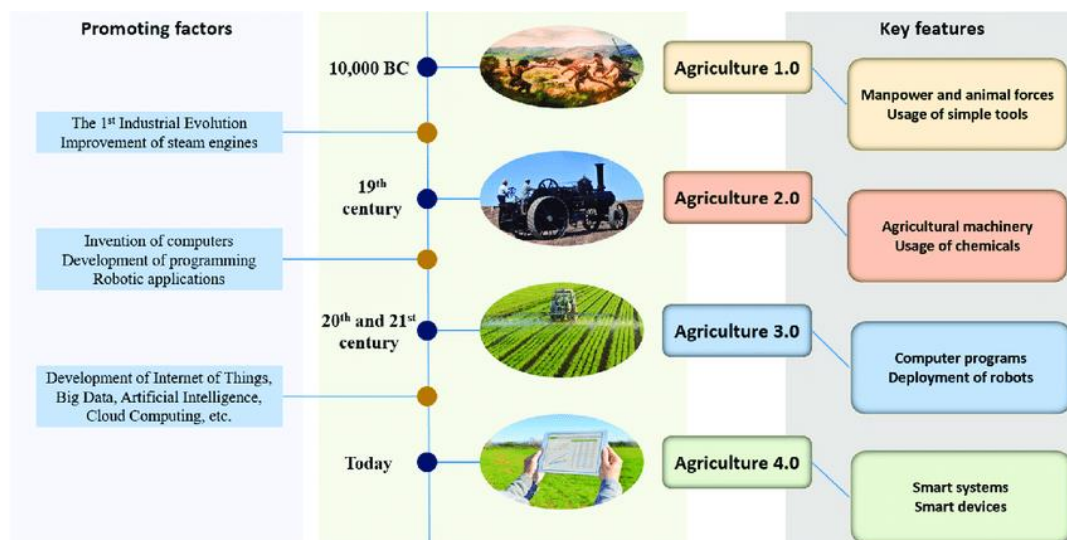


Figura 1 - Estrutura geral de um Sistema de Suporte à Decisão Agrícola para gestão de pragas. [4]

Até ao século XIX, o mundo que todos conhecemos passava por uma transformação radical com a Revolução Industrial. As máquinas a vapor foram aperfeiçoadas e começaram a ser amplamente utilizadas, proporcionando novas potências em todos os setores da vida e indústrias, incluindo a agricultura. Esta mudança marcou o início da era da Agricultura 2.0, um período em que os agricultores operavam manualmente várias máquinas agrícolas e utilizavam excessivamente químicos. A introdução de maquinaria na agricultura representou um aumento significativo na eficiência e produtividade dos trabalhos agrícolas. No entanto, este progresso substancial veio com um custo. As consequências prejudiciais incluíram contaminações químicas no campo, destruição do ambiente ecológico, consumo excessivo de energia, desperdício de recursos naturais e danos graves na saúde humana [4][5]. Este foi um período de avanços, mas também de desafios significativos em termos de sustentabilidade.

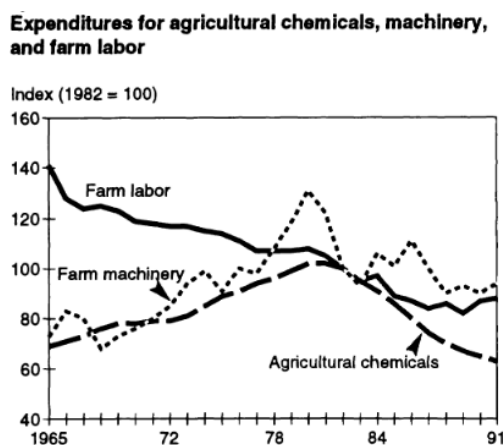


Figura 2 - Crescimento de produtos químicos agrícolas entre 1965 a 1991 nos EUA [6]

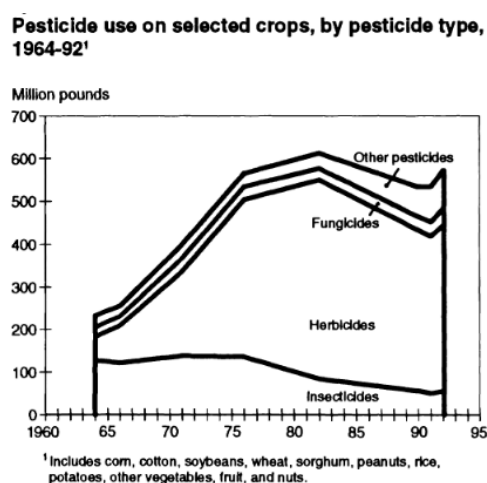


Figura 3 - Tipos e quantidades de pesticidas utilizados em plantações entre 1964 a 1992 [6]

Como podemos observar pela figura acima (Figura 2), no decorrer dos anos 1965 até 1982 existiu uma grande implementação de maquinarias na agricultura, com um enorme uso de agroquímicos (Figura 3), sendo que a partir de 1982, o uso de pesticidas sofreu um declínio em uso, devido à diminuição das áreas de cultivo que por consequência reduziu também o uso de agroquímicos [6].

A revolução tecnológica que ocorreu durante o século XX, mudou completamente o mundo, impulsionando avanços em várias áreas, incluindo a agricultura. Com esta revolução, criaram-se máquinas agrícolas mais eficientes e precisas que as previamente utilizadas, aumentando a produtividade, enquanto a inovação na biotecnologia permitiu o desenvolvimento de plantações mais sustentáveis e resistentes [7].

Com estas inovações, tornou-se muito mais fácil criar projetos voltados para o setor agrícola, visto que a adoção das tecnologias mencionadas anteriormente melhorou significativamente as operações no campo. O desenvolvimento de plataformas baseadas em sensores e redes de baixo custo permitiu a monitorização em tempo real das culturas, otimizando o uso de água, fertilizantes e outros consumos. Assim, a eficiência da produção aumentou, enquanto era reduzido os fatores de produção necessários nos processos agrícolas normais, promovendo constantemente, um sistema mais sustentável e amigo do ambiente [8][9].

Atualmente, a Internet é utilizada por cerca de 4,7 mil milhões de pessoas em todo o mundo [10] para realizar diversas tarefas, como navegar na web, enviar e receber e-mails, aceder conteúdos multimédia como, visualizar vídeos, filmes e séries, jogar e utilizar aplicações de redes sociais entre outros. Porém, existe um novo avanço relativamente ao uso da Internet, que envolve a comunicação entre dispositivos e objetos inteligentes.

A central cloud icon with the text "IOT (Internet of Things)" is connected by lines to various smart devices. The devices include a laptop, printer, refrigerator, camera, game console, smartphone, washing machine, car, security camera, microwave, and smart TV. The entire diagram is set against a blue background.

6

A origem deste conceito veio de um projeto realizado em 1982, que consistia na ligação de uma máquina de refrigerantes à internet, permitindo que se verificasse remotamente se havia ou não refrigerantes na máquina e se estavam frios [13]. Mais tarde, a expressão *Internet of Things* surgiu em 1999, cunhada por Kevin Ashton durante uma apresentação. Naquela época, a IoT foi mencionada como uma inovação com potencial para transformar o mundo, especialmente no que dizia respeito à tecnologia [14].

A IoT baseia-se na interconexão de dispositivos físicos, equipados com sensores, software e outras tecnologias, que lhes permitem comunicar e trocar dados entre si ou com sistemas centrais, através da internet. Estes dispositivos podem incluir desde eletrodomésticos a sistemas de monitorização industriais, e a capacidade de partilhar informações em tempo real é um dos seus principais benefícios. À medida que se torna progressivamente um aspeto importante da vida humana, a IoT melhora a eficiência e a conveniência, facilitando a automação e o controlo remoto.

Desde a criação de casas inteligentes, com eletrodomésticos conectados e sistemas de segurança monitorizados à distância, até cidades inteligentes, que otimizam o tráfego e a gestão de recursos, a IoT transforma como o ser humano vive e trabalha.

2.3. IoT na Agricultura

Todos os sectores, da saúde ao ambiente, da educação ao entretenimento e da indústria ao lar, adotam a revolução de IoT [16]. Como mencionado anteriormente, a agricultura tem passado por muitas mudanças e tem sido objeto de uma abundância de maquinaria para aumentar os rendimentos, prejudicando o ambiente e as cultivações devido ao uso indevido de químicos e poluição produzida por maquinaria excessiva.

Neste contexto, a área em foco na tecnologia IoT é a agricultura de precisão, que surge em resposta ao aumento da população mundial, o que consequentemente gera uma maior procura de alimentos, assim como ao impacto negativo das práticas agrícolas ineficientes no ambiente. A agricultura de precisão exige uma monitorização constante das condições do solo e do clima para permitir uma tomada de decisão mais informada e precisa.

Os sistemas de irrigação inteligente, oferecem uma solução eficiente para a gestão dos recursos hídricos e da energia utilizada para distribuir a água na agricultura, promovendo a sustentabilidade. A IoT integra sensores monitorizando em tempo real a humidade e temperatura do solo, as condições atmosféricas e outros parâmetros relevantes [17]. Estes sensores, em conjunto com atuadores e tecnologias de comunicação sem fios, automatizam o

processo de irrigação. Os dados recolhidos em tempo real permitem que o fornecimento de água seja ajustado automaticamente conforme as necessidades do solo, garantindo que a irrigação seja realizada eficientemente e no momento adequado. Desta forma, a utilização da água é otimizada, evitando o desperdício e assegurando que as culturas recebam a quantidade necessária para uma produção elevada.

As redes de sensores sem fio desempenham um papel fundamental na monitorização e controlo de fatores que afetam diretamente a produtividade das culturas e o seu crescimento. Estas redes permitem o controlo eficiente de variáveis cruciais, como a temperatura e a humidade do solo e do ar. A instalação de redes simples de sensores sem fio em toda a área agrícola permite que os componentes do sistema sejam controlados de forma mais fácil e com custos significativamente reduzidos, um benefício de extrema relevância para os agricultores.

2.4. Comunicação sem fios

A IoT abrange uma vasta gama de tecnologias, sendo as comunicações sem fios um componente essencial nesse ecossistema. Entre as tecnologias sem fios utilizadas para IoT, destacam-se várias com características distintas, cada uma apresentando benefícios e limitações específicas.

As principais vantagens das comunicações sem fios para IoT incluem a facilidade de instalação e mobilidade, eliminando a necessidade de infraestruturas físicas complexas como cablagens, permitindo uma maior flexibilidade na integração de dispositivos em diferentes ambientes. Além disso, muitas destas tecnologias oferecem uma cobertura alargada, essencial para a conectividade de dispositivos dispersos em áreas amplas.

Por outro lado, algumas desvantagens devem ser consideradas. As comunicações sem fios podem estar sujeitas a interferências, especialmente em ambientes urbanos densos ou em áreas com muitos obstáculos físicos. Adicionalmente, certas tecnologias podem apresentar limitações em termos de largura de banda e latência, podendo não ser adequado para aplicações que exijam transmissão de dados em tempo real ou com elevado volume de informação. A segurança também constitui um desafio relevante, uma vez que as redes sem fios são mais suscetíveis a ataques e intrusões, exigindo a implementação de medidas robustas de proteção.

Alguns exemplos de tecnologias de comunicação sem fios utilizadas em IoT incluem Bluetooth, BLE (Bluetooth Low Energy), ZigBee, Wi-Fi, LoRaWAN, Sigfox e 6LoWPAN, entre outras [18]. Estas tecnologias diferenciam-se, entre outros fatores, pelo seu alcance e consumo de energia.

Para comunicações de curto alcance, que normalmente se situam entre 1 a 100 metros, são frequentemente utilizadas tecnologias como o Bluetooth, BLE e ZigBee. Estas soluções são ideais para cenários onde os dispositivos estão próximos, como em ambientes domésticos ou industriais de pequena escala, oferecendo uma boa combinação de baixo consumo de energia e capacidade de transmissão de dados.

Por outro lado, para comunicações de longo alcance, que podem variar entre alguns quilómetros e até 20 quilómetros em condições ideais, utilizam-se tecnologias como LoRaWAN e Sigfox, especialmente em áreas rurais ou com baixa densidade de dispositivos. O Wi-Fi, embora seja mais comum em ambientes de curto alcance, também pode ser utilizado para distâncias intermédias, até cerca de 100 metros, dependendo da potência do sinal e da presença de obstáculos. BLE, embora tipicamente associado ao curto alcance, pode também ser utilizado em configurações de longo alcance, com alcance ampliado em certas condições específicas.

Cada uma destas tecnologias tem as suas próprias vantagens e desvantagens, o que implica que a escolha da solução mais adequada depende sempre das necessidades específicas da aplicação IoT em questão. Além de aspetos como o alcance, é também crucial considerar fatores como o consumo de energia, a capacidade de dados e a robustez da conexão. Neste sentido, para aplicações de curto alcance, como em cenários agrícolas, a ZigBee tem-se mostrado particularmente eficaz [19]. Já para comunicações de longo alcance, especialmente em áreas extensas e de baixa densidade de dispositivos, tecnologias como LoRaWAN e Sigfox são frequentemente as mais recomendadas.

A ZigBee é uma norma de comunicação sem fios baseada na especificação IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 802.15.4. Funciona em 3 bandas de frequência de rádio não licenciadas em que 2,4 GHz global com 16 canais e com uma taxa de dados de 250Kbps, 915 MHz nos Estados Unidos da América com 10 canais e com uma taxa de dados de 40Kbps e 868 MHz na Europa com 1 canal com uma taxa de dados de 20 Kbps [20]. A Zigbee foi concebida para aplicações de curto alcance e baixo consumo de energia, permitindo que os dispositivos comuniquem a distâncias de até 100 metros.

SigFox é uma Low-Power Wide-area Network (LPWAN) [21], em que opera em frequências de rádio não licenciadas, sendo que estas diferem consoante o país, variando entre 862 MHz na Europa e 902MHz na América do Norte [22]. A Sigfox permite que dispositivos IoT transmitam pequenas quantidades de dados eficientemente, permitindo dispositivos consumam pouca energia, aumentando assim a sua autonomia. O alcance dos dispositivos Sigfox é de 40 km em meios rurais e de 10 km em meios urbanos [23]. Como uma vez que é um serviço pago, os valores variam de país por país, sendo as mensagens diárias estão limitadas por 140 *uplinks* e 4 *downlinks*.

LoRaWAN é uma *Low-Power Wide-area Network* (LPWAN), na qual o nome LoRa deriva das distâncias extremamente longas que a tecnologia permite cobrir eficazmente. Desenvolvida pela *Semtech* como um padrão para LPWANs, a LoRa permite a comunicação em longas distâncias: até 5 km em áreas urbanas e até 15 km ou mais em áreas rurais. Uma característica fundamental das soluções baseadas em LoRa é o seu baixo consumo de energia. Isso permite a criação de dispositivos alimentados por baterias que podem durar até 10 anos [24]. Implementada com uma topologia em estrela, uma rede que utilize o protocolo aberto LoRaWAN é ideal para aplicações que necessitem de um alcance extenso ou de uma conectividade profunda entre diversos dispositivos com necessidades mínimas de energia e que recolham dados limitados. Esta tecnologia opera em frequências de rádio não licenciadas, sendo estas 868MHz na Europa, 433MHz na Ásia e 915MHz na América do Norte, na qual as taxas de dados varia entre 0.3kbit/s a 50kbit/s [25].

Conforme os cenários de aplicação, existem 3 classes de dispositivos LoRaWAN que podem ser utilizados [26]:

- Classe A – *Talk Before Listen* – No protocolo LoRaWAN, a Classe A é a mais básica e otimizada em termos de consumo de energia. Esta classe suporta comunicações bidirecionais, onde cada transmissão de *uplink* do dispositivo é seguida por duas breves janelas de receção de *downlink*. Os dispositivos da Classe A são configurados para despertar e transmitir quando detetam uma mudança no ambiente ou quando um evento específico é acionado. Após as duas janelas de receção, os dispositivos retornam ao modo de suspensão até a próxima transmissão de *uplink*

- Classe B – *Listen At Specific Times* - Esta representa uma extensão da Classe A, oferecendo oportunidades adicionais e regulares para um dispositivo receber downlinks da rede. Esta classe é caracterizada pela introdução de janelas de recepção adicionais, conhecidas como “*ping slots*”, sincronizadas com um sinal de *beacon* transmitido periodicamente pela rede. Os dispositivos da Classe B começam a operar no modo Classe A e podem ser comutados para o modo Classe B pelo aplicativo, ao terem sido programados com uma pilha de Classe B durante a fabricação. A transição para a Classe B permite que os dispositivos recebam downlinks em horários previsíveis, além das janelas de recepção que se abrem após cada transmissão de *uplink* no estilo da Classe A. Para que os *ping slots* funcionem corretamente, o dispositivo deve receber periodicamente um dos *beacons* da rede para alinhar o seu relógio interno com o da rede. Com base na referência de tempo do *beacon*, os dispositivos podem abrir os *ping slots* em intervalos regulares. Qualquer um desses *ping slots* pode ser usado pela infraestrutura da rede para iniciar uma comunicação de *downlink*.
- Classe C – *Listen Continuously* - Os dispositivos da Classe C têm janelas de recepção que estão quase sempre abertas, fechando apenas quando o dispositivo transmite. Esta característica permite que os dispositivos da Classe C recebam comunicações do servidor a qualquer momento, proporcionando uma baixa latência entre todas as classes de dispositivo [27].

Para gerir as redes LoRaWAN é necessário recorrer a servidores de *network*. Estes são responsáveis pela gestão dos *gateways* LoRaWAN, pela autorização dos sensores e pela troca de dados (*uplink*, *downlink*) entre sensores e aplicações. Existindo uma grande variedade de servidores de *network* como, por exemplo, *Everynet*, *ThingPark – Actility*, *LORIoT – Hybrid Network Management System for Massive IoT*, entre outros, porém o grande foco vai para o *The Things Network* (TTN), visto que este é gratuito e com acesso total a todos. Este servidor implementa uma rede privada para que todos os utilizadores tenham a sua própria infraestrutura de rede dedicada, oferecendo mais segurança, personalização e controlo [28].

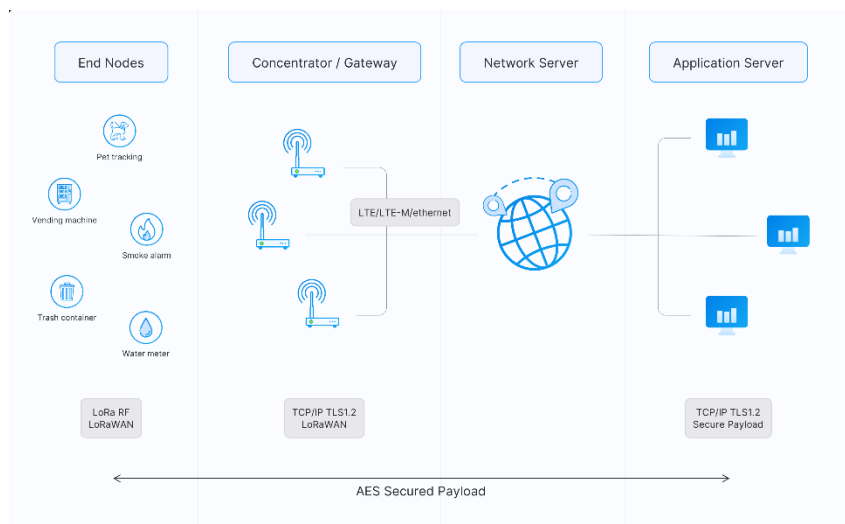


Figura 5 - Arquitetura LoRaWAN [29]

Como se pode observar na figura 5, é ilustrado a arquitetura de comunicação típica numa rede LoRaWAN, composta por nós finais (*End Nodes*), *concentrators /gateways*, um servidor de rede (*Network Server*) e servidores de aplicação (*Application Servers*). A comunicação nesta rede segue diversas etapas interligadas. Os nós finais representam os dispositivos IoT, como medidores de água, alarmes de fumo e máquinas de venda automática, que utilizam a tecnologia LoRa RF para transmitir dados. Estes dispositivos enviam as suas informações para o *gateway*, que atua como intermediário, recebendo os dados e transmitindo-os para o servidor de rede utilizando protocolos como TCP/IP (*Transmission Control Protocol/ Internet Protocol*) e TLS (*Transport Layer Security*) 1.2, ou redes como LTE (*Long Term Evolution*), LTE-M (*Long Term Evolution for Machines*) ou Ethernet. O servidor de rede desempenha um papel crucial ao gerir os *gateways* e as mensagens trocadas entre os sensores e as aplicações. Ele assegura o processamento dos dados como mencionado anteriormente, além de garantir a segurança através da encriptação com AES. Essa camada de segurança mantém a integridade e confidencialidade dos dados ao longo de todo o processo de comunicação. Por fim, os dados chegam aos servidores de aplicação, onde são interpretados e processados para gerar informações úteis, exibidas em interfaces adequadas para a tomada de decisões. A comunicação entre o servidor de rede e os servidores de aplicação é igualmente protegida por protocolos de segurança como o TLS 1.2.

2.5. Microcontroladores

Para a realização das aplicações mencionadas anteriormente, é necessária uma plataforma de computação, como um microcontrolador, pois estes são componentes fundamentais em sistemas IoT. Estes são dispositivos que auxiliam na realização de tarefas, recolha de dados, comunicação entre sensores e controlo. Um Microcontrolador é um circuito integrado compacto concebido para gerir uma operação específica num sistema incorporado. Um microcontrolador típico possui um processador, memória e GPIOs (*General Purpose Input Output*) programáveis num só chip. Estes podem ser encontrados em várias aplicações como, por exemplo, robótica, automação, dispositivos médicos entre outros.

Como mencionado anteriormente, como os microcontroladores são programáveis, estes podem ser customizados para realizar diferentes tarefas. As linguagens de programação utilizadas para programar microcontroladores incluem C, C++, e Python, cada uma oferecendo diferentes níveis de controlo e facilidade de uso. Além disso, é comum que os microcontroladores venham equipados com módulos de conectividade, como Bluetooth e Wi-Fi, facilitando a integração em sistemas de IoT e outras aplicações que requerem comunicação sem fios.



Figura 6 - JacobsParts ESP8266 Wifi [30]

Tabela 1 - Comparação entre Microcontroladores

Especificações	ESPRESSIF ESP32S3	Heltec WiFi LoRa 32 V2	NodeMCU V3 ESP8266
MCU	Xtensa® 32-bit LX7 dual-core	ESP32 (dual-core 32-bit MCU + ULP core)	Tensilica 32-bit RISC CPU Xtensa LX106
Wi-Fi	802.11 b/g/n	802.11 b/g/n	802.11 b/g/n
Bluetooth	V5.0 LE	V4.2 BR/EDR e Bluetooth LE	Não suportado
Frequência CPU	240 MHz	240 MHz	80 MHz a 160 MHz
SRAM	512 KB	520 KB	64 KB
Flash	16 MB	8 MB	4 MB
GPIO	45 pins	21 pins	16 pins
Buses	I2C, SPI, UART, I2S	I2C, SPI, UART	I2C, SPI, UART

A integração de microcontroladores com placas Wi-Fi e a tecnologia LoRaWAN representa uma combinação poderosa no campo das aplicações de IoT. A tecnologia LoRaWAN, conhecida por seu alcance de longa distância e eficiência energética, é perfeitamente adequada para aplicações que exigem comunicação sem fio em grandes áreas ou locais de difícil acesso. No entanto, a taxa de dados do LoRaWAN é limitada, tornando a placa Wi-Fi uma adição valiosa. A tecnologia Wi-Fi permite altas taxas de dados, essenciais para aplicações que requerem transmissão de dados em tempo real. Além disso, a placa Wi-Fi inserido em um microcontrolador facilita a conectividade com a internet, permitindo uma fácil integração com a nuvem e outros serviços online. Portanto, a combinação de microcontroladores com placa Wi-Fi e LoRaWAN abre caminho para a criação de soluções de IoT robustas, flexíveis e eficientes. No entanto, é necessário acrescentar um protocolo, o MQTT (Message Queuing Telemetry Transport).

O MQTT é um protocolo de mensagens baseado em padrões, ou conjuntos de regras, utilizados para comunicação entre dispositivos. Este protocolo, que funciona sobre TCP/IP, baseia-se num modelo de publicação/assinatura bidirecional, que facilita a recolha e transmissão de dados em que define clientes e agentes, garantindo uma comunicação sem perdas. O Cliente MQTT é um software servidor para microcontroladores que utiliza uma

biblioteca MQTT. Este cliente consegue publicar informações em tópicos e também subscrever tópicos para receber informações. A flexibilidade do cliente MQTT permite que seja utilizado numa ampla gama de aplicações IoT, desde a recolha de dados ambientais até ao controlo remoto de dispositivos.

Por outro lado, o agente MQTT, também conhecido como broker, é responsável por receber e encaminhar as mensagens para os clientes subscritos nos tópicos correspondentes. Atua como um intermediário que garante a entrega eficiente e segura das mensagens entre os dispositivos conectados. O agente MQTT gere todas as conexões, mantém o estado das subscrições e assegura que as mensagens sejam entregues aos destinatários apropriados. Esta arquitetura descentralizada e eficiente faz do MQTT uma escolha popular para sistemas IoT que exigem comunicação em tempo real e fiável [31].

A implementação desta tecnologia em LoRaWAN pode ser utilizada por meios do servidor TTN de maneira que consiga enviar informação de dados recebidos dos dispositivos via LoRa.

2.6. Node-RED

O Node-RED, uma plataforma *open-source* baseada em JavaScript, construída em Node.js e desenvolvida pela IBM. O Node-RED facilita a integração entre dispositivos IoT, APIs (*Application Programming Interface*) [35] e serviços online [33]. O sistema utiliza nós representados por ícones intuitivos e opera de duas formas: através do sistema *drag-and-drop* para a ligação entre nós (Figura 7) ou pela importação de código JavaScript. Com grande flexibilidade, o Node-RED permite aos utilizadores criar fluxos complexos com facilidade, além de suportar uma ampla gama de protocolos e serviços, tornando-o uma solução versátil para diversos cenários de IoT.

A interface intuitiva do Node-RED permite a rápida prototipagem e desenvolvimento, reduzindo significativamente o tempo necessário para implementar soluções funcionais. Além disso, a sua robusta comunidade e a vasta biblioteca de nós contribuem para a constante melhoria e atualização da ferramenta, garantindo que os utilizadores tenham acesso às mais recentes inovações e melhores práticas na integração de dispositivos e serviços.

O Node-RED conta com centenas de bibliotecas, organizados em várias categorias, permitindo aos utilizadores uma flexibilidade significativa na construção de fluxos complexos de informação. O número de nós disponíveis pode variar consoante a versão do Node-RED e as contribuições feitas pela comunidade, que continua a expandir a biblioteca de nós através de módulos adicionais. Estes desempenham funções específicas e estão agrupados em várias categorias, tais como:

- **Funções** – Incluem nós que permitem manipular e transformar dados, como *delay* (para introduzir atrasos), *switch* (para definir condições), *change* (para modificar mensagens), *trigger* (para criar eventos temporizados) e *json* (para manipulação de dados em formato JSON);
- **Base de Dados** – Facilitam a integração com diferentes sistemas de armazenamento de dados, como *fileaccess*, *mongodb* e *mysql*.
- **Input/Output** – englobam nós que permitem a comunicação entre dispositivos e serviços, como *TCP* (*Transmission Control Protocol*) e *UDP* (*User Datagram Protocol*) para comunicação em rede, *HTTP* (*HyperText Transfer Protocol*) para interação com serviços web, *inject* (para inserir dados manualmente nos fluxos), *debug* (para monitorizar e depurar fluxos) e *notify* (para enviar notificações).

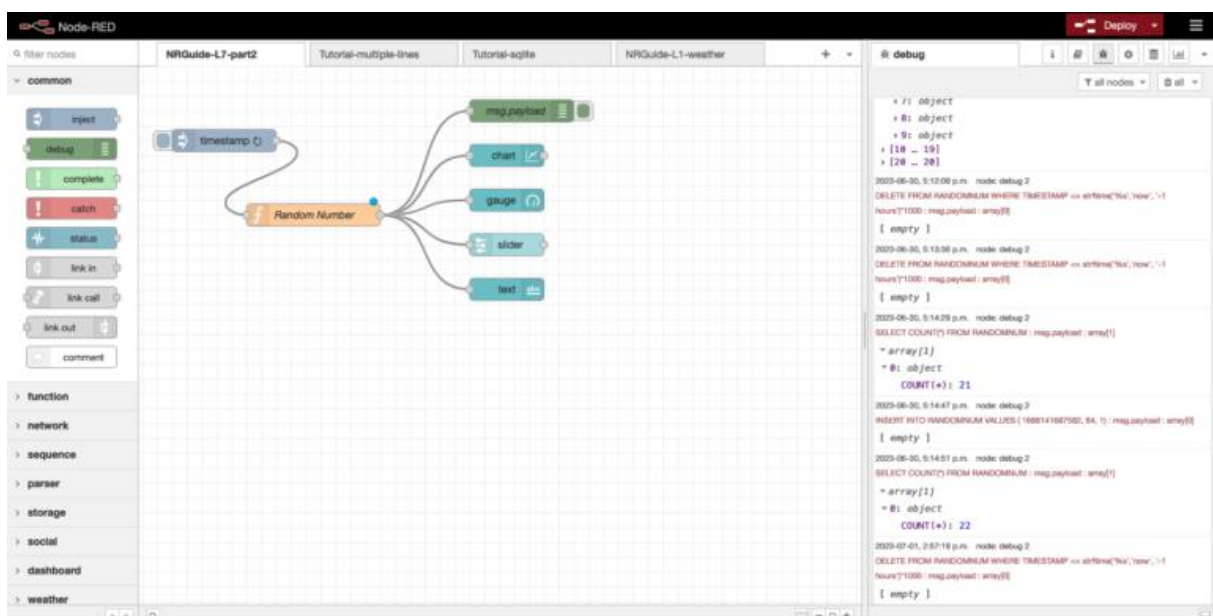


Figura 7 - User Interface do Node-RED [33]

CAPÍTULO 3

Descrição Funcional

Este capítulo apresenta uma descrição detalhada do desenvolvimento da dissertação, começando pela descrição detalhada dos sensores utilizados, da *gateway*, dos protocolos de comunicação e o software.

Na secção 2.1 é apresentado os sensores utilizados no sistema, com a informação técnica de cada sensor e por fim um diagrama do sistema com os sensores colocados. Na secção 2.2 é demonstrado os protocolos de comunicação utilizados entre os sensores sendo demonstrado como a informação é enviada do microcontrolador para o Node-RED. Por fim, na secção 2.3 é apresentado a estrutura do software, explicando cada página e como os dados adquiridos pelos sensores são transformados em informação útil para o utilizador.

3.1. Hardware

O sistema proposto inclui vários nós de sensores energeticamente eficientes que medem parâmetros agrícolas essenciais, como a humidade e a temperatura do ar, a humidade e a temperatura do solo e um módulo GPS. Estes parâmetros são cruciais para otimizar o crescimento e a qualidade das culturas [36].

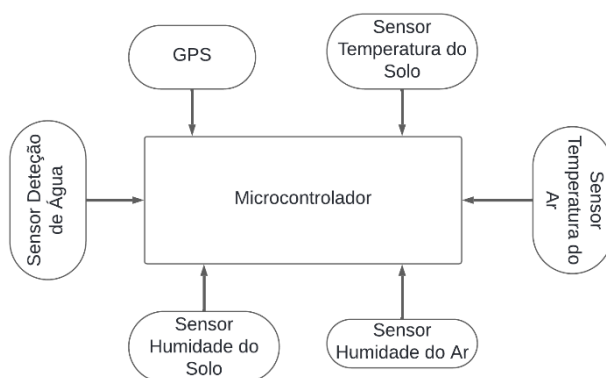


Figura 8 - Diagrama de Blocos do nó de LoRa

Na Figura 8, é apresentado um diagrama de blocos que ilustra a arquitetura do sistema proposto.

Foram realizadas as seguintes escolhas de sensores conforme os requisitos para o desenvolvimento do sistema:

- A placa de desenvolvimento selecionada para a configuração de parâmetros específicos dos sensores foi a Heltec WiFi LoRa 32 V2 (Figura 9). Esta placa está equipada com um chip integrado LoRa SX1276, portas de antena LoRa, ESP32, um ecrã OLED e um sistema de integração de bateria com uma tomada que permite a ligação de uma bateria externa [37]. A placa também possui conectividade Bluetooth, tem o certificado CE e apresenta um design de baixo consumo de energia com corrente de *sleep* de $\leq 800\mu A$, tornando-a ideal para este sistema.

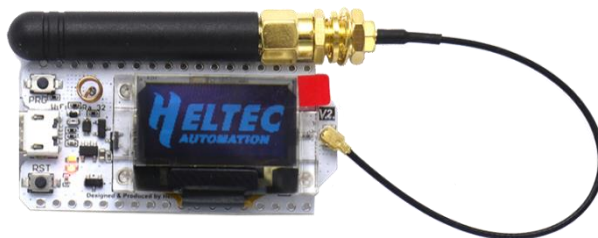


Figura 9 - Heltec WiFi LoRa 32 V2 [38]

- Para as medições da humidade e temperatura do ar, foi utilizado o sensor CM2302/DHT22 da Velleman (Figura 10). Este sensor digital oferece uma precisão típica de humidade relativa (HR) de $\pm 2\%$ HR, medindo de 0% a 99,9% HR com um tempo de resposta de 5 segundos. Além disso, o sensor apresenta uma precisão de temperatura de $\pm 0,5^{\circ}C$ numa gama de temperaturas de $-40^{\circ}C$ a $80^{\circ}C$. O sensor possui uma ligação de um só fio, facilitando uma integração direta. Funciona com uma tensão de alimentação de 3,3 a 5,5 VCC, com uma corrente máxima de alimentação de 1,5 mA [39].

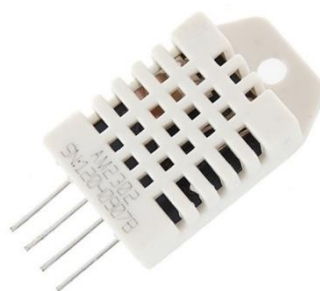


Figura 10 - Velleman DHT22 [40]

- DS18B20 da *Shelly* (Figura 11) foi utilizado com o objetivo de medir a temperatura do solo. O sensor de temperatura oferece uma exatidão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e fornece leituras até 12 bits, que podem ser configuradas. O sensor funciona numa gama de tensões de 3 a 5,5V, permitindo assim a medição de temperaturas entre -55°C e $+125^{\circ}\text{C}$. O sensor demonstra uma precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ entre as temperaturas de -10°C e $+85^{\circ}\text{C}$. Além disso, o sensor tem presente uma ponta de aço inoxidável resistente [41].



Figura 11 - Shelly DS18B20 [42]

- O sensor de humidade capacitivo da M5Stack (Figura 12) foi selecionado com base na sua relação custo-benefício e na bomba integrada, que facilita a irrigação no campo. O sensor funciona numa gama de tensão de 3,3 a 5,5 VDC, com uma tensão de saída de 0 a 3,0 VDC. Tem uma corrente de funcionamento de 5mA e utiliza uma interface PH2.0-3P. As dimensões do sensor são 192,5 x 24 x 33 mm [43].



Figura 12 - Moisture Sensor and Pump [44]

- O sensor de nível de água é um módulo de 3 pinos da Velleman (Figura 13), que emite um sinal analógico de 0 a 500 lido no ADC, que indica a profundidade aproximada de submersão da água. O sensor pode emitir também um sinal digital que indica a presença de água. O sensor funciona com uma tensão de +5V e um consumo de corrente inferior a 20mA. A área de detecção de água do sensor mede 40 mm x 16 mm e possui orifícios de montagem com um tamanho adequado para 0,12 polegadas (3 mm). O sensor foi concebido para funcionar num intervalo de temperatura de -30°C a 50°C [45].



Figura 13 - Sensor de Nivel de Água [46]

- O módulo GPS AT6558 + MAX2659 da M5Stack (Figura 14) foi integrado neste sistema, devido à necessidade de determinar a geolocalização precisa do nó de sensores. Esta informação é crucial para que o sistema poder identificar quais as culturas mais adequadas a serem cultivadas, conforme a localização geográfica. O sensor oferece uma precisão de posicionamento de 2,5 metros e suporta 56 canais. O sensor oferece uma frequência de atualização de posicionamento de 1-10 Hz e consegue funcionar a uma altura máxima de 1800 metros, a uma velocidade de 515 m/s e a uma aceleração de ≤ 4 g. O sensor apresenta uma sensibilidade de -162 dBm para seguimento, -148 dBm para captura e -146 dBm para arranque a frio. A gama de temperaturas de funcionamento é de -40°C a 85°C, com um peso líquido de 13 g e dimensões de 48 x 24 x 8 mm [47].



Figura 14 - M5Stack GPS [48]

- O The Things Indoor Gateway (TTIG) (Figura 15) é um gateway LoRaWAN de baixo custo com um ESP8266 incorporado. Possui 8 canais baseados no SX1308, com suporte de múltiplos padrões de frequência como EU868, US915 e AU915. Esta gateway tem um design compacto, com uma antena omnidirecional e de fácil configuração, sendo necessário ter ligação à internet para comunicar com o servidor [48].



Figura 15 - The Things Indoor Gateway [49]

O diagrama do sistema que inclui todos os componentes necessários são ilustrados na Figura 16.

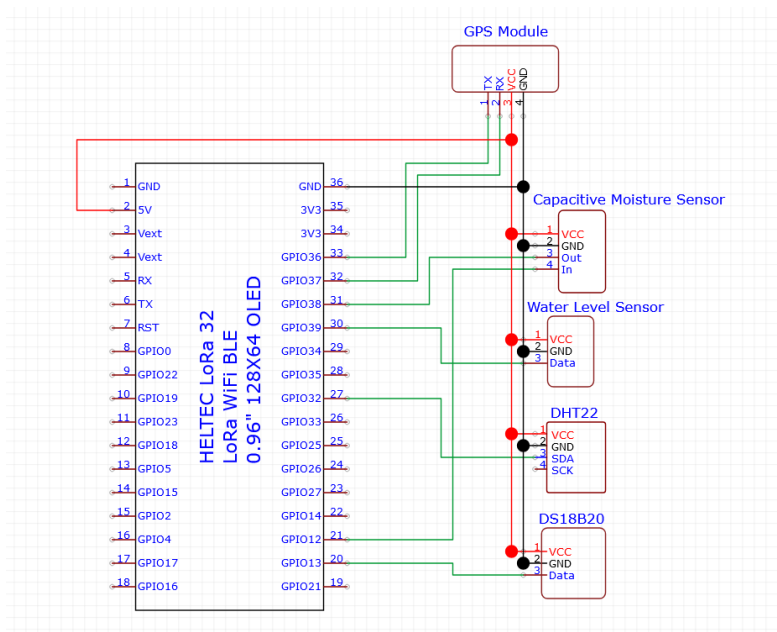


Figura 16 – Diagrama de blocos do nó LoRa

E o protótipo do sistema com todos os componentes inseridos numa *breadboard* é ilustrado na Figura 17.

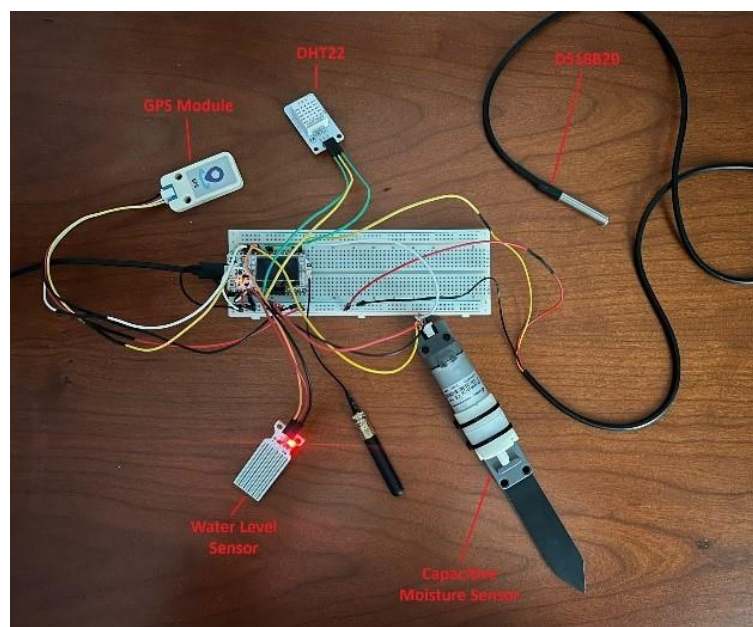


Figura 17 - Protótipo do nó LoRa

3.2. Protocolos de Comunicação

De maneira a conseguir fazer a transmissão dos dados do nó de sensores mencionado anteriormente para a ferramenta visual Node-RED, foi implementada uma arquitetura de comunicação utilizando o protocolo MQTT sobre a tecnologia LoRa. (Figura 18).

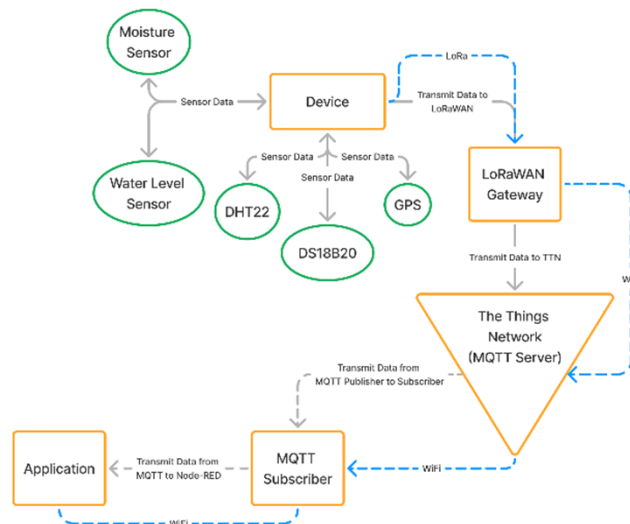


Figura 18 - Flowchart do Sistema

Os dados recebidos pelos sensores são processados pelo microcontrolador e enviados posteriormente para a rede LoRa (Figura 19), onde são transmitidos para uma *gateway* LoRaWAN.

```
void send_lorawan_payload()
{
    int moisture = analogRead(sensorPin);
    float t = dht.readTemperature();
    float h = dht.readHumidity();
    int tempsolo = analogRead(sensorPin);
```

Figura 19 – Exemplo de Código enviado para a rede LoRa

A *gateway* LoRa encaminha as informações recolhidas pelos sensores para a TTN via WiFi, que funciona como um servidor MQTT. No TTN, é configurado um *uplink payload formatter* (Figura 20), responsável por converter a informação dos sensores em tópicos MQTT. Esses tópicos podem, então, ser facilmente integrados no Node-RED. Através de um nó MQTT, é possível subscrever e receber os dados publicados, permitindo a sua visualização no Node-RED.

```

1 function decodeUplink(input) {
2   let payload = String.fromCharCode(...input.bytes).split(',');
3   return {
4     data: {
5       percenthumidade: parseInt(payload[0]),
6       water: parseInt(payload[1]),
7       temp: parseFloat(payload[2]),
8       hum: parseInt(payload[3]),
9       GPSDistrict: (payload[4]),
10      GPSCancelho: (payload[5]),
11      moisture: parseFloat(payload[6]),
12    },
13    warnings: [],
14    errors: []
15  };
16 }

```

Figura 20 - uplink payload formatter

3.3. Software

Como mencionado anteriormente, a ferramenta de software visual Node RED foi utilizada na execução desta dissertação como, meio de visualização de toda a informação captada pelos sensores, e ajuda na plantação ao utilizador final.

A aplicação está dividida em cinco partes: a página inicial, uma *dashboard* para visualização em tempo real dos sensores, uma página que indica o que pode ser plantado na região consoante a localização do sistema e o que pode ser plantado de momento conforme as informações dos sensores, uma página de meteorologia e por fim uma página de ajuda onde tem as informações técnicas de cada plantação suportada pelo sistema.

A página inicial apresenta quatro botões que levam às páginas referidas, como pode ser observado na figura 21.



Figura 21 - Página Inicial da SOLAR-IoT

A página de *dashboard* serve com o propósito de exibir toda a informação captada em tempo real pelos sensores, com o histórico de informação de cada sensor. Os valores dos dados para poderem ser ilustrados na aplicação, são guardados numa base de dados MySQL, em que foi criado uma tabela que guarda os registos dos sensores (Figura 22)

```
CREATE TABLE SensorValues (
    P_Id INT AUTO_INCREMENT PRIMARY KEY,
    A_Time DATETIME,
    tese_percenthumidade INT,
    tese_temp FLOAT,
    tese_hum FLOAT,
    tese_water INT,
    tese_soiltemp FLOAT,
    tese_gpslat FLOAT,
    tese_gpslong FLOAT
);
```

Figura 22 - Criação da tabela em MySQL

A página também exibe um calendário que guarda a informação média captada pelos sensores nos dias em que o dispositivo está ativo, em que existe também a opção de fazer uma transferência das informações para um ficheiro local em formato .csv (Figura 23).



Figura 23 – Dashboard com a Informação dos Sensores

Na página de recomendação de plantação, é também possível ser visualizada a informação dos sensores em tempo real e localização onde o dispositivo está, de maneira a prevenir que o utilizador volte à página *dashboard* para consultar esta mesma informação. É possível ser observado também o que pode ser plantado consoante a localização do dispositivo e o que pode ser plantado de momento (Figura 24).

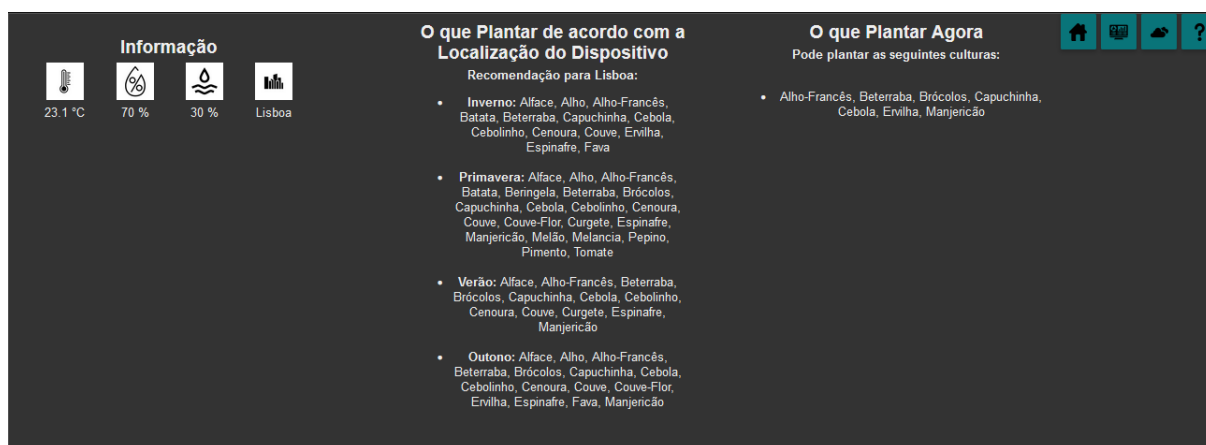


Figura 24 - Página de Recomendação de plantação

Os dados adquiridos da recomendação da localização onde as plantações podem ser plantadas, foram retiradas de um website português chamado “hortas biológicas”, que fornece um calendário regional das plantações em Portugal [50]. Este calendário divide Portugal Continental em 4 zonas, em que cada zona têm um certo número de distritos (Figura 25).

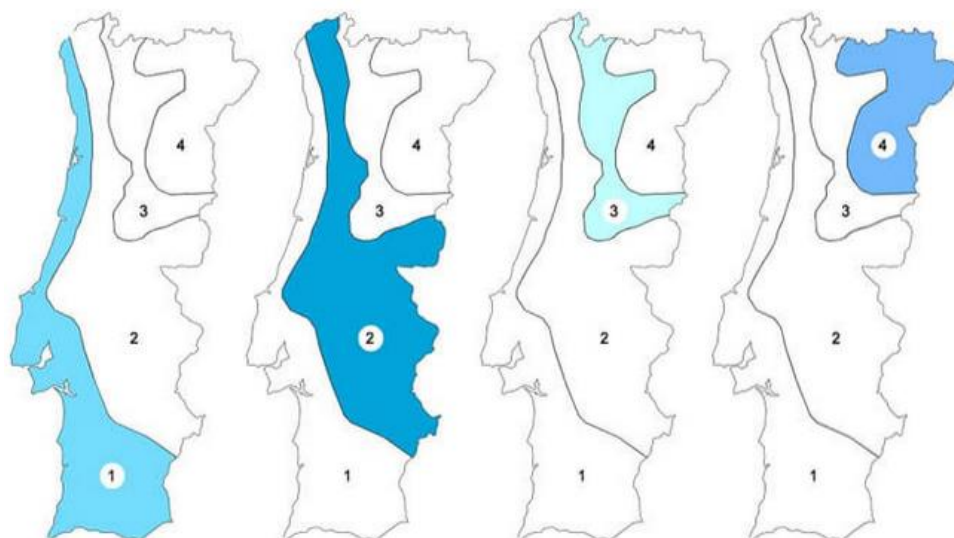


Figura 25 - Divisão de Portugal Continental em Zonas [50]

O calendário classifica a Zona 1 como regiões que abrangem muito áreas costeiras como zonas interiores, principalmente a sul. O clima dominante é de influência marítima, com invernos moderados, sendo mais amenos e curtos nas áreas do Sul, enquanto os verões variam entre frescos no norte e centro, e mais quentes, secos e prolongados no sul. O ambiente é geralmente húmido, com uma baixa amplitude térmica ao longo do ano. A significativa quantidade de dias de sol favorece ciclos de produção agrícola mais longos, graças à estabilidade das temperaturas e à exposição solar constante, sendo os distritos abrangidos: faixa costeira de Viana do Castelo, Braga, Porto, Aveiro, Coimbra e Leiria; Lisboa; Santarém; Setúbal; Beja; Faro.

Na zona 2, abrange distritos que apresentem um clima temperado, mas com notáveis influências continentais que podem provocar extremos, como verões muito quentes e secos no sul, e invernos rigorosos, especialmente no centro e norte, onde o frio pode surgir já em dezembro. Durante o inverno, algumas áreas podem sofrer com nevoeiro persistente, o que pode afetar o desenvolvimento de plantas agrícolas. No Norte, é comum a ocorrência de chuvas intensas, particularmente no outono e inverno, enquanto no Sul a precipitação tende a ser mais irregular e escassa [51]. O risco de geadas persiste até meados de abril, fator importante a considerar no planeamento das sementeiras e transplantes das culturas de verão, sendo os distritos abrangidos: zona interior de Viana do Castelo, Braga, Porto, Aveiro, Coimbra e Leiria; Viseu; Santarém; Castelo Branco; Portalegre; Évora; Beja.

As regiões na zona 3, apesar de serem regiões mais interiores, ainda se sente alguma influência marítima. No entanto, é aconselhável ter especial cautela durante os meses mais frios. Embora os invernos não sejam geralmente rigorosos, entre o final de novembro e meados de fevereiro podem ocorrer geadas ligeiras, por vezes persistentes, que podem encurtar o ciclo de produção de algumas culturas. A região também regista precipitações abundantes, sobretudo no outono e inverno, enquanto os verões tendem a ser relativamente frescos, sendo os distritos abrangidos: Vila Real; Viseu; Coimbra; Castelo Branco.

Por fim a zona 4 destaca-se por uma grande amplitude térmica anual, com verões muito quentes e invernos longos e frios. A precipitação é menos abundante em comparação com as zonas costeiras. Algumas áreas situam-se entre os 600 e 700 metros de altitude, encurtando o período de produção agrícola. Para estas condições, é recomendável optar por variedades autóctones adaptadas ao bioclima local, sendo os distritos abrangidos: Guarda; Bragança.

As culturas demonstradas no espaço “O que Plantar Agora” são determinadas com base na combinação de vários fatores ambientais, incluindo a temperatura atual do solo, a humidade do solo adquiridos pelos sensores. Foi implementada uma condição no sistema que verifica se

os dados dos sensores estão nos intervalos adequados para cada cultura. Quando essa condição é cumprida, o sistema indica quais as culturas mais apropriadas para serem plantadas, com base nas condições registradas e nas informações do website mencionado anteriormente. Foram colocadas as seguintes variáveis, para as plantações:

Tabela 2 - Variáveis de cada Cultura

Culturas	Temperatura do Solo (°C)	Temperatura do Ar (°C)	Humidade do Solo (%)	Humidade do Ar (%)
Alface [52]	13 – 15	15 - 20	70 – 80	50 – 70
Alho [53]	10 – 20	13 - 25	60 – 70	50 – 70
Alho-Francês [54]	12 – 23	12 – 23	60 – 70	50 – 70
Batata [55]	15 – 20	18 – 22	60 – 80	50 – 70
Beringela [56]	20 – 30	20 – 30	60 – 70	60 – 70
Beterraba [57]	10 – 25	10 – 20	60 – 70	50 – 70
Brócolos [58]	15 – 24	18 – 24	60 – 70	50 – 70
Capuchinha [59]	10 – 25	12 – 30	60 – 70	50 – 70
Cebola [60][61]	20 – 25	13 – 28	60 – 70	50 – 70
Cebolinho [62][63]	15 - 20	10 – 25	60 – 70	50 – 70
Cenoura [64][65]	15 – 20	16 – 22	60 – 70	50 – 70
Couve [66][67]	15 – 21	15 – 20	60 – 70	50 – 70
Couve-Flor [68][69]	15 – 20	15 – 20	60 – 70	50 – 70
Curgete [70]	16 - 25	16 – 25	60 – 70	65 – 80
Ervilha [71][72][73]	16 – 25	16 – 25	60 – 70	65 – 80
Espinafre [74][75]	10 – 20	10 – 20	60 – 70	40 – 70
Fava [76][77]	10 – 20	10 – 20	60 – 80	65 – 75

Feijão [78][79][80]	15 – 20	18 – 25	50 – 80	60 – 70
Manjeriço [81][82]	>18	18 – 30	40 – 60	40 – 60
Melão [83][84]	18 – 35	25 – 32	30 – 50	20 – 50
Melancia [85][86]	20 – 34	20 – 34	30 – 50	20 – 50
Morangos [87][88][89]	13 – 26	13 – 26	60 – 80	60 – 80
Pepino [90][91][92][93]	22 – 31	20 – 25	60 – 80	55 – 75
Pimento [94][95]	21 – 25	18 – 30	60 – 70	50 – 70
Tomate [96][97][98]	15 – 25	21 - 26	60 – 70	50 – 70

Com base nos requisitos específicos de cada cultura, o sistema foi configurado para garantir uma irrigação eficiente e precisa, com um caudal de 0,6 L/min. O microcontrolador, o receber os dados do sensor de humidade do solo, é programado para acionar a bomba de água sempre que os níveis de humidade desçam abaixo dos 30%. Uma vez ativada, a bomba permanece em funcionamento até que a humidade atinja o valor desejado de 50%, garantindo que o solo receba a quantidade adequada de água. Esta abordagem não só assegura a otimização do uso de recursos hídricos, como também promove o crescimento saudável das plantas, ao evitar tanto a subirrigação como o excesso de água.

Na página de meteorologia é presente uma previsão de temperatura máxima e mínima, a velocidade e direção do vento, a humidade na região e também as horas onde o sol nasce e se põe no dia e também a previsão para os próximos 7 dias do local (Figura 26)

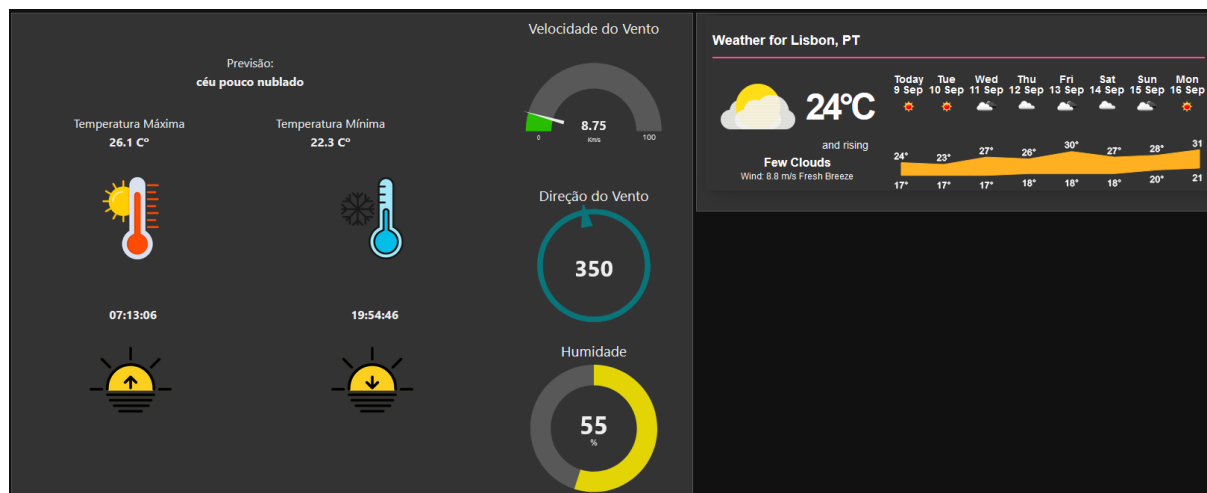


Figura 26 - Página de Meteorologia

Toda a informação presente é retirada de um website que disponibiliza dados meteorológicos em tempo real, o *OpenWeatherMap* [99]. Este serviço é amplamente utilizado por fornecer uma vasta gama de informações sobre condições atmosféricas, como temperatura, humidade, velocidade do vento, precipitação, e previsões futuras, entre outros parâmetros, provenientes de múltiplas fontes, incluindo estações meteorológicas, dados de satélite e modelos de previsão.

Para finalizar a aplicação, é disponibilizado ao utilizador uma página de ajuda onde o utilizador pode obter orientações detalhadas sobre o cultivo das culturas apresentadas. (Figura 27)



Figura 27 - Página de Ajuda

Ao clicar numa das imagens de culturas disponíveis, o utilizador tem acesso a informações específicas sobre como proceder ao plantio dessa cultura. São fornecidas informações sobre o tipo de solo adequado, a quantidade de luz necessária, o espaçamento recomendado entre as plantas, e a preparação ideal do solo. Além disso, são disponibilizados dados técnicos, como a temperatura ideal do solo e do ar, e a percentagem de humidade adequadas para o solo e para o ar. As informações dadas auxiliam o utilizador mais inexperiente a começar a preparar o terreno e a poder perceber melhor os cuidados a ter com as culturas.



Figura 28 - Informação ao Selecionar Alface

Ensaio e Resultados

4.1. Validação do Sistema

Para avaliar a funcionalidade do dispositivo, foi executado um teste num pequeno jardim na Charneca, Lisboa, com as coordenadas 38°92'02 "N, -9°21'49.1" W durante os meses de verão (julho de 2024). O clima desta região caracteriza-se por uma nítida mudança de temperatura entre a manhã e a tarde, sendo a primeira relativamente fresca e a segunda muito quente. A Figura 29 apresenta uma descrição pormenorizada da hora e do local dos ensaios.

Tempo	Manhã	[08:31 - 08:40]
	Meio-Dia	[12:21 -12:30]
	Tarde	[17:10 - 17:20]
Coordenadas		38°92'02"N -9°21'49.1" W

Figura 29 - Horário dos Ensaio

O objetivo principal da validação do sistema era recolher dados em três momentos distintos do dia: manhã, início da tarde e final da tarde. Para assegurar a qualidade dos dados e a estabilização dos sensores, estes foram colocados e operados durante um período de aproximadamente dez minutos. Este tempo permitiu que todos os sensores atingissem um estado de equilíbrio e fornecessem leituras confiáveis. O intervalo de transmissão de dados foi definido em 1 minuto, garantindo a conformidade com a política de utilização justa do TTN [100].

A análise focou-se inicialmente no parâmetro da humidade relativa do ar (HR), que exibiu uma variação significativa ao longo do dia (Figura 30). No início da manhã, os níveis de HR começaram em valores elevados, próximos dos 70%, atingindo posteriormente um pico de aproximadamente 85%. Após este ponto máximo, verificou-se um decréscimo gradual, com os valores a descenderem até 30-35% ao meio-dia. À medida que a tarde avançava, os níveis de HR voltaram a subir, estabilizando entre os 50 e 55% no final da tarde.

Contudo, a humidade do solo apresentou um comportamento distinto e mais consistente ao longo do dia. As medições iniciais indicaram cerca de 15% no início da manhã, com um ligeiro aumento para aproximadamente 20% à medida que o dia avançava. Por volta do meio-dia, a humidade do solo manteve-se relativamente estável, com pequenas flutuações entre os

10% e os 15%. No entanto, no final da tarde, foi observada uma subida acentuada, com os níveis de humidade do solo a atingirem valores entre 20% e 25%.

Este aumento gradual no final do dia demonstra a capacidade do solo em reter humidade, mesmo perante variações consideráveis na humidade relativa do ar.

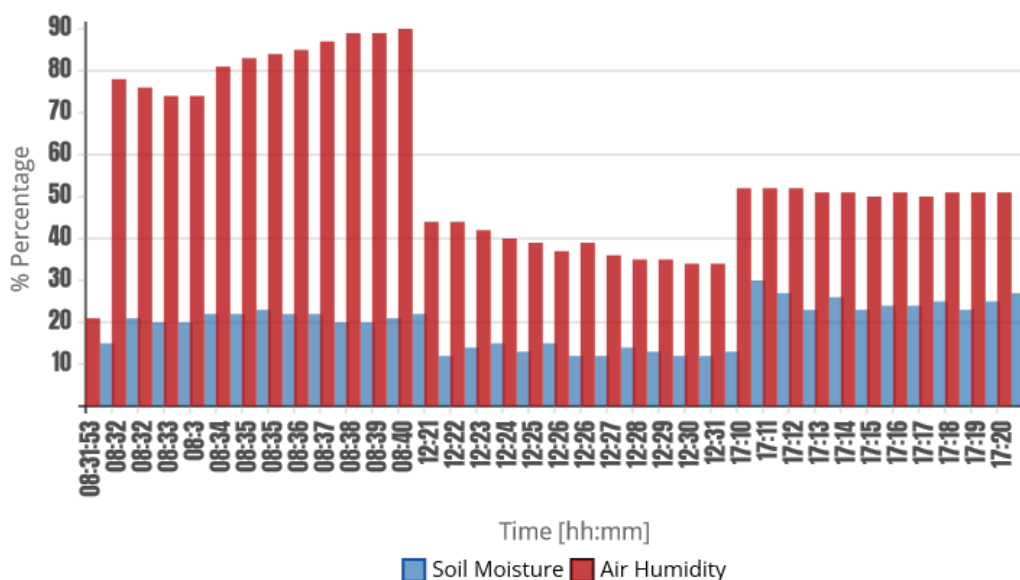


Figura 30 - Variação da Humidade do Ar e Solo durante as Diferentes Fases do Dia

Tabela 3 - Registos de Valores de Humidade

Resultados	Valores
Percentagem Máxima Registada – Humidade do Ar	90%
Percentagem Mínima Registada – Humidade do Ar	34%
Percentagem Máxima Registada – Humidade do Solo	30%
Percentagem Mínima Registada – Humidade do Solo	12%
Média - Humidade do Ar	57.5%
Média - Humidade do Solo	19.6%

A segunda e última análise focou-se na medição da temperatura do ar e do solo. A análise comparativa destes dois parâmetros ao longo do dia, conforme ilustrado na Figura 31, permite compreender as diferenças significativas nos seus comportamentos ao longo de um ciclo diário. A temperatura do ar apresentou flutuações mais marcantes, iniciando-se com aproximadamente 20°C no início da manhã, seguida de uma ligeira descida para o intervalo de 15 a 20°C. No entanto, ao aproximar-se do meio-dia, observou-se um aumento acentuado, atingindo um pico de aproximadamente 35°C, antes de estabilizar durante a tarde entre 25 e 30°C.

Em contrapartida, a temperatura do solo demonstrou um aumento mais gradual e uma maior estabilidade ao longo do dia. A temperatura do solo começou com cerca de 15°C de manhã e subiu de forma constante, atingindo os 30°C por volta do meio-dia, onde se manteve estável até ao final da tarde. Este comportamento térmico mais estável do solo, em comparação com a temperatura do ar, pode ser atribuído à sua capacidade de reter calor de forma mais eficaz, particularmente o calor acumulado do dia anterior.

Esta estabilidade térmica do solo proporciona um ambiente mais consistente e previsível para as culturas agrícolas, como as videiras, que beneficiam de um regime térmico moderado. O equilíbrio observado durante a tarde, quando tanto a temperatura do ar quanto a do solo se encontram entre 25°C e 30°C, sugere um estado de equilíbrio térmico entre o solo e o ar circundante.

Esta estabilidade não só é benéfica para o desenvolvimento saudável das videiras, como também indica a eficiência do solo em reter o calor e proporcionar um ambiente mais estável para as plantas ao longo do dia.

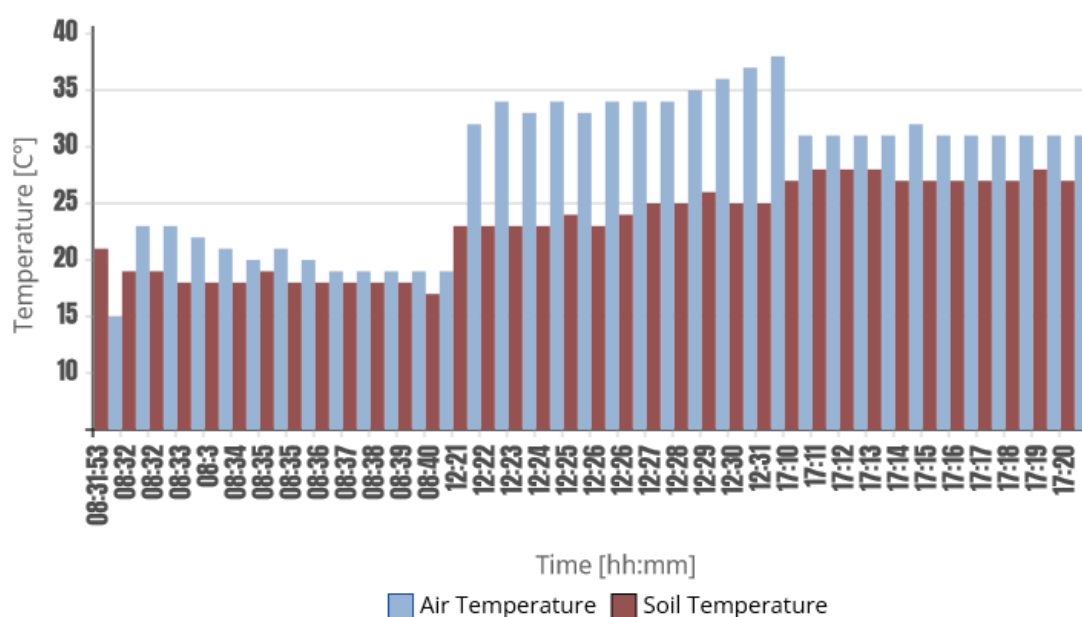


Figura 31 - Variação da temperatura do Ar e Solo durante as Diferentes Fases do Dia

Tabela 4 - Registos de Valores de Temperatura

Resultados	Valores
Temperatura Máxima Registada – Temperatura do Ar	38°C
Temperatura Mínima Registada – Temperatura do Ar	15°C
Temperatura Máxima Registada – Temperatura do Solo	28°C
Temperatura Mínima Registada – Temperatura do Solo	17°C
Média - Temperatura do Ar	27.8°C
Média - Temperatura do Solo	22.9°C

Foi realizado um ensaio sobre o consumo energético do sistema, que incluiu a monitorização do consumo de todos os sensores ligados e ativos no microcontrolador, estes sendo, o DHT22, o sensor de humidade capacitivo com a bomba de irrigação, sensor de temperatura do solo, módulo GPS e o sensor de deteção de água. Durante o teste, foi registado um consumo médio de 154,45 mA (Figura 32).



Figura 32 - Consumo Energético dos Sensores Ativos no Microcontrolador

No entanto, com a bomba de irrigação desativada, o consumo reduziu para 85,41 mA (Figura 33).



Figura 33 - Consumo Energético dos Sensores ligados ao Microcontrolador com a Bomba de Irrigação Desativada

Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1. Conclusões

O sistema proposto nesta dissertação para monitorização de solo e ar, com a interface web, é simples de utilizar e representa uma mais-valia tanto para quem está a iniciar atividades agrícolas, como para aqueles com experiência consolidada que procuram uma abordagem mais eficiente e tecnológica no cultivo das suas colheitas. Este dispositivo permite uma integração eficaz entre a tecnologia e as necessidades reais do agricultor, contribuindo para a otimização da gestão agrícola. Além disso, trata-se de um dispositivo de baixo custo, eficiente em termos de consumo energético, e de fácil manutenção, características que o tornam ideal para o uso diário de um agricultor, mesmo em pequenas explorações.

O dispositivo tem o poder de monitorizar e fornecer informações valiosas sobre as condições do solo e do ar durante longos períodos, adaptando-se tanto a ambientes urbanos como a zonas rurais e campos agrícolas em Portugal. Desta forma, o dispositivo pode ser utilizado tanto em explorações agrícolas de grande escala como em pequenas quintas domésticas, contribuindo para a sustentabilidade e eficiência dos sistemas de produção agrícola. Além disso, o dispositivo tem o potencial de ser integrado em sistemas maiores de agricultura inteligente, permitindo o controlo remoto e a automatização de processos agrícolas via IoT.

5.2. Trabalhos Futuros

Em trabalhos futuros, o desenvolvimento do sistema poderá focar-se em várias vertentes. Uma das principais seria a criação de um módulo capaz de identificar automaticamente as melhores culturas a plantar em diferentes países ou regiões, tendo em consideração as condições climáticas específicas, a tipologia dos solos e as práticas agrícolas locais. Tal funcionalidade seria particularmente útil num contexto de globalização e de mudança climática, onde a adaptação e a resiliência das práticas agrícolas tornam-se cada vez mais cruciais.

No entanto, seria necessário garantir que o dispositivo se adapta às alterações climáticas, como a variação de temperatura, humidade e condições atmosféricas extremas. A implementação destas melhorias resultaria num aumento substancial do desempenho do dispositivo, melhorando a sua precisão, fiabilidade e utilidade prática. Com estas atualizações, o dispositivo teria um impacto positivo não só a nível nacional, mas também global, proporcionando aos agricultores mais veteranos e novatos, ferramentas inovadoras que facilitem a sua atividade diária.

Referências Bibliográficas

- [1] Na, A., Isaac, W., Varshney, S., & Khan, E. (2016). An IoT based system for remote monitoring of soil characteristics. 2016 International Conference on Information Technology (InCITE) - the next Generation IT Summit on the Theme - Internet of Things: Connect Your Worlds. <https://doi.org/10.1109/incite.2016.7857638>.
- [2] Gagliardi, G., Cosma, A. I. M., & Marasco, F. (2022). A Decision Support System for Sustainable Agriculture: The Case Study of Coconut Oil Extraction Process. *Agronomy*, 12(1), 177. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010177>
- [3] Zhai, Z., Martínez, J. F., Beltran, V., & Martínez, N. L. (2020). Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105256. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>
- [4] Dhanaraju M, Chenniappan P, Ramalingam K, Pazhanivelan S, Kaliaperumal R. Smart Farming: Internet of Things (IoT)-Based Sustainable Agriculture. *Agriculture*. 2022; 12(10):1745. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101745>
- [5] Neha Dhankhar, & Kumar, J. (2023). Impact of increasing pesticides and fertilizers on human health: A review. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.766>
- [6] Lin, Biing-Hwan & Padgitt, Merritt & Bull, Len & Delvo, Herman & Shank, David & Taylor, Harold, 1995. "Pesticide and Fertilizer Use and Trends in U.S. Agriculture," *Agricultural Economic Reports* 308423, United States Department of Agriculture, Economic Research Service.
- [7] Jacto. (2022, August 25). *Biotecnologia na agricultura: qual a importância e as novidades?* Tecnologia Para Agricultura - Blog Da Jacto. <https://blog.jacto.com.br/biotecnologia-na-agricultura/>
- [8] Rose, D. C., Wheeler, R., Winter, M., Lobley, M., & Chivers, C.-A. (2021). Agriculture 4.0: Making it work for people, production, and the planet. *Land Use Policy*, 100, 104933. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104933>
- [9] Ferrández-Pastor, F., García-Chamizo, J., Nieto-Hidalgo, M., Mora-Pascual, J., & Mora-Martínez, J. (2016). Developing Ubiquitous Sensor Network Platform Using Internet of Things: Application in Precision Agriculture. *Sensors*, 16(7), 1141. <https://doi.org/10.3390/s16071141>
- [10] International Telecommunication Union (via World Bank); Gapminder (2019); UN (2022); HYDE (2017); Gapminder (Systema Globalis) – processed by Our World in Data. “Number of Internet users” [dataset]. International Telecommunication Union (via World Bank); Gapminder (2019); UN (2022); HYDE (2017); Gapminder (Systema Globalis)
- [11] What is an Edge Network? | Glossary. (2024). Hpe.com. <https://www.hpe.com/pt/en/what-is/edge-network.html>
- [12] Samuel, A., & Sipes, C. (2019). Making Internet of Things Real. *IEEE Internet of Things Magazine*, 2(1), 10–12. <https://doi.org/10.1109/iotm.2019.1907777>
- [13] Foote, K. (2022, January 14). A Brief History of the Internet of Things - DATAVERSITY. DATAVERSITY. <https://www.dataversity.net/brief-history-internet-things/>

- [14] Ashton, K. (2010). That “Internet of Things” Thing. In RFIDJournal.
<https://www.itrco.jp/libraries/RFIDjournal-That%20Internet%20of%20Things%20Thing.pdf>
- [15] First-Tech. (2021, April 13). Internet das coisas no setor de serviços. First Tech. <https://first-tech.com/conteudo/internet-das-coisas-no-setor-de-servicos/>
- [16] Misra, S. (2021). Introduction to Industrial Internet of Tings and Industry 4.0.
- [17] Obaideen, K., Yousef, B. A. A., AlMallahi, M. N., Tan, Y. C., Mahmoud, M., Jaber, H., & Ramadan, M. (2022). An overview of smart irrigation systems using IoT. *Energy Nexus*, 7, 100124.
<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100124>
- [18] Khanna, A., & Kaur, S. (2019). Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of Precision Agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 218–231.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.039>
- [19] *Wireless Communication Technologies for Internet of Things and Precision Agriculture: A Review | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore*. (n.d.). Ieeexplore.ieee.org. Retrieved February 12, 2024, from <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9609421>
- [20] Ramya, C. M., Shanmugaraj, M., & Prabakaran, R. (2011). Study on ZigBee technology. *2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology*.
<https://doi.org/10.1109/icectech.2011.5942102>
- [21] What is Sigfox? - Sigfox 0G Technology. [Online]. Available: <https://www.sigfox.com/what-is-sigfox/>.
- [22] Radio Configurations | Sigfox build. [Online]. Available: <https://build.sigfox.com/sigfox-radio-configurations-rc>.
- [23] Sigfox - Implementing Low-Power Wide-Area Network (LPWAN) Solutions with AWS IoT. (n.d.). Docs.aws.amazon.com. <https://docs.aws.amazon.com/whitepapers/latest/implementing-lpwan-solutions-with-aws/sigfox.html>
- [24] LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview. (2019). https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf
- [25] Lalle, Y., Fourati, L. C., Fourati, M., & Barraca, J. P. (n.d.). A Comparative Study of LoRaWAN, SigFox, and NB-IoT for Smart Water Grid | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. Ieeexplore.ieee.org. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9044961>
- [26] *A Comparative Study of LoRaWAN, SigFox, and NB-IoT for Smart Water Grid | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore*. (n.d.). Ieeexplore.ieee.org. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9044961>
- [27] MQ Support Center. (2023). Machineq.com. <https://support.machineq.com/s/article/What-are-the-differences-between-Class-A-Class-B-and-Class-C>
- [28] Network, T. (n.d.). *9 reasons why you should move from The Things Network to The Things Industries*. The Things Network. Retrieved February 13, 2024, from <https://www.thethingsnetwork.org/article/9-reasons-why-you-should-move-from-the-things-network-to-the-things-industries>
- [29] The Things Network. (n.d.). *LoRaWAN Architecture*. The Things Network.

- [30]Amazon.com: JacobsParts ESP8266 ESP-12F WiFi Microcontroller USB Development Board NodeMCU MicroPython : Electronics. (n.d.). Wwww.amazon.com. Retrieved February 13, 2024, from <https://www.amazon.com/JacobsParts-ESP8266-Microcontroller-Development-MicroPython/dp/B0787LMTZD/docs/lorawan/architecture/>
- [31]O que é MQTT? – Explicação sobre o protocolo MQTT – AWS. (n.d.). Amazon Web Services, Inc. <https://aws.amazon.com/pt/what-is/mqtt/>
- [32]Node RED Alternatives - Self Hosted Automation | LibHunt. (2024, February 8). Selfhosted.libhunt.com. <https://selfhosted.libhunt.com/node-red-alternatives>
- [33]Node-RED guide, Web site: <http://noderedguide.com/>
- [34]O que é um IDE? – Explicação sobre ambiente de desenvolvimento integrado – AWS. (n.d.). Amazon Web Services, Inc. <https://aws.amazon.com/pt/what-is/ide/>
- [35]O que é uma API? – Guia de APIs para iniciantes – AWS. (n.d.). Amazon Web Services, Inc. <https://aws.amazon.com/pt/what-is/api/>
- [36]Rabiu, A., Adesanya, M., Akpenpuun, T., Ogunlowo, Q., Rabiu, A., Adesanya, M., Dutta, P., Kim, H-T., & Lee, H-W. (2023). Review of Temperature Management Strategies and Techniques in the Greenhouse Microenvironment Review of Temperature Management Strategies and Techniques in the Greenhouse Microenvironment. 6(2), 126–147.
- [37]Heltec WiFi LoRa 32 V2 - 868MHz. (n.d.). MolukasLabs Shop.Retrieved July 16, 2024, from <https://shop.molukas.com/es/nodos/36-heltec-wifi-lora-32-v2-868mhz.html>
- [38]Heltech. (2023). WiFi LoRa 32(V2) [Review of WiFi LoRa 32(V2)]. <https://heltec.org/project/wifi-lora-32v2/>
- [39]Cm2302/dht22 temperature and humidity sensor, 3.3-5 vdc, temperature range -40°C to 80°C, humidity level 0-99.9%, white. (n.d.). Wwww.velleman.eu. <https://www.velleman.eu/products/view/?id=459226>
- [40](2017). In Electrofun. <https://www.electrofun.pt/sensores-arduino/sensor-humidade-temperatura-dht22>
- [41]“Precio Sonda de Temperatura Impermeable DS18B20 3 Metros.” Shelly Espana, www.shellyespana.com/sonda-de-temperatura-impermeable-ds18b20-3-metros/.
- [42](2024). In Servelec.pt. <https://servelec.pt/product/sensor-de-temperatura-shelly-ds18b20-shelly-ds18b20>
- [43]Watering Unit with Mositure Sensor and Pump. (n.d.). M5stack-Store. Retrieved <https://shop.m5stack.com/products/watering-unit-with-mositure-sensor-and-pump>
- [44](2024). In The Pi Hut. <https://thepihut.com/products/watering-unit-with-mositure-sensor-and-pump>
- [45]Soil moisture and water level sensor, 5 vdc, white. (n.d.). Wwww.velleman.eu. <https://www.velleman.eu/products/view/?id=459210>
- [46]High. (2024). High sensitivity Water Sensor. Elektronik Lavpris Aps. <https://elektronik-lavpris.dk/p131022/sens0008-high-sensitivity-water-sensor/>
- [47]m5-docs. (n.d.). Docs.m5stack.com. <https://docs.m5stack.com/en/unit/gps>
- [48]Unidad Mini GPS/BDS de M5Stack (AT6558). (2023). RobotShop Europe. <https://eu.robotshop.com/es/products/unidad-mini-gps-bds-de-m5stack-at6558>
- [49]The Things Indoor Gateway. (2024). The Things Industries. <https://www.thethingsshop.com/products/the-things-indoor-gateway>

- [50] Calendário da horta por regiões em Portugal | 2024. (2022, January 19). <https://www.hortasbiologicas.pt/calendario-da-horta-por-regioes-em-portugal/>
- [51] Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (n.d.). Wwww.ipma.pt. <https://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/>
- [52] ALFACE EM MODO DE PRODUÇÃO BIOLÓGICO. (n.d.). https://agriculturabiologica.azores.gov.pt/Storage/Stored_Files/sto_04-08-2022_15-10-282540220.pdf
- [53] Clima propício para plantio - Portal Embrapa. (n.d.). Wwww.embrapa.br. <https://www.embrapa.br/hortalicas/alho/clima>
- [54] 3. FICHA TÉCNICA ALHO FRANCÊS EM MODO DE PRODUÇÃO BIOLÓGICO. (n.d.). Retrieved September 9, 2024, from https://agriculturabiologica.azores.gov.pt/Storage/Stored_Files/sto_04-08-2022_15-11-156450048.pdf
- [55] acientistaagricola. (2020, April 2). A cultura da batata: tudo o que deve saber para ter sucesso - A cientista agrícola. <https://acientistaagricola.pt/cultura-da-batata/>
- [56] Ribeiro, C., Brune, S., & Reifschneider, F. (2017). Cultivo da berinjela. Embrapa.br. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/765608/cultivo-da-berinjela-solanum-melongena-l>
- [57] acientistaagricola. (2020, December 16). Como cultivar beterraba: tudo o que deve saber - A cientista agrícola. A Cientista Agrícola - a Ciência E a Agricultura de Mãos Dadas. https://acientistaagricola.pt/como-cultivar-beterraba-tudo-o-que-deve-saber/?doing_wp_cron=1725956400.7062671184539794921875
- [58] acientistaagricola. (2020, October 20). Como cultivar brócolos na sua horta: informações que deve ter em conta - A cientista agrícola. A Cientista Agrícola - a Ciência E a Agricultura de Mãos Dadas. https://acientistaagricola.pt/como-cultivar-brocolos/?doing_wp_cron=1725956580.2284390926361083984375
- [59] acientistaagricola. (2024, February). Tudo o que debes saber sobre as capuchinhas e porque as debes ter na tua horta - A cientista agrícola. A Cientista Agrícola - a Ciência E a Agricultura de Mãos Dadas. https://acientistaagricola.pt/capuchinhas-na-horta/?doing_wp_cron=1725956709.4922668933868408203125
- [60] Clima - Portal Embrapa. (2017). Embrapa.br. <https://www.embrapa.br/hortalicas/cebola/clima>
- [61] acientistaagricola. (2021, March 17). Como plantar cebolo: dicas essenciais para iniciantes - A cientista agrícola. A Cientista Agrícola - a Ciência E a Agricultura de Mãos Dadas. <https://acientistaagricola.pt/como-plantar-cebola/>
- [62] hortasbiologicas. (2022, January 20). Cebolinho | Aprenda a cultivar na sua horta | 2024. Hortas Biológicas. <https://www.hortasbiologicas.pt/como-cultivar-cebolinho/>
- [63] acientistaagricola. (2021, March 9). Como cultivar cebolinho: tudo o que deve saber para o cultivo desta aromática - A cientista agrícola. A Cientista Agrícola - a Ciência E a Agricultura de Mãos Dadas. https://acientistaagricola.pt/como-cultivar-cebolinho-tudo-o-que-deve-saber-para-o-cultivo-desta-aromatica/?doing_wp_cron=1725957126.0338389873504638671875

- [64] noticiasdejardim. (2020, July 7). Perfil do solo de cenoura: Como fixar o seu solo para cultivar cenouras mais saudáveis. Notícias de Jardim; Notícias De Jardim. <https://www.noticiasdejardim.com/legumes/cenouras/perfil-do-solo-de-cenoura/>
- [65] Como plantar cenoura | Hortas.info. (2024). Hortas.info. <https://hortas.info/como-plantar-cenoura>
- [66] Plantei. (2021, September 20). Como plantar couve: passo a passo - Blog da Plantei. Blog Da Plantei. <https://blog.plantei.com.br/plante-cultive-e-colha-couve-com-sucesso/>
- [67] Como plantar couve | Hortas.info. (2024). Hortas.info. <https://hortas.info/como-plantar-couve>
- [68] Plantei. (2021, September 23). Como plantar couve-flor - Blog da Plantei. Blog Da Plantei. <https://blog.plantei.com.br/como-plantar-couve-flor/>
- [69] Como plantar couve-flor | Hortas.info. (2024). Hortas.info. <https://hortas.info/como-plantar-couve-flor>
- [70] 9. FICHA TÉCNICA CURGETE -EM MODO DE PRODUÇÃO BIOLÓGICO. (n.d.). Retrieved September 10, 2024, from https://agriculturabiologica.azores.gov.pt/Storage/Stored_Files/sto_04-08-2022_14-54-093257052.pdf
- [71] Como plantar ervilha | Hortas.info. (n.d.). Hortas.info. <https://hortas.info/como-plantar-ervilha>
- [72] Agrobio. (2023, May 2). Festival Internacional de Jardins de Ponte de Lima. Revista Jardins. <https://revistajardins.pt/cultivar-ervilha/>
- [73] hortasbiologicas. (2022, September 19). Ervilhas - Como cultivar na horta e em casa - 2024. Hortas Biológicas. <https://www.hortasbiologicas.pt/como-cultivar-ervilhas-na-horta-e-em-casa/>
- [74] Como plantar espinafre | Hortas.info. (n.d.). Hortas.info. <https://hortas.info/como-plantar-espinafre>
- [75] Queridas Plantas. (2017, January 18). Como plantar espinafres em vaso, na horta ou no jardim. Queridas Plantas. <https://www.queridasplantas.com/como-plantar-espinafres/>
- [76] As Favas - Como Cultivar Corretamente Na Sua Horta - 2024. (2022, October 12). <https://www.hortasbiologicas.pt/como-cultivar-as-favas-na-sua-horta/>
- [77] Martins, R. (2024, July 10). Como Plantar Fava | Aprender a Plantar. Aprenderaplantar.com.br. <https://aprenderaplantar.com.br/como-plantar-fava/>
- [78] Como preparar o solo para o plantio de feijão? (2021). Vocepergunta.com. <https://vocepergunta.com/library/artigo/read/231118-como-preparar-o-solo-para-o-plantio-de-feijao>
- [79] Clima - Portal Embrapa. (n.d.). Wwww.embrapa.br. <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/pre-producao/clima>
- [80] Como plantar feijão | Hortas.info. (2024). Hortas.info. <https://hortas.info/como-plantar-feijao#:~:text=Como%20plantar%20feij%C3%A3o%201%20Clima%20A%20temperatura%20deve>
- [81] Monte. (2021, February 4). Aprenda como deve plantar manjeriço em canteiros ou vasos. A Senhora Do Monte. <https://asenhoradomonte.com/2021/02/04/como-plantar-manjericao/>
- [82] Como plantar manjeriço | Hortas.info. (2024). Hortas.info. <https://hortas.info/como-plantar-manjericao#:~:text=Como%20plantar%20manjer%C3%A3o%201%20Clima%20O%20manjer%C3%A3o%20%C3%A9>
- [83] Como plantar melão | Hortas.info. (2024). Hortas.info. <https://hortas.info/como-plantar-melao>
- [84] acientistaagricola. (2021, May 25). Como cultivar melão e melancia: o básico que deve saber - A cientista agrícola. A Cientista Agrícola - a Ciência E a Agricultura de Mãos Dadas. <https://acientistaagricola.pt/como-cultivar-melao-melancia-meloa/>

- [85]Plantei. (2022, July 11). Como plantar melancia: passo a passo. Blog Da Plantei. <https://blog.plantei.com.br/como-plantar-melancia/>
- [86]pena, carlos. (2024, September 10). Clima para a Cultura da Melancia. HortaeFlores.com. <https://www.hortaeFlores.com/2019/05/clima-para-cultura-da-melancia.html>
- [87]Mathias, J. (2023, December 12). Como plantar morango: veja o passo a passo e dicas para cuidar da fruta. Globo Rural. <https://globorural.globo.com/vida-na-fazenda/como-plantar/noticia/2023/12/como-plantar-morango-veja-o-passo-a-passo-e-dicas-para-cuidar-da-fruta.ghtml>
- [88]rafael. (2019, June 7). Plantio Do Morango: Época, Cuidados E Como Plantar Em Estufa. Mundo Ecologia; Mundo Ecologia. <https://www.mundoecologia.com.br/plantas/plantio-do-morango-epoca-cuidados-e-como-plantar-em-estufa/>
- [89]Rau, P. (2019, June 19). Festival Internacional de Jardins de Ponte de Lima. Revista Jardins. <https://revistajardins.pt/morangos-saiba-como-plantar/>
- [90]Plantei. (2021, July 12). Como plantar pepino: passo a passo - Blog da Plantei. Blog Da Plantei. <https://blog.plantei.com.br/como-plantar-pepino/#:~:text=O%20pepineiro%20prefere%20clima%20quente%20e%20cresce%20bem>
- [91]Olmo Axayacatl. (2024, March 15). Clima, suelo y agua para la producción del cultivo del pepino. Blog Agricultura. <https://blogagricultura.com/clima-suelo-pepino/>
- [92]hortasbiologicas. (2024, June 3). Cultivar pepinos: Guia completo para hortas caseiras - 2024. Hortas Biológicas. <https://www.hortasbiologicas.pt/como-cultivar-pepinos-em-hortas-caseiras/>
- [93]acientistaagricola. (2021, May 19). Como cultivar pepino: dicas úteis para o seu cultivo - A cientista agrícola. A Cientista Agrícola - a Ciência E a Agricultura de Mãos Dadas. <https://acientistaagricola.pt/como-cultivar-pepino-dicas-uteis-para-o-seu-cultivo/>
- [94]Mar, A. e. (2021, May 29). Como cultivar pimentos: conheça os cuidados que deve ter em conta - AGRICULTURA E MAR. AGRICULTURA E MAR. <https://agriculturaemar.com/como-cultivar-pimentos-conheca-os-cuidados-que-deve-ter-em-conta/>
- [95]Plantas. (2019, July 30). Como plantar pimentão, dicas e segredos. - Plantas jardins e hortas. Plantas Jardins E Hortas. <https://plantas.dou.pt/como-plantar-pimentao/>
- [96]Temperatura ideal para tomates: o que é que suporta. (2018, January 25). Tomathouse.com. <https://pt.farm.tomathouse.com/pomidoryi/optimalnaya-temperatura.html>
- [97]Como preparar o solo para iniciar a plantação do tomate? | BASF. (2024). Basf.com. <https://agriculture.basf.com/br/pt/conteudos/cultivos-e-sementes/tomate/preparacao-do-solo-tomate>
- [98]Choong, O. (2014, June 30). 3 Formas de Preparar o Solo para Plantar Tomates. WikiHow; wikiHow. <https://pt.wikihow.com/Preparar-o-Solo-para-Plantar-Tomates>
- [99]OpenWeatherMap.org. (2012). Current weather and forecast - OpenWeatherMap. Openweathermap.org. <https://openweathermap.org/>
- [100] Fair Use Policy explained. (2021, May 14). The Things Network. <https://www.thethingsnetwork.org/forum/t/fair-use-policy-explained/1300>

Apêndice 1 - Artigo Publicado

O seguinte artigo foi publicado e apresentado em “*ISSI 2024 - 4th International Symposium on Sensing and Instrumentation in IoT Era*”.

Soil and Air Characteristics Monitoring base on IoT for Precision Agriculture

Roberto Miguel

Iscte – Instituto Universitário de Lisboa
Lisbon, Portugal
roberto_filipe_miguel@iscte-iul.pt

Octavian Adrian Postolache

Iscte - Instituto Universitário de Lisboa
and Instituto de Telecomunicações
Lisbon, Portugal
opostolache@lx.it.pt

Mariana Jacob Rodrigues

Iscte - Instituto Universitário de Lisboa
and Instituto de Telecomunicações
Lisbon, Portugal
mariana_jacob@iscte-iul.pt

Abstract— In the face of global population growth and climate change, modern agriculture must adopt innovative technologies to meet the increasing demand for food. This paper proposes and implements the application of Internet of Things (IoT) technologies in agricultural settings to enhance resource management, to monitor and give vital information to those who are not familiar with agriculture or for those who are getting started on the subject. By implementing multiple sensors in one node, the farmers can monitor and analyze environmental and soil data in real time, enabling precision agriculture that optimizes yield and minimizes resource use. All the data is displayed on a Node-RED dashboard with different tabs that display the information given by the sensors, a meteorologic forecast, a feature to indicate what the farmer can plant at that precise moment and location, along with a help tab offering tips on planting and the necessary precautions to take. The proposed system was implemented to help and give important data that can't be obtain easily without some background research.

Keywords— internet of things (IoT), smart agriculture, Low-Power Wide-area Network (LPWAN).

I. INTRODUCTION

Agriculture has undergone many changes and has been subject to a large amount of machinery to increase yields, damaging the environment and crops due to the misuse of chemicals and pollution produced by excessive machinery. According to studies the number of farms around the world would drop from 616 million in 2020 to 272 million in 2100, leaving many fields empty [1]. This leaves a heavy mark to the world population, due to the consistent world population inscreasing at a high speed, reaching an increase of growth percentage of «224% from 1950 to 2024 [2]. A significant body of research from around the globe has documented a decline in the number of young people pursuing a career in agriculture and a scarcity of new entrants into the profession. A number of factors contribute to this trend, including inadequate working conditions, insufficient financial resources and limited land availability. The lack of adequate working conditions and the necessity of performing arduous and often disagreeable tasks deter young individuals from engaging in an industry that offers limited earning potential[3]. However, the introduction of new agricultural technologies, including drones, robotic milking systems, and automatic steering tractors, has the potential to enhance motivation and capture the interest of younger generations. As the world's population continues to grow, it is becoming increasingly difficult to provide large amounts of food, and with the world's climate changing, it is also becoming more difficult to keep an eye on what the land needs. These challenges require new technological approaches to mitigate or even eliminate these types of problems, such as the use of

the Internet of Things (IoT). The IoT revolution is being embraced across a multitude of fields, including health, environment, education, entertainment, industry, and even our home [4], and for agriculture. These challenges require new technological approaches to mitigate or even eliminate these types of problems, with the IoT offering a promising solution. Precision agriculture requires the monitoring of soil and weather conditions to make better decisions and to provide very important information that would otherwise require many prior studies. Monitoring all the conditions and getting accurate information is a very time-consuming and costly exercise, and with the strict timing of farming, there is no time to do a lot of field preparation activities or to prepare the farmer to understand what needs to be done before planting. This study introduces a novel IoT-based system designed for real-time monitoring of soil and air characteristics in agricultural settings, with a particular focus on assisting individuals who are new to agriculture. In contrast to existing solutions, which frequently necessitate considerable expertise or intricate configurations, this system is portable, straightforward to operate, and furnishes real-time, actionable data via a simple Node-RED interface. This research addresses a crucial gap in the existing literature by offering a practical, accessible solution for precision agriculture, utilising the ESP32 microcontroller and LoRaWAN communication for long-range, low-power connectivity

II. RELATED WORK

A plethora of projects have been conducted utilising the IoT in agricultural contexts. These range from remote monitoring to smart irrigation of plants and even to fully automated harvesting.system.

For instance, Nayyar et al. [5] devised a smart farming solution that employs sensors for real-time temperature and moisture monitoring, in conjunction with cloud computing and solar technology. This work demonstrated the feasibility and benefits of integrating renewable energy sources with the IoT for sustainable agricultural practices. Notably, the use of solar panels presents a challenge in areas with limited sunlight. When deploying these devices over large fields in regions with low sun exposure, the efficiency and reliability of the system can be significantly compromised due to the lack of battery.

Adetiba et al. [6] introduced an IoT-based data acquisition and automatic irrigation system for precision agriculture. This innovative system eliminates the need for farmers to be present on the field, offering a significant time-saving advantage. However, the focus of this project is on more advanced farmers who have years of experience, providing them with access to a wealth of complex data information.

Lakshmiprabha et al. [7] concentrated their attention on a hydroponic-based smart irrigation system utilising IoT, thereby illustrating the potential of such systems to optimise water usage and enhance crop yields. Additionally, Singh et al. [8] developed a system that incorporates a variety of sensors to monitor environmental parameters and automate irrigation processes. However, the projects created by these authors lack portability and are challenging for newcomers to learn.

This paper presents an innovative and practical device based on the ESP32 microcontroller, incorporating MQTT and LoRaWAN connectivity. The device has been designed to be portable and user-friendly, and is equipped with multiple sensors for the measurement of air temperature, humidity, soil temperature, and soil humidity. Furthermore, we present a web platform developed with Node-RED, which enables real-time monitoring of all sensor measurements.

III. SYSTEM DESCRIPTION

The proposed device includes several energy-efficient sensor nodes that measure essential agricultural parameters, such as air humidity and temperature, soil moisture and temperature, and a GPS module, all of which are crucial for optimizing crop growth and health[9].

A. Hardware

For the air humidity and temperature measurements, the CM2302/DHT22 sensor from Velleman was used. this cost-effective digital sensor offers a typical relative humidity (RH) accuracy of $\pm 2\%$ RH, measuring from 0% to 99.9% RH with a response time of 5 seconds. Furthermore, the sensor exhibits temperature accuracy of $\pm 0.5^\circ\text{C}$ across a temperature range of -40°C to 80°C . The sensor features a single-wire connection, facilitating straightforward integration. It operates on a supply voltage of 3.3 to 5.5 VDC, with a maximum current supply of 1.5 mA [10].

The DS18B20 from Shelly was employed for the purpose of measuring soil temperature. Renowned for its precision, the temperature sensor offers an accuracy of $\pm 0.5^\circ\text{C}$ and provides temperature readings up to 12 bits, which can be configured. The device is operational within a voltage range of 3 to 5.5V, thereby enabling the measurement of temperatures between -55°C and $+125^\circ\text{C}$. The device demonstrates an accuracy of $\pm 0.5^\circ\text{C}$ between temperatures of -10°C and $+85^\circ\text{C}$. Moreover, the device is furnished with a resilient stainless steel tip, rendering it suitable for a plethora of applications that necessitate dependable and precise temperature readings [11].

The capacitive moisture sensor from M5Stack was selected on the basis of its cost-effectiveness and integrated pump, which facilitates field irrigation. The sensor operates within a voltage range of 3.3 to 5.5 VDC, with an output voltage of 0 to 3.0 VDC. It has an operating current of 5mA and utilises a PH2.0-3P interface. The sensor dimensions are 192.5 x 24 x 33 mm, and the pump has a power rating of 5W[12]. The pump output is optimised for small-scale precision agriculture. Designed to operate efficiently with minimal power consumption, this rating is sufficient to meet the irrigation needs of small plots of land, typically found in urban or hobby farms.

The Water Level Sensor is a three-pin module that outputs an analogue signal with a range from 0 to 500, indicating the approximate depth of water submersion. Additionally, the device is capable of generating a digital signal, which indicates the presence of water. This is the primary function of the sensor in the context of this project. The sensor operates

at a voltage of +5V with a current consumption of less than 20mA. The water detection area of the sensor measures 1.58 inches x 0.63 inches (40mm x 16mm), and it features mounting holes of a size appropriate for 0.12 inches (3mm). The sensor is designed to operate within a humidity range of 10% to 90% (non-condensing) and a temperature range of -30°C to 50°C [13].

In conclusion, the AT6558 + MAX2659 GPS module from M5Stack was used for the completion of this device. The sensor provides positioning accuracy of 2.5 metres and supports 56 channels. The device offers a positioning update frequency of 1-10 Hz and is capable of operating at a maximum height of 1800 meters, speed of 515 m/s, and acceleration of ≤ 4 g. The sensor exhibits a sensitivity of -162 dBm for tracking, -148 dBm for capture, and -146 dBm for cold start. The time required for the device to become operational following a cold start is 35 seconds, a warm start takes 32 seconds, and a hot start requires only one second. The operational temperature range is -40°C to 85°C , with a net weight of 13 g and dimensions of 48 x 24 x 8 mm[14].

The development board selected for the configuration of specific parameters from the sensors and calibration was the Heltec WiFi LoRa 32 V2. The board is equipped with an integrated SX1276 LoRa chip, LoRa antenna ports, ESP32, an OLED screen and a battery integration system featuring a socket that allows for the connection of an external battery [15], features that are essential to the development of this device. The board also features a Bluetooth connectivity, has the CE Certificate and features a low-power design with sleep current $\leq 800\mu\text{A}$, making it ideal for other IoT applications.

The device diagram comprises all the necessary components, are illustrated in Fig 1. These include the DHT22, DS18B20 capacitive moisture sensor and the GPS module connected to the development board Heltec WiFi LoRa 32 V2.

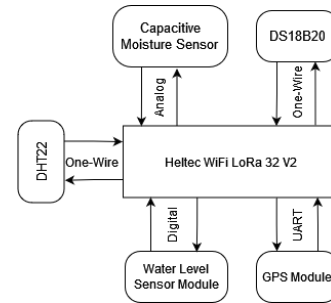


Fig. 1. Device layer architecture

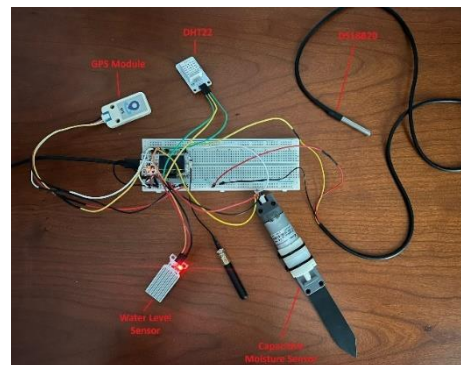


Fig. 2. Sensor node prototype for soil and air characteristics monitoring

B. Communication Protocols

A combination of communication protocols—such as LoRaWAN and MQTT—is necessary to transmit and visualize data in real time provided by the aforementioned sensors. The information is aggregated and processed using the Heltec WiFi LoRa 32 V2 microcontroller, and the MQTT server used is a public Mosquitto server.

LoRaWAN is a Low-Power Wide-Area Network (LPWAN), which the name LoRa comes from LongRange that the technology is capable of covering effectively. LoRa, developed by Semtech as a standard for LPWANs, enables communication over extended distances, with a range of up to 5 kilometres in urban areas and up to 15 kilometres or more in rural areas. A salient characteristic of LoRa-based solutions is their minimal power consumption. This enables the creation of battery-powered devices that are capable of functioning for up to 10 years[16]. A network configured with a star topology, utilising the open LoRaWAN protocol, is optimally suited to applications that necessitate an extended range or deep connectivity between disparate devices, while simultaneously ensuring minimal energy consumption and constrained data collection. This technology operates on unlicensed radio frequencies, which are 868 MHz in Europe, 433 MHz in Asia and 915 MHz in North America. The data rates range from 0.3 kbit/s to 50 kbit/s [17]. To manage LoRaWAN networks, it is necessary to use network servers. These are responsible for managing LoRaWAN gateways, authorising sensors and exchanging data (uplink, downlink) between sensors and applications. The most commonly used network server is TTN (The Things Network). In addition to numerous other protocols, TTN permits the utilisation of MQTT for the dissemination of data received over uplinks.

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) is a communication protocol developed by IBM. The MQTT protocol is primarily implemented for machine-to-machine (M2M) communication and is also suitable for use on Internet of Things (IoT) devices. It employs a lightweight publish/subscribe messaging protocol, which is well-suited for IoT sensors and bandwidth-limited networks, such as those utilising the LoRaWAN technology. This protocol consists in two entities: a message broker and its clients. The MQTT broker serves as the platform for message exchange, enabling clients to publish and/or subscribe to topics[18]. A simple visualisation on how MQTT publish-subscribe protocol works is shown in the Fig. 3.

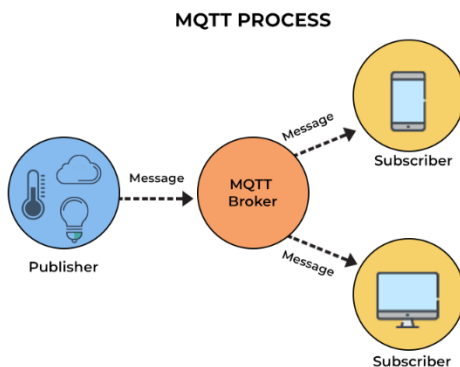


Fig. 3. MQTT Publish-Subscribe Protocol.
Source [19]

C. Software

In order to facilitate event-driven applications such as real-time environment monitoring, Node RED is utilised. Node RED is a flow-based visual programming tool that is frequently referred to as a devices' flow editor and is particularly well-suited for connecting IoT devices. It has been developed on the JavaScript language and the runtime is built on Node.JS. In Fig. 4, the air temperature and humidity, soil moisture and the GPS were connected to a MQTT client, which subscribed to specific topics hosted by the MQTT broker residing in the TTN server. A function node is responsible for retrieving the sensor readings into a format that can be read and shown in a template node, following by another function node that filters the location of the GPS and according to the reading of the GPS data and the other sensors, show what can be planted on that geographic location right at the moment.

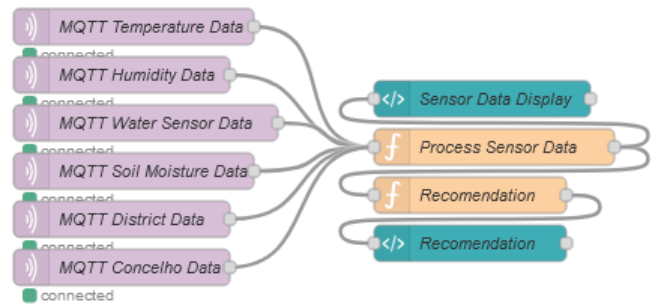


Fig. 4. An example of Node-RED flow with MQTT and Function nodes

To illustrate the structure and operation of the device, a flowchart has been included in Fig. 5. The flowchart describes the operation of the device, including equipment and data transmission.

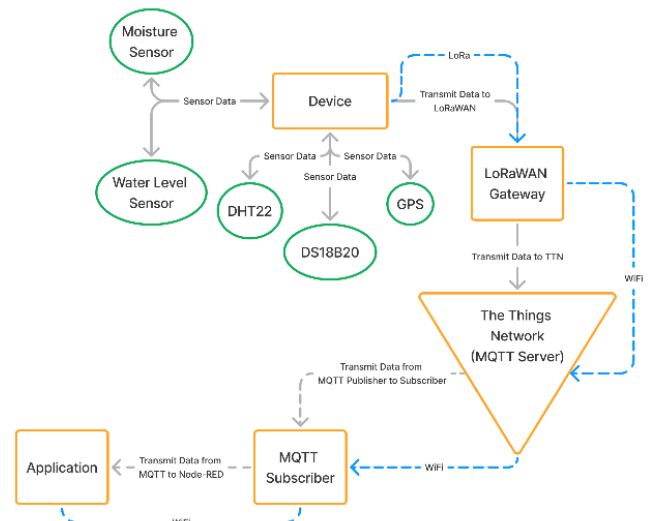


Fig. 5. Device FlowChart

IV. RESULTS

The Home screen tab of the web interface provided by the device to the user commences with a menu page, as illustrated in Fig. 6. The user is presented with four tabs, which can be selected to access the dashboard, information regarding planting, meteorological tab and a help tab.

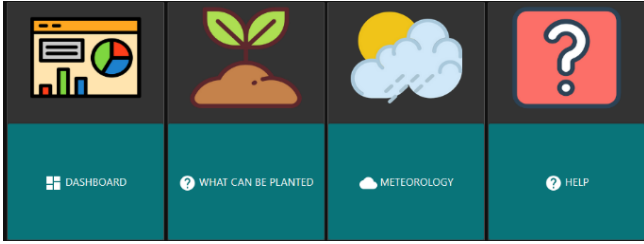


Fig. 6. Home Screen tab of the web interface

Upon entering the dashboard, the user is presented with a clear display of all data received by the sensors presented in gauges shown in Fig. 7.

Concurrently, the data is also stored in a MySQL database, which serves to retain a complete record of all data and to facilitate the retrieval of any desired information by the user. The charts displayed in Fig. 7 comprise the data acquired by the sensors and stored in the database, thereby facilitating the user's ability to visualise the historical record of each sensor over the course of its data registration. Additionally, the user may access the historical data for the sensors by clicking on the days of the calendar shown in Fig. 8, which will display the average values stored in MySQL. The tab "What can be planted" provides a concise overview of the essential data from the sensors, eliminating the need for users to navigate through multiple tabs. It displays the optimal plant species for the specific geographic location and the corresponding season, based on sensor readings and GPS coordinates.

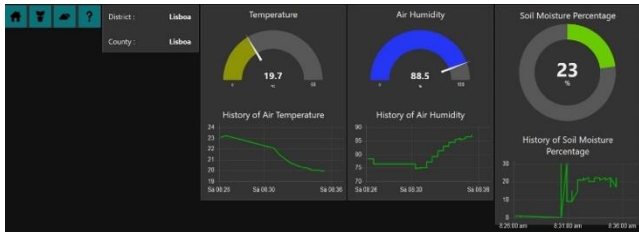


Fig. 7. Dashboard Tab

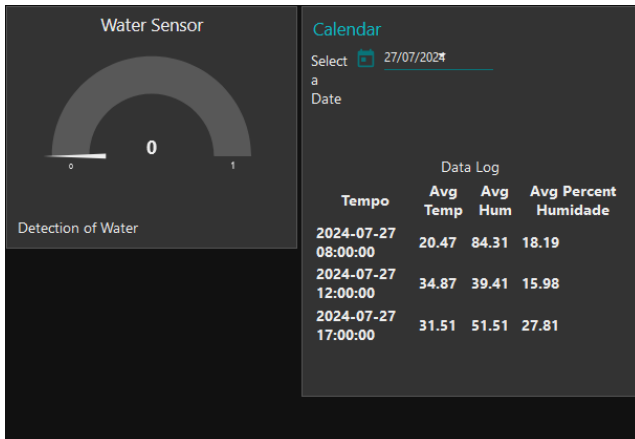


Fig. 8. Water Detection and Calendar from Dashboard tab

This allows users to make informed decisions about planting in a simple and efficient manner. In the event that the user lacks the requisite knowledge to plant, attend to the field, and to water the requisite plants, the help tab displays a multitude of figures representing various plant species, shown in Fig. 9. The device provides all pertinent information for these plants.



Fig. 9. Help Tab

In order to evaluate the system's functionality, a series of tests were conducted in a small garden in Charneca, Lisboa with the coordinates 38°92'02"N, -9°21'49.1" W during the summer months (July 2024). The climate in this region is characterised by a distinct change in temperature between the morning and afternoon, with the former being relatively cool and the latter being very hot. Table 1 provides a detailed account of the time and location of the tests.

TABLE I. INFORMATION OF THE TEST

Time	Morning	[08:31 - 08:40]
	Mid-Afternoon	[12:21 - 12:30]
	Evening	[17:10 - 17:20]
Coordinates		38°92'02"N -9°21'49.1" W

The objective of these experiments was to obtain data at three distinct time points: morning, mid-afternoon, and evening, over the course of a one-day test. The sensors were positioned and activated for approximately ten minutes to permit the stabilisation of all data received from the sensors. The data transmission interval was set to 1 minute to ensure compliance with the TTN fair-use policy. In Fig. 10-11 illustrates the data collected from the device over the course of a day, showcasing the distinct stages of the day.

The initial analysis focused on the air relative humidity (RH) parameter, which demonstrated a notable diurnal variation. RH levels were initially high, reaching approximately 70% in the early morning, before peaking at 85%. This was followed by a decline to 30-35% around

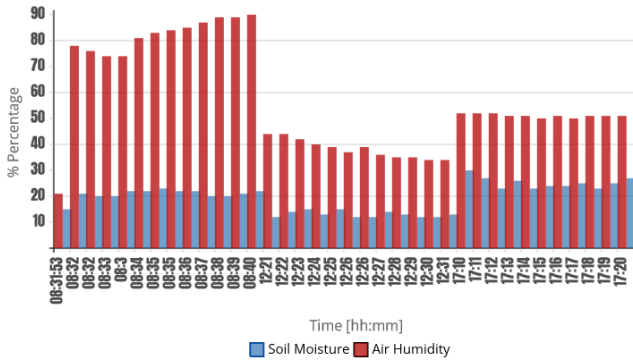


Fig. 10. Air and Soil Humidity Variation during the Different Stages of the Day

midday, before a subsequent rise to stabilise at 50-55% in the late afternoon.

In contrast, the soil moisture exhibits a more gradual and consistent trend over the course of the day. The initial reading is approximately 15% in the early morning, with a slight increase to approximately 20% as the morning progresses. At approximately midday, the soil moisture remains relatively constant, exhibiting fluctuations between 10 and 15%. In the late afternoon, a notable increase is observed, with soil moisture levels reaching approximately 20-25%. This consistent increase towards the end of the day serves to illustrate the soil's capacity to retain moisture, even in the face of significant fluctuations in air humidity.

The second and final analysis concentrated on the temperature of the air and soil. The comparative analysis of air and soil temperatures over the course of the day, as illustrated in the Fig.11, elucidates the disparate thermal behaviours exhibited by these two parameters. The air temperature displays discernible fluctuations, commencing at approximately 20 degrees Celsius in the early morning and declining slightly to a range of 15 to 20 degrees Celsius. By midday, the air temperature has risen significantly, reaching a peak of approximately 35°C, and then stabilises in the afternoon at around 25-30°C. In contrast, the increase in soil temperature is more gradual and stable. The temperature of the soil begins at approximately 15°C in the morning, increases steadily to reach around 30°C by midday, and maintains this level throughout the afternoon. This suggests that the soil retains heat from the previous day more effectively, thereby providing a more stable thermal environment for grapevines. The observed stabilisation in the afternoon, where both air and soil temperatures hover around 25-30°C, suggests the attainment of thermal equilibrium between the soil and the surrounding air.

During the test, the tab labelled "What can be planted" displays potential plantings based on the current data received from the sensors. The "What can be planted" information was sourced from a Portuguese website named "hortas biológicas" that provides a regional gardening calendar for Portugal. This calendar offers planting guidelines based on local climate conditions. The calendar is divided into five distinct zones based on climate variations, covering coastal and southern areas, inland regions with temperate climates, interior areas with maritime influence, high-altitude regions with extreme temperatures, and the autonomous regions of Madeira and the Azores. The guidelines assist gardeners in optimising their planting schedules in accordance with local weather conditions[20]. The result can be seen in Fig. 12

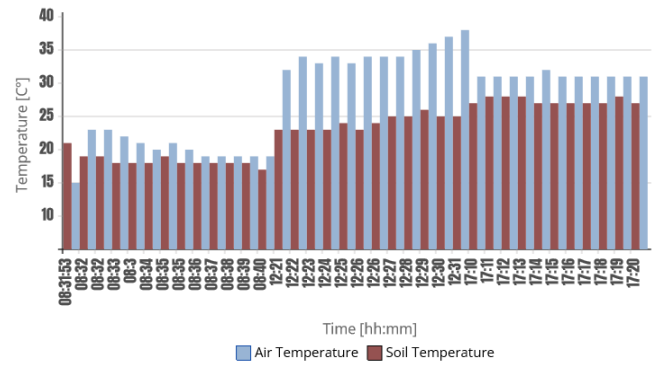


Fig. 11. Air and Soil Temperature Variation during the Different Stages

What can you Plant according to the Device Location	What can be Planted right now
Recommendations for Lisbon:	Recommendations for Lisbon:
• Winter: Lettuce, Garlic, Leek, Potato, Beetroot, Nasturtium, Onion, Chive, Carrot, Cabbage, Pea, Spinach, Fava Bean • Spring: Lettuce, Garlic, Leek, Potato, Eggplant, Beetroot, Broccoli, Nasturtium, Onion, Chive, Carrot, Cabbage, Cauliflower, Zucchini, Spinach, Basil, Melon, Watermelon, Strawberry, Cucumber, Pepper, Tomato • Summer: Lettuce, Leek, Beetroot, Broccoli, Nasturtium, Onion, Chive, Carrot, Cabbage, Zucchini, Spinach, Basil • Autumn: Lettuce, Garlic, Leek, Beetroot, Broccoli, Nasturtium, Onion, Chive, Carrot, Cabbage, Cauliflower, Pea, Spinach, Fava Bean, Basil	• Summer: Lettuce, Leek, Beetroot, Broccoli, Nasturtium, Onion, Chive, Carrot, Cabbage, Zucchini, Spinach, Basil

Fig. 12. "What can be Planted" tab from the web interface

V. CONCLUSIONS

The proposed soil and air IoT module, described in this paper together with the web interface, is a simple yet effective tool for those engaged in agricultural activities and for those with existing agricultural expertise seeking an efficient approach to cultivating their crops. Furthermore, it is a cost-effective and time-efficient object for daily use by farmers. The device is capable of monitoring and providing valuable information for an extended period of time in all Portuguese cities, as well as in agricultural fields and on very small domestic farms. By facilitating access to precision agriculture through the integration of IoT technologies, this work contributes to the advancement of the field by providing a user-friendly system that empowers individuals, regardless of their agricultural expertise, to make informed decisions about resource management and crop selection.

Future work could focus on developing a system for identifying the optimal vegetable to plant in different country, considering the unique climatic conditions and agricultural practices of that country. The device could also need to be capable of adapting to the ever-changing climate. The implementation of these future work objectives would result in a notable enhancement of the device's performance, while also ensuring its compatibility with all regions worldwide. This would facilitate the work of farmers worldwide and provide a teaching aid for those new to the field.

VI. REFERENCES

- [1] Mehrabi, Z. (2023). Likely decline in the number of farms globally by the middle of the century. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01110-y>

- [2] *World Population Growth Rate 1950-2024*. (2024). Macrotrends.net. <https://www.macrotrends.net/global-metrics/countries/WLD/world/population-growth-rate>
- [3] Lorenzen, Rachel P., and Stephan Lorenzen. "Changing Realities—Perspectives on Balinese Rice Cultivation." *Human Ecology*, vol. 39, no. 1, 17 Aug. 2010, pp. 29–42, <https://doi.org/10.1007/s10745-010-9345-z>.
- [4] Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376. <https://doi.org/10.1109/comst.2015.2444095>.
- [5] Nayyar, A., & Puri, V. (2016, November 9). Smart farming: IoT based smart sensors agriculture stick for live temperature and moisture monitoring using Arduino, cloud computing & solar technology. ResearchGate. <https://doi.org/10.1201/9781315364094-121>
- [6] Adetiba, Emmanuel, et al. "Development of an IoT Based Data Acquisition and Automatic Irrigation System for Precision Agriculture." *2022 IEEE Nigeria 4th International Conference on Disruptive Technologies for Sustainable Development (NIGERCON)*, 17 Apr. 2022, <https://doi.org/10.1109/nigercon54645.2022.9803132>.
- [7] Lakshmi Prabha, Kakkanallur Ethirajan, and Chinnathambi Govindaraju. "Hydroponic-Based Smart Irrigation System Using Internet of Things." *International Journal of Communication Systems*, 1 July 2019, p. e4071, <https://doi.org/10.1002/dac.4071>.
- [8] A. K. Singh, K. Verma, and M. Raj, "IoT based smart agriculture system," in 2021 5th International Conference on Information Systems and Computer Networks (ISCON). IEEE, 2021, pp. 1–4
- [9] Rabiou, A., Adesanya, M., Akpenpuun, T., Ogunlowo, Q., Rabiou, A., Adesanya, M., Dutta, P., Kim, H-T., & Lee, H-W. (2023). Review of Temperature Management Strategies and Techniques in the Greenhouse Microenvironment Review of Temperature Management Strategies and Techniques in the Greenhouse Microenvironment. 6(2), 126–147.
- [10] Cm2302/dht22 temperature and humidity sensor, 3.3-5 vdc, temperature range -40°C to 80°C, humidity level 0-99.9%, white. (n.d.). www.velleman.eu. <https://www.velleman.eu/products/view/?id=459226>
- [11] "Precio Sonda de Temperatura Impermeable DS18B20 3 Metros." Shelly Espana, www.shellyespana.com/sonda-de-temperatura-impermeable-ds18b20-3-metros/.
- [12] Watering Unit with Moisture Sensor and Pump. (n.d.). M5stack-Store. Retrieved <https://shop.m5stack.com/products/watering-unit-with-moisture-sensor-and-pump>
- [13] *Soil moisture and water level sensor, 5 vdc, white*. (n.d.). www.velleman.eu. <https://www.velleman.eu/products/view/?id=459210>
- [14] *m5-docs*. (n.d.). [Docs.m5stack.com](https://docs.m5stack.com/en/unit/gps). <https://docs.m5stack.com/en/unit/gps>
- [15] *Heltec WiFi LoRa 32 V2 - 868MHz*. (n.d.). MolukasLabs Shop. Retrieved July 16, 2024, from <https://shop.molukas.com/es/nodos/36-heltec-wifi-lora-32-v2-868mhz.html>
- [16] LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview. (2019). https://loradevelopers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf
- [17] Lalle, Y., Fourati, L. C., Fourati, M., & Barraca, J. P. (n.d.). A Comparative Study of LoRaWAN, SigFox, and NB-IoT for Smart Water Grid | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. ieeexplore.ieee.org. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9044961>
- [18] steve. *How MQTT Works -Beginners Guide*. 4 June 2018, www.steves-internet-guide.com/mqtt-works/.
- [19] BasuMallick, Chiradeep. "A Diagrammatic Representation of the MQTT Process," Spiceworks.com, 11 July 2022,
- [20] Calendário da horta por regiões em Portugal | 2024. (2022, January 19). <https://www.hortasbiologicas.pt/calendario-da-horta-por-regioes-em-portugal/>