

Oriol Norberto González

**XARXA DE SENSORS SENSE FILS PER A LA MONITORITZACIÓ
DE PARTÍCULES EN SUSPENSÍO**

TREBALL DE FI DE GRAU

dirigit pel Dr. Eduard Lobet Valero

Grau d'Enginyeria de Sistemes i Serveis de Telecomunicacions



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2023

Agraïments

M'agradaria expressar la meua gratitud a tots els que m'han acompanyat durant la realització d'aquest treball, ja que han estat uns mesos de molta feina, molta recerca, i s'han hagut de solucionar molts problemes pel camí, i sense ells no hauria estat possible tot això.

Al meu tutor, el Dr. Eduard Llobet Valero que m'ha guiat durant el desenvolupament de tot el treball, i també al Xavier Blanch, qui m'ha donat suport en els aspectes tècnics i amb l'experiment final.

També voldria agrair el suport moral dels meus pares i de la meua parella, que han estat imprescindibles durant l'etapa final del grau.

Resum

Aquest Treball de Fi de Grau es basa en el desenvolupament d'una xarxa de sensors sense fils per a la monitorització al núvol de partícules en suspensió. Es realitza un estudi per separat sobre les xarxes de sensors, les partícules en suspensió i els sensors comercials per detectar-les. Finalment, es desenvolupa un prototip que compleixi amb tots els requisits d'una xarxa de sensors sense fils. Per dur a terme aquesta tasca s'ha utilitzat l'estàndard de comunicació LoRaWAN per establir connectivitat entre els nodes de la xarxa. Utilitzant Wi-Fi, s'aconsegueix vincular el *gateway* a un punt d'accés a Internet per pujar les dades de les mesures preses. Els mòduls que s'han programat són els TTGO LoRa32-OLED V1, els quals portaven connectats un DFRobot Gravity: PM_{2,5} Air Quality Sensor excepte el *gateway*. El codi s'ha desenvolupat a l'IDE d'Arduino i les dades s'han pujat a la plataforma d'anàlisi IoT de MathWorks anomenada ThingSpeak.

Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado se basa en el desarrollo de una red de sensores inalámbrica para la monitorización en la nube de partículas en suspensión. Se realiza un estudio por separado sobre las redes de sensores, las partículas en suspensión y los sensores comerciales para detectarlas. Finalmente, se desarrolla un prototipo que cumpla con todos los requisitos de una red de sensores inalámbrica. Para llevar a cabo esta tarea, se ha utilizado el estándar de comunicación LoRaWAN para establecer conectividad entre los nodos de la red. Utilizando Wi-Fi, se consigue vincular el *gateway* a un punto de acceso a Internet para subir los datos de las medidas tomadas. Los módulos que se han programado son los TTGO LoRa32-OLED V1, los cuales tenían conectados un DFRobot Gravity: PM_{2,5} Air Quality Sensor excepto el *gateway*. El código se ha desarrollado en el IDE de Arduino y los datos se han subido a la plataforma de análisis IoT de MathWorks llamada ThingSpeak.

Abstract

This Final Degree Project is based on the development of a wireless sensor network for monitoring suspended particles in the cloud. Research is carried out separately on sensor networks, suspended particles and sensors to detect them. Finally, a prototype that meets all the requirements of a wireless sensor network, is developed. To carry out this task, the LoRaWAN communication standard has been used to establish connectivity between the nodes of the network. Using Wi-Fi, the gateway is linked to an Internet access point to upload the data from the measurements taken. The modules that have been programmed are the TTGO LoRa32-OLED V1, each of which had a DFRobot Gravity: PM_{2.5} Air Quality Sensor connected except for the gateway. The code was developed in the Arduino IDE and the data was uploaded to the MathWorks IoT analytics platform called ThingSpeak.

Índex

1. Introducció.....	10
1.1. Context i antecedents	10
1.2. Objectius.....	10
1.3. Limitacions	11
1.4. Estructura del document	11

Marc Teòric

12

2. Xarxes de sensors sense fils i la IoT	12
2.1. Definició i característiques generals	12
2.2. Topologies de xarxa en les WSN	14
2.2.1. <i>Estrella</i>	14
2.2.2. <i>Malla</i>	15
2.2.3. <i>Arbre</i>	15
2.2.4. <i>Bus</i>	16
2.2.5. <i>Híbrida</i>	16
2.3. Aplicacions de les WSN.....	16
2.4. Protocols de comunicació en les WSN	17
2.4.1. <i>ZigBee</i>	17
2.4.2. <i>Bluetooth Low Energy</i>	19
2.4.3. <i>LoRaWAN</i>	20
2.4.4. <i>Wi-Fi</i>	23
2.4.5. <i>Altres protocols</i>	24
2.5. Comparació dels estàndards i elecció pel prototip	24
2.6. Alimentació dels nodes i estalvi energètic	26
3. Partícules en suspensió i qualitat de l'aire	28
3.1. Definició, origen i classificació de les partícules en suspensió.....	28
3.2. Tècniques de mesura de les partícules en suspensió utilitzades per sensors comercials	33

Part experimental.....	35
4. Disseny i implementació d'una WSN per a la monitorització de partícules en suspensió	35
4.1. Estudi dels sensors de partícules en suspensió i tria pel prototip	35
4.2. Mòduls utilitzats pel prototip	39
4.3. Disseny de l' <i>end-node</i> i del <i>gateway</i> del prototip.....	44
4.4. Pressupost del prototip creat	45
4.5. Entorn de programació	45
4.6. Entorn de visualització de les dades.....	46
5. Experiment i anàlisi dels resultats	49
5.1. Experiment realitzat.....	49
5.2. Anàlisi dels resultats	50
6. Conclusions i línies futures	54
7. Referències i webgrafia.....	55
8. Annexos.....	59
8.1. Codi d'un dels <i>end-nodes</i> transmissors amb sensor.....	59
8.2. Codi del node receptor que actuarà com a <i>gateway</i> amb Wi-Fi	61

Llistat d'acrònims

3GPP	3rd Generation Partnership Project
AAL	Ambient-Assisted Living
ADC	Analog-to-Digital Converter
AES	Advanced Encryption Standard
API	Application Programming Interface
AP	Access Point
BLE	Bluetooth Low Energy
BR/EDR	Basic Rate/Enhanced Data Rate
BW	Bandwidth
CLI	Command-Line Interface
CO	Monòxid de Carboni
COV	Compostos Orgànics Volàtils
CR	Coding Rate
CSS	Chirp Spread Spectrum
CSV	Comma-Separated Values
EUI	Extended Unique Identifier
GPIO	General Purpose Input/Output
I2C	Inter-Integrated Controller
ID	Identificador
IDE	Integrated Development Environment
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineering
IoT	Internet of Things
IR	Infraroig
ISM	Industrial, Scientific and Medical
FFD	Full Function Device
FSK	Frequency Shift Keying

LPWAN	Low Power Wide Area Network
LTE-M	Long Term Evolution – Machine type communication
M2M	Machine to Machine
MCU	Microcontroller Unit
MPOC	Malaltia Pulmonar Obstructiva Crònica
NDIR	Non-Dispersive Infrared
NB-IoT	Narrowband-Internet of Things
NO_x	Òxid de Nitrogen
O₃	Ozó
OMS	Organització Mundial de la Salut
PM	Particulate Matter
PST	Partícules en Suspensió Totals
RF	Radiofreqüència
RFD	Reduced Function Device
SCL	Serial Clock
SDA	Serial Data
SF	Spreading Factor
SO₂	Diòxid de Sofre
SPI	Serial Peripheral Interface
TFG	Treball Final de Grau
TTIG	The Things Indoor Gateway
TTN	The Things Network
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Network
XML	Extensible Markup Language

Llistat de figures

Figura 2.1. Arquitectura general d'una WSN.....	12
Figura 2.2. Diagrama de la composició d'un end-node.....	14
Figura 2.3. Diagrama de la topologia d'estrella d'una xarxa.	14
Figura 2.4. Diagrama de la topologia de malla d'una xarxa.....	15
Figura 2.5. Diagrama de la topologia d'arbre d'una xarxa.....	15
Figura 2.6. Diagrama de la topologia de bus d'una xarxa.....	16
Figura 2.7. Diagrama d'una topologia híbrida que combina estrella i bus.....	16
Figura 2.8. Diagrama de xarxa ZigBee.....	18
Figura 2.9. Diagrama d'una scatternet Bluetooth.....	20
Figura 2.10. Diagrama d'exemple d'una xarxa LoRaWAN.....	20
Figura 2.11. Arquitectura LoRaWAN amb modulació LoRa.....	21
Figura 2.12. Gràfic potència – temps d'un node a una WSN.....	26
Figura 3.1. Comparació de la mida de les partícules amb un cabell humà.....	28
Figura 3.2. Classificació del PM de l'atmosfera en escala logarítmica.....	30
Figura 3.3. Afectació de la PM10 a les vies respiratòries.....	30
Figura 3.4. Compostos contaminants atmosfèrics PM _{2,5}	31
Figura 3.5. Afectació de la PM _{2,5} a les vies respiratòries.....	32
Figura 3.6. Penetració de les diferents partícules a les vies respiratòries.....	32
Figura 3.7. Comportament d'un sensor de dispersió làser.....	33
Figura 3.8. Diagrama de funcionament d'un sensor NDIR.....	34
Figura 4.1. Sensor PM de Nova SDS011.....	35
Figura 4.2. Sensor DSM501A.....	36
Figura 4.3. Sensor GP2Y1010AU0F.....	36
Figura 4.4. Sensor Metriful MS430.....	36
Figura 4.5. Sensor SGP30 de Sensirion.....	37
Figura 4.6. DFRobot Gravity: PM2.5 Air Quality Sensor.....	37
Figura 4.7. Diagrama de blocs del funcionament del sensor de PM de DFRobot.....	38
Figura 4.8. Heltec WiFi LoRa 32 (V2).....	39
Figura 4.9. The Things Indoor Gateway.....	39
Figura 4.10. Pàgina per registrar un gateway a The Things Network.....	40
Figura 4.11. Dragino LG01-P indoor gateway.....	40
Figura 4.12. Heltec WiFi LoRa 32 (V3).....	41

Figura 4.13. TTGO LoRa32-OLED V1.	42
Figura 4.14. Diagrama dels pins del mòdul TTGO LoRa32-OLED V1.	43
Figura 4.15. Interfície I-PEX i connector de l'antena.	43
Figura 4.16. Diagrama del muntatge del sensor connectat al mòdul LoRa.	44
Figura 4.17. Prototip final de la WSN.	45
Figura 4.18. Interfície de l'IDE d'Arduino.	46
Figura 4.19. Creació d'un canal a ThingSpeak.	47
Figura 4.20. Menú principal del canal.	48
Figura 4.21. Pestanya de les API Keys de ThingSpeak.	48
Figura 5.1. Vapor d'una cigarreta electrònica sobre el sensor de PM de DFRobot.	49
Figura 5.2. Pot d'acetat de trans-2-Hexenil sota el sensor de PM de DFRobot.	49
Figura 5.3. Acetat de trans-2-Hexenil.	50
Figura 5.4. Recepció de dades al <i>gateway</i>	50
Figura 5.5. Visualització de les dades a ThingSpeak.	50
Figura 5.6. Detecció del vapor al node 1 de la xarxa.	51
Figura 5.7. Detecció del vapor al node 2 de la xarxa.	52
Figura 5.8. Mesures fetes sota la presència d'acetat de trans-2-Hexenil.	53

Llistat de taules

Taula 2.1. Característiques de ZigBee.	18
Taula 2.2. Característiques de Bluetooth Classic i Bluetooth LE.	19
Taula 2.3. Característiques de LoRaWAN.	21
Taula 2.4. Característiques de Wi-Fi 5.	23
Taula 2.5. Comparació de les característiques dels protocols de comunicació.	25
Taula 4.1. Especificacions del DFRobot Gravity: PM2.5 Air Quality Sensor.	38
Taula 4.2. Especificacions del mòdul TTGO LoRa32-OLED V1.	42
Taula 4.3. Relació entre els pins del SX1276 i de la ESP32 a través de SPI.	43
Taula 4.4. Relació de les línies de comunicació I2C amb els pins de la ESP32 del mòdul TTGO LoRa32-OLED V1.	44
Taula 4.5. Pressupost del prototip.	45

1. Introducció

1.1. Context i antecedents

La contaminació de l'aire és un problema existent i realment alarmant que concerneix a tota la població mundial.

Segons la **OMS**, al voltant de 7 milions de morts són conseqüència de la contaminació atmosfèrica, és a dir, una vuitena part del total de defuncions anuals. [1]

Entre les patologies més comuns causades per la contaminació es troben la cardiopatia isquèmica, els accidents cerebrovasculars, la pneumopatia obstructiva crònica, infeccions de les vies respiratòries o el càncer de pulmó. [1]

Tot i que l'emissió de substàncies contaminants per l'atmosfera també es produeix de forma natural, és evident que aquestes emissions en gran proporció provenen de fonts antropogèniques que agreugen encara més aquest problema. Activitats del sector industrial i químic, combustió de residus, activitats agràries, el transport públic i privat, i fins i tot productes d'ús quotidià com pintures o aerosols, són contribuents a augmentar l'índex de contaminació, tant ambiental com domèstic. [2]

1.2. Objectius

L'objectiu d'aquest projecte és dissenyar i implementar un sistema per la detecció de la concentració de partícules en suspensió d'un interior, ajudant a prevenir els riscos i problemes de salut esmentats anteriorment.

Per dur a terme aquesta tasca s'abordaran els següents aspectes:

- Estudi de les xarxes de sensors i la IoT per monitoritzar la qualitat de l'aire.
- Estudi dels diferents protocols de comunicació i tria del més adient per desenvolupar aquesta aplicació de la forma més eficient possible.
- Estudi dels diferents tipus de partícules en suspensió per determinar el perill i la nocivitat que aquestes representen.
- Estudi de les tècniques de mesura que existeixen per la detecció de partícules i tria d'una metodologia emprada per un sensor comercial.
- Disseny i implementació d'un prototip de WSN per a la monitorització de partícules en suspensió.

1.3. Limitacions

Cal tenir en compte que la finalitat d'aquest projecte és íntegrament acadèmica, per tant existeixen certes limitacions econòmiques que impedeixen desenvolupar una solució òptima a la problemàtica que es pretén abordar.

El projecte s'ha realitzat dins d'uns marges assequibles per tal de validar el correcte funcionament d'un prototip de xarxa, que s'aproxima en termes pràctics al que podria ser una solució comercial.

1.4. Estructura del document

Aquest document està organitzat amb un índex de vuit punts que es poden agrupar en dos grans blocs. El primer, engloba tot el marc teòric del projecte:

Començant per la introducció, la qual serveix per exposar el problema que representa la contaminació de l'aire i quines conseqüències en poden derivar. També s'indiquen clarament els objectius i limitacions del treball.

El següent punt brinda informació sobre les **xarxes de sensors** i la **IoT**, així com les característiques dels estàndards de comunicació. Es presenta també una comparativa entre aquests i de manera justificada es tria el protocol de comunicació que s'utilitzarà en el prototip mencionat en el punt anterior.

Tot seguit, es tracten els fonaments teòrics relacionats amb les partícules en suspensió, la classificació d'aquestes mitjançant el concepte de **PM**, així com l'estat de l'art en les tècniques de mesurament que utilitzen els diferents sensors comercials.

El segon bloc es focalitza en el marc experimental:

Inicialment s'explica tot el hardware utilitzat en el desenvolupament del prototip, des dels components de la xarxa com els mòduls emprats pels nodes o el *gateway* fins els sensors adquirits. També s'explica tota la part de software utilitzat, com l'entorn de programació dels nodes de la xarxa, o el motor gràfic per representar les dades obtingudes.

A continuació, s'exposa el disseny de l'experiment que es realitza per validar el funcionament del prototip. S'analitzen els resultats i es presenten les conclusions pertinents.

Per acabar, s'adjunten els codis utilitzats pel prototip en un annex al final del document.

Marc Teòric

2. Xarxes de sensors sense fils i la IoT

2.1. Definició i característiques generals

Les xarxes de sensors sense fils (WSN) estan conformades per un conjunt de dispositius autònoms amb la capacitat de mesurar i monitoritzar diferents magnituds físiques i ambientals [3]. Aquests dispositius s'interconnecten mitjançant diverses topologies i protocols de comunicació amb l'objectiu d'enviar les dades a un node central o *sink node*. [4]

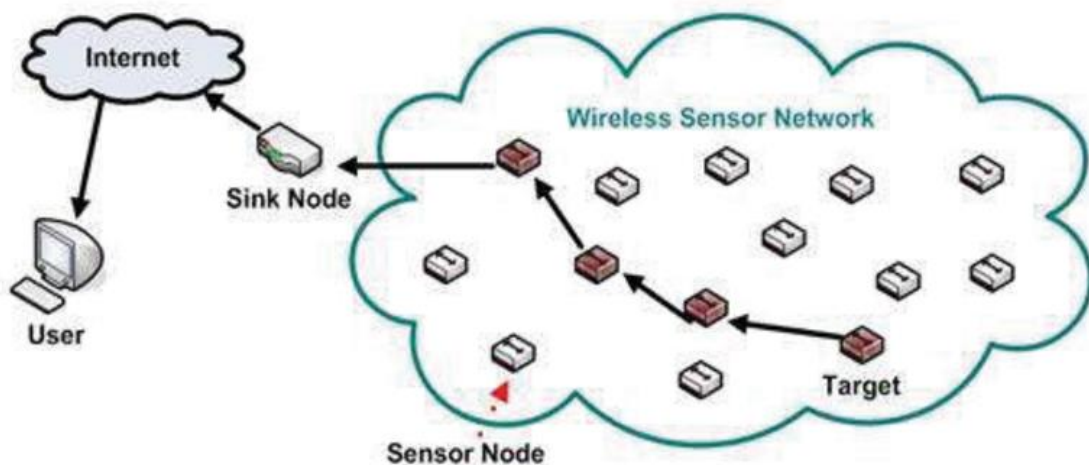


Figura 2.1. Arquitectura general d'una WSN. [5]

La IoT juga un paper fonamental en aquest projecte ja que la nostra xarxa de sensors necessitarà connectivitat a Internet en el node central, fent la funció de *gateway*. Això farà que la WSN pugui estar constantment connectada i monitoritzada. Les mesures fetes pels sensors estaran sempre actualitzades en temps real, el que permetrà detectar anomalies ràpidament i actuar en conseqüència per evitar els riscos de l'exposició a un ambient contaminant.

Les WSN tenen una sèrie de característiques que fan que siguin les idònies per desenvolupar aquest projecte, ja que l'absència de fils fa que la instal·lació dels nodes pràcticament no interfereixi en la resta d'elements del recinte ni incomodi els usuaris d'un espai tant en un interior com a l'aire lliure.

Algunes de les característiques més notòries de les WSN són les següents:

- Distribució en l'espai: Els nodes estan distribuïts en l'espai. A més, poden estar en una posició fixa o mòbil. [6]
- Autoconfiguració: Els nodes poden fer-se per detectar dades o bé oferir serveis d'encaminament entre nodes no consecutius, convertint-se tant en emissors com en receptors de la informació. [6,7]

- Robustesa: Gràcies a la possibilitat de configurar les WSN com a xarxes *ad-hoc*¹, aquestes poden implementar protocols de cerca d'altres nodes de forma no centralitzada, de manera que els permet conèixer la posició dels altres nodes i en conseqüència la topologia de la xarxa, utilitzant comunicacions *multi-hop*². Això facilita el manteniment de la xarxa notablement, la qual és més robusta i resistent a caigudes de nodes i fallides. [7]
- Escalabilitat: Les xarxes de sensors son fàcilment escalables afegint nodes a la xarxa, ja que els altres nodes, descobriran automàticament l'existència dels nous comunicant-se amb ells tal i com s'ha mencionat en el punt anterior. [7]
- Composició d'un node: cada node té diverses parts. El component principal és el **sensor**, el qual s'encarrega de generar un senyal elèctric proporcional a la detecció d'un canvi en una magnitud física.

Aquest senyal analògic, es digitalitza amb un **conversor analògic a digital** (ADC).

A continuació, ens trobem amb el **microcontrolador** (MCU), el qual rep el senyal digital que prèviament ha transformat el ADC. Aquest té la capacitat de tractar les dades mitjançant un algorisme i obtenir la informació de la mesura captada pel sensor.

Un cop tenim les dades de la mesura, el MCU pot enviar-les al **transceptor**, el qual disposa d'una antena que emet i rep ones electromagnètiques amb les dades tractades, o bé cap a una memòria externa si és necessari en funció de l'aplicació de la WSN en qüestió.

Com es lògic, cada node té un funcionament independent i necessita d'una **font d'alimentació**. Per això, s'utilitzen bateries si el consum del node es relativament baix o eficient, o bé s'utilitzen tècniques de recollida d'energia o *Energy Harvesting*.

Una tècnica de recollida d'energia força típica en aquests casos consistiria en aprofitar els senyals captats per alimentar les bateries dels nodes i prolongar la seva autonomia. [6,8]

¹ Les xarxes *ad-hoc* són aquelles on els dispositius es comuniquen directament entre sí, sense la necessitat d'un control central i poden estar formades per qualsevol conjunt de dispositiu *wireless*.

² És el procés de transmissió de dades d'un node a un altre dins d'una mateixa xarxa, fins que el datagrama o conjunt de datagrames arriben a la seva destinació final.

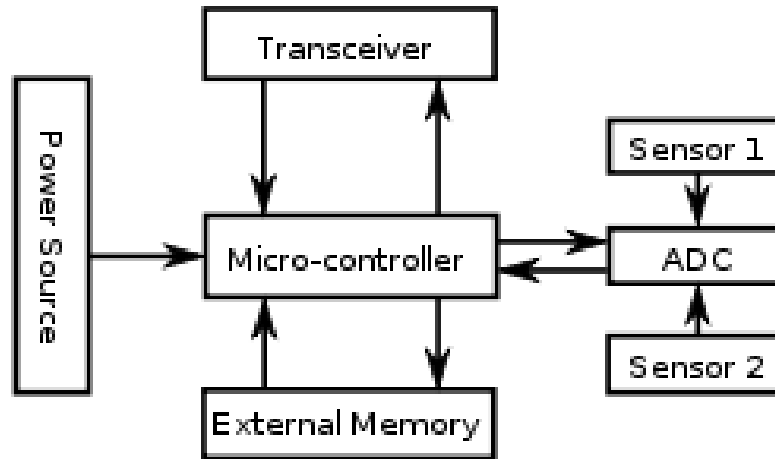


Figura 2.2. Diagrama de la composició d'un end-node. [8]

2.2. Topologies de xarxa en les WSN

Les xarxes de sensors es distribueixen de diferents formes segons els requeriments i propòsits que tingui la seva aplicació. Entre totes les topologies diferents en les que es pot configurar una xarxa, les més típiques de les xarxes de sensors sense fils són les següents:

2.2.1. Estrella

Aquesta topologia s'implementa mitjançant un **AP** que fa de sink node o node central. Els altres nodes de la xarxa, es connecten directament a l'AP utilitzant comunicacions sense fils, formant un patró similar a una estrella, motiu pel qual rep aquest nom. Aquesta configuració permet una gran flexibilitat a l'hora de distribuir els *end-nodes* de la xarxa ja que la comunicació amb l'AP sempre serà directa, sense necessitat d'encaminar els paquets a través d'altres nodes. Tot i això, existeixen alguns inconvenients amb aquesta topologia, com podrien ser les interferències o l'atenuació del senyal rebut per l'AP en cas que la seva distància amb el node que envia informació sigui relativament elevada. El major problema de la xarxa és que si el node central deixa de funcionar, cau tota la xarxa. [9-11]

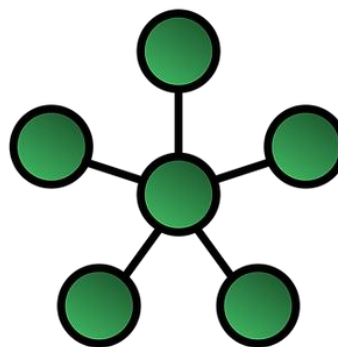


Figura 2.3. Diagrama de la topologia d'estrella d'una xarxa. [11]

2.2.2. Malla

En la topologia de malla, cada node de la xarxa es connecta directament a altres nodes veïns, creant així diversos camins dins de la xarxa més coneguts com a **rutes** o **paths**. Les dades es transmeten utilitzant la tècnica de transmissió de *multi-hop*. Aquesta topologia és molt més robusta i fiable, ja que si cau un node, la xarxa disposa encara d'altres rutes per seguir encaminant dades fins al seu destí. Com a inconvenient, es pot mencionar que aquesta topologia requereix d'algorismes o protocols d'encaminament complexos com podria ser l'algorisme de Dijkstra [12], els quals introduirien una major latència en la transmissió de dades. [9-11]

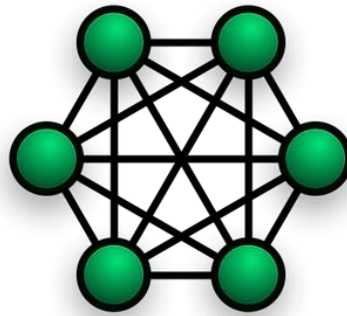


Figura 2.4. Diagrama de la topologia de malla d'una xarxa. [11]

2.2.3. Arbre

Els nodes o dispositius estan organitzats de manera **jeràrquica** en la topologia d'arbre. Un dispositiu central, anomenat **arrel**, es connecta amb dispositius secundaris a través de **branques**, seguidament, aquests nodes es connecten a través de **sub-branques** als següents nodes de l'arbre i així successivament fins als últims de la xarxa. Com es pot deduir de qualsevol sistema jeràrquic, si falla un node de la xarxa, tots els que siguin jeràrquicament inferiors quedaran aïllats de la resta. En cas que falli l'arrel, les diferents branques quedaran separades sense connexió entre elles. Per altra banda, aquesta topologia té una transmissió de dades més eficient, ja que no necessita protocols d'encaminament que provoquin un augment de latència. El camí que pren les dades sempre és el mateix en funció del node d'on provingui la informació, saltant per les sub-branques i branques que porten fins al node arrel. [9-11]

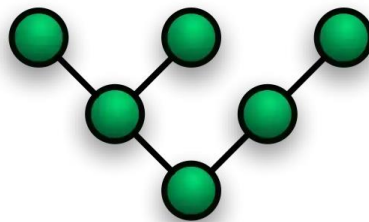


Figura 2.5. Diagrama de la topologia d'arbre d'una xarxa. [9]

2.2.4. Bus

En la topologia de bus, els nodes utilitzen un medi compartit per comunicar la informació. Aquest medi s'anomena **bus** i normalment és un medi físic. Tot i que en les WSN no s'utilitza massa aquesta topologia, en un context sense fils, el bus podria ser associat a un canal o freqüència compartida. És una topologia molt eficient en xarxes petites o de poc abast, ja que tots els nodes estan interconnectats a través d'aquest bus. La xarxa pot patir problemes de col·lisions si diversos nodes intenten transmetre de forma simultània. [9-11]

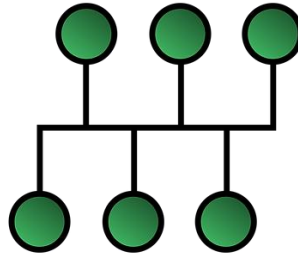


Figura 2.6. Diagrama de la topologia de bus d'una xarxa. [9]

2.2.5. Híbrida

És una combinació de les altres topologies. S'utilitza principalment per adaptar la xarxa a les necessitats de l'aplicació que aquesta ha de dur a terme. És molt més complexa però també permet una alta flexibilitat i personalització. [9-11]

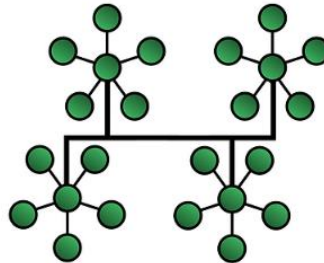


Figura 2.7. Diagrama d'una topologia híbrida que combina estrella i bus. [11]

2.3. Aplicacions de les WSN

Els camp d'aplicació de les WSN és realment ampli. Gràcies a la IoT, la connectivitat de l'entorn i la disponibilitat d'informació a temps real és un fet que en molts àmbits ja està tenint un gran impacte mitjançant les xarxes de sensors sense fils alguns dels camps d'aplicació més rellevants són els següents:

- Mediambiental: en aquest camp trobem aplicacions molt diverses com podrien ser detecció d'inundacions, incendis o fins i tot activitat sísmica. Hi ha molts tipus de sensors que permeten mesurar magnituds físiques com els sensors de temperatura, els sensors d'humitat, de pressió baromètrica. També n'hi ha d'altres que mesuren concentracions de partícules i determinar la contaminació de l'aire o l'aigua. [4]

- **Salut i benestar:** les aplicacions en salut i benestar son ben diverses. Podem trobar aplicacions per mesurar constants vitals, com ara monitoratge d'activitat cardiovascular, activitat física o muscular o activitat respiratòria. També ens trobem aplicacions en AAL, dedicades a aquelles persones amb dificultats en el seu dia a dia com les persones de la 3a edat, o gent discapacitada que viuen sols. Aquest sector comptaria amb funcions com detecció de caigudes, o fins i tot d'activitat mental. [4]
- **Llar:** en aquest àmbit també podem utilitzar xarxes de sensors per monitoritzar o automatitzar algunes parts de la casa. La domòtica engloba moltes de les aplicacions que es poden trobar en un domicili funcionant sota xarxes de sensors, com poden ser sensors de moviment per a la seguretat, detecció de fum i incendis o fins i tot aplicacions destinades a l'estalvi energètic. [4]
- **Militar:** les xarxes de sensors també tenen lloc dins dels conflictes bèl·lics. La monitorització de forces amigues, d'equipament i munició, el reconeixement del terreny o vigilància, són activitats on les xarxes de sensors tenen un gran pes. Alguns dels sensors que es podrien utilitzar són sensors de vibració, sensors magnètics, per detectar tancs entre d'altres coses, o sensors IR. [4]
- **Altres:** com ja s'ha dit a l'inici d'aquest punt, les aplicacions de els WSN són molt extenses i pràcticament semblen no tenen límit. Hi ha moltes aplicacions possibles en altres àmbits a part dels que ja s'han mencionat en aquest punt com podria ser en el món de l'automoció o les *Smart Cities*. També cal mencionar aplicacions en l'àmbit industrial o agrícola per agilitzar l'eficiència de les tasques i dels recursos.

2.4. Protocols de comunicació en les WSN

Per la interacció entre nodes d'una xarxa de sensors sense fils, és necessari un protocol o estàndard de comunicació. Aquests estàndards defineixen com es transmeten o es reben les dades, i també com es coordinen els diferents dispositius de la xarxa.

A les xarxes de sensors sense fils, els estàndards s'han desenvolupat sota la premissa indispensable de que el consum energètic sigui baix. D'altra manera, una xarxa de sensors sense fils no seria útil, ja que requeriria d'un manteniment i canvi de bateries molt sovint, això comportaria una despesa de temps i de recursos humans més freqüent del necessari.

A continuació, es presenten alguns dels estàndards de comunicació més globalitzats per les xarxes de sensors sense fils, amb les seves característiques més importants:

2.4.1. ZigBee

ZigBee és un protocol de comunicació basat en l'estàndard **IEEE 802.15.4**, estàndard que regula les WPAN. És un protocol candidat per ser utilitzat per la xarxa que es vol

desenvolupar en aquest projecte ja que és probablement una de les tecnologies més utilitzades per xarxes de sensors sense fils en tot el món [6].

A continuació es presenten les característiques més importants de ZigBee i s'explica la seva estructura de xarxa:



Abast	10 – 100 m
Bandes de freqüència	868 MHz (UE), 915 MHz,(EUA), 2,4 GHz (High band)
V _{max} de transmissió	250 kbps
Latència	30 ms
Nodes per xarxa	Fins a 2 ¹⁶
Durada de les bateries	Anys
Consum	3 µA – 30 mA

Taula 2.1. Característiques de ZigBee. [6, 13-17]

L'estructura de xarxa ZigBee conté 3 tipus de dispositiu diferents:

- Un **node coordinador** o *sink* per xarxa que la regula i determina les diferents rutes entre nodes.
- **Routers** que interconnecten els dispositius que no tenen connectivitat directa entre sí. La seva funcionalitat principal és adreçar paquets, tot i que també poden funcionar com a *end-device* per aquella xarxa.
- **End-devices** que poden incorporar sensors i actuadors depenent de les necessitats de la xarxa. Es prioritza que estiguin en mode *sleep* per aprofitar al màxim la duració de les bateries. [6, 14]

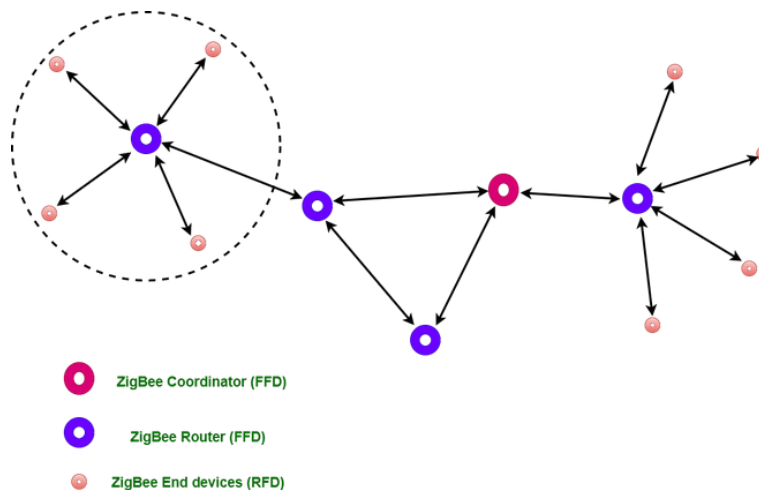


Figura 2.8. Diagrama de xarxa ZigBee. [16]



Aquests, també es classifiquen en **Full Function Devices (FFD)** o bé **Reduced function Devices (RFD)**. Els primers estan sempre actius i poden emetre dades de forma autònoma. Tenen més capacitat computacional i de memòria, mentre que els segons tenen funcionalitats més limitades i tan sols responen peticions dels FFD.

2.4.2. Bluetooth Low Energy

Tant el **Bluetooth** clàssic com el **Bluetooth Low Energy (BLE)** o **Bluetooth 4.0** es basen en l'estàndard **IEEE 802.15.1**. Aquest protocol de comunicació s'ha convertit en una opció bastant comuna a l'hora de desenvolupar xarxes de sensors sense fils degut a les seves característiques.

A diferència del Bluetooth clàssic, el seu consum és molt més baix, però a canvi també d'una menor velocitat de transmissió de dades. Això implica, com és lògic, que tenen aplicacions diferents. Mentre que el Bluetooth clàssic s'utilitza per la transferència arxius multimèdia, o per fer *streaming* d'àudio en un altre dispositiu, el BLE s'utilitza per exemple, per transmetre dades de sensors. [18]

Vegem la comparativa entre les dues versions de Bluetooth a la taula següent:

	 Bluetooth	 Bluetooth <small>SMART</small>
Abast	10 – 100 m	10 – 50 m
Bandes de freqüència	2,4 GHz (ISM band)	2,4 GHz (ISM band)
V _{max} de transmissió	3 Mbps	1 Mbps
Latència	100 ms	6 ms
Nodes per xarxa	7	indefinit
Durada de les bateries	Dies	De mesos a anys
Consum	2,5 mA	1 µA – 15 mA

Taula 2.2. Característiques de Bluetooth Classic i Bluetooth LE. [18,19]

L'estructura d'una xarxa Bluetooth LE s'assembla molt al que seria una topologia híbrida entre estrella i malla, però amb alguna petita diferència i utilitzant una altra terminologia. Els dispositius BLE en xarxa confeccionen el que s'anomena una *scatternet*, la qual està formada per dues o més *piconets*. [19]

Cada *piconet*, té un dispositiu central (*master*) i d'altres connectats directament a aquest (*slaves*) com si es tractés d'una xarxa de topologia estrella. [19]

La diferència del que coneixem com una topologia híbrida malla-estrella respecte d'una *scatternet*, és que en la primera, la comunicació entre cada subxarxa de topologia estrella es produeix sempre a través del node central d'aquesta.

En una *scatternet* les diferents *piconets* que la formen poden comunicar-se a través dels respectius dispositius *masters*, però principalment ho fan a través d'un node *slave* el qual comparteixen ambdues *piconets*. Aquest node compartit, s'anomena **bridge**, el qual de vegades pot ser el *master* d'una *piconet*, però un *slave* en una altra [19]. Vegem-ho més clar a la figura següent:

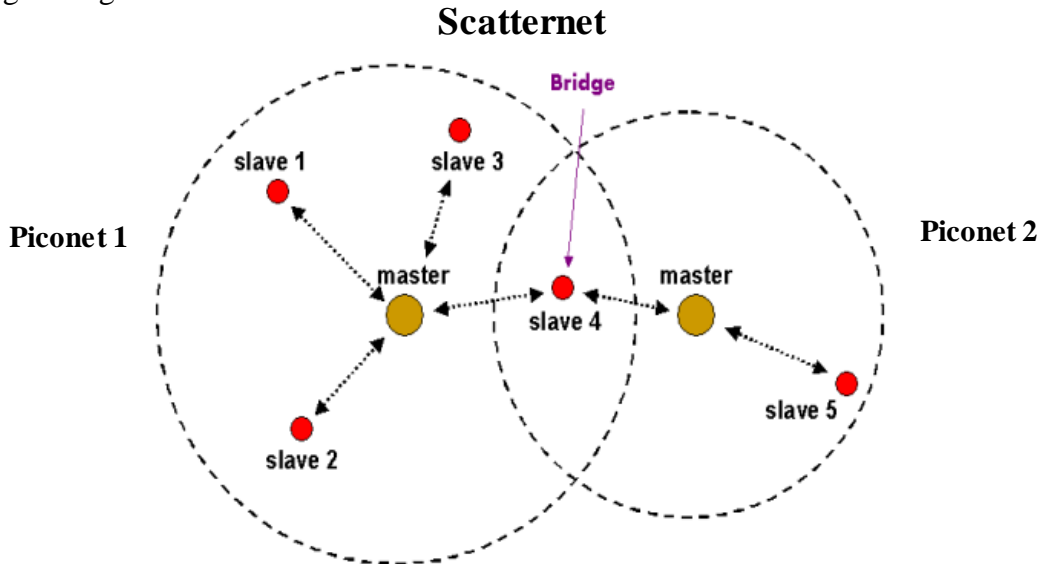


Figura 2.9. Diagrama d'una scatternet Bluetooth. [19]

2.4.3. LoRaWAN

LoRaWAN és un estàndard per optimitzar les **LPWANs**. Globalment, és un dels protocols més utilitzats en aplicacions IoT, ja que les seves característiques encaixen perfectament per aquest ús.

A les xarxes on s'utilitza aquest protocol, tan sols hi ha dos tipus de dispositius: els **end-nodes** i els **gateways**. Vegem un exemple de xarxa **LoRaWAN**:

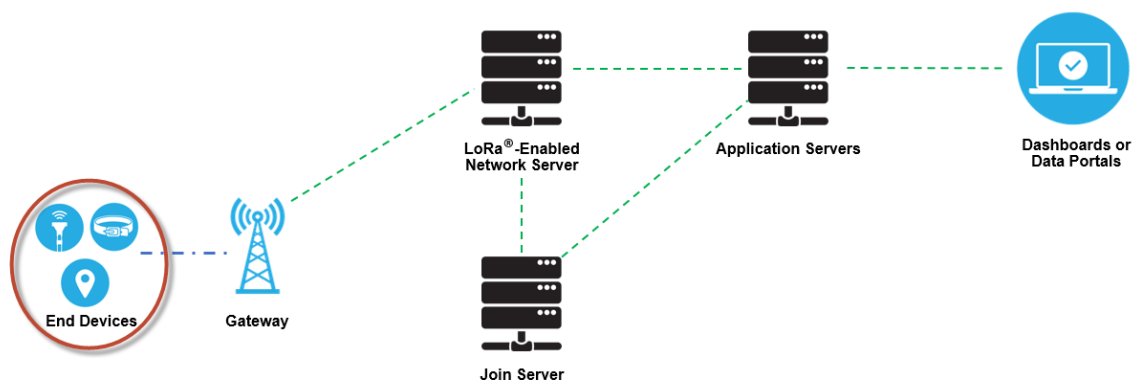


Figura 2.10. Diagrama d'exemple d'una xarxa LoRaWAN. [20]

El protocol LoRaWAN utilitza diversos tipus de modulació segons el propòsit de la xarxa on s'apliqui aquest protocol:

De les tecnologies que hem vist fins ara, si les comparem amb LoRaWAN, destaca clarament l'abast que té aquesta a canvi d'una baixa velocitat de transmissió. Tot això, lògicament tindrà una repercussió a l'hora de determinar la topologia de xarxa entre d'altres factors.

La topologia predominant en les xarxes que utilitzen LoRaWAN com a protocol de comunicació és la topologia d'estrella. Això pot semblar estrany quan hem dit que aquesta topologia pateix molt les interferències o l'atenuació del senyal, però res d'això és un inconvenient quan utilitzem LoRa.

Els chips desenvolupats per **Semtech** tenen una gran sensibilitat. Poden rebre dades a una potència tan baixa com **-168dBm** [21]. Això juntament amb l'abast de les comunicacions d'aquest protocol, fa que la topologia d'estrella sigui idònia ja que no necessita implementar tècniques d'encaminament de paquets ni comunicacions *multi-hop*. Amb un sol enviament directe del node cap al *gateway* és suficient per rebre correctament les dades. [20-22]

La modulació LoRa contempla una sèrie de paràmetres que ens permeten acomodar les característiques de la xarxa a les nostres necessitats. Aquests paràmetres són:

- **Spreading Factor (SF):** Valor comprès entre 7 i 12. S'utilitza per determinar el guany en transmissió i la sensibilitat en recepció. Com més alt sigui, aquests dos paràmetres augmentaran, mentre que la velocitat de transmissió es veurà afectada i disminuirà. Un SF alt, és clau per xarxes d'un gran abast. [20]
- **Coding Rate (CR):** S'utilitza per afegir bits de redundància als datagrames enviats i facilitar la correcció d'errors. Un major valor de CR facilitarà aquesta tasca, però la velocitat de transmissió també disminuirà. [13,20].
- **Bandwidth (BW):** indica l'ample de banda del canal que s'utilitzarà. Per pujada de dades pot ser 125kHz o 500kHz mentre que de baixada ha de ser de 500kHz. [20]

Pel que fa a la seguretat a l'hora d'establir una comunicació a una xarxa LoRaWAN ens trobem amb dos tipus de connexió. Connexió **OTAA (Over The Air Activation)** o bé **ABP (Activation By Personalisation)**.

A les connexions OTAA s'utilitzen tres tipus de claus:

- **DevEUI (Device EUI):** és l'identificador de fàbrica del dispositiu. Alguns dispositius permeten modificar-lo però ha de ser únic. [22]
- **AppEUI (Application EUI):** és un identificador de 8 bytes únic per l'aplicació que classifica els dispositius per xarxa. [22]
- **AppKey (Application Key):** és una clau de 16 bytes que utilitza l'estàndard **AES³**. És una clau compartida entre el servidor i el dispositiu de la xarxa. [22]

³ Algorisme que utilitza una mateixa clau per encriptar i desencriptar dades.

Per establir la comunicació mitjançant **OTAA**, en primer lloc, el node envia al *gateway* una sol·licitud i aquest la reenvia al servidor de l'aplicació. El servidor verifica que el node pertany a l'aplicació corresponent i que l'*AppKey* sigui correcta. Tot seguit, el servidor envia l'adreça del dispositiu a l'aplicació (*DevAddress*), la clau de sessió a l'aplicació (*AppSKey*), i la clau de sessió de xarxa (*NwkSKey*) cap al node, i aquest ja pot comunicar-se en aquella sessió. D'aquesta manera, s'estableix una connexió de forma segura. [22]

El mode **ABP** és més senzill, ja que el node coneix la *DevAddress*, l'*AppSKey* i la *NwkSKey*. D'aquesta manera, se salta directament a l'últim pas i s'estableix una sessió de comunicació del node amb la xarxa. Cal dir, que el mode **ABP**, és més vulnerable perquè totes les dades de la sessió ja les té el dispositiu, no venen donades amb una verificació prèvia. [22]

2.4.4. Wi-Fi

El protocol de comunicacions de radiofreqüència **Wi-Fi** es regeix sobre l'estàndard **IEEE 802.11**. La principal característica diferenciadora dels dispositius que operen amb Wi-Fi, és que poden connectar-se a Internet a través d'un AP.

La majoria de dispositius que treballen sobre **Wi-Fi 5 (IEEE 802.11.ac)** tot i que molts ja estan començant a implementar **Wi-Fi 6 (IEEE 802.11.ax)**, la qual ofereix més velocitat de dades i afegeix la banda de 2,4 GHz a part de la de 5 GHz, a la que ja operava Wi-Fi 5 entre d'altres millores. [13]

Observem les característiques de Wi-Fi:



Abast	70 – 250 m
Bandes de freqüència	5 GHz
V_{\max} de transmissió	6,9 Gbps
Latència	20 – 50 ms
Nodes per xarxa	32
Durada de les bateries	Hores
Consum	20 – 200 mA

Taula 2.4. Característiques de Wi-Fi 5. [13,24,25]

Com podem observar, Wi-Fi ens ofereix una gran velocitat de transmissió de dades i una alta compatibilitat entre les seves versions, tot i que no tot són avantatges.

S'ha de considerar que es vol desenvolupar una WSN, i el seu consum fa que sigui una tecnologia inviable per utilitzar-la en els nodes finals de la nostra xarxa. A més, pel fet de ser una tecnologia tan globalitzada, és possible que hi hagi interferències si hi ha una altra xarxa operant en la mateixa banda freqüencial. A més, si molts dispositius es connecten a un

mateix AP, es pot congestionar la xarxa i que deixi de proporcionar el servei que es desitja. [13]

El que és indispensable en una xarxa Wi-Fi és una bona seguretat. En una tecnologia tan utilitzada mundialment la seguretat és indispensable, ja que si no s'encriptés el tràfic de dades d'una xarxa, qualsevol dispositiu que fes ús de Wi-Fi podria llegir tota la informació que hi circula.

Entre els mètodes de seguretat hi trobem el **WEP** (*Wired Equivalent Privacy*) o el **WPA** (WiFi Protected Access) amb les seves versions **WPA2** que implementa Wi-Fi 5 i **WPA3** que implementa Wi-Fi 6. Les últimes versions de WPA són els mètodes de xifratge més moderns. [13,24]

2.4.5. *Altres protocols*

A part dels protocols ja mencionats i revisats al llarg del punt 2.4, n'hi ha d'altres que no s'estudiaran tan en profunditat, ja que per qüestions com poden ser les seves característiques, la seva accessibilitat o la seva implementació en dispositius comercials, no compleixen amb els requisits que es busquen per dissenyar el prototip de xarxa que es necessita.

Alguns d'aquests són els següents:

- Sigfox: utilitza la banda ISM i té proveïdors arreu del món. A Espanya està operat per Cellnex. És un protocol realment eficient amb un cicle de treball molt baix, de manera que les bateries poden durar anys, però cada dispositiu pot enviar un màxim de 140 paquets al dia. [6]
- NB-IoT: és un protocol de comunicació per a les LPWANs desenvolupat pel 3GPP⁴. És un tipus de **Cellular IoT**, és a dir, utilitza la mateixa infraestructura que els mòbils per connectar-se a Internet. Una de les companyies més importants que ha llançat una xarxa NB-IoT és Vodafone. [6]
- LTE-M: és similar al NB-IoT ja que també ha estat desenvolupat pel 3GPP i és una tecnologia **Cellular IoT**. Aquest protocol utilitza comunicació **M2M**, i inclou transmissió de veu. Una de les operadores de telefonia més importants com és Orange, ha desplegat una xarxa LTE-M. [6]

2.5. **Comparació dels estàndards i elecció pel prototip**

Un cop s'han vist tots els estàndards de comunicació, toca fer una comparativa i analitzar quines són les característiques que més necessitarà el prototip que es vol dissenyar. Per això, en primer lloc veurem en la taula següent els 4 estàndards estudiats:

⁴ És un grup d'associacions de telecomunicacions que va desenvolupar un sistema global de comunicacions per mòbils de tercera generació (3G).



Abast	10 – 100 m	10 – 50 m	5 – 10 km	70 – 250 m
Bandes de freqüència	868 MHz (UE), 915 MHz (EUA), 2,4 GHz (High band)	2,4 GHz (ISM band)	433 MHz (EU), 868 MHz (EU), 915 MHz (EUA), 430 MHz (AS)	5 GHz
V _{max} de transmissió	250 kbps	1 Mbps	50 kbps	6,9 Gbps
Latència	30 ms	6 ms	Molt alta	20 – 50 ms
Nodes per xarxa	Fins a 2 ¹⁶	indefinit	Fins a 62500	32
Durada de les bateries	Anys	De mesos a anys	Anys	Hores
Consum	3 µA – 30 mA	1 µA – 15 mA	20 nA – 10 mA	20 – 200 mA

Taula 2.5. Comparació de les característiques dels protocols de comunicació.

Observant atentament aquesta taula, es poden veure clarament els trets característics que destaquen tant positivament com negativament de cadascun dels protocols estudiats. No obstant, pel prototip que es vol dissenyar són necessàries les següents característiques:

- Un baix consum dels nodes
- Un rang considerable
- Gran capacitat de nodes per xarxa

Com es comenta en el punt 1.3, la finalitat del projecte és senzillament acadèmica, i per un simple prototip no caldria tenir en compte més que el consum dels nodes per tal que la xarxa fos mínimament viable, però cal tenir en compte l'escalabilitat del projecte i les línies futures. Per aquesta raó es pren en consideració també el rang i la capacitat de la xarxa d'augmentar el nombre de nodes.

Per dur a terme això, es realitzarà una combinació de dues tecnologies: LoRaWAN serà la principal amb la que operaran els nodes del prototip, ja que, a part d'oferir el consum més baix d'entre tots els estàndards, també ofereix el rang més elevat i un gran nombre de nodes per xarxa. Això permetrà que la xarxa sigui escalable i permeti tenir una cobertura de diversos km² amb sensors de partícules en suspensió. A més, el fet de que LoRaWAN utilitzi la topologia d'estrella per confeccionar la xarxa, facilita molt més la tasca.

Per últim, cal tenir en compte que per ser una WSN amb ús de IoT, es necessita accés a Internet. Per això, el *gateway* de la nostra xarxa utilitzarà Wi-Fi per transmetre les dades a un *access point*.

2.6. Alimentació dels nodes i estalvi energètic

En una xarxa de sensors sense fils, els nodes solen estar alimentats amb bateries, ja que depenent de la ubicació dels nodes, no hi ha accés directe a la xarxa d'alimentació. Per aquesta raó es important que la vida de la bateria pugui prologar-se el màxim temps possible.

Això s'aconsegueix fent ús de rutines *sleep*, que consisteixen en mantenir els dispositius en un estat de *stand by* durant un temps molt més elevat (T_{OFF} o $T - T_{ON}$) que el temps en el qual es realitzen les mesures del sensor o transmeten/reben dades (T_{ON}) durant un període d'execució, de manera que només consumeix un corrent molt petit, el just per mantenir l'alimentació del node. Això permet allargar molt més la vida de les bateries.

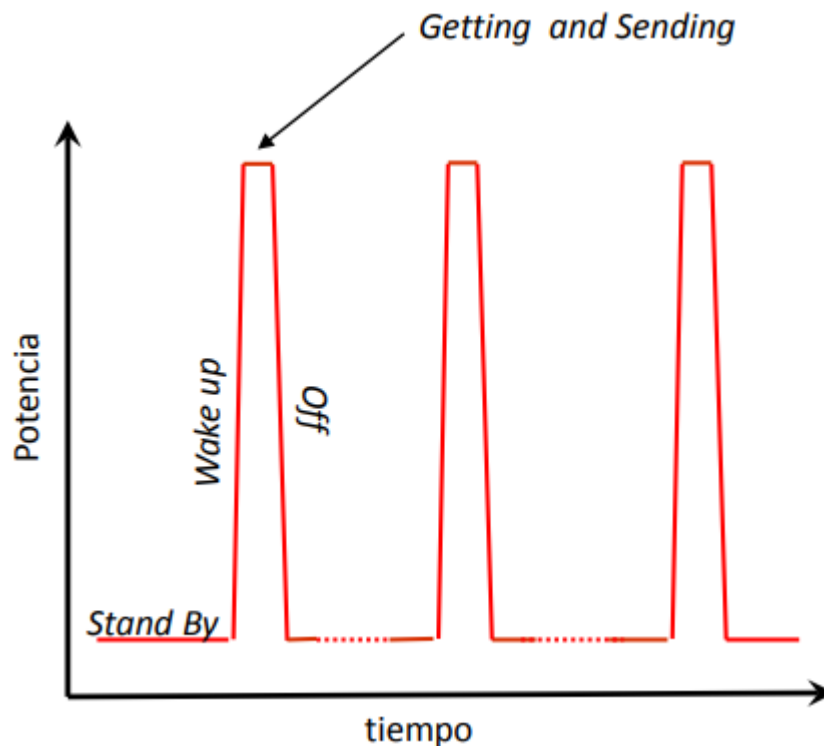


Figura 2.12. Gràfic potència – temps d'un node a una WSN. [6]

Per tal de reduir el consum al màxim, s'ha de reduir el cicle de treball. El cicle de treball o *duty cycle* és la fracció de temps en tant per u d'un període sencer d'execució en el qual el dispositiu està treballant. És a dir, des del moment del *wake up* fins que torna a estar en *stand by*. El cicle de treball (1) es calcula de la següent manera [49]:

$$D = \frac{T_{ON}}{T}, \quad 0 < D \leq 1 \quad (1)$$

Per saber la quantitat d'hores que durarà la bateria (2), s'ha de realitzar el següent càlcul [49]:

$$Battery\ duration(h) = \frac{C(mAh)}{I_{av}(mA)} \quad (2)$$

On

C és la capacitat de la bateria donada pel fabricant en mAh.

I_{av} és el corrent mitjà que es consumeix en un període T en mA.

Per saber el corrent mitjà (3) que es consumeix, es calcula amb aquesta equació [49]:

$$I_{av} = \frac{I_{ON}T_{ON} + I_{OFF}(T - T_{ON})}{T} = I_{ON}D + I_{OFF}(1 - D) \quad (3)$$

I_{ON} (4) és:

$$I_{ON} = \sum_i I_i \frac{T_i}{T} \quad (4)$$

i indica el estat de treball dins de T_{ON} (transmissió, recepció, mesura, ...).

Sabent que $I_{ON} \gg I_{OFF}$, com més reduït sigui el cicle de treball, menor serà el corrent mitjà i en conseqüència s'aconseguirà un estalvi energètic que permetrà allargar el temps de vida de la bateria abans que s'hagi de canviar.

3. Partícules en suspensió i qualitat de l'aire

3.1. Definició, origen i classificació de les partícules en suspensió

Les **partícules en suspensió**, com el seu nom indica, són partícules molt petites que poden trobar-se en estat sòlid o líquid a l'atmosfera. Les partícules en suspensió poden tenir diferents mides, des de partícules **microscòpiques i submicroscòpiques** fins d'altres que, tot i ser també molt petites, poden arribar a ser visibles a simple vista. [26-27]

Com ja s'havia comentat a l'apartat 1.1., l'origen d'aquestes partícules prové de dos tipus de fonts diferents. Una d'elles, són les **fonts naturals**, on s'originen partícules a partir de l'erosió del relleu, d'emissions volcàniques, partícules de pol·len, partícules que provenen de la descomposició orgànica i fins i tot, virus i bacteris també formen part d'aquest grup. [2]

Per altra banda, tenim la vessant **antropogènica** com a segon tipus de font originària de partícules en suspensió. Moltes activitats que realitzem els humans generen aquestes partícules, com per exemple la crema de combustibles fòssils a les indústries, als vehicles o fins i tot a calefaccions, activitats de construcció, activitats agràries o l'ús de productes químics quotidians com productes de neteja o diversos aerosols. [2]

Totes aquestes pràctiques generen una gran varietat de partícules, que poden anar des de compostos orgànics fins a metalls pesats o productes químics tòxics, el que augmenta considerablement la **contaminació de l'aire** i l'impacte nociu que això implica a la salut de les persones i el medi ambient.

Les partícules poden classificar-se de moltes maneres segons l'objectiu d'estudi. Poden classificar-se en funció de la seva composició química, segons el seu origen com ja hem vist anteriorment o segons la seva mida. Aquesta mida, vindrà definida per la mida aerodinàmica o hidrodinàmica que la partícula, que és el mateix que el diàmetre, ja que es modelitzaran com un objecte esfèric. Per tal d'observar ben bé quines partícules pertanyen a cada grup, veurem la següent figura on es comparen amb el gruix d'un cabell humà:

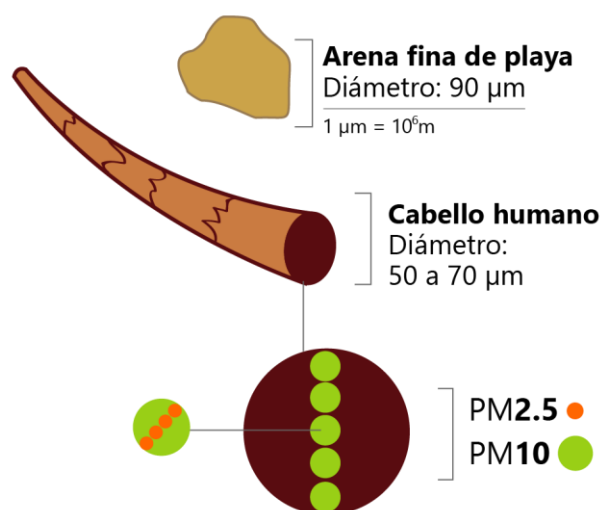


Figura 3.1. Comparació de la mida de les partícules amb un cabell humà. [33]

El diàmetre de la partícula pot calcular-se en funció de diversos paràmetres, com per exemple el volum (5). Tècnica típica en anàlisi de tamís, molt utilitzada en enginyeria química o civil [29]:

$$D = 2 \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} \quad (5)$$

On

V = volum de la partícula.

També és possible calcular el diàmetre de les partícules a partir de l'àrea d'aquesta (6). S'utilitza en tècniques com la granulometria òptica, que consisteix en mesurar el diàmetre dels grans d'un material granular [29]:

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (6)$$

On

A = àrea de la partícula.

Finalment, també podem calcular el diàmetre a partir de la massa i la densitat de la partícula en qüestió (7) [29]:

$$D = 2 \sqrt[3]{\frac{3W}{4\pi d g}} \quad (7)$$

On

W = pes

d = densitat

g = constant gravitacional.

Per aquest projecte, classificar-les segons la seva mida és el que pren més rellevància ja que es pretén estudiar la concentració de partícules en un espai en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. És indiferent l'origen del qual provinguin les partícules o la seva composició, ja que la seva mida pot ser suficient per que siguin respirables i puguin provocar problemes de salut a les persones. Per això mateix, la classificació de les partícules en suspensió es realitzarà sota la variable "PM" (*Particulate Matter* en anglès). Aquesta variable, es pot associar a diferents mides de partícula, tot i que no a totes.

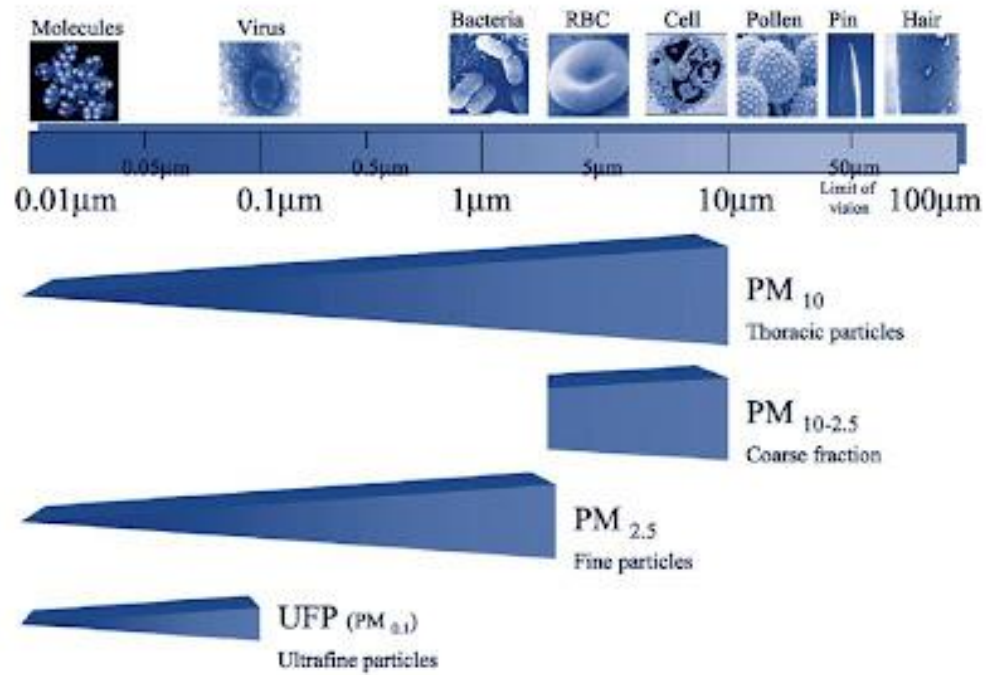


Figura 3.2. Classificació del PM de l'atmosfera en escala logàrmica. [32]

Observem els casos més rellevants:

- **PST:** Partícules en suspensió totals. Representa la concentració del total de partícules en suspensió que hi ha. Normalment són les que es troben entre els **10 i els 100 µm de diàmetre**, les quals es coneixen com a **partícules gruixudes**. La majoria d'aquestes partícules no representen un gran perill per la salut de les persones ja que no poden ser respirables. [30]
- **PM₁₀:** Representa la concentració on s'inclouen totes les partícules d'un **diàmetre igual o inferior a 10 µm**. Aquest tipus de partícules ja són respirables i es depositen principalment a l'orofaringe i a les parts superiors de les vies respiratòries. [27-33].

PM₁₀

- Afecta vies respiratòries superiors.

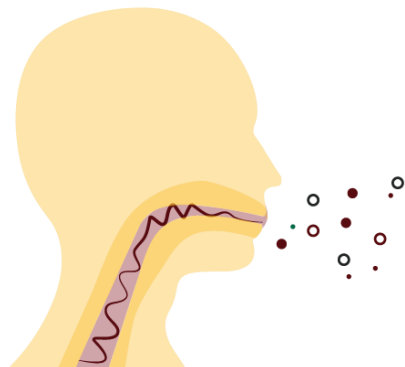


Figura 3.3. Afectació de la PM₁₀ a les vies respiratòries. [33]

Degut a que les seves dimensions no són tan petites com les de les partícules que estudiarem posteriorment, les partícules del PM_{10} tendeixen a estar menys temps en suspensió i per tant no solen causar tants problemes de salut.

Entre les malalties més comuns que poden causar aquestes partícules en cas que s'arribin a respirar, trobem la faringitis o la bronquitis. Poden causar congestió nasal, irritació del nas i la gola, esternuts i tos. En el cas de les persones amb asma o malalties respiratòries cròniques, la inhalació d'aquestes partícules pot empitjorar greument els símptomes associats. [31]

- **$PM_{2,5}$:** En aquest grup s'inclouen totes les partícules amb una **mida aerodinàmica igual o inferior a $2,5 \mu m$** . Es consideren partícules fines i en conseqüència passen més temps en suspensió que les PM_{10} , cosa que fa augmentar el risc d'inhalació. [26,32]

Les partícules $PM_{2,5}$ també s'inclouen dins del PM_{10} ja que són un subgrup amb dimensions inferiors, per tant, totes les malalties que puguin causar les partícules del grup $PM_{2,5}$ també poden ser causades pel grup PM_{10} . Altres partícules que poden ser compostos com l'òxid de nitrogen (NO_x), el diòxid de sofre (SO_2), el monòxid de carboni (CO), compostos orgànics volàtils (COV), o l'ozó de la troposfera (O_3) també poden causar problemes similars. [33]



Figura 3.4. Compostos contaminants atmosfèrics $PM_{2,5}$. [33]

Les partícules de $PM_{2,5}$ que es respiren poden ser altament perilloses, ja que per la seva mida poden arribar a la part més profunda del sistema respiratori. A diferència de les PM_{10} , que es depositen a l'orofaringe, aquestes partícules fines poden arribar a penetrar fins als bronquíols. Per tant, a part de tots els problemes o malalties respiratòries que puguin causar, també perjudiquen greument la salut cardiovascular de la persona que les inhala. [32]

Entre les malalties més típiques que causen aquestes partícules, tenim la Malaltia Pulmonar Obstructiva Crònica (MPOC), la cardiopatia isquèmica, accidents cerebrovasculars i càncer de pulmó entre d'altres, podent ocasionar fins i tot la mort de qui les pateix. [1,31-34]

PM2.5

- Afecta todo el sistema respiratorio.
- Propicia enfermedades cardiovasculares.
- Puede ser mortal.

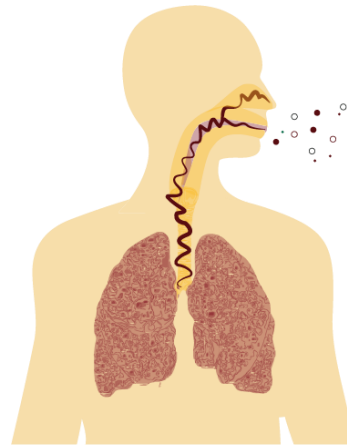


Figura 3.5. Afectació de la PM_{2,5} a les vies respiratòries. [33]

- **PM₁ i PM_{0,1}:** S'anomenen partícules ultrafines i tenen un **diàmetre inferior a 1 µm**. Són les partícules més difícils de detectar degut a la seva mida microscòpica. La quantitat de partícules que ens trobem en aquesta escala es redueix bastant ja que majoritàriament són virus i molècules. Aquestes tenen la capacitat d'arribar fins als alvèols pulmonars, on es produeix l'intercanvi de gasos a la sang, pel que poden causar problemes igual de severs per la salut que les partícules PM_{2,5} i encara més greus. [32]

Per resumir una mica de forma gràfica les afectacions que tenen els diferents tipus de partícules, observem les següents figures:

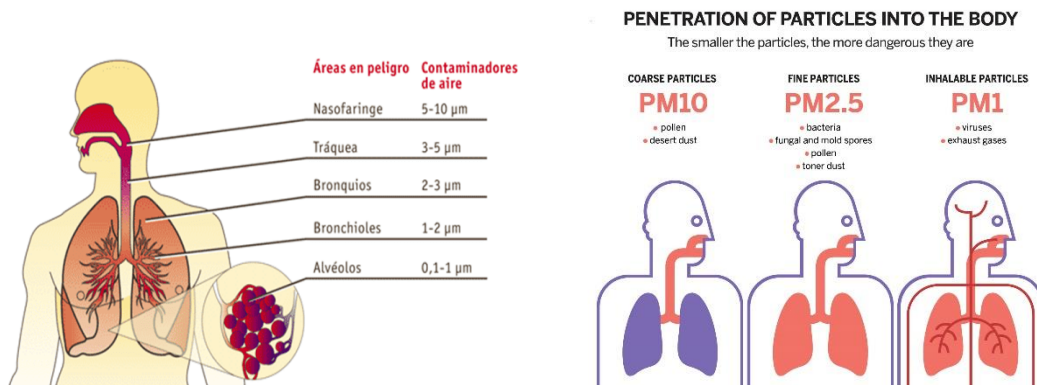


Figura 3.6. Penetració de les diferents partícules a les vies respiratòries. [35,36]

Coneixedora de tota aquesta informació, la OMS té establerts uns índex màxims de contaminació de l'aire que pel bé de la salut de la població no s'haurien de sobrepassar. Evidentment, no es pot fer front a la creació d'aquestes partícules de fonts naturals, però les fonts antropogèniques són responsabilitat nostra mantenir-les per sota dels índexs recomanats.

A l'any 2021, la OMS va endurir aquests criteris davant les estadístiques tan aterrades com podien ser **4,2 milions de morts prematures a l'any causades per la contaminació atmosfèrica**. [37]

D'aquesta manera, va reduir el nivell de concentració recomanat de **PM₁₀ de 20 a 15 µg/m³ de mitjana al any** i també de **50 a 45 µg/m³ de mitjana cada 24 hores**. Així mateix també s'aplica una reducció a la concentració de **PM_{2,5} de 10 a 5 µg/m³ anualment** i de **25 a 15 µg/m³ de mitjana diària**. [37]

3.2. Tècniques de mesura de les partícules en suspensió utilitzades per sensors comercials

Un cop estudiades les diferents partícules i els efectes que tenen, cal fer un estudi de les diferents metodologies que utilitzen els sensors per detectar-les i mesurar la concentració.

En primer lloc trobem els **sensors òptics o de dispersió làser**. És el mètode més utilitzat ja que és el menys costós en termes consum d'energia i temps de resposta [38]. Permet detectar tot tipus de partícules que s'aproximin a un diàmetre similar a la longitud d'ona del làser o feix de llum, d'acord amb la solució de Gustav Mie a les equacions de Maxwell⁵ [39].

Aquest tipus de sensors funcionen amb una font de llum o làser dirigida a les partícules. Les partícules refracten aquesta llum amb la seva presència i gràcies als fotodetectors es pot saber quina és la mida aerodinàmica de les partícules i la concentració de massa per unitat de volum que hi ha en un instant donat. Les partícules més petites que es poden detectar amb aquest sensor són de 0,3 µm, ja que les partícules de menor dimensió no dispersen prou llum i no poden detectar-se amb aquest mètode. La resta de partícules dispersen una quantitat de llum pràcticament proporcional a la seva concentració. [38,40]

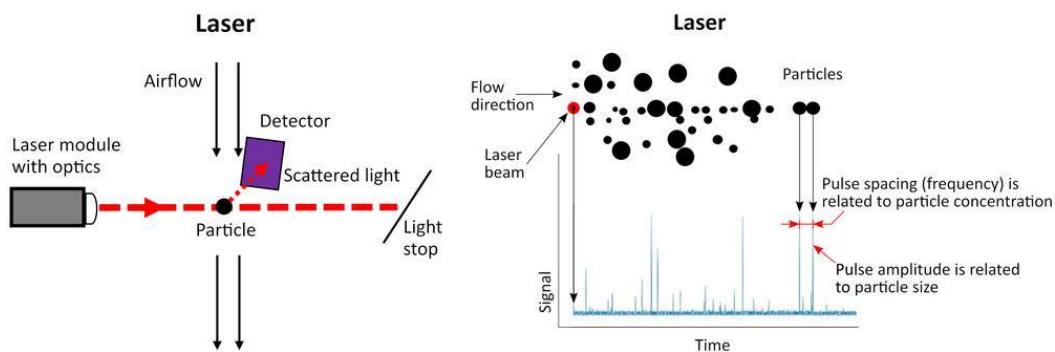


Figura 3.7. Comportament d'un sensor de dispersió làser. [40]

Com es pot observar en la figura superior, l'espaiat entre polsos de la llum dispersada està directament relacionat amb la concentració de partícules. Com menys temps hi hagi entre un pols i un altre, més partícules s'estaran detectant. Per altra banda, l'amplitud del pols té a veure directament amb la mida de la partícula detectada. [40]

⁵ Solució analítica a les equacions de Maxwell per a la dispersió de radiació electromagnètica de partícules esfèriques.

Els sensors de dispersió làser seran els utilitzats en el marc experimental pel seu senzill ús, adaptabilitat i el seu baix consum.

Altres sensors poden ser els sensors d'infraroig no dispersius o els electroquímics. La diferència d'aquests amb els sensors de dispersió làser és que s'utilitzen principalment per detectar un tipus de gas en específic i no tot el conjunt de partícules en suspensió d'un entorn, per tant, tan sols s'estudiaran per sobre de forma teòrica, ja que no tindran cap presència en el nostre marc experimental.

En el cas dels **sensors d'infraroig no dispersius (NDIR)**, són sensors espectroscòpics⁶ per detectar el monòxid de carboni (CO).

La concentració de gas es mesura per l'absorció d'una longitud d'ona de l'infraroig. Un filtre abans del fotodetector elimina totes les longituds d'ona que el gas o partícules que es volen estudiar no poden absorbir, per tant en funció de la quantitat de llum infraroja es detecti en una determinada longitud d'ona, podrem saber la concentració d'aquest gas mitjançant un senyal que s'origina després del detector d'infraroig. [38]

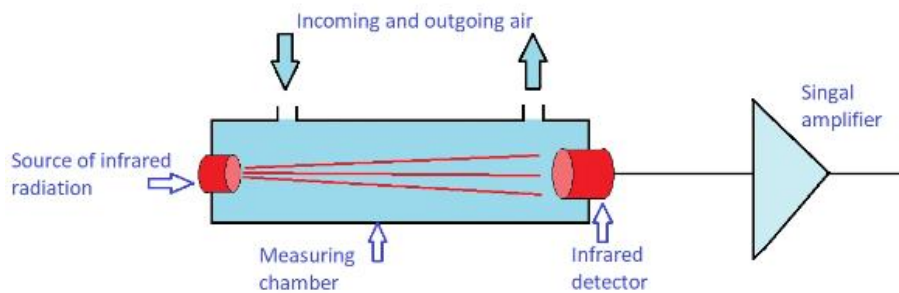


Figura 3.8. Diagrama de funcionament d'un sensor NDIR. [38]

Els **sensors electroquímics** també s'utilitzen per detectar concentracions de partícules. Concretament de CO₂ o COV.

Aquests sensors funcionen generalment amb una cel·la amb un electròlit sòlid, que condueix els ions a través d'un corrent elèctric. Aquesta cel·la s'escalfa i els seus elèctrodes produeixen unes reaccions químiques. Mesurant el corrent que es genera, es pot determinar la concentració per exemple de CO₂. [38]

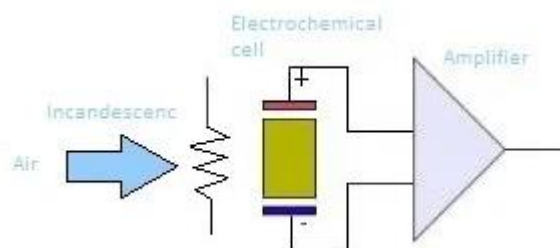


Figura 3.9. Diagrama de funcionament d'un sensor electroquímic. [38]

⁶ L'espectroscòpia estudia la interacció entre la radiació electromagnètica i la matèria. L'absorció, dispersió o emissió d'energia d'un objecte.

Part experimental

4. Disseny i implementació d'una WSN per a la monitorització de partícules en suspensió

4.1. Estudi dels diferents sensors de partícules en suspensió i tria pel prototip

Per començar a confeccionar el prototip de xarxa, en primer lloc necessitem els sensors que s'encarregaran de mesurar la matèria particular d'un entorn. Per fer això, s'han estudiat diverses opcions entre els diferents sensors comercials que hi ha actualment al mercat. Molts d'ells es van haver de descartar per alguns motius de pes que impossibilitaven o feien molt difícil el seu us o obtenció.

El sensor **SDS011** va ser un dels primers sensors que es va valorar com a candidat pel prototip. El gran problema d'aquest sensor és que el fabrica una empresa Xinesa anomenada "Nova Fitness Co., Ltd" ubicada a Shangai, això complicava molt la seva obtenció i entrega a temps per poder treballar amb ells, ja que no hi havia *stock* a les botigues online de **RS Components** o **Farnell**. Disposa de llibreries per Arduino i és senzill de programar ja que utilitza comunicació UART amb el microcontrolador.



Figura 4.1. Sensor PM de Nova SDS011. [42]

Un altre sensor que es va considerar factible era el **DSM501A**. També es fabrica a una empresa asiàtica, en aquest cas de Corea, anomenada Samyoung S&C, tot i que la falta de *stock* va ser el principal motiu pel qual es va descartar, tampoc tenia llibreries d'Arduino que facilitessin la seva programació.

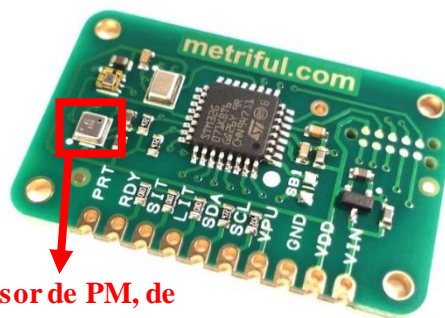


Figura 4.2. Sensor DSM501A.

Per motius de temps d'entrega i disponibilitat, es van descartar tots els sensors que no es fabriquessin o distribuïssin a tota Europa. D'aquesta manera, ja es van descartar altres sensors com el **GP2Y1010AU0F** de Filipines, o el **Metriful MS430**, el qual era una molt bona opció, ja que estava molt ben documentat, però només es venia al Regne Unit.



Figura 4.3. Sensor GP2Y1010AU0F.



**Sensor de PM, de
temperatura i humitat**

Figura 4.4. Sensor Metriful MS430.

Es va optar també per contemplar sensors de l'empresa Sensirion, que se sabia que venien els seus productes a través de RS Components i de Farnell. El problema que va ocasionar que es descartés també el sensor de qualitat de l'aire que venen, el **SGP30**, és que no detectava qualsevol partícula. Estava fet per detectar exclusivament CO₂ i COV, la qual cosa, no era l'objectiu d'aquest treball.



Figura 4.5. Sensor SGP30 de Sensirion.

Finalment vam trobar el **DFRobot Gravity: PM2.5 Air Quality Sensor**, un sensor que s'ajustava exactament a les necessitats del projecte i a més el fabrica la companyia DFRobot, la qual té distribuïdors a tot el món, incloent a Espanya. Alguns d'aquestes empreses distribuïdores són BricoGeek o RobotShop.com.

Tenint en compte les prestacions que ofereixen, la precisió, la capacitat de mesurar partícules d'un diàmetre superior o igual a 0,3 μm , la facilitat de programació a través de l'IDE d'Arduino gràcies a les llibreries que té, el seu preu raonable, i evidentment que hi havia existències en *stock*, es va decidir que serien aquests els sensors que formarien part del prototip. [41]



Figura 4.6. DFRobot Gravity: PM2.5 Air Quality Sensor. [41]

Aquest sensor de partícules utilitza el principi de la dispersió làser. Conté una cavitat on es produeix aquest feix de llum i es detecten les partícules en suspensió que hi entren. El senyal s'amplifica i passa directament a un microprocessador que mitjançant un algorisme basat en la teoria de Mie, calcula les dimensions de les partícules i la concentració de massa per unitat de volum. Per tal de comunicar-se amb un microcontrolador, ho fa a través del bus I2C. [41]

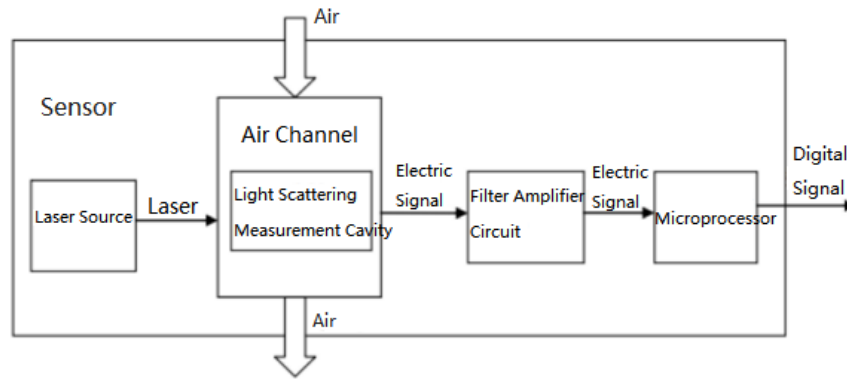


Figura 4.7. Diagrama de blocs del funcionament del sensor de PM de DFRobot. [41]

Vegem a la taula següent les especificacions més importants pel nostre projecte del sensor donades pel datasheet de DFRobot:

Tensió de treball	3.3~5.0V
Corrent màxim de treball	100 mA
Corrent de <i>stand by</i>	≤2 mA
Rang de partícules mesurades	0,3 ~ 1 μm; 1.0 ~ 2,5 μm; 2,5 ~ 10 μm
Eficiència del comptatge de partícules	50% @ 0.3 μm 98% @ ≥0.5 μm
Rang efectiu de PM _{2,5}	0~500 μg/m ³
Valor màxim de PM _{2,5}	≥1000 μg/m ³
Resolució de PM	1 μg/m ³
Error de PM	±10% @ 100 ~ 500 μg/m ³ ; ±10 μg/m ³ @ 0 ~ 100 μg/m ³
Rang de temperatura operable	-10 ~ +60 °C
Rang d'humitat operable	0 ~ 95% sense condensació
Mida del producte	67 mm × 40 mm × 14 mm

Taula 4.1. Especificacions del DFRobot Gravity: PM2.5 Air Quality Sensor. [41]

Aquest sensor està pensat per monitoritzar principalment espais tancats, com cuines, lavabos o entorns on no s'espera una contaminació elevada de partícules per tal de detectar alguna anomalia.

Els fabricants recomanen afegir-li mesures de protecció al sensor en entorns on la concentració de partícules superi els 300 mg/ m³ durant més del 50% del temps o bé que superi els 500 mg/ m³ durant més del 20% del temps, com podria ser per exemple una sala de fumadors. [41]

4.2. Mòduls utilitzats pel prototip

Com ja s'ha vist al punt 2.5, el protocol de comunicació que volem utilitzar és LoRaWAN per comunicar els nodes de la xarxa amb el *gateway*, i aquest últim es connectarà a través de Wi-Fi amb un punt d'accés a Internet per pujar-hi les dades. Les plaques **ESP32** són les que compleixen aquests requisits, ja que disposen d'aquestes característiques, tot i que n'hi ha de diferents fabricants.

En primer lloc vam optar una placa **Heltec WiFi LoRa32 (V2)** perquè ja hi havia una a la universitat, juntament amb un *gateway indoor* de LoRaWAN de **The Things Network (TTN)**, el **The Things Indoor Gateway (TTIG)**.

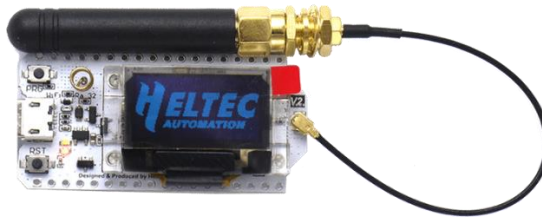


Figura 4.8. Heltec WiFi LoRa 32 (V2).



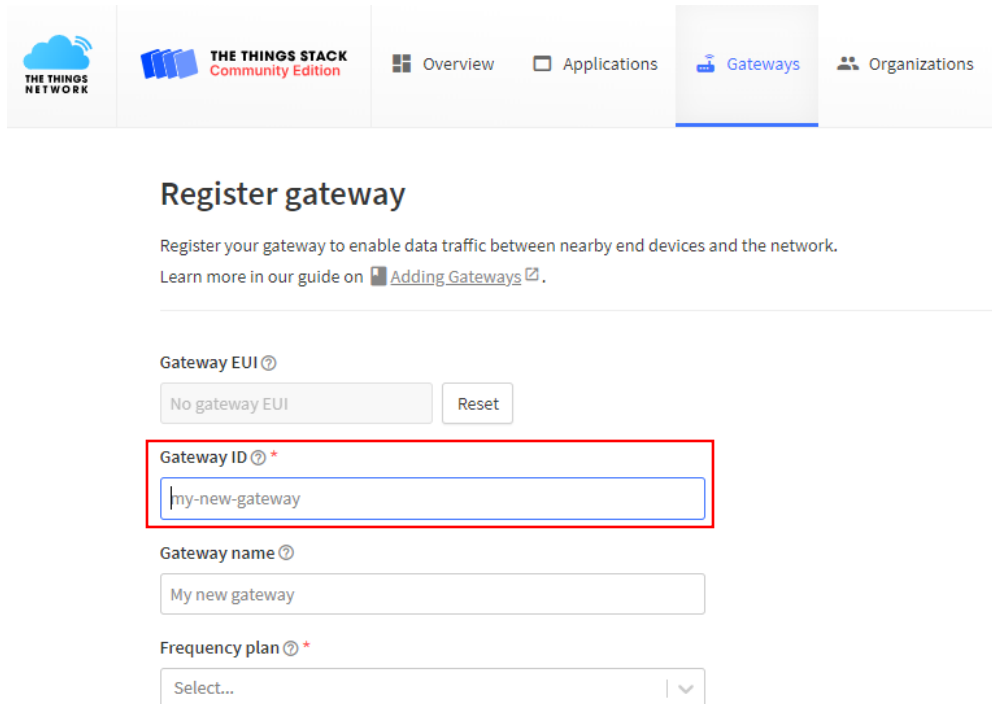
Figura 4.9. The Things Indoor Gateway. [43]

El problema me'l vaig trobar a l'hora de reclamar el *gateway* al servidor de TTN anomenat *The Things Stack* introduint el seu EUI, ja que el *gateway* ja havia estat reclamat abans i no estava autoritzat a ser reclamat un altre cop. Després de molts intents fallits d'intentar reclamar el *gateway* en la meua compta de *The Things Network*, vaig donar amb la solució indagant en fòrums i explicacions de la pròpia pàgina, on indicava què calia fer per reclamar un *gateway* existent. S'havia d'instal·lar la CLI de TTN, accedir-hi des de la consola de comandes del sistema operatiu i escriure la següent comanda:

```
ttn-lw-cli gateways claim authorize <gateway-id> [43]
```


Per tal de conèixer el *gateway-id*, vaig haver de contactar amb el anterior usuari del *gateway*, ja que era un paràmetre configurable des de *The Things Stack* i només tindria accés aquella

persona des del seu compte personal. Per veure més clar això, vegem una imatge de la web de *The Things Stack* on es pot registrar un *gateway*:



Register gateway


Register your gateway to enable data traffic between nearby end devices and the network.
Learn more in our guide on [Adding Gateways](#).

Gateway EUI 


No gateway EUI

Gateway ID  *

my-new-gateway

Gateway name 

My new gateway

Frequency plan  *


Select... 

Figura 4.10. Pàgina per registrar un gateway a The Things Network.

El requadre vermell és el que conté el ID que s'ha d'escriure amb la comanda per tal d'habilitar el *gateway* per ser registrat en altres usuaris. Finalment, no vaig poder aconseguir aquest ID, ja que la pàgina de TTN s'havia actualitzat molt des de l'últim cop que es va fer ús d'aquell TTIG i per tant, no es va poder trobar l'ID que es necessitava. Per això aquesta primera opció es va descartar.

La següent opció va ser provar amb el *gateway* LoRaWAN de **Dragino**, concretament el **LG01-P**.



Figura 4.11. Dragino LG01-P indoor gateway.

Aquest és un *gateway* programable des de l'IDE d'Arduino, però no vaig aconseguir que rebés les dades que enviava el mòdul Heltec de cap manera, probablement per un problema de compatibilitat amb el *hardware*. Dragino té *shields* pròpies per acoblar a les plaques Arduino i tots el projectes que utilitzen aquest *gateway*, fan servir les shields del mateix fabricant pels nodes emissors.

Finalment, vaig decidir que utilitzaria també una altra placa ESP32 com a *gateway*, ja que em seria molt més pràctic i la funcionalitat seria la mateixa, així que tan aviat como van arribar els següents mòduls **Heltec WiFi LoRa 32 (V3)**, vaig començar a desenvolupar el codi, utilitzant les mateixes llibreries que havia utilitzat pel mòdul de la versió 2.



Figura 4.12. Heltec WiFi LoRa 32 (V3).

Les diferències en principi són poques, el connector micro-USB de la versió 2, canvia per un USB-C a la versió 3, però la sorpresa ve quan els codis no compilaven per aquest mòdul en concret, i no era per errors de sintaxi.

Vaig entrar a fòrums per intentar trobar la solució al problema i al *datasheet* del mòdul en les dues versions, i vaig trobar el següent: en primer lloc, la distribució de pins era diferent per una versió i per l'altra, però el més greu era que els fitxers de les llibreries referents a aquest mòdul tenien errors de definició, a més no funcionaven amb la llibreria LoRa.h com sí que ho feia la versió 2 d'aquesta placa. Per tant també va quedar descartat utilitzar aquests mòduls. [44-46]

Finalment, com res del que s'havia provat funcionava com s'esperava, es va optar per adquirir tres mòduls iguals, per evitar problemes de compatibilitat i per facilitar la programació dels microcontroladors, ja que només caldria desenvolupar un codi per la lectura del sensor i emissió de les dades i un altre codi per la recepció i pujada a Internet.

Els mòduls que s'utilitzaran finalment són els TTGO LoRa32-OLED V1. Aquests mòduls vénen amb dues tires de pins que es poden soldar a la placa per tal de connectar-hi dispositius, i també una antena de 2 dBi. Per alimentar el mòdul cal fer-ho a través de la connexió micro-USB així com per programar-lo.

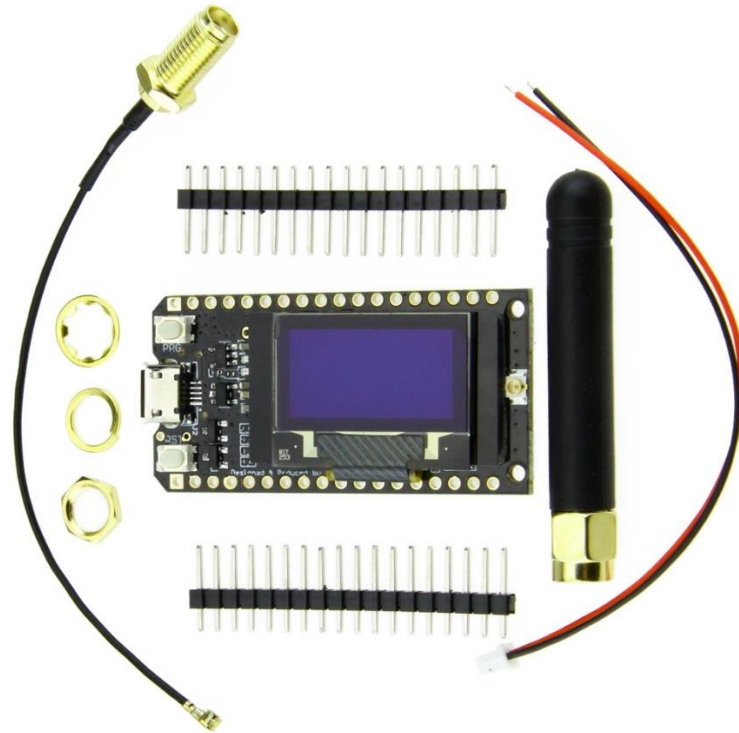


Figura 4.13. TTGO LoRa32-OLED V1.

A la taula 4.2 podem veure algunes de les seves especificacions més importants.

Tensió de treball	3,3 – 7 V
Consum de corrent de treball	10 - 14 mA
Consum de corrent en mode <i>Sleep</i>	0,2 μ A
Freqüències	868 MHz o 915 MHz
Sensibilitat	-98 dBm
Potència de transmissió	20 dBm
Velocitat de transmissió màxima	150 Mbps
Rang de temperatura operable	-10 - 90 °C

Taula 4.2. Especificacions del mòdul TTGO LoRa32-OLED V1. [47]

Els mòduls TTGO LoRa32-OLED V1 utilitza una ESP32 per la connectivitat Wi-Fi, i un **chip SX1276 LoRa**. Disposa d'un *display* OLED programable que utilitza comunicació a través de bus **I2C**. El chip SX1276 es comunica mitjançant el protocol de comunicació **SPI**.

Per tal de fer ús d'aquestes interfícies, hem de saber a quins pins hem de referir-nos quan desenvolupem el codi.

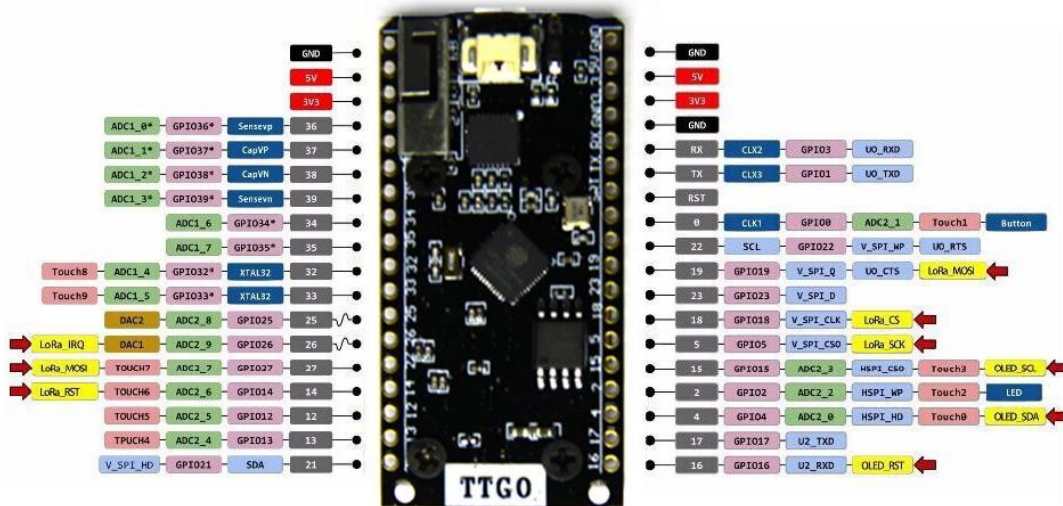


Figura 4.14. Diagrama dels pins del mòdul TTGO LoRa32-OLED V1. [47]

Observant la figura anterior, podem saber quins pins del mòdul interconnecten el chip LoRa amb la ESP32:

SX1276	ESP32
MISO	GPIO 19
MOSI	GPIO 27
SCK	GPIO 5
CS	GPIO 18
IRQ	GPIO 26
RST	GPIO 14

Taula 4.3. Relació entre els pins del SX1276 i de la ESP32 a través de SPI.

Per tal de que la connexió LoRa sigui estable, cal acoblar l'antena al connector I-PEX⁷ que té el mòdul.



Figura 4.15. Interfície I-PEX i connector de l'antena. [48]

⁷ Tipus de connector dissenyat per l'empresa I-PEX, la qual dona el nom a aquest tipus d'interfícies.

4.3. Disseny de l'end-node i del gateway del prototip

Els nostres nodes constaran simplement del sensor de partícules de DFRobot, i del mòdul TTGO LoRa32-OLED V1 amb la seva respectiva antena. Com ja s'ha vist a l'apartat 4.1, el nostre sensor transmet les dades via comunicació I2C.

El bus I2C utilitza dues línies per a la comunicació: la **SDA**, on es transmeten les dades i la **SCL**, el senyal de rellotge. Per això cal saber a quins pins del nostre mòdul trobem les dues línies del bus I2C, i ho podem observar novament a la figura 4.14:

I2C	ESP32
SDA	GPIO 21
SCL	GPIO 22

Taula 4.4. Relació de les línies de comunicació I2C amb els pins de la ESP32 del mòdul TTGO LoRa32-OLED V1.

Vegem en un diagrama com quedaria confeccionat el muntatge del node:

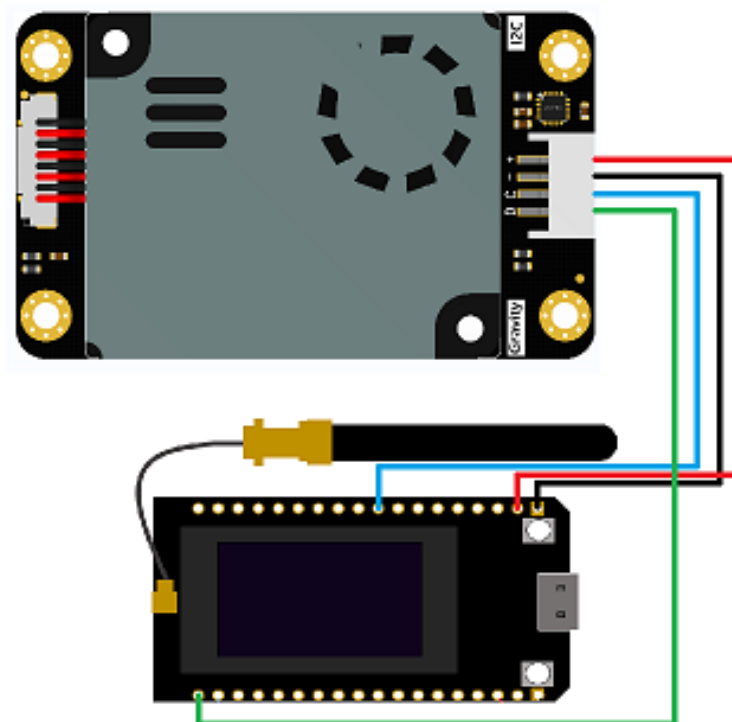


Figura 4.16. Diagrama del muntatge del sensor connectat al mòdul LoRa.

Pel que fa al *gateway*, tan sols serà el mòdul TTGO amb l'antena, sense les tires de pins soldades ja que no necessitarà tenir cap dispositiu connectat. Simplement necessitarem que sigui capaç de rebre els paquets que li arribaran dels nodes emissors i que tingui un punt d'accés a Internet com un *router* a prop.

La xarxa final serà un prototip amb 2 nodes i un sol *gateway* monocanal⁸, tot i que com ja s'ha comentat, la xarxa es perfectament escalable incloent més nodes.

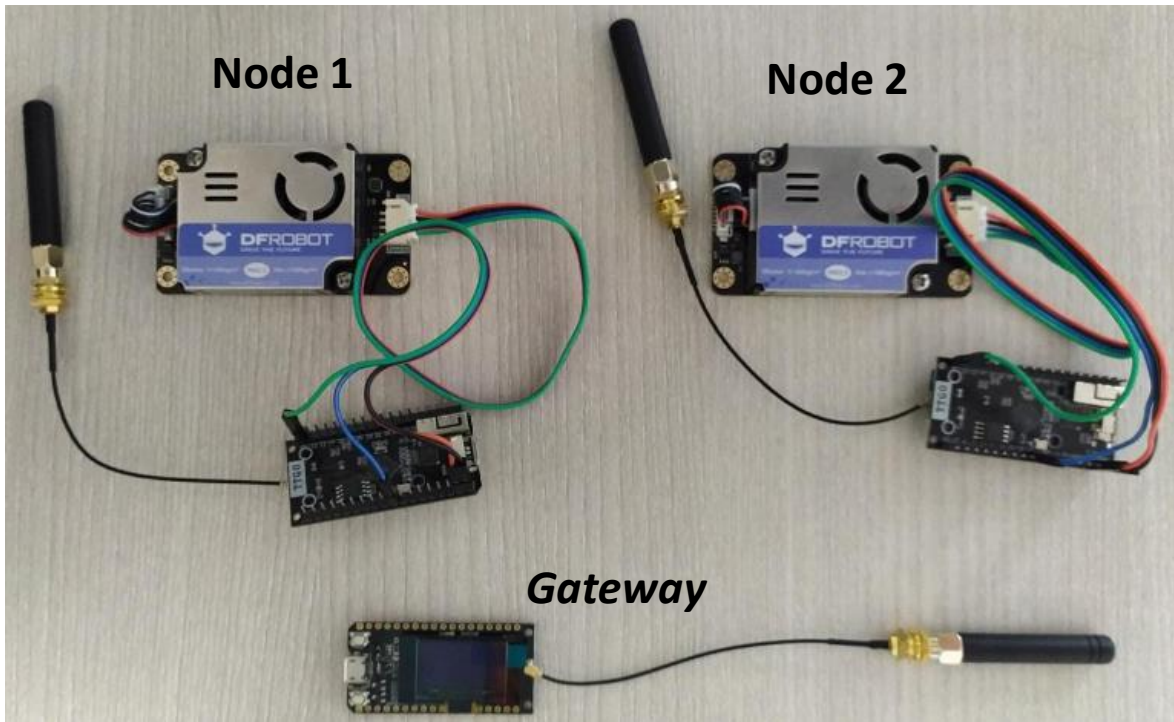


Figura 4.17. Prototip final de la WSN.

4.4. Pressupost del prototip creat

Tenint en compte els tres mòduls TTGO LoRa32-OLED V1 i els dos sensors DFRobot Gravity: PM2,5 Air Quality Sensor podem fer la següent taula de pressupost.

Quantitat	Model	Preu unitari	Subtotal
3	TTGO LoRa32-OLED V1	19,95 €/u	59,85 €
2	DFRobot Gravity: PM2,5 Air Quality Sensor	39,73 €/u	79,46 €
TOTAL			139,31 €

Taula 4.5. Pressupost del prototip.

4.5. Entorn de programació

Per programar els mòduls vistos a l'apartat anterior, s'utilitzarà com ja s'havia comentat abans **l'IDE d'Arduino**, ja que són compatibles amb aquest entorn.

A l'IDE d'Arduino es programa amb el **llenguatge C++** i conté llibreries per programar tots els dispositius que utilitzarem per la nostra xarxa. Les llibreries poden ser creades i utilitzades per tots els usuaris d'aquesta plataforma, és a dir, és de **codi obert**. només cal

⁸ Que només pot vincular-se a un punt d'accés Wi-Fi alhora.

importar les llibreries a l'ordinador on hagi de desenvolupar el codi i ja se'n pot fer ús de totes les funcions definides. Això facilita molt el desenvolupament del projecte.

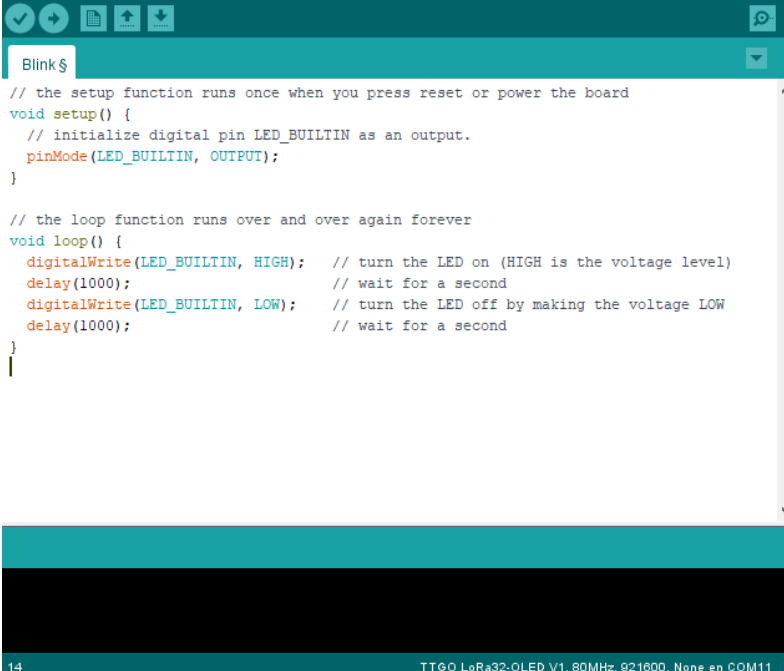
Un codi o *sketch* es divideix en 4 parts:

En primer lloc trobem el espai on podem incloure llibreries, declarar variables o definir constants.

Després trobem el `void setup()`, una funció que s'executa un cop en tot el codi, i s'utilitza generalment per inicialitzar el monitor sèrie, inicialitzar les comunicacions o els dispositius amb les seves llibreries pertinents, definir pins, etc.

A continuació, hi ha el `void loop()`. Aquesta funció es repeteix periòdicament quan s'acaba d'executar el `void setup()` mentre el MCU estigui alimentat. S'utilitza per executar el que volem que faci el nostre dispositiu.

Finalment la quarta part del codi és tot l'espai destinat a funcions auxiliars que podem cridar des del `void loop()`. Aquesta part sol ser més prescindible si la majoria del codi utilitza funcions de les llibreries, però sempre ajuda a tenir el codi més net i facilita la identificació d'errors.



```
Blink$
// the setup function runs once when you press reset or power the board
void setup() {
  // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000); // wait for a second
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000); // wait for a second
}
|

14 TTGO LoRa32-OLED V1, 80MHz, 921600, None en COM11
```

Figura 4.18. Interfície de l'IDE d'Arduino.

4.6. Entorn de visualització de les dades

Per visualitzar les dades dels sensors, utilitzarem **ThingSpeak**. ThingSpeak és una plataforma d'anàlisi IoT de **MathWorks**, que permet visualitzar dades pujades a temps real en el núvol.

Per fer això s'ha de crear un canal, a través del qual es visualitzaran les dades que els nostres dispositius vulguin pujar des de l'entorn d'Arduino o Matlab. [50]

Un canal emmagatzema tota aquesta informació i permet representar gràfiques en funció del temps, o implementar *widgets*⁹ com ara un indicador o un display numèric. Cada canal té vuit camps on es poden representar dades de forma separada de tipus *Float*. Un canal pot ser públic o privat, i pot compartir-se també amb determinats usuaris per tal que interactuïn amb ell. [50]

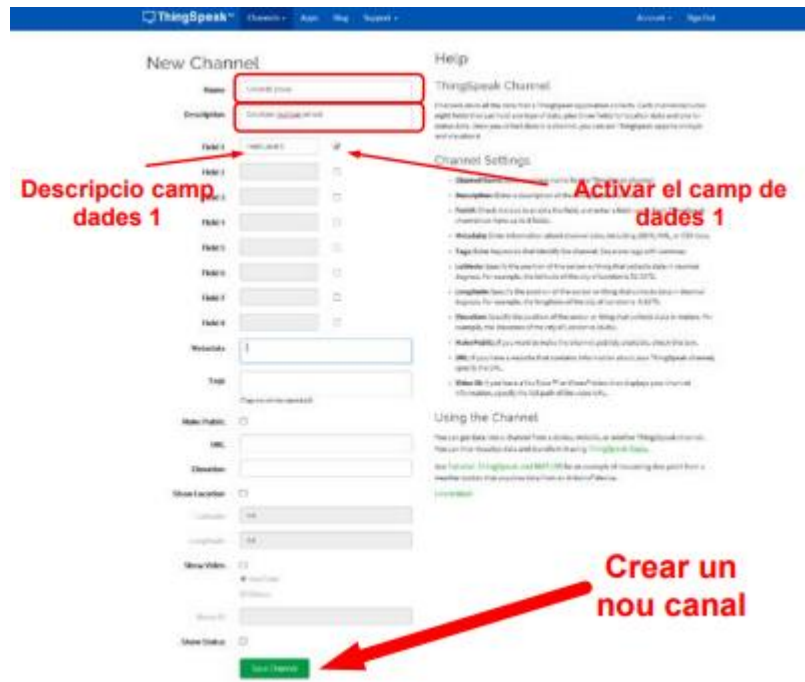


Figura 4.19. Creació d'un canal a ThingSpeak. [50]

Després de crear el canal, s'assigna un identificador de canal únic que apareix al menú principal d'aquest (*channel ID*). Inclou diverses pestanyes, com la vista pública del canal, la vista privada, la configuració per afegir nous camps o modificar els camps ja existents o una pestanya per veure les claus o *API Keys*. També permet exportar les dades en fitxers amb format **XML** o **CSV**. [50]

⁹ Component gràfic dissenyat per proporcionar informació de forma visual a l'usuari.



Figura 4.20. Menú principal del canal. [50]

Cada canal té unes **API Keys**, que són unes claus úniques que permeten interactuar amb el canal de manera privada des d'un dispositiu extern que pugui les dades o les llegeixi. Cada clau està formada per 16 dígits en format alfanumèric. Les claus són la **Write API Key**, que serveix escriure les dades al canal que li correspon, i la **Read API Key**, que permet la lectura de les dades del canal associat. [50]

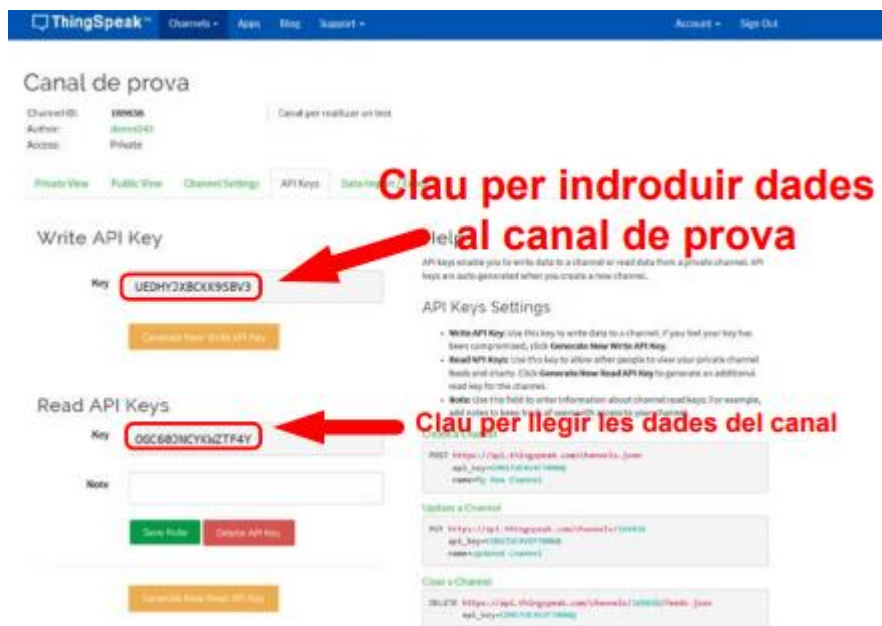


Figura 4.21. Pestanya de les API Keys de ThingSpeak. [50]

5. Experiment i anàlisi dels resultats.

5.1. Experiment realitzat

Per testejar el correcte funcionament de la xarxa de sensors i verificar que les mesures obtingudes s'ajustaven a la realitat, es van sotmetre de forma separada els dos sensors a dues proves separades i posteriorment es va fer una anàlisi de la seva resposta.

En primer lloc, es va utilitzar una cigarreta electrònica per emetre vapor a sobre d'un dels sensors. A part de vapor d'aigua, les cigarretes electròniques també emeten compostos volàtils orgànics i altres partícules prou grans generades en la combustió del líquid, que haurien de ser detectables pels sensors DFRobot Gravity.

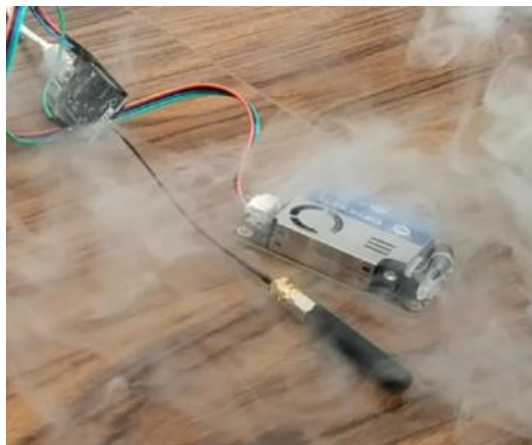


Figura 5.1. Vapor d'una cigarreta electrònica sobre el sensor de PM de DFRobot.

La segona prova que es va dur a terme va ser l'exposició de l'altre dels sensors a damunt d'un pot d'acetat de trans-2-Hexenil líquid amb una puresa superior al 90% i una massa molecular de 142,2 Da. [51]



Figura 5.2. Pot d'acetat de trans-2-Hexenil sota el sensor de PM de DFRobot.

La formulació d'aquest compost és $C_8H_{14}O_2$.

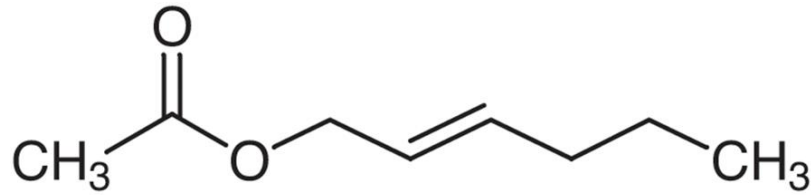


Figura 5.3. Acetat de trans-2-Hexenil. [52]

Com es pot observar, és un compost relativament senzill, per tant és possible que les molècules de l'acetat de trans-2-Hexenil no siguin detectables pel nostre sensor. Vegem a l'apartat 5.2. els resultats.

5.2. Anàlisi dels resultats

Un cop es van connectar els nodes i es van carregar els codis corresponents que hi ha als Annexos a l'apartat 8, es va verificar través del monitor sèrie del *gateway* que les dades es rebien correctament per part dels dos dispositius i es pujaven de forma separada a la plataforma de ThingSpeak de manera periòdica.

```

COM11

Node 1:
PM2,5 = 7 ug/m3
PM10 = 7 ug/m3
Dades enviades a ThingSpeak correctament

Node 2:
PM2,5 = 8 ug/m3
PM10 = 8 ug/m3
Dades enviades a ThingSpeak correctament
  
```

Figura 5.4. Recepció de dades al *gateway*.



Figura 5.5. Visualització de les dades a ThingSpeak.

Observem amb atenció el primer pic de les dues gràfiques superiors corresponents a la PM_{2,5} i la PM₁₀ del sensor 1, i també al segon pic de les gràfiques inferiors corresponents al les mesures del sensor 2.

En el primer cas, trobem un increment en la detecció de partícules en suspensió en el primer sensor degut al vapor emès per la cigarreta electrònica a una distància aproximada d'un 30cm. Es pot veure com ràpidament es dispara la concentració tant de PM_{2,5} però molt més de PM₁₀ com era lògic d'esperar.

```

COM11

Node 1:
PM2,5 = 6 ug/m3
PM10 = 7 ug/m3
Dades enviades a ThingSpeak correctament

Node 2:
PM2,5 = 10 ug/m3
PM10 = 10 ug/m3
Dades enviades a ThingSpeak correctament

Node 1:
PM2,5 = 371 ug/m3
PM10 = 1324 ug/m3
Dades enviades a ThingSpeak correctament

Node 2:
PM2,5 = 6 ug/m3
PM10 = 6 ug/m3
Dades enviades a ThingSpeak correctament

Node 1:
PM2,5 = 384 ug/m3
PM10 = 525 ug/m3
Dades enviades a ThingSpeak correctament

```

Figura 5.6. Detecció del vapor al node 1 de la xarxa.

Cal mencionar que en el codi s'aplica una rutina de *sleep* d'un minut entre dues mesures consecutives d'un mateix node, per tal de que no hi hagi problemes per la pujada de les dades a ThingSpeak.

Per aquesta mateixa raó, la concentració disminueix tant entre una mesura i l'altra, degut al corrent d'aire de la sala, que evitava que el vapor arribés al sensor 2 i que a més es dissipava ràpidament del primer sensor, on s'hi havia abocat el vapor inicialment. Veiem que tant pel PM_{2,5} i el PM₁₀ les concentracions son de 371 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i de 1324 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Aquests valors cauen dràsticament després d'un minut fins a 384 i 525 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivament, tot i que és un valor realment elevat i contaminant.

La mateixa prova es va fer amb el segon sensor, però aquest cop molt més a prop i amb més concentració de vapor.

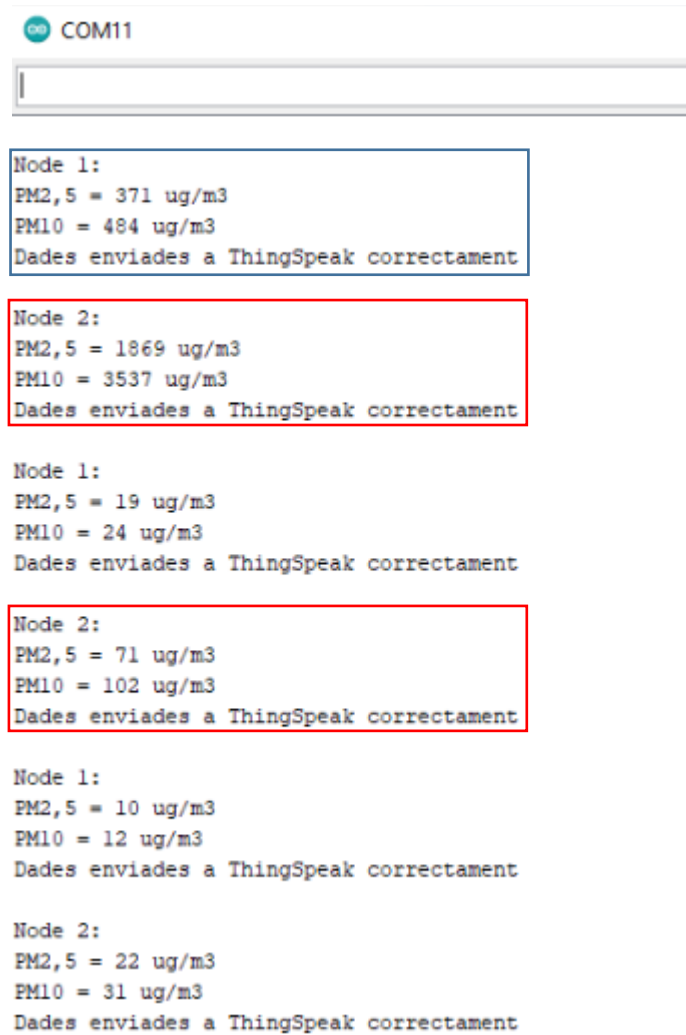


Figura 5.7. Detecció del vapor al node 2 de la xarxa.

Com es pot veure en aquesta figura queda evidenciada la presència de ventilació en la sala on es va realitzar l'experiment, ja que mentre s'estava abocant el vapor sobre el node 2, el primer d'ells va realitzar una mesura (requadre blau) amb una quantitat més reduïda que la que apareix després del node 2. Cal dir que les mesures fetes pel node 2 de $1869 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2,5}$ i de $3537 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} no són del tot fiables, ja que com s'indica a la taula 4.1, el valor màxim per $\text{PM}_{2,5}$ ronda els $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Cal observar com es dissipa en els minuts posteriors tota aquesta concentració, fins assolir poc a poc els valors estables que es veuen a la figura 5.4 de aproximadament $5\text{-}8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Finalment, es va exposar el sensor 1 a l'acetat de trans-2-Hexenil, durant uns minuts consecutius. Aquesta va ser la resposta del sensor:

```
COM11  
Node 1:  
PM2,5 = 7 ug/m3  
PM10 = 7 ug/m3  
Dades enviades a ThingSpeak correctament  
  
Node 2:  
PM2,5 = 8 ug/m3  
PM10 = 8 ug/m3  
Dades enviades a ThingSpeak correctament  
  
Node 1:  
PM2,5 = 5 ug/m3  
PM10 = 5 ug/m3  
Dades enviades a ThingSpeak correctament  
  
Node 2:  
PM2,5 = 7 ug/m3  
PM10 = 7 ug/m3  
Dades enviades a ThingSpeak correctament  
  
Node 1:  
PM2,5 = 6 ug/m3  
PM10 = 6 ug/m3  
Dades enviades a ThingSpeak correctament  
  
Node 2:  
PM2,5 = 7 ug/m3  
PM10 = 7 ug/m3  
Dades enviades a ThingSpeak correctament
```

Figura 5.8. Mesures fetes sota la presència d'acetat de trans-2-Hexenil.

Com podem comprovar en aquesta figura i a la part dreta dels gràfics mostrats a la figura 5.5, la presència d'aquest compost no va alterar la resposta donada pels sensors. La hipòtesi més factible per donar resposta a aquesta qüestió, és que la mida de les molècules d'acetat de trans-2-Hexenil són massa petites per ser detectades pel sensor, com ja s'havia pogut valorar a l'apartat anterior.

Una altra possible hipòtesi seria que la concentració fos massa petita, però aquesta queda descartada ràpidament ja que estem parlant d'un compost amb una puresa de més del 90%, amb la qual cosa podem afirmar que la concentració a la boca del pot era més que suficient.

6. Conclusions i línies futures

Havent finalitzat el treball, finalment s'han aconseguit tots els objectius que s'havien exposat a l'inici del treball.

Aquests objectius anaven des de realitzar un estudi sobre les xarxes de sensors sense fils, incloent els estàndards de comunicació que s'utilitzen, estudiar també les partícules en suspensió, els seus efectes en la salut i com detectar-les, fins a dissenyar i implementar un prototip de WSN que permetés monitoritzar les partícules en suspensió d'un entorn.

El projecte m'ha permès aprofundir molt més els meus coneixements sobre LoRaWAN i en les xarxes de sensors del que ja ho havia fet al llarg del Grau d'Enginyeria de Sistemes i Serveis de Telecomunicacions, i molt més important, he pogut apreciar com d'amplic pot ser el món de la IoT i la infinitud d'aplicacions que s'hi poden trobar.

He pogut descobrir també un món realment extens i pel que fa a les partícules en suspensió, estudiant tècniques per a la seva detecció. Aquesta combinació ha fet que es fes molt més amena la realització del treball ja que a mesura que anava avançant en la recerca tenia ganes de seguir aprenent-ne més.

Parlant ara dels resultats obtinguts, si bé és cert que les partícules d'alguns compostos purs com l'acetat de trans-2-Hexenil són massa petites com per ser detectades, els sensors són realment efectius quan es tracta de partícules d'aerosols o generades en processos de combustió.

Quant a les línies futures d'aquest treball, es podria intentar fer una xarxa de sensors sense fils a gran escala per un edifici sencer, una fàbrica o una planta química on es facin reaccions o combustions de residus. Amb més temps del que s'ha disposat per fer el treball, es podria haver desenvolupat una plataforma IoT a mida per la xarxa desenvolupada o una aplicació mòbil que capturés les dades i les mostregés a temps real. Evidentment, també es podrien haver implementat millores al prototip ja dissenyat, com per exemple un recobriment amb impressió 3D pels nodes, amb espai per una bateria o *power bank*, o fins i tot incloure algun sensor electroquímic que ens ajudés a detectar concentració d'algun compost concret, com el CO₂, tot i que això no era l'objecte d'estudi d'aquest TFG.

En general, el projecte ha estat una experiència molt enriquidora i profitosa de la que he extret aprenentatges molt positius. Assolir els objectius marcats fan que el resultat final sigui satisfactori.

7. Referències i webgrafia

- [1] Organització Mundial de la Salut (OMS). [Accés: 14/03/2023]. URL: <https://www.who.int/es/news/item/25-03-2014-7-million-premature-deaths-annually-linked-to-air-pollution>
- [2] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Vicepresidencia Tercera del Gobierno de España. “Emisiones. Problemática ambiental y contaminantes”. [Accés: 14/03/2023]. URL: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/>
- [3] Wikipedia. “Wireless sensor network”. [Accés: 29/03/2023]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_sensor_network
- [4] Dr. Agustí Solanas. “Tema 1: Aplicacions amb Xarxes de Sensors”. Teoria sobre les aplicacions de les WSN de l'assignatura Aplicacions per a les Xarxes de Sensors, la Internet de les Coses i les Ciutats Intel·ligents.
- [5] Mohd Fauzi Othman, Khairunnisa Shazali. “Wireless Sensor Network Applications: A Study in Environment Monitoring System”. *Procedia Engineering*, vol.41, pp.1204, 2012.
- [6] David Girbau; Ramón Villarino. “Tema 3: Wireless Sensor Networks (WSN)”. Teoria sobre les WSN de l'assignatura Tecnologies per a les Xarxes de Sensors, la Internet de les Coses i les Ciutats Intel·ligents.
- [7] Zona Movilidad. “Redes de Sensores Inalámbricos”. [Accés: 13/04/2023]. URL: [Redes de sensores inalámbricos \(WSN\): características, aplicaciones y tecnologías inalámbricas | Zonamovilidad.es](https://zonamovilidad.es/redes-de-sensores-inalambricos-wsn-caracteristicas-aplicaciones-y-tecnologias-inalambricas)
- [8] Wikipedia. “Sensor node”. [Accés: 16/04/2023]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Sensor_node
- [9] Culturación. “Topología de red: malla, estrella, árbol, bus y anillo”. [Accés 15/05/2023]. URL: <https://culturacion.com/topologia-de-red-malla-estrella-arbol-bus-y-anillo/>
- [10] Wikipedia. “Topología de red”. [Accés: 21/04/2023]. URL: https://es.wikipedia.org/wiki/Topolog%C3%ADa_de_red
- [11] InternationalIT. “Topología de Red.: conozca los principales tipos”. [Accés: 22/04/2023]. URL: <https://www.internationalit.com/post/topologia-de-red-conozca-los-principales-tipos?lang=es>
- [12] Dr. Agustí Solanas; Dr. Josep M^a Banús. “Tema 3: Encaminament i Interconnexió de Xarxes. Part 2: Encaminament Dinàmic Interior”. Teoria sobre encaminament dinàmic de l'assignatura Disseny de Xarxes.
- [13] Juan Manuel Palacios. “Estudio del Sistema de Conexión Inalámbrica Mediante Nodos de Comunicación con Salida a Internet”. Treball Final de Grau a la ETSE de la URV, 2021.
- [14] Wikipedia. “Zigbee”. [Accés: 01/05/2023]. URL: <https://es.wikipedia.org/wiki/Zigbee>
- [15] Digi. “Red de malla inalámbrica Zigbee”. [Accés: 01/05/2023]. URL: <https://es.digi.com/solutions/by-technology/zigbee-wireless-standard>
- [16] GeeksforGeeks. “Introduction of Zigbee”. [Accés: 05/05/2023]. URL: <https://www.geeksforgeeks.com/introduction-of-zigbee/>
- [17] InformIT. “Introduction to the ZigBee Wireless Sensor and Control Network”. [Accés: 05/05/2023]. URL: <https://www.informit.com/articles/article.aspx?p=1409785&seqNum=2>
- [18] How2Electronics. “Bluetooth Low Energy Basics: Classic Bluetooth vs Bluetooth LE”. [Accés: 08/05/2023]. URL: <https://how2electronics.com/classic-bluetooth-vs-bluetooth-low-energy-comparison/>

- [19] Antonio Ramón Lázaro. “Bluetooth Low Energy (BLE) Technology”. Teoria sobre Bluetooth BR/EDR i BLE de l'assignatura Laboratori de Sensors i Tecnologies Mòbils.
- [20] Semtech Corporation. “LoRa Developer Portal: What are LoRa® and LoRaWAN®?”. [Accés: 11/05/2023]. URL: <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>
- [21] Medium. “Haciendo IoT con LoRa: Capítulo 1.- ¿Qué es LoRa y LoRaWAN?”. [Accés: 12/05/2023]. URL: <https://medium.com/beelan/haciendo-iot-con-lora-cap%C3%ADtulo-1-qu%C3%A9-es-lora-y-lora-wan-8c08d44208e8>
- [22] Medium. “Haciendo IoT con LoRa: Capítulo 2.- Tipos y Clases de Nodos”. [Accés: 12/05/2023]. URL: <https://medium.com/beelan/haciendo-iot-con-lora-capitulo-2-tipos-y-clases-de-nodos-3856aba0e5be>
- [23] Moko LoRa. “How To Calculate The Network Capacity of LoRaWAN Gateway?”. [Accés: 14/05/2023]. URL: <https://www.mokolora.com/calculate-the-network-capacity-of-lorawan-gateway/>
- [24] Wikipedia. “Wifi”. [Accés: 20/05/2023]. URL: <https://es.wikipedia.org/wiki/Wifi#>
- [25] Wikipedia. “IEEE 802.11”. [Accés: 20/05/2023]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11
- [26] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Vicepresidencia Tercera del Gobierno de España. “Partículas en suspensión”. [Accés: 22/05/2023]. URL: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/particulas.aspx>
- [27] Pérez Vidal, H; Lunagómez Rocha, MA; Acosta Pérez, LI. “Análisis de partículas suspendidas totales (PST) y partículas fracción respirable (PM10), en Cunduacán, Tabasco”. Universidad y ciencia, Villahermosa, v.26, n.2, p.151-162, agosto 2010. [Accés: 22/05/2023]. URL: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792010000200003
- [28] Roberts, A; Associates Inc. “Manual de Control de la Calidad del Aire”. Calidad de Aire En America Latina, June 2009, 2–5. [Accés: 25/05/2023]. URL: https://www3.epa.gov/ttn/catc/dir2/c_allchs-s.pdf
- [29] Wikipedia. “Particle size”. [Accés: 25/05/2023]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Particle_size
- [30] Wikipedia. “Partículas en suspensión”. [Accés: 28/05/2023]. URL: https://es.wikipedia.org/wiki/Part%C3%ADculas_en_suspensi%C3%B3n
- [31] Pere Casan Clarà; Francisco Rodríguez Jerez; José Belda Ramírez; Cristina Martínez González. “Depósito de partículas inhaladas en el pulmón y su impacto clínico”. Universidad de Oviedo. Hospital Universitario Clínico de San Cecilio. Hospital Arnau de Vilanova. Facultad de Medicina de la Universidad Católica de Valencia. [Accés: 28/05/2023]. URL: <https://multimedia.elsevier.es/PublicationsMultimediaV1/item/multimedia/S0300289623000273:mmc1.pdf?idApp=UINPBA00003Z#:~:text=En%20cualquier%20caso%2C%20las%20part%C3%ADculas,superiores%20de%20las%20v%C3%ADdas%20respiratorias.>
- [32] Ecologistas en acción. “¿Qué son las PM2,5 y cómo afectan a nuestra salud?”. [Accés: 26/05/2023]. URL: <https://www.ecologistasenaccion.org/17842/que-son-las-pm25-y-como-afectan-a-nuestra-salud/>
- [33] Área Metropolitana Valle de Aburrá. “Principales contaminantes del aire”. [Accés: 28/05/2023]. URL: <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/paginas/generalidades/principales-contaminantes.aspx>
- [34] Becerra Pérez, Luis Armando; Ramos Álvarez, Roberto Alonso. “Evaluación del impacto en la salud por partículas PM2,5 en Sinaloa, México”. Rev. Int. Contam. Ambient, Ciudad de México, v.36, n.2, p.249-259, any 2020. [Accés: 28/05/2023]. URL: <https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188->

- [49992020000200249&script=sci_arttext#:~:text=De%20acuerdo%20con%20estudios%20epidemiol%C3%B3gicos,\(Cohen%20et%20al.%202005%20C](https://doi.org/10.1016/j.scitech.2020.100000)
- [35] Calidad de aire. “Mala calidad del Aire: ¿Qué son las partículas PM10 y cómo nos afectan? [Accés: 28/05/2023]. URL: <https://www.calidaddeaire.com/mala-calidad-del-aire-que-son-las-particulas-pm10-y-como-nos-afectan/>
- [36] ATMO. “What is PM?” [Accés: 28/05/2023]. URL: <https://atmotube.com/atmotube-support/what-are-the-pms>
- [37] Europapress. “La OMS fija riesgos importantes para la salud en niveles de contaminación considerados hasta ahora seguros”. Madrid, 2021. [Accés: 28/05/2023]. URL: <https://www.europapress.es/sociedad/medio-ambiente-00647/noticia-oms-fija-riesgos-importantes-salud-niveles-contaminacion-considerados-ahora-seguros-20210922183843.html>
- [38] Solectro. “Sensores de calidad del aire - Parámetros, niveles y características”. [Accés: 29/05/2023]. URL: <https://solectroshop.com/es/blog/sensores-de-calidad-del-aire-parametros-niveles-y-caracteristicas-n79>
- [39] Wikipedia. “Mie Scattering”. [Accés: 29/05/2023]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Mie_scattering#:~:text=Mie%20scattering%20occurs%20when%20the.commo,n%20causes%20of%20Mie%20scattering.
- [40] SOS electronic. “Avance tecnológico en sensores ópticos de material particulado atmosférico”. [Accés: 29/05/2023]. URL: <https://www.soselectronic.com/es/articulos/sensirion/avance-tecnologico-en-sensores-opticos-de-material-particulado-atmosferico-2217>
- [41] DFRobot. “Gravity PM2.5 Air Quality Sensor Datasheet”. [Accés: 15/05/2023]. URL: https://wiki.dfrobot.com/Gravity_PM2.5_Air_Quality_Sensor_SKU_SEN0460
- [42] Solectro. “Nova PM Sensor SDS011 – Sensor de calidad del aire – alta precisión làser PM2.5 Mòdulo test polvo”. [Accés: 01/06/2023]. URL: <https://solectroshop.com/es/sensores-calidad-del-aire/5228-nova-pm-sensor-sds011-sensor-de-calidad-del-aire-alta-precision-laser-pm25-modulo-test-polvo.html>
- [43] The Things Industries. “The Things Indoor Gateway”. [Accés: 09/04/2023]. URL: <https://www.thethingsindustries.com/docs/gateways/models/thethingsindoorgateway/>
- [44] Heltec Automation Community Forum. “Heltec V3 ESP LORA 32 Does NOT WORK!”. [Accés 25/04/2023]. URL: <http://community.heltec.cn/t/heltec-v3-esp-lora-32-does-not-work-aaron-lee-respond-now/12000>
- [45] Heltec Automation Community Forum. “Heltec WiFi LoRa 32 (V3) Sketches & OLED not working”. [Accés 25/04/2023]. URL: <http://community.heltec.cn/t/heltec-wifi-lora-32-v3-sketches-oled-not-working/12755>
- [46] Heltec Automation Community Forum. “Heltec LoRa 32 V3 nightmares”. [Accés 25/04/2023]. URL: <http://community.heltec.cn/t/heltec-lora-32-v3-nightmares/12133>
- [47] LilyGO. “LILYGO@ TTGO LORA32 868/915Mhz ESP32 LoRa OLED 0.96 Inch Display Bluetooth WIFI ESP32 ESP-32 Module with Antenna”. [Accés: 03/06/2023]. URL: http://www.lilygo.cn/prod_view.aspx?TypeId=50060&Id=1326&FId=t3:50060:3
- [48] EverythingRF. “What are I-PEX MHF Connectors?”. [Accés: 03/06/2023]. URL: <https://www.everythingrf.com/community/what-are-i-pex-mhf-connectors>
- [49] Antonio Ramón Lázaro. “Wearable technologies”. Teoria sobre wearables y dispositivos IoT de l’assignatura de Telemedicina.

[50] “*Guia ThingSpeak*”. Explicació de com crear i utilitzar un canal de ThingSpeak de l'assignatura Tecnologies per a les Xarxes de Sensors, la Internet de les Coses i les Ciutats Intel·ligents.

[51] The Good Scents Company. “*trans-2-hexenyl acetate*”. [Accés: 02/06/2023]. URL: <http://www.thegoodscentscompany.com/data/rw1031091.html#tblndr>

[52] Cymit Química S.L. “*trans-2-hexenyl acetate*”. [Accés: 02/06/2023]. URL: <https://cymitquimica.com/es/productos/3B-A0877/2497-18-9/trans-2-hexenyl-acetate/>

8. Annexos

8.1. Codi d'un dels *end-nodes* transmissors amb sensor

```
// Codi end-node transmissor LoRa pel mòdul TTGO LoRa32-OLED V1
// Mesures enviades de PM2,5 i PM10 del DFRobot Air Quality Sensor

// s'inclouen totes les llibreries necessàries
#include <LoRa.h>
#include <SPI.h>
#include <esp_sleep.h>
#include "DFRobot_AirQualitySensor.h"

// definim les constants que es corresponen als pins
// que s'han de declarar del mòdul per transmetre
// i l'adreça que utilitza el sensor per establir comunicació
// amb el mòdul via bus I2C.
#define I2C_ADDRESS 0x19
#define SCK 5
#define MISO 19
#define MOSI 27
#define SS 18
#define RST 14
#define DIO0 26

// es crea la variable particle que es correspon al sensor
// definint que utilitzarà I2C (&Wire) i a quina adreça es correspon
DFRobot_AirQualitySensor particle(&Wire, I2C_ADDRESS);

// definim l'ID del node per distingir-los al receptor
// l'altre node de la xarxa tindrà l'ID 0x02 i així seria successivament
uint8_t node_id = 0x01;

void setup() {

  Serial.begin(115200);
  while(!Serial);

  // inicialitzem els pins del nostre modul TTGO LoRa32-OLED V1
  // per poder utilitzar les comunicacions LoRa

  SPI.begin(SCK, MISO, MOSI, SS);
  LoRa.setPins(SS,RST,DIO0);

  while(!LoRa.begin(868E6)) {

    Serial.println("ERROR inicialitzant la comunicacio LoRa.");
    delay(1000);

  }
  LoRa.setTxPower(14, PA_OUTPUT_RFO_PIN);
  LoRa.setSyncWord(0xF3);

  Serial.println("Comunicacio LoRa inicialitzada.");
}
```

```
while(!particle.begin()) {

    Serial.println("No hi ha cap dispositiu");
    delay(1000);

}

Serial.println("Sensor inicialitzat");

}

void loop() {

    // mesurem primer la concentracio de partícules PM2,5 i PM10
    // i les guardem a un buffer d'enters sense signe de 16 bytes.
    uint16_t pm_buffer[2] =
    {particle.gainParticleConcentration_ugm3(PARTICLE_PM2_5_STANDARD),
    particle.gainParticleConcentration_ugm3(PARTICLE_PM10_STANDARD)};

    uint8_t buf[5];
    buf[0] = node_id; // NODE 1

    // verifiquem per Serial que les mesures s'han realitzat correctament.
    Serial.print("PM2.5 = ");
    Serial.print(pm_buffer[0]);
    Serial.println(" ug/m3");
    Serial.print("PM10 = ");
    Serial.print(pm_buffer[1]);
    Serial.println(" ug/m3");

    // amb la funcio memcpy copiem els bytes del nostre pm_buffer
    // a un buffer de bytes. Es transformen les dades per tal de
    // poder transmetre els paquets amb LoRa.h.
    memcpy(buf + 1, &pm_buffer, sizeof(pm_buffer));

    // es crea i s'envia el paquet amb el array de bytes
    LoRa.beginPacket();
    LoRa.write(buf, sizeof(buf));
    LoRa.endPacket();
    delay(5000);

}
```

8.2. Codi del node receptor que actuarà com a gateway amb Wi-Fi

```
// Codi gateway receptor LoRa pel mòdul TTGO LoRa32-OLED V1
// Dades enviades a través de WiFi a un Access Point
// per representar-les a ThingSpeak

// s'inclouen totes les llibreries necessàries
#include <LoRa.h>
#include <WiFi.h>
#include <SPI.h>
#include <ThingSpeak.h>

// definim les constants que es corresponen als pins
// que s'han de declarar del mòdul per utilitzar la comunicació LoRa
#define SCK 5
#define MISO 19
#define MOSI 27
#define SS 18
#define RST 14
#define DIO0 26

// variables pertinents al SSID i la contrassenya del AP.
const char ssid[] = "SSID";
const char password[] = "PASSWORD";

// variables del ID i la WriteKey del canal de ThingSpeak
unsigned long channel_id = 2168517;
const char* write_key = "V0EDFYVHYL46QI9C";

// es declara un array de bytes sense signe on arribaran les dades
// enviades pels mòduls transmissors LoRa
uint8_t buf[5];

// es declara el buffer de enters sense signe de 2 bytes
// per tal de copiar les dades del buffer anterior i poder llegir
// les dades reals que s'han mesurat inicialment.
uint16_t pm_buffer[2];

int i = 0;

// declarem un client WiFi amb el que accedirem a la IP de ThingSpeak
WiFiClient client;

void setup() {

  Serial.begin(115200);
  while(!Serial);

  // inicialitzem els pins del nostre mòdul TTGO LoRa32-OLED V1
  // per poder utilitzar les comunicacions LoRa
  SPI.begin(SCK, MISO, MOSI, SS);
  LoRa.setPins(SS, RST, DIO0);
```

```

while(!LoRa.begin(868E6)) {

    Serial.println("ERROR inicialitzant la comunicacio LoRa.");
    delay(1000);

}
LoRa.setSyncWord(0xF3);
Serial.println("Comunicacio LoRa inicialitzada.");

WiFi.begin(ssid,password);
while(WiFi.status() != WL_CONNECTED) {

    Serial.println("ERROR de connexio WiFi.");
    delay(1000);

}
Serial.println("Comunicacio WiFi inicialitzada.");

// accedim a ThingSpeak a través del client
ThingSpeak.begin(client);
delay(1000);
}

void loop() {

    // comprovem si hi ha algun paquet LoRa en recepció
    if(LoRa.parsePacket()){

        // mentre hi hagi dades rebudes per LoRa carreguem
        //byte a byte el buffer
        while(LoRa.available()) {

            buf[i] = LoRa.read();
            i++;

        }
        i = 0;

        // us de la funció memcpy per retornar les dades
        // al seu format original copiant les dades del buffer de bytes
        // al buffer d'enters de 2 bytes i transformant-les al format
        // del nou tipus de variable. Tenint en compte que a la primera
        // posició de buf va el ID del node transmissor el saltem escrivint
        // buf+1
        memcpy(&pm_buffer, buf+1, sizeof(pm_buffer));

        // si es llegeix el ID del node 1
        if(buf[0] == 0x01){

            Serial.println("Node 1: ");
            // les dades de PM obtindudes correspondran
            // als "Fields" 1 i 2 del canal de ThingSpeak
            ThingSpeak.setField(1,pm_buffer[0]);
            ThingSpeak.setField(2,pm_buffer[1]);

        }

    }
}

```

```
// en canvi si es llegeix el ID del node 2
else if(buf[0] == 0x02){

    Serial.println("Node 2: ");
    // les dades de PM obtingudes correspondran
    // als "Fields" 3 i 4 del canal de ThingSpeak
    ThingSpeak.setField(3,pm_buffer[0]);
    ThingSpeak.setField(4,pm_buffer[1]);

} // d'aquesta manera cada sensor
  // tindra els seus grafics de PM10 i PM2,5 per separat

// verifiquem per Serial les dades obtingudes
// i que s'hagin llegit correctament
Serial.print("PM2,5 = ");
Serial.print(pm_buffer[0]);
Serial.println(" ug/m3");
Serial.print("PM10 = ");
Serial.print(pm_buffer[1]);
Serial.println(" ug/m3");
Serial.println();

// enviem a ThingSpeak els fields anteriors al nostre canal
ThingSpeak.writeFields(channel_id, write_key);
Serial.println("Dades enviades a ThingSpeak correctament");

}

}
```