

Aplicacions de LoRaWAN en xarxes IoT

Cintia Maroto Mirón

Grau en Enginyeria de Tecnologies i Serveis de Telecomunicació
Xarxes sense fils

Nom Consultor/a: **Ferran Adelantado Freixer**

Nom Professor/a responsable de l'assignatura: **Ferran Adelantado Freixer**

Data Lliurament: 23 de desembre del 2020



Aquesta obra està subjecta a una llicència de [Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada 3.0 Espanya de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

FITXA DEL TREBALL FINAL

Títol del treball:	<i>Aplicacions de LoRaWAN en xarxes IoT</i>
Nom de l'autor:	<i>Cintia Maroto Mirón</i>
Nom del consultor/a:	<i>Ferran Adelantado Freixer</i>
Nom del PRA:	<i>Ferran Adelantado Freixer</i>
Data de lliurament (mm/aaaa):	<i>12/2020</i>
Titulació o programa:	<i>Grau en Enginyeria de Tecnologies i Serveis de Telecomunicació</i>
Àrea del Treball Final:	<i>Xarxes sense fils</i>
Idioma del treball:	<i>Català</i>
Paraules clau	<i>LPWAN, LoRaWAN, IoT</i>
<p>Resum del Treball (màxim 250 paraules): <i>Amb la finalitat, context d'aplicació, metodologia, resultats i conclusions del treball</i></p>	
<p>L'actualitat i l'evolució constant d'internet, ha generat diferents tecnologies per dur a terme la connectivitat de diferents dispositius en escenaris diferents. D'aquesta manera, s'han creat les xarxes d'àrea àmplia de baixa potència (LPWAN) que permeten connexions sense fils de llarg abast amb transmissions baixes de dades i alta durabilitat de les bateries dels dispositius que la formen. Dins de les tecnologies LPWAN no cel·lulars, les líders en aquest àmbit són LoRaWAN, Sigfox i Weightless, competint pel desenvolupament IoT a nivell mundial.</p> <p>En aquest projecte s'elabora un anàlisi profund de la tecnologia LoRaWAN i les seves característiques, classes de dispositius, diferents paràmetres i casos d'ús, així com la comparativa amb altres tecnologies i el resum dels seus avantatges i inconvenients.</p> <p>Per finalitzar, es realitzen simulacions d'escenaris amb característiques diferents al programa de OMNeT ++ i fent servir el framework FLoRa modificant la quantitat de nodes, àrea, diversitat de serveis i altres aspectes per tal d'avaluar els requisits IoT desitjats.</p> <p>Com a conclusió, podem afirmar un cop realitzades les simulacions, que la tecnologia LoRaWAN és molt correcta en el cas de no necessitar una baixa</p>	

latència i una seguretat en les comunicacions d'alta qualitat, i aconseguim amb ella una elevada cobertura en gran àrees i una duració alta de les bateries dels seus dispositius, així com un baix cost i una fàcil implantació de la seva xarxa respecte als seus competidors principals. Podem afirmar que es tracta d'una molt bona opció per aplicacions IoT de diferents característiques avaluant prèviament les nostres necessitats.

Abstract (in English, 250 words or less):

The current and constant evolution of the internet has generated different technologies to carry out the connectivity of different devices in different scenes. In this way, low-power wide area networks (LPWANs) have been created to allow long-range wireless connections with low data transmissions and high battery life of devices that are part of it. Within non-cellular LPWAN technologies, the leaders in this field are LoRaWAN, Sigfox and Weightless, competing for IoT global development.

This project provides an in-depth analysis of LoRaWAN technology and its features, device classes, different parameters and use cases, as well as a comparison with other technologies and a summary of their advantages and disadvantages.

Finally, scenario simulations with different features are performed in the OMNeT ++ program and using the FLoRa framework by modifying the number of nodes, the area, diversity of services and other aspects in order to evaluate the desired IoT requirements.

In conclusion, we can say that once the simulations have been performed, the LoRaWAN technology is very correct in case of not needing low latency and security in high quality communications, and we achieve a high coverage in large areas and a high battery life of your devices, as well as a low cost and easy deployment of your network compared to its main competitors. We can confirm that is a very good option for IoT applications with different characteristics by previously assessing our needs.

Índex

1. Introducció.....	1
1.1 Context i justificació del Treball	1
1.2 Objectius del Treball.....	2
1.3 Enfocament i mètode seguit	2
1.4 Planificació del Treball.....	2
1.5 Breu sumari de productes obtinguts	5
1.6 Breu descripció dels altres capítols de la memòria	5
2. La tecnologia LoRaWAN	6
2.1 Xarxes LPWAN	6
2.1.1 SigFox.....	8
2.1.2 Weightless	9
2.1.3 Altres alternatives	10
2.2 LoRa Alliance	11
2.3 Què és LoRaWAN?	12
2.4 LoRa.....	12
2.5 Característiques de LoRaWAN	15
2.5.1 Arquitectura de xarxa.....	15
2.5.2 Vida útil de les bateries.....	16
2.5.3 Capacitat de la xarxa	17
2.5.4 Classes de dispositius	18
2.5.5 Seguretat	19
2.5.6 LoRaWAN a les diferents regions.....	21
2.5.7 Cost de LoRaWAN contra altres sistemes.....	22
2.5.8 Limitacions del duty cycle	23
2.5.9 Principals avantatges de LoRaWAN	24
2.5.10 Principals inconvenients de LoRaWAN.....	25
2.6 Especificacions de LoRaWAN.....	25
2.6.1 Paquets físics i finestres de recepció.....	25
2.6.2 Format de trama MAC	27
2.6.3 Ordres MAC.....	29
2.6.4 Activació del dispositiu final	29
2.7 Diferents versions de LoRaWAN.....	30
2.8 Avantatges de LoRaWAN sobre altres tecnologies LPWAN	30
2.9 Dispositius	31
2.9.1 Nodes finals	31
2.9.2 Portes d'enllaç	32
2.9.3 Servidors de xarxa	32
2.9.4 Servidors d'aplicació	33
2.10 Casos d'ús.....	33
3. Escenaris i simulacions	36
3.1 Què tenir en compte pels diferents escenaris?	36
3.2 Simulador escollit	36
3.3 Resultats a valorar de les simulacions	36
3.4 Diferents escenaris proposats	39

3.4 Simulacions i resultats.....	40
3.4.1 Escenari 1: zona amb gran densitat de nodes i mateix servei.....	40
3.4.1.1 Característiques físiques de l'entorn.....	40
3.4.1.2 Descripció de la xarxa.....	40
3.4.1.3 Configuració de la xarxa i model.....	41
3.4.1.4 Resultats.....	43
3.4.2 Escenari 2: zona amb poca densitat de nodes i mateix servei.....	48
3.4.2.1 Característiques físiques de l'entorn.....	48
3.4.2.2 Descripció de la xarxa.....	48
3.4.2.3 Configuració de la xarxa i model.....	48
3.4.2.4 Resultats.....	50
3.4.3 Escenari 3: zona amb gran densitat de nodes i diferents serveis.....	55
3.4.3.1 Característiques físiques de l'entorn.....	55
3.4.3.2 Descripció de la xarxa.....	55
3.4.3.3 Configuració de la xarxa i model.....	55
3.4.3.4 Resultats.....	56
4. Conclusions.....	61
5. Glossari.....	63
6. Bibliografia.....	66
7. Annexos.....	68
A. Fitxer XML amb paràmetres de consum d'energia.....	68
B. Codi de simulació 1.....	68
B.a Codi de descripció de topologia de xarxa.....	68
B.b Arxiu de configuració inicial de simulació de xarxa.....	69
C. Codi de simulació 2.....	71
C.a Codi de descripció de topologia de xarxa.....	71
C.b Arxiu de configuració inicial de simulació de xarxa.....	72
D. Codi de simulació 3.....	74
D.a Codi de descripció de topologia de xarxa.....	74
D.b Arxiu de configuració inicial de simulació de xarxa.....	75

Llista de figures

Figura 1: LoRa i IoT [1].....	1
Figura 2: Planificació per tasques del TFG	3
Figura 3: Diagrama de Gantt del TFG	4
Figura 4: Comparació d'abast i ample de banda entre tecnologies cel·lulars, de curt abast i LoRa [4]	6
Figura 5: Comparació entre xarxes de curt abast (LAN), LPWAN i xarxes cel·lulars [1].....	7
Figura 6: Comparació de les principals característiques de les diferents opcions de tecnologies LPWAN cel·lulars contra LoRaWAN [1]	8
Figura 7: Comparació de les principals característiques de les diferents opcions de tecnologies LPWAN no cel·lulars [6]	11
Figura 8: LoRa CSS [8]	13
Figura 9: Model de capes de xarxa [1]	14
Figura 10: Arquitectura d'una xarxa LoRaWAN [1].....	16
Figura 11: Classes de dispositius i relació latència - durada de bateries [1] ...	18
Figura 12: Visió general de la seguretat de LoRaWAN [10]	20
Figura 13: Característiques LoRaWAN per les diferents regions [1]	21
Figura 14: Banda ISM per LoRaWAN a Amèrica del Nord [1].....	22
Figura 15: Comparació de costos entre sistema WMBus i LoRa [1]	23
Figura 16: Exemples de Duty Cycle [11]	23
Figura 17: Característiques principals de LoRaWAN [1]	24
Figura 18: Estructura física d'una trama d'enllaç ascendent [12]	25
Figura 19: Estructura física d'una trama d'enllaç descendent [12]	25
Figura 20: Temporització de la finestra de recepció del dispositiu final [13].....	26
Figura 21: Esquema de sincronització de balises [13]	27
Figura 22: Finestres de recepció d'un dispositiu final de classe C [13]	27
Figura 23: Format de PHYPayload [13].....	28
Figura 24: Format de MHDR [13]	28
Figura 25: Format de MACPayload [13]	28
Figura 26: Exemple de node LoRaWAN [11].....	31
Figura 27: Exemple de porta d'enllaç outdoor (LoRiX One) [11]	32
Figura 28: Configuració de topologia de xarxa escenari 1	41
Figura 29: Model de xarxa amb un gateway	42
Figura 30: Model de xarxa amb dos gateways	42
Figura 31: Model definitiu de xarxa amb un gateway	43
Figura 32: Model definitiu de xarxa amb dos gateways.....	44
Figura 33: Gràfica comparativa PDR simulació 1	46
Figura 34: Comparativa d'energia total simulació 1	47
Figura 35: Comparativa de paquets rebuts per spreading factor simulació 1 ...	47
Figura 36: Configuració de topologia de xarxa escenari 2	48
Figura 37: Model de xarxa amb un gateway	49
Figura 38: Model de xarxa amb dos gateways	49
Figura 39: Model de xarxa amb sis gateways	52
Figura 40: Gràfica comparativa PDR simulació 2.....	53
Figura 41: Comparativa d'energia total simulació 2.....	54
Figura 42: Comparativa de paquets rebuts per spreading factor simulació 2... 54	

Figura 43: Configuració de topologia de xarxa escenari 3	55
Figura 44: Model de xarxa amb un gateway	56
Figura 45: Model de xarxa amb dos gateways	56
Figura 46: Gràfica comparativa PDR simulació 3.....	59
Figura 47: Comparativa d'energia total simulació 3.....	59
Figura 48: Comparativa de paquets rebuts per spreading factor simulació 3...	60

Llista de taules

Taula 1: Paràmetres del model de propagació	38
Taula 2: Paràmetres màxims de cada SF	38
Taula 3: Time on air a cada SF per paquets de 51 bytes	38
Taula 4: Dades escalabilitat simulació 1 amb un gateway	44
Taula 5: Dades consum simulació 1 amb un gateway	44
Taula 6: Paquets rebuts i PDR per cada SF simulació 1 amb un gateway	45
Taula 7: Dades escalabilitat simulació 1 amb dos gateways	45
Taula 8: Dades consum simulació 1 amb dos gateways	45
Taula 9: Paquets rebuts i PDR per cada SF simulació 1 amb dos gateways ...	46
Taula 10: Dades escalabilitat simulació 2 amb un gateway	50
Taula 11: Dades consum simulació 2 amb un gateway	50
Taula 12: Paquets rebuts i PDR per cada SF simulació 2 amb un gateway	50
Taula 13: Dades escalabilitat simulació 2 amb dos gateways	51
Taula 14: Dades consum simulació 2 amb dos gateways	51
Taula 15: Paquets rebuts i PDR per cada SF simulació 2 amb dos gateways .	51
Taula 16: Dades escalabilitat simulació 2 amb sis gateways	52
Taula 17: Dades consum simulació 2 amb sis gateways	53
Taula 18: Paquets rebuts i PDR per cada SF simulació 2 amb sis gateways ..	53
Taula 19: Dades escalabilitat simulació 3 amb un gateway	57
Taula 20: Dades consum simulació 3 amb un gateway	57
Taula 21: Paquets rebuts i PDR per cada SF simulació 3 amb un gateway	57
Taula 22: Dades escalabilitat simulació 3 amb dos gateways	58
Taula 23: Dades consum simulació 3 amb dos gateways	58
Taula 24: Paquets rebuts i PDR per cada SF simulació 3 amb dos gateways .	58

1. Introducció

1.1 Context i justificació del Treball

En l'era tecnològica en què ens trobem actualment, obtenim una quantitat inimaginable de dispositius connectats a la xarxa, cada cop amb més necessitat de transmissió de dades de la forma més eficient, segura i poc costosa. Aquesta característica s'aconsegueix a les xarxes de telecomunicacions sense fils d'àrea àmplia i baixa potència (LPWAN) que permeten interconnectar dispositius com sensors que funcionen amb bateries d'una alta durabilitat, amb un baix consum d'energia, poc cost del dispositiu i un abast des d'uns quilòmetres en zones urbanes a més de deu en zones rurals. La interconnexió digital de dispositius a internet per tal de facilitar la vida quotidiana de les persones, ens porta al concepte de l'Internet de les coses (IoT), millorant la nostra qualitat de vida en pràcticament totes les àrees.

Unificant els dos conceptes, trobem una aliança de les xarxes LPWAN, LoRa Alliance, que porta a terme la seva tecnologia sense fils pròpia anomenada LoRaWAN, basada en una modulació en radiofreqüència patentada per Semtech (Chirp Spread Spectrum) amb una arquitectura de xarxa típica en estrella, baix consum d'energia, gran abast i una alta tolerància a les interferències entre altres avantatges. Aquesta tecnologia és ideal per connexions de xarxes IoT i connexions de grans distàncies amb diferents grans aplicacions com Smart Cities, explotacions agrícoles o ramaderes o xarxes privades de diferents sensors.

Analitzant aquesta tecnologia ens trobem amb la necessitat de veure els paràmetres que la defineixen i com evolucionen aquests en funció de diferents aspectes, com la densitat de nodes, la distància, la diversitat de serveis que ens trobem dins de la xarxa, etc. D'aquesta manera, l'objectiu consisteix en avaluar la tecnologia LoRaWAN en diferents tipus de xarxes IoT i connexions de grans distàncies a través de la seva simulació per verificar la seva utilitat.



Figura 1: LoRa i IoT [1]

1.2 Objectius del Treball

Els objectius principals són:

- Iniciació a les xarxes LPWAN i les seves característiques
- Comparativa de les principals tecnologies competidores de LoRaWAN
- Resum de la capa física LoRa en què es basa la tecnologia i la seva aliança creadora LoRa Alliance
- Estudi en detall de les característiques de LoRaWAN, tipus de dispositius i estat actual de la tecnologia
- Anàlisi d'avantatges respecte a altres tecnologies LPWAN
- Repàs de casos d'ús reals d'implantació
- Resum de característiques del software escollit per les simulacions
- Estudi dels diferents casos a analitzar i paràmetres a valorar
- Anàlisi dels resultats extrets de les simulacions realitzades

1.3 Enfocament i mètode seguit

El Treball de Fi de Grau consisteix en una evolució teòric-pràctica que consistirà en l'anàlisi de la tecnologia LoRaWAN i la simulació de diferents escenaris de xarxes IoT amb la seva correcta implementació, els dispositius adequats i les seves característiques, i observant les diferents conclusions que es puguin extreure d'aquestes. Es farà servir el programari FLoRa, un marc de simulació per xarxes LoRa extrem a extrem basat en el simulador de xarxa OMNeT++ que també fa servir components del marc INET, per analitzar les característiques principals de la tecnologia treballada [15].

1.4 Planificació del Treball

Per dur a terme el TFG s'han dividit les diferents tasques a executar, agrupades segons les entregues que s'han de realitzar al llarg del quadrimestre (Proves d'Avaluació Contínua) amb la seva temporització corresponent. El TFG té una durada total de 122 dies, 18 setmanes aproximadament, on es realitzaran les següents tasques:

- 1.- PAC 1 (15 dies)
 - 1.1.- Anàlisi i elecció del tema del TFG (6 dies)
 - 1.2.- Cerca inicial sobre la tecnologia LoRaWAN (5 dies)
 - 1.3.- Elaborar document d'objectius, abast i planificació del TFG (5 dies)
- 2.- PAC 2 (42 dies)
 - 2.1.- Estudi sobre LoRaWAN: tecnologia i paràmetres (13 dies)
 - 2.2.- Check Point 1 (1 dia)
 - 2.3.- Anàlisi de productes LoRaWAN (6 dies)
 - 2.4.- Estat de l'art (7 dies)
 - 2.5.- Check Point 2 (1 dia)

2.6.- Valoració inicial dels diferents casos d'ús i possibles escenaris (14 dies)

3.- PAC 3 (28 dies)

3.1.- Descripció i objectius dels diferents escenaris a simular (9 dies)

3.2.- Iniciació a FLoRa (OMNeT++) i el seu ús (4 dies)

3.3.- Check Point 3 (1 dia)

3.4.- Simulació dels escenaris amb FLoRa (14 dies)

4.- PAC 4 (14 dies)

4.1.- Conclusions de les simulacions realitzades pels diferents escenaris (3 dies)

4.2.- Redacció de la memòria final (5 dies)

4.3.- Elaboració de la presentació virtual (6 dies)

5.- Debat Virtual (5 dies)

Podem observar aquesta planificació de les tasques en el Diagrama de Gantt corresponent:

Nombre	Fecha de inicio	Fecha de fin	Duración
TFG	16/09/20	15/01/21	122
PAC 1	16/09/20	30/09/20	15
• Anàlisi i elecció del tema del TFG	16/09/20	21/09/20	6
• Cerca inicial sobre la tecnologia LoRaWAN	22/09/20	25/09/20	4
• Elaborar document d'objectius, abast i planificació del TFG	26/09/20	30/09/20	5
PAC 2	1/10/20	11/11/20	42
• Estudi sobre LoRaWAN: tecnologia i paràmetres	1/10/20	13/10/20	13
• Check Point 1	14/10/20	14/10/20	1
• Anàlisi de productes LoRaWAN	15/10/20	20/10/20	6
• Estat de l'art	21/10/20	27/10/20	7
• Check Point 2	28/10/20	28/10/20	1
• Valoració inicial dels diferents casos d'ús i possibles escenaris	29/10/20	11/11/20	14
PAC 3	12/11/20	9/12/20	28
• Descripció i objectius dels diferents escenaris a simular	12/11/20	20/11/20	9
• Iniciació a FLoRa (OMNET++) i el seu ús	21/11/20	24/11/20	4
• Check Point 3	25/11/20	25/11/20	1
• Simulació dels escenaris amb FLoRa	26/11/20	9/12/20	14
PAC 4	10/12/20	23/12/20	14
• Conclusions de les simulacions realitzades pels diferents escenaris	10/12/20	12/12/20	3
• Redacció de la memòria final	13/12/20	17/12/20	5
• Elaboració de la presentació virtual	18/12/20	23/12/20	6
• Debat virtual	11/01/21	15/01/21	5

Figura 2: Planificació per tasques del TFG

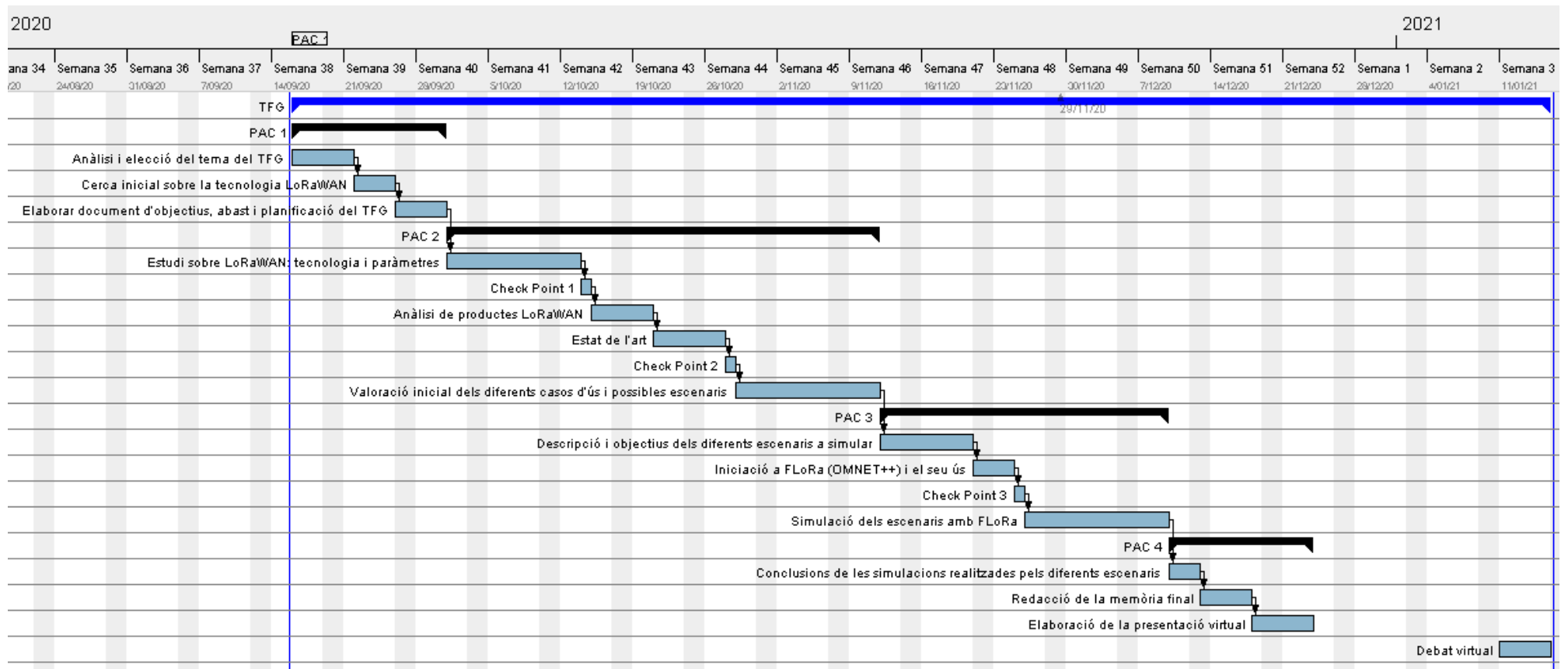


Figura 3: Diagrama de Gantt del TFG

1.5 Breu sumari de productes obtinguts

- Descripció de les xarxes LPWAN
- Descripció d'altres alternatives a LoRaWAN
- Comparativa entre les diferents tecnologies
- Descripció i anàlisi profund de la tecnologia LoRaWAN
- Simulacions de diferents escenaris amb FLoRa i anàlisi dels resultats
- Conclusions

1.6 Breu descripció dels altres capítols de la memòria

El treball consisteix en tres grans capítols resumits de la següent manera:

- Capítol 2: La tecnologia LoRaWAN. Descripció de les tecnologies LPWAN i les seves característiques, principals tecnologies competidores amb LoRaWAN, anàlisi en profunditat de LoRaWAN amb resum de la seva aliança creadora i la capa física LoRa en que està basada, les seves característiques i especificacions, avantatges i inconvenients, tipus de dispositius i casos d'ús.
- Capítol 3: Escenaris i simulacions. Explicació dels paràmetres a tenir en compte en les simulacions, resum del programari escollit i en què es basa, diferents escenaris escollits i característiques físiques, de topologia de xarxa, descripció i característiques de la xarxa, modelatge i resultats de les simulacions en cada cas respecte als valors obtinguts.
- Capítol 4: Conclusions un cop fet l'anàlisi de la tecnologia, les diferents simulacions i els resultats obtinguts.

2. La tecnologia LoRaWAN

Abans d'endinsar-nos en la tecnologia escollida per aquest projecte, començarem explicant què són les xarxes LPWAN i els diferents tipus que ens trobem, fent un repàs de les tecnologies competidores amb LoRaWAN, farem un incís de l'aliança creadora d'aquesta tecnologia i la capa física LoRa en què es basa i després ja aprofundirem en tots els detalls de LoRaWAN.

2.1 Xarxes LPWAN

Per l'internet de les coses (IoT) tenim dos tipus de xarxes sense fils, les de curt abast com el WiFi o el Bluetooth i les de llarg abast com el GSM o GPRS. L'operador de xarxa accepta que només es podrien connectar el 10-15% del volum previst de dispositius IoT amb tecnologies cel·lulars clàssiques (bandes amb llicència) [3], degut a que l'elevat cost dels transmissors dificulta el seu ús extensiu i també l'elevat consum elèctric que tenen al tractar-se de sistemes complexos que fa que les bateries dels seus dispositius no tinguin una durabilitat elevada, són problemes greus que fan pràcticament descartar aquest tipus de xarxes. WiFi i Bluetooth serveixen per a algunes aplicacions, però és evident que no es connectaran sensors d'humitat per a agricultura amb un sistema WiFi, per exemple. Per a un ús que requereixi la implantació de molts sensors capaços de transmetre una quantitat de dades reduïda a baixa velocitat, les xarxes d'àrea àmplia de baixa potència (LPWAN) són òptimes degut a que estan pensades per equips amb baix consum, amb capacitat de memòria i potència de càlcul limitades pels que és necessària una autonomia de varis anys, com és el cas dels sensors. [2]

Les xarxes LPWAN es poden dividir en les xarxes no cel·lulars (com Sigfox o LoRa) i les xarxes que fan servir les xarxes cel·lulars ja existents (com NB-IoT).

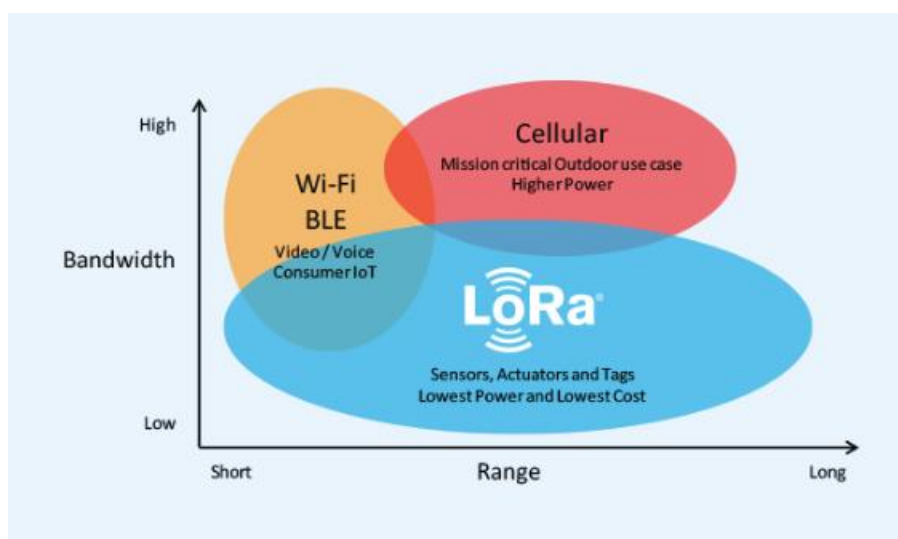


Figura 4: Comparació d'abast i ample de banda entre tecnologies cel·lulars, de curt abast i LoRa [4]

A la figura anterior es pot observar com la tecnologia LoRa té un abast superior a les tecnologies cel·lulars i les de curt abast, i també com fa servir un ample de banda inferior a les altres tecnologies.

Aquestes xarxes sense fils permeten comunicacions de llarg abast (uns quilòmetres a àrees urbanes i més de deu quilòmetres a àrees rurals) amb una taxa de bits baixa entre objectes connectats, una baixa potència (bateries petites i econòmiques que poden durar fins a 20 anys) i una velocitat de dades d'entre 0,3 kbit/s a 50 kbit/s per canal. Són de baix cost al fer servir protocols simplificats que redueixen la complexitat de hardware dels dispositius amb una topologia en forma d'estrella que redueix els requisits d'infraestructura.

Una mateixa tecnologia no pot servir per qualsevol aplicació ni mateixos volums de dades dins de IoT. La tecnologia cel·lular, per exemple, és ideal per aplicacions que necessiten un alt rendiment de dades i tenen una font d'alimentació. Les xarxes LPWAN estan dissenyades per sensors i aplicacions que necessiten enviar petites quantitats de dades a llargues distàncies uns quants cops per hora des de diferents ubicacions.










	Local Area Network Short Range Communication	Low Power Wide Area (LPWAN) Internet of Things	Cellular Network Traditional M2M
	40%	45%	15%
	Well established standards In building	Low power consumption Low cost Positioning	Existing coverage High data rate
	Battery Live Provisioning Network cost & dependencies	High data rate Emerging standards	Autonomy Total cost of ownership
	 		  

Figura 5: Comparació entre xarxes de curt abast (LAN), LPWAN i xarxes cel·lulars [1]

A la figura anterior, podem veure com comparant els tres tipus de xarxes de curt abast, de llarg abast i cel·lulars tradicionals, la tecnologia LPWAN és la que obté un millor rendiment donat que té un consum baix d'energia, baix cost i llarga vida útil de les bateries dels dispositius.

Els factors més importants en una LPWAN són:

- Arquitectura de la xarxa
- Abast de la comunicació
- Duració de la bateria o baixa potència
- Robustesa a les interferències
- Capacitat de la xarxa (número màxim de nodes a una xarxa)
- Seguretat de la xarxa
- Comunicació unidireccional o bidireccional
- Varietat d'aplicacions servides

Hi ha molta activitat al sector de l'loT que compara les opcions de LPWAN tant des d'una comparació tècnica com des d'una perspectiva de model de negoci. Les xarxes LPWAN s'estan desplegant ara perquè hi ha un fort cas empresarial per donar suport al desplegament immediat i el cost de desplegar la xarxa en bandes sense llicència requereix molt menys capital que fins i tot una actualització de programari 3G.

Feature	LoRaWAN	Narrow-Band	LTE Cat-1 2016 (Rel12)	LTE Cat-M 2018 (Rel13)	NB-LTE 2019(Rel13+)
Modulation	SS Chirp	UNB / GFSK/BPSK	OFDMA	OFDMA	OFDMA
Rx bandwidth	500 - 125 KHz	100 Hz	20 MHz	20 - 1.4 MHz	200 KHz
Data Rate	290bps - 50Kbps	100 bit/sec 12 / 8 bytes Max	10 Mbit/sec	200kbps – 1Mbps	~20K bit/sec
Max. # Msgs/day	Unlimited	UL: 140 msgs/day	Unlimited	Unlimited	Unlimited
Max Output Power	20 dBm	20 dBm	23 - 46 dBm	23/30 dBm	20 dBm
Link Budget	154 dB	151 dB	130 dB+	146 dB	150 dB
Battery lifetime - 2000mAh	105 months	90 months		18 months	
Power Efficiency	Very High	Very High	Low	Medium	Med high
Interference immunity	Very high	Low	Medium	Medium	Low
Coexistence	Yes	No	Yes	Yes	No
Security	Yes	No	Yes	Yes	Yes
Mobility / localization	Yes	Limited mobility, No loc	Mobility	Mobility	Limited Mobility No Loc

Figura 6: Comparació de les principals característiques de les diferents opcions de tecnologies LPWAN cel·lulars contra LoRaWAN [1]

Es pot veure en la taula anterior una comparació de les principals tecnologies LPWAN cel·lulars i les seves característiques, contra LoRaWAN. En aquest projecte, degut a les implementacions dels diferents escenaris que es volen simular de llarg abast, el tipus d'arquitectura que presenta aquesta tecnologia, les capacitats de comunicació de la xarxa i el que això comporta per la durada de les bateries dels dispositius que la formen, s'escull el tipus de xarxa LPWAN LoRaWAN per dur a terme el anàlisis de les diferents situacions que presentem i veure els diferents estats i factors que afecten en funció de la densitat de nodes i tipus de serveis que tenim. Farem un repàs general per les diferents tecnologies LPWAN que competeixen directament amb LoRaWAN pel mercat IoT.

2.1.1 SigFox

Sigfox és un operador de xarxes sense fils mundial francès fundat el 2010. Utilitza una modulació de banda ultra estreta propietària (modulació per desplaçament de fase binària diferencial, DBPSK) amb una connexió d'enllaç ascendent molt limitada. Mitjançant aquesta modulació, es pot aconseguir una velocitat màxima de dades de 100 bps mitjançant la transmissió de missatges amb una longitud màxima de càrrega útil de 12 bytes. L'ús d'aquesta taxa de bits baixa permet grans abasts de més de 10 km amb una potència de transmissió molt baixa, cosa que permet estalviar energia als nodes llunyans

(edge users). Les fitxes tècniques de Sigfox confirmen un temps de vida típic de 20 anys amb una bateria de 2,5 Ah.

La topologia estrella de Sigfox és similar a una arquitectura cel·lular, amb un ampli desplegament d'estacions base dirigides a cobrir països sencers mitjançant l'ús de bandes ISM (bandes de ràdio industrials, científiques i mèdiques). Aquesta estructura d'estació base permet als nodes llunyans carregar les dades recollides directament als servidors Sigfox, cosa que fa que sigui accessible per als subscriptors mitjançant una API basada en web (Application Programming Interface). L'ús de bandes ISM juntament amb l'estratègia d'accés mitjà de Sigfox, és a dir, sense tècniques per evitar col·lisions, condueix a una estricta limitació d'ocupació de l'amplada de banda que pateixen els nodes llunyans. Tot i que originalment es va dissenyar com un sistema unidireccional, Sigfox ha inclòs darrerament una finestra d'enllaç descendent limitada (quatre missatges de vuit bytes per node de vora per dia) similar a l'estratègia adoptada pels dispositius de classe A de LoRaWAN.

Pel que fa als problemes de seguretat, Sigfox implementa mecanismes de salt de freqüència i anti-reproducció als seus servidors, però no s'utilitzen tècniques de xifratge entre els nodes finals i les estacions base. A més, el format de càrrega útil no està definit. Per tant, l'estratègia de seguretat de Sigfox es basa en el fet que no es pot interpretar un missatge interceptat tret que l'atacant sigui capaç d'entendre el sistema del subscriptor en particular. [5]

2.1.2 Weightless

Weightless és el nom de l'aliança per a un conjunt de tres estàndards oberts LPWAN: Weightless-W, Weightless-N i Weightless-P. Els tres estàndards Weightless funcionen en bandes sub-GHz, però cadascun d'ells té les seves particularitats.

L'estàndard original Weightless-W fa ús de l'espectre d'espais en blanc del televisor (els espais en blanc de la televisió, anomenats whitespaces en anglès, són aquelles bandes de freqüència assignades al servei de televisió que, o bé geogràficament o bé temporalment, queden lliures i poden ser reutilitzades per un sistema secundari) i proporciona una àmplia gamma d'esquemes de modulació, factors de distribució i mides de paquets. Tenint en compte totes aquestes funcions i, segons les pèrdues de propagació de l'enllaç (link budget), Weightless-W afirma aconseguir velocitats de dades bidireccionals des d'1 kbps fins a 10 Mbps amb una sobrecàrrega molt baixa. A causa de l'extens conjunt de funcions que proporciona Weightless-W, la durada de la bateria del node de vora està limitada a tres anys i el cost del terminal és superior al dels seus competidors. La comunicació entre els nodes llunyans i l'estació base es pot establir al llarg de 5 km, en funció de les condicions ambientals.

Al seu torn, Weightless-N utilitza una classe de tecnologia de baix cost, molt similar a la que utilitza Sigfox. D'aquesta manera, s'adopta la modulació de banda ultra estreta (DBPSK) per proporcionar connectivitat només

unidireccional de fins a 100 bps, aprofitant les bandes ISM. Aquest esquema es basa en la tecnologia de nWave. A causa de la senzillesa d'aquesta solució, Weightless-N permet una durada de la bateria de fins a 10 anys, terminals de baix cost i un ampli rang de connexions similar a l'assolit per Weightless-W.

Finalment, el nou estàndard obert Weightless-P es deriva del protocol Platanus de M2Communication [5]. Aquesta versió reuneix les característiques més pròpies de les normes anteriors i afirma estar específicament centrada en el sector industrial. Mitjançant un esquema de modulació de banda estreta (Modulació per desplaçament mínim gaussià, GMSK i Modulació per desplaçament de fase en quadratura compensada, OQPSK) que opera en canals de 12,5 kHz, Weightless-P implementa una comunicació bidireccional amb una velocitat de dades adaptativa de 200 bps a 100 kbps. Admet operacions d'espectre amb ISM i amb llicència. Dirigit a proporcionar la fiabilitat exigida per algunes aplicacions industrials, Weightless-P inclou, per defecte, característiques valorades com ara transmissions reconegudes (acknowledged transmissions), retransmissió automàtica, sincronització de freqüència i temps i codificació de canals, entre d'altres. En comparació amb la resta d'estàndards Weightless, Weightless-P proporciona un abast més limitat de 2 km i les seves funcions avançades en comparació amb Weightless-N permeten una durada de bateria més curta de tres anys.

Respecte a la seguretat, les tres versions Weightless proporcionen autenticació de xarxa de punta a punta i xifratge AES (estàndard d'encryptació avançada) de 128 bits. [5]

2.1.3 Altres alternatives

Hi ha altres alternatives que es troben en un estat de desplegament menys avançat. Per exemple, Ingenu (anteriorment coneguda com On-Ramp) [5] és una plataforma LPWAN que inicia el seu desplegament als Estats Units. Es basa en la seva tecnologia patentada RPMA (Accés múltiple de fase aleatòria), que té la particularitat de treballar a la banda de 2,4 GHz. A més, permet topologies d'estrella i d'arbre mitjançant l'ús de maquinari de xarxa diferent. Tot i que Ingenu ha plantejat grans expectatives pel que fa a l'abast, la durada de la bateria del dispositiu llunyà i l'amplada de banda disponible, aquestes xifres haurien de confirmar-se en desplegaments reals, ja que s'han extret fins ara només dels estudis de simulació.

Centrat principalment al mercat de les ciutats intel·ligents, Telensa també ha desenvolupat la seva pròpia tecnologia bidireccional de banda ultra estreta. PLANet i PARKet de Telensa [5] es centren en el control de la il·luminació pública i la millora de l'aparcament intel·ligent, respectivament. Tots dos es defineixen com a sistemes d'extrem a extrem, des de nodes llunyans fins a la interfície d'usuari final, incloses les estacions base. Mitjançant l'ús de la seva tecnologia propietària, Telensa afirma assolir els rangs reals de 2-3 km (urbà) i 5-8 km (rural). Ja han desplegat les seves solucions a diferents grans ciutats del món.

Al seu torn, Dash7 és un estàndard obert promogut per Dash7 Alliance, que té el seu origen en la norma ISO / IEC 18000-7. A diferència de les solucions revisades anteriorment, Dash7 proposa una topologia d'arbre de dos salts composta per dispositius jerarquititzats, punts finals, sub-controladors i portes d'enllaç. Aquesta topologia és similar a l'arquitectura d'una xarxa sense fils de sensors (WSN) tradicional en lloc dels sistemes de llarg abast. Els principals avantatges que proporciona el protocol Dash7 són l'ampli rang en comparació amb altres solucions de WSN pur a causa de l'ús de bandes sub-GHz (433 MHz i 868/915 MHz), la possibilitat de comunicació directa de dispositiu a dispositiu, que actualment no està disponible a cap de les plataformes LPWAN, i la seva compatibilitat amb els dispositius de ràdio de comunicació de camp proper (NFC). Tanmateix, aquesta proposta encara no ha estat adoptada àmpliament i fins ara només s'han dut a terme alguns projectes pilot. [5]

	Weightless -N	Weightless -P	Sigfox	LoRaWAN	Ingenu RPMA
Frequency band	EU: 868 MHz US: 900 MHz	Sub-GHz ISM	EU: 868 MHz US: 902 MHz	EU: 433/868 MHz US: 915 MHz	2.4 GHz
Range (estimated)	3 km (urban)	2 km (urban)	3–8 km (urban) 30–50 km (rural)	3–8 km (urban) 30–50 km (rural)	1–3 km (urban) 5–10 km (rural)
Link budget⁷			156 dB	156 dB	172 dB
Data throughput	10 bps – 10 kbps	200 bps – 100 kbps	EU: 100 bps US: 600 bps up to 140 messages per day	0.3 – 50 kbps adaptive	Uplink: 100 kbps Downlink: 600 kbps
Power consumption			Tx: < 50 mA Rx: 10-40 mA Sleep: <0.01 mA	Tx: < 50 mA Rx: 10–40 mA Sleep: <0.01 mA	Tx: 750 mA Rx: 300 mA Sleep: 0.072 mA
Packet size	Up to 20 bytes	Minimum of 10 bytes	12 bytes	Defined by user	6 bytes to 10 kB
Devices per access point	Unlimited	Unlimited	1 million	1 million	< 500,000
Security	AES-128 encryption	AES-128/256 encryption	No network encryption	AES CCM (128-bit) for encryption and authentication	128/256 bit encryption
Status	Early deployments	Under development	Being deployed	Being deployed	Being deployed

Figura 7: Comparació de les principals característiques de les diferents opcions de tecnologies LPWAN no cel·lulars [6]

2.2 LoRa Alliance

L'Aliança LoRa (LoRa Alliance) és una associació oberta i sense ànim de lucre que ha crescut molt des de la seva creació el març del 2015, convertint-se en l'aliança més gran i de més ràpid creixement del sector tecnològic. Els seus membres col·laboren per promoure i impulsar l'èxit del protocol LoRaWAN com a estàndard global obert líder per a la connectivitat IoT LPWAN segura a nivell d'operador. Amb la flexibilitat tècnica per abordar una àmplia gamma d'aplicacions IoT, tant estàtiques com mòbils, i un programa de certificació per garantir la interoperabilitat, LoRaWAN ja ha estat desplegat pels principals operadors de xarxes mòbils a nivell mundial, amb una àmplia expansió continuada fins al 2020 i més enllà.

2.3 Què és LoRaWAN?

LoRaWAN es tracta de la tecnologia que defineix el protocol de comunicació i l'arquitectura de la xarxa basant-se en la capa física LoRa que ens possibilita un enllaç de comunicació de llarg abast. És una especificació per optimitzar les LPWAN en la vida útil de les bateries, la capacitat de la xarxa, el seu cost, el seu abast, la qualitat del servei, la seguretat i la varietat d'aplicacions que ofereix la xarxa, ja que el protocol i l'arquitectura de la xarxa tenen la major influència en aquests factors.

LoRaWAN és la tecnologia LPWAN més adoptada fins la data i representa més d'un terç de totes les implementacions a nivell mundial. S'espera que el mercat creixi un 42% durant els pròxims 5 anys [7].

LoRaWAN és un complement a les variacions LTE (long term evolution) i ofereix diferents segments d'aplicació, de manera que no competeixen per les mateixes aplicacions. Els operadors estan desplegant xarxes ara en la banda sense llicència i oferiran serveis en M2M (machine-to-machine, màquina a màquina) cel·lular, banda LPWAN amb llicència i banda LPWAN sense llicència i segmentaran les diferents categories amb la qualitat del servei (QoS) per maximitzar els ingressos i l'ús de banda amb llicència.

A LoRaWAN es poden distingir clarament dues parts a la xarxa: portes d'enllaç (o gateways) i nodes, els primers són encarregats de rebre i enviar informació a o des dels nodes cap a Internet i els segons, són els dispositius finals que envien i reben informació dels sensors o actuadors cap al gateway.

2.4 LoRa

LoRa és una abreviatura de Long Range, és a dir, és un format de modulació per ràdio que proporciona un abast més llarg que la modulació FSK (modulació per desplaçament en freqüència) directa. Això s'aconsegueix mitjançant una combinació de mètodes: utilitza una tècnica d'espectre estès anomenada Chirp Spread Spectrum (CSS, modulació d'espectre eixamplat de chirp) i utilitza la codificació de correcció d'errors directa (en combinació amb blanqueig i entrellaçament) per millorar la robustesa davant interferències.

LoRa és la capa física o modulació sense fils utilitzada per crear l'enllaç de comunicacions de llarg abast, un protocol per LPWAN desenvolupat per Semtech, una important empresa fabricant de xips de ràdio. Molts dels sistemes sense fils heretats fan servir la modulació FSK com a capa física al tractar-se d'una modulació que aconsegueix una potència baixa. Tot i així, LoRa es basa en la tècnica CSS que manté les característiques de baixa potència de la modulació FSK però augmentat significativament l'abast de la comunicació. La modulació CSS s'ha fet servir a les comunicacions militars i espacials durant molts anys degut a les llargues distàncies que pot aconseguir i la robustesa que té davant interferències, però LoRa és la primera implementació per ús comercial de baix cost.

En un sistema tradicional o d'espectre eixamplat de seqüència directa (DSSS), la fase portadora del senyal del transmissor canvia segons una seqüència de codis. Quan es multiplica el senyal de dades amb un patró de bits pre-definit a una velocitat molt més alta, també conegut com a codi d'eixamplament (o seqüència de chirps), es crea un senyal "més ràpid" que té components de freqüència més alts que la senyal de dades original. Això significa que l'amplada de banda del senyal s'estén més enllà de l'amplada de banda del senyal original. En radiofreqüència, els bits de la seqüència de codi s'anomenen chirps (per tal de distingir entre els bits més llargs i sense codificar del senyal de dades original). Quan el senyal transmès arriba al receptor de radiofreqüència, es multiplica per una còpia idèntica del codi d'eixamplament utilitzat al transmissor, donant lloc a una rèplica del senyal de dades original. Seguir aquesta multiplicació de seqüències de codis proporciona una àrea de cobertura més gran, de manera que es pot transmetre en un interval més llarg.

La relació logarítmica de la velocitat de chirp de la seqüència de codis i la velocitat de bits del senyal de dades s'anomena guany de processament (G_p). Aquest guany és el que permet al receptor recuperar el senyal de dades original, fins i tot si el canal té una relació senyal-soroll (SNR) negativa. LoRa té un G_p superior en comparació amb la modulació FSK, el que permet un nivell de potència de sortida del transmissor reduït mantenint la mateixa velocitat de dades de senyal i una àrea de cobertura similar.

Un dels inconvenients d'un sistema DSSS és el fet que requereix un rellotge de referència molt precís (i car). La tecnologia CSS de Semtech ofereix una alternativa DSSS de baix cost i poca potència, però robusta, que no requereix un rellotge de referència d'alta precisió. En la modulació LoRa, l'expansió de l'espectre del senyal s'aconsegueix generant un senyal chirp que varia contínuament en freqüència. Un avantatge d'aquest mètode és que els desplaçaments de temps i freqüència entre el transmissor i el receptor són equivalents, reduint en gran mesura la complexitat del disseny del receptor. L'amplada de banda de freqüència d'aquest chirp és equivalent a l'amplada de banda espectral del senyal. El senyal de dades que transporta les dades des d'un dispositiu final a una passarel·la es processa a una velocitat de dades més alta i es modula a la senyal portadora de chirp. La modulació LoRa també inclou un esquema de correcció d'error variable que millora la robustesa del senyal transmès. Per cada quatre bits d'informació enviada, s'envia un cinquè bit d'informació de paritat.

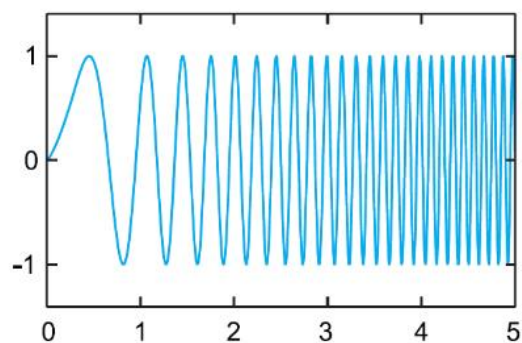


Figura 8: LoRa CSS [8]

Amb aquesta tecnologia, amb un únic gateway o estació base es poden cobrir ciutats senceres o centenars de quilòmetres quadrats, i el màxim abast depèn en gran mesura de l'entorn i obstruccions de la ubicació determinada.

Les característiques principals de LoRa són:

- Alta tolerància a les interferències
- Alta sensibilitat per a rebre dades (-168dB)
- Basada en modulació "chirp"
- Baix consum (fins a 10 anys amb una bateria)
- Llarg abast de 10 a 20 km
- Baixa transferència de dades (fins a 255 bytes)
- Connexió punt a punt o connexió punt a multipunt
- Diferents bandes de freqüència de treball en funció de la

regió

LoRaWAN defineix el protocol de comunicació i l'arquitectura del sistema per la xarxa amb la capa MAC (Control d'Accés al Medi), mentre que la capa física LoRa habilita l'enllaç de comunicació de llarg abast.

És important diferenciar ambdues tecnologies, ja que LoRa parla de la capa física (capa 1 física del model OSI), és a dir, el tipus de modulació, l'ample de banda, la freqüència, etc; mentre que LoRaWAN estableix la manera en què es realitzaran les comunicacions (correspondria a la capa 2 de xarxa del model OSI).

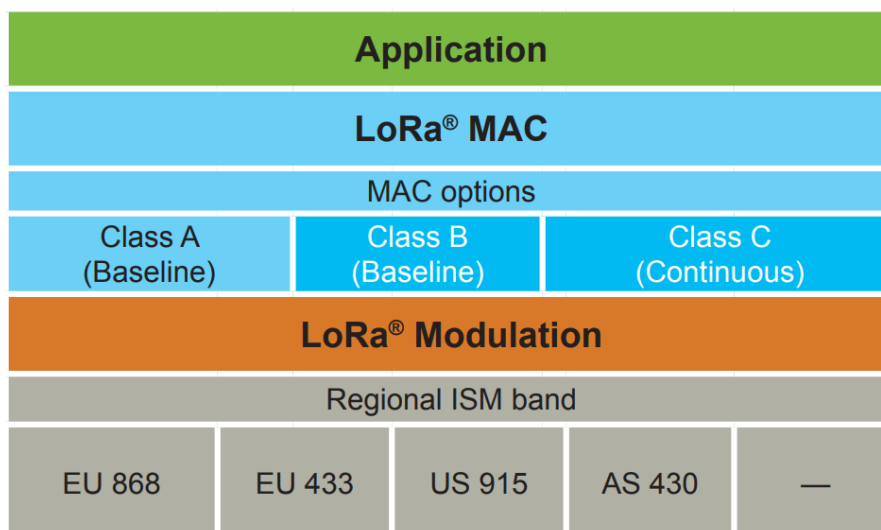


Figura 9: Model de capes de xarxa [1]

Aquesta estructura ens dona gran flexibilitat per a construir xarxes de sensors i/o actuadors per IoT, amb les següents característiques:

- Topologia estrella
- Abast de 10 a 15 km en línia de vista
- Encriptació AES 128

- Suport per a 3 classes de nodes
- Administració de dispositius
- Xarxes públiques i privades
- Baix consum i llarg abast
- Baixa transferència de dades (fins a 242 bytes)

Existeixen gran quantitat d'aplicacions on podem utilitzar Lora o LoRaWAN:

- Connexions punt a punt (P2P) o màquina a màquina
- Xarxes de sensors en ciutats, camp o indústria
- Xarxes IoT on no es requereix transferir veu o vídeo
- Tracking de vehicles, animals o persones
- Xarxes privades que no requereixen connectar-se a serveis en el núvol o on no hi ha cobertura cel·lular

Els paràmetres de comunicació principals LoRa són [9]:

- Canal dins de la banda: freqüència central que representa el canal. El canal 10 dins de la banda 868 MHz té un valor de 865.200.000 Hz
- Factor d'eixamplament (spreading factor) (SF): defineix el nombre de bits usats per codificar un símbol. A major SF, menor velocitat de transferència tindrem però major immunitat a interferències
- Taxa de codificació (code rate) (CR): la velocitat de codificació es refereix a la proporció de bits transmesos que realment transporten informació. La modulació LoRa afegeix una protecció contra errors (FEC) a cada transmissió de dades. Aquesta implementació es realitza codificant dades de 4 bits amb redundàncies en 5 bits, 6 bits, 7 bits o fins i tot 8 bits. L'ús d'aquesta redundància permetrà que el senyal LoRa aguantí curtes interferències. Cal ajustar el valor de velocitat de codificació segons les condicions del canal utilitzat per a la transmissió de dades. Si hi ha massa interferències al canal, es recomana augmentar el valor de CR, tot i que aquest augment també farà que la durada de la transmissió sigui superior
- Ample de banda (bandwidth) (BW): indica l'ample de freqüència que farem servir. En el cas de LoRa es tracta de les bandes de 125kHz, 250kHz o 500kHz.

2.5 Característiques de LoRaWAN

2.5.1 Arquitectura de xarxa

Moltes de les xarxes de comunicacions existents fan servir l'arquitectura de xarxa tipus malla. En aquest tipus de xarxa, els nodes finals envien la informació d'altres nodes per augmentar l'abast de la comunicació i la mida de la cel·la de la xarxa. Aquest fet augmenta l'abast però també li afegeix complexitat, redueix la capacitat de la xarxa i redueix la vida útil de la bateria ja

que els nodes reben i reenvien informació d'altres nodes que és irrellevant per a ells.

LoRaWAN fa servir una xarxa de xarxes en estrella, on la primera xarxa estrella està formada pels dispositius finals i les portes d'enllaç i la segona xarxa estrella està formada per les portes d'enllaç i un servidor de xarxa central, de manera que les portes d'enllaç són el pont entre els dispositius finals i el servidor. L'arquitectura tipus estrella de llarg abast té més sentit a l'hora de preservar la durada de la vida de la bateria quan es vol aconseguir connectivitat de llarg abast. En una xarxa LoRaWAN, els nodes no s'assignen a una porta d'enllaç específica, així les dades transmeses per un node són rebudes per diversos gateways on cadascun d'ells reenviarà el paquet rebut des del node final fins al servidor de xarxa al núvol a través d'una xarxa de retorn (ja sigui cel·lular, Ethernet, satèl·lit o Wi-Fi).

La intel·ligència i complexitat se situen al servidor de xarxa, que gestiona la xarxa i filtrarà els paquets rebuts redundants, realitzarà controls de seguretat, programarà reconeixements de la porta d'enllaç més òptima i realitzarà una adaptació de la velocitat de dades. Si un node és mòbil o està en moviment, no és necessari un traspàs de gateway a gateway, el que és una característica fonamental per habilitar les aplicacions de seguiment d'actius, el principal objectiu d'aplicació per l'IoT.

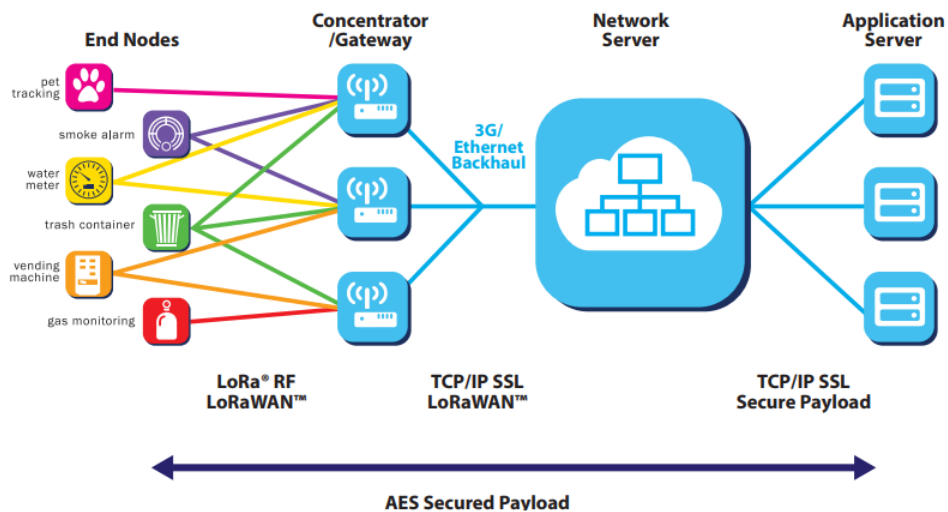


Figura 10: Arquitectura d'una xarxa LoRaWAN [1]

2.5.2 Vida útil de les bateries

Els nodes d'una xarxa LoRaWAN són asíncrons i es comuniquen quan tenen les dades a punt per enviar, ja sigui per esdeveniments o programades. Es tracta del protocol Aloha, el protocol en el que està basat l'accés al medi de LoRaWAN. En una xarxa de malla o amb una xarxa síncrona de xarxa, com la cel·lular, els nodes sovint s'han de 'despertar' per sincronitzar-se amb la xarxa i comprovar si hi ha missatges. Aquesta sincronització consumeix energia significativament i és la principal causa de reducció de la durada de la bateria. En un recent estudi i comparació realitzat per GSMA de les diverses

tecnologies que aborden l'espai LPWAN, LoRaWAN va mostrar un avantatge de 3 a 5 vegades en comparació amb la resta d'opcions tecnològiques [1].

2.5.3 Capacitat de la xarxa

Per tal de fer viable una xarxa en estrella de llarg abast, el gateway ha de tenir una capacitat molt alta per rebre missatges d'un volum molt elevat de nodes. L'elevada capacitat de xarxa d'una xarxa LoRaWAN s'aconsegueix mitjançant la velocitat de dades adaptativa i mitjançant l'ús d'un transceptor multimòdem multicanal al gateway de manera que es poden rebre missatges simultanis en diversos canals. Els factors crítics que afecten la capacitat són el nombre de canals simultanis, la velocitat de dades, la longitud de la càrrega útil i la freqüència amb què transmeten els nodes. Atès que LoRa està basada en una modulació d'espectre eixamplat, els senyals són pràcticament ortogonals entre si quan s'utilitzen diferents factors d'eixamplament (spreading factor). Això significa que els senyals modulats amb diferents factors d'eixamplament i transmesos al mateix canal de freqüència alhora no interfereixen entre ells, de manera que són invisibles entre ells, simplement són soroll. A mesura que canvia el spreading factor, la velocitat de dades efectiva també canvia. El gateway aprofita aquesta propietat per ser capaç de rebre diverses velocitats de dades diferents al mateix canal alhora. Un dispositiu final situat a prop d'una passarel·la hauria de transmetre dades amb un spreading factor baix, ja que necessita una potència rebuda gran. No obstant això, un dispositiu final situat a diversos quilòmetres d'una passarel·la haurà de transmetre amb un spreading factor molt superior. Aquest spreading factor més alt proporciona un augment del guany de processament i una sensibilitat de recepció més alta, tot i que la velocitat de dades serà necessàriament menor.

En incrementar la velocitat de transmissió, el temps a l'aire (time on air) s'escurça obrint més espai potencial per a la transmissió d'altres nodes. La velocitat de dades adaptativa també optimitza la durada de la bateria d'un node. Per tal de fer funcionar la velocitat de dades adaptativa, es requereix un enllaç simètric de pujada i baixada amb una capacitat d'enllaç descendent suficient. Aquestes funcions permeten a una xarxa LoRaWAN tenir una capacitat molt alta i fer que la xarxa sigui escalable. Una xarxa es pot desplegar amb una quantitat mínima d'infraestructura i, com es necessita capacitat, es poden afegir més gateways, augmentant la velocitat de dades, reduint l'escolta d'altres gateways i ampliant la capacitat entre 6 i 8 vegades [1]. Altres alternatives de LPWAN no tenen l'escalabilitat de LoRaWAN a causa de les compensacions tecnològiques que limiten la capacitat de l'enllaç descendent o fan que el rang de l'enllaç descendent sigui asimètric al rang d'enllaç ascendent.

El spreading factor del senyal base és variable i representa una solució de compromís. Per a un ample de banda disponible, un major spreading factor redueix la taxa de bits, i també redueix la durada de la bateria incrementant el temps de transmissió.

$$T_s \text{ (duration of a symbol)} = \frac{2^{SF}}{BW}$$

Amb una taxa de codificació de $4/(4+n)$ amb $n \in \{1, 2, 3, 4\}$

$$R_b \text{ (Bit Rate)} = SF \times \frac{BW}{2^{SF}} \times CR$$

LoRa permet sis factors de propagació (SF7 - SF12) i tres diferents amplex de banda (125 kHz, 250 kHz, 500 kHz). Segons el spreading factor que fem servir, tenim una velocitat des de 0.3kbps (SF12) a 5kbps (SF7). La sensibilitat de recepció va de -137 dBm (SF12) a -123 dBm (SF7) i l'abast de 14km (SF12) a 2km (SF7). Els factors de propagació i amplex de banda permesos estan definits per les agències reguladores.

Un determinat spreading factor i ample de banda donaran una taxa de bits definits per:

- A més spreading factor, menys taxa de bits (de un spreading factor 9 a un de 10, dupliquem la taxa de bits pel mateix ample de banda aproximadament).
- A més ample de banda, més taxa de bits (d'una amplada de banda de 125 kHz a una de 250 kHz, dupliquem la taxa de bits pel mateix spreading factor).

2.5.4 Classes de dispositius

Els dispositius finals serveixen per a diferents aplicacions i tenen requisits diferents. Per tal d'optimitzar la gran varietat de perfils d'aplicacions finals, LoRaWAN utilitza diferents classes de dispositius. Les classes de dispositius compensen la latència de la comunicació d'enllaç descendent de la xarxa en comparació amb la durada de la bateria. En una aplicació tipus controlador o actuator, la latència d'enllaç descendent de comunicació és un factor important.

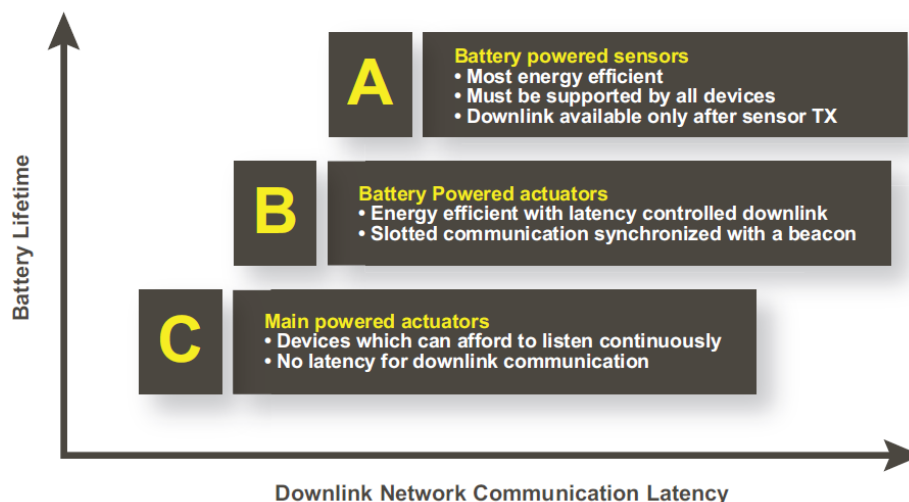


Figura 11: Classes de dispositius i relació latència - durada de bateries [1]

- Dispositius finals bidireccionals (classe A): els dispositius finals de classe A permeten les comunicacions bidireccionals per la qual cosa cada transmissió d'enllaç ascendent de cada dispositiu final és seguida de

dues finestres curtes de recepció d'enllaç descendent. La ranura de transmissió programada pel dispositiu final es basa en les seves pròpies necessitats de comunicació amb una petita variació basada en una base de temps aleatòria. Aquesta operació de classe A és el sistema de dispositiu final de menor potència per a aplicacions que només requereixen una comunicació d'enllaç descendent del servidor poc després que el dispositiu final hagi enviat una transmissió d'enllaç ascendent. Les comunicacions d'enllaç descendent del servidor en qualsevol altre moment hauran d'esperar fins la següent transmissió a l'enllaç ascendent programat. És la classe amb més latència i de més durada de les bateries. Els dispositius de classe A poden utilitzar-se de dues formes: enviant dades en un interval de temps (per exemple, cada 10 minuts) o enviant dades amb esdeveniments (p. ex. quan la temperatura supera els 30° o per sota de 15°).

- Dispositius finals bidireccionals amb ranures de recepció programades (classe B): a més de les finestres de recepció aleatòria de classe A, els dispositius de classe B obren finestres de recepció addicionals als instants programats. Per tal que el dispositiu final obri la finestra de recepció a l'instant programat, rep una balisa sincronitzada amb el temps des del gateway. Això permet al servidor saber quan el dispositiu final està escoltant. És la classe on la latència i la durada de les bateries és un entremig de les altres dues classes.
- Dispositius finals bidireccionals amb ranures màximes de recepció (classe C): els dispositius finals de classe C tenen finestres de recepció obertes gairebé contínuament, només es tanquen quan estan transmetent. És la classe amb menys latència i de menys durada de les bateries, en la majoria dels casos necessita una font d'energia constant per a operar.

Tots els dispositius finals LoRaWAN impliquen com a mínim la funcionalitat de classe A. A més, poden implementar la classe B i / o la classe C. Quan funcionen a la classe B, els dispositius finals s'anomenen habilitats per a la classe B. El mateix amb la classe C. En tots els casos, els dispositius finals continuen sent compatibles amb la classe A.

2.5.5 Seguretat

És extremadament important que qualsevol LPWAN incorpori seguretat. LoRaWAN utilitza dues capes de seguretat: una per a la xarxa i una per a l'aplicació. La seguretat de la xarxa garanteix l'autenticitat del node a la xarxa mentre que la capa de seguretat de l'aplicació garanteix que l'operador de xarxa no tingui accés a les dades de l'aplicació de l'usuari final. El xifratge AES s'utilitza amb la clau intercanviada utilitzant un identificador IEEE EUI64.

Hi ha compromisos en totes les opcions tecnològiques, però les funcions LoRaWAN en arquitectura de xarxa, classes de dispositius, seguretat, escalabilitat de capacitat i l'optimització per a la mobilitat s'adreça a la més àmplia varietat d'aplicacions IoT potencials.

LoRa Alliance sempre ha mantingut la seguretat en el desenvolupament de l'especificació LoRaWAN i ha estat altament transparent sobre les característiques de seguretat del protocol. L'especificació LoRaWAN s'ha dissenyat des del principi amb la seguretat com a aspecte essencial, proporcionant propietats de seguretat d'última generació que satisfan les necessitats de xarxes IoT de baixa potència. A diferència de moltes altres tecnologies IoT, l'especificació LoRaWAN ja ofereix xifratge dedicat de punta a punta als diferents proveïdors d'aplicacions.

L'especificació defineix dues capes de criptografia:

- Utilitzant una clau de sessió de xarxa de 128 bits única compartida entre el dispositiu final i el servidor de xarxa
- Utilitzant una clau de sessió d'aplicació de 128 bits única compartida de extrem a extrem a nivell d'aplicació

Els algorismes AES s'utilitzen per proporcionar autenticació i integritat de paquets al servidor de xarxa i xifratge de punta a punta al servidor d'aplicacions. En proporcionar aquests dos nivells, es poden implementar xarxes compartides multi usuari o de tinença múltiple sense que l'operador de xarxa tingui visibilitat de les dades de càrrega útil dels usuaris.

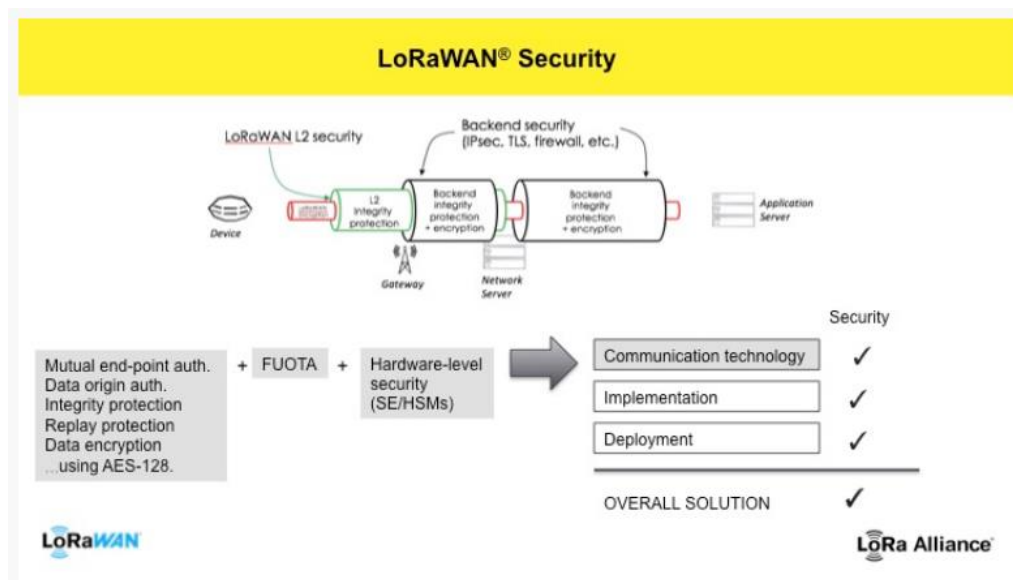


Figura 12: Visió general de la seguretat de LoRaWAN [10]

LoRaWAN té tots els components bàsics necessaris i utilitzats per qualsevol tecnologia moderna de comunicacions sense fils, i ho fa amb la potència d'AES-128. La seguretat inherent de LoRaWAN, tal com es proporciona a l'especificació, ha d'anar acompanyada d'una implementació segura i d'un desplegament segur d'aquests dispositius i/o xarxes per mantenir els mecanismes de seguretat integrats del protocol. Cal assenyalar que això és

cert en totes les implementacions de dispositius segurs que utilitzen qualsevol tecnologia de comunicació.

Com s'ha dit anteriorment, LoRaWAN es basa en la criptografia simètrica, que requereix compartir claus d'una manera segura. Per ajudar més amb aquest procés, els membres de LoRa Alliance han desenvolupat:

- Interfícies d'interfície LoRaWAN que aïllen l'emmagatzematge de claus arrel al servidor d'unió, de manera que es converteix en un reproductor de confiança, independentment de la xarxa
- Solucions d'elements segurs que proporcionen protecció física contra la manipulació de maquinari
- Per garantir la seguretat de dispositius i xarxes, com passa amb qualsevol tecnologia, la millor pràctica sempre és utilitzar dispositius certificats i treballar amb proveïdors de serveis provats i de confiança. LoRaWAN no és diferent i els usuaris finals poden confiar en el seu desplegament si aprofiten recursos que saben implementar correctament les solucions LoRaWAN.

2.5.6 LoRaWAN a les diferents regions

LoRaWAN utilitza l'espectre sense llicència com part de la banda de ràdio ISM. A tota Europa s'utilitza un pla de freqüències sense llicència al voltant dels 868 MHz i dels 433 MHz, a Estats Units i Austràlia al voltant dels 915 MHz, a la Xina al voltant del 490 MHz, al Japó i a Corea al voltant dels 923 MHz i a la Índia als 866 MHz.

L'especificació LoRaWAN varia lleugerament d'una regió a una altra en funció de les diferents assignacions d'espectre regionals i requisits regulatoris. L'especificació LoRaWAN per a Europa i Amèrica del Nord està definida, però altres regions encara estan sent definides pel comitè tècnic [1].

	Europe	North America	China	Korea	Japan	India
Frequency band	867-869MHz	902-928MHz	470-510MHz	920-925MHz	920-925MHz	865-867MHz
Channels	10	64 + 8 +8	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee
Channel BW Up	125/250kHz	125/500kHz				
Channel BW Dn	125kHz	500kHz				
TX Power Up	+14dBm	+20dBm typ (+30dBm allowed)				
TX Power Dn	+14dBm	+27dBm				
SF Up	7-12	7-10				
Data rate	250bps- 50kbps	980bps-21.9kpbs				
Link Budget Up	155dB	154dB				
Link Budget Dn	155dB	157dB				

Figura 13: Característiques LoRaWAN per les diferents regions [1]

- Europa

LoRaWAN defineix deu canals, vuit dels quals tenen una velocitat de dades múltiple des de 250bps fins a 5,5 kbps, un únic canal LoRa a alta velocitat de dades a 11 kbps i un sol canal FSK a 50 kbps. La potència de sortida màxima permesa per l'ETSI (Institut Europeu de Normes de Telecomunicacions) a Europa és de 14dBm, a excepció de la banda G3 que permet 27dBm. Hi ha restriccions del cycle de treball (duty cycle) segons ETSI, però no hi ha limitacions màximes de transmissió ni de temps de permanència del canal.

- Amèrica del Nord

La banda ISM per a Amèrica del Nord és de 902-928 MHz. LoRaWAN defineix 64 canals d'enllaç ascendent de 125 kHz de 902,3 a 914,9 MHz en increments de 200 kHz. N'hi ha altres vuit canals d'enllaç ascendent de 500 KHz en increments d'1,6 MHz de 903 MHz a 914,9 MHz. Els vuit canals d'enllaç descendent tenen una amplada de 500 kHz a partir de 923,3 MHz a 927,5 MHz. La potència màxima de sortida a la banda de 902-928 MHz d'Amèrica del Nord és 30 dBm, però per a la majoria de dispositius 20 dBm són suficients. Per la FCC (Federal Communications Commission) no hi ha limitacions del cycle de treball, però hi ha un temps de permanència màxim de 400 ms per canal.

La modulació LoRa es qualifica com a tècnica de modulació digital per la qual cosa està exempt d'haver de complir tots els requisits de salt de freqüència especificats per FCC sota un mode de funcionament híbrid. En el mode híbrid, la potència màxima de sortida està limitada a 21dBm i només un subconjunt de vuit canals dels 64 canals d'enllaç ascendent s'utilitza en mode híbrid.

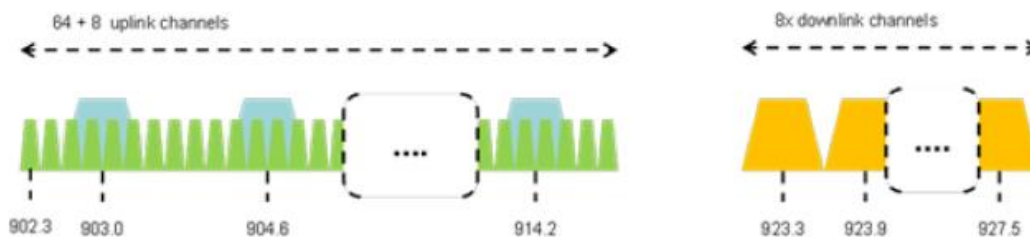


Figura 14: Banda ISM per LoRaWAN a Amèrica del Nord [1]

2.5.7 Cost de LoRaWAN contra altres sistemes

LoRaWAN suposa un important estalvi de costos en el desplegament i la infraestructura necessària en comparació amb els sistemes existents. Els propis dispositius que formen part de la xarxa ja no tenen un cost elevat en comparació amb altres tecnologies, però la infraestructura necessària per dur a terme les connexions tampoc és d'una complexitat elevada, fet que fa que els costos generals de la seva implementació resulten bastant més baixos que amb la resta de sistemes. També el fet que ens trobem amb un programari de codi obert al que tothom pot tenir accés, fa que optimitzem els costos. L'anàlisi següent es realitza per Talkpool que tenen una experiència significativa en el desplegament de WMBus i LoRa solucions.

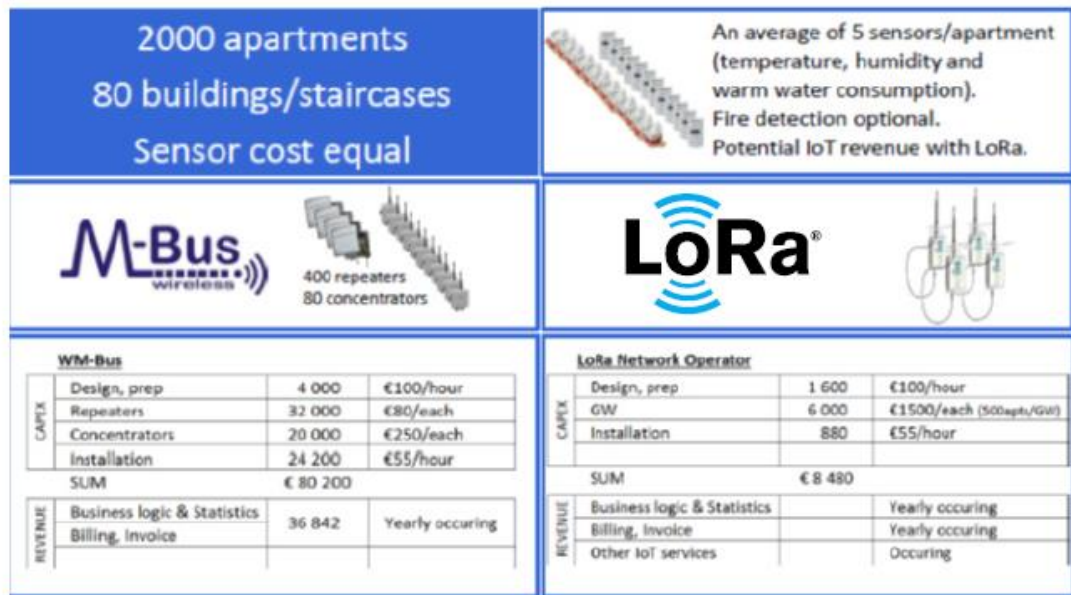


Figura 15: Comparació de costos entre sistema WMBus i LoRa [1]

2.5.8 Limitacions del duty cycle

El Duty Cycle és la fracció de temps durant la qual el recurs està ocupat. Per exemple, si un únic node transmet en un canal durant 2 unitats de temps cada 10 unitats de temps, el dispositiu té un duty cycle del 20%.

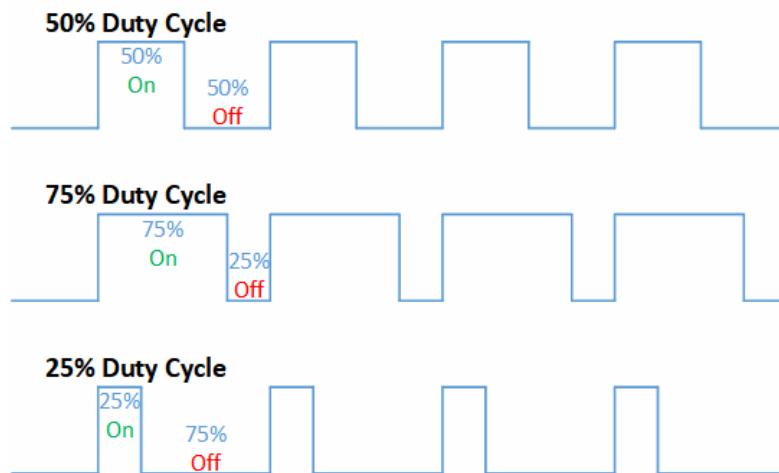


Figura 16: Exemples de Duty Cycle [11]

El duty cycle dels dispositius de ràdio està regulat per normatives governamentals. Normalment no s'ha de superar l'1%.

A Europa, els cicles de treball estan regulats per la secció 4.3.3 de l'estàndard ETSI EN 300 220-2 [17]. Aquest estàndard defineix els següents duty cycles per a cadascuna de les següents sub-bandes:

- g (863.0 - 865.0 MHz): 0.1%
- g1 (865.0 – 868.6 MHz): 1%
- g2 (868.7 - 869.2 MHz): 0.1%

- g3 (869.4 - 869.65 MHz): 10%
- g4 (869.7 - 870.0 MHz): 1%

Finalment, comentar que a la xarxa de la comunitat pública de The Things Network (infraestructura de codi obert l'objectiu de la qual és proporcionar una cobertura de xarxa LoRaWAN gratuïta) utilitzen una política d'accés que limita el temps de connexió de l'enllaç ascendent a 30 segons per dia (cada 24 hores) i per node. I per als missatges d'enllaç descendent a 10 missatges per dia (cada 24 hores) i per node. Per a les xarxes privada, aquests límits no s'apliquen, però encara ha de complir amb els límits governamentals i de LoRaWAN.

2.5.9 Principals avantatges de LoRaWAN

- Connexions bidireccionals segures mitjançant encriptació d'extrem a extrem
- Baix consum d'energia (duració de les bateries d'entre 10 i 20 anys) optimitzades per baixa potència
- Llarg abast de comunicació (10-20 km) amb bona cobertura als interiors i topologia d'estrella
- Connexió d'infininat de sensors i equips a xarxes públiques o privades (fins a 1 milió de nodes en xarxa)
- Baixes velocitats de dades
- Baixa freqüència de transmissió, mobilitat i serveis de localització
- Interoperabilitat de les diferents xarxes LoRaWAN en tot el món
- Tecnologia multi ús d'alta capacitat, per xarxa pública i multi-tenant
- Baix cost amb una infraestructura mínima, programari obert i nodes finals de baix cost

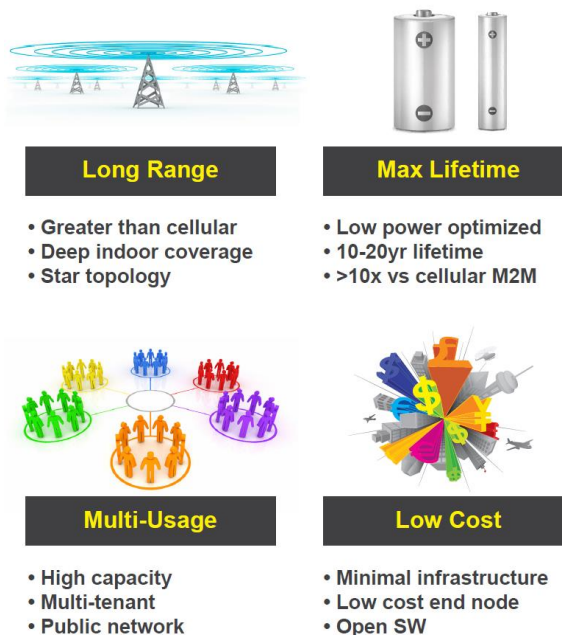


Figura 17: Característiques principals de LoRaWAN [1]

2.5.10 Principals inconvenients de LoRaWAN

- No es pot transmetre contingut multimèdia (grans velocitats de dades)
- No es poden realitzar trucades telefòniques
- El temps de latència és alt (excepte a dispositius de classe C)
- No pot mostrar dades en temps totalment real
- No està pensat per controlar coses (llums en un habitatge, per exemple) ja que tot i que la tecnologia pot ser bidireccional, no es recomana
- No es poden enviar i rebre dades de manera simultània

2.6 Especificacions de LoRaWAN

2.6.1 Paquets físics i finestres de recepció

La terminologia LoRa distingeix entre els missatges d'enllaç ascendent i d'enllaç descendent.

Els paquets d'enllaç ascendent s'envien per dispositius finals a un servidor de xarxa transmès per una o diverses passarel·les. Aquests utilitzen el mode explícit de paquets de ràdio LoRa en què s'inclouen la capçalera LoRa (PHDR) més una capçalera CRC (PHDR_CRC). La integritat de la càrrega útil està protegit per un CRC. El transceptor de ràdio inserirà els camps PHDR, PHDR_CRC i CRC de càrrega útil.

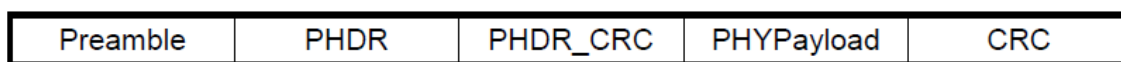


Figura 18: Estructura física d'una trama d'enllaç ascendent [12]

Els paquets d'enllaç descendent els envia un servidor de xarxa només a un dispositiu final i els transmet un servidor de xarxa a través d'una o més passarel·les. Aquests també utilitzen el mode explícit de paquets de ràdio LoRa en què s'inclouen la capçalera LoRa (PHDR) més una capçalera CRC (PHDR_CRC).

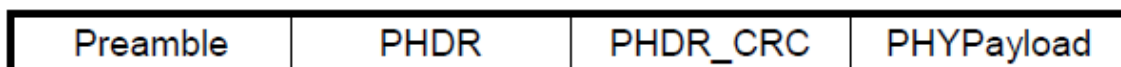


Figura 19: Estructura física d'una trama d'enllaç descendent [12]

Després de cada transmissió d'enllaç ascendent, el dispositiu final deu obrir una o dues finestres de recepció (RX1 i RX2); si no es rep cap paquet destinat al dispositiu final a RX1, s'obrirà RX2. Els temps d'inici de les finestres de recepció es defineixen utilitzant com a referència el final de la transmissió.

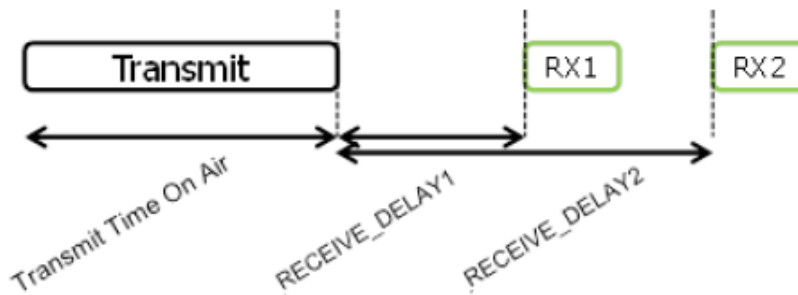


Figura 20: Temporització de la finestra de recepció del dispositiu final [13]

La durada d'una finestra de recepció haurà de ser, com a mínim, el temps requerit pel transceptor de ràdio del dispositiu final per detectar un preàmbul d'enllaç descendent que comença a RECEIVE_DELAY1 (+/- 20 microsegons) o RECEIVE_DELAY2 (+/- 20 microsegons) després del final de la modulació d'enllaç ascendent.

L'opció LoRaWAN Classe B afegeix una finestra de recepció sincronitzada al dispositiu final. Una de les limitacions de LoRaWAN Classe A és el mètode ALOHA d'enviar dades des del dispositiu final; no permet un temps de reacció conegut quan l'aplicació del client o el servidor volen dirigir-se al dispositiu final. El propòsit de la classe B és tenir un dispositiu final disponible per a la recepció a una hora previsible, a més de les finestres de recepció que segueixen la transmissió aleatòria de l'enllaç ascendent des del dispositiu final de la classe A. La classe B s'aconsegueix amb l'enviament des de la passarel·la d'una balisa regularment per sincronitzar tots els dispositius finals de la xarxa de manera que el dispositiu final pugui obrir una finestra de recepció addicional curta (anomenada ranura de ping) a un temps previsible durant una franja horària periòdica.

En cas de pèrdua de la balisa, un dispositiu final haurà de poder mantenir el funcionament de la classe B durant 2 hores (120 minuts) després de rebre l'última balisa. Aquesta operació temporal de classe B sense balisa s'anomena operació sense balisa. Es basa en el propi rellotge del dispositiu final per mantenir el temps. Durant l'interval de temps de 120 minuts descrit anteriorment, la recepció de qualsevol balisa dirigida al dispositiu final hauria d'ampliar el funcionament sense balises de la classe B 120 minuts més, cosa que permetria al dispositiu final corregir qualsevol deriva de temps i restablir la durada de les ranures de recepció. Un dispositiu final també pot utilitzar enllaços descendents de ranura ping de classe B per re sincronitzar el rellotge intern.

L'interval entre l'inici de dues balises successives s'anomena període de balises. La transmissió del marc de la balisa està alineada amb el començament de l'interval BEACON_RESERVED. Cada balisa va precedida d'un interval de temps BEACON_GUARD, on no es pot col·locar cap ranura de ping. La longitud de l'interval de temps BEACON_GUARD correspon al temps en antena del fotograma permès més llarg. Això és per garantir que un enllaç descendent de classe B iniciat durant una ranura de ping just abans de l'interval de temps BEACON_GUARD sempre tindrà temps per acabar sense xocar amb la transmissió de la balisa. Per tant, l'interval de temps útil per a una franja de

ping dura des del final de l'interval de temps BEACON_RESERVED fins al començament del següent interval de temps BEACON_GUARD.

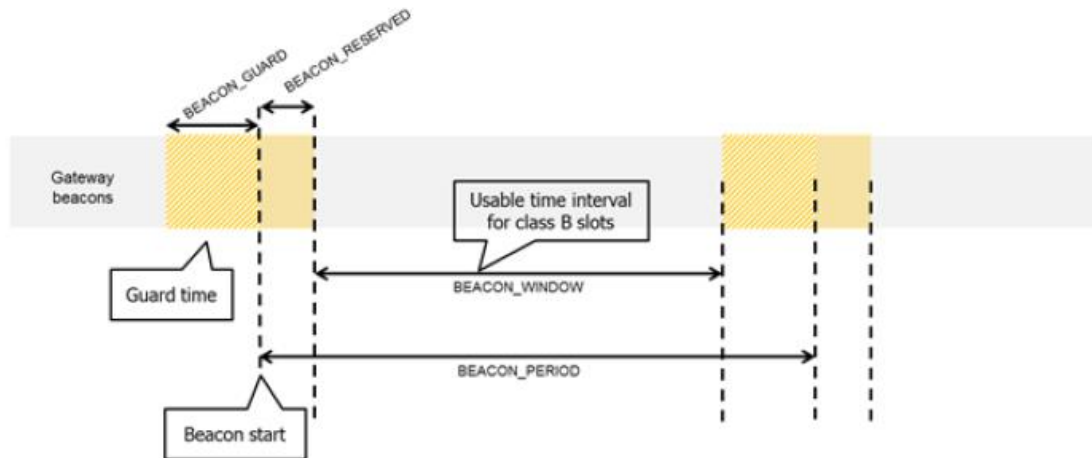


Figura 21: Esquema de sincronització de balises [13]

Un dispositiu final habilitat per a classe C escolta el més sovint possible mitjançant una combinació de canal/paràmetres de velocitat de dades anomenats RXC. El dispositiu final escoltarà a RXC quan no estigui transmetent o bé rebent a RX1 o bé rebent a RX2, segons la definició de classe A. Per fer-ho, obrirà una finestra curta sobre els paràmetres RXC entre el final de la transmissió d'enllaç ascendent i el començament de la finestra de recepció RX1. S'obrirà una altra finestra RXC entre el final de la finestra RX1 i el començament de la finestra RX2 i canviarà als paràmetres de recepció RXC tan bon punt es tanqui la finestra de recepció RX2. Aquesta finestra final de recepció RXC romandrà oberta fins que el dispositiu final comenci a enviar un altre paquet.

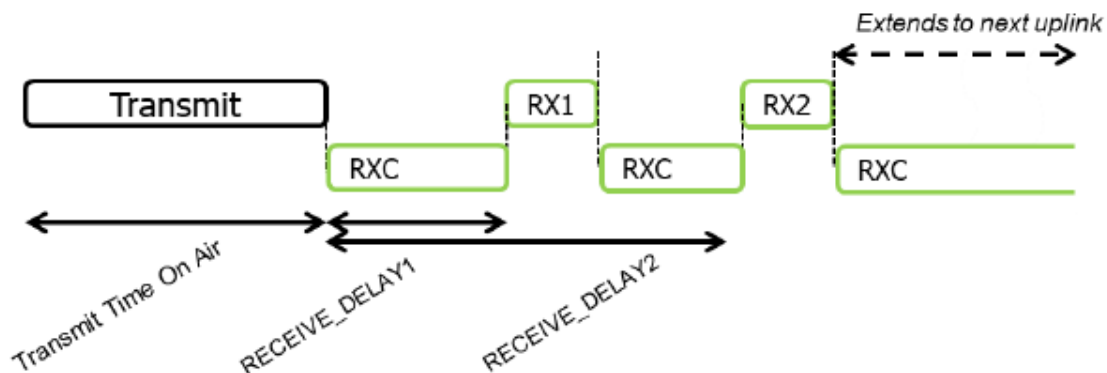


Figura 22: Finestres de recepció d'un dispositiu final de classe C [13]

2.6.2 Format de trama MAC

Tots els paquets d'enllaç ascendent i descendent de LoRaWAN porten una càrrega útil PHY (PHYPayload) començant amb una capçalera MAC d'un octet (MHDR), seguida d'una càrrega útil MAC (MACPayload) i acabant amb un codi d'integritat de missatges de 4 octets (MIC).

Size (octets)	1	7..M	4
PHYPayload	MHDR	MACPayload	MIC

Figura 23: Format de PHYPayload [13]

A la càrrega útil PHY, la longitud màxima M del camp MACPayload és específica per a la regió. Qualsevol trama rebuda per un dispositiu final o un servidor de xarxa que contingui una càrrega superior a la longitud màxima especificada M sobre la velocitat de dades utilitzada per rebre la trama s'haurà de descartar.

La capçalera MAC (MHDR) especifica el tipus de trama (FType) i la versió principal (Major) del format de trama de l'especificació de capa LoRaWAN segons la qual s'ha codificat la trama. LoRaWAN distingeix entre sis tipus de trames MAC diferents: sol·licitud d'enllaç (Join-Request), acceptació d'enllaç (Join-Accept), enllaç ascendent /descendent de dades no confirmades i enllaç ascendent/descendent de dades confirmades. Les trames de sol·licitud i acceptació d'enllaç s'utilitzen mitjançant el procediment d'activació per antena (OTAA). La versió principal especifica el format dels fotogrames intercanviats en el procediment Join i els primers quatre octets del MACPayload.

Bits	[7:5]	[4:2]	[1:0]
MHDR	FType	RFU	Major

Figura 24: Format de MHDR [13]

La càrrega útil MAC de trames de dades conté una capçalera de trames (FHDR) seguida d'un camp de port opcional (FPort) i un camp de càrrega útil de trames opcional (FRMPayload). El FHDR conté l'adreça curta del dispositiu final (DevAddr), un octet de control de trames (FCtrl), un comptador de trames de 2 octets (FCnt) i fins a 15 octets d'opcions de trames (FOpts) per transportar ordres MAC. Si el camp de càrrega útil de la trama no està buit, el camp FPort haurà d'estar present. Un valor de 0 indica que la càrrega FRMPayload només conté ordres MAC, els valors de 1 a 223 són específics de l'aplicació, el valor 224 està dedicat al protocol de prova de capa LoRaWAN MAC i els valors de 224 a 255 estan reservats per a l'ús i l'assignació de LoRa Alliance. Si una trama de dades porta una càrrega útil (FRMPayload), s'ha de xifrar abans que es calculi el codi d'integritat del missatge (MIC).

Size (octets)	7..22	0..1	0..N
MACPayload	FHDR	FPort	FRMPayload

Figura 25: Format de MACPayload [13]

El codi d'integritat del missatge (MIC) es calcula en tots els camps de la trama. És la informació que s'utilitza per confirmar que el missatge és autèntic, prové del remitent indicat i no s'ha modificat protegint la integritat de les seves dades.

2.6.3 Ordres MAC

Una ordre MAC consisteix en un identificador d'ordres (CID) d'1 octet seguit d'una seqüència d'octets específica de l'ordre, possiblement buida. Per a l'administració de xarxa, es pot intercanviar un conjunt d'ordres MAC exclusivament entre un servidor de xarxa i la capa MAC d'un dispositiu final. Les ordres de capa MAC mai són visibles al servidor d'aplicacions ni a l'aplicació que s'executa al dispositiu final.

2.6.4 Activació del dispositiu final

Per participar en una xarxa LoRaWAN, cada dispositiu final s'ha de personalitzar i activar.

L'activació d'un dispositiu final es pot aconseguir de dues maneres, ja sigui mitjançant l'activació per aire (OTAA) quan es desplega o es restableix un dispositiu final o bé mitjançant l'activació per personalització (ABP) en què es troben els dos passos de finalització. La personalització i activació del dispositiu es realitzen en un sol pas.

Un dispositiu final implementarà OTAA o ABP i pot implementar tant OTAA com ABP:

- Activació per aire

Per a l'activació per antena, els dispositius finals han de seguir un procediment de participació abans de participar en intercanvis de dades amb un servidor de xarxa. Un dispositiu final iniciarà un nou procediment d'unió cada vegada que perdi la informació del context de la sessió. El dispositiu final s'haurà de personalitzar amb la informació següent abans d'iniciar el procediment d'unió: un identificador de dispositiu final exclusiu a nivell mundial (DevEUI), l'identificador de servidor d'unió (JoinEUI) i una clau AES-128 (AppKey).

- Activació per personalització

L'activació per personalització vincula un dispositiu final directament a una xarxa específica, evitant així el procediment sol·licitud-acceptació d'unió. El dispositiu final està equipat amb la informació necessària per participar en una xarxa LoRaWAN específica tan aviat com s'inicia. Comprometre les claus d'un dispositiu final no compromet la seguretat de les comunicacions d'altres dispositius finals. En iniciar-se primer i després restablir-se, els dispositius finals personalitzats hauran de tenir tots els canals disponibles per a aquesta regió habilitats i haurien d'utilitzar totes les velocitats de dades necessàries per a aquesta regió. Els dispositius finals ABP han d'emmagatzemar els comptadors de trames de manera persistent (per exemple, en memòria no volàtil).

2.7 Diferents versions de LoRaWAN

Actualment, hi ha versions diferents de l'especificació LoRaWAN que estan disponibles per als desenvolupadors. Cadascuna admet funcions lleugerament diferents.

- LoRaWAN Specification 1.0: gener 2015

Versió inicial del protocol.

- LoRaWAN Specification 1.0.1 : febrer 2016

Diferents correccions en termes de transmissió i seguretat i s'afegeixen els plans de freqüències per a la banda ISM australiana (915-928 MHz) i la banda xinesa de mesura (470-510 MHz).

- LoRaWAN Specification 1.0.2 : juliol 2016

Petites correccions, aclariments i definicions del protocol intern.

- LoRaWAN Specification 1.1: octubre 2017

Es descriu el protocol de xarxa LoRaWAN que està optimitzat per a dispositius finals amb bateria. L'especificació LoRaWAN v1.1 afegeix compatibilitat amb la millora de la itinerància de transferència, la classe B i la seguretat.

- LoRaWAN Specification 1.0.3: juliol 2018

Admet totalment dispositius de classe B unicast i multicast. Les seccions classe A i classe C no canvien en comparació amb LoRaWAN 1.0.2 amb l'excepció d'una nova ordre MAC "DeviceTimeRequest" que s'utilitza per sincronitzar el rellotge de temps real d'un dispositiu. La secció LoRaWAN1.0.3 classe B és compatible amb la LoRaWAN1.1 classe B.

- LoRaWAN Specification 1.0.4: octubre 2020

La última versió de LoRaWAN, simplifica el desenvolupament, la implementació i la interoperabilitat.

2.8 Avantatges de LoRaWAN sobre altres tecnologies LPWAN

Hi ha algunes diferències tècniques entre LoRaWAN i tecnologies LPWAN alternatives que permeten abordar un conjunt molt més ampli d'aplicacions des d'una connectivitat bidireccional, velocitat de dades adaptativa i una perspectiva de classe de punt final, però el diferencial clau és l'ecosistema, el programa de certificació i estandardització. Si s'analitza com s'ha acollit la tecnologia de manera exitosa en els darrers anys, tots han seguit aquest model. Tenir diferents models de negoci, competència i un ecosistema divers amb líders de la indústria és l'única manera d'escalar. Un estàndard

obert també és una estratègia provada per aconseguir una acceptació i un ampli desplegament enfront de la tecnologia propietària, l'elecció dels diferents components de la xarxa; gateways, dispositius finals, servidors de xarxa al núvol juntament amb xips, kits de desenvolupament i productes finals de molts proveïdors diferents ofereixen una estratègia de baix risc per a possibles operadors o usuaris finals.

Per últim, però no menys important, LoRaWAN protegeix les dades i la privadesa com cap altra LPWAN, és la solució més segura disponible al mercat amb xifratge 128AES en diversos nivells per a totes les dades, des del sensor fins al servidor d'aplicacions.

2.9 Dispositius

Podem distingir doncs els següents elements en una xarxa LoRaWAN:

- Nodes finals
- Portes d'enllaç
- Servidors de xarxa
- Servidors d'aplicació

2.9.1 Nodes finals

Els nodes finals són dispositius de hardware físic que contenen capacitats de detecció, una mica de potència de càlcul i un mòdul de ràdio per traduir les dades en un senyal de ràdio, a més dels sensors o actuadors amb els que es connecten. Típicament, els nodes es poden construir a partir dels mòduls de ràdio i algun tipus de microcontrolador com Arduino o altres de major potència de càlcul als que associem diferents sensors i/o actuadors.

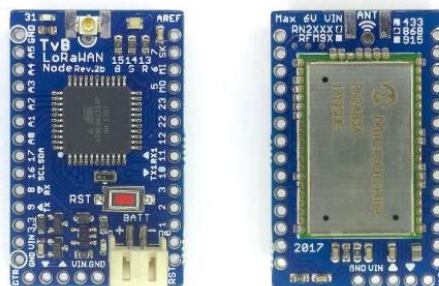


Figura 26: Exemple de node LoRaWAN [11]

Els nodes envien o reben dades cap a o des de les portes d'enllaç LoRaWAN, cap a o des d'Internet mitjançant una connexió de dades Ethernet, 3G-4G o similar. Un node pot aconseguir una autonomia de varis anys de vida amb una petita bateria si es programa perquè es posi en mode de suspensió profunda per optimitzar el consum d'energia i únicament es desperti en el moment de transmetre les dades via LoRa. Aquest és un dels majors avantatges d'aquesta tecnologia.

2.9.2 Portes d'enllaç

Les portes d'enllaç o gateways també es coneixen com mòdems, punts d'accés o passarel·les. Una porta d'enllaç també és un dispositiu de maquinari que recull tots els missatges LoRaWAN dels nodes finals. Aquests missatges es converteixen en bits que es poden enviar a través de les xarxes IP tradicionals. La porta d'enllaç està connectada al servidor de xarxa al que transmet tots els missatges.

Les portes d'enllaç són transparents i amb un poder computacional limitat, tota la complexitat i la intel·ligència s'executen al servidor de xarxa. Segons l'ús i el tipus, les portes d'enllaç poden ser de dos tipus:

- Gateway indoor o d'ús en interiors
- Gateway outdoor, d'ús a l'aire lliure

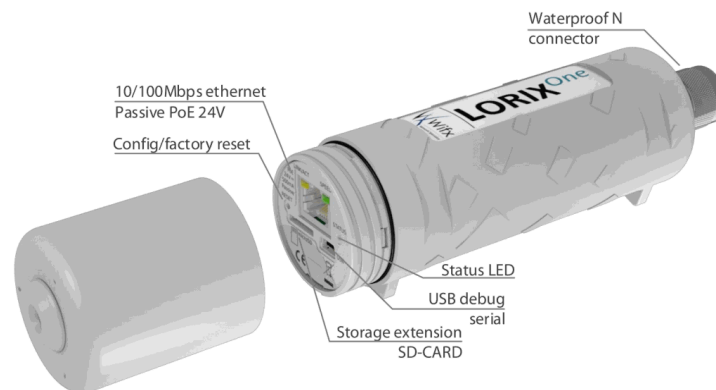


Figura 27: Exemple de porta d'enllaç outdoor (LoRiX One) [11]

2.9.3 Servidors de xarxa

Tots els missatges de les portes d'enllaç s'envien al servidor de xarxa. Aquí és on tenen lloc els processos més complicats de tractament de dades.

És el principal responsable de:

- Encaminament/reenviament de missatges a l'aplicació adequada.
- Seleccionar la millor porta d'enllaç per al missatge d'enllaç descendent, típicament en funció d'una indicació de qualitat d'enllaç, calculada a partir del RSSI (Indicació de la intensitat del senyal rebut) i la SNR (Relació de senyal-soroll) dels paquets rebuts prèviament.
- Eliminació de missatges duplicats si es reben per múltiples portes d'enllaç.
- Desxifrar els missatges enviats des dels nodes finals i xifrar els missatges que s'envien als nodes.

Les portes d'enllaç normalment es connecten al servidor de xarxa en un enllaç xifrat de Protocol d'Internet (IP). La xarxa generalment conté una interfície de posada en servei i supervisió de porta d'enllaç, el que permet que el proveïdor de xarxa administri les portes d'enllaç, gestioni situacions de fallada, monitoritzi alarmes, etc.

2.9.4 Servidors d'aplicació

En els servidors d'aplicació és on s'ubiquen les veritables aplicacions de IoT. En els servidors d'aplicació és on es realitzen processos útils amb les dades recopilades dels dispositius finals.

Els servidors d'aplicacions s'executen principalment en un núvol privat o públic, que interactua amb el servidor de xarxa LoRaWAN i realitza el processament específic de l'aplicació. La interfície amb el servidor d'aplicacions és gestionada pel servidor de xarxa.

2.10 Casos d'ús

Les aplicacions on són aplicables LPWAN són infinites, però si ens fixem en les principals que impulsen els desplegaments de xarxa actuals, es tracta d'edificis intel·ligents, cadenes de subministrament, smart cities i agricultura. Per exemple, algunes necessitats que poden quedar cobertes amb la implantació d'una xarxa LoRaWAN, són :

- El fet que els sensors sàpiguen si s'utilitza un edifici o una habitació pot reduir significativament la gestió del servei i les despeses relacionades.
- A una cadena de subministrament, qualsevol aplicació que tingui un lliurament o recollida amb l'inventari associat pot suposar un gran estalvi en la gestió d'inventaris i l'optimització de la ruta de lliurament.
- Una solució intel·ligent de control de les escombraries redueix les recollides en un 40%.
- A l'agricultura les necessitats estan motivades per la creixent demanda d'aliments, mentre que el 80% del consum d'aigua correspon a l'agricultura i el valor dels cultius és extremadament elevat, de manera que és important disposar de sensors per determinar l'ús d'aigua, la salut del sòl/cultiu, etc. i la supervisió del sòl es tradueix en un important estalvi de costos en l'ús de recursos i una millora dels beneficis amb una millora dels rendiments.
- Al treballar amb grans distàncies i informació bidireccional, aquesta tecnologia és útil en situacions d'emergència. Com les bateries dels dispositius no necessiten ser reemplaçades amb freqüència, els sensors es poden instal·lar en àrees remotes de difícil accés. Per exemple, en el cas d'un tsunami o inundació, si un pont proveït d'aquesta tecnologia queda submergit, els sensors de pressió i humitat poden detectar la situació i transmetre la informació a una central de monitorització ambiental, que sabrà l'horari en que va ocórrer, la intensitat dels estralls i fins i tot, pot avisar a la població sobre possibles rutes de fugida alternatives.
- Les empreses enfocades a produir solucions que converteixen les ciutats intel·ligents en una realitat es recolzen en LoRaWAN per a activitats que van des del control de la il·luminació pública fins al monitoratge

ambiental, oferint informes de falles d'elements d'infraestructura de la ciutat, així com informacions pertinents per a canvis i millores estructurals que beneficiïn les ciutats que adoptin la tecnologia.

- No és només en grans empreses, esdeveniments i serveis públics que la tecnologia LoRa pot estar present. Hi ha empreses que fabriquen productes domèstics recolzats en LoRa, incloent localitzadors d'objectes, rastrejadors de persones, sensors de moviment i altres productes orientats a la seguretat domèstica.

Alguns casos d'ús d'implantació real són [14]:

- Gran nombre de persones
En 2017, Orange va implementar per al torneig de tennis de Roland Garros, diverses xarxes per 4G i IoT. En aquest últim cas, es va utilitzar la tecnologia LoRa, que va servir per millorar l'experiència dels aficionats. Els sensors col·locats en les catifes a les entrades de les pistes van permetre als organitzadors entendre el flux de visitants, el nombre de persones en cadascuna de les 17 pistes i la disponibilitat de seients per acomodar els espectadors.
- Ubicació de béns
Una gran corporació nord-americana va implementar una solució IoT amb l'ús de LoRa, connectada a una xarxa LoRaWAN privada perquè pogués monitoritzar béns com muntacàrregues i camions dins i fora dels seus més de 5 km de túnels, pels quals fa el transport de materials. La mateixa empresa va utilitzar la solució per monitoritzar la localització de diversos objectes d'art ubicats en la seva major planta, proporcionant més seguretat a aquests béns amb una estructura de comunicació de baix cost i que utilitza sensors amb bateria de llarga vida.
- Carreteres i àrees de descans
VINCI Autoroutes, empresa responsable de l'administració de més de 4 mil km de carreteres a França, realitza diversos controls amb tecnologia LoRaWAN en l'àrea de serveis d'una de les autopistes que gestiona. L'empresa utilitza sensors per mesurar la temperatura de la carretera, saber quantes places d'aparcament estan lliures, si hi ha entrades sanitàries disponibles, si les escombraries del lloc estan plenes i fins i tot si hi ha algun consum inusual d'aigua i energia. Tota aquesta informació es transmet a través dels sistemes d'Orange a un lloc de seguretat amb una interfície per veure i interpretar les dades.
- Estalvi de subministraments
IOTLABS va dissenyar i instal·lar una solució integral de gestió de l'aigua que aprofita els dispositius LoRa. El sistema proporciona a Esporles (Mallorca) la possibilitat de controlar la xarxa d'aigua i l'ús d'aigua, llegir i informar automàticament els nivells dels dipòsits i controlar els intervals de pH i clor per garantir la qualitat i la seguretat de l'aigua per al consum humà. El sistema ha vist inicialment fins a un percentatge d'estalvi d'aigua.

- Edifici intel·ligent
Capgemini volia fer un seguiment dels canvis en l'entorn de l'oficina, interpretar l'anàlisi de tendències i crear un sistema de gestió d'edificis fàcil d'utilitzar i potent. La companyia es va adreçar als dispositius LoRa de Semtech i al protocol obert LoRaWAN, basada en dispositius locals com sensors de presència que s'utilitzen a les sales de reunions per obtenir un ús en temps real, sensors d'escriptori que s'utilitzen per a escriptoris i taules de sales de reunions per mesurar l'ús real, sensors de confort que s'utilitzen per mesurar CO2, soroll, temperatura, humitat i llum per portar aquesta informació als usuaris de l'oficina (i també per senyalitzar extrems), etc.

- Monitoritzar camps de golf
Calgary Recreation col·labora amb les tecnologies de la informació a la ciutat de Calgary per provar els sensors, el programari i la xarxa municipal LoRaWAN d'Internet de les coses (IoT) per determinar una solució de baix cost per fer un seguiment efectiu del ritme de joc al camp de golf Shaganappi Point. El joc lent pot disminuir l'experiència general del golf i la capacitat del camp per retenir els clients. El seguiment dels carros de golf incrustats amb els sensors basats en LoRa de Semtech proporciona informació sobre el ritme de joc i, amb informació de localització del carretó de golf en temps real, es millora l'experiència dels clients. A mesura que es detecten anomalies del ritme de joc, es poden enviar comissaris per ajudar els golfistes que necessiten ajuda

3. Escenaris i simulacions

3.1 Què tenir en compte pels diferents escenaris?

En el moment de valorar els diferents escenaris que simularem, s'ha de tenir en compte que per aconseguir comunicacions satisfactòries a grans distàncies és recomanable, i en ocasions necessari complir amb els següents requisits:

- Línia de visió: des dels nodes fins a les passarel·les hi ha d'haver una línia de visió lliure o amb pocs obstacles. Si entre punts hi ha un turó, és gairebé impossible que s'aconsegueixi comunicar aquests punts.
- Potència: és recomanable fer servir la màxima potència legal disponible, 20 dBm.

3.2 Simulador escollit

OMNeT ++ es tracta d'un framework de simulació modular d'esdeveniments discrets d'ús lliure que es fa servir per fer simulacions de models de xarxes de comunicacions. Es basa en components programats en C++ i components més complexes basats en llenguatge d'alt nivell NED (Network Description) per descriure la topologia de xarxa basat en un IDE (entorn de desenvolupament integrat) sobre Eclipse. Fa servir una llibreria de codi obert INET, la seva biblioteca estàndard més utilitzada. Té una interfície gràfica molt completa que permet modelar topologies, simular diferents escenaris i visualitzar i analitzar els resultats. Està disponible per l'àmbit acadèmic i d'investigació i per sistemes UNIX i Windows. [15]

A partir del programari base, existeixen diferents framework de simulació basats en xarxes específiques, com FLoRa, dedicat a xarxes LoRaWAN. Aquesta implementa mòduls pels nodes, portes d'enllaç i servidor de xarxa necessaris per la creació de xarxes LoRaWAN, implementant la lògica necessària i amb la possibilitat de gestionar els paràmetres de comunicació a partir d'ADR. També es basa en la capa física LoRa per les mesures de col·lisió i genera estadístiques de consum de la xarxa. D'aquesta manera es tracta de la millor opció per dur a terme les simulacions del treball i poder veure els resultats dels escenaris proposats. [16]

FLoRa té una limitació i es tracta de l'activació dels dispositius, es realitza mitjançant OTAA i considera que sempre és correcta sense errors, de manera que el procés d'autenticació no és real. Tot i així, si que es tenen en compte els temps i consums d'aquest procés.

3.3 Resultats a valorar de les simulacions

De tots els resultats que ens trobarem un cop finalitzades les simulacions dels diferents escenaris proposats, trobem que els factors més

importants a valorar seran l'escalabilitat de la xarxa i la potència consumida dels nodes.

L'escalabilitat ens indica la capacitat de connexió d'una quantitat elevada de dispositius a la xarxa sense que es vegi afectat el seu funcionament en augmentar el número de nodes. Per avaluar l'escalabilitat de la xarxa, ho farem a partir de la relació d'entrega de paquets PDR (packet delivery ratio) que és la relació entre els paquets rebuts i el total de paquets enviats:

$$PDR = \frac{\text{Paquets Rebuts}}{\text{Paquets Enviats}}$$

Si tinguéssim en compte que, en general, tots els paquets perduts es perden a conseqüència de col·lisions, l'expressió es podria aproximar de la següent manera:

$$PDR = \frac{\text{Paquets Enviats} - \text{Col·lisions}}{\text{Paquets Enviats}}$$

Tot i així, en les nostres simulacions farem servir la primera expressió ja que és la més correcta.

Referent al consum d'energia a cada node, es tracta de l'energia gastada per enviar i rebre informació a cada dispositiu de manera correcta, aspecte que varia en funció de la potència de transmissió i la duració d'aquesta.

El consum a FLoRa ve determinat per defecte amb els valors corresponents al xip SX1272/73, que farem servir als tres escenaris, on conté els valors de tensió d'alimentació dels nodes i els valors de corrent per cada estat i potència de transmissió.

El model de propagació que fem servir, ve donat per la següent expressió, on la potència rebuda pel receptor ha de ser superior a la seva sensibilitat:

$$P_r = P_t + G_t - L_t - L_{pl} + G_r - L_r$$

Podem definir la potència rebuda (P_r) com la suma de la potència transmesa (P_t), els guanys de receptor (G_r) i transmissor (G_t), restant les pèrdues de transmissió (L_t), recepció (L_r) i de trajecte (L_{pl}) (tots els valors expressats en dB). Es tracta d'un valor important ja que ens afectarà directament al PDR. Al tractar-se d'àrees grans es poden produir pèrdues degut a obtenir una potència rebuda menor a la sensibilitat del receptor, problema que es pot solventar augmentant el número de gateways. Les pèrdues de trajecte, venen definides per la següent expressió, escollida en referència a altres estudis de configuració LoRaWAN ja realitzats [16]:

$$L_{pl} = L_{pl}(d_0) + 10n \log \frac{d}{d_0} + X_\sigma$$

Tenim l'expressió definida per les pèrdues de propagació a una distància de referència d_0 , n és l'exponent de pèrdues i X_σ els esvaïments lents, que tenen en unitats logarítmiques una distribució normal de mitja 0 i variància σ^2 . La seva funció de distribució és:

$$\phi(x) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right]$$

La sigma σ es tracta de la desviació típica lognormal dels esvaïments lents, el paràmetre que ens indica la variació del senyal i la desviació de la mitja d'aquest. En funció de si ens trobem en un entorn urbà o rural, tindrem una sigma o una altra. Aquesta es considera 3.57 en entorns urbans i interiors i 7.08 en rurals. Els paràmetres de FLoRa segons el model de propagació són els següents:

Escenari	d_0 [m]	n	σ [dB]
Urbà	40	2.08	3.57
Suburbà	1000	2.32	7.08

Taula 1: Paràmetres del model de propagació

Al realitzar la distribució de paquets als diferents spreading factors de manera automàtica (ADR), aquests tenen una mida de paquet màxima, time-on-air i bitrate diferent en funció del SF en què ens trobem. Vindrà definit per la següent taula (en tots casos en l'ample de banda 125kHz i regió 868MHz europea):

Spreading Factor	Màxima mida del paquet (bytes)	Bitrate (bits/sec)	Time on air (ms)
SF7	222	5470	368.9
SF8	222	3125	655.9
SF9	115	1760	676.9
SF10	51	980	698.4
SF11	51	440	1560.6
SF12	51	250	2793.5

Taula 2: Paràmetres màxims de cada SF

Com tindrem distribució automàtica en tots els SF disponibles a les nostres simulacions, farem servir la mida màxima de paquet de 51 bytes per tots els SF, ample de banda 125kHz i amb el time on air següent:

Spreading Factor	Time on air (ms)
SF7	118
SF8	215.6
SF9	390.1
SF10	698.4
SF11	1560.6
SF12	2793.5

Taula 3: Time on air a cada SF per paquets de 51 bytes

3.4 Diferents escenaris proposats

Per realitzar unes simulacions prou diferents entre si amb una varietat de resultats que ens permeti treure les conclusions correctes respecte a la tecnologia LoRaWAN i les seves característiques, buscarem tres escenaris del següent tipus:

- Zona amb gran densitat de nodes LoRaWAN pel mateix servei
- Zona amb menys densitat de nodes LoRaWAN pel mateix servei on els nodes estiguin més dispersos
- Zona amb una densitat de nodes LoRaWAN per diferents tipus de serveis

La variació de distàncies, densitat de nodes i diferents serveis pels que estan pensades les següents xarxes, així com la seva correcta configuració pel seu òptim rendiment, ens permetran fer un anàlisi de les característiques de LoRaWAN i el seu funcionament.

Escenari de zona amb gran densitat de nodes

El primer escenari es tracta d'una obtenció en temps real de la disponibilitat de seients del teatre Victòria de Barcelona i del seu flux de gent pels seus diferents accessos a la sala. El teatre consta de 1.134 localitats, 796 a platea i 338 a l'amfiteatre, on a totes s'instal·larà un sensor de presència que ens indiqui si el seient està o no ocupat i així veure la seva disponibilitat en temps real.

Aquest consta de 3 plantes, la planta baixa on hi ha dos accessos per entrar a la zona de platea, el primer pis on es troba el bar i el segon pis on hi ha dos accessos per accedir a l'amfiteatre. Cada pis té dos accessos diferenciats (dret i esquerre) on es posaran 11 sensors a les catifes per determinar el flux de persones que té cada accés i poder així indicar al client la millor ruta per arribar a la seva localitat.

Aquesta informació serà rebuda pel gateway que es posarà a la sala, s'enviarà la informació als respectius servidors i aquesta arribarà informació a les aplicacions dels dispositius mòbils intel·ligents dels agents de la sala per dur a terme la correcta gestió de l'acomodament dels clients.

L'espai ve determinat per una amplada màxima de 30 metres i un fons màxim de 50 metres (entre sala i vestíbul), tenint així una dimensió total de l'espai de 1.500m² aproximadament.

Escenari de zona amb poca densitat de nodes i més dispersos

El segon escenari es tracta d'un seguit de sensors distribuïts per un cultiu d'arròs situat al delta de l'Ebre, de 30 hectàrees de terreny (300.000m², 500m d'ample per 600m de llarg), per poder mesurar la quantitat d'aigua que tenen els cultius (volum d'aigua) i poder així activar el reg automàtic en el moment que aquesta mesura arribi a un mínim definit de manera que s'obri el cabal d'aigua per omplir-ho fins a la quantitat desitjada.

També es realitzarà una mesura de la qualitat de l'aigua per poder intervenir en el cas que tingui algun tipus de plaga, bateria o pH incorrecte pel correcte creixement de l'arrossar.

Els sensors es distribuiran un a cada hectàrea (30 sensors en total) de manera que es pugui identificar qualsevol problema d'humitat de la parcel·la. A part de donar l'ordre al reg automàtic per tal que tingui l'aigua necessària, enviarà els diferents paràmetres registrats a una aplicació per telèfons intel·ligents on les persones responsables puguin verificar l'estat dels cultius.

Escenari de zona per nodes de diferents tipus de serveis

El tercer escenari es tracta d'un sistema per control d'habitatge intel·ligent d'una oficina, on es distribuiran diferents sensors per la seva planta de 600m² (espai de 30 metres de llarg per 20 d'ample). Els sensors estaran destinats al control d'electricitat, d'aigua, de calefacció o d'aire condicionat (segons l'època de l'any) per poder tenir un rendiment òptim dels diferents subministraments i així fer un gran estalvi en costos.

Es disposaran aquests sensors en tots els punts necessaris com endolls, llums, aixetes, lavabos, aires condicionats i radiadors de calefacció, on es posaran uns nivells i alarmes on en el moment que una de les mesures dels sensors sobrepassi un límit programat, ja sigui de temps o de la mesura que correspongui (graus, volum, potència, etc.) ens saltin al sistema centralitzat els avisos amb la possibilitat de desactivar alguns d'ells de manera remota. El número de sensors que es posaran serà de 75 sensors pel sistema d'aigua, 250 sensors pel sistema elèctric, 50 sensors pel sistema d'aire condicionat i 50 sensors pels radiadors, amb un total de 425 sensors per planta.

D'aquesta manera es podrà tenir un control en tot moment en el sistema central de l'edifici d'aquests subministraments en temps real i poder avaluar un seguit de mesures per poder fer la planta molt més eficient a nivells energètics.

3.4 Simulacions i resultats

En les diferents simulacions, es farà servir un tipus de topologia definida al seu arxiu NED corresponent, un únic arxiu XML per determinar el consum (igual a totes les simulacions) i respecte a la configuració de xarxa, ve indicada al fitxer INI i serà concreta per cada escenari. Tots els codis dels diferents fitxers, venen indicats a l'apartat d'Annexos del projecte.

3.4.1 Escenari 1: zona amb gran densitat de nodes i mateix servei

3.4.1.1 Característiques físiques de l'entorn

En el primer escenari ens trobem amb un entorn urbà de 1.500m² de dimensions 30 x 50 metres sobre el que es desplegaran un total de 1.200 nodes.

3.4.1.2 Descripció de la xarxa

El modelatge de l'escenari 1 ve determinat per un node, una porta d'enllaç i un punt d'accés. El número de components i paràmetres de

comunicació variarà per tal de tenir diferents resultats i obtenir el més adequat per aquest escenari. Es descriu el fitxer NED corresponent i la seva visualització gràfica és la següent:

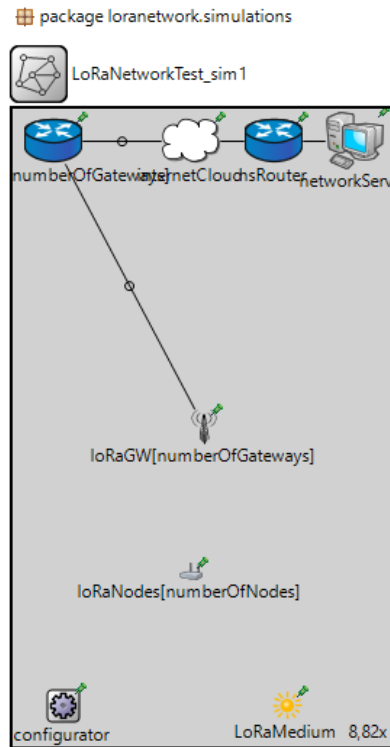


Figura 28: Configuració de topologia de xarxa escenari 1

3.4.1.3 Configuració de la xarxa i model

Al fitxer de configuració de xarxa inicial és on venen determinat els paràmetres dels components de la xarxa a partir de la seva topologia. Determinem el número de nodes indicats (1.200) i el número de portes d'enllaç que farem servir (1 o 2), la localització dels components i el número de canals actius (3, de 125kHz cadascun, el permès a Europa). Es determinaran els valors inicials dels paràmetres de transmissió i consum. El temps de simulació (4 hores) i període d'escalfament (1 dia) corresponen al temps necessari perquè la xarxa arribi a un estat d'estabilitat. Els nodes enviarn el seu primer paquet en els primers 1000 segons del temps de simulació i a partir d'aquest instant faran un enviament en els següents 120 segons, actualitzant així la informació de presència de cada seient i actualitzant la densitat de cada accés cada dos minuts. Al tractar-se d'un entorn interior, farem servir una sigma de 3.57. Els diferents spreading factors venen distribuïts per ADR a la xarxa.

En el cas de tenir un únic gateway aquest es trobarà al centre de l'escenari, en cas de tenir dos es trobaran separats equidistantment del punt central i entre ells.

La distribució dels nodes es fa en distribuïda en una graella de 30x40 en tot l'espai que tenim.

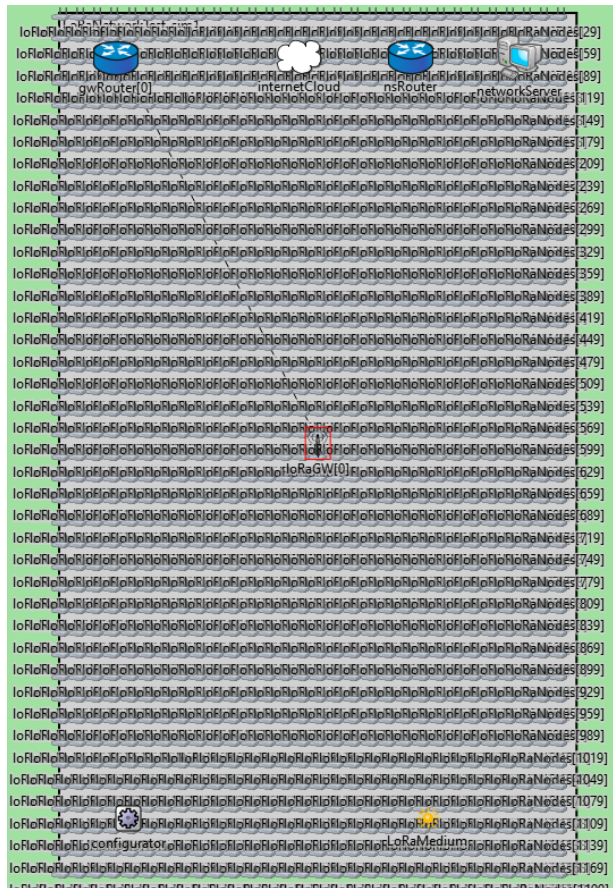


Figura 29: Model de xarxa amb un gateway

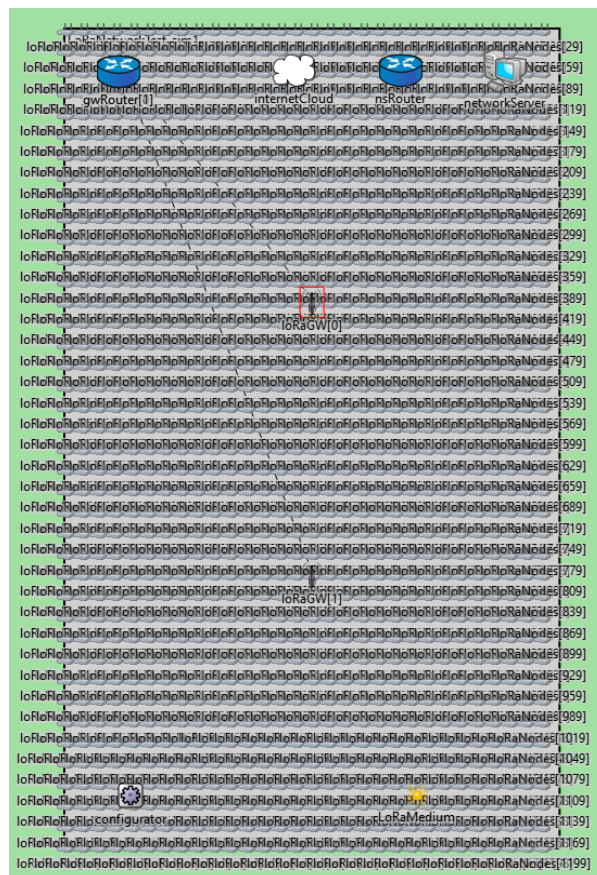


Figura 30: Model de xarxa amb dos gateways

3.4.1.4 Resultats

En aquest primer escenari ens hem trobat amb la problemàtica que el poc temps d'enviament de cada paquet des del node i la quantitat tant gran de nodes escollits, ens portava a una simulació on el servidor no rebia cap paquet i el temps real en fer la simulació era extremadament alt. D'aquesta manera, hem pogut afirmar que ens trobem amb el primer inconvenient de LoRaWAN (ja que no podem transmetre paquets en temps pràcticament real, com ja ens deia la teoria). Per poder dur a terme la simulació, hem realitzat una modificació en la quantitat de nodes, passant a distribuir 300 nodes en una graella de 15x20 (en comptes de 1.200) i el temps màxim de simulació és de 7 dies (en comptes de 4h) i el temps d'enviament de cada node de 3600s (en comptes de 120s) (un paquet cada hora, enviant un paquet abans de l'espectacle, un altre a la meitat i un altre al final). Els models de xarxa quedarien de la següent manera:

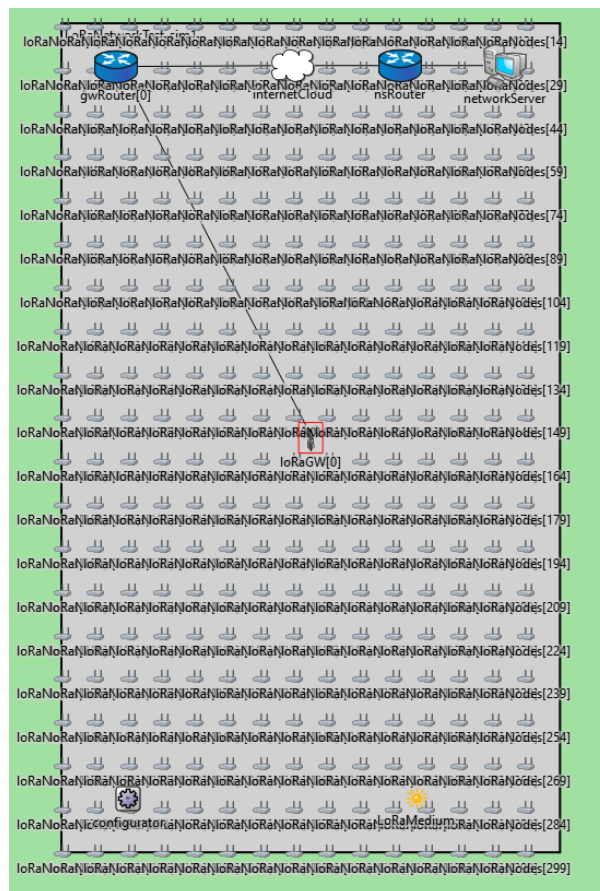


Figura 31: Model definitiu de xarxa amb un gateway

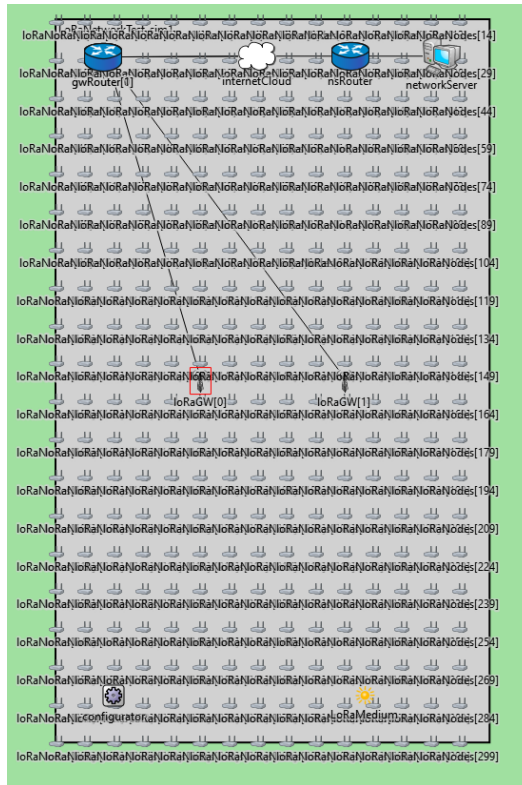


Figura 32: Model definitiu de xarxa amb dos gateways

El temps màxim de la simulació són 604.800s (7 dies que hem programat). En aquest temps de simulació obtenim els següents resultats:

- Un gateway

Primer de tot, avaluarem el número de paquets enviats, les col·lisions i els paquets rebuts per tal de calcular el PDR. Els resultats obtinguts són els següents:

Paquets enviats	Paquets rebuts	Col·lisions	PDR
43.200	36.961	6.035	85.55%

Taula 4: Dades escalabilitat simulació 1 amb un gateway

Podem observar que el número de paquets rebuts és bastant elevat obtenint així una PDR superior al 85%, molt acceptable per poder dur a terme una aplicació real de comunicació amb LoRaWAN. El número de paquets que no han arribat al gateway és de 6.239, un 14.45% dels paquets enviats.

A continuació avaluarem el consum de la xarxa als nodes i gateway durant els 7 dies del temps de simulació:

Consum màxim (J)	Consum mínim (J)	Consum mig (J)	Energia total (J)
56.18	11.79	22.37	6.711

Taula 5: Dades consum simulació 1 amb un gateway

Els paquets obtinguts als diferents spreading factors possibles distribuïts per ADR als canals actius són els següents:

SF	SF7	SF8	SF9	SF10	SF11	SF12
Núm. paquets rebuts	6.603	5.903	6.531	6.174	7.026	4.724
PDR	97.56%	95.33%	85.57%	84.06%	75.06%	80.01%

Taula 6: Paquets rebuts i PDR per cada SF simulació 1 amb un gateway

Es poden observar als resultats obtinguts que els paquets rebuts estan molt repartits per tots els SF disponibles, fent servir així els SF més baixos els nodes més propers al gateway i els SF més elevats els més llunyans.

- Dos gateways

Primer de tot, avaluarem el número de paquets enviats, les col·lisions i els paquets rebuts per tal de calcular el PDR. Els resultats obtinguts són els següents:

Paquets enviats	Paquets rebuts	Col·lisions	PDR
43.200	37.129	14.043	85.94%

Taula 7: Dades escalabilitat simulació 1 amb dos gateways

En aquest cas tenim una PDR entre els dos gateways superior al 80%. Per tant, podem indicar que ens trobem en una simulació molt propera a poder-se dur a terme en una aplicació IoT, ja que ens agradaria aconseguir un PDR del 90% o superior. Més concretament, tenim 36.056 paquets rebuts al primer gateway (PDR del 83.46%) i 35.746 paquets rebuts al segon gateway (PDR del 82.74%). En total, s'han rebut 37.129 paquets, ja sigui al primer gateway o al segon, un 85.94% dels paquets enviats. Així podem afirmar que dels 71.802 paquets que ens indica la simulació que s'han rebut en total, els 34.673 paquets restants, s'han rebut per duplicat als dos gateways (un 48.28% del total de paquets rebuts, pràcticament la meitat). El mateix passa amb les col·lisions, on una mateixa col·lisió pot ser detectada pels dos gateways a la vegada. També podem indicar que el número de paquets perduts que no arriben a cap dels dos gateways és de 6.071 paquets, un 14.05% dels paquets enviats.

A continuació avaluarem el consum de la xarxa als nodes i gateways durant els 7 dies del temps de simulació:

Consum màxim (J)	Consum mínim (J)	Consum mig (J)	Energia total (J)
60.88	11.79	21.96	6.590

Taula 8: Dades consum simulació 1 amb dos gateways

Es pot observar, que les dades de consum de la xarxa són pràcticament igual que en el cas d'un gateway. Això és degut a que el consum i

energia no depenen del modelatge, sinó de la quantitat de paquets que s'envien a cada node durant un temps determinat.

També avaluarem els paquets obtinguts als diferents spreading factors possibles distribuïts per ADR als canals actius:

SF	SF7	SF8	SF9	SF10	SF11	SF12
Núm. paquets rebuts	6.597	5.762	7.278	6.228	7.039	4.225
PDR	97.47%	93.05%	95.36%	84.8%	75.2%	71.56%

Taula 9: Paquets rebuts i PDR per cada SF simulació 1 amb dos gateways

En aquest cas veiem que els paquets que arriben al destí són també molt repartits entre tots els SF, com en el cas anterior. Això és degut a que, tot i pensar que al tenir dos gateways les pèrdues de propagació són menors i es podrien fer servir més els spreading factors més baixos, el criteri d'assignació automàtica ADR fa que assigni un spreading factor o altre al mateix canal variant la velocitat de transmissió per tal que no interfereixin entre ells i el gateway pugui rebre el màxim de paquets possibles alhora de diferents nodes i mateix canal.

A continuació analitzarem els factors principals avaluats per cada cas i els compararem entre ells.

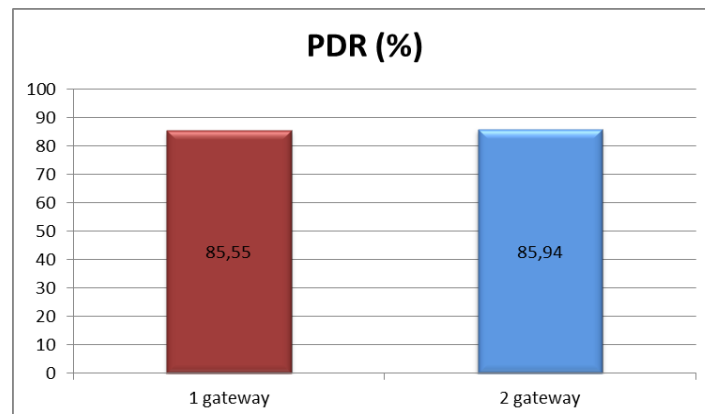


Figura 33: Gràfica comparativa PDR simulació 1

L'escalabilitat al modificar el model de xarxa és pràcticament la mateixa, ja que amb el model de dos gateways, cadascun d'ells tenen un PDR quasi igual al del model amb un únic gateway. Donat que tenim un espai reduït, les col·lisions als dos gateways estan molt correlades (és a dir, quan tenim una col·lisió a un gateway, és molt probable que també la tinguem a l'altre). De manera que podem indicar que el fet d'afegir un gateway més no modifica molt els resultats.

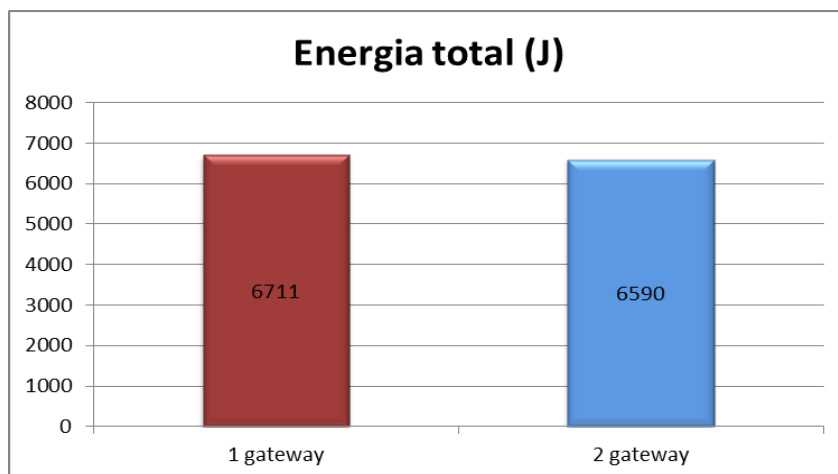


Figura 34: Comparativa d'energia total simulació 1

L'energia consumida de la xarxa en els dos casos és pràcticament la mateixa, una mica inferior en el cas de 2 gateways però pràcticament sense diferències. Això és degut a que aquesta energia és el número de paquets enviats per l'energia requerida per paquet, al enviar el mateix número de paquets, no varia el fet d'afegir un nou gateway al model de xarxa.

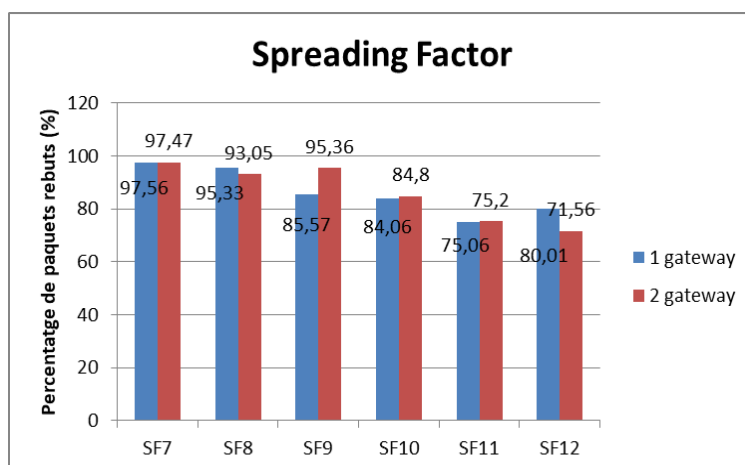


Figura 35: Comparativa de paquets rebuts per spreading factor simulació 1

Respecte als paquets rebuts en els diferents spreading factors, aquests es troben repartits de manera equitativa entre els diferents spreading factors i no s'aprecia diferència entre el model amb dos gateways i el model amb un gateway, donat que l'ADR distribueix els paquets de la millor manera per aprofitar al màxim la capacitat de la xarxa.

Podem afirmar, que en aquesta simulació seria el més correcte escollir un gateway ja que els resultats obtinguts són molt semblants i d'aquesta manera reduiríem costos i complexitat a la xarxa.

3.4.2 Escenari 2: zona amb poca densitat de nodes i mateix servei

3.4.2.1 Característiques físiques de l'entorn

En el segon escenari ens trobem amb un entorn rural de 300.000m² de dimensions 500 x 600 metres sobre el que es desplegaran un total de 30 nodes.

3.4.2.2 Descripció de la xarxa

El modelatge de l'escenari 2 ve determinat per un node, una porta d'enllaç i un punt d'accés. El número de components i paràmetres de comunicació variarà per tal de tenir diferents resultats i obtenir el més adequat per aquest escenari. Es descriu el fitxer NED corresponent i la seva visualització gràfica és la següent:

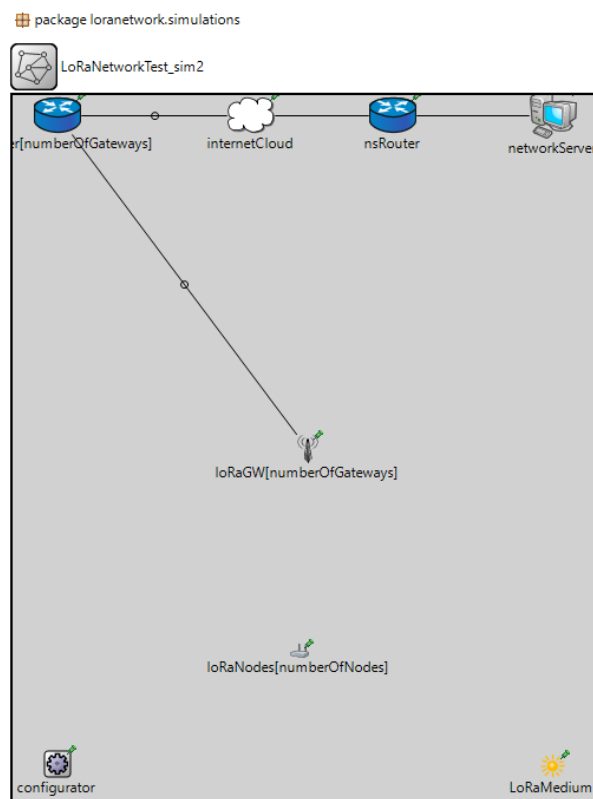


Figura 36: Configuració de topologia de xarxa escenari 2

3.4.2.3 Configuració de la xarxa i model

Al fitxer de configuració de xarxa inicial és on venen determinat els paràmetres dels components de la xarxa a partir de la seva topologia. Determinem el número de nodes indicats (30) i el número de portes d'enllaç que farem servir (1 o 2), la localització dels components i el número de canals actius (3, de 125kHz d'ample de banda cadascun). Es determinaran els valors inicials dels paràmetres de transmissió i consum. El temps de simulació (7 dies) i període d'escalfament (1 dia) corresponen al temps necessari perquè la xarxa arribi a un estat d'estabilitat. Els nodes enviaran el seu primer paquet en els

primers 100 segons del temps de simulació i a partir d'aquest instant faran un enviament en els següents 60 minuts, per actualitzar la informació dels sensors de cada hectàrea. Al tractar-se d'un entorn rural, farem servir una sigma de 7.08.

En el cas de tenir un únic gateway aquest es trobarà al centre de l'escenari, en cas de tenir dos es trobaran separats equidistantment del punt central i entre ells.

La distribució dels nodes es fa en distribuïda en una graella de 5x6 en tot l'espai que tenim.

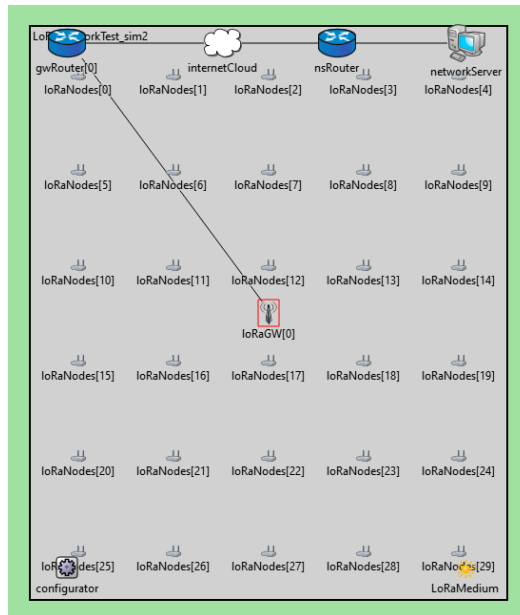


Figura 37: Model de xarxa amb un gateway

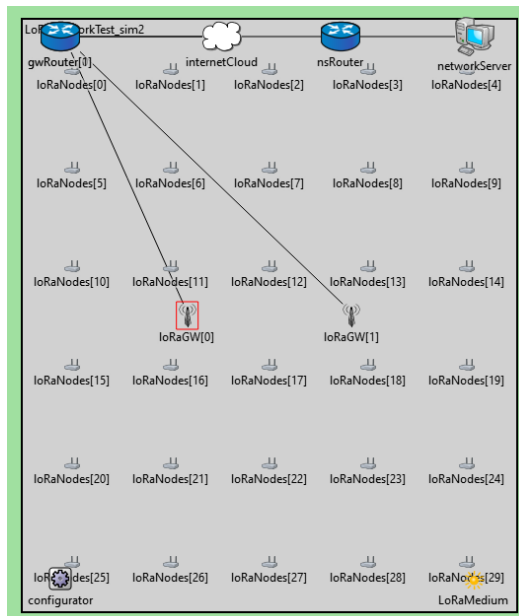


Figura 38: Model de xarxa amb dos gateways

3.4.2.4 Resultats

El temps màxim de la simulació són 604.800s (7 dies que hem programat). En aquest temps de simulació obtenim els següents resultats:

- Un gateway

Primer de tot, avaluarem el número de paquets enviats, les col·lisions i els paquets rebuts per tal de calcular el PDR. Els resultats obtinguts són els següents:

Paquets enviats	Paquets rebuts	Col·lisions	PDR
4.320	1.603	275	37.1%

Taula 10: Dades escalabilitat simulació 2 amb un gateway

Podem observar que tot i que no hi ha hagut un número elevat de col·lisions, els paquets rebuts no arriben al 40% degut a que els paquets no han arribat al seu destí per falta de potència (degut al espai elevat). El número de paquets perduts és de 2.717 paquets, un 62.89% dels paquets enviats.

A continuació avaluarem el consum de la xarxa als nodes i gateway durant els 7 dies del temps de simulació:

Consum màxim (J)	Consum mínim (J)	Consum mig (J)	Energia total (J)
41.12	11.79	19.95	598.62

Taula 11: Dades consum simulació 2 amb un gateway

També avaluarem els paquets obtinguts als diferents spreading factors possibles distribuïts per ADR als canals actius:

SF	SF7	SF8	SF9	SF10	SF11	SF12
Núm. paquets rebuts	25	179	138	411	660	190
PDR	5.78%	17.75%	31.94%	47.56%	50.92%	65.97%

Taula 12: Paquets rebuts i PDR per cada SF simulació 2 amb un gateway

La majoria dels paquets s'han rebut al SF10 i SF11, en comparació amb la resta. Això és degut a que els enviats a la resta de spreading factors, no han arribat al seu destí final a causa d'un problema de distància elevada i sensibilitat del receptor (la potència rebuda és inferior a la sensibilitat del receptor, de manera que el paquet no ha arribat al gateway). Com els spreading factors més elevats són més immunes a interferències, es veu clarament que quant més elevat el spreading factor, més percentatge de paquets han arribat al gateway en relació als paquets enviats en aquest SF.

- Dos gateways

Primer de tot, avaluarem el número de paquets enviats, les col·lisions i els paquets rebuts per tal de calcular el PDR. Els resultats obtinguts són els següents:

Paquets enviats	Paquets rebuts	Col·lisions	PDR
4.320	2.323	0	53.77%

Taula 13: Dades escalabilitat simulació 2 amb dos gateways

En aquest cas tenim una PDR entre els dos gateways que supera per poc el 50%. Tampoc tenim cap col·lisió, ni als nodes ni als gateways. Al no haver cap col·lisió, els paquets que no arriben al destí són deguts a la poca potència amb la que arriben al receptor. Més concretament, tenim 1.532 paquets rebuts al primer gateway (PDR del 35.46%) i 1.637 paquets rebuts al segon gateway (PDR del 37.89%). En total s'han rebut 2.323 paquets, ja sigui al primer gateway o al segon, un 53.77% dels paquets enviats. Així podem afirmar que dels 3.169 paquets que ens indica la simulació que s'han rebut en total, els 846 paquets restants, s'han rebut per duplicat als dos gateways (un 26.69% del total de paquets rebuts, pràcticament un terç). També podem indicar que el número de paquets perduts que no arriben a cap dels dos gateways és de 1.997 paquets, un 46.22% dels paquets enviats.

A continuació avaluarem el consum de la xarxa als nodes i gateways durant els 7 dies del temps de simulació:

Consum màxim (J)	Consum mínim (J)	Consum mig (J)	Energia total (J)
41.12	11.79	19.73	592.05

Taula 14: Dades consum simulació 2 amb dos gateways

Es pot observar, que les dades de consum de la xarxa són pràcticament igual que en el cas d'un gateway. Això és degut a que el consum i energia no depenen del modelatge, sinó de la quantitat de paquets que s'envien a cada node durant un temps determinat.

També avaluarem els paquets obtinguts als diferents spreading factors possibles distribuïts per ADR als canals actius:

SF	SF7	SF8	SF9	SF10	SF11	SF12
Núm. paquets rebuts	85	272	175	556	985	250
PDR	19.67%	26.98%	40.5%	64.35%	76%	86.8%

Taula 15: Paquets rebuts i PDR per cada SF simulació 2 amb dos gateways

En aquest cas veiem que els paquets que arriben al destí són també en el cas de SF10 i SF11 la majoria d'ells, com en el cas anterior.

Donat que els resultats obtinguts amb dos gateways no són els desitjats, desplegarem la xarxa amb sis gateways per veure si els resultats són millors i es podria desplegar la xarxa amb aquest model.

- Sis gateways

El model de xarxa amb sis gateways és el següent:

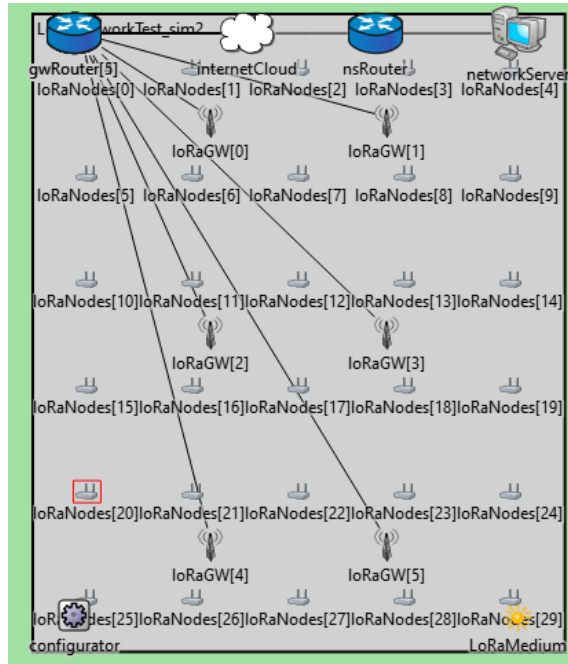


Figura 39: Model de xarxa amb sis gateways

Primer de tot, avaluarem el número de paquets enviats, les col·lisions i els paquets rebuts per tal de calcular el PDR. Els resultats obtinguts són els següents:

Paquets enviats	Paquets rebuts	Col·lisions	PDR
4.320	3.307	0	76.55%

Taula 16: Dades escalabilitat simulació 2 amb sis gateways

En aquest cas tenim una PDR entre els sis gateways superior al 75%, que ja ens indica que la xarxa està millor dimensionada. Tampoc tenim cap col·lisió, ni als nodes ni als gateways. Més concretament, tenim 1.348 paquets rebuts al primer gateway (PDR del 31.2%), 1.279 paquets rebuts al segon gateway (PDR del 29.6%), 1.518 paquets rebuts al tercer gateway (PDR del 35.13%), 1.670 paquets rebuts al quart gateway (PDR del 38.65%), 1.394 paquets rebuts al cinquè gateway (PDR del 32.26%) i 1.400 paquets rebuts al sisè gateway (PDR del 32.4%). En total s'han rebut 3.307 paquets, ja sigui al primer gateway, al segon, al tercer, al quart, al cinquè o al sisè, un 76.55% dels paquets enviats. Així podem afirmar que dels 8.609 paquets que ens indica la simulació que s'han rebut en total, els 5.302 paquets restants, s'han rebut per duplicat a diferents gateways (un 61.58% del total de paquets rebuts). També podem indicar que el número de paquets perduts que no

arriben a cap dels dos gateways és de 1.013 paquets, un 23.44% dels paquets enviats.

A continuació avaluarem el consum de la xarxa als nodes i gateways durant els 7 dies del temps de simulació:

Consum màxim (J)	Consum mínim (J)	Consum mig (J)	Energia total (J)
41.61	11.79	19.51	585.42

Taula 17: Dades consum simulació 2 amb sis gateways

Es pot observar, que les dades de consum de la xarxa són pràcticament igual que en el cas d'un gateway. Això és degut a que el consum i energia no depenen del modelatge, sinó de la quantitat de paquets que s'envien a cada node durant un temps determinat.

També avaluarem els paquets obtinguts als diferents spreading factors possibles distribuïts per ADR als canals actius:

SF	SF7	SF8	SF9	SF10	SF11	SF12
Núm. paquets rebuts	190	555	264	781	1229	288
PDR	43.98%	55.06%	61.11%	90.39%	94.83%	100%

Taula 18: Paquets rebuts i PDR per cada SF simulació 2 amb sis gateways

En aquest cas veiem que els paquets que arriben al destí són també en el cas de SF10 i SF11 la majoria d'ells, com en el cas anterior.

A continuació analitzarem els factors principals avaluats per cada cas i els compararem entre ells.

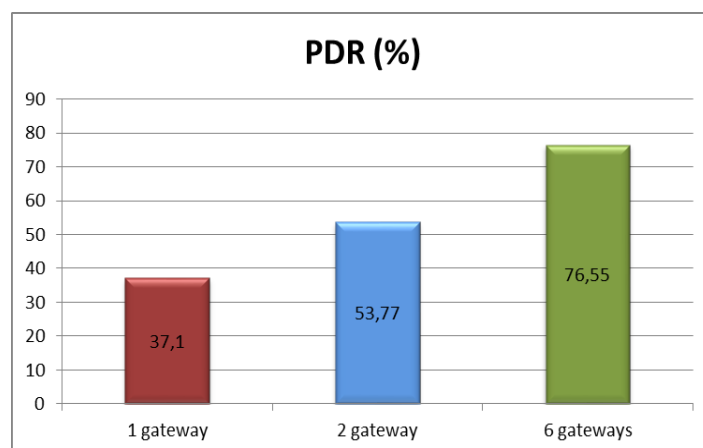


Figura 40: Gràfica comparativa PDR simulació 2

L'escalabilitat al modificar el model de xarxa és bastant superior, millorant el PDR a mesura que augmentem el número de gateways. Donat que tenim un espai molt gran, les col·lisions als gateways estan incorrelades (no té relació les col·lisions a un gateway amb les col·lisions als altres gateways, en

aquest cas no hi ha col·lisions directament). Es pot observar doncs, que les pèrdues són degudes a problemes de cobertura principalment. Així veiem que afegir fins a sis gateways afecta favorablement als resultats desitjats.

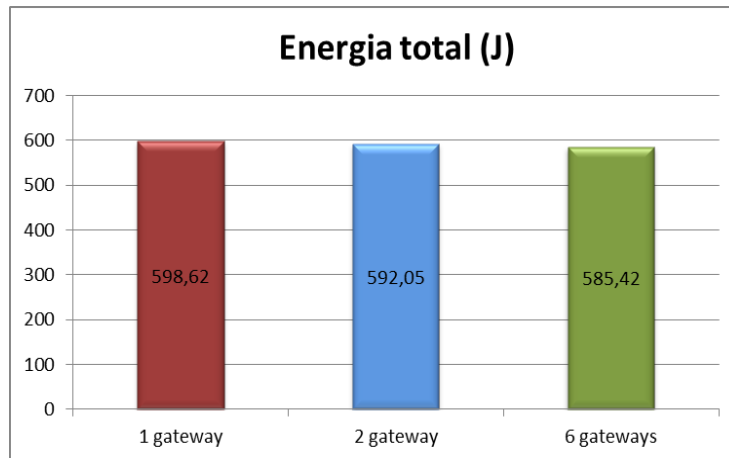


Figura 41: Comparativa d'energia total simulació 2

L'energia consumida de la xarxa en els tres casos és pràcticament la mateixa, una mica inferior a mesura que anem augmentant gateways però pràcticament sense diferències, com en el cas de la simulació anterior.

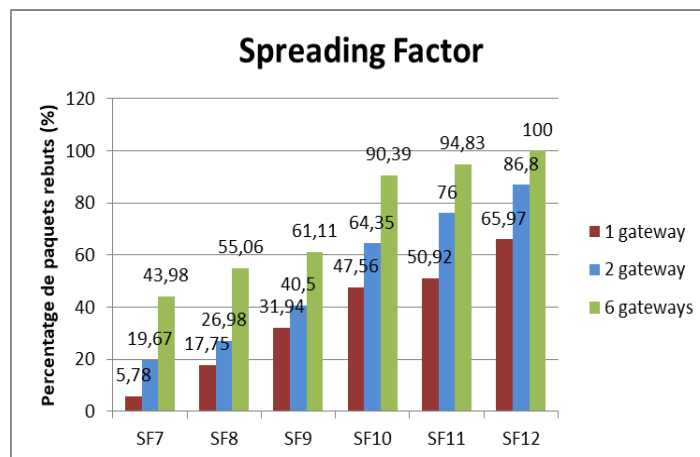


Figura 42: Comparativa de paquets rebuts per spreading factor simulació 2

Respecte als paquets rebuts en els diferents spreading factors podem observar que a mesura que augmentem els gateways el percentatge de paquets rebuts en relació als enviats als diferents spreading factors és bastant superior. També que augmenten els paquets rebuts a mesura que augmentem el spreading factor en els tres casos.

Podem afirmar, que en aquesta simulació seria el més correcte escollir sis gateways ja que els paquets rebuts són superiors i els percentatge de paquets rebuts en relació als enviats a cada spreading factor també és bastant més elevat.

3.4.3 Escenari 3: zona amb gran densitat de nodes i diferents serveis

3.4.3.1 Característiques físiques de l'entorn

En el tercer escenari ens trobem amb un entorn urbà de 600m² de dimensions 30 x 20 metres sobre el que es desplegaran un total de 425 nodes.

3.4.3.2 Descripció de la xarxa

El modelatge de l'escenari 3 ve determinat per un node, una porta d'enllaç i un punt d'accés. El número de components i paràmetres de comunicació variarà per tal de tenir diferents resultats i obtenir el més adequat per aquest escenari. Es descriu el fitxer NED corresponent i la seva visualització gràfica és la següent:

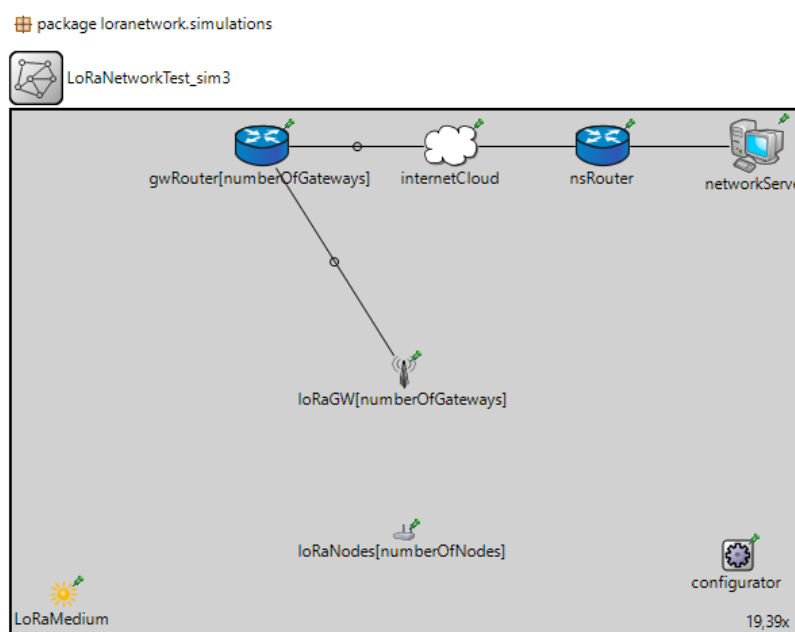


Figura 43: Configuració de topologia de xarxa escenari 3

3.4.3.3 Configuració de la xarxa i model

Al fitxer de configuració de xarxa inicial és on venen determinat els paràmetres dels components de la xarxa a partir de la seva topologia. Determinem el número de nodes indicats (425) i el número de portes d'enllaç que farem servir (1 o 2), la localització dels components i el número de canals actius (3, de 125kHz cadascun). Es determinaran els valors inicials dels paràmetres de transmissió i consum. El temps de simulació (2 dies) i període d'escalfament (1 dia) corresponen al temps necessari perquè la xarxa arribi a un estat d'estabilitat. El primer paquet s'envia en els primer 100 segons de simulació i a partir d'aquest instant s'envien els següents paquets cada 300 segons (5 minuts). Al tractar-se d'un entorn interior, farem servir una sigma de 3.57.

En el cas de tenir un únic gateway aquest es trobarà al centre de l'escenari, en cas de tenir dos es trobaran separats equidistantment del punt central i entre ells.

La distribució dels nodes es fa de forma aleatòria en tot l'espai que tenim.

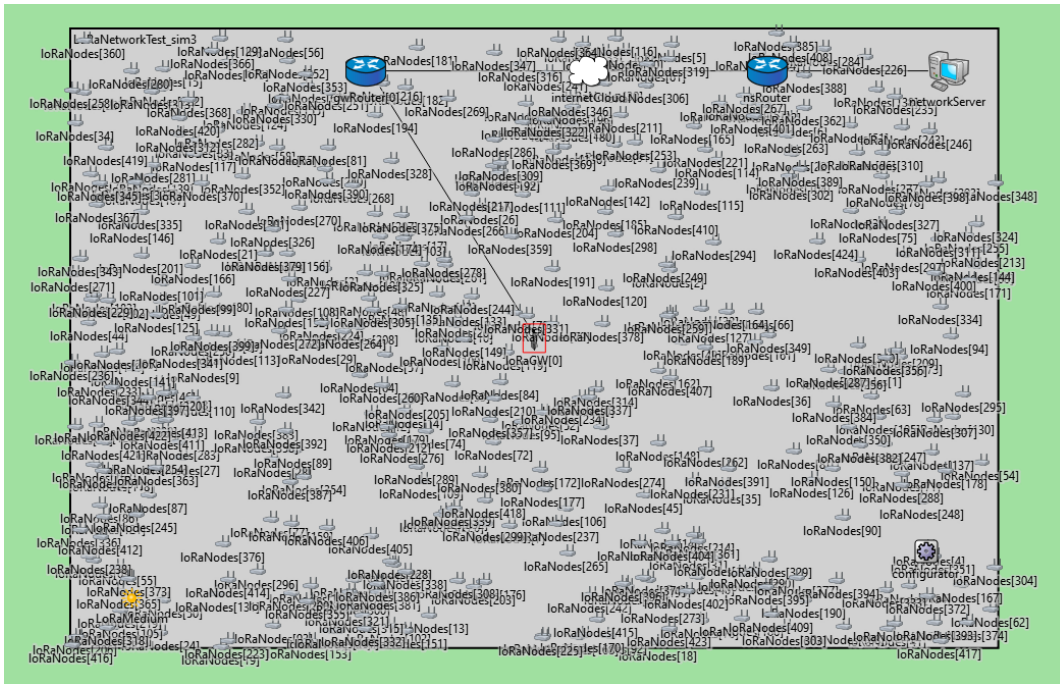


Figura 44: Model de xarxa amb un gateway

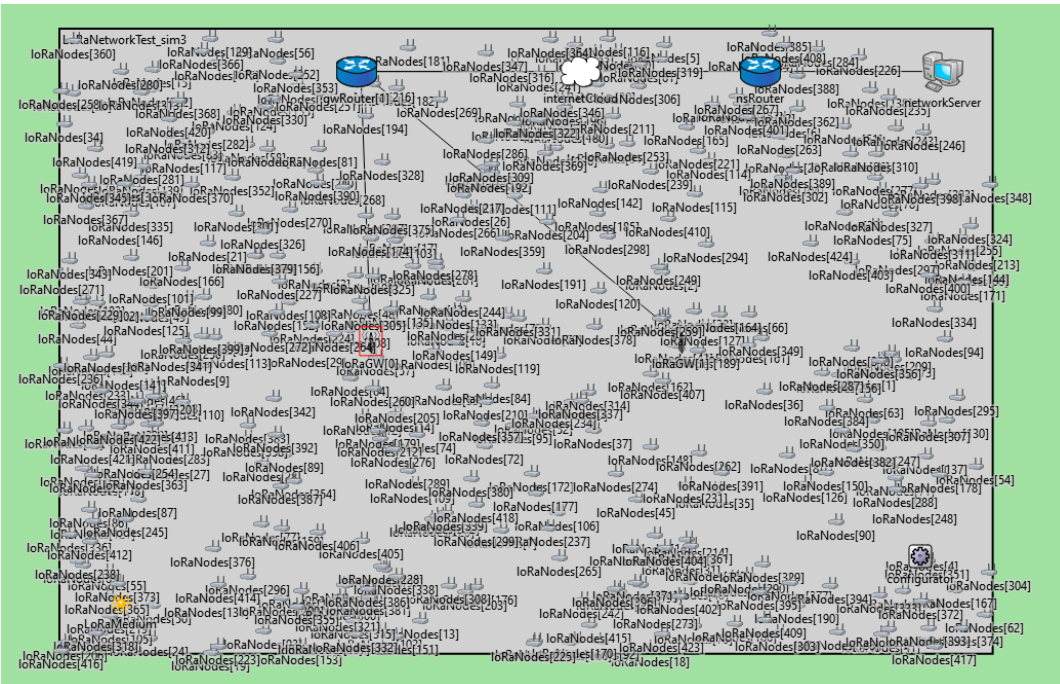


Figura 45: Model de xarxa amb dos gateways

3.4.3.4 Resultats

El temps màxim de la simulació són 172.800s (2 dies que hem programat). En aquest temps de simulació obtenim els següents resultats:

- Un gateway

Primer de tot, avaluarem el número de paquets enviats, les col·lisions i els paquets rebuts per tal de calcular el PDR. Els resultats obtinguts són els següents:

Paquets enviats	Paquets rebuts	Col·lisions	PDR
122.400	93.098	29.277	76.06%

Taula 19: Dades escalabilitat simulació 3 amb un gateway

Podem observar que el PDR és superior al 75%, de manera que podem indicar que el número de paquets rebuts és bo tot i que no suficient per fer-lo servir en aplicacions IoT (on podríem aplicar una xarxa a partir del 90% de PDR o superior, en funció de l'aplicació). El número de paquets perduts és de 29.302, un 23.9% dels paquets enviats.

A continuació avaluarem el consum de la xarxa als nodes i gateway durant els 2 dies del temps de simulació:

Consum màxim (J)	Consum mínim (J)	Consum mig (J)	Energia total (J)
205.98	40.36	77.48	32.932,17

Taula 20: Dades consum simulació 3 amb un gateway

Es pot observar, que les dades de consum de la xarxa són aproximadament el doble que en el cas anterior respecte al consum mig. Tot i així, no són molt elevades amb el considerable número de nodes que tenim.

També avaluarem els paquets obtinguts als diferents spreading factors possibles distribuïts per ADR al canal actiu:

SF	SF7	SF8	SF9	SF10	SF11	SF12
Núm. paquets rebuts	19.378	20.46	14.068	16.172	11.951	11.068
PDR	97.51%	94.72%	74.01%	73.88%	59.28%	55.69%

Taula 21: Paquets rebuts i PDR per cada SF simulació 3 amb un gateway

La majoria dels paquets en aquest cas s'han enviat al SF7 i SF8, però de manera més equitativa a la resta de spreading factors. Això és degut a la poca distància en què es troben els nodes fins al gateway i d'aquesta manera arriben amb més velocitat i fent un ús del canal durant menys temps. Els paquets rebuts als spreading factors inferiors són majors en relació als enviats que no pas els que s'envien als SF superiors, ja que tenen menys time on air i tenen menys probabilitats de col·lisionar.

- Dos gateways

Primer de tot, avaluarem el número de paquets enviats, les col·lisions i els paquets rebuts per tal de calcular el PDR. Els resultats obtinguts són els següents:

Paquets enviats	Paquets rebuts	Col·lisions	PDR
122.400	97.787	60.099	79.89%

Taula 22: Dades escalabilitat simulació 3 amb dos gateways

En aquest cas tenim 92.691 paquets rebuts al primer gateway (PDR del 75.72%) i 91.847 paquets rebuts al segon gateway (PDR del 75.03%). El total de paquets rebuts és de 97.787, ja sigui al primer gateway, al segon o a tots dos, un 79.89% dels paquets enviats. Així podem afirmar que els 86.751 paquets restants s'han rebut per duplicat als dos gateways (un 47% dels paquets rebuts, casi la meitat). El número de paquets perduts són 24.613, un 20.1% dels paquets enviats no arriben a cap dels dos gateways, ja sigui per col·lisions o per falta de cobertura. Respecte a les col·lisions, com en el cas de la simulació 1, una mateixa col·lisió pot ser detectada pels dos gateways a la vegada, per això tenim un número tant elevat.

A continuació avaluarem el consum de la xarxa als nodes i gateways durant els 2 dies del temps de simulació:

Consum màxim (J)	Consum mínim (J)	Consum mig (J)	Energia total (J)
229.78	40.43	78.24	33.255,02

Taula 23: Dades consum simulació 3 amb dos gateways

Es pot observar, que les dades de consum de la xarxa són pràcticament igual que en el cas d'un gateway. Això és degut a que el consum i energia no depenen del modelatge, sinó de la quantitat de paquets que s'envien a cada node durant un temps determinat.

També avaluarem els paquets obtinguts als diferents spreading factors possibles distribuïts per ADR al canal actiu:

SF	SF7	SF8	SF9	SF10	SF11	SF12
Núm. paquets rebuts	18.667	20.009	16.934	17.775	13.265	11.137
PDR	93.93%	92.63%	89.08%	81.20%	65.78%	56.04%

Taula 24: Paquets rebuts i PDR per cada SF simulació 3 amb dos gateways

En aquest cas veiem que els paquets que arriben al destí són també en el cas de SF7 i SF8 majoritàriament, com en el cas anterior.

A continuació analitzarem els factors principals avaluats per cada cas i els compararem entre ells.

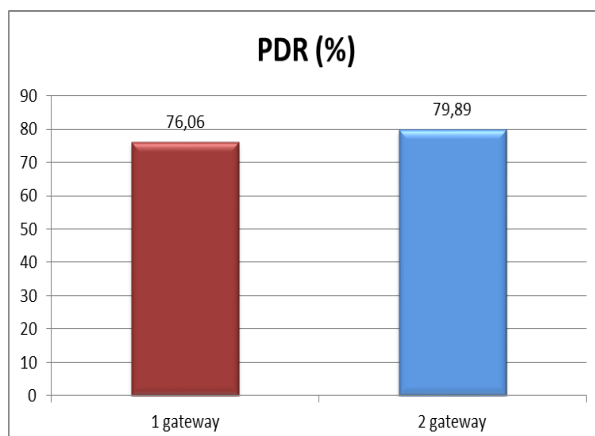


Figura 46: Gràfica comparativa PDR simulació 3

L'augment d'escalabilitat de la xarxa és una mica superior que amb el model d'un únic gateway. Com en el cas de la primera simulació, ens trobem amb col·lisions correlades degut al poc espai en relació amb el número de nodes. En aquest cas, ens quedaríem amb la opció de dos gateways tot i augmentar en costos i complexitat de la xarxa, ja que l'augment és considerable per una aplicació IoT.

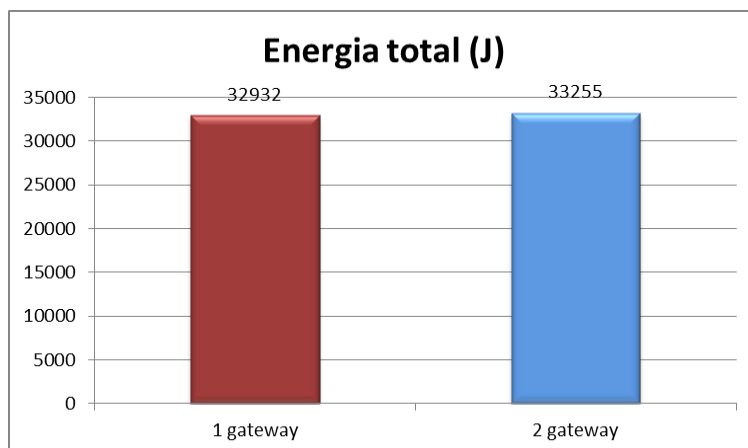


Figura 47: Comparativa d'energia total simulació 3

L'energia consumida de la xarxa en els dos casos és pràcticament la mateixa, una mica superior en el cas de 2 gateways però pràcticament sense diferències, no afecta la modificació en aquest cas.

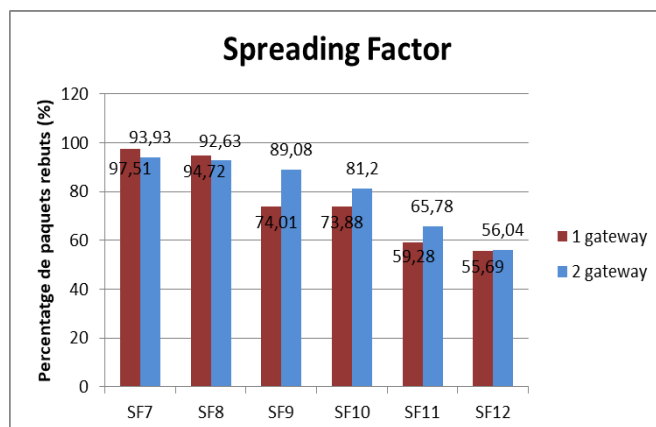


Figura 48: Comparativa de paquets rebuts per spreading factor simulació 3

Respecte als paquets rebuts en els diferents spreading factors, aquests es centren tant amb un com dos gateways en els spreading factors 7 i 8, tot i així no hi ha molta diferència amb el model d'un gateway ja que estan prou compensats. L'ADR distribueix els paquets de la millor forma en funció de la potència rebuda, distribuint els SF per poder transmetre el màxim possible alhora.

Podem afirmar, que en aquesta simulació seria el més correcte escollir dos gateways ja que tot i que els resultats són més o menys semblants, milloren una mica els resultats obtinguts per tant ens quedaríem en aquesta opció.

4. Conclusions

Un cop fet l'estudi inicial de les xarxes sense fils d'àrea ampla i baix consum hem analitzat les seves característiques i la seva evolució, valorant les diferents opcions que teníem disponibles amb els seus avantatges i inconvenients, i escollint finalment LoRaWAN degut a les seves prestacions en comparació amb els seus competidors i pels escenaris que volíem analitzar. En el nostre cas, necessitàvem una xarxa amb possibilitat d'assolir un gran abast amb baixa potència per una llarga durada de les bateries dels dispositius, renunciant a baixes latències i qualitat extrema del seu servei. La seva implantació, el cost i la llarga durada de les bateries ens van portar a escollir LoRaWAN davant SigFox o Weightless, entre d'altres.

Ja escollida la tecnologia i analitzat en profunditat les seves característiques, hem realitzat diferents simulacions amb diferents escenaris variant el número de nodes, l'àrea, la distribució dels diferents nodes, els serveis oferts (canals) i l'àrea urbana o rural, obtenint diferents resultats que ens ajudessin a poder analitzar LoRaWAN més concretament. Hem fet dues valoracions a cada escenari amb un i dos gateways que ens han fet obtenir característiques de la tecnologia.

Podem concloure un cop realitzades les simulacions, que l'escalabilitat de la xarxa és semblant en el cas de les àrees urbanes amb un i dos gateways (en petites dimensions) i augmenta molt considerablement al afegir un segon gateway en el cas d'àrees rurals amb nodes molt dispersos entre ells i àrea més gran.

També hem vist que el consum d'energia no es veu afectat per les modificacions del model de xarxa (nodes, gateways) ni pel tipus d'àrea (més gran, més petita), mantenint-se sempre igual en les diferents simulacions. Això és degut a que el consum només varia en funció del número de paquets enviats i el temps que estiguem enviant paquets.

En el cas de les col·lisions, són molt superiors en el cas d'afegir un segon gateway ja que els nodes envien paquets als gateways disponibles i les col·lisions es poden arribar a duplicar, però també millora la recepció de paquets al tenir més possibilitats d'arribar al seu destí final.

Respecte als diferents spreading factors, hem observat que quan ens trobem amb una quantitat elevada de nodes en poc espai es fan servir els SF inferiors ja que es troben menys temps ocupant la comunicació i no és necessari que siguin molt robustos a interferències al trobar-se més a prop i els SF superiors es fan servir en els casos de tenir nodes molt llunyans per poder així tenir més resistència a interferències i tenir més possibilitats d'arribar al seu destí final.

D'aquesta manera podem resumir que la tecnologia LoRaWAN és possible en aplicacions IoT que no necessitin un enviament constant d'informació a baixa latència i que necessitin una àmplia cobertura amb dispositius que tinguin una bateria que pugui durar molts anys, per reduir

la seva simplicitat de xarxa i eficàcia. Haurem d'analitzar prèviament el nostre escenari per poder decidir sobre el número de nodes, gateways, canals i àrea, i poder tenir el model i topologia de xarxa més correcte per cada cas.

Els objectius que volíem dur a terme a l'inici d'aquest projecte s'han conclòs de forma satisfactòria, realitzant l'anàlisi en profunditat de la tecnologia i extraient les característiques gràcies a les simulacions dels escenaris prou diferents entre ells per analitzar-ho.

Pel que fa a la planificació i metodologia seguits, s'han produït alguns retards en el moment de l'anàlisi en profunditat de les característiques i de la realització de les simulacions a FLoRa, degut al desconeixement del programari OMNeT++ i a certs anàlisis de massa alt nivell en alguns punts.

Com a línies de treball futur, caldria una millora del programa FLoRa pel que fa a realització de simulacions amb més nodes sense que això suposi un temps de simulació real molt elevat, i la possible implantació d'algun dels escenaris a la vida real.

5. Glossari

ABP Activació per personalització (Activation by Personalization). Forma d'activació d'un dispositiu vinculant-lo a una xarxa evitant el procediment de sol·licitud-acceptació d'unió.

ADR Velocitat de dades adaptativa (Adaptative Data Rate). Mecanisme per optimitzar les velocitats de transmissió de dades i el consum d'energia a la xarxa.

AES Estàndard de xifratge avançat (Advanced Encryption Standard). Esquema de xifratge per blocs adaptat com un estàndard de xifratge pel govern dels Estats Units.

BW Ample de banda (Bandwith). Mesura de dades i recursos de comunicació disponible o consumida expressada en bit/s o múltiples.

CR Taxa de codificació (Coding Rate). Es refereix a la proporció de bits transmesos que realment transporten informació.

CSS Modulació d'espectre eixamplat de chirp (Chirp Spread Spectrum). Tècnica de modulació d'espectre eixamplat que utilitza polsos de chirp modulats de freqüència lineal de banda ampla per codificar informació.

DSSS Espectre eixamplat per seqüència directa (Direct Sequence Spread Spectrum) Mètode de codificació de canal prèvia modulació en espectre eixamplat per transmissió de senyals digitals en què es base el CSS.

ETSI Institut Europeu de Normes de Telecomunicacions (European Telecommunications Standards Institute) Organització de normalització independent d'Europa

FCC Comissió Federal de Comunicacions (Federal Communications Commission) Agència estatal independent dels Estats Units encarregada de la regulació de telecomunicacions interestatals i internacionals.

FEC Correcció d'errors cap endavant (Forward Error Correction) Tipus de mecanisme de correcció d'errors que permet la seva correcció al receptor sense retransmetre la informació original.

FLoRa Framework basat en OMNeT++ per realitzar simulacions d'extrem a extrem per xarxes LoRa.

Gp Guany de processament. Relació logarítmica de la velocitat de chirp de la seqüència de codis i la velocitat de bits del senyal de dades.

IDE Entorn de desenvolupament integrat (Integrated Development Environment) Aplicació informàtica que proporciona serveis integrals per facilitar al programador el desenvolupament de software.

IoT Internet de les coses (Internet of Things) Concepte referit a la interconnexió digital d'objectes quotidians amb internet.

IP Protocol d'internet (Internet protocol) Conjunt de números que identifica a una interfície a la xarxa d'un dispositiu que correspongui al nivell de xarxa del model TCP/IP.

ISM Bandes de ràdio industrials, científiques i mèdiques (Industrial, Scientific, Medical) Reservades internacionalment per l'ús d'energia de radiofreqüència.

LoRa Llarg abast (Long Range) Tecnologia capa física sense fils que fa servir modulació CSS que estableix com diferents dispositius de baixa potència es comuniquen entre ells.

LoRaWAN Tecnologia d'accés al medi sense fils per xarxes tipus estrella basada en LoRa que proporciona serveis d'autenticació, xifratge i velocitat adaptativa.

LPWAN Xarxa d'àrea àmplia i baixa potència (Low Power Wide Area Network) Tecnologies de comunicació sense fils que permeten transmetre dades entre un dispositiu i una estació base separats per varis quilòmetres amb un baix consum energètic.

LTE Evolució a llarg termini (Long Term Evolution) Estàndard per comunicacions sense fils de transmissió de dades a alta velocitat per telèfons mòbils i terminals de dades.

M2M Màquina a màquina (Machine to machine) Concepte genèric referit a l'intercanvi d'informació o comunicació de dades entre dues màquines remotes.

MAC Control d'accés al medi (Media Access Control) Conjunt de mecanismes i protocols de comunicacions a través del que varis interlocutors comparteixen un medi de transmissió comú.

NED Descripció de xarxa (Network Description) Arxiu d'alt nivell per descriure la topologia de la xarxa a OMNeT++.

PDR Relació d'entrega de paquets (Packet Delivery Ratio) Relació entre els missatgers rebuts i els missatges transmesos durant un període de temps.

OMNeT ++ Simulador modular d'esdeveniments discrets de xarxes orientada a objectes que es fa servir per modelar el tràfic de xarxes de telecomunicacions.

OSI Model d'interconnexió de sistemes oberts (Open System Interconnection) Model de referència pels protocols de xarxa creat per l'Organització Internacional de Normalització.

OTAA Activació a través de l'aire (Over the Air Activation) Procés d'activació d'un dispositiu final on han de seguir un procediment de participació abans de participar en intercanvis de dades amb un servidor de xarxa.

P2P Xarxa entre parells (Peer to peer) Xarxa d'ordinadors a la que tots o alguns aspectes funcionen sense clients ni servidors fixes, tractant-se d'un conjunt de nodes que són iguals entre si.

QoS Qualitat del servei (Quality of service) Rendiment promig d'una xarxa de telecomunicacions, particularment el rendiment vist pels usuaris de la xarxa.

RSSI Indicador de força de la senyal rebuda (Received Signal Strength Indicator) Escala de referència per mesurar el nivell de potència de les senyals rebudes per un dispositiu a una xarxa sense fils.

SF Factor d'eixamplament (Spreading Factor) Defineix el nombre de bits usats per codificar un símbol.

SNR Relació senyal-soroll (Signal to noise ratio) Proporció existent entre la potència de la senyal transmesa i la potència del soroll.

6. Bibliografia

- [1] *Què es LoRaWAN*. LoRa Alliance (2015) [en línia]. [Data de consulta: 25 d'octubre del 2020] Disponible a: <<https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>>
- [2] *Xarxes LPWAN: quin és el seu grau de desenvolupament?* Matooma (2019) [en línia]. [Data de consulta: 22 d'octubre del 2020] Disponible a: <<https://www.matooma.com/es/informarse/noticias-iot-m2m/redes-lpwan>>
- [3] *Sobre LoRa Alliance*. LoRa Alliance (2015). [en línia]. [Data de consulta: 25 d'octubre del 2020] Disponible a: <<https://lora-alliance.org/about-lora-alliance>>
- [4] *Perquè LoRa?* Semtech (2018) [en línia]. [Data de consulta: 25 d'octubre del 2020] Disponible a: <<https://www.semtech.com/lora/why-lora>>
- [5] *Estat de l'art de solucions LPWAN per serveis industrials IoT*. NCBI (National Center for Biotechnology Information) (2016) [en línia]. [Data de consulta: 8 de novembre del 2020] Disponible a: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4883399/>>
- [6] *Els operadors tenen com a objectiu aixafar LoRa, Sigfox i altres*. Austin Startups (2016) [en línia]. [Data de consulta: 9 de novembre del 2020] Disponible a: <<https://austinstartups.com/carriers-aim-to-crush-lora-sigfox-and-others-4d38adc8cc32>>
- [7] *LoRa Alliance llança l'especificació LoRaWAN TS1-1.0.4; Simplifica el desenvolupament, el desplegament i la interoperabilitat*. LoRa Alliance (2020) [en línia]. [Data de consulta: 3 de novembre del 2020] Disponible a: <<https://lora-alliance.org/in-the-news/lora-alliancer-releases-lorawan-ts1-104-specification-simplifies-development>>
- [8] *LoRa i LoRaWAN: resum tècnic*. Semtech LoRa (2020) [en línia]. [Data de consulta: 8 de novembre del 2020] Disponible a: <<https://lora-developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>>
- [9] *LoRaWAN i LoRa*. LoRaWAN (2017) [en línia]. [Data de consulta: 4 d'octubre del 2020] Disponible a: <<https://lorawan.es>>
- [10] *LoRaWAN és segur (però la implementació importa)*. LoRa Alliance (2020) [en línia]. [Data de consulta: 18 d'octubre del 2020] Disponible a: <<https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawan-secure-implementation-matters>>
- [11] *El protocol LoRaWAN*. AlfaloT (2019) [en línia]. [Data de consulta: 5 d'octubre del 2020] Disponible a: <<https://alfaiot.com//blog/ultimas-noticias-2/post/el-protocolo-lorawan-6>>
- [12] *Especificació de LoRaWAN 1.0*. LoRa Alliance (2015) [en línia]. [Data de consulta: 1 de novembre del 2020] Disponible a: <<https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawan-specification-v10>>
- [13] *Paquet d'especificacions de LoRaWAN 1.0.4*. LoRa Alliance (2020) [en línia]. [Data de consulta: 1 de novembre del 2020] Disponible a: <<https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawan-104-specification-package>>
- [14] *LoRaWAN: la tecnologia que pot impulsar Internet de les Coses*. Orange Business (2018) [en línia]. [Data de consulta: 3 de novembre del 2020] Disponible a: <<https://www.orange-business.com/es/blogs/lorawan-tecnologia-que-puede-impulsar-internet-las-cosas>>

- [15] *Manual de simulació OMNeT ++*. OMNeT ++ (2019) [en línia]. [Data de consulta: 29 de novembre del 2020] Disponible a:
<<https://doc.omnetpp.org/omnetpp/manual/>>
- [16] *FLoRa*. FLoRa (2017) [en línia]. [Data de consulta: 1 de desembre del 2020] Disponible a:
<<https://flora.aalto.fi/download/slabicki2018adaptive.pdf>>
- [17] *Estàndard ETSI EN 300 220-2 v.3.2.1*. ETSI (2018) [en línia]. [Data de consulta: 8 de desembre del 2020] Disponible a:
<https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022002/03.02.01_60/en_30022002v030201p.pdf>

7. Annexos

A. Fitxer XML amb paràmetres de consum d'energia

energyConsumptionParameters.xml

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<root>
  <supplyVoltage value="3.3"/>
  <receiverReceivingSupplyCurrent value="9.7"/>
  <receiverBusySupplyCurrent value="9.7"/>
  <idleSupplyCurrent value="0.0001"/>
  <txSupplyCurrents>
    <txSupplyCurrent txPower="2" supplyCurrent="24"/>
    <txSupplyCurrent txPower="3" supplyCurrent="24"/>
    <txSupplyCurrent txPower="4" supplyCurrent="24"/>
    <txSupplyCurrent txPower="5" supplyCurrent="25"/>
    <txSupplyCurrent txPower="6" supplyCurrent="25"/>
    <txSupplyCurrent txPower="7" supplyCurrent="25"/>
    <txSupplyCurrent txPower="8" supplyCurrent="25"/>
    <txSupplyCurrent txPower="9" supplyCurrent="26"/>
    <txSupplyCurrent txPower="10" supplyCurrent="31"/>
    <txSupplyCurrent txPower="11" supplyCurrent="32"/>
    <txSupplyCurrent txPower="12" supplyCurrent="34"/>
    <txSupplyCurrent txPower="13" supplyCurrent="35"/>
    <txSupplyCurrent txPower="14" supplyCurrent="44"/>
  </txSupplyCurrents>
</root>
```

B. Codi de simulació 1

B.a Codi de descripció de topologia de xarxa

package_sim1.ned

```
package loranetwork.simulations;

import inet.applications.udpapp.UDPBasicApp;
import inet.node.inet.Router;
import inet.node.internetcloud.InternetCloud;
import loranetwork.LoRaPhy.LoRaMedium;
import loranetwork.LoraNode.LoRaNode;
import loranetwork.LoraNode.LoRaGW;
import inet.node.inet.StandardHost;
import inet.networklayer.configurator.ipv4.IPv4NetworkConfigurator;
import inet.node.ethernet.Eth1G;

@license(LGPL);
network LoRaNetworkTest_sim1
{
  parameters:
    int numberOfNodes = default(1);
    int numberOfGateways = default(1);
    int networkSizeX = default(30);
    int networkSizeY = default(50);
}
```

```

        @display("bgb=30,50");
    submodules:
        loRaNodes[numberOfNodes]: LoRaNode {
            @display("p=13.940001,36.266666");
        }
        loRaGW[numberOfGateways]: LoRaGW {
            @display("p=15,25;is=s");
        }
        LoRaMedium: LoRaMedium {
            @display("p=21.42,46.806667");
        }
        networkServer: StandardHost {
            parameters:
                @display("p=26.746668,2.4933333");
        }
        configurator: IPv4NetworkConfigurator {
            parameters:
                assignDisjunctSubnetAddresses = false;
                @display("p=3.9666667,46.806667");
        }
        internetCloud: InternetCloud {
            @display("p=13.940001,2.4933333");
        }
        gwRouter[numberOfGateways]: Router {
            @display("p=3.23,2.55");
        }
        nsRouter: Router {
            @display("p=20.4,2.4933333");
        }
    connections:
        networkServer.ethg++ <--> Eth1G <--> nsRouter.ethg++;
        nsRouter.pppg++ <--> Eth1G <--> internetCloud.pppg++;
        for i=0..numberOfGateways-1 {
            internetCloud.pppg++ <--> Eth1G <--> gwRouter[i].pppg++;
            gwRouter[i].ethg++ <--> Eth1G <--> loRaGW[i].ethg++;
        }
}

```

B.b Arxiu de configuració inicial de simulació de xarxa

loraNetworkTest_sim1.ini

```

[General]
network = LoRaNetworkTest_sim1
rng-class = "cMersenneTwister"

**.numberOfChannels = 3

# network features
**.loRaGW[0].numUdpApps = 1
**.loRaGW[0].packetForwarder.localPort = 2000
**.loRaGW[0].packetForwarder.destPort = 1000
**.loRaGW[0].packetForwarder.destAddresses = "networkServer"
**.loRaGW[0].packetForwarder.indexNumber = 0

**.loRaGW[1].numUdpApps = 1
**.loRaGW[1].packetForwarder.localPort = 2000
**.loRaGW[1].packetForwarder.destPort = 1000

```

```

**.loRaGW[1].packetForwarder.destAddresses = "networkServer"
**.loRaGW[1].packetForwarder.indexNumber = 1

**.networkServer.numUdpApps = 1
**.networkServer.**.evaluateADRinServer = false
**.networkServer.udpApp[0].typename = "NetworkServerApp"
**.networkServer.udpApp[0].destAddresses = "loRaGW[0]"
**.networkServer.udpApp[0].destPort = 2000
**.networkServer.udpApp[0].localPort = 1000
**.networkServer.udpApp[0].adrMethod = ${"avg"}

**.numberOfNodes = 300 #1200 original
**.numberOfPacketsToSend = 0 #0 means infinite number of packets
sim-time-limit = 7d #4h original
warmup-period = 1d
simtime-resolution = -11

**.timeToFirstPacket = exponential(100s)
**.timeToNextPacket = 3600s #120s original
**.alohaChannelModel = false

#nodes features
**.loRaNodes[*]**.initFromDisplayString = false
**.loRaNodes[*]**.evaluateADRinNode = false
**.loRaNodes[*]**.initialLoRaSF = intuniform(7,12)
**.loRaNodes[*]**.initialLoRaBW = 125 kHz
**.loRaNodes[*]**.initialLoRaCR = 4
**.loRaNodes[*]**.initialLoRaTP = (2dBm + 3dBm*intuniform(0, 4))

# Nodes situats en una graella de 30x40 - 1200 nodes d'idea original
**.loRaNodes[*]**.initialY = floor(parentIndex()/30)*1.28m
**.loRaNodes[*]**.initialX = (parentIndex()-
(floor(parentIndex()/30)*30))*1m

# Nodes situats en una graella de 15x20
**.loRaNodes[*]**.initialY = floor(parentIndex()/15)*2.63m
**.loRaNodes[*]**.initialX = (parentIndex()-(floor(parentIndex()/15)*15))*2m

#gateway features
**.numberOfGateways = 1
**.loRaGW[*]**.initFromDisplayString = false
**.loRaGW[0]**.initialX = 15m
**.loRaGW[0]**.initialY = 25m

**.numberOfGateways = 2
**.loRaGW[*]**.initFromDisplayString = false
**.loRaGW[0]**.initialX = 10m
**.loRaGW[0]**.initialY = 25m
**.loRaGW[1]**.initialX = 20m
**.loRaGW[1]**.initialY = 25m

#power consumption features
**.loRaNodes[*].LoRaNic.radio.energyConsumerType = "LoRaEnergyConsumer"
**.loRaNodes[*]**.energySourceModule = "IdealEpEnergyStorage"
**.loRaNodes[*].LoRaNic.radio.energyConsumer.configFile =
xmldoc("energyConsumptionParameters.xml")

#general features
**.sigma = 3.57

```

```

**.constraintAreaMinX = 0m
**.constraintAreaMinY = 0m
**.constraintAreaMinZ = 0m
**.constraintAreaMaxX = 30m
**.constraintAreaMaxY = 50m
**.constraintAreaMaxZ = 0m

LoRaNetworkTest.**.radio.separateTransmissionParts = false
LoRaNetworkTest.**.radio.separateReceptionParts = false

**.delayer.config = xmldoc("cloudDelays.xml")
**.radio.radioMediumModule = "LoRaMedium"
**.LoRaMedium.pathLossType = "LoRaLogNormalShadowing"
**.minInterferenceTime = 0s
**.displayAddresses = false

```

C. Codi de simulació 2

C.a Codi de descripció de topologia de xarxa

package_sim2.ned

```

package loranetwork.simulations;

import inet.applications.udpapp.UDPBasicApp;
import inet.node.inet.Router;
import inet.node.internetcloud.InternetCloud;
import loranetwork.LoRaPhy.LoRaMedium;
import loranetwork.LoraNode.LoRaNode;
import loranetwork.LoraNode.LoRaGW;
import inet.node.inet.StandardHost;
import inet.networklayer.configurator.ipv4.IPv4NetworkConfigurator;
import inet.node.ethernet.Eth1G;

@license(LGPL);
network LoRaNetworkTest_sim2
{
    parameters:
        int numberOfNodes = default(1);
        int numberOfGateways = default(1);
        int networkSizeX = default(500);
        int networkSizeY = default(600);
        @display("bgb=500,600");
    submodules:
        loRaNodes[numberOfNodes]: LoRaNode {
            @display("p=243,471");
        }
        loRaGW[numberOfGateways]: LoRaGW {
            @display("p=250,300;is=s");
        }
        LoRaMedium: LoRaMedium {
            @display("p=457,569");
        }
        networkServer: StandardHost {
            parameters:
                @display("p=458,17");
        }
        configurator: IPv4NetworkConfigurator {

```



```

        parameters:
            assignDisjunctSubnetAddresses = false;
            @display("p=38,567");
        }
        internetCloud: InternetCloud {
            @display("p=202,17");
        }
        gwRouter[numberOfGateways]: Router {
            @display("p=38,17");
        }
        nsRouter: Router {
            @display("p=322,17");
        }
        connections:
            networkServer.ethg++ <--> Eth1G <--> nsRouter.ethg++;
            nsRouter.pppg++ <--> Eth1G <--> internetCloud.pppg++;
            for i=0..numberOfGateways-1 {
                internetCloud.pppg++ <--> Eth1G <--> gwRouter[i].pppg++;
                gwRouter[i].ethg++ <--> Eth1G <--> loRaGW[i].ethg++;
            }
    }
}

```

C.b Arxiu de configuració inicial de simulació de xarxa

loraNetworkTest_sim2.ini

```

[General]
network = LoRaNetworkTest_sim2
rng-class = "cMersenneTwister"

**.numberOfChannels = 3

# network features
**.loRaGW[0].numUdpApps = 1
**.loRaGW[0].packetForwarder.localPort = 2000
**.loRaGW[0].packetForwarder.destPort = 1000
**.loRaGW[0].packetForwarder.destAddresses = "networkServer"
**.loRaGW[0].packetForwarder.indexNumber = 0

**.loRaGW[1].numUdpApps = 1
**.loRaGW[1].packetForwarder.localPort = 2000
**.loRaGW[1].packetForwarder.destPort = 1000
**.loRaGW[1].packetForwarder.destAddresses = "networkServer"
**.loRaGW[1].packetForwarder.indexNumber = 1

**.loRaGW[2].numUdpApps = 1
**.loRaGW[2].packetForwarder.localPort = 2000
**.loRaGW[2].packetForwarder.destPort = 1000
**.loRaGW[2].packetForwarder.destAddresses = "networkServer"
**.loRaGW[2].packetForwarder.indexNumber = 2

**.loRaGW[3].numUdpApps = 1
**.loRaGW[3].packetForwarder.localPort = 2000
**.loRaGW[3].packetForwarder.destPort = 1000
**.loRaGW[3].packetForwarder.destAddresses = "networkServer"
**.loRaGW[3].packetForwarder.indexNumber = 3

**.loRaGW[4].numUdpApps = 1

```

```

**.loRaGW[4].packetForwarder.localPort = 2000
**.loRaGW[4].packetForwarder.destPort = 1000
**.loRaGW[4].packetForwarder.destAddresses = "networkServer"
**.loRaGW[4].packetForwarder.indexNumber = 4

**.loRaGW[5].numUdpApps = 1
**.loRaGW[5].packetForwarder.localPort = 2000
**.loRaGW[5].packetForwarder.destPort = 1000
**.loRaGW[5].packetForwarder.destAddresses = "networkServer"
**.loRaGW[5].packetForwarder.indexNumber = 5

**.networkServer.numUdpApps = 1
**.networkServer.**.evaluateADRinServer = false
**.networkServer.udpApp[0].typename = "NetworkServerApp"
**.networkServer.udpApp[0].destAddresses = "loRaGW[0]"
**.networkServer.udpApp[0].destPort = 2000
**.networkServer.udpApp[0].localPort = 1000
**.networkServer.udpApp[0].adrMethod = ${"avg"}

**.numberOfNodes = 30
**.numberOfPacketsToSend = 0 #0 means infinite number of packets
sim-time-limit = 7d
warmup-period = 1d
simtime-resolution = -11

**.timeToFirstPacket = exponential(100s)
**.timeToNextPacket = 3600s
**.alohaChannelModel = false

#nodes features
**.loRaNodes[*]**.initFromDisplayString = false
**.loRaNodes[*]**.evaluateADRinNode = false
**.loRaNodes[*]**.initialLoRaSF = intuniform(7,12)
**.loRaNodes[*]**.initialLoRaBW = 125 kHz
**.loRaNodes[*]**.initialLoRaCR = 4
**.loRaNodes[*]**.initialLoRaTP = (2dBm + 3dBm*intuniform(0, 4))

# Nodes situats en una graella de 5x6
**.loRaNodes[*]**.initialY = 50m+floor(parentIndex()/5)*100m
**.loRaNodes[*]**.initialX = 50m+(parentIndex()-
(floor(parentIndex()/5)*5))*100m

#gateway features
**.numberOfGateways = 1
**.loRaGW[*]**.initFromDisplayString = false
**.loRaGW[0]**.initialX = 250m
**.loRaGW[0]**.initialY = 300m

**.numberOfGateways = 2
**.loRaGW[*]**.initFromDisplayString = false
**.loRaGW[0]**.initialX = 166.66m
**.loRaGW[0]**.initialY = 300m
**.loRaGW[1]**.initialX = 333.33m
**.loRaGW[1]**.initialY = 300m

**.numberOfGateways = 6
**.loRaGW[*]**.initFromDisplayString = false
**.loRaGW[0]**.initialX = 166.66m

```

```

**.loRaGW[0]**.initialY = 100m
**.loRaGW[1]**.initialX = 333.33m
**.loRaGW[1]**.initialY = 100m
**.loRaGW[2]**.initialX = 166.66m
**.loRaGW[2]**.initialY = 300m
**.loRaGW[3]**.initialX = 333.33m
**.loRaGW[3]**.initialY = 300m
**.loRaGW[4]**.initialX = 166.66m
**.loRaGW[4]**.initialY = 500m
**.loRaGW[5]**.initialX = 333.33m
**.loRaGW[5]**.initialY = 500m

#power consumption features
**.loRaNodes[*].LoRaNic.radio.energyConsumerType = "LoRaEnergyConsumer"
**.loRaNodes[*]**.energySourceModule = "IdealEpEnergyStorage"
**.loRaNodes[*].LoRaNic.radio.energyConsumer.configFile =
xmldoc("energyConsumptionParameters.xml")

#general features
**.sigma = 7.08
**.constraintAreaMinX = 0m
**.constraintAreaMinY = 0m
**.constraintAreaMinZ = 0m
**.constraintAreaMaxX = 500m
**.constraintAreaMaxY = 600m
**.constraintAreaMaxZ = 0m

LoRaNetworkTest.**.radio.separateTransmissionParts = false
LoRaNetworkTest.**.radio.separateReceptionParts = false

**.delayer.config = xmldoc("cloudDelays.xml")
**.radio.radioMediumModule = "LoRaMedium"
**.LoRaMedium.pathLossType = "LoRaLogNormalShadowing"
**.minInterferenceTime = 0s
**.displayAddresses = false

```

D. Codi de simulació 3

D.a Codi de descripció de topologia de xarxa

```
package_sim3.ned
```

```

package loranetwork.simulations;

import inet.applications.udpapp.UDPBasicApp;
import inet.node.inet.Router;
import inet.node.internetcloud.InternetCloud;
import loranetwork.LoRaPhy.LoRaMedium;
import loranetwork.LoraNode.LoRaNode;
import loranetwork.LoraNode.LoRaGW;
import inet.node.inet.StandardHost;
import inet.networklayer.configurator.ipv4.IPv4NetworkConfigurator;
import inet.node.ethernet.Eth1G;

@license(LGPL);
network LoRaNetworkTest_sim3
{

```

```

parameters:
    int numberOfNodes = default(1);
    int numberOfGateways = default(1);
    int networkSizeX = default(30);
    int networkSizeY = default(20);
    @display("bgb=30,20");
submodules:
    loRaNodes[numberOfNodes]: LoRaNode {
        @display("p=14.959795,16.04309");
    }
    loRaGW[numberOfGateways]: LoRaGW {
        @display("p=15,10;is=s");
    }
    LoRaMedium: LoRaMedium {
        @display("p=1.9602491,18.416023");
    }
    networkServer: StandardHost {
        parameters:
            @display("p=28.42361,1.341223");
    }
    configurator: IPv4NetworkConfigurator {
        parameters:
            assignDisjunctSubnetAddresses = false;
            @display("p=27.701414,16.920044");
    }
    internetCloud: InternetCloud {
        @display("p=16.765287,1.341223");
    }
    gwRouter[numberOfGateways]: Router {
        @display("p=9.543318,1.341223");
    }
    nsRouter: Router {
        @display("p=22.542864,1.341223");
    }
connections:
    networkServer.ethg++ <--> Eth1G <--> nsRouter.ethg++;
    nsRouter.pppg++ <--> Eth1G <--> internetCloud.pppg++;
    for i=0..numberOfGateways-1 {
        internetCloud.pppg++ <--> Eth1G <--> gwRouter[i].pppg++;
        gwRouter[i].ethg++ <--> Eth1G <--> loRaGW[i].ethg++;
    }
}

```

D.b Arxiu de configuració inicial de simulació de xarxa

loraNetworkTest_sim3.ini

[General]

network = LoRaNetworkTest_sim3
rng-class = "cMersenneTwister"

network features

```

**.loRaGW[0].numUdpApps = 1
**.loRaGW[0].packetForwarder.localPort = 2000
**.loRaGW[0].packetForwarder.destPort = 1000
**.loRaGW[0].packetForwarder.destAddresses = "networkServer"
**.loRaGW[0].packetForwarder.indexNumber = 0

```

```

**.numberOfChannels = 3

```

```

**.loRaGW[1].numUdpApps = 1
**.loRaGW[1].packetForwarder.localPort = 2000
**.loRaGW[1].packetForwarder.destPort = 1000
**.loRaGW[1].packetForwarder.destAddresses = "networkServer"
**.loRaGW[1].packetForwarder.indexNumber = 1

**.networkServer.numUdpApps = 1
**.networkServer.**.evaluateADRinServer = false
**.networkServer.udpApp[0].typename = "NetworkServerApp"
**.networkServer.udpApp[0].destAddresses = "loRaGW[0]"
**.networkServer.udpApp[0].destPort = 2000
**.networkServer.udpApp[0].localPort = 1000
**.networkServer.udpApp[0].adrMethod = ${"avg"}

**.numberOfNodes = 425
**.numberOfPacketsToSend = 0 #0 means infinite number of packets
sim-time-limit = 2d
warmup-period = 1d
simtime-resolution = -11

**.timeToFirstPacket = exponential(100s)
**.timeToNextPacket = 300s
**.alohaChannelModel = false

#nodes features
**.loRaNodes[*]**.initFromDisplayString = false
**.loRaNodes[*]**.evaluateADRinNode = false
**.loRaNodes[*]**.initialLoRaSF = intuniform(7,12)
**.loRaNodes[*]**.initialLoRaBW = 125 kHz
**.loRaNodes[*]**.initialLoRaCR = 4
**.loRaNodes[*]**.initialLoRaTP = (2dBm + 3dBm*intuniform(0, 4))

# random deployment of nodes in a square area
**.loRaNodes[*]**.initialX = uniform(0m, 30m)
**.loRaNodes[*]**.initialY = uniform(0m, 20m)

#gateway features
**.numberOfGateways = 1
**.loRaGW[*]**.initFromDisplayString = false
**.loRaGW[0]**.initialX = 15m
**.loRaGW[0]**.initialY = 10m

**.numberOfGateways = 2
**.loRaGW[*]**.initFromDisplayString = false
**.loRaGW[0]**.initialX = 10m
**.loRaGW[0]**.initialY = 10m
**.loRaGW[1]**.initialX = 20m
**.loRaGW[1]**.initialY = 10m

#power consumption features
**.loRaNodes[*].LoRaNic.radio.energyConsumerType = "LoRaEnergyConsumer"
**.loRaNodes[*]**.energySourceModule = "IdealEpEnergyStorage"
**.loRaNodes[*].LoRaNic.radio.energyConsumer.configFile =
xmldoc("energyConsumptionParameters.xml")

#general features
**.sigma = 3.57
**.constraintAreaMinX = 0m
**.constraintAreaMinY = 0m

```

```
**constraintAreaMinZ = 0m
**constraintAreaMaxX = 30m
**constraintAreaMaxY = 20m
**constraintAreaMaxZ = 0m

LoRaNetworkTest.**radio.separateTransmissionParts = false
LoRaNetworkTest.**radio.separateReceptionParts = false

**.delayer.config = xmldoc("cloudDelays.xml")
**.radio.radioMediumModule = "LoRaMedium"
**.LoRaMedium.pathLossType = "LoRaLogNormalShadowing"
**.minInterferenceTime = 0s
**.displayAddresses = false
```