
This is the **published version** of the bachelor thesis:

Gómez Gómez, Carlos; Carrabina Bordoll, Jordi, dir. Estudi de cobertura de la xarxa LoRaWAN a la UAB i demostració de la cadena IoT. 2022. (958 Enginyeria Informàtica)

This version is available at <https://ddd.uab.cat/record/264166>

under the terms of the  license

Estudi de cobertura de la xarxa LoRaWAN a la UAB i demostració de la cadena IoT

Carlos Gómez Gómez

Resum– Les tecnologies de comunicació conegudes com a Low Power Wide Area network (LPWAN) proveeixen una solució rendible de llarg abast i baix consum per a xarxes de dispositius sense fils. Disposen de moltes aplicacions en la indústria de l'Internet de les coses (IoT). LoRaWAN és una de les tecnologies LPWAN més populars. En aquest treball s'utilitza el programa HTZ Communications per simular la cobertura de la xarxa LoRaWAN instal·lada a la Universitat Autònoma de Barcelona. Els resultats de la simulació són comparats amb les mesures reals obtingudes a l'interior i a l'exterior del campus. Addicionalment, es realitzarà un estudi de cobertura passiu instal·lant tres dispositius LoRaWAN. L'objectiu del treball és analitzar la precisió de la simulació portada a cap, avaluar la qualitat de la xarxa LoRaWAN de la UAB i proposar possibles accions per augmentar la cobertura en àrees fosques. Per assolir aquest objectiu s'haurà d'implementar una xarxa IoT completa.

Paraules clau– Internet de les coses, Simulació, Xarxes d'àrea ampla, LoRaWAN, LPWAN.

Abstract– Communication technologies known as the Low Power Wide Area Network (LPWAN) provide a cost-effective long-range and low-consuming solution for wireless device networks. They have many applications on the Internet of Things (IoT) industry. LoRaWAN is one of the most popular LPWAN technologies. In this paper the HTZ Communications software is used to simulate coverage of the LoRaWAN network installed at the Universitat Autònoma de Barcelona. The results of the simulation are compared to the real measurements obtained inside and around the campus. Additionally, a passive coverage study will be performed installing three LoRaWAN devices. The goal of the paper is to analyse and evaluate the quality of the UAB LoRaWAN network and propose possible actions to increase coverage in dark areas. To achieve this goal, a complete IoT network must be implemented.

Keywords– Internet of Things, Simulation, Wide-area networks, LoRaWAN, LPWAN.



1 INTRODUCCIÓ - CONTEXT DEL TREBALL

LA tecnologia LoRa és una tecnologia de comunicació sense fils en la banda lliure ISM de 868 MHz (915 MHz als EUA i altres parts del món) de gran abast, implementada amb xips d'escàs consum de bateria, amb una amplada de banda (bit rate) i cicle de treball (duty cycle) baixos. LoRa s'utilitza en la indústria de l'Internet de les coses (IoT), on usualment hi ha limitacions de consum de bateria en els dispositius, ja que estan alimentats per bateria. Aquest tipus de xarxes s'anomenen Low-Power Wide

Area Networks (LPWAN). L'avantatge principal de les tecnologies ultra narrow band recau en la seva cobertura, és a dir, amb un sol gateway es pot cobrir gran àrea.

Inicialment, la tecnologia LoRa fou promoguda pel fabricant de xips Semtech i actualment es governa per l'associació LoRa Alliance [25]. Es tracta d'una organització sense ànim de lucre creada amb l'objectiu de donar suport i promoure l'adopció global de l'estàndard LoRaWAN. Disposen d'un catàleg de dispositius certificats que garanteixen un rendiment constant dels sensors IoT.

Cal diferenciar entre LoRa i LoRaWAN. Segons el model OSI, es pot classificar a LoRa com la part de capa física del protocol mentre que LoRaWAN, seria capa d'enllaç de dades o capa de xarxa.

LoRa és un acrònim de Long Range (Llarg Abast) i respon la tècnica de modulació sense fil desenvolupada a partir de la tecnologia chirp spread spectrum (CSS). Les freqüències de treball de LoRa són les següents: 868 Mhz a Europa, 915 Mhz a Amèrica i 433 Mhz a Àsia. Entre les

- E-mail de contacte: 1460840@uab.cat
- Menció realitzada: Enginyeria de Computadors
- Treball tutoritzat per: Jordi Carrabina Bordoll (Departament de Microelectrònica i de Sistemes Electrònics) i Marc Codina Barberà (Departament de Microelectrònica i de Sistemes Electrònics)
- Curs 2021/22

seves característiques principals destaquen les següents:

1. **Llarg Abast:** En condicions urbanes com a ciutats, l'abast de Lora pot arribar a ser d'uns 3 km, en canvi, en zones rurals amb menys edificis l'abast pot arribar a 30 km.
2. **Baixa transmissió de dades:** Això no suposa un problema quan es tracta d'enviar dades de mesures realitzades per molts tipus de sensors: ambientals, químics, etc.
3. **Baix consum:** la bateria dels dispositius pot durar entre 5 i 10 anys depenent del cicle de treball dels dispositius.
4. **Gran quantitat de dispositius connectats:** Amb un sol Gateway es poden connectar milers de dispositius. Per desplegar una xarxa LoRa es requereix una menor quantitat de Gateways que els necessaris per a desplegar una xarxa mòbil.

D'altra banda, LoRaWAN és un protocol de la capa de control d'accés a mitjans Media Access Control (MAC), construït sobre la modulació LoRa. La responsabilitat del desenvolupament i el manteniment del protocol LoRaWAN recau sobre l'associació LoRa Alliance. L'arquitectura de la xarxa LoRaWAN aquesta formada per elements físics i programari.

Els elements físics els componen els dispositius finals i gateways. Els primers són els dispositius i actuadors que interactuen amb el medi, captant informació o realitzant accions en ell, i es comuniquen enviant missatges LoRa als gateways. Els Gateways realitzen la comunicació entre els dispositius finals i els Network Servers.

Els elements de software estan conformats pels Network Servers, Application Servers i Join Servers. Els Network Servers són els encarregats de gestionar tota la xarxa LoRa, els Application Servers són els encarregats de processar de manera segura les dades d'aplicació i els Join Servers, s'encarreguen de processar els missatges de join-request enviats pels dispositius. A la figura 1 es mostra un esquema de l'arquitectura LoRa creat per The Things Industries [30].

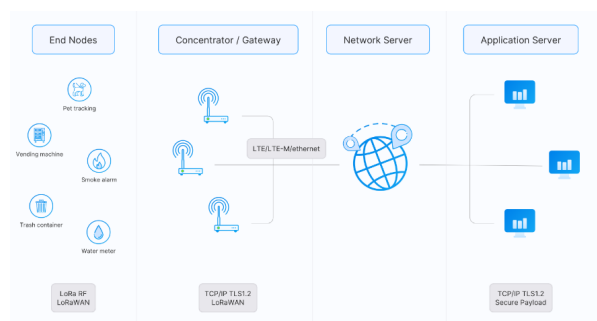


Fig. 1: Arquitectura xarxa LoRaWAN

1.1 Estudis previs

Els últims anys s'han realitzat diversos estudis que analitzen la cobertura de les xarxes LoRaWAN en exteriors i interiors.

Els estudis i mesures prèvies mostren bones cobertures en àrees suburbanes. Depenent del spreading factor utilitzat

l'àrea que cobreix el gateway varia, amb un SF de 12 s'obté una bona cobertura a uns 3 km i amb un SF 7 la cobertura és de 2,3 km [1]. En els estudis preliminars normalment es realitzen les mesures amb SF 7 i 12, ja que són els valors màxims i mínims que el SF pot tenir.

En altres estudis en àrees exteriors [2] s'obté un radi de cobertura d'uns 2 km de radi amb un SF12 i 1,2 km amb SF 7. A més van cobrir una ciutat d'uns 100 km² utilitzant 30 gateways. El desplegament de la xarxa tenia una densitat de 7000 habitants per Gateway.

En altres estudis realitzats a l'exterior en entorns urbans es va obtenir una ràtio del 80% de missatges rebuts en un rang de distàncies fins a 5 km i una ràtio del 60% en distàncies entre 5 i 10 km. En el mateix estudi també es van dur a terme proves amb un vaixell i es va assolir un rang de comunicació de gairebé 30 km amb aproximadament una ràtio del 70% de missatges rebuts en distàncies inferiors a 15 km.[3]

A part dels diversos estudis realitzats en exteriors també s'han realitzat diferents estudis a l'interior dels edificis. En l'estudi [4] s'indica que amb un gateway LoRa es poden arribar a cobrir àrees interiors d'uns 34000 m² amb un spreading factor (SF) de 7, de la mateixa manera, s'ha verificat que amb un gateway es pot donar servei a més de 6000 dispositius mentre que es manté la relació de pèrdua de paquets per sota del 10%.

En l'estudi [5] els autors han realitzat milers de mesures per obtenir el rendiment de la xarxa. El gateway va ser instal·lat a l'interior de l'edifici on les mesures es van realitzar en la mateixa planta i en les plantes superiors i inferiors. Depenent del punt on es realitzaven les mesures obtenien una taxa de missatges perduts entre el 5% i el 40 %.

En un altre estudi [6] s'ha analitzat la cobertura LoRaWAN en un hospital i els valors de RSSI obtinguts van ser sempre superiors a -132 dBm. Es podria finalment destacar que, el menor percentatge de paquets rebuts obtingut va ser del 94,7%.

1.2 Objectiu del TFG

L'objectiu del treball és realitzar un estudi amb un simulador tridimensional que tingui en compte el relleu de la superfície terrestre (incloent-hi els edificis) que permeti conèixer la cobertura de la xarxa LoRaWAN instal·lada a la UAB i comprovar experimentalment si la simulació realitzada concorda amb els valors de cobertura reals. Així mateix, es pretén analitzar si els valors de cobertura de senyal varien en el temps.

Per tal d'assolir aquest objectiu, aquest treball proposa optimitzar els paràmetres del simulador fins a obtenir un model prou acurat.

La realització d'aquest projecte ha sigut possible gràcies al suport de l'empresa Cellnex Telecom que ha facilitat l'accés al simulador, als dispositius de mesura i a la plataforma en Cloud.

2 METODOLOGIA A SEGUIR

Es portaran a terme dos estudis de cobertura utilitzant dues tècniques diferents. Es farà una simulació de l'àrea que cobreixen els dos gateways. L'eina de simulació, ens permet

obtenir una visió general de la cobertura que seria impossible.

Paral·lelament, es realitzaran mesures in situ per conèixer la cobertura real. S'utilitzaran dues tècniques diferents. Primerament, es portarà a cap una mesura manual amb un dispositiu amb GPS per mesurar la cobertura en diversos punts estratègics. Amb la finalitat d'aconseguir dades de la xarxa al llarg del temps, s'instal·laran tres dispositius LoRaWAN en el campus i s'estudiaran les dades assolides.

2.1 Estudi de cobertura teòric

Primerament, es vol generar un mapa de cobertura de la xarxa LoRa d'Universitat Autònoma de Barcelona.

Generalment, quan es duen a terme projectes de IoT en exteriors, prèviament es genera un mapa de cobertura teòric. Aquest mapa permet identificar si els gateways instal·lats a la zona són suficients o per contra és necessari instal·lar més gateways.

Per realitzar la planificació de desplegament de sistemes de radiofreqüència s'utilitzarà l'eina HTZ Communications [17], es tracta d'un programa que permet realitzar planificacions de ràdio. S'ha utilitzat en diversos estudis, com per exemple en l'estudi [14] per avaluar diferents models de propagació.

Els dispositius indoor, necessiten tenir més cobertura que els dispositius outdoor, ja que dins d'un edifici hi ha moltes atenuacions del senyal.

Cal tenir en compte que hi ha dispositius, com per exemple els dispositius per detectar l'estacionament de cotxes, que s'instal·len a l'exterior, però requereixen una cobertura com si es tractés un dispositiu indoor. Això és degut a l'atenuació del senyal que es produeix a causa del vehicle.

2.2 Estudi de cobertura mesurat

Adicionalment, es vol desenvolupar un estudi de cobertura mesurat. La idea és realitzar l'estudi de cobertura tècnic in situ un cop ja s'hagi desenvolupat l'estudi de cobertura teòric, per tal de comparar ambdós models. S'utilitzarà el dispositiu FTD Network Tester d'Adeunis per mesurar els paràmetres de xarxa [15].

2.3 Estudi de cobertura passiu

S'instal·laran tres dispositius LoRa del fabricant Milesight [19]. Els dispositius s'instal·laran i s'analitzaran les dades de xarxa obtingudes per comparar-les amb els valors simulats. És realitzaran totes les configuracions necessàries per poder veure les dades a la plataforma de Cellnex

2.4 Anàlisi de dades i prestacions

S'analitzaran totes les dades obtingudes per tal d'extreure les conclusions pertinents. Es valorarà les diferents formes d'ampliar la cobertura en funció de les necessitats requerides.

2.5 Proposta d'ampliació de cobertura

Un cop analitzades les dades obtingudes de l'experimentació, s'aportaran recomanacions per tal de cobrir les possibles zones on els nivells de cobertura no són suficients.

3 ARQUITECTURA

L'arquitectura de les xarxes Iot generalment es pot desglossar en tres capes. La capa de percepció (Device), la capa de xarxa o (Edge) i la capa d'aplicació (Cloud).

La capa de percepció correspon a la capa física de l'arquitectura Iot, actuant com a medi entre el món físic i digital. Els dispositius estan equipats amb sensors o actuadors. Els sensors s'utilitzen per detectar paràmetres físics com humitat, temperatura, pressió atmosfèrica. Generalment, són de mida reduïda i requereixen poca energia per funcionar. Els actuadors representen una part dels dispositius que permeten transformar un senyal físic en accions físiques. Els dispositius IoT, normalment han de disposar de bateries per mantenir una vida de funcionament llarga, donat pel fet que poden ser instal·lats en ubicacions remotes amb difícil accés a fonts d'energia.

La capa de xarxa té la funció de transportar les dades des de la capa de percepció a la capa d'aplicació. Això inclou a totes les tecnologies i protocols que fan que aquesta connexió sigui possible. Hi ha un gran nombre de protocols que poden ser utilitzats en IoT. Per exemple, protocols pensats per ser emprats en xarxes cablejades com IPv6 o protocols sense fils com ZigBee, Sigfox, Bluetooth, LoRaWAN entre altres.

Els protocols sense fils són particularment importants en el IoT, pel fet que els sensors poden estar en instal·lats en àrees de difícil accés i requereixen menys material i recursos que les xarxes cablejades. Un altre factor rellevant és la facilitat d'afegir i eliminar nodes de la xarxa.

En altres casos d'ús, pot ser requerida una xarxa cablejada, ja que presenten una major fiabilitat, tasses de transmissió més elevades que les xarxes sense fils i facilitat per a l'alimentació elèctrica.

La capa d'aplicació, inclou tot el software necessari per emmagatzemar i tractar les dades per oferir un servei específic. Les dades són emmagatzemades, agregades, filtrades i processades. Com a resultat d'aquestes transformacions les dades són accessibles per les aplicacions IoT.

3.1 Device

En aquest projecte per realitzar les mesures de la xarxa s'ha utilitzat el dispositiu Field Test Device LoRaWAN 863-870 d'Adeunis [15]. Es tracta d'un dispositiu LoRaWAN classe A que suporta múltiples freqüències per adaptar-se a les diferents regions. El dispositiu permet dur a terme mesures de la cobertura de la xarxa i visualitzar l'estat en temps real. A més disposa de GPS i altres mètriques com la temperatura que aporten informació extra.

Per realitzar l'estudi de cobertura passiu s'utilitzaran tres dispositius de qualitat d'aire de Milesight [19]. Aquest dispositiu té integrat nou sensors de qualitat d'aire. En aquest cas no es descodificaran els sensors de qualitat d'aire només es tindran en compte les dades de xarxa.

3.2 Edge

La xarxa LoRa de la UAB està formada per dos gateways que connecten directament a la xarxa internet de la UAB, un instal·lat a l'escola d'enginyeria i l'altre a la facultat de veterinària.

El model de gateway utilitzat és el Lorix One [18], es tracta d'un gateway outdoor robust i compacte. Els gateways s'han instal·lat fent servir l'antena de 5 dBi que bé amb el kit del gateway. En la configuració del gateway s'ha d'indicar l'antena que s'està emprant perquè el gateway ajusti la potència de Rx de sortida, a causa del fet que en la normativa Europea (ETSI EN 300 220-1), s'especifica que el gateway pot emetre com a màxim a una potència de 14 dBm ERP.

S'utilitza The Things Network (TTN) [26] com a network server, es tracta d'un network server de codi obert que permet construir i gestionar xarxes LoRaWAN.

Adicionalment, TTS disposa d'una gran quantitat d'integracions per ampliar les funcionalitats del stack.

Els gateways i els dispositius estan donats d'alta al TTS, per poder enviar i rebre els paquets.

3.3 Cloud

Per poder visualitzar i emmagatzemar les dades que envia el dispositiu de mesura d'Adeunis s'ha utilitzat la integració amb Azure IoT Central. És necessari utilitzar el mòdul Azure Device Bridge per obtenir les dades del network server, per poder emmagatzemar les dades s'empra Azure Blob Storage.

D'altra banda, s'utilitza la plataforma IoT de Cellnex per visualitzar i analitzar les dades provinents dels dispositius de mesura passius. La plataforma de Cellnex Telecom és una eina modular que permet la gestió dels diferents tipus de serveis en temps real. Segueix les recomanacions de la norma AENOR 178104 definida per la SEISAD.[21]

Per poder veure les dades a la plataforma de Cellnex s'ha desenvolupat el codi en Java Script per descodificar la informació provinent del dispositiu, crear el flux de dades en Node-RED [20] i realitzar les configuracions necessàries en la plataforma de Cellnex.

Node-RED és una eina de programació visual molt estesa en el món del IoT que va ser desenvolupada per IBM. Es treballa sobre un panell o "flow" al qual es van incorporant nodes que es comuniquen entre si.

El flux de dades ha sigut creat amb els nodes MQTT input, json, function, provision retriever, provision-ngsi-merger i el node de kafka. A la figura A.2.4 es mostra el fluxe de dades creat.

El node MQTT es configura perquè rebi les dades que s'envien mitjançant MQTT [22] des del network server de TTN. Un cop es té el missatge, s'utilitza el node json per convertir el missatge rebut d'un string a objecte json perquè es pugui descodificar.

El node function, permet incloure codi en java script, s'utilitza per incloure el codi per descodificar el missatge rebut i crear l'entitat NGSI [23] seguint el model de dades prèviament definit. Un cop ja es descodifica el missatge, s'obté la informació de l'eina de provisió de Cellnex amb el node provision retrievier i s'afegeix la informació rebuda de provisió al missatge descodificat amb el node provision-ngsi-merger. Aquests dos nodes han estat desenvolupats per Cellnex.

Finalment, és tornar a passar el missatge pel node json i s'envia al bus kafka [24]. El bus s'encarrega de distribuir la informació entre totes les capes de la plataforma.

4 NORMATIVA

La modulació LoRa opera en bandes ISM que no requereixen llicència del radi espectre i està regulada per l'estàndard normatiu en l'àmbit europeu definit pel European Telecommunications Standards Institut (ETSI). La regulació vigent de qualsevol radiofreqüència ve marcada per l'ETSI EN 300 220-1.

En l'àmbit europeu LoRa pot operar en les bandes lliures de 433 MHz i 868 MHz. L'organització LoRa Alliance, ha creat un document que reuneix la normativa específica que regulen a escala mundial LoRa i a LoRaWAN. Per al cas europeu s'han de consultar les seccions EU863-870 MHz i EU433 MHz ISM Band [10].

L'EIRP fa referència a la potència isotròpica equivalent radiada, que és la potència de sortida radiada referenciada a una antena isotròpica que irradia energia en totes les direccions i els guanys de les quals s'expressen en dBi. Per a les freqüències 863-870 MHz el valor màxim de l'EIRP pot ser de +16dBm, no obstant això, per a les freqüències entre 433 – 434 és de +12,15 dBm.

Les simulacions realitzades es realitzaran tenint en compte la normativa vigent. Per això els Gateways simulats emetran a 16 dBm d'EIRP.

5 SIMULACIÓ EN HTZ COMMUNICATIONS

La simulació es realitzarà utilitzant el programa HTZ Communications. Es tracta d'un programari de simulació de comunicacions per radi basat en un sistema d'informació de mapes. Ofereix capacitats avançades de planificació i optimització de xarxes de radi per a gairebé totes les tecnologies.

La simulació es realitzarà sobre la base d'un projecte creat prèviament, que es tracta d'un fitxer amb extensió .PRO que conté els enllaços a altres arxius amb la informació necessària per construir i analitzar una xarxa [12]. S'utilitza un mapa de la península Ibèrica que conté les dades de l'orografia de la península Ibèrica que són imprescindibles per portar a cap la simulació.

Per a realitzar la simulació s'han d'introduir les coordenades dels gateways juntament amb l'altura de l'antena respecte al sòl. Els dos gateways estan instal·lats en els terrats dels edificis a uns 20 metres d'altura.

El primer pas per a realitzar és calcular el balanç d'enllaç (Link Budget) del sistema. El balanç d'enllaç és el balanç entre tots els guanys i totes les pèrdues del sistema, això permet calcular la pèrdua màxima que podem disposar per a assegurar la comunicació entre el Gateway i el dispositiu. També permet veure quina ruta és més restrictiva si la que va del dispositiu al gateway (uplink) o la ruta que va del gateway al dispositiu (downlink).

Per a realitzar el càlcul del Link Budget es necessiten els següents paràmetres:

Per calcular el balanç d'enllaç s'ha utilitzat la següent fórmula:

$$Linkbudget = -(senbility) + Ptx + Gtx - Ltx + Grx - Lrx \quad (1)$$

El resultat d'aplicar aquesta fórmula és que les pèrdues de propagació màximes admissibles són les que es mostren a la taula 2. Per tant, l'enllaç és d'uplink, la ruta que va des

TAULA 1: PARÀMETRES PER LA SIMULACIÓ

Paràmetre	Valors
Potència Tx del gateway	Màxim 27 dBm (dB)
Guany de l'antena	5 dBi
Distància gateway i l'antena	0 m, antena integrada
Sensibilitat Rx del gateway	-135 dBm
Alçada dels gateway	20 m
Potència Tx del dispositiu	14 dBm
Guany de l'antena del dispositiu	No s'especifica
Distància dispositiu i l'antena	0m, antena integrada
Sensibilitat Rx del dispositiu	-140 dBm

del dispositiu al gateway, és l'enllaç limitant perquè suporta menys pèrdues.

TAULA 2: PÈRDUES DE PROPAGACIÓ MÀXIMES ADMISSIBLES

Color	Rang dBm
Gw to Device	158,2 dB
Device to Gw	157,5 dB

El llindar de simulació, utilitzat per definir la paleta de colors a representar, es calcula aplicant un marge de 16 dB al link budget calculat prèviament.

Com que el llindar s'ha calculat en dB, el valor obtingut s'ha de convertir a dBuV/m, ja que HTZ comunicacions treballa amb aquest tipus de dada. S'utilitza la següent fórmula per realitzar la conversió.

$$U_{\text{mbral}} = U_{\text{mbral}} - \text{Guany} + 20 * \text{LOG}_{10}(868) + 77.2 \quad (2)$$

El valor en dBuV/m obtingut és de -7,32, com que es tracta d'un nombre negatiu s'ha d'ajustar, perquè el programa no pot representar valors negatius.

Un cop ja es té el valor del link budget i la paleta ajustada es pot procedir a realitzar la simulació. A la figura 2 es mostra la cobertura simulada a partir dels dos gateways.

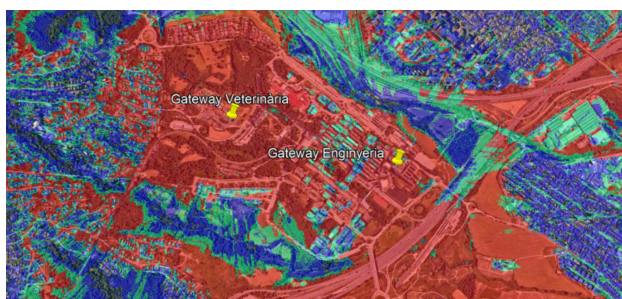


Fig. 2: Àrea de cobertura total simulada a partir del gateway de veterinària i del gateway d'enginyeria

Les àrees de cobertura representen el valor esperat de RSSI. S'utilitzaran el RSSI i el SNR per comprovar la qualitat de la xarxa. El RSSI indica la potència del senyal rebuda, es mesura en dBm i és un valor negatiu. Com més a prop al 0 millor és el senyal. El SNR és la relació entre el senyal i

soroll que corromp el senyal. Els valors del SNR en LoRa poden estar entre -20 dB i +10 dB. Com més a prop a +10 dB menys corromput està el senyal. A la taula 3 mostra la paleta de colors en funció dels nivells de RSSI.

TAULA 3: PALETA COLORS SIMULACIÓ

Color	Rang dBm
Vermell	-111 dBm
Verd	-121 dBm
Blau	-141 dBm

Les zones de cobertura vermella, corresponen a les zones que tenen més de 30 dBm de marge, aquestes zones són les adequades per la instal·lació de dispositius a l'interior dels edificis. Fins i tot es podrien arribar a instal·lar dispositius en nivells soterranis com per exemple plantes -1.

Les zones verdes es poden considerar zones de cobertura interior poc profunda, per exemple en aquesta zona es podrien instal·lar dispositius interiors a prop d'una finestra.

Les àrees de color blau, es podrien utilitzar per instal·lar dispositius a l'exterior. En el nostre cas el dispositiu de mesura pot arribar a captar -137 dBm. Normalment, en realitzar les simulacions se solen deixar uns 5 dBm de marge per tal de ser previnguts.

S'ha de tenir en compte, que és possible que no s'aconsegueixi la connexió fins i tot estant en una zona amb suposadament bona cobertura. Això pot ser degut a l'atenuació dels senyals a causa de l'atenuació estructural. L'atenuació estructural és l'atenuació dels senyals de ràdio quan penetren diferents obstacles, influenciant la recepció i transmissió dels senyals això provoca un escurçament de l'abast de la cobertura ràdio [13].

6 ESTUDI DE COBERTURA MESURAT

L'objectiu de la mesura de la xarxa LoRa recau en validar la simulació realitzada i comprovar els nivells de en el terreny. Les mesures s'han efectuat amb un SF de 7 emetent a 14 dBm de potència. S'han realitzat mesures per veure els nivells de cobertura a l'interior de l'escola d'enginyeria i mesures a l'exterior. En un primer moment es van realitzar les mesures exteriors en tres zones diferents: als voltants de les facultats de Filosofia i Educació, els voltants de la facultat de medicina i la vila universitària, quan només estava operatiu el gateway d'enginyeria i més tard es van realitzar unes mesures generals quan els dos gateways estaven operatius.

D'altra banda, s'han realitzat 250 mesures en l'interior de l'escola d'enginyeria, 100 mesures en cada una de les zones en les primeres mesures outdoor i 300 mesures en les mesures generals amb els dos gateways.

En la figura 3 es poden veure les coordenades exactes dels missatges rebuts en el gateway d'enginyeria. Mentre que a la figura 4 es veuen les coordenades dels missatges rebuts en el gateway de veterinària. Finalment, assenyalar que el color de les icones segueix la mateixa paleta de colors la simulació, en funció del valor de RSSI les coordenades es pinten en blau, verd i vermell.

TAULA 4: RESULTATS MESURAMENTS

Zona	Mitjana RSSI	Mitjana SRN	Mesures correctes
Interior Enginyeria	-91,01 dBm	5,99 dB	99 %
Filosofia i Educació	-104,27 dBm	3,87 dB	95 %
Facultat de Medicina	-99,95 dBm	4,77 dB	93 %
Vila Universitària	-114,03 dBm	0,26 dB	29 %
Mesures generals gateway Enginyeria	-110,36 dBm	1,37 dB	88 %
Mesures generals gateway Veterinària	-100,65 dBm	5,6 dB	92 %

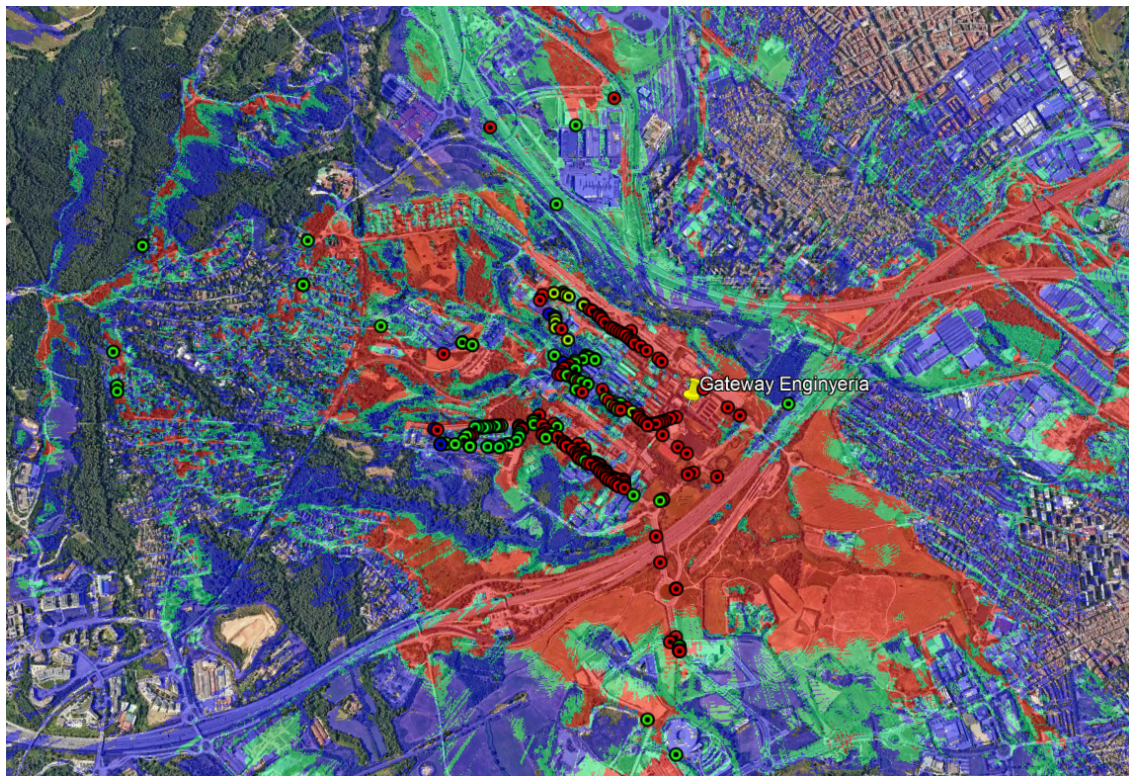


Fig. 3: Cobertura simulada del gateway d'enginyeria i missatges rebuts en el gateway d'enginyeria

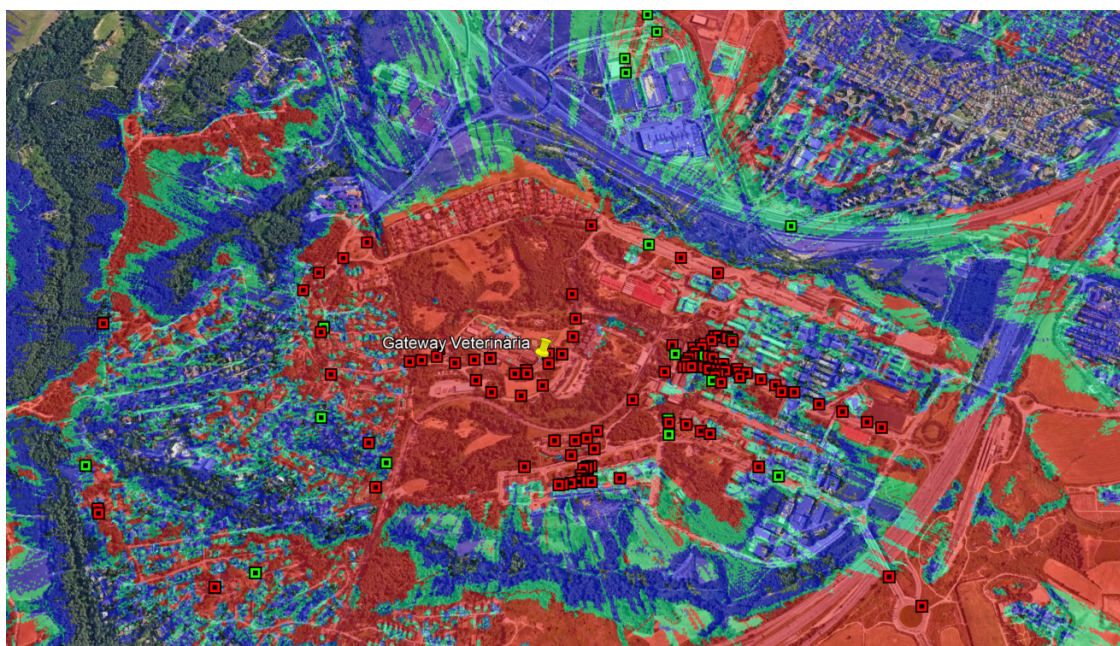


Fig. 4: Cobertura simulada del gateway de veterinària i missatges rebuts en el gateway de veterinària

6.1 Resultats obtinguts amb el gateway d'enginyeria

En aquesta secció es mostren els resultats obtinguts de les mesures realitzades quan el gateway d'Enginyeria era l'únic que estava operatiu.

La figura 5 mostra la correlació entre el RSSI i el SNR. Es pot observar que quan potencia rebuda és més gran de -110 dBm, el SNR varia entre 4 i 8 dB. Per contra quan el RSSI és menor de -110 dBm els SNR disminueix entre 4 i -4 dB. En el paper [16] es pot veure aquesta mateixa correlació amb les mesures obtingudes.

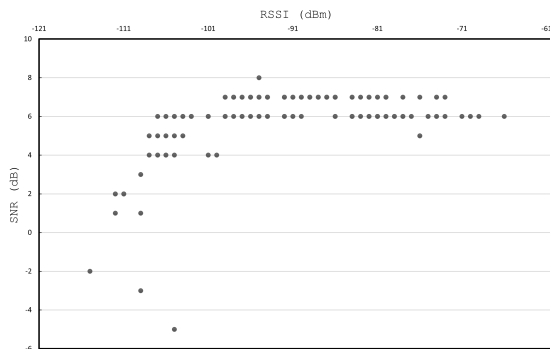


Fig. 5: Correlació entre els RSSI i SNR en l'interior de l'escola d'enginyeria

La figura 6 mostra la dispersió dels valors de RSSI obtinguts en les tres zones outdoor analitzades. Es pot veure que en la zona de la vila els valors de RSSI van entre -106 i -126 dBm, això pot explicar el fet que es rebin tan pocs paquets en aquesta zona. En la zona de Filosofia i Educació els valors de RSSI oscil·len entre -80 i -123 dBm i en la facultat de Medicina els valors rebuts estan en un rang d'entre -78 i -120 dBm.

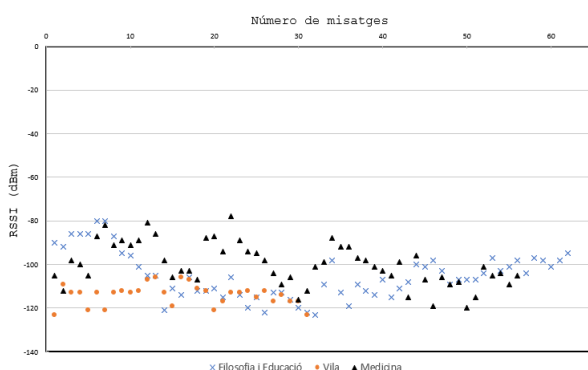


Fig. 6: Valors RSSI outdoor de les tres zones analitzades.

La taula 4 mostra els valors mitjans de RSSI, SNR i el percentatge de missatges rebuts en les distintes zones de mesura.

Els resultats obtinguts en indoor són molt bons, la mitjana de RSSI és 91,01 dBm i la del SNR és de 5,99 dB. Addicionalment, també s'han obtingut un bon nivell de cobertura el pàrquing de l'escola. Això es pot donar pel fet que es tracta d'un pàrquing que relativament obert, les parets laterals tenen unes obertures cap al exterior. Tanmateix

l'altura de l'edifici és de 4 plantes incloent el pàrquing i, per tant, amb un sol gateway es pot cobrir tot l'edifici. La taxa de missatges rebuts està al torn del 91 % i les mesures realitzades concorden amb les dades obtingudes a la simulació en un 99 %.

En zona analitzada de Filosofia i Educació el percentatge de missatges rebuts és de 74 % i malgrat que els nivells mitjans dels paràmetres de ràdio són bons, ja que la mitjana de RSSI és de 104,27 dBm i del SNR de 3,87 dB. Amb aquests nivells de ràdio obtinguts, el percentatge de missatges rebuts hauria de ser més elevat. Això es deu al fet que la gran majoria de missatges rebuts s'han obtingut en zones de cobertura amb nivells d'indoor amb un RSSI elevats. Aquest fet es pot veure clarament en la figura 3, on es pot veure la ubicació dels missatges que s'han rebut en el gateway superposats amb la simulació realitzada. Es pot veure que més de la meitat dels missatges rebuts se situen a la zona vermella de la cobertura. Aquesta zona coincideix amb aquelles zones, en les que hi ha menys edificis, a mesura que el senyal es va propagant entre els edificis aquesta es va atenuant. En la figura 3 es pot veure que hi ha dues zones on els valors de RSSI disminueixen, la primera zona de la facultat d'Educació i l'altre a la zona de la facultat de Ciències quan es realitzen mesures en aquestes zones, el percentatge de missatges rebuts es redueix considerablement. Hi ha algunes variacions entre la representació dels valors mesurats i esperats, ja que en molts casos els valors mesurats estan a la frontera de la paleta de colors, malgrat això, les mesures realitzades concorden amb les dades obtingudes a la simulació en un 95 %.

Els valors obtinguts en la zona de medicina són molt bons, el nivell mitjà de RSSI està per sobre de -100 dBm i la taxa de missatges rebuts és del 90 % i el SNR mitjà és de 4,77 dB. Les mesures obtingudes concorden amb la simulació en un 93 %. Aquesta zona reporta uns resultats molt satisfactoris, això és a causa del fet que és una zona que està situada a la mateixa elevació que el gateway i que les zones intermèdies entre el gateway i la facultat de medicina estan situades a una elevació inferior i, per consegüent, el senyal no es veu atenuat pels obstacles. El gateway està situat a uns 153 m d'alçada i la facultat de medicina a 150 m, i les zones intermèdies a 123 m.

La cobertura a la zona de la vila universitària es baixa, només el 44 % dels paquets han arribat i els paquets que han arribat han estat els que s'han enviat des de l'avinguda de can Domènech i del carrer de la Font del Carme, en els carrers interiors de la vila i en el carrer de la vila, a causa de l'atenuació del senyal amb els edificis s'han perdut molts paquets. El valor mitjà de RSSI és de 114,03 dBm i el valor mitjà de SNR és de 0,26 dB. Un SNR de 0,26 indica que el senyal incorpora molt soroll, fet que dificulta la transmissió dels missatges. A la figura 3 es pot veure que la majoria de les mesures realitzades són de color verd, entre -111 dBm i -121 dBm, però s'han realitzat en una zona vermella. Si s'analitzen aquests punts, es pot veure que els valors de RSSI obtinguts són de -112, -113, -114, -115 dBm són valors situats la frontera de la zona vermella que és -111 dBm. Això provoca que les mesures realitzades concordin amb la simulació en un 29%. El percentatge de mesures correctes s'incrementaria si apliquéssim un marge al mateix.

6.2 Mesures generals dels dos gateways

En aquesta secció es recullen els resultats de les mesures realitzades amb els dos gateways operatius.

Durant la segona fase de mesures, s'han realitzat mesures fora del campus universitari. En concret han estat efectuades a Bellaterra, al llarg de l'avinguda de la ciència i al sincrotró de Cerdanyola i al voltant de l'Ikea de Sabadell, amb l'objectiu de validar si la cobertura mesurada en aquells punts correspon amb la cobertura simulada.

En la figura 7 es mostra la dispersió dels valors de RSSI obtinguts en els dos gateways. Dels 300 missatges enviats, han arribat 94 missatges en el gateway d'enginyeria i 147 al gateway de veterinària. Es pot veure que la gran majoria dels missatges rebuts a enginyeria presenten un RSSI entre -100 i -120 dBm, mentre que si es miren els missatges rebuts a veterinària, la major part dels missatges estan en el rang de -80 a -110 dBm.

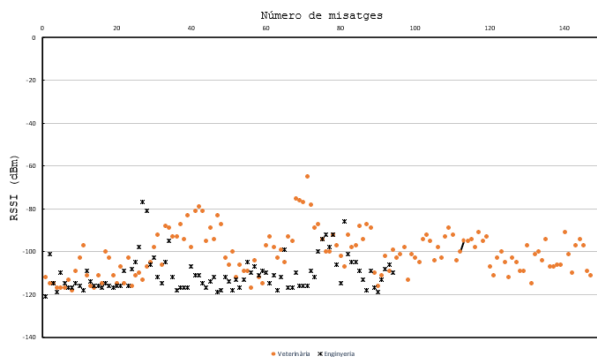


Fig. 7: Valors RSSI de les mesures realitzades amb els dos gateways operatius.

En la figura 4 es mostren tots els missatges rebuts al gateway de veterinària, els quals concorden amb els valors esperats en un 92 %.

El gateway de veterinària està situat en una zona estratègica per cobrir la quantitat més gran d'àrea possible, ja que l'edifici està situat en una zona elevada del terreny a uns 160 metres la zona adjacent a veterinària té poca densitat d'edificis.

Gràcies al gateway de veterinària s'obté un augment de cobertura molt notable en la vila universitària. En la figura 8 es mostra una imatge realitzada al dispositiu de mesura en la vila universitària amb visió directa de l'edifici de veterinària. A la imatge es pot veure que el nivell de RSSI mesurat és de -72 dBm, es tracta d'un nivell molt elevat que normalment només s'obté als voltants de l'edifici on s'instal·la el gateway.

El gateway de veterinària també augmenta notablement la cobertura en l'eix central i a la zona de la plaça cívica. Això fa que arribin més missatges al gateway amb nivells de RSSI superiors.

7 ESTUDI DE COBERTURA PASSIU

S'han instal·lat tres dispositius LoRaWAN en diferents ubicacions per tal d'obtenir dades de la xarxa al llarg del temps i analitzar el nivell de cobertura real obtingut en les diferents zones.



Fig. 8: Fotografia del dispositiu de mesura, feta a la vila amb visió directa amb el gateway de veterinària.

Les zones escollides per instal·lar els dispositius presenten nivells de cobertura teòrics diferents, el primer dispositiu s'ha instal·lat a l'escola d'enginyeria en una zona de cobertura vermella, el segon a la facultat de lletres en una zona de cobertura verda i l'últim a la facultat d'empresa en una zona blava. A la figura A.2.6 es pot veure la ubicació exacta dels dispositius.

A les figures A.2.1, A.2.2 i A.2.3, es mostren les gràfiques amb els valors de RSSI al llarg del temps i la mitjana de RSSI resultants a cada gateway. Les línies vermelles de les figures corresponen als nivells de RSSI rebuts al gateway d'enginyeria i les de color taronja els nivells rebut al gateway de veterinària. Les figures es mostren els valors obtinguts entre els dies 07/06/2022 i 27/06/2022.

Els nivells de xarxa que obtinguts generalment són regulars al llarg dels dies sense presentar grans variacions. Tampoc hi ha variacions en els nivells de cobertura entre el dia i la nit. No obstant això, el dispositiu instal·lat a la facultat d'enginyeria presenta una disminució d'uns 10 dBm el dia 13/06/2022 a les 15 h. Aquest fet es pot veure a la figura A.2.1. A la figura A.2.5, es mostra l'arxiu meteorològic de Bellaterra, hi ha un augment de temperatura a partir del dia 10/06/2022, més enllà d'aquest fet la resta de paràmetres es mantenen estables, no hi ha cap precipitació des del 24/05/2022, la cobertura de núvols es baixa i la velocitat del vent es manté estable.

Així i tot, No es pot concloure que aquesta disminució sigui deguda als factors ambientals. Hi ha més causes que poden provocar una disminució en els nivells de cobertura, com l'aparició d'un obstacle entre el dispositiu i el gateway.

De la mateixa manera, s'ha detectat que el dispositiu instal·lat a la facultat d'empresa va deixar d'emetre missatges el dia 10/06/2022. Es tractava d'un error que es produïa quan el dispositiu enviava el missatge de join-request al network server. S'ha solucionat l'error canviant la confi-

guració del dispositiu de la versió de LoRaWAN de la 1.1 [27] a la 1.0.3. [28].

8 PROPOSTA D'AMPLIACIÓ DE COBERTURA

Del conjunt de proves realitzades es pot extreure que la qualitat de la xarxa LoRa és suficientment bona per instal·lar dispositius a l'exterior del campus de la UAB. Gràcies al fet que els dos gateways es complementen entre si i conjuntament arriben a cobrir tota la superfície del campus.

Hi ha dues zones en els quals la cobertura podria ser millorada utilitzant gateways indoor com per exemple el The Things Indoor Gateway [30]. Aquest tipus de gateways tenen l'avantatge de ser més econòmics i més fàcils d'instal·lar que les macros gateways instal·lats a l'exterior. Amb un gateway d'aquest estil es poden cobrir un parell de plantes d'un edifici.

Aquestes dues zones estan conformades pels edificis de la vila universitària situats a prop del carrer de la vila, i els edificis de la zona de les facultats de filosofia i lletres. Per tant, si s'haguessin de dur a terme projectes a l'interior en aquestes dues zones, s'hauria de dur a terme una anàlisi de la xarxa mesurada i seria recomanable instal·lar gateways interiors, per augmentar els nivells de cobertura a l'interior dels edificis.

9 CONCLUSIONS

En aquest treball s'analitza la cobertura de la xarxa LoRaWAN a la UAB mitjançant simulacions amb el software HTZ Communication i dues tècniques de mesura. Addicionalment, s'ha implementat una xarxa IoT completa que va des de dispositius sensors de qualitat de l'aire, que envien missatges MQTT a la xarxa LoRaWAN, utilitzant The Things Network com a Network Server, i una integració amb Azure i una altra amb la plataforma de Cellnex com a Cloud, creant un flux de dades sobre NodeRed.

La majoria de mesures realitzades concorden amb els resultats esperats obtinguts amb la simulació i els nivells de cobertura són estables al llarg del temps sense variacions importants.

Podem concloure que la simulació realitzada és fiable i serveix per representar els nivells de cobertura de la universitat. La simulació és de gran utilitat en la fase de planificació de projectes IoT, ja que aporta una visió global de la cobertura de la xarxa.

Uns dels factors que limiten el radi de cobertura en entorns suburbans com el que s'ha analitzat, és la densitat d'edificis que atenuen el senyal i les diferències d'elevació del terreny. En el cas de la vila i de la facultat de lletres es recomana afegir gateways indoor en cas que alguna aplicació ho requereixi.

La xarxa LoRa actual de la UAB, té la qualitat suficient per ser utilitzada per instal·lar dispositius exteriors al llarg de tot el campus i dispositius a l'interior d'una gran quantitat de facultats.

Com a treball futur, s'haurien de realitzar mesures a l'interior de més facultats del campus i s'hauria d'ampliar el rang de temps de l'estudi de cobertura passiu, per veure si hi ha alguna variació degut a l'estacionalitat del clima.

10 AGRAÏMENTS

El desenvolupament d'aquest treball no hauria estat possible sense el suport brindat durant tot el transcurs del treball i de la meua estança en practiques pels companys de Cellnex Telecom, en especial l'Arantxa Arribas. Tampoc hauria estat possible sense el suport dels tutors del TFG, Jordi Carabina i Marc Codina, que han aportat recomanacions al llarg de tot el projecte i han sigut vitals per la superació dels problemes tècnics que han sorgit.

Per acabar, agrair especialment a la meua família, amics i parella, sense els quals havia sigut més difícil arribar al final d'aquest grau.

REFERÈNCIES

- [1] Augustin, Aloÿs Yi, Jiazi Clausen, Thomas Heide Townsley, William.(2016). A Study of LoRa: Long Range Low Power Networks for the Internet of Things. Sensors. 16. 1466. 10.3390/s16091466. 2016
- [2] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella and M. Zorzi.(2016) Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios in IEEE Wireless Communications, vol. 23, no. 5, pp. 60-67, doi: 10.1109/MWC.2016.7721743.
- [3] Petajajarvi, Juha, et al.(2015) On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology. ITS Telecommunications (ITST), 2015 14th International Conference on. IEEE.
- [4] Abdulkadir Karagaac, Floris Van den Abeele, Wout Joseph, Ingrid Moerman, Jeroen Hoebeke, et al.(2017) LLoRa Indoor Coverage and Performance in an Industrial Environment: Case Study , Jetmir Haxhibeqiri1, Ghent University - imec, IDLab, Department of Information Technology.
- [5] Neumann, Pierre & Montavont, Julien & Noël, Thomas.(2016) Indoor deployment of low-power wide area networks (LPWAN): A LoRaWAN case study. 1-8. 10.1109/WiMOB.2016.7763213.
- [6] Petäjälärvi, Juha, et al.(2016) Evaluation of LoRa LPWAN technology for remote health and wellbeing monitoring. 2016 10th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT).
- [7] How Spreading Factor affects LoRaWAN® device battery life.(2019). Consultada 2 de març de 2022, de thethingsnetwork.org. [En línia] Disponible: <https://www.thethingsnetwork.org/article/how-spreading-factor-affects-lorawan-device-battery-life>
- [8] Missatges rebuts al gateway de l'Escola d'Enginyeria. Consultada el 10 de febrer 2022, de ttnmapper.org. [En línia] Disponible: <https://ttnmapper.org/gateways/?gateway=eui-fcc23dffe0ab30e&startdate=2019-09-01&enddate=2021-09-30&gateways=on&lines=on&points=on>

- [9] Virginia Andújar Morgado , Manel Martinez-Ramon.(2010) Entorno de simulación en la banda ISM para test de algoritmos de detección espectral, Universidad Carlos III De Madrid.
- [10] RP002-1.0.2 LoRaWAN Regional Parameters,21-22, Consultada: 21/03/2022. [En línia] Disponible: https://loro-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/RP_2-1.0.2.pdf
- [11] Messages Types, The Things Network, Consultada: 25/03/2022. [En línia] Disponible: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/message-types/>
- [12] Manual de inicio HTZ Communication. Consultada: 28/03/2022. [En línia] Disponible: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/28239/RuizMoncadaNicolasAgustin2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [13] LoRaWAN-Range, Part 1: The most important factors for a good LoRaWAN radio range. Consultada: 07/04/2022. [En línia] Disponible: <https://smartmakers.io/en/lorawan-range-part-1-the-most-important-factors-for-a-good-lorawan-signal-range/>
- [14] Ingabire, Winfred & Larijani, Hadi & Gibson, Ryan. (2020). Performance Evaluation of Propagation Models for LoRaWAN in an Urban Environment. 1-6. 10.1109/ICECCE49384.2020.9179234.
- [15] Adeunis Iot Products & Solutions, FTD: network tester, Consultada 19/05/2020 .[En línia] Disponible: <https://www.adeunis.com/en/produit/ftd-network-tester/>
- [16] Turcinovic, Filip & Vukovic, Josip & Božo, Slaven & Sisul, G.. (2020). Analysis of LoRa Parameters in Real-World Communication. 10.1109/EL-MAR49956.2020.9219028.
- [17] ATDI, HTZ Communications. Consultada: 21/05/2022. [En línia] Disponible: <https://atdi.com/products-and-solutions/htz-communications-for/>
- [18] LORIX One, Discover the LORIX One, Consultada: 22/05/2022. [En línia] Disponible: <https://www.lorixone.io/en/products>
- [19] Ambience Monitoring Sensor AM307, Milesight. [En línia] Disponible: <https://www.milesight-iot.com/lorawan/sensor/am300/>
- [20] Node-RED, Low-code programming for event-driven applications. Consultada: 10/06/2022. <https://nodered.org/>
- [21] UNE 178104 y UNE 178108 Nuevas normas para ciudades inteligentes, AENOR. Consultada: 10/06/2022. [En línia] Disponible: <https://www.aenor.com/Certificacion/Documentos/Art%C3%ADculos42ene18-Ciudades%20inteligentes.pdf>
- [22] MQTT - The Standard for IoT Messaging, MQTT.org. Consultada: 10/06/2022. [En línia] Disponible: <https://mqtt.org/>
- [23] Knowage And NGSI. Consultada: 10/06/2022. Consultada: 10/06/2022. [En línia] Disponible: <https://knowage.readthedocs.io/en/6.1.1/user/NGSI/README/index.html>
- [24] APACHE KAFKA, kafka. Consultada: 10/06/2022. [En línia] Disponible: <https://kafka.apache.org/>
- [25] Homepage - LoRa Alliance. Consultada: 10/06/2022. [En línia] Disponible: <https://loro-alliance.org/>
- [26] Homepage - The Things Network. Consultada: 25/06/2022. [En línia] Disponible: <https://www.thethingsnetwork.org/>
- [27] LoRaWAN® Specification v1.1. Consultada: 26/06/2022. [En línia] Disponible: https://loro-alliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-1/
- [28] LoRaWAN® Specification v1.0.3 Consultada: 26/06/2022. [En línia] Disponible: https://loro-alliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-0-3/
- [29] The Things Indoor Gateway Consultada: 26/06/2022. [En línia] Disponible: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/gateways/thethingsindoor/>
- [30] LoRaWAN Architecture Consultada: 26/06/2022. [En línia] Disponible: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/>

APÈNDIX

A.1 Definicions

Banda ISM: xarxes que es comuniquem mitjançant un medi de transmissió no guiat (sense cables) mitjançant ones electromagnètiques. La transmissió i la recepció es realitzen a través d'antenes. Tenen diversos avantatges com instal·lació de la xarxa sense necessitat de cable, poc cost de manteniment comparat amb una xarxa normal, permeten una gran mobilitat.

Spreading factor (factor de propagació): controla la freqüència modulada polsada (chirp) i aquest controla la velocitat de transmissió. A menor spreading factor significa que es tindrà un chirp més ràpid, per tant, una taxa de transmissió més ràpida. A cada augment del factor de propagació el chirp es redueix a la meitat, en conseqüència, la taxa de transmissió de dades es redueix a la meitat. El spreading factor pot tenir un valor entre 7 i 12.

Chirpring (Freqüència modulada polsada): tecnologia de pols irradiada i comprimida d'alta intensitat, les seves sigles en anglès són Compressed High-Intensity Radiate Pulse.

Bit rate: es refereix a la velocitat en la qual es processen o es transfereixen les dades. Generalment, es mesura amb segons, des de bits per segon (bps) fins a kbps i mbps.

Ultra narrow band: tecnologia de transmissió amb un canal molt estret, és a dir ≤ 1 kHz, gràcies a això l'ona pot cobrir grans distàncies des de 5 a 25 km en àrees obertes.

Spreading factor: quantitat de codi d'eixamplament aplicat al senyal de dades original. El factor de propagació controla el chirp rate, i, per tant, controla la velocitat de transmissió de dades. Per cada augment en el spreading factor, el chirp rate es redueix a la meitat, i, en conseqüència, la taxa de transmissió de dades es redueix a la meitat. La modulació LoRa té un total de sis factors de dispersió de SF7 a SF12. Com més gran sigui el SF, major serà l'abast i la penetració de la transmissió, la qual cosa fa més probable que una porta d'enllaç escolti un dispositiu final. Els spreading factor més baixos signifiquen un chirp més ràpid i, per tant, una taxa de transmissió de dades més alta.

Effective Isotropic radiated power (EIRP): en català Potència Isotròpica Radiada Equivalent (PIRE), és la potència efectiva emesa en el lòbul principal d'una antena transmissora relativa a un radiador isotròpic que té 0 dB de guany. Es calcula sumant el guany de l'antena més la potència que ingressa l'antena. També es tenen en compte les pèrdues de la línia de transmissió.

$$EIRP = PT - L_c + G_a \quad (3)$$

On EIRP i PT són la potència del transmissor (dBm), L_c les pèrdues del cable (dB) i G_a el guany de l'antena (dBi).

Effective radiated power (ERP): en català potencia

radiada aparent (PRA), és una definició estandarditzada del IEEE de potència de radiofreqüència direccional (RF). És la potència efectiva emesa en el lòbul principal d'una antena transmissora relativa a la directivitat màxima d'una antena dipol de mitja ona. Es calcula afegint a la potència del transistor les pèrdues de la línia de comunicació amb l'antena i el guany de l'antena.

$$ERP = PT - L_c + G_a \quad (4)$$

On ERP i PT són la potència del transmissor (dBm), L_c les pèrdues del cable (dB) i G_a el guany de l'antena (dBi). Es pot realitzar la conversió de EIRP a ERP amb la següent fórmula:

$$EIRP = ERP + 2,15 \text{ dB} \quad (5)$$

Duty Cycle: és la fracció de temps durant la qual el recurs està ocupat. Per exemple, si un node transmet 2 de cada 10 unitats de temps, el dispositiu té un Duty Cycle del 20

Link Budget: és el balanç entre tots els guanys i totes les pèrdues del sistema, això permet calcular la potència que rebrà el receptor.

Media Access Control (MAC) Layer: la capa MAC, és una de les dues capes de la capa d'enllaç de dades definides en el model d'interconnexió de sistemes oberts Open Systems Interconnection (OSI). Essencialment, la capa MAC, determina quin equip de la xarxa està autoritzat a utilitzar els mitjans en un moment donat.

Open Systems Interconnection (OSI): és un model de referència per als protocols de xarxa. El model OSI està conformat per 7 capes o nivells d'abstracció:

1. Capa 0 Mitjà: Medi físic de transmissió.
2. Capa 1 Física: Defineix totes les especificacions elèctriques i físiques dels dispositius.
3. Capa 2 Enllaç de dades: Proporciona adreçament físic i procediments d'accés a mitjans.
4. Capa 3 Xarxa: responsable de l'adreçament lògic i el domini de l'encaminament.
5. Capa 4 Transport: Proporciona transport de confiança i control del flux a través de la xarxa.
6. Capa 5 Sessió: Estableix, administra i finalitza les connexions entre les aplicacions locals i les remotes.
7. Capa 6 Presentació: Transforma el format de les dades i proporciona una interfície estàndard per a la capa d'aplicació.
8. Capa 7 Aplicació: Responsable dels serveis de xarxa per a les aplicacions.

Uplink: els missatges d'uplink són els missatges enviats des dels dispositius finals cap al Network Server passant per un o diversos gateways. Si el missatge d'uplink correspon a un application server o un Join server, el network server

el tramet al servidor corresponent.

Downlink: els missatges de downlink són enviats des d'un network server a un dispositiu i transmesos per un únic gateway.

A.2 Figure

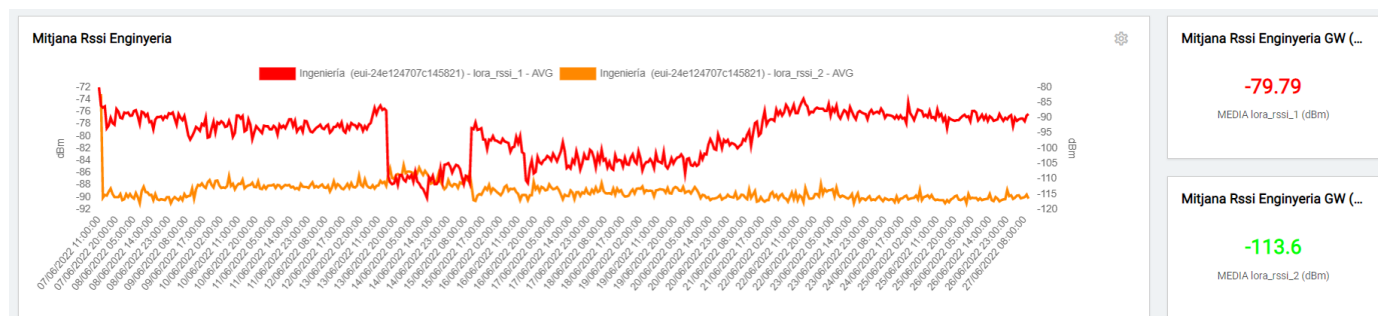


Fig. A.2.1: ValoRs RSSI del dispositiu d'Enginyeria.

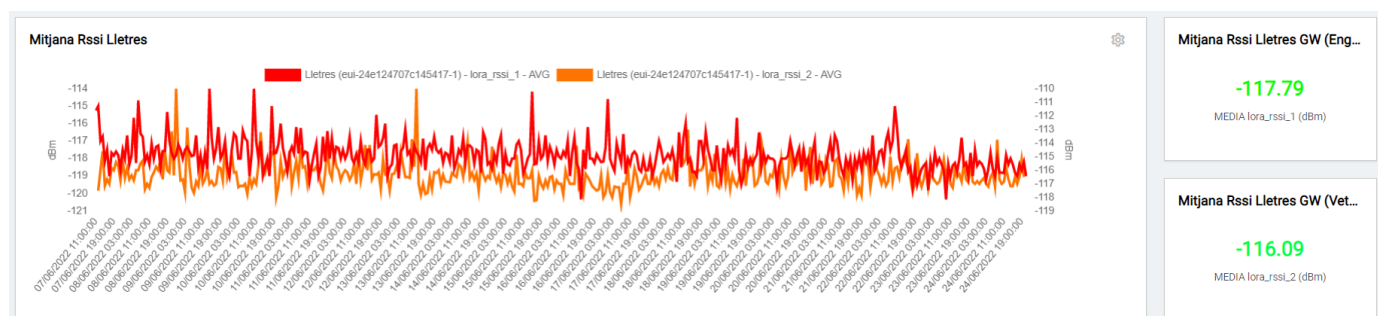


Fig. A.2.2: ValoRs RSSI del dispositiu instal·lat a Lletres.

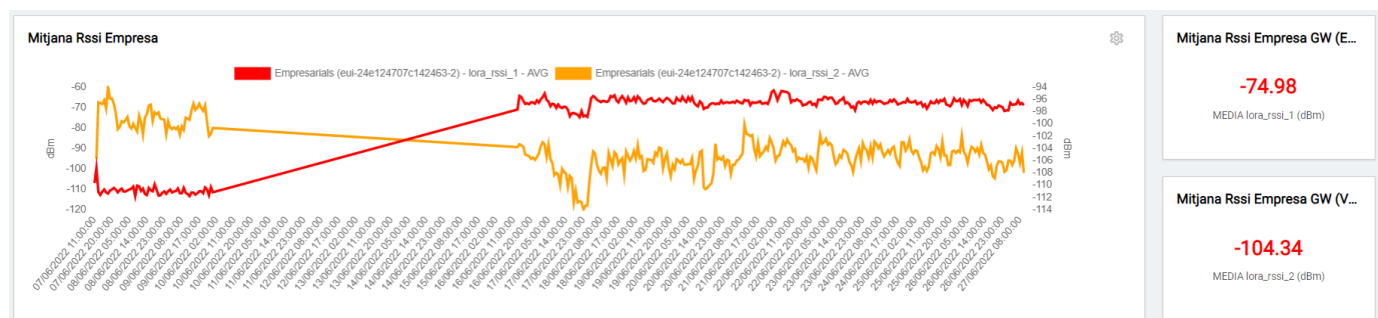


Fig. A.2.3: ValoRs RSSI del dispositiu instal·lat a Empresa.

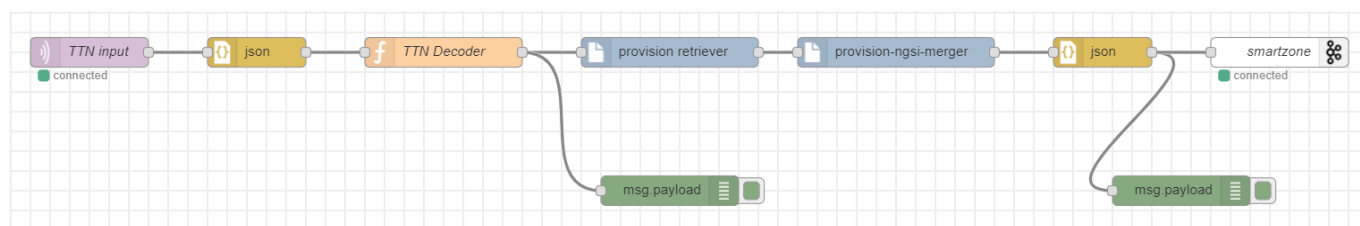


Fig. A.2.4: Flux de dades creat a Node-Red.

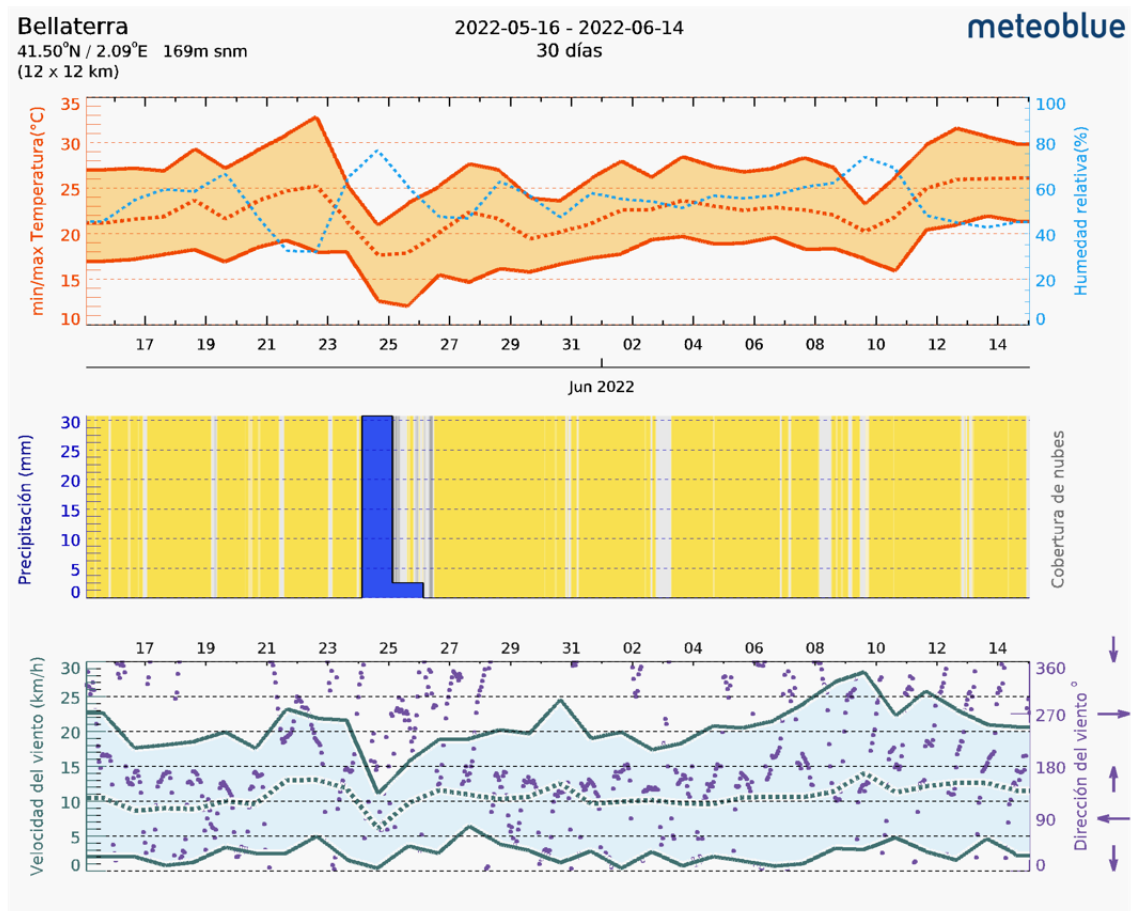


Fig. A.2.5: Dades històriques de l'arxiu meteorològic de bellaterra.



Fig. A.2.6: Ubicació dels dispositius de mesura pasius.