

TELEKOMUNIKAZIO TEKNOLOGIAREN
INGENIARITZAKO GRADUA
GRADU AMAIERAKO LANA

***EEM ESPOSIZIOAREN IKERKETA,
NEURKETAK ETA SIMULAZIOAK IOT
SAREETAN***

Ikaslea: Landa Guerra, Aitor
Zuzendaria (1): Landa Sedano, Iratxe
Zuzendaria (2): Fernandez Andres, Marta

Ikasturtea: 2018-2019

Data: 2019/7/8

Laburpena

Long Range (LoRa), etorkizunean handitzea espero diren “Internet of Things” (IoT) sareetarako diseinatu den teknologia berri bat da. Hala ere, berria izateagatik, konfigurazio desberdinetan horien efizientzia eta sortzen dituzten esposizio mailen inguruko ikerketen hutsa dago.

Proiektu honen xedea, konfigurazio desberdinetan eremu elektromagnetikoaren (EEM) esposizio mailak gainditzen diren aztertzeko metodologia bat ikertzea eta garatzea da. Horregatik, Gradu Amaierako Lan (GrAL) hau, definituriko helburuak betetzeko asmoarekin, proiektua nola burutu den deskribatzen du.

Hala, Microchip-en LoRa-ren RN3483 moduluak goranzko (uplink) komunikazioetan ematen dituen konfigurazio posibleen azterketa bat egin da. Konfigurazio batzuk zehaztu eta konfigurazio hauentzat neurketak egin dira urruneko eremuan baita simulazioak ere. Emaitzekin Europako araudiak ematen dituen mugekin konparatu da.

Hitz gakoak: LoRa, Spreading Factor, esposizioa, SAR, eremu elektrikoa

Resumen

Long Range (LoRa) es una tecnología reciente desarrollada para las redes “internet de las cosas” (IoT – internet of Things), las cuales se esperan que vayan en aumento en el futuro cercano. Sin embargo, al ser una tecnología reciente, hay una falta de estudios que analicen la eficiencia de estas conexiones y los niveles de exposición electromagnética (EM) en diferentes casos y configuraciones.

El propósito de este proyecto es el investigar y desarrollar una metodología para determinar si los límites de exposición EM son excedidos en diferentes configuraciones y como podría ser reducida esta exposición. Por lo tanto, este Trabajo de Fin de Grado contiene la manera en la que se ha llevado a cabo el proyecto, con el objetivo de alcanzar los propósitos definidos.

De esta manera, se ha llevado a cabo un estudio previo de las diferentes configuraciones del módulo RN2483 de LoRa (Microchip), para las comunicaciones de subida (uplink) al Gateway, el cual le proporciona conexión a la red. Estas configuraciones se han utilizado para hacer mediciones en campo lejano y simulaciones con las cuales se han comprobado que no se superen los límites marcados por la normativa europea.

Palabras clave: LoRa, Spreading Factor, esposizioa, SAR, eremu elektrikoa

Abstract

Long Range (LoRa) is a new technology developed for Internet of Things (IoT) networks, which are expected to grow in the near future. However, as it is a recent technology, there is a lack of studies that analyze the efficiency of the links and the levels of the electromagnetic (EM) exposition, in different cases and configurations.

The aim of this project is to research and develop a method whether the EM exposition exceed the allowed limits in different configurations and how it could be reduced. So, this final degree project presents the way in which the project has been carried out, in order to achieve the defined purposes.

In this way, a previous study of different configurations on LoRa technology has been done for uplink communications of an RN2483 module to a Gateway (Microchip), which gives modules connection to the network. These configurations have been used for doing measurements on far field and simulations, with which the European electromagnetic exposure limits has been checked.

Key words: LoRa, Spreading Factor, esposizioa, SAR, eremu elektrikoa

Aurkibidea

Laburpena	2
Resumen	3
Abstract.....	4
Taulen zerrenda	7
Irudien zerrenda.....	8
Grafikoen zerrenda	9
Laburduren zerrenda.....	10
1. Sarrera.....	11
2. Testuingurua	12
3. Artearen egoera.....	13
3.1. Haririk gabeko sentsore sareak.....	13
3.2. Irismen handiko eta potentzia baxuko Sareak (LP-WAN)	13
3.3. LoRa	13
3.3.1. LoRa modulazioaren oinarriak	14
3.3.2. LoRa arkitektura: LoRa MAC – LoRaWAN	16
3.4. Espektro hedatua LoRa-n.....	18
3.5. Parametroak eta transmisio aukerak.....	22
3.6. Esposizioa.....	23
3.6.1. SAR.....	24
3.6.2. Esposizioaren mugak	26
4. Helburuak eta irismena.....	29
4.1. Helburu nagusia	29
4.2. Helburu partzialak.....	29
4.2.1. LoRa-ren funtzionamendua aztertzea.....	29
4.2.2. LoRa-ren seinalearen neurketak egin	29
4.2.3. Neurketen prozesamendua eta analisisa gauzatu.....	30
4.2.4. Simulazioak egiteko antena diseinatu eta optimizatu.....	30
4.2.5. Esposizio simulazioak egin	30
4.2.6. Neurketen eta simulazioen emaitzak bildu.....	30
4.2.7. Neurketen eta simulazioen emaitzak konparatu, aztertu eta ondorioztatu	30
5. Onurak	31

5.1.	Gizarte onura.....	31
5.2.	Onura zientifikoa	31
5.3.	Onura teknikoa.....	31
6.	Metodologia.....	32
6.1.	Emisio parametroen azterketa (LoRa Evaluation Kit 800).....	32
6.2.	Neurketak Anritsu Espektrora analizatzailearekin.....	35
6.2.1.	Frekuentziaren domeinuan	37
6.2.2.	Denboraren domeinuan.....	38
6.3.	Neurketa eta datuen prozesatzea.....	39
6.3.1.	Frekuentzia domeinuan	39
6.3.2.	Denbora domeinuan.....	42
6.4.	Neurketen egokitzapena.....	43
6.5.	Neurketen emaitzen multzokatzea eta analisisa.....	44
6.5.1.	500 kHz-ko banda-zabalerako datuak (5 m).....	45
6.5.2.	125 kHz-ko banda-zabalerako datuak	53
6.5.3.	Bi BW desberdinen konparaketa.....	59
6.6.	CST simulazioak.....	61
6.6.1.	Antenaren diseinua.....	61
6.6.2.	Antenaren optimizazioa.....	65
6.6.3.	Gorputz ereduak eta simulazioak	68
6.6.4.	Simulazioen emaitzak	71
6.7.	Etorkizuneko lanak.....	73
6.8.	Kontutan hartu beharrekoak eta zailtasunak.....	74
7.	Plangintza eta baliabideak	74
7.1.	Lan-taldea.....	74
7.2.	Lan paketeen deskribapena	75
7.2.1.	LP 1 Proiektuaren kudeaketa eta gainbegirategia	75
7.2.2.	LP 2 LoRa-ren parametro konfiguragarrien azterketa	76
7.2.3.	LP 3 Erabiliko den LoRa gailuarekin trebatu eta aztertu.....	77
7.2.4.	LP 4 LoRa gailuarekin urruneko eremuan neurketak egin	77
7.2.5.	LP 5 Prozesamendurako Matlab-eko programak garatu	78
7.2.6.	LP 6 CST Studio Suite programarekin trebatu.....	79
7.2.7.	LP 7 Antenaren SW bidezko diseinua eta optimizazioa egin.....	79

7.2.8.	LP 8 Simulazioak egin	80
7.2.9.	LP9 Neurketen datuak bihurtu, grafikoak egin, multzokatu, konparatu eta aztertu	80
7.2.10.	LP10: Egindakoak antolatu eta ondorioak atera	81
7.2.11.	LP11: Dokumentazioa.....	81
7.3.	Gantt.....	82
8.	Aurrekontua	84
8.1.	Giza-baliabideak: barne-orduak.....	84
8.2.	Amortizazioak.....	84
8.3.	Gastuak	85
8.4.	Kostu aitortpena.....	85
9.	Arriskuen analisisa	86
9.1.	Tresnekin arazoak.....	86
9.2.	Lan-taldeko kideren baten gaixotzea.....	86
9.3.	Atzerapenak.....	86
9.4.	Datu galera	87
9.5.	Baliabideen urritasuna.....	87
10.	Ondorioak	88
	Erreferentziak	89
	1. eranskina: Matlab kodea frekuentzian kanalaren potentzia kalkulatzeko	91
	2. eranskina: Matlab kodea denborak kalkulatzeko.....	100

Taulen zerrenda

Taula 3-1.	Esposizio oinarrizko mugak	27
Taula 3-2.	Esposizio oinarrizko mugak 10 -300 GHz artean	27
Taula 3-3.	Esposizio erreferentzia-mailak (langilarentzat).....	28
Taula 3-4.	Esposizio erreferentzia-mailak (jende arruntarentzat).....	28
Taula 6-1.	Parametro konfiguragarriak.....	33
Taula 6-2.	Konfigurazioen parametroak.....	34
Taula 6-3.	Konfigurazio adibideak.....	35
Taula 6-4.	45
Taula 6-5.	Denbora neurketen emaitzak (BW=500 kHz).....	46
Taula 6-6.	Neurketen emaitzak (BW=500 kHz).....	47
Taula 6-7.	Neurketen emaitzak E haztatua (BW=500 kHz)	48

Taula 6-8. Kalkuluen eta mailen konparaketa (BW=500 kHz)	49
Taula 6-9. Erreferentzia-mailak 400 – 2000 MHz.....	49
Taula 6-10. Potentzia neurketen emaitzak (BW=500 kHz)	50
Taula 6-11. Denbora neurketen emaitzak(BW=125 kHz)	53
Taula 6-12. Neurketen emaitzak (BW=125 kHz)	54
Taula 6-13. Eremu haztatuaren emaitzak (BW=125 kHz)	55
Taula 6-14. Mugen eta eremu haztatuaren konparaketa.....	55
Taula 6-15. Erreferentzia-mailak 400-2000 MHz.....	55
Taula 6-16. Neurketen emaitzak (BW=125 kHz)	57
Taula 6-17. Geruzen lodiera	69
Taula 6-18. Gorputzaren dimentsioak.....	70
Taula 7-1. Lan-taldea.....	74
Taula 7-2. LP1.1: Proiektuaren definizioa.....	75
Taula 7-3. LP1.2: Proiektuaren jarraipena.....	75
Taula 7-4. LP1.3: Proiektuaren hasieratzea.....	76
Taula 7-5. LP2.: LoRa-ri buruz informatu.....	76
Taula 7-6. LP3: Erabiliko den gailu zehatzak baimentzen dituen parametroak aztertu.....	77
Taula 7-7. LP4: LoRa gailua erabiliz definituriko konfigurazioekin neurketak egin.....	77
Taula 7-8. LP5: Prozesamendurako Matlab-eko programak garatu	78
Taula 7-9. LP6: CST Studio Suite programarekin trebatu.....	79
Taula 7-10. LP7: Antenaren SW bidezko diseinua eta optimizazioa.....	79
Taula 7-11. LP8: Gorputz ereduarekin eta diseinatutako antenarekin simulazioak egin.....	80
Taula 7-12. LP9: Neurketen datuak bildu multzokatu, konparatu eta aztertu	80
Taula 7-13 LP10 Egindakoak antolatu eta ondorioak atera	81
Taula 7-14. LP11 Dokumentazioa.....	81
Taula 8-1. Berne-orduak.....	84
Taula 8-2. Amortizazioak.....	84
Taula 8-3. Gastuak.....	85
Taula 8-4. Kostu aitortpena.....	85
Taula 9-1. Arriskuen Eragin-Probabilitate taula	87

Irudien zerrenda

Irudia 2-1- IoT sareen hazkundea.....	12
Irudia 3-1 Espektrora hedatuaren oinarriak. Iturria: Semtech	15
Irudia 3-2. Sare arkitektura. Iturria: LoRa Evaluation Guide [9]	17
Irudia 3-3. Frekuentzia handitzen doan seinalea (chirp)	18
Irudia 3-4. LoRa seinalea frekuentziaren domeinuan. Iturria: LoRa/LoRaWAN tutorial 11 [11]	18
Irudia 3-5. LoRa modulazioaren oinarriak [12].....	19
Irudia 3-6. SF ezberdinen konparaketa [13]	20
Irudia 3-7. LoRa trama [14].....	21
Irudia 3-8. LoRa seinalea denboraren eremuan	21
Irudia 3-9. Erradiasiomotak uhin luzearen arabera [17].....	23
Irudia 6-1. FCC erlaitza.....	33
Irudia 6-2. Radio Erlaitza.....	34

Irudia 6-3. Neurketen ingurunea	36
Irudia 6-5. CSV fitxategiak frekuentzia eremuan.....	37
Irudia 6-6. CSV fitxategiak denbora eremuan.....	38
Irudia 6-7. Anritsu VS Matlab konparaketa	41
Irudia 6-8. Neurketa bateko LoRa seinalea denboran.....	42
Irudia 6-13. Denboren konparaketa	59
Irudia 6-14. Jasotako potentzien konparaketa.....	60
Irudia 6-15. Eredu elektriko haztatuen konparaketa.....	60
Irudia 6-16. Jasotako potentzien konparaketa Ptx desberdinetarako.....	60
Irudia 6-17. Antenaren neurriak.....	61
Irudia 6-18.....	62
Irudia 6-19.....	62
Irudia 6-20. Barne eroalea	63
Irudia 6-21. Antenaren portua	64
Irudia 6-22. S11 parametroa optimizatu gabe	64
Irudia 6-23. Erradiazio diagrama.....	64
Irudia 6-24. S11 1. Optimizazio saiakeran	65
Irudia 6-27. Optimizazioaren emaitzak – parametroak	67
Irudia 6-28. Antena optimizatua	67
Irudia 6-29. S11 bigarren antena	68
Irudia 6-30. Sumulazio ingurunea eredu inportatuarekin	69
Irudia 6-31.....	70
Irudia 6-32. Sumulazio ingurunea eredu diseinatuarekin.....	70
Irudia 6-33 SAR eredu inportatuarekin	71
Irudia 6-34. SAR eskala linealean (ezk) eta logaritmikoan (esk).....	72
Irudia 6-35. SAR diseinaturiko ereduarekin	72
Irudia 6-36. Eredu elektriko (E field probe).....	73

Grafikoen zerrenda

Grafikoa 6-8. Neurketa bateko LoRa seinalea denboran.....	42
Grafikoa 6-9. ToA SF desberdinetarako eta frekuentzia desberdinetan.....	46
Grafikoa 6-10. Jasotako potentzia SF eta f desberdinen menpe (BW=500 kHz).....	48
Grafikoa 6-11. Eredu elektriko haztatua SF eta f bakoitzeko (BW=500 kHz).....	49
Grafikoa 6-12. Jasotako potentzia emititutako potentzia desberdinetarako, SF guztiak kontuan hartuz (BW=500 kHz).....	51
Grafikoa 6-13. Eredu elektriko Potentzien arabera, SF guztiak kontuan hartuz (BW=500 kHz)	51
Grafikoa 6-14. ToA SF eta f desberdinetarako(BW=125 kHz).....	54
Grafikoa 6-15. Jasotako potentzia SF eta f desberdinetarako (BW=125 kHz)	56
Grafikoa 6-16. Eredu elektriko haztatua SF eta f desberdinetarako (BW=125 kHz).....	57
Grafikoa 6-17. Jasotako potentzia Ptx desberdinetarako(BW=125 kHz).....	58
Grafikoa 6-18. Eredu elektriko Ptx desberdinetarako(BW=125 kHz).....	59
Grafikoa 7-1. Gantt	83

Laburduren zerrenda

BW - Bandwidth
CF - Center Frequency
CR - Code Rate
CRC - Cyclic Redundancy Check
CSS - Chrip Spread Spectrum
CSV - Comma Separated Values
EEM - Eremu Elektromagnetikoa
IoT - Internet of Things
ISM - Industrial Scientific and Medical
ISM - Industrial, Scientific and Medical
LoRa - Long Range
LoRaWAN - LoRa Wide Area Network
LPWAN - Low Power Wide Area Network
MAC - Medium Access Control
RBW - Resolution Bandwidth
SAR - Specific Absortion Rate
SF - Spreading Factor
SNR - Signal to Noise Ratio
SW - Software
SWT- Sweep Time
ToA - Time on Air
TP - Transimission Power

1. Sarrera

Agiri honetan proiektuaren atalik garrantzitsuenak azalduko dira, proiektua egitea zehaztasunak ezagutzera emateko asmoarekin. Proiektua, LoRa telekomunikazio teknologiaren erradiaziopean gorputz batek jasan dezakeen esposizioa ebaluatzeko metodologia baten garapenean oinarritzen da. Metodologia hau, beste teknologia batzuetara ere hedagarria izan daiteke, eta neurketa, analisi, eta simulazioen bidez egiten da.

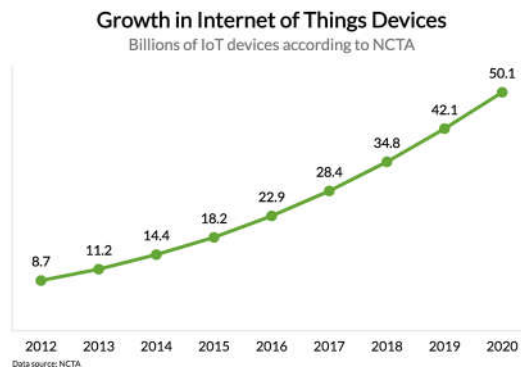
Lehenik eta behin, LoRa teknologiaren ezaugarrien eta esposizioaren inguruko informazioa bildu da, metodologia garatzeko beharrezkoak diren ezaguera tekniko eta teorikoak ulertzeko eta azaltzeko xedearekin.

Gero, ezagutza horietaz baliatuz, LoRa garapen kit-a igorle modura lan eginez espektrora analizatzailearekin urruneko eremuan neurketak egin dira. Behin neurketak egin direla, datuak prozesatu dira, potentzia eta transmisio denboren analisia egiteko. Prozesatutako datu horiek araudiak ematen dituen magnitudeetara bihurtu dira, balio konparagarriak lortuz.

Bukatzeko, LoRa-ak lan egiten maiztasun-bandan (Europar 868 MHz) lan egiten duten bi antena diseinatu dira, eta simulazio batzuk jaurti dira gorputzek duten esposizioa teorikoki nola simulatu daitekeen azaltzeko.

2. Testuingurua

IoT “Gauzen Internet”-a edo “gailuen Internet”-a, objektu eta gailu fisikoak Interneten bitartez inter-konektatuta egotean oinarritzen da. IoT, gaur egun, garapen bidean dago eta denborarekin, garrantzi handia hartuko duela aurreikusten da. Interkonektatzeko modu berri honek, teknologia eta protokolo berrien garapena eskatzen du; datu tasa baxuko eta irismen handiko sareak baitira, eta Industrial Science and Medical (ISM) bandetan lan egiteko araututa baitaude.



Irudia 2-1- IoT sareen hazkundera.

Iturria: priceconomics.com/

Sare hauen garapenarekin eta sare berdinerakonektatutako gailu kopuru handiarekin, gehienak transmisio bide berdina erabilita (irradi-espektroa) arazoak agertzen dira:

- Gailu ugari egoteagatik interferentziak handiak izan daitezke, hau ekiditeko modulazio zehatz bat erabiliz gero, modulazio honek abiadura bitarra txikitzea eragin dezake.
- Gailu kantitatea handitzeak sareen limiteak gainditzea ekar dezakete.
- Gailuen arteko distantziak ugariak izan ohi dira eta distantzia luzeetan egoten diren galerek komunikazioan eragin dezakete.

LoRa, IoT sareen oinarriak bete eta arazoak gainditzeko eginkizunarekin LoRa AllianceTM-ek [1] sortu duen haririk gabeko kontsumo baxuko eta estaldura handiko (Low Power Wide Area Network - LPWAN) teknologia da, eta hainbat fabrikatzaile dira, teknologia hau erabiltzen duten sistemak sortu dituztenak. Proiektu honetan, Europako auraudia betetzeko, datu transmisio arauak betetzen dituen Microchip Technology Inc. fabrikatzailearen LoRa Evaluation Kit 800 gailua erabiliko da.

Mota honetako sareek dituzten ezaugarriak direla eta, oso teknologia aproposa da sentsore ugariko sareen hedapenerako, baina, banda librearen erabilera arazo nagusia bihur daiteke. Hau ekiditeko, legediak erabilera bi eratara arautzen[2] ditu: igorritako potentzia gehienez 25mWkoa izatea eta denboraren %1a baino gehiago transmititzen ezin egotea.

3. Artearen egoera

Azken urteetan, gailu eta aparailu berrien arteko iterkonektibitate dagoen joera argia da. Gailu eta sistema adimentsuak gora egiten ari dira eta baita erabilera zehatzetarako sentzore eta aparailuak ere, honek, kontrol, kudeaketa edota komunikaziorako sarera konektatuta egotea eskatzen du, gainera, 2020 urterako 50 bilioi gailu baino gehiago haririk gabeko komunikatuko direla uste da [3]. Honetarako beharrezkoa izango da haririk gabeko komunikazioaren belaunaldia, 5G, zeinek Internet of Things (IoT) barneratu behar izango duen.

IoT hitza objektu fisikoak internetera konektatzea oinarritzat duen teknologia aldaera baten modura hartzen da. Hala ere Internetera konektatzen diren gailuen eta IoT-en artean desberdintasun nagusi bat dago, IoT-en gailuen baliabideak apalagoak dira memoria, prozesadore, energia eta banda-zabalera aldetik. Gailu kantitatea handitzeak haririk gabeko sareetan teknologia gabeziak aurkitzea ekarri du, horiek gainditzeko, Potentzia Baxuko eta Irismen Handiko Sare-en (LPWAN) erapenerako protokolo eta teknologia berriak sortzen ari dira. Teknologia hauek 3 gailutan oinarritzen dira, nodoak, gateway-ak eta zerbitzariak aurrerago sakonago azalduko direnak.

3.1. Haririk gabeko sentzore sareak

Azkenaldian teknologian egon diren hobekuntzek, kostu eta kontsumo baxuko sentzoreen garapena eta diseinu ahalbidetu du. Nodo hauen kokapen eta propietateek, protokolo berrien beharra eskatzen dute, gehien bat kontsumo energetikoa murriztea abiapuntutzat dutenak, atzerapena eta prozesatutako informazio kantitatea alde batera utzita. Teknologia ugari daude, hala nola, Bluetooth LE, IEEE 802.15.4, 802.11ah, Sigfox.

3.2. Irismen handiko eta potentzia baxuko Sareak (LP-WAN)

IoT sareetan datu tasa, irismena eta gailuen arteko distantzia aldakorra izan daiteke sare desberdinen artean, baita zertarako erabiltzen diren ere, Low Power Wide Area Network-ak behar hauek asetzeko jaio ziren. [4]

LPWAN honako ezaugarri nagusiak ditu:

- Kontsumo baxua
- Kostua ahalik eta baxuenak
- Instalatzeko eta azpiegitura muntatzeko erraztasuna bermatu: gailuak gehitzea edo mugitzea.
- Informazio transmisioa segurua izan behar du objektua eta erabiltzaile finalaren artean.
- Modulazio sendoa izatea garrantzitsua da.

3.3. LoRa

Lehenik eta behin, gaian sakonago sartu aurretik, beharrezkoa da LoRa eta LoRaWAN kontzeptuak desberdintzea. LoRa modulazioa, Semtech enpresak aurkeztu zuen modulazio mota bat da eta LoRaWAN berriz, gailuak komunikatzeko eta kudeatzeko sare mailako

protokolo bat da; hala ere, lan honetan, LoRa hitza erabiltzen denean, guztiak barneratzen dituen teknologiari egingo zaio erreferentzia.

LoRa modulazioak honako ezaugarriak ditu[5]:

- Tolerantzia altua interferentzien aurrean
- Datuak jasotzeko sentsibiltate oso altua
- Kontsumo baxua
- Chirp bidezko modulazioan oinarritua
- Irismen handia (10 – 20 km)
- Datu transferentzia baxua
- Lan frekuentziak: 915 MHz Ameriketean, 868 MHz Europan, eta 433 MHz Asian

LoRaWAN protokoloak honako ezaugarri hauek ditu:

- Izar topologia
- AES 128 enkriptazioa
- 3 nodo mota desberdin onartzen ditu
- Gailu kudeaketa
- Sare publiko eta pribatuak
- Kontsumo baxua eta irismen handia
- Datu transferentzia baxua

3.3.1. LoRa modulazioaren oinarriak

Long Range (LoRa) Spread Spectrum Semtech-ek modulazio teknika bat da. Forward Error Correction (FEC) barneratzen duen ChirpSpread Spectrum (CSS) modulaziotik eratorritako modulazio teknika bat da. LoRa hartzaile batek zarataren azpitik 19,5 dB-ra deskodetu ditzake transmisioak, honek distantzia oso luzeko komunikazioak gauzatzeko ahalbidetzen du. LoRa-aren ezaugarri nagusiak hauek dira:

- Distantzia luzekoa
- Sendotasun handia interferentzien aurrean
- Multipath-arekiko sendoa (hainbat leku desberdinetatik seinalea heltzea)
- Potentzia baxua
- Doppler efektuarekiko sendoa

Gaur egungo LoRa “transceiver”-ak 137-1020 MHz artean lan egin dezakete, hala ere lizentzien beharrik gabeko bandetan lan egitera mugatuak daude legez: ISM (Industrial Scientific and Medical) , EBn (Europear Batasuna): 868 MHz eta 433 MHz, AEBn (Ameriketako Estatu Batuak): 915 MHz eta 433 MHz. Ondorioz LoRa-ak Europan 868 MHz-ko bandan lan egiten du. [6]

LoRa modulazioa, chirp bidezko (CSS – Chirp Spread Spectrum) espektro hedatutik eratorritako modulazio mota bat da. Honen helburu nagusia sentsibiltatearen hobekuntza da, baina honek, banda-zabalera bererako, datu tasa txikiagoa izatea dakar. Datu-tasa

aldakorrek eskaintzen ditu zenbait hedapen-faktore (SF- Spreading Factor) erabili daitezkeelarik, honela sarearen lanegina hobetu daiteke banda-zabalera bera izanda ere. LoRa maila fisikotik aurrerako teknologia bat da, honela inplementazioa ez da gaineko geruzen menpekoa, eta sare arkitektura ugariarekin lan egin dezake.

3.3.1.1. Espectro hedatuaren oinarriak

Shannon-Hartley-ren teorema kanal edo bide zaratatsu baten bitartez komunikatu daitekeen informazio tasa maximoa ematen du [7].

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

Non:

C kanalaren kapazitatea da: bit/s

B kanalaren banda zabalera da: Hz

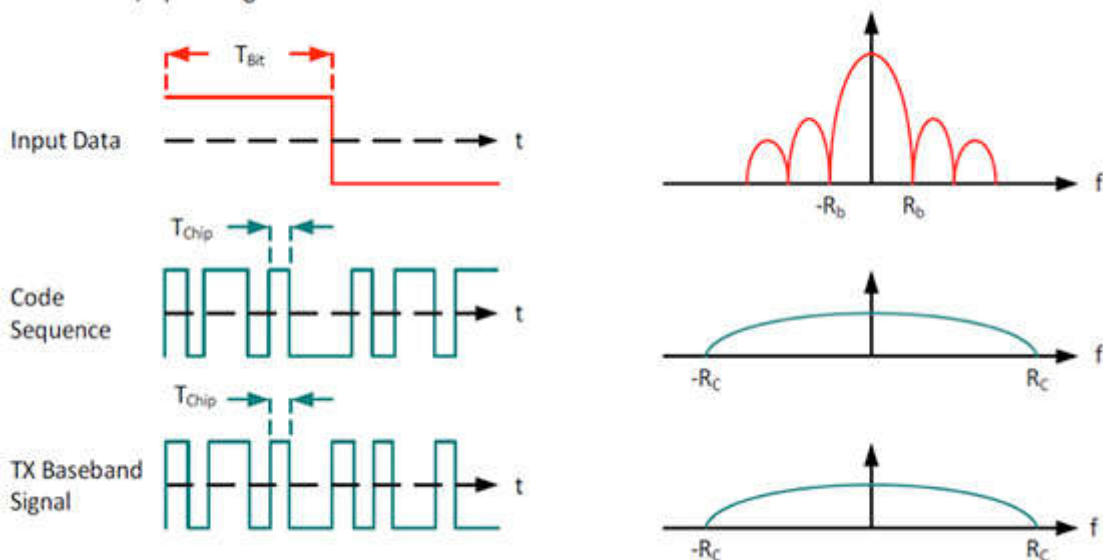
S seinale erabilgarriaren potentzia da: W, mW...

N kanalean agertzen den zarataren potentzia da: W, mW...

Ikusi daiteke banda zabalera handituz gero, zaratak eragiten duen degradazioa orekatu daitekeela.

Sekuentzia Jarrai bidezko Espektrro Hedatu (DSSS) sistemetan eramalearen fasea kode sekuentzia bati jarraiki aldatzen da, prozesu hau, datu seinalea hedapen kode batekin biderkatuz lortzen da, chip sekuentzia. [Irudia 3-1]

Modulation / Spreading



Irudia 3-1 Espektrro hedatuaren oinarriak. Iturria: Semtech

Chip sekuentzia datu seinalea baino askoz arinago aldatzen da, honengatik jatorrizko senilenaren banda zabalera sakabanatu (hedatu) egiten du frekuentzian aztertzean. Jasotzean seinalea berriro ere biderkatuko da, lokalean sortutako kode seinale berberarekin, honela seinalea berriro konprimatu eta transmititutako seinalea berreskuratuko da. formazioa zuzena izateko, beharrezkoa da jasotzean chip kode berdina aplikatzea.

Honen eraginez Signal to Noise Ratio (SNR) balio negatiboa (dB-tan) duten seinaleak ulertzeko kapaza da hartzailea, hau da, intereseko seinalea zarata eta interferentziaren potentziaren azpitik dagoenean. Prozesatzearen ondoriozko hobekuntza beraz, irabazi honen bitartez adierazi daiteke:

$$G_p = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{R_c}{R_b}\right) \text{ (dB)}$$

Non:

R_c = chip rate (chips/s) → Zenbat kode sinbolo dauden segundoko

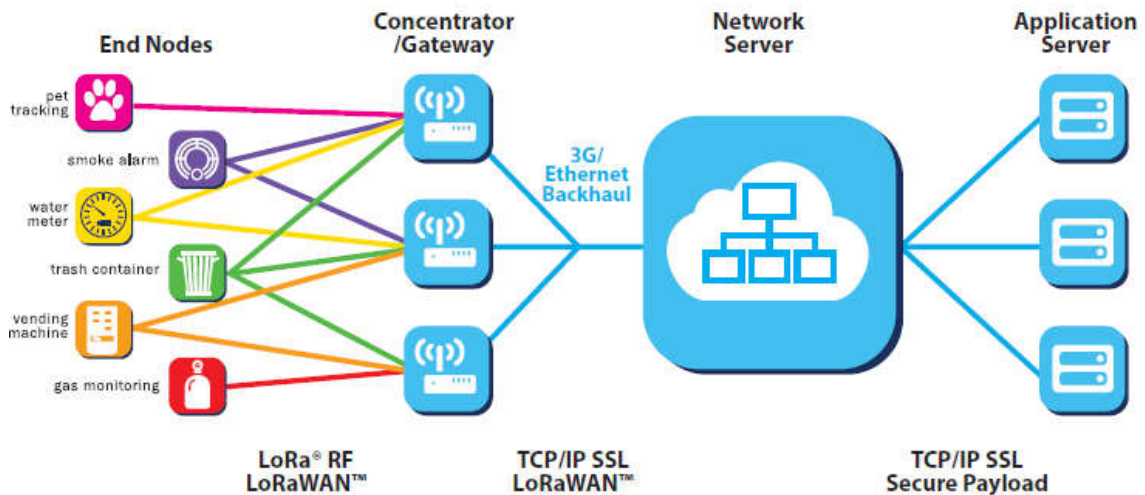
R_b = bit-rate (bit/s) → Zenbat bit bidaltzen dira segundo baten

Oso erabilia da teknika hau komunikazio aplikazioetarako, hala ere, zailtasunak agertzen dira kostua eta kontsumo energetikoa murrizten saiatzean. Global Navigation Satellite System (GNSS) batzuetan bezala erloju oso zehatzen beharra sortzen da, gainera, hedapen kodea gero eta luzeagoa izan, gero eta denbora gehiago behar da seinale osoaren korrelazioa gauzatzeko edota sekuentzalki edo paraleloan kode desberdinekin korrelazioa gauzatzeko, energia aldetik mugatuak dauden gailuetan bereziki garrantzitsua delarik.

3.3.2. LoRa arkitektura: LoRa MAC – LoRaWAN

LoRaWAN LoRa Alliance™-ek [8] garatutako sare-mailako protokolo bat da, bukaerako gailuetan energia kontsumoa hobetzeko diseinatu zena.

LoRaWAN sareak izar-topologia erabiltzen duten sare zentralizatuak izan ohi dira, eta lau elementu nagusik osatzen dute:



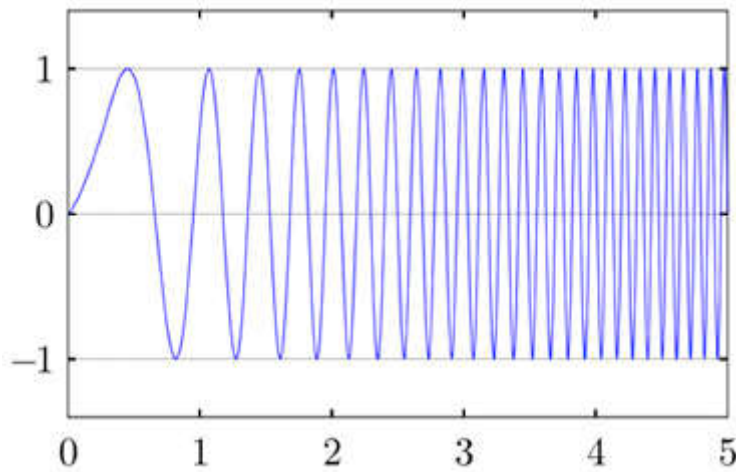
Irudia 3-2. Sare arkitektura. Iturria: LoRa Evaluation Guide [9]

- **Moduluak/Terminalak/Sentsoreak:** bukaerako nodo izena ere hartzen dute; informazioa biltzeaz eta informazio hori transmititzeaz arduratzen diren gailuak dira. Informazio bidalketak periodikoki, zein aldaketarik egotean, zein zerbitzariaren eskari dagoenean eman daitezke. Hiru mota daude eginkizunaren eta aplikazioaren arabera diseinatu zirenak:
 - *A klasea:* gailu hauek behin goranzko informazio transmisio bat gauzatu dutela, entzuteko bi kanal irekitzen ditu denbora tarte labur batean zehar, erantzunaren zain. Energia kontsumo eragin gutxiena duen mota da.
 - *B klasea:* funtzionalitate gehigarriak ditu, hala nola, gailuak informazioa igotzen duenean gateway-arekin sinkronizatu egiten da, honek, moduluak erantzuna noiz itxaroten ari den jakitea ahalbidetzen die zerbitzariari
 - *C klasea:* gailu honek beheranzko kanala etengabe irekita du informazioa jasotzeko aukera emanez. Hiru motetatik atzerapen gutxien ematen duen gailu mota da, baina gainerakoek duten energia kontsumoa gainditzen du.
- **Gateway:** moduluen eta LoRa sare-zerbitzariaren arteko komunikazioa ahalbidetzen duen erdibideko gailua da, bere bitartez, LoRa aplikazio-zerbitzarira informazioa transmititu ahal izateko edo alderantziz.
- **Sare-zerbitzaria:** hainbat gateway-tara konektaturik dago, elkarren arteko TCP/IP konexioen bitartez. Mezu errepikatuak baztertzen ditu, zein gateway-k erantzun behar duen erabakitzen du, eta moduluak kudetzen ditu, sarearen kapazitatea eta moduluen bizi-erabilgarria handitzearen.
- **Aplikazio-zerbitzaria:** bukaerako nodoen datuak biltzeaz, elkartzeaz eta aztertzeaz arduratzen da, baita nodoek egin behar dituzten ekintzak zehazteaz eta erabakitzeaz ere.

3.4. Espektrua hedatua LoRa-n

LoRa-ak, DSSSekiko kostu eta kontsumo gutxiagoko alternatiba bat eskaintzen du eta dituen arazoak ebazten ditu.

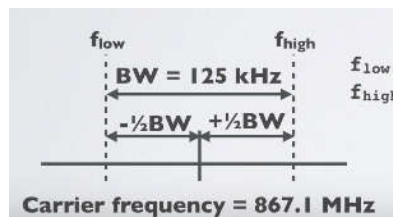
Espektrua hedatua LoRa-aren kasuan, frekuentziaz linealki etengabe aldatzen den chirp seinale batekin lortzen da, honela, hartzaileen konplexutasuna murriztea lortzen da.



Irudia 3-3. Frekuentzia handitzen doan seinalea (chirp)

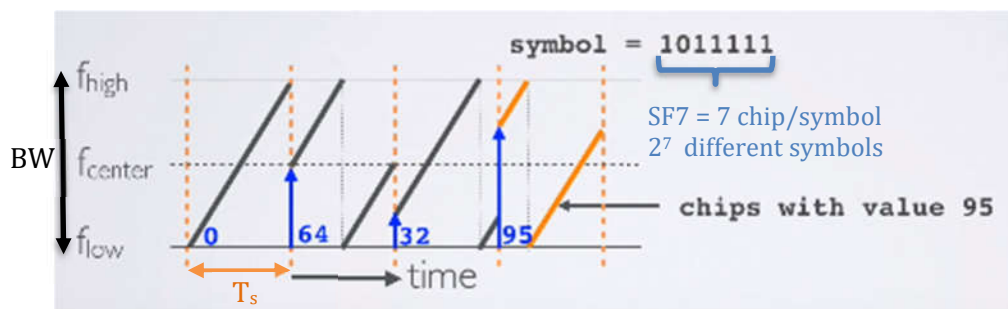
Chirp seinalea beraz, denboran zehar, sinbolo iraupen baten (T_s), bere frekuentzia linealki aldatzen doan seinalea da; gehienez, aldaketa hori, f_{low} minimo batetik f_{high} maximo batera arte (up-chirp) edo f_{low} batetik f_{high} -era arte (down-chirp), $f_{low} < f_{high}$ izanik. f_{low} eta f_{high} banda-zabaleraren (BandWidth - BW) arabera definituta daude[10].

LoRa-k modulazio M-tar bat darabil, chirp hauetan oinarritzen dena. Sinboloak sortzeko, erabilitako BWa, Center Frequency (CF) eta SFa kontutan hartzen dira. Transmisioarako definituriko frekuentziatik (CF), BW/2 desbideratzen dira gure, f_{low} eta f_{high} . SFak T_s sinbolo iraupen horretan dauden bit edo chip kopurua zehazten digu, T_s hori aldakorra izanik, SF eta BW bakoitzerako.



Irudia 3-4. LoRa seinalea frekuentziaren domeinuan.
Iturria: LoRa/LoRaWAN tutorial 11 [11]

Datorren [Irudia 3-5. LoRa modulazioaren oinarriak [12] irudi sinplifikatua oso adierazgarria da, sinboloak nola sortzen diren ulertzeko [12]:



Irudia 3-5. LoRa modulazioaren oinarriak [12]
Iturria: LoRa/LoRaWAN tutorial 11

Spreading Factor-ak bit kopurua zehazten du, kasu honetan, SF7 izanda, 2^7 sinbolo desberdin har ditzake seinaleak, hasierako frekuentzia zehatz batetik hasita eta oinarritzko chirp seinaleetik abiatuta (0garren sinboloa irudian) frekuentzia desplazatuz lortzen direnak, aurreko irudian [Irudia 3-5] ikusi daiteke. Frekuentzia aldaketa hau, bai gorakorra, zein beherakorra izan daiteke, up-chirp eta down-chirp izenak hartzen dituelarik, hurrenez hurren. SFak seinalea interferentzien aurrean sendotu egiten ditu.

T_s (sinbolo baten iraupena) laranja dauen zuzen ez-jarraien arteko denbora da, sinbolo batek bere frekuentzien igaroa egiteko duen denbora hain zuzen, igaro hau zirkularra da, hau da, behin frekuentzia altuenera (f_{high}) heltzen dela, frekuentzia baxuenera egingo du salto eta bertatik (f_{low}) hasiko da berriro ere sinboloaren frekuentzia aldaketa (oinarritzkoa jarraituz).

Hau ez da zertan gorakorra - frekuentzia baxuenera - izan, baina kontzeptua ulertzeko erabilgarria da. Laburbilduz, BWak eta SFak definituriko frekuentzian desplazatze desberdinak, sinbolo desberdinak adierazteko balio dute.

SFak beraz, sinbolo bakoitzeko chip edo zati kopurua adierazten du, hau da, adierazi daitezkeen sinbolo kopurua hain zuzen ere. Ondorioz, chip hauen ordenak zein sinbolo den definitzen du. BWak berriz, segundoko egon daitezkeen ziklo kopurua zehazten du baita frekuentzia tartea ere. Hain zuzen ere, segundo baten egon daitezkeen chip kopurua esaten du, hau da, chip abiadura (R_c) edo chip rate, chip/s-tan adierazten dena eta aldi berean f_{high} eta f_{low} limiteak definitzen ditu.

Modulazioaren abiadura bitarra, honela definitu daiteke:

$$R_b = SF \cdot \text{Rate Code} \left(\frac{\text{bit}}{\text{s}} \right)$$

Non:

$$\text{Sinbolo abiadura} \rightarrow R_s = \frac{1 \text{ BW}}{T_z 2^{SF}} \left(\frac{\text{chip/s}}{\text{chip/symbol}} \right)$$

$$\text{Kodifikazio ratioa} \rightarrow \text{Rate Code} = \frac{4}{4+CR}$$

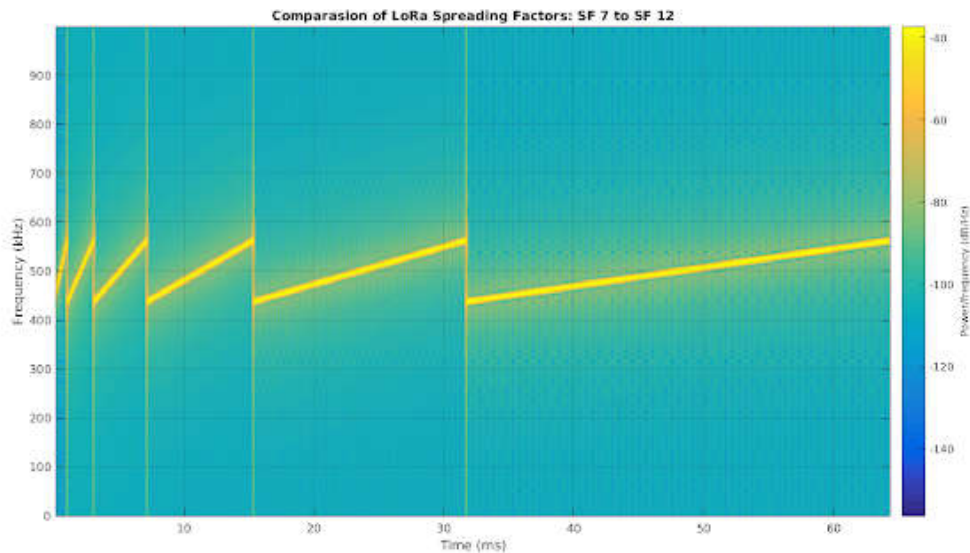
Eta:

SF = spreading factor (7..12) (bit/symbol)

CR = code rate (1..4)

BW = modulazio banda-zabalera (Hz)

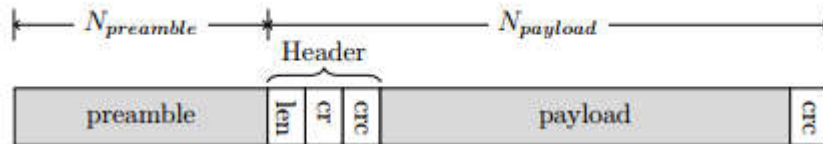
LoRa-ak 125 kHz, 250 kHz eta 500 kHz-eko banda-zabalerak erabili ahal ditu eta bere SFak 7tik 12ra heldu daitezke. LoRa-k CSS (Chirp Spread Spectrum) motako modulazioa erabiltzen du. Alegia, chirp seinale bat erabiltzen du seinalea kodifikatzeko, chirp seinale hau, anplitude finko bat du eta bere periodoaren frekuentzia banda-zabalera guztitik igarotzen du. Igarotze honetarako behar duen denbora SFaren arabera izanik, hurrengo grafikoan ikusi daitekeen bezala:



Irudia 3-6. SF ezberdinen konparaketa [13]

SFa parametro garrantzitsua da, sinbolo abiaduraren eta chip abiaduraren arteko erlazioa edo ratioa baita. SFa hanidzeak Signal to Noise Ratio-a (SNR) handitzea dakar, baina aldi berean airean igarotako denbora (“airtime” edo “Time on Air”) ere handitzen da. Sinboloko chip kopurua 2^{SF} adierazpenaren bitartez kalkulatzen da.

Maila fisokoko tramak hasierako sinbolo batzuk ditu (preamble), goiburua bat, payload-a (datu byte-ak) eta hautazko Cyclic Redundancy Check (CRC):



Irudia 3-7. LoRa trama [14]

Ikusten denez, trama bidaltzeko behar izango den denbora (ToA) beraz, 3 faktore nagusiekiko araberakoa izango da: tramaren luzeera, hau da, payload-ak duen luzeera, erabilitako banda-zabalera eta erabilitako SFa.

$$T_{oA} = T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload} \quad [15]$$

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4.25) \cdot T_s$$

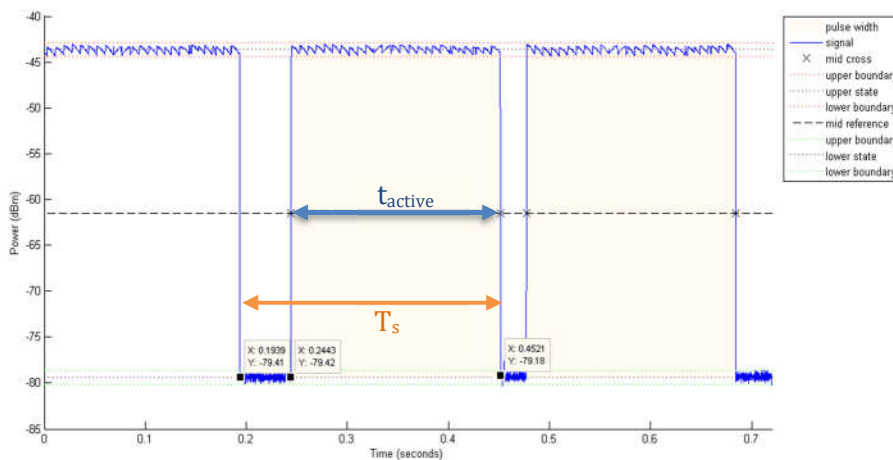
$$T_{payload} = T_s \left(8 + \max \left(\text{positibora_biribilketa} \left(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20H}{4(SF - 2DE)} \right) (CR + 4), 0 \right) \right)$$

Non European (868MHz banda):

$$N_{preamble} = 8$$

ToA denbora teorikoak kalkulatzeko web aplikazio bat eskaintzen da esteka honetan:

<https://www.loratools.nl/#/airtime> [16]



Irudia 3-8. LoRa seinalea denboraren eremuan

3.5. Parametroak eta transmisio aukerak

Transmisioan, eta batez ere, proiektu honetarako interesgarriak diren LoRa-ren parametro azalpen eta ezaugarri batzuk emango dira jarraian. Aurrerago proiektu honetan erabili den LoRa gailuak ematen dituen aukerak esango dira [14]:

- *Transmisio potentzia (TP)*: TPa LoRa-n -4 dBm-tik 20 dBm-ra konfiguratu daiteke, 1 dB-ko pausoeekin baina, hardware limitazioen ondorioz, eta limite legalak betetzeko 17 dBm-tik gorako potentziak lan zikloaren %1ean bakarrik erabili daiteke.
- *Frekuentzia Eramalea (Carrier Frequency - CF)*: transmisiorako frekuentzia zentrala da, eta 137 MHz-tik 1020 MHz-tara programatu daiteke, baina lan egiteko frekuentzia tarte hau, LoRa chip bakoitzaren arabera da, gainera, aurrerago azalduko den bezala, legediaren arabera mugatua dago.
- *Spreading Factor (SF)*: sinboloko erabiltzen diren chip kopurua adierazten du, eta aldi berean aurrerago esan bezala, denboran zehar chirp-aren frekuentzia nola handitzen edo txikitzen den adierazten digu. Seinalea interferentzien aurrean sendoagoa izatea egiten du.

Erabilitako chip kopurua 2^{SF} bitartez kalkulatzen da, hau da, SF10eko transmisio baten beraz 1024 chip/symbol erabiliko ziren. SFa 6tik 12ra aldatzeko aukera dago, baina kontutan hartzekoa da, SFa gorantza doan heinean, transmisio iraupena eta ondorioz, kontsumo energetikoa ere gorantza egiten dutela.

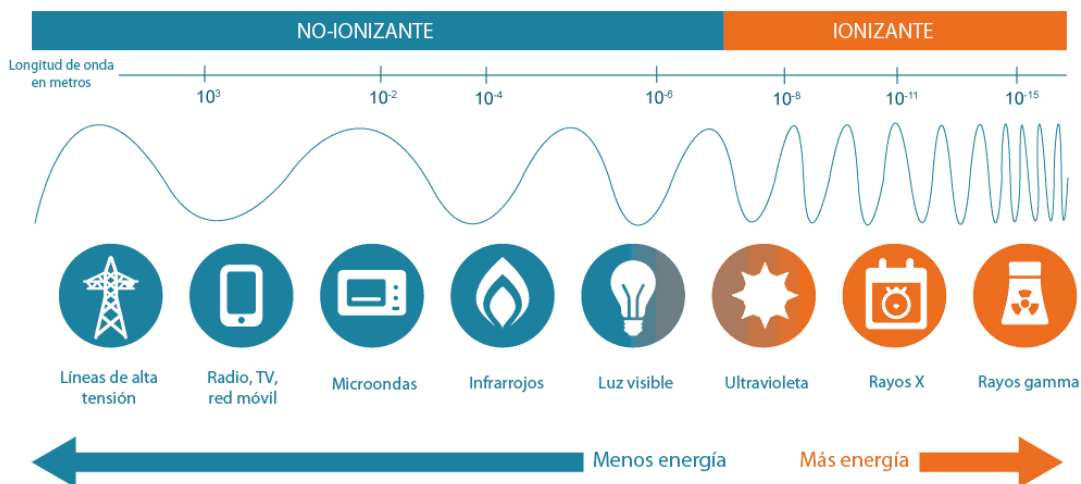
- *Bandwidth (BW)*: BWa erabiltzen ari den kanalaren frekuentzia zabalera da. SFaren kontrara, BWa handitzeak airean igarotako denbora murrizten du, baina zarataren potentzia handitzea dakar. Datuak BWaren abiadurara bidaltzen dira, horregatik 500 kHz-ko banda-zabalerarekin bidaliz gero, 500 kchip/s-ko abiadura jarraituko du seinaleak.
- *Coding Rate (CR)*: CRa LoRa-k babes gisa eskaintzen duen Forward Error Correction-a da, balio hauek hartu ditzakeena: 4/5, 4/6, 4/7, 4/8.
- *Payload*: datu byte-ak dira, transmititu nahi den informazioa.

Parametro guzti hauen garrantzia bi arrazoi nagusi ditu: bata, transmititutako potentziak (TP) edozein gorputzek jasoko duen potentzia handiagoa edo txikiagoa izatea eragiten duela. Bestea, eta gainerako parametroek, energia hori igortzen eta jasotzen egongo diren denboran eragina dutela.

3.6. Esposizioa

Eremu elektromagnetikoak (EEM) erabiltzen dituzten teknologia berriek, onura asko ekarri dizkiete gizakiei, hala nola, telekomunikazioetan, energia transmisioan, industrian, etxebizitzetan eta medikuntzan. Zenbait ikerketek EEMek osasunerako kaltegarriak izan litezkela diote, nahiz eta gaur egun, oraindik ez den ezer frogatu. Hala ere, segurtasun neurri eta arauak definitzeko asmoa adostu da zientziaren munduan, horren ardura erakunde erregulatzailerak eta estandarizatzaileei egokitu zaie.

Erradiazio ionizatzaileek sor ditzaketen kalteak ezagunak dira, baina ez-ionizatzaileen inguruko kezka handituz joan da azken urteotan, horien garapenarekin eta erabileraren hazkundearekin batera.



Irudia 3-9. Erradiazio motak uhin luzearen arabera [17]

LoRa-k komunikazioetara bideratutako frekuentzia ez-ionizatzaileetan (3 kHz-300 GHz) lan egiten du, zehazki, Europar Batasuneko (European Union - EU) bandan, 868 MHzko Industrial Scientific and Medical (ISM) bandan.

Irrati-frekuentzia eta mikrouhinen EEMak neurtzeko honako magnitude eta unitateak erabiltzen dira [18]: eremu elektrikoaren intentsitatea (E) volt zati metrotan (V/m)-tan neurtzen dena, eta eremu magnetikoaren intentsitatea (H) ampere zati metrotan (A/m) edo teslatan (T) neurtzen dena. Uhinaren uhin-luzera λ (m) eta frekuentzia f (Hz) euren artean uhin elektromagnetikoen abiaduraren bitartez erlazionatuta daudelarik c (300.000.000 m/s). Potentzia dentsitatea S (W/m^2), E eta H-rekiko perpendikularki hedatzen dena.

Uhin hauek gorputz bat zeharkatzean, gorputz honen propietate dielektrikoen arabera, gorputz honek seinalearen zati bat edo osoa xurgatuko du, erradiazio ez-ionizatzailen eremu elektromagnetikoen sistema biologikoeekin dituzten interakzioengatik. Hau neurtzeko Xurgapen Tasa Espezifiko (Specific Absorption Ratio - SAR) magnitudea erabiltzen da (W/kg). SAR, gorputzak denbora unitateko xurgatzen duen energia, potentzia (W), masa unitateko (kg) da.

Gorputzek duten esposizioa kontrolpean edukitzeko, arauak sortzen dira, igorpen parametro nagusiak baldintzatzen dituztenak hauek dira:

- Baimendutako esposizio maximoa, frekuentzia banda zehatz baterako
- Zein lekutan eta zein baldintzatan erabili daitezkeen erradiatzen duten sistemak
- EEMa ezaugarritzeko jarraitu beharreko protokolo eta jarraibideak definitzen dituzte, balio fidagarriak lor daitezzen.

3.6.1. SAR

Specific Absorption Ratio-a (SAR) gorputz ehunek xurgatzen duten irrati-frekuentzia (Radio Frequency - RF) energia kantitatearen neurketa edo koefizientea da. Magnitude hau, watt kilogramoko (W/kg) unitateetan neurtzen da, hau da, gorputzak bere masarekiko jasotzen duen potentzia da, energia elektromagnetiko iturri zehatz baterako. Gorputzean barneratzen den potentzia neurtzen du, eta potentzia transmitituaren, erabilitako antenaren, ingurunearen eta abarren arabera da. SAR arauak eta emisio limiteak zehazteko energia dosiak neurtzen dituen erreferentzia magnitudea da.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protectionek (ICNIRP) bi motatako SAR desberdintzen ditu:

- *Gorputz osoko SARA*: erradiazioaren iturria distantzia batera dagoenean eta igorritako potentzia gorputz osoan jotzen duenean.
- *Zonalde bateko SARA*: elementu erradiatzailea gorputzetik hurbil dagoenean eta erradiazioa, gorputzaren zonalde batek bakarrik jasotzen duenean.

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dU}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dU}{\rho dv} \right)$$

Edo honela sinplifikatuz:

$$SAR = \frac{\sigma \cdot E^2}{\rho}$$

Non:

$$\begin{aligned} \sigma &= \text{materialaren konduktibitatea} \rightarrow \frac{S}{m} \\ E &= \text{Eremu elektrikoaren balio efikaza} \rightarrow \frac{V}{m} \\ \rho &= \text{materialaren masa dentsitatea} \rightarrow \frac{kg}{m^3} \end{aligned}$$

SARa 100kHz eta 100 GHz-ko tartean definituta dago, tarte hau erradiazio espektro ez-ionizatzaile gunean aurkitzen da, beraz, erradiazioa hauek ez dute gorputzen konposizioan eraginik, baizik eta, ehunek energia xurgatu eta energia termikoan bihurtzen dute [19].

$$SAR = C_i \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

Non:

C_i → Gorputzaren berotze gaitasuna ($\frac{J}{kg \cdot K}$)

ΔT → Tenperatura hazkundera (K)

Δt → Denbora hazkundera edo iraupena (s)

Gorputz osoko SARa efektu termikoak eta gorputz horrek jasaten duen esposizio irratielektrikoak erlazionatzeko onartua dago [19]. Sistema bat ebaluatu eta erradiazio baldintza edo egoera zehaztetan, gehiegizko energia xurgatzeak aztertze zonaldeko SARak interesgarriak dira, adibidez, gorputza sistema erradiatzailetik hurbil dagoenean, gorputzaren gune txikietan aztertu ohi da.

Eremu elektriko eta magnetikoek materialen kargarengan eragiten dute, adibidez giza-ehunetan. Ehunek propietate dielektrikoak dituzte, eta eremu hauen eraginpean egoteagatik propietate dielektrikoetan aldaketak jasan ditzakete [20].

SARen balioak zenbait faktoreren arabera izan ohi dira:

- Eremu erasotzailearen parametroak, hala nola, frekuentzia, intentsitatea, polarizazioa, aztertzen ari den gorputzaren posizioa eta distantzia (eremu hurbilean edo eremu urrunean).
- Jasaten duen gorputzaren ezaugarrien arabera: tamaina, barne eta kanpo geometria, ehun desberdinen propietate dielektrikoak...
- Inguruko gorputzen eraginak: erreflexioak...

Frekuentziak eragina du lortzen diren emaitzetan:

- 1kHz-100kHz bitarteko frekuentziek korrante dentsitateak sortzen dituzte - J (A/m²)- eta barneko eremu elektrikoak -E(V/m)- ere, duten barneratze handiagatik. Honek nerbio-sistema estimulatu dezake.
- 100kHz-10GHz bitarteko frekuentzietan, gorputzak energia elektromagnetikoa xurgatzen du, eta xurgatutako energia hori bero modura xahutzen da. Xurgatutako energia SAR (W/kg) magnitudearen bidez adierazten da, eta esposizio indartsu batek ehunetan kalteak sor ditzake.
- 10 GHz-300 GHz bitarteko frekuentziek penetrazio baxua dutenez, ehunaren gainazalean xurgatzen da daramaten energia elektromagnetikoa. Gainazalean denez potentzia dentsitatean adierazten da S (W/m²) eta, aurrekoaren era berera, bero modura disipatzen da. Gainazalean kalteak sor ditzake.

ETSIren araudiaren arabera European, nodoek denboraren %1 egon daitezke datuak bidaltzen eta gateway-en kasuan, denbora hori %10era heldu daiteke. Ehuneko hori lan-zikloa adierazten du, hau da, kanala okupatzeko limitea da, denek baliabidea erabiltzea

ahalbidetzen duena [21]. Lan-zikloa (*duty-cycle*) aktibo dagoen denboraren eta periodo edo seinale osoaren iraupenaren arteko erlazioa da:

$$T = \frac{t_{active}}{t_{tot}} \cdot 100 [\%]$$

Beste mugetako bat potentzia igorritakoarena da, 14 dBm-ko potentzia transmitituta limitatua dagoena.

3.6.2. Esposizioaren mugak

Langilearen esposizio eta jende arruntaren esposizioa

Lanean esposizioa jasaten duen jendea, baldintza eta egoera ezagunetan egoten dira erradiaziopean, egoeraren arrisku posibleak eta hartu beharreko neurriak ezagutzen dituzte. Jende orokorra berriz, edade eta osasun-egoera ugarietakoak dira, eta zenbait pertsona sentikorrak izan daitezke. Jende arruntak eremu elektromagnetikoen (EEM) esposiziotik babesteko edo esposizio hori txikitzeko neurriak hartzea ez da arrunta. Guzti horiek aintzat hartuz egin ohi dira mugak, eta horiek dira jende orokorraren mugak murrizagoak izatearen arrazoia.

Oinarrizko mugak eta erreferentzia mailak

Mugak, osasunean duten eraginean oinarritzen dira [22] eta oinarrizko mugak izena hartzen dute. Korrante dentsitatea, SAR eta potentzia dentsitatea magnitudeak erabiltzen dira limite horiek definitzeko, eta frekuentziaren menpekoak dira. Ondorio kaltegarriak saihestu nahi badira beharrezkoa da limite hauek ez gainditzea.

“Erreferentzia-mailak” berriz neurtutako balioekin konparatzeko ematen dira, honela, erreferentzia-mailetan zehazten direnak betez gero, oinarrizko mugak bermatzen direla ziurtatzen da. Beraz, neurtutako balioak erreferentzia-mailak gainditzen badituzte ez dute zertan oinarrizko mugak gainditu, baina kasu horietan, oinarrizko mugen azterketa sakonago bat behar izango da.

EEMek gizaki eta animalietan dituzten eragin biologikoei buruz informazio gutxi dago. Horregatik ematen diren balio hauek etorkizunean desberdinak izan daitezke.

Oinarrizko mugak

Zenbait oinarri zientifiko erabili ziren oinarrizko mugen zehaztapenean, frekuentzia tarte desberdinetan banandurik:

- **1 Hz eta 10 MHz artean:** mugak korrante dentsitate magnitudearen bidez ematen dira, nerbio-sisteman egon ahal diren kalteak ebitatzeko asmoarekin.
- **100 kHz eta 10 GHz artean:** SAR magnitudea erabiltzen da kasu honetan, gorputzak edota gorputzaren gune batek jasan dezakeen berotzea saihesteko.

- 10 eta 300 GHz artean: potentzia dentsitatean ematen dira, ehunetan edota gorputzaren gainazalean gehiegizko berotzeak saihesteko.

ICNIRPek [22] oinarrizko muga hauek ematen ditu:

Taula 3-1. Esposizio oinarrizko mugak

Esposizioaren egoera	Frekuentzia tartea f (Hz)	Korronte dentsitatea buruan eta gorputzenburuan J(mA m ⁻²) (rms)	Gorputz osoko batzbesteko SAR (W·kg ⁻¹)	SARa buruan eta gorputzenburuan (W·kg ⁻¹)	Guneko edo zonaldeko SAR (gorputz-adarretan) (W·kg ⁻¹)
Esposizio profesionala	0 - 1 Hz	40	--	--	--
	1 - 4 Hz	40/f	--	--	--
	4 Hz - 1 kHz	10	--	--	--
	1 - 100 kHz	f/100	--	--	--
	100 kHz - 10 MHz	f/100	0,4	10	20
	10 MHz - 10 GHz	--	0,4	10	20
Jende arruntaren esposizioa	0 - 1 Hz	8	--	--	--
	1 - 4 Hz	8/f	--	--	--
	4 Hz - 1 kHz	2	--	--	--
	1 - 100 kHz	f/500	--	--	--
	100 kHz - 10 MHz	f/500	0,08	2	4
	10 MHz - 10 GHz	--	0,08	2	4

10 eta 300 GHz arteko frekuentzietan potentzia dentsitatearen arabera ematen dira:

Taula 3-2. Esposizio oinarrizko mugak 10 -300 GHz artean

Esposizio mota	Potentzia dentsitatea (W·m ⁻²)
Esposizio profesionala	50
Jende orokorra	10

Erreferentzia-mailak

Erreferentzia-mailak oinarrizko mugetatik abiatuz kalkulatzen dira, eredu matematikoak eta ikerketen emaitzak erabiliz. Balio hauek erreferentzia modura erabili ohi dira, baizik eta, oinarrizko-mugak ez gainditzeko asmoarekin kalkulatu dira.

Esposizio profesionala, erreferentzia-mailak:

Taula 3-3. Esposizio erreferentzia-mailak (langilarentzat)

Frekuentzia tartekak	Ereму elektrikoaren intentsitatea E (V/m)	Ereму magnetikoaren intentsitatea H (A/m)	Fluxu magnetikoaren intentsitatea (T)	Potentzia dentsitatea S(Wm ⁻²)
0 - 1 Hz	-	$1,63 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	-
1 - 8 Hz	20 000	$1,63 \cdot 10^5 / f^2$	$2 \cdot 10^5 / f^2$	-
8 - 25 Hz	20 000	$2 \cdot 10^4 / f$	$2,5 \cdot 10^4 / f$	-
0,025 - 0,82 kHz	$500 / f$	$20 / f$	$25 / f$	-
0,82 - 65 kHz	610	24,4	30,7	-
0,065 - 1 MHz	610	$1,6 / f$	$2 / f$	-
1 - 10 MHz	$610 / f$	$1,6 / f$	$2 / f$	-
10 - 400 MHz	61	0,16	0,2	10
400 - 2000 MHz	$3 \cdot f^{0,5}$	$0,008 \cdot f^{0,5}$	$0,01 \cdot f^{0,5}$	$f / 40$
2 - 300 GHz	137	0,36	0,45	50

Jende arruntarentzako erreferentzia-mailak:

Taula 3-4. Esposizio erreferentzia-mailak (jende arruntarentzat)

Frekuentzia tartekak	Ereму elektrikoaren intentsitatea E (V/m)	Ereму magnetikoaren intentsitatea H (A/m)	Fluxu magnetikoaren intentsitatea B (T)	Potentzia dentsitatea (Wm ⁻²)
0 - 1 Hz	-	$3,2 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	-
1 - 8 Hz	10 000	$3,2 \cdot 10^4 / f^2$	$4 \cdot 10^4 / f^2$	-
8 - 25 Hz	10 000	$4000 / f$	$5000 / f$	-
0,025 - 0,8 kHz	$250 / f$	$4 / f$	$5 / f$	-
0,8 - 3 kHz	$250 / f$	5	6,25	-
3 - 150 kHz	87	5	6,25	-
0,15- 1 MHz	87	$0,73 / f$	$0,92 / f$	-
1 - 10 MHz	$87 / f^{0,5}$	$0,73 / f$	$0,92 / f$	-
10 - 400 MHz	28	0,073	0,092	2
400 - 2000 MHz	$1,375 \cdot f^{0,5}$	$0,0037 \cdot f^{0,5}$	$0,0046 \cdot f^{0,5}$	$f / 200$
2 - 300 GHz	61	0,16	0,20	10

4. Helburuak eta irismena

Sare hauek handituz joango dira, gero eta datu-fluxu eta uhin elektromagnetiko gehiago egonik; ondorioz, beharrezkoa da bidez hainbat aspektu aztertzea: gailu askok aldi berean lan egin ahal izatea, pertsonak jasaten dituzten esposizio mailak bermatzea, etab.

Proiektu honen helburua, IoT sareetan egongo diren esposizioak neurtzean eta ezaugarritzea ahalbidetzen duen metodologia garatzean oinarritzen da. Bestalde, proiektu honek zehazki, konfigurazio desberdinak erabilita, esposizio mailak aztertzea eta horretarako jarraibideak diseinatzea du helburu nagusia. Honetarako neurketak eta simulazioak egingo dira, teknologia aztertu eta aldi berean, horiek egiteko jarraibideak sortuz. Horrela teknologia ebaluatzea eta arazoak ikuskatzea ahalbidetuko du, baita eremu elektromagnetiko esposizio mailen legedia betetzen dela bermatzea ere.

Sakonduz:

4.1. Helburu nagusia

Proiektu honek helburu nagusizat, gorputz batek xurgatzen duen esposizioa aztertzea eta horretarako beharrezkoa den metodologia bat garatzea ditu. Lortzeko neurketak eta simulazioak egingo dira, neurketen datuak prozesatuko dira eta simulazioen emaitzekin alderatu ostean ondorioak aterako dira. Azkenik, metodoaren erabilgarritasuna eta funtzionamendua baieztatzeko eta ebaluatzeko asmoarekin.

4.2. Helburu partzialak

Helburu partzialak hauek dira:

4.2.1. LoRa-ren funtzionamendua aztertzea

LoRa-k orokorrean dituen parametro konfiguragarriak eta horiek transmisioan duten eragina aztertuko dira. Behin parametro horiek identifikatu eta ulertu direla, transmisioan eragina duten zenbait parametro hartuko dira hainbat konfigurazio desberdin egin ahal izateko. Esposizioaren neurketak eta simulazioak horiek kontuan hartu egingo baitira.

Parametro konfiguragarri hauek gailuz gailu desberdinak izan daitezke, beraz, gailu zehatz batekiko egingo dira konfigurazioen zehaztapena.

4.2.2. LoRa-ren seinalearen neurketak egin

Gailuaren konfigurazio batzuk erabiliz eta distantzia zehatz batera edo batzuetara neurketak egingo dira espektro analizatzaile baten bitartez. Neurketa horiek ".csv" (comma-separated values) luzapeneko fitxategietan erregistratuko dira.

Konfigurazio bakoitzeko denboran eta frekuentzian egingo dira neurketak. Denboran paketeak airean behar duen denbora aztertzeko eta frekuentzian igorritako kanaleko batz-

bezteko potentzia neurtzeko, bi neurketa horiek esposizioaren balioak neurtzeko konbinatuko baitira.

4.2.3. Neurketen prozesamendua eta analisisa gauzatu

Espektro analizatzaile bidez lortutako “.csv” fitxategiak Matlab programaren bidez prozesatuko dira. Horregatik beharrezkoa izango da fitxategiek dakartzaten datuak aztertzea eta horiek inportatzeko programa batzuk egitea.

Inportatutako datuetatik bi elementu nagusi beharrezko aztertze programak sortu beharko dira:

- Seinalearen iraupen aktiboa eta datu transmisio periodoa neurtzen dituen programa, lan-zikloa (duty-cycle) kalkulatu ahal izateko.
- Transmisorako erabilitako kanalaren potentzia neurtzen duen programa, kanalaren banda-zabaleraren arabera egiten duena.

Azkenik beharrezkoa izango da datuak aztertze Excel tauletara esportatzeko programa bate egitea.

4.2.4. Simulazioak egiteko antena diseinatu eta optimizatu

Erabilitako LoRa gailuak dakarren antena ezaugarritzea beharrezkoa da, behin hori eginda CST Studio Suite programaren bidez diseinu eta ezaugarri berdinak dituen antena bat diseinatuko da, alegia, erresonantzia frekuentzia berdinak eta antzerako erradiazio diagrama duen antena.

Antena simulatua, ezaugarri aldetik antena errealarekin ahalik eta antzekoen izaterarte optimizatuko da.

4.2.5. Esposizio simulazioak egin

Software bidez diseinaturiko antena erradiatzaile modura jarriko da eta gorputz baten eredia jarriko da jasotzen duen erradiazioa aztertu ahal izateko, aurretik neurketak egiteko zehaztutako egoera bat simulatuz.

Gorputz eredia eskuz diseinatua edo inportatua izango da.

4.2.6. Neurketen eta simulazioen emaitzak bildu

Neurketen eta simulazioen emaitzak Excel-etan bilduko dira horiek aztertze, eta konfigurazio desberdinek potentzian eta denboran duten eragina konprobatze asmoarekin.

4.2.7. Neurketen eta simulazioen emaitzak konparatu, aztertu eta ondorioztatu

Neurketetatik eta simulazioetatik lortutako emaitzak multzokatu egingo dira, analizagarriak izanda daitezzen. Gainera, datuak konparagarriak izatearren, behar dituzten bihurtetako aplikatuko zaizkie.

Behin hori lortu dela, sakon aztertuko dira legediak jarrita dituen mugak gainditzen ez direla aztertzeke.

5. Onurak

Proiektu honek hainbat onura dakartza arlo ezberdinetan, orain arlo nagusietan lortuko ziren onurak azalduko dira.

5.1. Gizarte onura

Giza esposizioaren neurketa eta mugak gainditzeko egoera posibleak aztertuko dira, hauek txosten informatiboak zabaldu ahal izatea ahalbidetzen du. Honela gizartea, udaletxeak edota beste erakunde eta azpiegiturak informatuak mantendu daitezke. Onura honen eragina handia da, gaur egun, dagoen erradiazio elektromagnetikoaren inguruko kezkarengatik.

5.2. Onura zientifikoa

Proiektuaren onura nagusia arlo honetan kokatzen da, metodologia bat diseinatzea eta gauzatzea ditu helburu. Etorkizunari begira, metodologia baten garapenak garrantzi handia du, teknologia bera beste egoeratan aztertzea ahalbidetzen duelako eta baita beste teknologia batzuk ebaluatzeko aukera ematen duelako.

Teknologia honen parametro aldaketa desberdinak erabiliz analizatzeko aukera emango du, ikerketa sakonago bat egiteko edo beste arlo batzuetara zabaltzeko aukera emanez.

5.3. Onura teknikoa

Proiektu honen onura tekniko nagusiak garatutako baliabide eta tresnak izan dira. Hasteko, espektro analizatzaileak sortutako “.csv” luzapeneko fitxategietatik inportatutako datuen, analisia automatikoki egiteko programak emango ditu, alegia, kanaleko potentzia neurtzeko programa, seinale baten periodoa eta iraupen aktiboa kalkulatzeko programa, kalkuluen esportazioa...

LoRa antena baten SW bidezko diseinua eta LoRa-k lan egiten dituen frekuentzietan lan egiteko optimizazio lanak.

6. Metodologia

Atal honetan lanean zehar egin diren pausak azaltzen dira. Lan honek esposizioa neurtzeko eta simulazioekin konparatzeko aukera ematen duen metodologia bat garatzea du helburu, gehien bat LoRa teknologia berria ebaluatzeko balioko duena.

Lanarekin hasi aurretik beharrezkoa izan da LoRa teknologiari buruz artikulua irakurtzea, baita lege eta esposizio mugen inguruen irakurtzea ere. Horretarako jarraitu diren pausoak hauek izanik:

6.1. Emisio parametroen azterketa (LoRa Evaluation Kit 800)

LoRa teknologiaren oinarriak eta ematen dituen aukerak ulertzeko asmoarekin, lehenik eta behin, gailu honen azterketa sakon bat burutu da.

Fabrikatzaile gehienek LoRa gailuak antzera lan egiten dute, eta parametro konfigurarri komunak izaten dituzte, hala ere, bakoitzak gailuen kontrolerako softwareak (SW) edota kontrolerako konexio protokoloak eskaintzen dituzte. Kasu honetan, Microchip Technology Inc. fabrikatzailearen LoRa Evaluation Kit 800 gailua erabili da. Microchip-ek gailuen erabilera errazteko asmoarekin LoRa Development Utility izeneko erabiltzaile interfaze bat ematen du.

Neurketak egiteko Kit-aren RN2483 modulua erabili da, modulu hau datu transmisore modura jarritz; jarraian, modulu honek ematen dituen aukerak azalduko dira. Aurretik aztertu den eta artearen egoeran azalduta dagoen bezala, transmisioan eragina duten eta proiektu honetan garrantzi berezia duten parametro nagusiak dira:

- Transmisio potentzia (TP): jasoko den potentzian eragina.
- Frekuentzia Eramalea (Carrier Frequency - CF): espazio libreko galeretan eta antenaren k parametroan eragina.
- Spreading Factor (SF): ToA-n eragina.
- Bandwidth (BW): ToA-n eta zaratan eragina.
- Coding Rate (CR): ToA-n eragina.
- Payload: ToA-n eragina.

Evaluation Kit 800eko RN2483 modulua parametro hauek aldatzen uzten du, Seinalea airean dagoen denbora eta jasotako potentzia garrantzitsuak dira esposizioaren neurketan, horregatik, SWak aldatzea baimentzen dituen parametroak hauek dira:

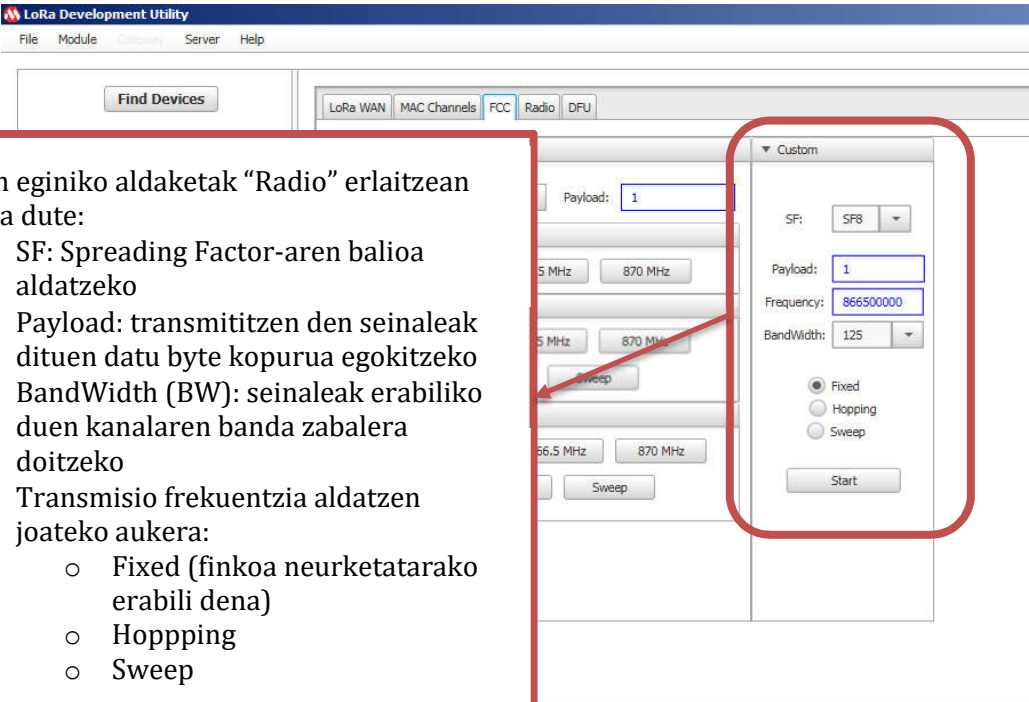
Taula 6-1. Parametro konfiguragarriak

Payload	Min.	0	BW (kHz)	BW1	125
				BW2	250
				BW3	500
	Max.	127	-CF-Frecuency (Hz)	Min.	863.000.000
				Max.	870.000.000
Preamble length	Min.	0	SF	Min.	7
				Max.	12
	Max.	65535	P _{tx}	Min.	-3
				Max.	15

Ondorengo irudian ikus daitezke aurretik izendatutako parametro horiek zein tokitan alda daitezkeen:

Hemen eginiko aldaketak “Radio” erlaitzean eragina dute:

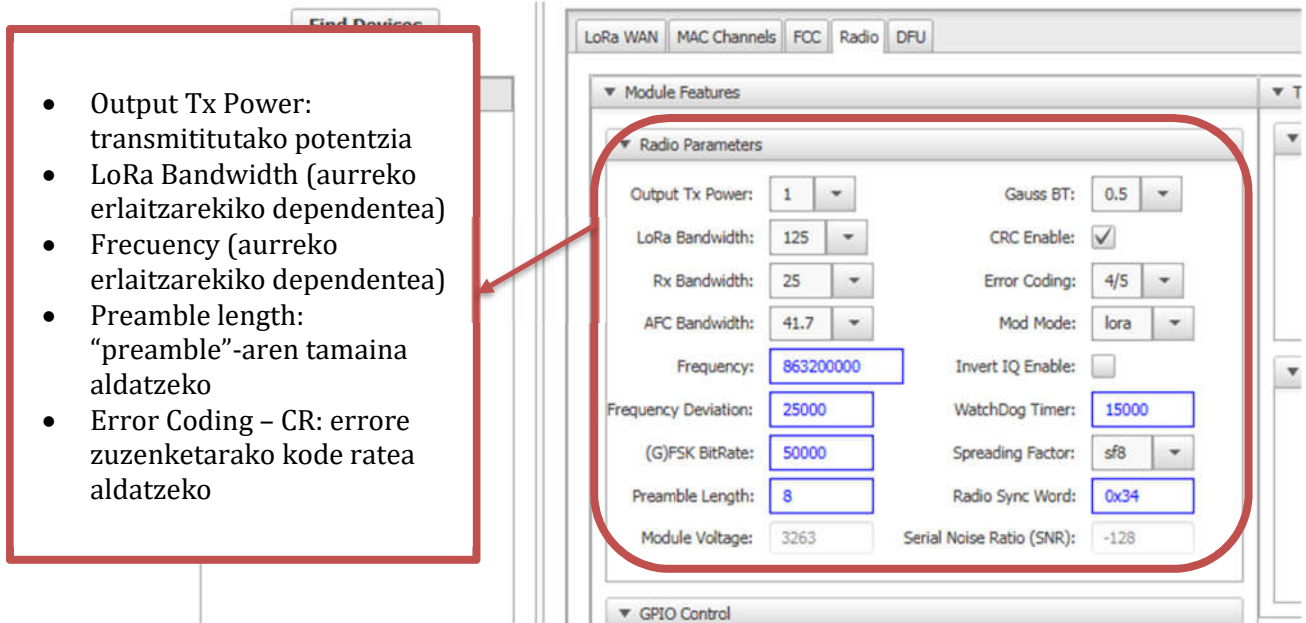
- SF: Spreading Factor-aren balioa aldatzeko
- Payload: transmitzen den seinaleak dituen datu byte kopurua egokitzeko
- BandWidth (BW): seinaleak erabiliko duen kanalaren banda zabalera doitzeko
- Transmisio frekuentzia aldatzen joateko aukera:
 - Fixed (finkoa neurketatarako erabili dena)
 - Hopping
 - Sweep



Irudia 6-1. FCC erlaitza

FCC erlaitzak, zehaztutako konfigurazioarekin etengabe transmititzeko aukera ematen du. Igortzen hasteko “Start” botoiari eman behar zaio, baina horretarako, lehenago “Radio” erlaitzeko balioak desiratutako balioekin konfiguratu behar dira.

Gainerako transmisio parametroak “Radio” erlaitzean aldatzen dira:



- Output Tx Power: transmititutako potentzia
- LoRa Bandwidth (aurreko erlaitzarekiko dependentea)
- Frecuency (aurreko erlaitzarekiko dependentea)
- Preamble length: “preamble”-aren tamaina aldatzeko
- Error Coding – CR: errore zuzenketarako kode ratea aldatzeko

Irudia 6-2. Radio Erlaitza

Behin konfigurazio posibleak aztertu direla, hurrengo konfigurazioak erabiltzea erabaki da, ToA-ean eta jasotako potentzian eragina duten parametrok aldatuz:

Taula 6-2. Konfigurazioen parametroak

Payload	1	BW (kHz)	BW1	125
			BW2	250
			BW3	500
Preamble length	8	-CF- Frecuency (Hz)	F1	864.500.000
			F2	867.000.000
			F3	868.500.000
Distantzia (m)	5	SF	SF7	7
			SF10	10
			SF12	12
		P_{tx}	P1 _{tx}	-3
P2 _{tx}	8			
P3 _{tx}	14			
P4 _{tx}	15			

Taula 6-2-ko ezker aldeko balioak (laranjaz) konstante mantendu dira, eskuinaldekoekin berriz konbinazio desberdinak egin dira neurketak egiteko. Neurketa horien konfigurazioaren adibide bat ematen da hemen:

Taula 6-3. Konfigurazio adibideak

BW (kHz)	Ptx (dBm)	SF	CF (MHz)	Distantzia (m)	Payload	Preamble
125	-3	7	864,5	X	1	8
500	-3	7	864,5	X	1	8
125	14	7	864,5	X	1	8
500	14	7	864,5	X	1	8
125	-3	10	864,5	X	1	8
500	-3	10	864,5	X	1	8
125	8	10	867	X	1	8
500	8	10	867	X	1	8

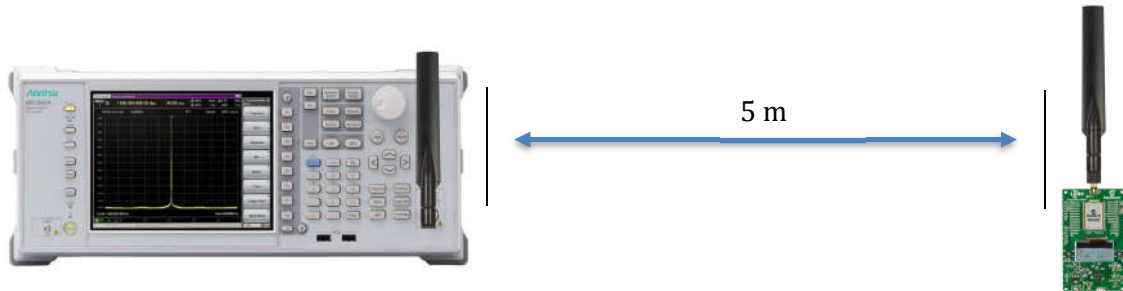
Aurreko ilararekin konparatuz aldaketa jasan duten parametroak, gorriaz markatzen dira Taula 6-3. Konfigurazio adibideak-an. Konfigurazio aldaketak, definitu modura egiten badira, distantzia bakoitzeko, 72 kasu desberdin egongo dira.

6.2. Neurketak Anritsu Espektro analizatzailearekin

Lanean zehar zenbait alditan azaldu den modura, pakete bat airean dagoen denbora garrantzitsua da, hau da, paketearen ToA. ToA, seinalea aktibo dagoen denbora da, eta ondorioz seinalea transmititzen ari den denbora da. Igorritako potentzia denbora tarte horretan izango da, horregatik, seinalearen denbora analisia egitea beharrezkoak dira denboraren domeinuan neurketak egitea.

Esposizioa gorputzak jasotzen duen potentziaren arabera da. Hori dela eta, kanalaren potentzia neurtu ahal izateko frekuentziaren domeinuan neurketak egin dira.

Neurketa hauek urruneko eremuan egin dira, antena txikia izanda, distantziak 3λ baino handiagoa izan behar du, horregatik, nahikoa izango da espektro analizatzailea 1 m inguruko distantziara egotea. Maiztasuna 863 MHz denean uhin-luzera handiena lortzen baita (0,348 m), eta kasu honetan urruneko eremuan egoteko distantzia minimoa $3\lambda = 1,043$ m baitira. Ondorioz, neurketak egiteko distantzia 5m izan da:



Irudia 6-3. Neurketen ingurunea

Neurketak egiteko, LoRa evaluatio kit-eko RN2483 modulua erabili da igorle moduan, modulu honek definituriko konfigurazioen arabera konfiguratuko da, eta konfigurazio zehatz bakoitzeko neurketa bat egin da Anritsu MS2480A espektro analizatzailearekin. Neurketa hauek, seinalearen 10001 lagin dituzten fitxategietan erregistratu dira, hau da, seinalearen traza gorde da, lagin bakoitzeko potentzia (dBm) balioa gordez.

Hasi aurretik, hainbat proba egin dira, Anritsuk seinaleak erregistratzeko ematen zituen aukerak eta esportatzen duen fitxategiaren egitura aztertzeko. Anritsu-k “.csv” (comma separated values) luzapeneko fitxategietan gordetzeko aukera ematen du. Fitxategi hauek Excel bitartez ireki daitezke; gainera Matlab-ek horiek funtzio batzuen bitartez irakurtzea eta inportatzea ahalbidetzen du.

Frekuentzia domeinuan neurtzeko espektro analizatzailean, *CF* eta *Span*-a (bistaratzen ari den frekuentzia tartearen tamaina) definitu behar dira, edota *Start Frequency* eta *Stop Frequency*-ak.

Denborarenean berriz, *Span Zero* moduan jarri behar da analizagailua, eta *Sweep Time*-a doitu behar da seinalea era egokian ikusteko.

Kontutan hartu behar da, gero prozesamendurako baliagarriak izan daitezkeen balio guzti hauek CSV fitxategiak berean gordetzen direla.

6.2.1. Frekuentziaren domeinuan

Frekuentziaren eremuan eginiko neurketen erregistroak datu hauek gordetzen ditu.

Trace, Start Freq(Hz), Stop Freq(Hz)	Trace-A, 861500000, 867500000
RBW(Hz), SWT(ms), ATT(dB)	300000, 5, 10
Detection, Trace Points	RMS, 10001
Ref Level(dBm), PreAmp	-10.00, Off
Storage Mode-A	Max Hold
Wave Data(dBm)-A	-79.704 -79.813 -79.692 -79.631

Irudia 6-4. CSV fitxategiak frekuentzia eremuan

- Urdinez bereizitako parametroak berdin mantendu dira frekuentzia neurketa guztietarako, hauek espektro analizatzailean bertan alda daitezke:
 - *Detection*: balioak nola hartu edo detektatzen dituen definitzeko aukera ematen du. Kasu honetan RMS (root mean square), hau da, balio efikaza kalkulatu du.
 - *Trace Points*: zenbat lagin hartzen dituen zehazten du. Kasu honetan: 10001
 - *Storage mode*: seinalearen zein balio erregistratzen eta mantentzen diren esaten du. Kasu honetan Max Hold modura konfiguratuta dago, honela, seinalearen ekorketa bakoitzeko maximoa erregistratzen joango da.
 - Neurketak prozesatzeko erabili ez diren parametroak (gorriz):
 - *SWT (ms)*: *sweep-time*-a seinalea eskaneatzen dagoen denbora ematen digu, hau da, seinalea jasotzen egon den denbora esaten du. Frekuentziaren domeinuan, seinalea zenbateko denboran zehar jasotzen egon den esaten du, baina, ez du laginen banaketan eraginik. Kasu honetan, *Span*-a eta *Trace Points* kopurua dira laginen banaketan eragina edukiko dutenak.
- *RefLevel (dBm)*: seinalea pantailan ikuskatzeko erabiltzen den erreferentzia maila da.
 - *PreAmp*: seinalea amplifikatu nahi bada.
 - *ATT (dB)*: atenuazioa, seinaleak espektro analizatzailea hondatu ez dezan erabiltzen duen babesa.
- Horiz neurketa bakoitzaren intereseko parametroak daude, gero Matlab-eko programak inportatu eta erabili beharko dituenak:
 - *Start freq (Hz)*: pantailan momentuan bistaratzen ari den eta trazan erregistratuko den frekuentzien hasierako balioa.
 - *Stop freq (Hz)*: pantailan momentuan bistaratzen ari den eta trazan erregistratuko den frekuentzien azkeneko balioa.
 - *Wave Data (dBm)*: 10001 baliotun array bat izango da, potentzien balio puntualak dituena.
 - *RBW (Hz)*: ekorketa egiteko erabiltzen den banda-pasako iragazkia da. Hurbileko 2 frekuentzia elkarren artean desberdintzeko kapazitatea definitzen du.

6.2.2. Denboraren domeinuan

Denboraren eremuan eginiko neurketen erregistroak datu hauek gordetzen ditu:

Trace, Freq(Hz)	Trace-A, 868500000
RBW(Hz), SWT(us), ATT(dB)	3000000, 720000, 1)
Detection, Trace Points	RMS, 10001
Ref Level(dBm), PreAmp	0.00, Off
Storage Mode-A	Off
Wave Data(dBm)-A	-38.184 -38.184 -38.188 -38.197

Irudia 6-5. CSV fitxategiak denbora eremuan

- Urdinez bereizitako parametroak berdin mantendu dira denbora neurketa guztietarako, hauek espektro analizatzailean bertan alda daitezke:
 - *Detection*: balioak nola hartu edo detektatzen dituen definitzeko aukera ematen du. Kasu honetan RMStan (root mean square), hau da, balio efikazetan kalkulatu du.
 - *Trace Points*: zenbat lagin hartzen dituen zehazten du. Kasu honetan: 10001
 - *Storage mode*: seinalearen zein balio erregistratzen eta mantentzen diren dio. Kasu honetan itzalita dago, aurreko ekorketan eginiko datuak garbitu eta berriaren balioak gorde ditzan.
 - *RBW (Hz)*: ekorketa egiteko erabiltzen den banda-pasako iragazkia da. Hurbileko 2 frekuentzia elkarren artean desberdintzeko kapazitatea definitzen du.
- Neurketetarako erabili ez diren parametroak:
 - *Ref Level (dBm)*: seinalea pantailan ikuskatzeko erabiltzen den erreferentzia maila da.
 - *PreAmp*: seinalea amplifikatu nahi bada.
 - *ATT (dB)*: atenuazioa, seinaleak espektro analizatzailea hondatu ez dezan erabiltzen duen babesa.
- Horiz neurketa bakoitzaren intereseko parametroak daude, gero Matlab-eko programak inportatu eta erabili beharko dituenak:
 - *SWT (μ s)*: *sweep-time*-a seinalea eskaneatzen dagoen denbora ematen digu, hau da, seinalea jasotzen egon den denbora esaten du. Denboran egiten dugunean, seinalearen laginak hartzen egon den denbora da, lagin horiek (*Trace Points*) denbora horretan banatzen direlarik.
 - *Wave Data (dBm)*: 10001 baliodun array bat izango da, potentzien balio puntualak dituen.

6.3. Neurketa eta datuen prozesatzea

Datuen prozesatzerako Matlab programa erabili da, seinaleen tratamendurako oso erabilgarria den SWa baita. Bi programa nagusi garatu dira, bata denbora domeinuko neurketen prozesamendua gauzatzeko eta beste bat frekuentzia eremurako.

Programa horiek, CSV datu fitxategietatik datuak jaso eta zenbait kalkulu egin ostean, emaitzak Excel dokumentu batera ateratzen dituzte. Aurretik aipatu den moduan, 72 neurketa egongo dira domeinu bakoitzean, bakoitzak konfigurazio zehatz bat duelarik (konfigurazio berdinak jarraituko dira bi domeinuetan).

Konfigurazio bakoitzak bere CSVa edukiko du, neurketa bakoitza jarraituko duen konfigurazioa zehazteko sekuentzia zenbaki bat jarraituko dutelarik. Sekuentzia zenbaki hauek eta dagozkien konfigurazioak, taula baten gorde dira neurketen konfigurazioen erregistroa izateko. Sekuentzia zenbaki bakoitzak konfigurazio bateri dagokio, eta Anritsu bidez trazak grabatzen direnean kode hau jarraitu da, programazioa errazten baitu:

- Frekuentzian: Fx.csv
 - F frekuentziaren eremuan dela adierazten du
 - x sekuentzia zenbakia da
- Denboran: Tx.csv
 - T frekuentziaren eremuan dela adierazten du
 - x sekuentzia zenbakia da

Horrela, Anritsu bidez gordetzea, konfigurazioak jarraitzea eta prozesua automatizatzea errazten da. Hurrengo azpiataletan eremu bakoitzean eginikoa azaltzen da.

6.3.1. Frekuentzia domeinuan

Programa bat garatu da kanalaren banda-zabalera kontutan izanik, kanal horren kanaleko batz-besteko potentzia kalkulatzeko duena. Helburu honetaz aparte, neurketekin konparatzeko aukera emango duen kodea garatu da. Gainera, balio horiek multzokatzeko, ulertzeko, konparatzeko edota etorkizunean berriro ere prozesatzeko aukera emango duen kode bat garatu da:

1. Anritsuk sortzen dituen CSV fitxategietatik parametro desberdinak irteerako aldagai modura itzultzeko ".m"-ak programatu dira, funtzio modura erabili ahal izateko:
 - a. *Start frequency* inportatzeko programa:
`importfileStartFreqHz([fitxategiaren izena])`
 - b. *Stop frequency* inportatzeko programa:
`importfileStopFreqHz([fitxategiaren izena])`
 - c. *RBW* inportatzeko programa:
`importfileRBW([fitxategiaren izena])`
 - d. *Power datuak* inportatzeko programa:
`importfileDatosFroga(FileName)`

2. Kanalaren batz-beste potentsia kalkulatzeko kodea egin da formula honetan oinarrituz:

- a. Horretarako kanalaren laginak bakandu dira eta horietatik kanalaren batz-beste potentsia lortzen da

$$\text{Channel Power} = \frac{BW_{kanala}}{rbw} \cdot \frac{1}{N_{kanala}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{kanala}} P_i$$

$$\text{Channel Power (eskala logaritmikoan)} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{BW}{rbw} \cdot \frac{1}{N_{kanala}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{kanala}} P_i \right)$$

Non:

RBW: Resolution BWa den

BW: kanalaren BWa

N: kanalaren banda zabalerak duen lagin kopurua

P_i: lagin bakoitzaren potentsia balioa

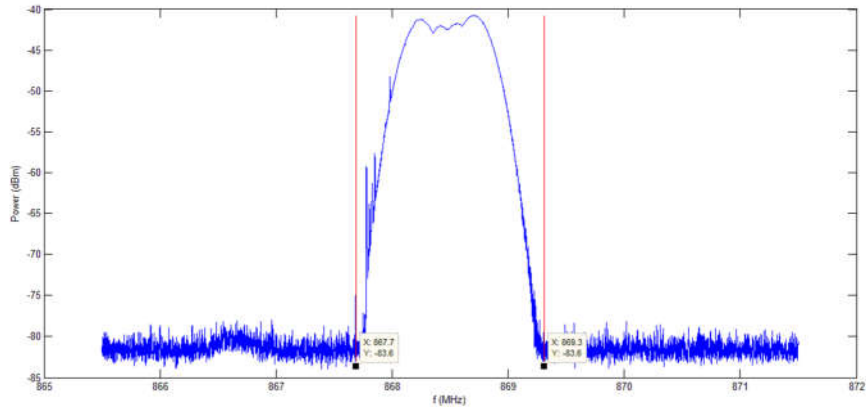
3. Esportazioa Excelera egiteko programa garatu da, ondorengo datuak ilaraz ilara gordetzen dituena:

- Fitxategiaren izena
- Startfreq
- Stopfreq
- Rbw
- Power (channel power)

4. Kanalaren potentsia kalkulatzeko banda-zabalera irudikatu eta zehaztu dira:

Kanalaren potentsia aztertu ahal izateko, beharrezkoa da zein banda-zabaleran kalkulatu den erabakitzea eta zehaztea. Honetarako seinaleak aztertu ostean, seinalea osorik hartzeko beharrezkoak diren banda-zabalerak erabaki dira: kanalaren banda-zabalera BW_{channel}-a 1 MHz-tan jarri da, LoRa BWa 125 kHz-koa duten seinaleentzat, eta 1,62 MHz-koa berriz LoRa BW_{LoRa} 500 kHz duten seinaleentzat. Baizik eta LoRa-k ematen dituen BWak -10 dB-tara baita.

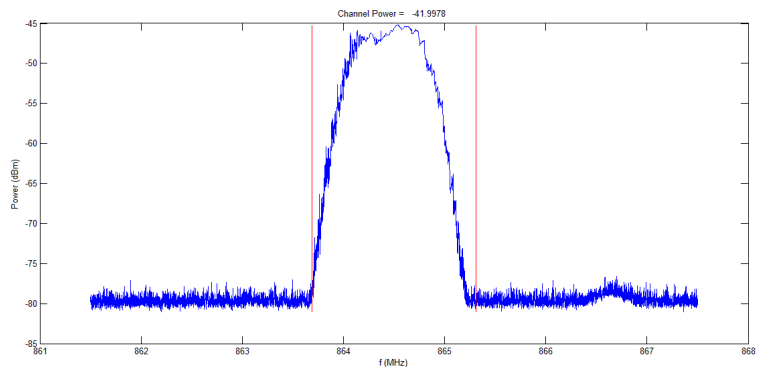
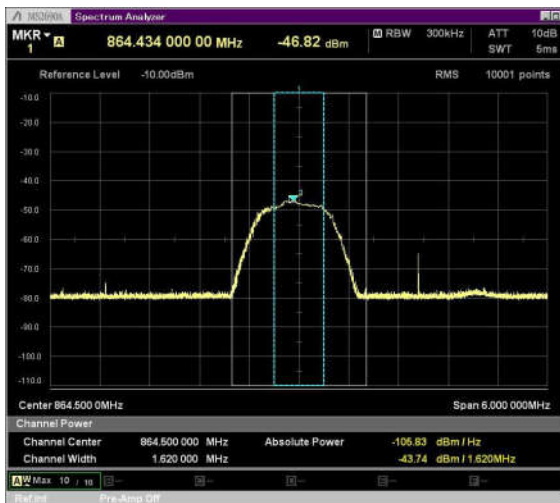
- a. Seinalea bistaratzeko kodea ere gehitu da programaren bertsio baten. Kalkuluak egiteko erabiliko duen banda-zabalera irudikatzen du marra gorrien bidez.



5. Eragiketa hauek barneratzen dituzten bi bertsio sortu dira:

- a. Batak sekuentzia zenbakia eskatzen du, analizatu nahi dugun fitxategia zehazteko aukera ematen duelarik. Bertsio honek, erabakitako sekuentzia zenbakiari dagokion fitxategira jotzen du datuen inportaziorako eta kalkulua egin ostean komando-lerroan emaitza ematen digu eta prozesatutako seinalearen irudia erakusten digu.
- b. Besteak sekuentzia zenbakia automatikoki handitzen doa, fitxategi guztien kanalaren batz-besteko potentzia banan-banan kalkulatu, baina ez ditu seinaleak irudikatzen.

Anritsu eta neurketen arteko konparaketa:



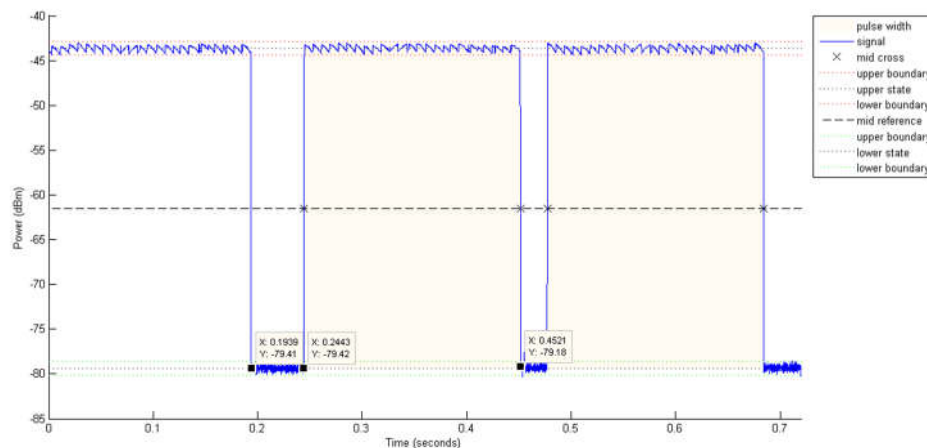
Irudia 6-6. Anritsu VS Matlab konparaketa

6.3.2. Denbora domeinuan

Bigarren programa bat garatu da, programa honen helburuak aurrekoaren berdinak dira, baina kalkuletan du desberdintasun bakarra. Denboraren eremuan bi balio kalkulatzeko programa diseinatu da, ToA (paketea airean ematen duen denbora) eta periodoaren iraupena (seinalea zenbatero bidaltzen den zehatzeko). Horrela lan-zikloa (*duty cycle*) kalkulatu daiteke geroago esposizioaren balioak kalkulatzeko, haztapen-faktore modura erabili ahal izateko.

Definituriko helburuak betetzeko asmoarekin kodea honela egituratuta dago:

1. Frekuentzia domeinuan bezala, Anritsuk sortzen dituen CSV fitxategietatik parametro desberdinak irteerako aldagai modura itzultzeko “.m”-ak programatu dira, funtzio modura erabili ahal izateko:
 - a. *Potentzia* datuak inportatzeko funtzioa garatu da: `importfileDatosFroga(FileName)`
 - b. *SWT (sweep time)* datua inportatzeko funtzioa garatu da: `importfileSWTFroga(FileName)`
2. Seinalearen periodoa eta aktibo dagoen denbora kalkulatzeko Matlab-ek bere liburutegian dituen funtzioak erabili dira:
 - a. *Periodoa* kalkulatzeko: `pulseperiod()`
 - b. *ToA* (iraupen aktiboa) kalkulatzeko: `pulsewidth()`
3. Esportazioa Excelera egiteko programa garatu da, datu hauek ilaraz ilara gordetzen dituen:
 - a. `FileName`
 - b. `sweepTime`
 - c. `Periodoa`
 - d. `ToA`
4. Seinaleak irudikatu ahal izateko aukera ematen duen kodea ere gehitu da:



Irudia 6-7. Neurketa bateko LoRa seinalea denboran

5. Eragiketa hauek barneratzen dituzten bi bertsio sortu dira:

- Zehatz bat kalkuatzeko: Batak sekuentzia zenbakia eskatzen du, analizatu nahi dugun fitxategia zehazteko aukera ematen duelarik. Bertsio honek, erabakitako sekuentzia zenbakiari dagokion fitxategira jotzen du datuen inportaziorako eta kalkulua egin ostean komando-lerroan emaitza ematen digu eta prozesatutako seinalearen irudia erakusten digu.
- Automatikoki kalkuatzeko: Bestea sekuentzia zenbakia handitzen doa fitxategi guztien kanalaren batz-besteko potentzia banan-banan kalkulatu, baina ez ditu seinaleak irudikatzen.

6.4. Neurketen egokitzapena

Atal honetan, neurketen analisia eta datuak legediak dioenarekin kanporagarriak diren balioak lortzeko jarraitu den metodologia azaltzen da.

Neurketak eremu-urrunean egin dira. Seinaleak airetik transmititzen direnez Friss-en ekuazioa jarraitzen dute, hortaz distantzia zehatz batera jasotako potentzia honela adierazi daiteke:

$$\text{Eskala logaritmikoan} \rightarrow P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} - L_{FSL} + G_{RX} - L_{RX} - L_{others}$$

Non:

$$L_{FSL} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)$$

Non:

- P_{RX} → d distantziara jasotako potentzia
- P_{TX} → igorritako potentzia
- G_{RX} → antena hartzailearen irabazia
- G_{TX} → antena igorlearen irabazia
- λ → seinalearen uhin luzeera
- L_{FSL} → Free Space Losses (espazio libreko galerak)

Ondorioz, Anritsu espektro analizatzailearen bidez erregistratutako balioak aurreko formula jarraitu dute. Ondoren, Matlab-en programaturiko "script"-en bidez, *Channel Power*, *Periodoa* (t_{tot}), *ToA* (t_{aktibo}) balioak lortu dira. Hala ere, ezin dira araudiarekin konparatu. Araudiarekin konparagarriak diren balioak eskuratzeko, datuak SAR edota eremu-elektrikoko balioetara bihurtzea beharrezkoa da, baizik eta, araudiak, mugak magnitude desberdinetan (SAR, E, H, etab.) ematen ditu frekuentzia tarteen arabera.

Eremu elektrikoko (E) balioetara itzultzeko, antenaren k parametroa barne hartzen duen hurrego adierazpena jarraitu da:

$$E_{neurtua} \left(\frac{dB\mu}{m} \right) = P_{RX_{kanala}} (dBm) + 107 + k$$

$$k = -29,77 - G_{i_{antenna}} (dBi) + 20 \cdot \log_{10} f (MHz)$$

Non:

$P_{RX_{kanala}}$ → d distantziara jasotako kanalaren potentzia
 k → antena faktorea
 $G_{i_{antenna}}$ → antenak duen irabazia (kasu honetan 3 dBi)

LoRa-ren modulazio ezaugarriak direla eta, eremu elektrikoaren balio hauek oraindik ezin dira araudiaren balioekin konparatu. LoRa-k, datuen transmisioa gauzatzeko periodo osoaren zati bat baino ez du erabiltzen eta kanalen batzuetako potentziak ($P_{RX_{kanala}}$) aldiz Max Hold konfigurazioarekin kalkulatu dira. Hori dela eta, eremu elektrikoaren lan-zikloarekin haztatu dira:

$$E_{haztatua} = E_{active_{avg}} = E_{neurtua} \cdot \sqrt{T} \quad \left(\frac{V}{m}\right)$$

Non:

$$T = \frac{t_{active}}{t_{tot}}$$

Eremu elektriko haztatuetik abiatuta SARen balioak eskuratu daitezke:

$$SAR = \frac{\sigma \cdot E^2}{\rho}$$

Non:

σ = materialaren konduktibitatea $\left(\frac{S}{m}\right)$

E = Eremu elektrikoaren balio efikaza $\left(\frac{V}{m}\right)$

ρ = materialaren masa dentsitatea $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

Eremu elektriko haztatu eta SAR balio hauek ICNIRPen araudiaren mugekin konparatu daitezke. Egokitzapen kalkulu hauek gauzatzeko Excel programa erabili da, horretarako beharrezkoak diren formulak sortuz.

6.5. Neurketen emaitzen multzokatzea eta analisisa

Matlab-ek idatzitako Excel fitxategiei aurreko azpiatalean azaltzen den magnitudeen egokitzapena (azaltzen diren formulak Excel funtzio bihurtuz) aplikatu zaie. Eragiketa hauen emaitzak aztertu eta ebaluatu ahal izateko, lehenik eta behin, balioak, bi multzotan banandu dira: alde batetik 125 kHz-ko banda-zabalerarekin lortutako neurketen eta kalkuluen emaitzak, eta beste aldetik 500 kHz-ko banda-zabalerako neurketen eta kalkuluen emaitzak. Kontutan hartu behar da neurketa hauek igorletik 5 m-ra egin direla. Neurketa hauek tauletan multzokatu dira, eta baita irudikatu ere. Taulen edukia ulertu ahal izateko, edukien azalpen txiki bat ematen da Taula 6-4-an:

Taula 6-4

DATUA	Esanahia
SF	Spreading Factor
ToA	Seinalearen zati aktiboaren iraupena
t_{tot}	Seinalearen periodo osoa
Duty-cycle	Lan-zikloa $T = \frac{t_{active}}{t_{tot}}$
E_{BB}	$E_{neurtua} \left(\frac{dB\mu}{m} \right) = P_{RX_{kanala}} (dBm) + 107 + k$
$E_{haztatua}$	$E_{haztatua} = E_{active_{avg}} = E_{neurtua} \cdot \sqrt{T}$
P_{rx}	$P_{RX_{kanala}} (dBm)$
E_{muga}	Erreferentzia-maila profesionala --> $3 \cdot f^{0,5}$ $E_{neurtua} \left(\frac{dB\mu}{m} \right) = P_{RX_{kanala}} (dBm) + 107 + k$

Errore-barren biez ematen diren datuak, batuz bestekoa irudikatzen dute, eta positibora eta negatibora duten joera ere, hau da, maximoa eta minimoa.

6.5.1. 500 kHz-ko banda-zabalerako datuak (5 m)

Bi multzoak (500 kHz eta 135 kHz), beste bi azpimultzotan banandu dira, batzuk frekuentzia eta SF desberdinak erabiltzean oinarrituak, besteak frekuentzia eta transmisio potentzia aldatzean oinarrituak.

Frekuentzia eta SF desberdinetarako analisisia

Denbora neurketak

LoRa-ren modulazioaren ondorioz, transmisiorako erabiltzen diren BW eta SFaren arabera, seinaleak airean egiten duen denbora (t_{tot}) eta paketea osorik bidaltzeko behar duen denbora handiagoa da (ToA), baita payload-aren eta preamble-aren arabera ere. Gainera, seinaleak airean igarotzen duen denbora gora egiteak, gorputzak egoera berdinetan egonda jasoko duen erradiazioan eragina du. Ondorioz, aurretik azaldu den bezala, beharrezkoa da datu hauen egokitzapena egitea, horretarako seinalea denboran aztertu da:

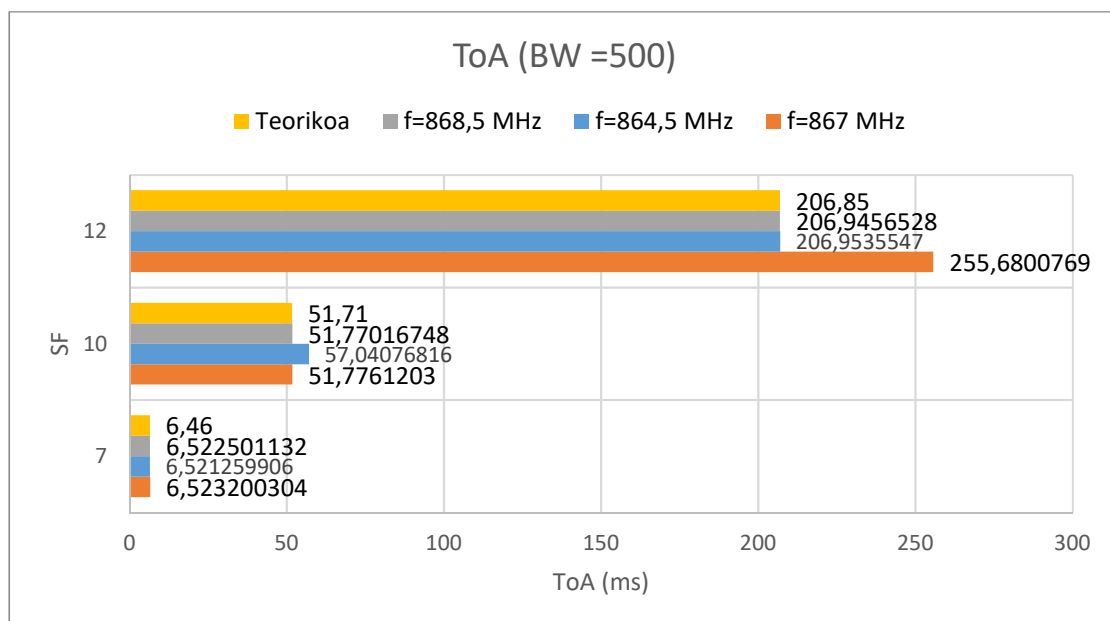
Matlab-en emaitzak adierazi bezala multzokatu ostean:

Taula 6-5. Denbora neurketen emaitzak (BW=500 kHz)

f (MHz)	SF	ToA Teorikoa (ms)	Periodoa t_{tot} (ms)	ToA T_{active} (ms)
864,5	7	6,46	66,47	6,52
	10	51,71	105,67	57,04
	12	206,85	261,05	206,95
867	7	6,46	66,03	6,52
	10	51,71	99,95	51,77
	12	206,85	255,68	255,68
868,5	7	6,46	67,45	6,52
	10	51,71	99,96	51,77
	12	206,85	253,71	206,94

Periodoa eta iraupen aktiboak kalkulatzeko potentzia guztietan egindako neurketetatik balio handiena hartu da, teorikorik hurbilen ziren balioak zirelako. Denboran seinaleak duen aldakortasuna handia da, horregatik balio batzuk teorikotik alendu daitezke.

Jarraian, taulen balioak grafikoki adierazi dira, honela datuak errazago behatu eta konparatu daitezke:



Grafikoa 6-2. ToA SF desberdinetarako eta frekuentzia desberdinetan

Ikusten denez lortutako balioak, balio teorikoetatik oso hurbil daude, SF12 eta $f=867$ MHz-ko neurketan izan ezik. Nahiz eta neurketak berriro errepikatu neurketa konkretu honetan arazoak izatea ohikoa izan daiteke, baizik eta banda-zabalera eta SF altuenekin transmititzen dago. Ondorioz, lan-zikloa (duty-cycle) altua izango da eta denbora tartekak kalkulatzeko zailagoa izango da.

Datu egokitzapena eta esposizioaren analisia

Behin seinaleen denborak kalkulatu direla, araudian ematen diren mugekin konparatzeko kanaleko potentzien magnitude itzulpena gauzatu da, magnitude aldaketa eginez eta ponderazio faktore bat aplikatuz (duty-cycle).

Neurketak SF eta BW konkretu batzuetarako P_{rx} desberdinetara neurtu direnez, jasotako potentzien maximorako ($P_{rx,max}$) egin dira eremu elektrikoaren (E) kalkuluak, hots, kasu txarreneko. Hurrengo bi taulatan lortutako datu garrantzitsuenak laburbiltzen dira. Datu garrantzitsu guztiak taula bakarrean sartzen ez direnez bi taulatan banandu dira datuak:

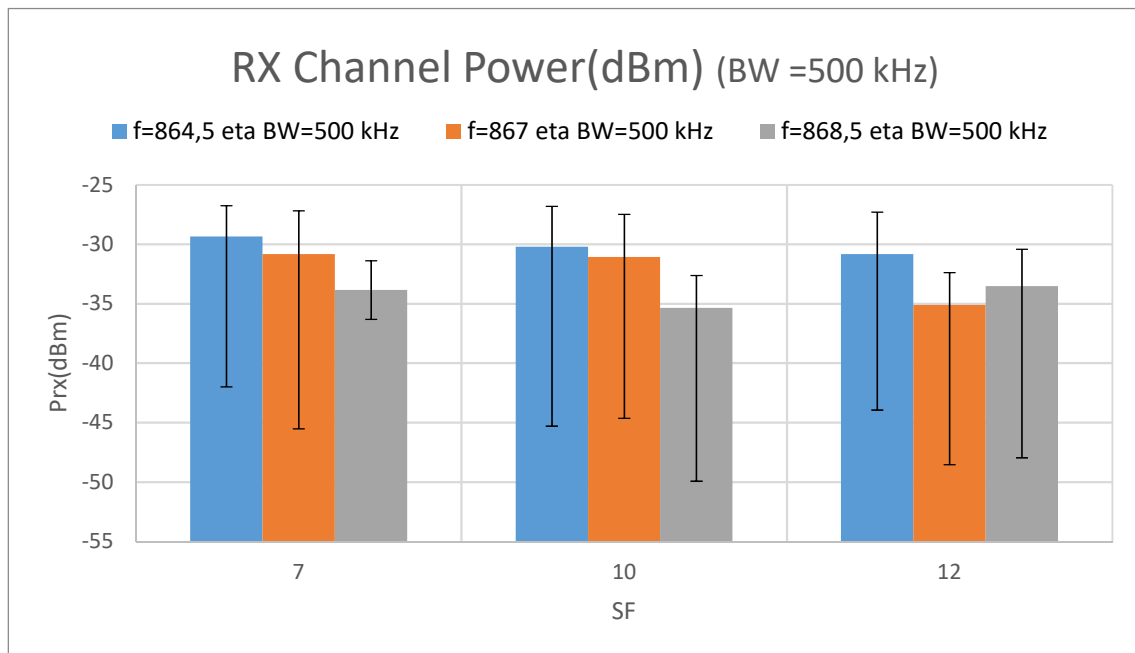
Taula 6-6. Neurketen emaitzak (BW=500 kHz)

f (MHz)	λ (m)	K (dB/m)	SF	P_{rx} (dBm)	E_{BB}(dBμv/m)	Periodoa t_{tot} (ms)	ToA T_{active} (ms)
864,5	0,3470	25,96	7	-29,36	89,01	66,47	6,52
			10	-30,21	97,84	105,67	57,04
			12	-30,82	105,06	261,05	206,95
867	0,3460	25,99	7	-30,84	86,63	66,03	6,52
			10	-31,07	95,97	99,95	51,77
			12	-35,12	103,13	255,68	255,68
868,5	0,3454	26,01	7	-33,85	84,49	67,45	6,52
			10	-35,34	95,60	99,96	51,77
			12	-33,51	100,90	253,71	206,94

Taula 6-7. Neurketen emaitzak E haztatua (BW=500 kHz)

f (MHz)	λ (m)	K (dB/m)	SF	duty_cycle T	Ehaztatua (dB μ V/m)	Ehaztatua (V/m)
864,5	0,3470	25,96	7	0,098	93,51	0,035
			10	0,539	100,07	0,073
			12	0,792	101,13	0,11
867	0,3460	25,99	7	0,0987	92,09	0,056
			10	0,517	99,06	0,079
			12	1	97,86	0,062
868,5	0,3454	26,01	7	0,0966	89,01	0,037
			10	0,517	94,80	0,060
			12	0,815	98,60	0,073

Jarraian taulen balioak grafikoetan irudikatu dira:



Grafikoa 6-3. Jasotako potentzia SF eta f desberdinen menpe (BW=500 kHz)

Grafikoa 6-3-ean ikusi daiteke nola espazio libreko galerak (L_{FSL}) handiagoak diren frekuentzia altuagotan, hain zuzen ere, formulak adierazten duen moduan. SF eta f bakoitzeko minimoak eta maximoak ere adierazten dira grafikoan.

Erreferentzia mailekin konparatuz:

Taula 6-8. Kalkuluen eta mailen konparaketa (BW=500 kHz)

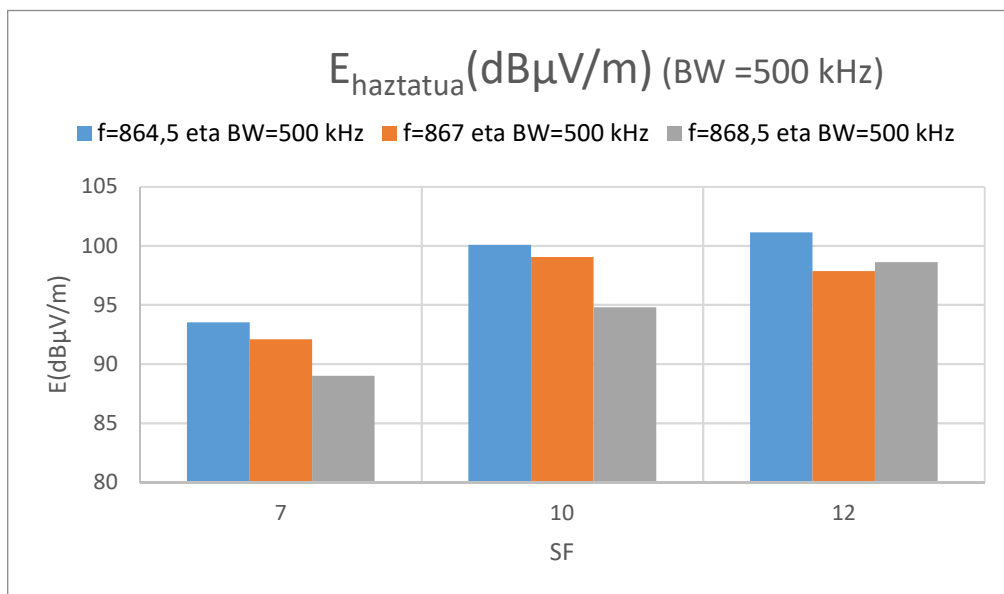
f (MHz)	SF	Erreferentzia-maila profesionala E (V/m)	Jende arruntaren erreferentzia-maila E (V/m)	E _{haztatua} (V/m)
864,5	7	88207,14	40428,27	0,0350
	10			0,0732
	12			0,1096
867	7	88334,59	40486,68	0,0561
	10			0,0792
	12			0,0622
868,5	7	88410,97	40521,69	0,0372
	10			0,0597
	12			0,07325

Taula 6-9. Erreferentzia-mailak 400 - 2000 MHz

Erreferentzia-maila profesionala --> $3 \cdot f^{0,5}$

Jende arruntaren erreferentzia-maila --> $1,375 \cdot f^{0,5}$

Ikusten denez, erreferentzia mailekin konparatuz, eremu elektriko mailak oso baxuak dira, beraz, ez dira mugak gaindituko. Hemen 500 kHz-etarako BWean, f eta SFa kontutan hartuz lortu diren esposizio mailak ematen dira, eremu elektriko magnitudea erabiliz:



Grafikoa 6-4. Eremu elektriko haztatua SF eta f bakoitzeko (BW=500 kHz)

Aipagarria da frekuentzia handitu ahala 5 m-ra dagoen esposizioa txikitu egiten dela, jasotako potentzia ere txikitzen baita. Banda-zabalera mantenduz gero, SFa handitzen bada esposizioa handitzen dela ikusten da.

Balio hauek gorputzen propietate dielektrikoak kontutan hartuz SAREn balioetara igaro daitezke aurretik esandako formula erabiliz:

$$SAR = \frac{\sigma \cdot E^2}{\rho}$$

Horretarako geruza desberdinen propietate dielektrikoak esteka honetan hartu daitezke: <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.php>

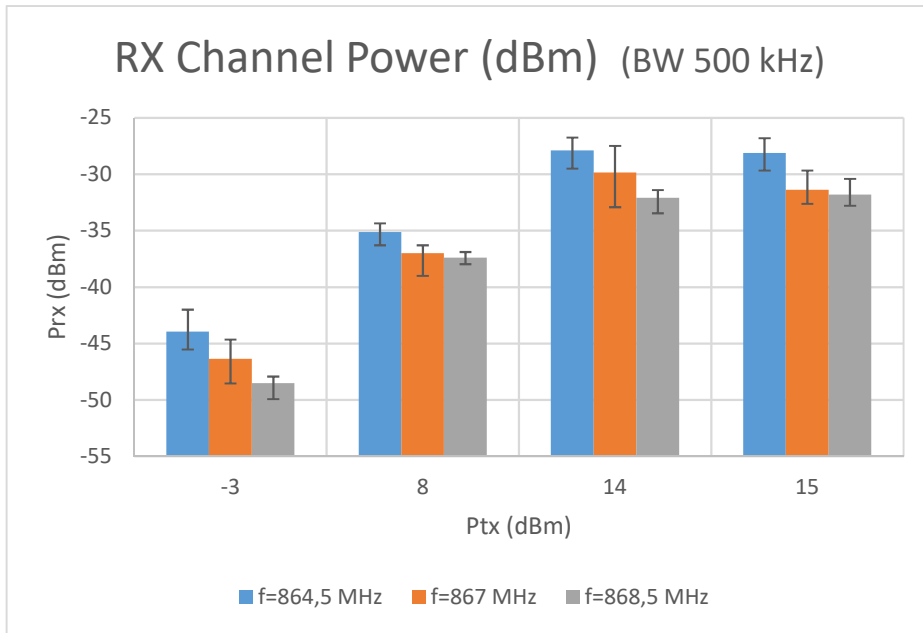
Potentziaren araberako analisisa

Bestalde, potentziaren araberako analisisa egiten bada, alegia, transmititutako potentzia desberdinetarako jasotako potentzia kalkulatzeko bada -SF guztien kanalaren batz-besteko potentzia hartuz – honako emaitzak lortzen dira:

Taula 6-10. Potentzia neurketen emaitzak (BW=500 kHz)

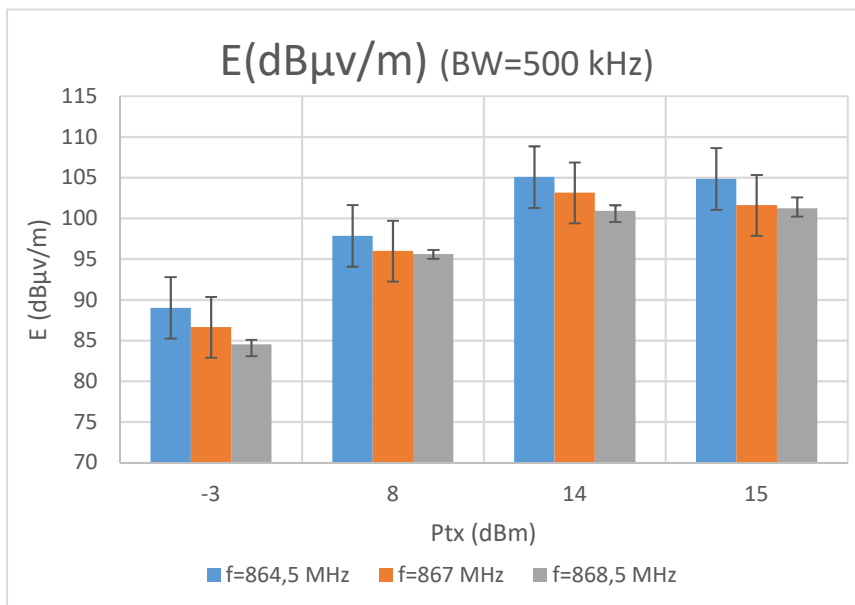
f (MHz)	λ (m)	K (dB/m)	SF	P _{tx} (dBm)	P _{rx} (dBm)	EBB(dBμv/m)
864,5	0,34702	25,96	7,10,12	-3	-43,95	89,01
				8	-35,11	97,84
				14	-27,90	105,06
				15	-28,12	104,84
867	0,3460	25,99	7,10,12	-3	-46,35	86,63
				8	-37,01	95,97
				14	-29,85	103,13
				15	-31,39	101,60
868,5	0,3454	26,01	7,10,12	-3	-48,51	84,49
				8	-37,40	95,60
				14	-32,09	100,91
				15	-31,79	101,21

Honela SF guztiak multzokaturik, transmisio potentzia desberdinetarako batz besteko potentzia, maximoak eta minimoak aztertu daitezke:



Grafikoa 6-5. Jasotako potentzia emititutako potentzia desberdinetarako, SF guztiak kontuan hartuz (BW=500 kHz)

Potentzia balio hauek eremu-elektrikora bihurtu dira:



Grafikoa 6-6. Eremu elektrikoa Potentzien arabera, SF guztiak kontuan hartuz (BW=500 kHz)

Balio hauetan [Grafikoa 6-6] ikusten denez, Friss-en formularen oinarriak betetzen ditu, transmititutako potentzia handitzean, esposizioa handitzen delarik. Azken datu hauek interesgarriak dira seinalearen SFaren arabera esposizioan dagoen aldakortasuna aztertzeko, igorritako potentzia eta baita frekuentzia bakoitzean ere. Aldakortasun hori errore-barren bidez adierazi da Grafikoa 6-6. Eremu elektrikoa Potentzien arabera. Hala ere, ezin dira araudiaren balioekin konparatu, ez baitira balio guztiz errealak. Balio hauek SF desberdinak barne hartzen dutenez ToA desberdinak hartzen dira kontuan transmisio potentzia bakoitzean, ondorioz ez dira haztatu.

6.5.2. 125 kHz-ko banda-zabalerako datuak

Frekuentzia eta SF desberdinetarako analisia

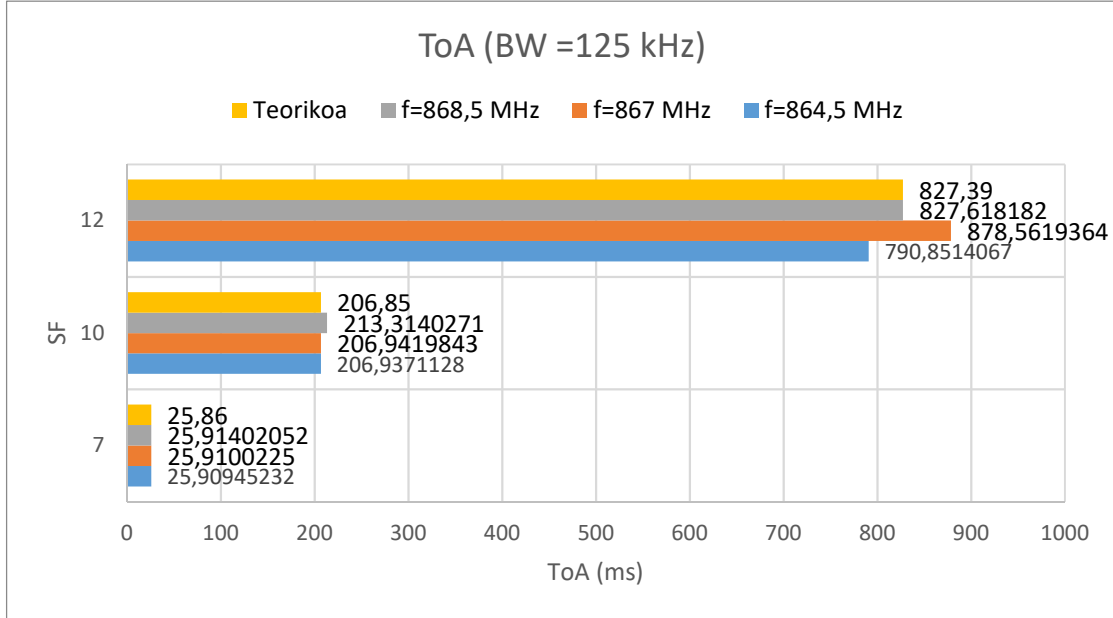
Banda-zabalera honetarako kalkuluetarako aurreko prozedura berdina jarraitu da. Gainera, modulazio berdina jarraitzen dutenez eta aldatu den parametro bakarra BWa denez, espero bezala, datuek jokaera berdina jarraitzen dutela ikusi daiteke.

Denbora neurketak

Denboraren neurketak egin dira:

Taula 6-11. Denbora neurketen emaitzak(BW=125 kHz)

f (MHz)	SF	ToA Teorikoa (ms)	Periodoa t_{tot} (ms)	ToA T_{active} (ms)
864,5	7	25,86	83,07	25,91
	10	206,85	261,98	206,93
	12	827,39	826,86	790,85
867	7	25,86	80,66	25,91
	10	206,85	256,43	206,94
	12	827,39	878,56	878,56
868,5	7	25,86	88,75	25,91
	10	206,85	261,74	213,31
	12	827,39	881,29	827,61



Grafikoa 6-7. ToA SF eta f desberdinetarako(BW=125 kHz)

Aurreko kasuan bezala SF12rako, 867 eta 868,5 MHz-ko frekuentzietan teorikoarekiko dagoen diferentzia apur bat handia da. Hala ere balio horiek erabili dira kalkuluetarako:

Taula 6-12. Neurketen emaitzak (BW=125 kHz)

f (MHz)	λ (m)	K (dB/m)	SF	P _{rx} (dBm)	E _{BB} (dB μ v/m)	Periodoa t _{tot} (ms)	ToA T _{active} (ms)
864,5	0,3470	25,9653	7	-37,01	95,95	83,072	25,91
			10	-34,64	98,31	261,98	206,94
			12	-31,97	100,99	826,86	790,85
867	0,3460	25,9903819	7	-33,07	99,92	80,66	25,91
			10	-34,08	98,90	256,43	206,94
			12	-37,11	95,88	878,56	878,56
868,5	0,3454	26,0053965	7	-36,24	96,76	88,75	25,91
			10	-36,58	96,41	261,74	213,31
			12	-35,43	97,56	881,29	827,61

Datu egokitzapena eta esposizioaren analisia

Taula 6-13. Eremu haztatuaren emaitzak (BW=125 kHz)

f (MHz)	λ (m)	K (dB/m)	SF	Duty - cycle T	E_{haztatua} (dB μ V/m)
864,5	0,3470	25,96	7	0,3118	90,89
			10	0,7898	97,29
			12	0,9564	100,79
867	0,3460	25,99	7	0,3211	94,99
			10	0,8069	97,97
			12	1	95,88
868,5	0,3454	26,01	7	0,2919	91,41
			10	0,8149	95,52
			12	0,9390	97,29

Eremu elektrikora itzulpena egin ostean, erreferentzia mailekin konparatuz:

Taula 6-14. Mugen eta eremu haztatuaren konparaketa

f (MHz)	SF	Erreferentzia-maila profesionala E (V/m)	Jende arruntaren erreferentzia-maila E (V/m)	E_{haztatua} (V/m)
864,5	7	88207,14	40428,27	0,03505
	10			0,0732
	12			0,1096
867	7	88334,59	40486,68	0,0561
	10			0,0792
	12			0,0622
868,5	7	88410,97	40521,69	0,0372
	10			0,0597
	12			0,0732

Taula 6-15. Erreferentzia-mailak 400-2000 MHz

Erreferentzia-maila profesionala --> $3 \cdot f^{0,5}$

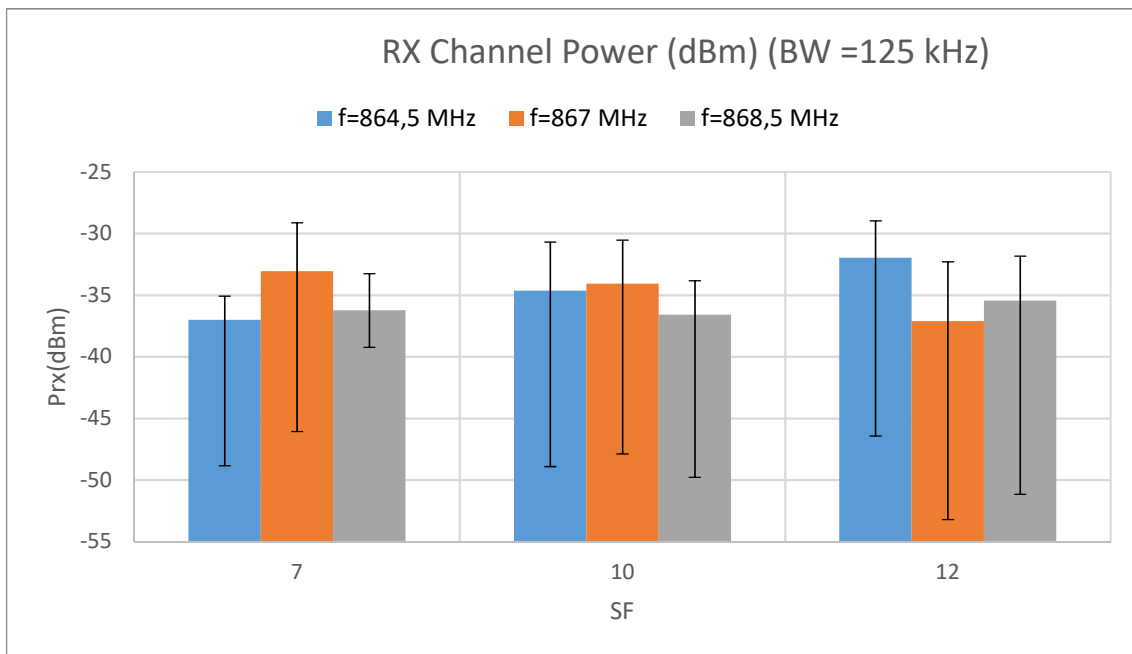
Jende arruntaren erreferentzia-maila --> $1,375 \cdot f^{0,5}$

Kasu honetan ere, ez dira erreferentzia-mailak gainditzen, eta mugetatik oso aldentuta daude esposizioaren balioak. Balio hauek gorputzen propietate dielektrikoak kontutan hartuz SAREN balioetara igaro daitezke aurretik esandako formula erabiliz:

$$SAR = \frac{\sigma \cdot E^2}{\rho}$$

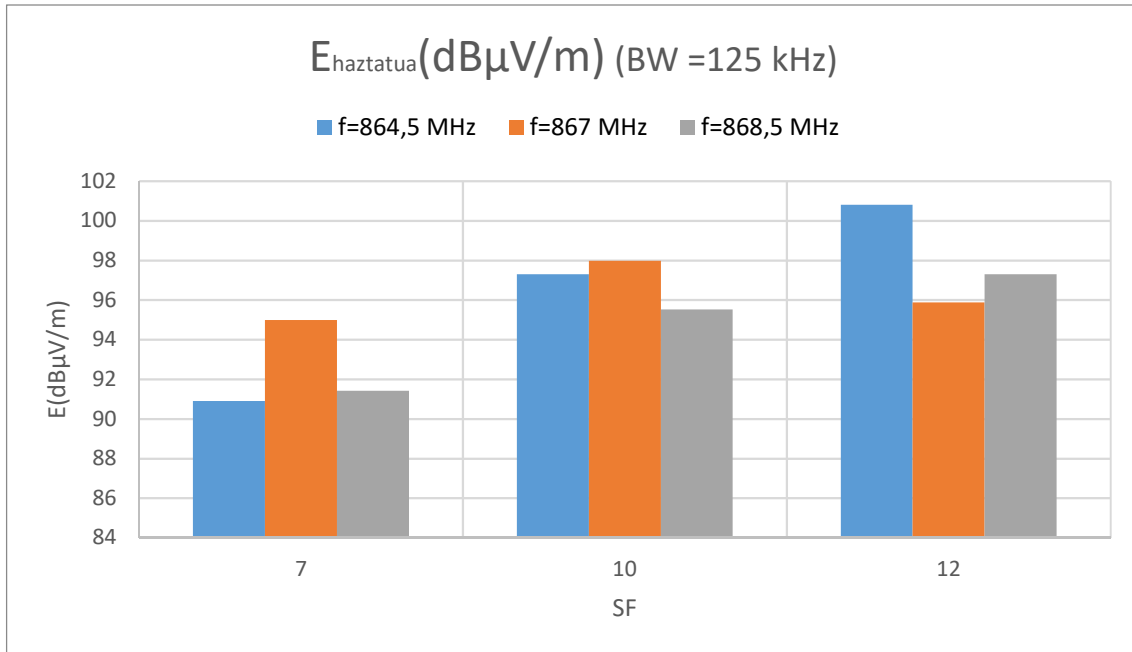
Horretarako geruza desberdinen propietate dielektrikoak esteka honetan hartu daitezke: <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.php>

SF desberdinetarako batz-beste kanalaren potentzia grafikoetan adieraziz:



Grafikoa 6-8. Jasotako potentzia SF eta f desberdinetarako (BW=125 kHz)

Eremuaren balioak irudikatuz:



Grafikoa 6-9. Eremu elektriko haztatua SF eta f desberdinetarako (BW=125 kHz)

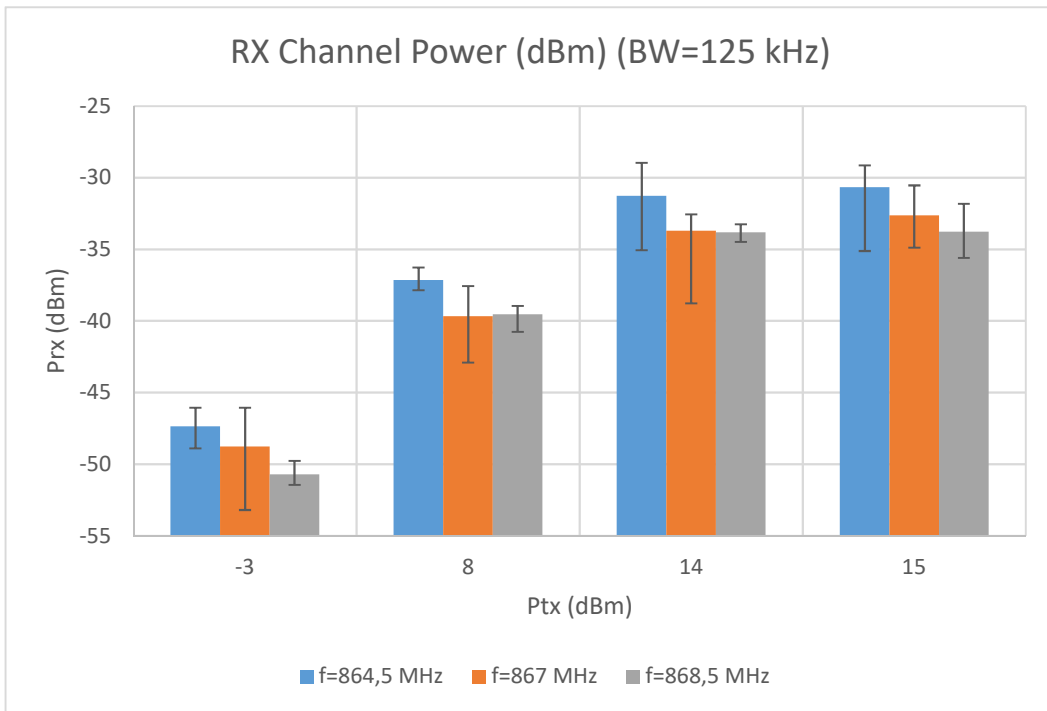
Potentziaren araberako analisia

Potentzien arabera aztertu da kasu honetan ere:

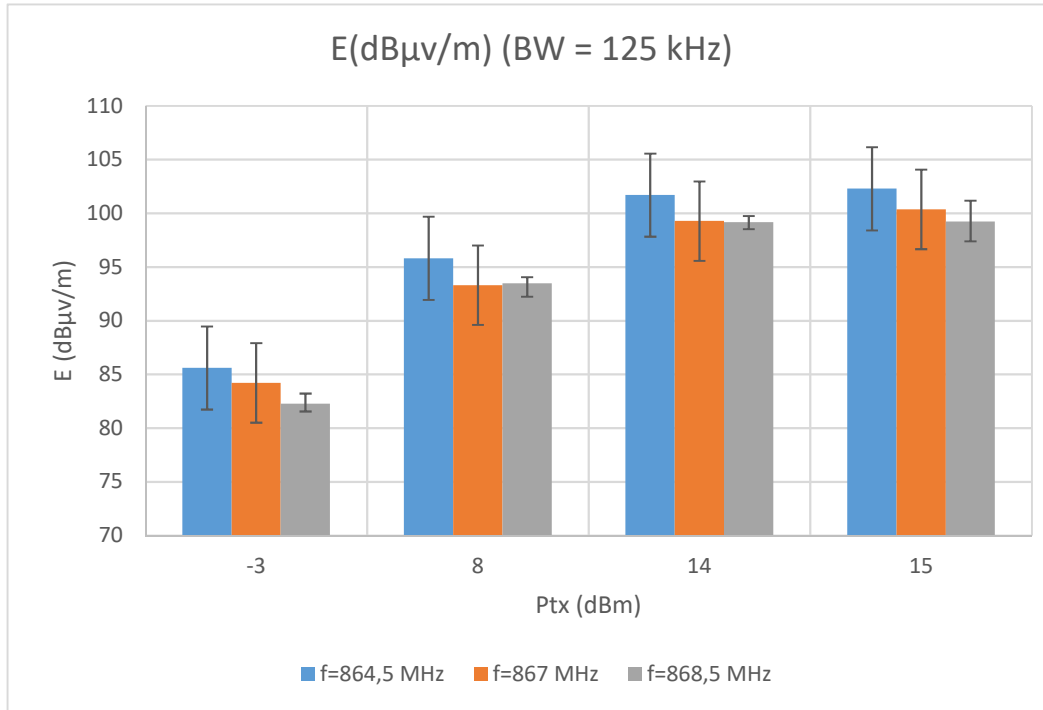
Taula 6-16. Neurketen emaitzak (BW=125 kHz)

f (MHz)	λ (m)	K	SF	P _{tx} (dBm)	P _{rx} (dBm)	E _{BB} (dBµv/m)
864,5	0,3470	25,96	7,10,12	-3	-47,36	85,60
				8	-37,15	95,81
				14	-31,26	101,70
				15	-30,67	102,28
867	0,3460	25,99	7,10,12	-3	-48,77	84,21
				8	-39,67	93,31
				14	-33,71	99,28
				15	-32,62	100,36
868,5	0,3454	26,01	7,10,12	-3	-50,73	82,27
				8	-39,53	93,46
				14	-33,82	99,18
				15	-33,77	99,23

Jasotako batz-beste potentsia irudikatu da, SFak eragiten duen maximo eta minimokin batera.



Grafikoa 6-10. Jasotako potentsia Ptx desberdinetarako(BW=125 kHz)



Grafikoa 6-11. Eremu elektrikoa Ptx desberdinetarako (BW=125 kHz)

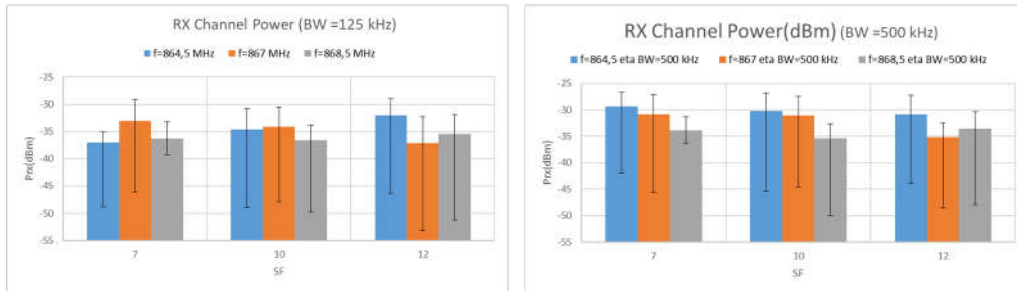
6.5.3. Bi BW desberdinen konparaketa

Modulazioaren ezaugarriek definitzen duten bezala, BW handiago bat erabiltzeak, airean emango duen denbora txikiagotzea dakar. Denbora txikiagotzeak orduan, seinale honen erradiaziopean dagoen denbora txikiagotzea eragiten du.



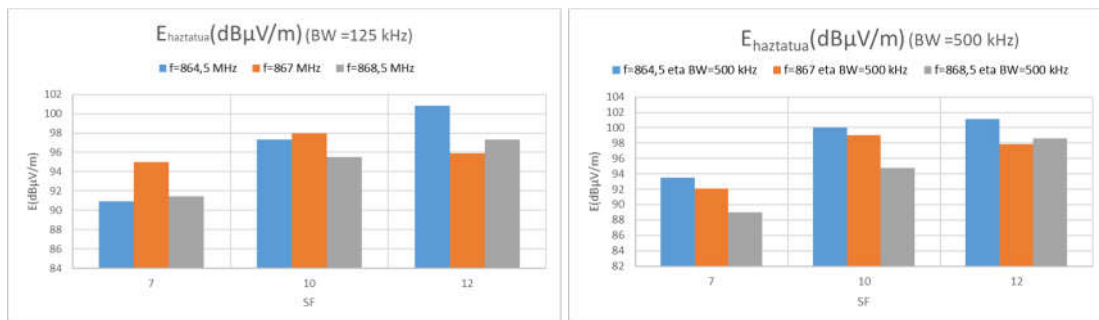
Irdia 6-8. Denboren konparaketa

Potentzia aztertuz gero, banda zabalera altuenean jasotzen den seinalearen kanalaren potentzia, orokorrean, handiagoa da. Kanalaren banda zabalera handiagoa izanik, potentzia gehiago egongo baita kanalean, baita zarata gehiago ere.



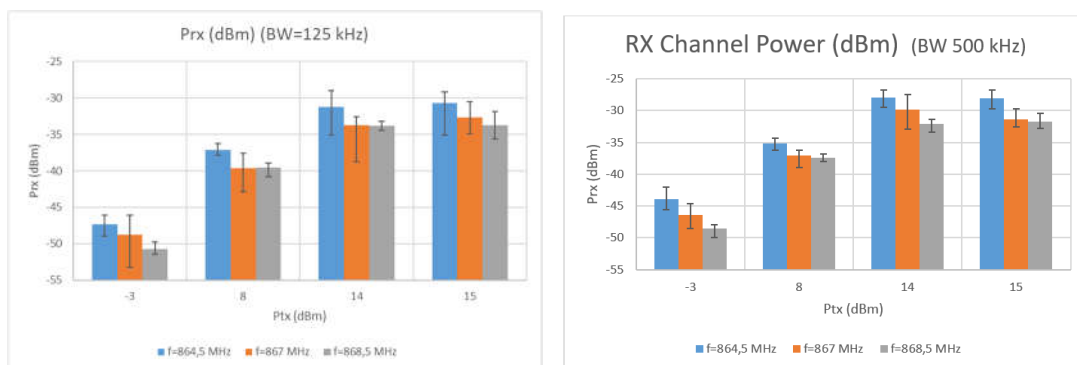
Irudia 6-9. Jasotako potentzien konparaketa

Nahiz eta potentzia aldetik, BW altuenetan potentzia gehiago jaso, BWA handiagoa izateak, *duty-cycle*-a txikiagoa izatea dakar. Ondorioz eremu elektrikoa haztatu ostean, gorputz batek jasoko lukeen erradiazioa banda zabalera batean zein bestean oso antzerakoa da.



Irudia 6-10. Eremu elektriko haztatuen konparaketa

Ez da hori gertatzen, aldiz, BW bereko eta SF desberdineko bi seinaleren erradiazioarekin, zeren eta, SFak t_{active} -ean eragina du, hortaz *duty-cycle*-ean ere.



Irudia 6-11. Jasotako potentzien konparaketa PtX desberdinetarako

Laburbilduz, SFa handitzeak esposizioa handitzea eragiten du. Iraupen aktibo hau payload eta preamble-ak luzatuz ere handitu daitezke, analisi hori metodologia hau erabiltzen duen etorkizuneko beste ikerketa lanen baterako aukera bat izan liteke.

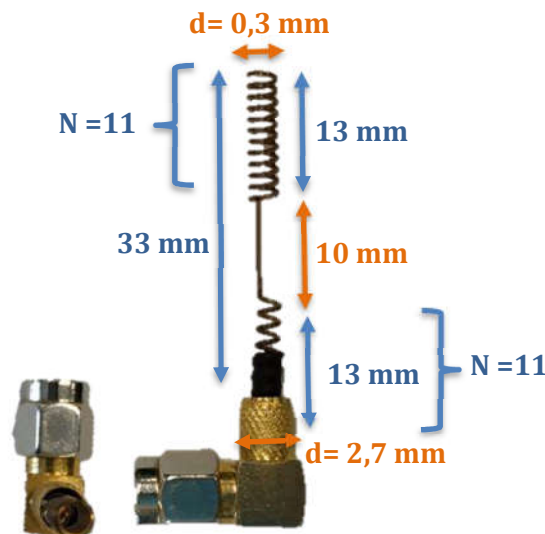
6.6. CST simulazioak

Metodologiaren neurketen oinarria azaldu ostean, atal honetan metodologia horren simulazioen oinarriak azaltzen dira. Gaur egun, simulazioek garrantzi handia dute; errealitate gertuko egoera bat era merkeago baten aurreikusteko erabili baitaitezke. Simulazioen zailtasun nagusia, SWen eta kontutan hartu beharreko faktore, parametro eta baldintzen konplexutasuna eta kantitateak dira. Ondorioz, emaitzen eraginkortasuna faktore askoren menpekoa da. Gainera, simulazioek HW baliabide anitz eskatzen dituzte.

Lan honetan, eremu elektrikoa kalkulatzeko edota SAR balioak lortzeko, simulazioak gauzatzeko jarraibideak ematen dira, neurketekin edo araudiarekin konparatu ahal izateko edota egon litekeen esposizioa aurreikusteko. Lan honetan CST Studio Suite simulazio elektromagnetikorako SWa erabili da. Egin diren simulazioetarako “Educational License” lizentzia beharrezkoa da, honek SAR kalkuluak eta gorputz ereduak erabiltzea baimentzen du.

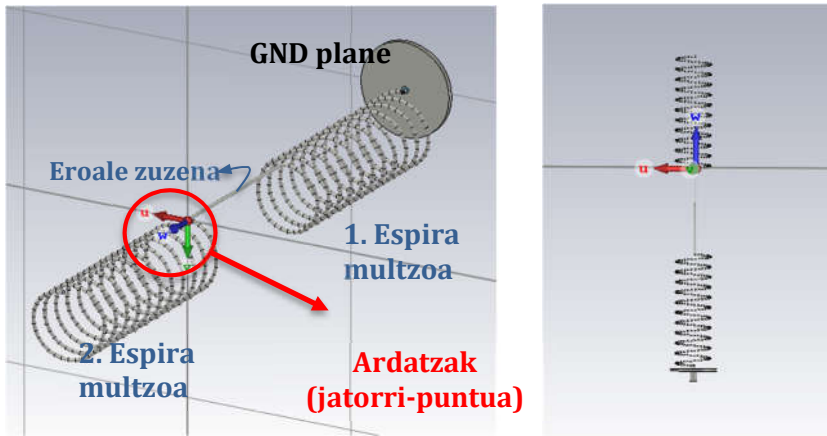
6.6.1. Antenaren diseinua

Simulazioak gauzatzeko antenaren diseinuarekin hasi behar da. Lizentzia honekin “Antenna Magus” antenen datu base eta diseinurako SWetik antenak inportatu daitezke, baina zenbait froga egin ostean, antena zerotik diseinatzea erabaki da, LoRa kit-aren antenan oinarrituz. Lehenik eta behin, LoRa-k zekarren antena ezaugarritu da, dituen luzerak eta espira kopuruak neurtuz.

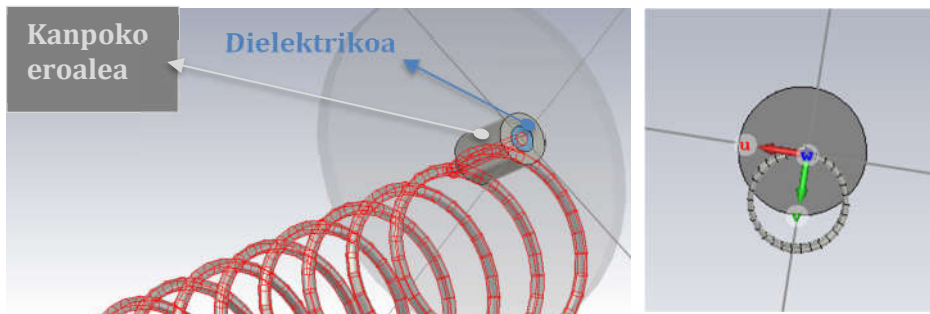


Irudia 6-12. Antenaren neurriak

Behin antena ezaugarritu dela CST SWaren bitartez diseinatu beharra dago:



Irudia 6-13



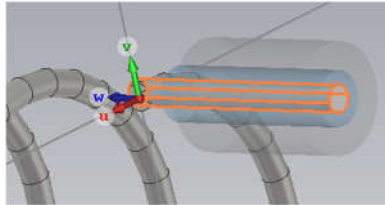
Irudia 6-14

Horretarako pausu hauek jarraitu dira:

1. Bi eroale zuzen eta bi espira multzo dituen eroalea diseinatu da eta PEC (Perfect Conductor) materialaz bete da, eroale perfektuz hain zuzen ere.
 - a) Hasteko, 1. espira multzoa egin da (helikoidala), tamaina zehatz bateko zirkulu bat espira multzotik hedatuz, zirkulu honen tamaina espiren hariaren tamainaren araberakoa izanik.
 - Buelta kopurua $N = 11$
 - Altuera = 13 mm
 - Zirkuluaren erradioa: $r = 0,1$ mm
 - Espiraren erradioa: $r = 1,5$ mm
 - 12 graduko angeluarekin

- b) Eroale zuzena egin da, horretarako ardatzen jatorria eroale zuzena espirekin lotuko den puntuan jarri behar da, tamainak jartzea errazten baitu. Gero zilindro bat egin da:
- Altuera: 10 mm
 - Erradioa: $r = 0,1$ mm
- c) Orain ardatzak zuzenaren puntu altuenean jarri dira 2. espira multzoa (helikoidala) sartu ahal izateko. 2. espira multzoa jartzeko lehen 1. espira egiteko aipatutako teknika erabili da.
- Buelta kopurua $N = 11$
 - Altuera = 13 mm
 - Zirkuluaren erradioa: $r = 0,1$ mm
 - Espiraren erradioa: $r = 1,5$ mm
 - 12 graduko angeluarekin
- d) Bukatzeko, ardatza puntu baxuenera jaitsi da eta lurreko plano (GND plane) gurutzatuko duen eroalea definitu da zilindro batekin (laranjaz markatua):
- Altuera: 1,3 mm
 - Erradioa: $r = 0,1$ mm

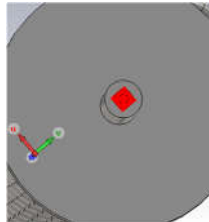
- e) Bukatzeko eroale bakarrean bildu dira



Irudia 6-15. Barne eroalea

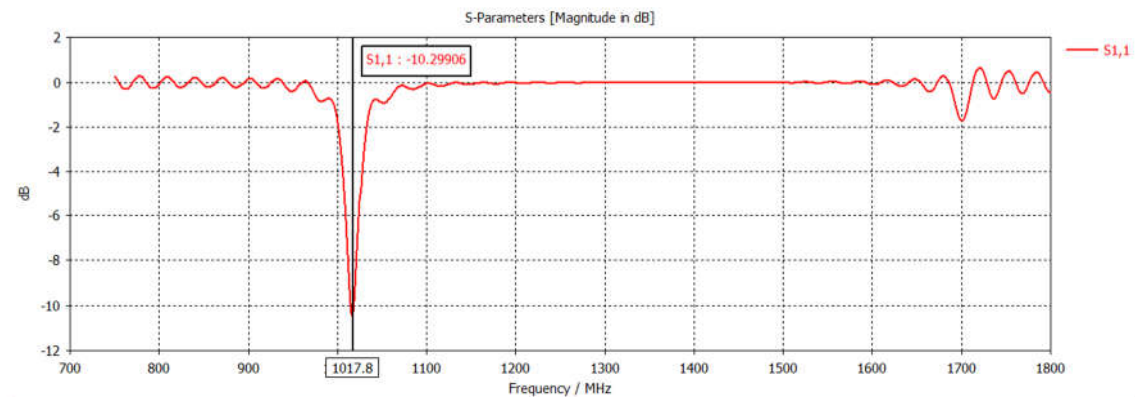
2. Gero lurreko plano eta konpo eroalea diseinatu dira:
- a) Lurreko plano eraztun luzatu bat da, hau da barrutik hutsunea duen zilindroa:
- Altuera: 0,3 mm
 - Kanpoko erradioa: $r = 2,7$ mm
 - Barneko erradioa: $r = 0,2$ mm
- b) Kanpoko eroalea diseinatu da, lurreko planoaren azpian
- Altuera: 1,2 mm
 - Kanpoko erradioa: $r = 0,4$ mm
 - Barneko erradioa: $r = 0,2$ mm
- c) Dielektrikoz bete da gertzen den hutsunea
- Altuera: 1,5 mm
 - Kanpoko erradioa: $r = 0,2$ mm
 - Barneko erradioa: $r = 0,1$ mm

3. Azkenik, portua gehitu behar zaio. Antena honen bitartez kitzikatzen da:



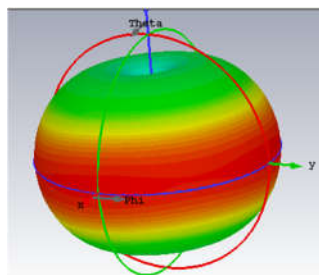
Irudia 6-16. Antenaren portua

Simulazio monitorerik (simulazio plantilla) jartzen ez bada eta simulazio bat martxan jartzen bada, antenaren S11 parametroak lortu daitezke:



Irudia 6-17. S11 parametroa optimizatu gabe

Farfield plantilla sortuz eta simulazioa jautiz gero, eremu urruneko antenaren erradiazio diagrama ikusi daiteke:



Irudia 6-18. Erradiazio diagrama

Antenaren erradiazio diagrama espero bezalakoa da, $\lambda/2$ dipolo baten erradiazio diagramaren antza baitu, baizik eta $\lambda/4$ monopolo baten diseinua du, bere haria helikoidala izanik.

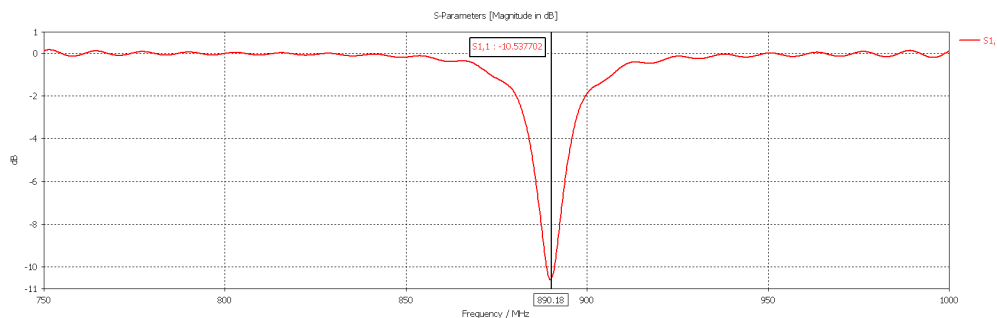
S11 parametroak seinalearen itzulerako potentziaren eta sarrerakoaren arteko erlazioa da. Parametro hau aztertzean, ikusi daiteke, antenak ez duela LoRa-aren frekuentzietan lan egiten baizik eta 868 MHz inguruko frekuentzian, S11 parametroa 0 dB baita. Honek, antenara heltzen den potentzia guztia itzultzen dela esan nahi du, hau da, ez duela frekuentzia horretan ezer ere ez transmititzen. Antena honen lan frekuentzia 1017 MHz inguruko frekuentzietan lan egiten du, non S11 parametroa -10,5 dB ingurukoa den.

6.6.2. Antenaren optimizazioa

Emaitzak espero zirenak izan ez direnez, antena LoRa-aren lan-frekuentzian lan egiteko egokitu da. Antena egokia dela zehazteko, zenbait baldintza minimo bete behar dituela erabaki dia:

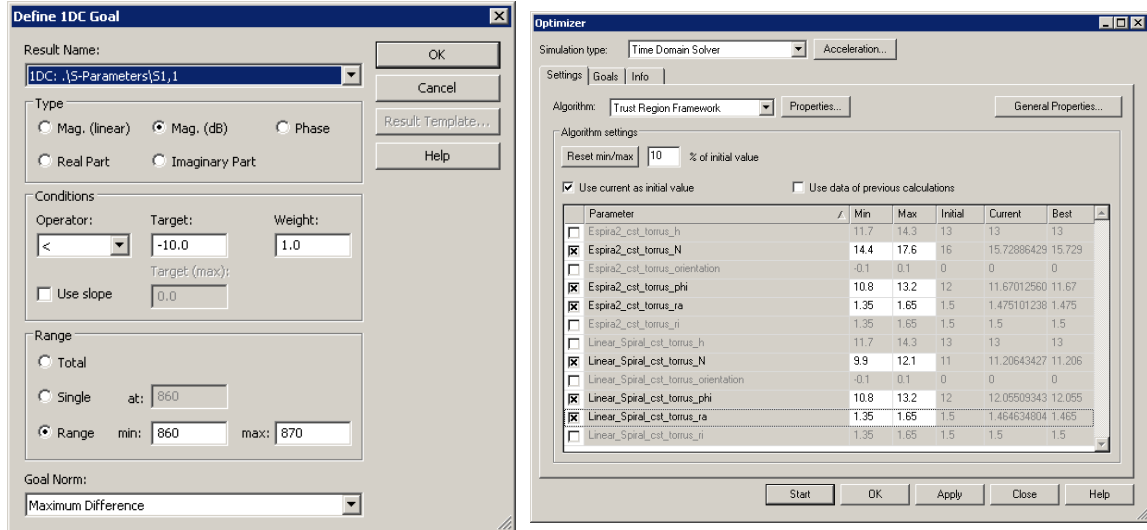
- $S_{11} \leq -10 \text{ dB}$ izan behar du lan-maiztasunean
- Lan-maiztasuna $f \in [863, 867] \text{ MHz}$ artean egon behar da, LoRa-ak Europan duen maiztasun tartea.
- Erradiazio-diagrama omnidirekzionala izan behar da, $\lambda/2$ dipolo baten erradiazio diagramaren antzekoa

Honetarako, lehenik, espira kantitatearekin jokatu da, desiratutako frekuentzietatik hurbil lan egiten duen antena bat lortu delarik. Espira multzo altuenaren (2. Espira multzoa) espira kantitatea 15era igoz lortu da emaitza hau.

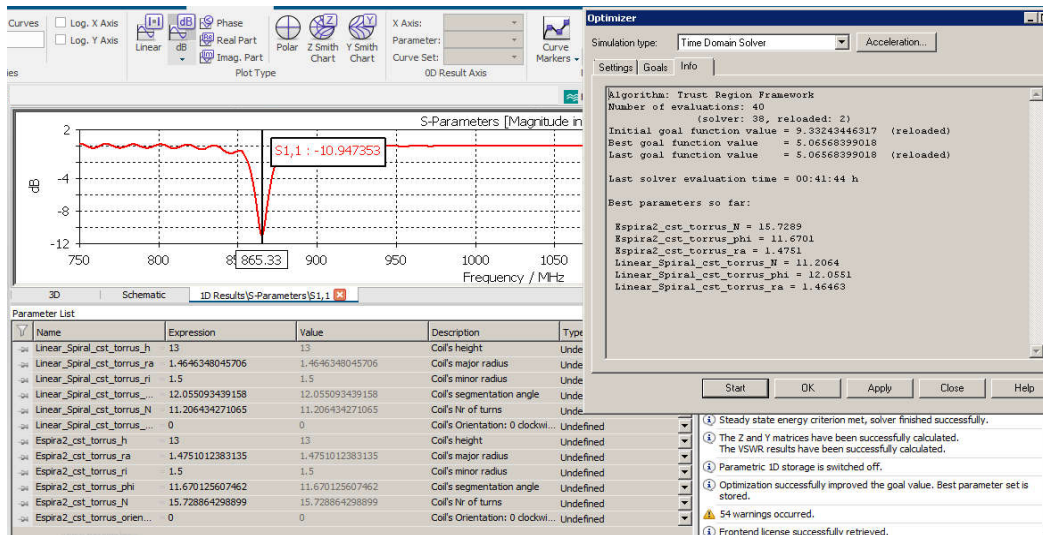


Irudia 6-19. S11 1. Optimizazio saiakeran

Ikusi daitekeenez 890 MHz-etan lan egiten du, baina oraindik 868MHz inguruko maiztasunean lan egitea lortu behar da. Honetarako SW bidezko optimizazio bat jaurti da, honako parametro hauek konfiguratu direlarik:



Irudia 6-25. SW optimizazioaren konfigurazioa



Irudia 6-26. SW optimizazioaren emaitza

Optimizazioa gauzatu ostean antenaren itxura apur bat aldatu da, eta bere lan frekuentzia 865 MHz ingurukoa da. Maiztasun hau LoRa-aren Europako bandaren barnean dago.

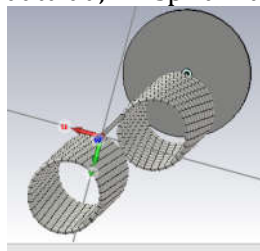
Optimizazioak antenaren itxura aldatu du [Irudia 6-21] eta hurrengo parametroak eman ditu:

Name	Expression	Value	Description
Linear_Spiral_cst_torru..._h	13	13	Coil's height
Linear_Spiral_cst_torru..._ra	1.4646348045706	1.4646348045706	Coil's major radius
Linear_Spiral_cst_torru..._ri	1.5	1.5	Coil's minor radius
Linear_Spiral_cst_torru..._...	12.055093439158	12.055093439158	Coil's segmentation angle
Linear_Spiral_cst_torru..._N	11.206434271065	11.206434271065	Coil's Nr of turns
Linear_Spiral_cst_torru..._...	0	0	Coil's Orientation: 0 clockwi.
Espira2_cst_torru..._h	13	13	Coil's height
Espira2_cst_torru..._ra	1.4751012383135	1.4751012383135	Coil's major radius
Espira2_cst_torru..._ri	1.5	1.5	Coil's minor radius
Espira2_cst_torru..._phi	11.670125607462	11.670125607462	Coil's segmentation angle
Espira2_cst_torru..._N	15.728864298899	15.728864298899	Coil's Nr of turns
Espira2_cst_torru..._orien...	0	0	Coil's Orientation: 0 clockwi.

Irudia 6-20. Optimizazioaren emaitzak - parametroak

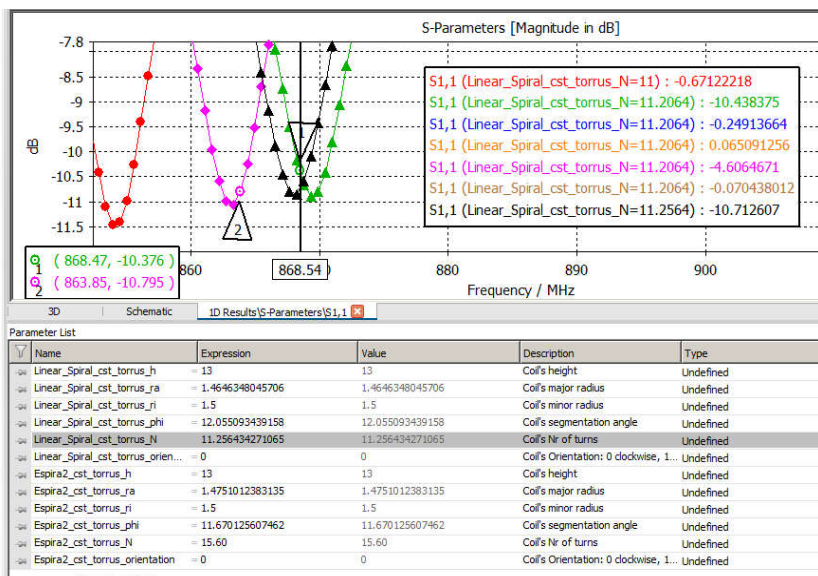
1. Espira multzoa
 - a. Buelta kopurua $N = 11,206434$
 - b. Altuera = 13 mm
 - c. Espiraren erradio txikiena: $r = 1,5$ mm
 - d. Espiraren erradio handiena: $r = 1,464634$ mm
 - e. Angelua = 12,05509 mm
2. Espira multzoa
 - a. Buelta kopurua $N = 15,728864$
 - b. Altuera = 13 mm
 - c. Espiraren erradio txikiena: $r = 1,5$ mm
 - d. Espiraren erradio handiena: $r = 1,4751012$
 - e. Angelua = 11,670125 mm

Hala ere, antenaren itxura ere aldatu du, 2. Espira multzoa jarraitzen zuen ardatzetik ateraz:



Irudia 6-21. Antena optimizatua

Antena diseinu hau 864,5 MHz inguruko simulazioak egiteko baliogarria da, baina 868,5 MHz-eko frekuentzian -7,2 dB-eko S11a ematen du. Martxan jarri diren gainerako SW optimizazioak ez dituzte espero ziren balioak eman. Ondorioz 867 eta 868,5 MHz-etara lan egiten duen beste antena bat diseinatu da, zenbait proba egin ostean:



Irudia 6-22. S11 bigarren antena

Laburbilduz, bi antena lortu dira, 865,5 MHz-etara lan egiten duen bat eta 867 y eta 868,5 MHz-etara lan egiten duen beste bat. Simulazioak maiztasun desberdinetara jaurtitzea ahalbidetzen du honek.

Antena diseinatu eta metodologiaren oinarria azaldu ostean, hurrengo pausoa simulazioak egitea da, baina horretarako gorputz ereduak behar dira.

6.6.3. Gorputz ereduak eta simulazioak

Gorputz batek jasaten duen erradiazioa eta SARa kalkulatzeko. Antenaren diseinua bukatu denean, hurrengo pausua giza-gorputzaren papera egiten duen 3D eredu (voxel model) bat diseinatu edo inportatzea da. Lan honetan erabili den lizentziak (Educational License), gorputz ereduak inportatzea eta erabiltzea ahalbidetzen du.

SAR simulazioak gauzatzeko, lehenik eta behin, materialei erabiliko diren frekuentzietarako "Makroa" aplikatu behar zaie, materialek, frekuentzia horietarako propietate dielektrikoak har ditzaten. Gero, Power Loss Density/Sar simulazio txantilio edota eredu bat gehitu behar da, eta gero post prozesatze bat exekutatu behar da SARen balioak lortu daitezten. Post-prozesatzea txantiloira gehitu daiteke, honela elkarren segidan egiten ditu biak.

Lan honetan bi gorputz eredu erabili eta simulazio adibide batzuk jaurti dira, nola egin beharko zen argi uzteko eta metodologia osorik azaldu ahal izateko.

CST voxel family bio models

CST programak gorputz eredu batzuk eskaintzen ditu Educational License-arekin, hauek inportatu besterik ez dira egin behar, simulazio ingurunean sartzeko. Inportatu eta gero, neurketen egoera berean egoteko, distantzia eta posizio berdiner jarri da.

Behin gorputzak inportatu direla, materialek frekuentzien arabera propietate dielektriko desberdinak dituztenez, Macro aukera erabiliz, giza gorputzaren material desberdinen propietate dielektrikoak definitu behar dira. Definitzean, simulazioetarako erabiliko den frekuentzia tartea zehaztu behar da.



Irudia 6-23. Simulazio ingurunea eredu inportatuarekin

Diseinaturiko gorputz ereduak

Frekuentzia hauetan eremu elektromagnetikoen dituzten penetrazioarengatik, gorputzaren lehenengo hiru geruzetan xurgatzea da ohikoena. Honengatik eta simulazio denborak murrizten dituelako, gorputz eredu sinplifikatu (laua) bat diseinatu da.

Gorputzaren lehenengo hiru geruzak eta euren lodierak hauek dira:

Taula 6-17. Geruzen lodiera

Geruzaren izena	Lodiera (mm)	Diseinuaren lodiera (mm)
Larruazala	1,1-1,6	1,3
Gantza	17 -34	50
Gantz biszerala	15-36	
Muskulua	8-16	12

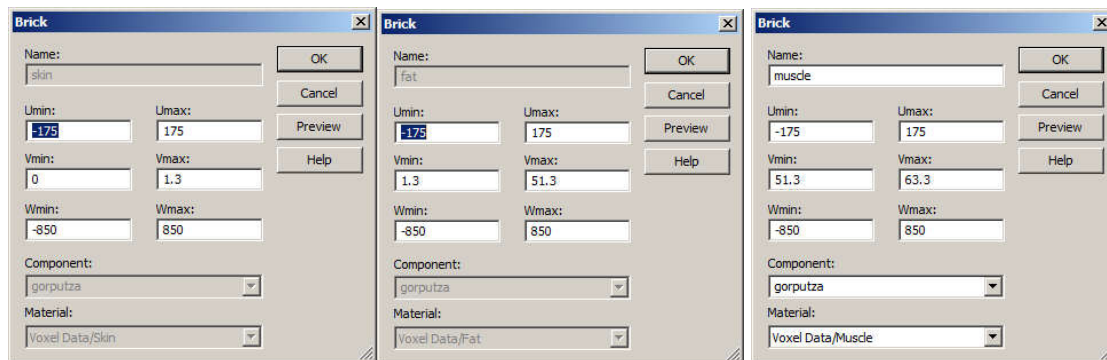
Gantza elementu bakarrean elkartu da, eredia are gehiago sinpletzeko asmoarekin. Tamainaren aldetik altuera erdiko pertsona baten dimentsioak erabili dira, gorputz osoa homogeneoa izango balitz bezala.

Taula 6-18. Gorputzaren dimentsioak

<i>Dimentsioa</i>	<i>Tamaina</i>
<i>Altuera</i>	1,70 m
<i>Zabalera</i>	35 cm

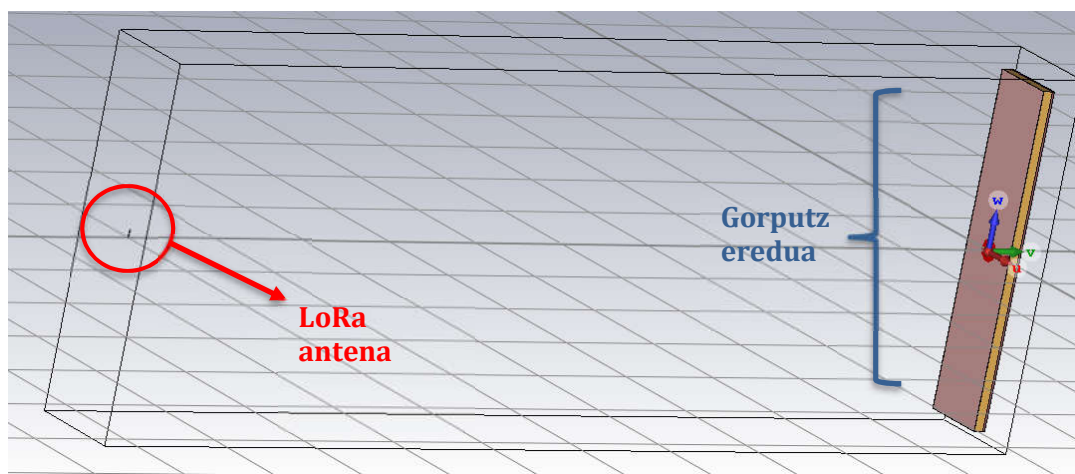
Geruzak sortzeko, “brick” (adreilu) desberdinak gehitu behar dira eta horiei material bat gehitu behar zaie. Material horiek, eskuz diseinatu daitezke, euren permitibitatea eta beste zenbait parametro gehituta, baina, lizentzia honek gorputz ereduak eskaintzen dituenek, gorputz eredu horietan dauden materialak erabili dira.

Azladu bezala, geruzek konfigurazio hau jarraitzen dute:



Irudia 6-24

Hemen ikusten da prozesu guztiaren emaitza:



Irudia 6-25. Sumulazio ingurunea eredu diseinatuarekin

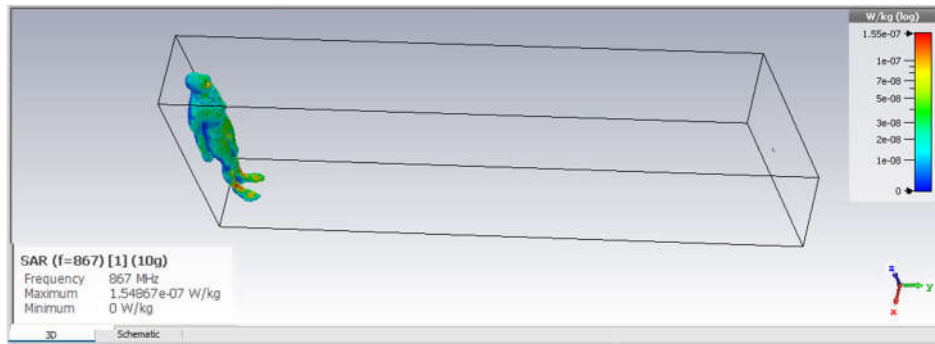
6.6.4. Simulazioen emaitzak

Kontutan hartu behar da simulazioetatik lortzen diren balioak ez dutela iraupen aktiboa kontutan hartzen. Nahiz eta lan honen helburu nagusia, simulazioak gauzaterena eta aztertzerena ez izan, simulazio adibide batzuk jaurti dira. Metodologia nola egin behar den argi geratu daiten eta metodologia osorik azaldu ahal izateko.

Bi eredu desberdinekin egin dira simulazioak, adibide modura emateko. Hala ere, ez dira emaitza erabakigarriak lortu, ez baita lan honen helburua. Lan honek garatu den metodologia azaltzea du herlburu, etorkizunean ikerketak egiteko aukerak ematen dituelarik.

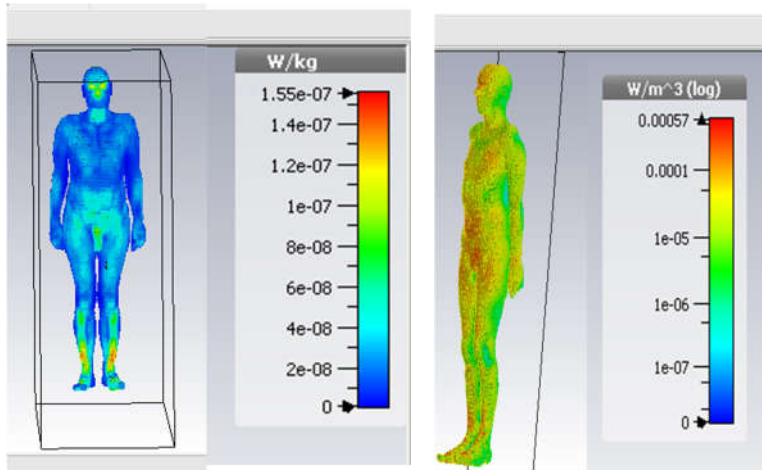
Simulazioak CSTren gorputz ereduekin

SAR simulazio bat egin da gorputz osoarekin, simulazio hauek denbora eta baliabide ugari behar dituztelako, simulazio honek konkretuan astebete iraun zuen. Simulazio hauek, portuaren elikadura balio lehenetsiekin utzi da kasu honetan egin dira.



Irudia 6-26 SAR eredu inportatuarekin

Emaitzak hemen ikusi daitezke, eskala desberdinetan:

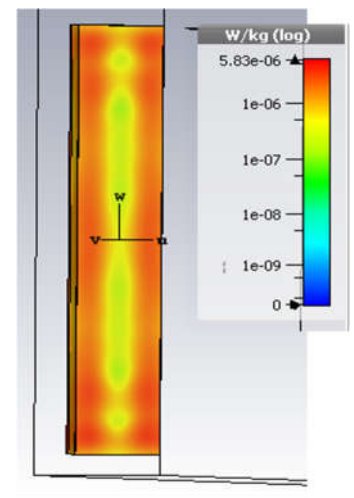
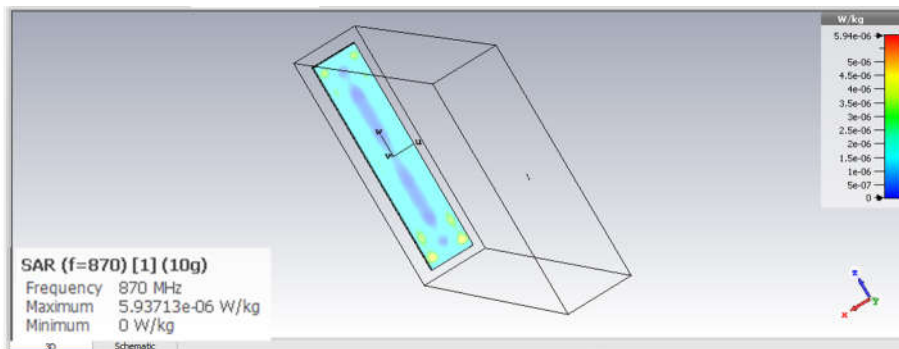


Irudia 6-27. SAR eskala linealean (ezk) eta logaritmikoan (esk)

Simulazioak diseinaturiko gorputz ereduarekin

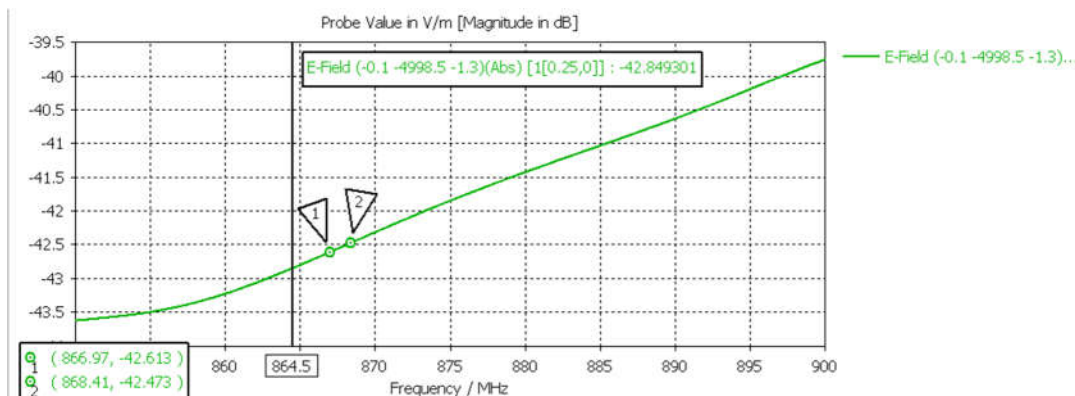
Kasu honetan, simulazio bat eta eremu elektriko puntualaren neurketa bat egin dira. Gorputza homogeenagoa izanda simulazioek denbora gutxiago behar dute kasu honetan, hala ere, ordu ugariakoak izan ohi dira.

Hauek dira SARaren emaitzak 870 MHz-tan:



Irudia 6-28. SAR diseinaturiko ereduarekin

SAR simulazioetatuz gain, eremu elektriko puntualen neurketa-simulazioak egin dira. Horretarako, lehenik eta behin, puntu zehatz bat zehaztu behar zaio, kasu honetan, azalaren erdiko puntua hartu da erreferentzia modura. Hasteko, balio lehenetsiekin Portuaren elikadura modura 0,25 Veko anplitudeko seinalea sartu zaio, 0,32 mW inguruko potentzia ematen duena, hau da, 14 dBm:



Irudia 6-29. Eremu elektrikoa (E field probe)

Bi markagailuek zehaztutako maiztasunean eremu elektrikoak duen balioa ematen dute. Eremu elektrikoak balio hauek ez dute “*duty-cycle*”-a kontuan hartzen, beraz kasu txarrenerako izango zen, uneoro transmititzen dagoen seinale bat izango bailitzan.

6.7. Etorkizuneko lanak

Metodologia hau oso irekia da lan berrien garapenerako, baizik eta teknologien esposizio ebaluaketarako aukera ematen du.

Metodologia honen bidez, LoRa-aren azterketa eta ebaluaketa sakona egin daiteke, esposizioa neurketen eta simulazioen analisi eta konparaketa bat eginez, adibidez:

- Giza gorputzekin simulazio gehiago egin eta neurketekin konparatu, hainbat konfigurazio desberdin gehiago erabiliz:
 - Gorputz eredu desberdinekin (umeak, emakume helduak, gizon helduak...)
 - Distantzia eta posizio desberdinetan
 - Gailu ugari aldeberean lan egiten dutenean

6.8. Kontutan hartu beharrekoak eta zailtasunak

Metodologia hau gauzatzeak hainbat zailtasun ditu:

- LoRa-ren gailuen gidaliburuek ez dute zenbait kasutan informazio nahikoa ematen, horregatik erabilera zailtzen da.
- LoRa-aren SWak ez dira erabilerrazak, eta horien manualak ez dituzte kontzeptu asko argitzen.
- CST Studio Suite programaren ezagutza sakonak beharrezkoak dira, oso SW ona baita, baina konplexua aldi berean:
 - Antenaren diseinua.
 - Simulazioak gauzatzeko behar dituen gelaxken optimizazioa.
 - Datu eta emaitzen interpretazioa eta irakurketa.
 - Kitzikapena aldatzea.
 - Edozein aldaketa egiteko kontuan hartu beharrezkoak asko dira.
- Simulazioen iraupena oso luzea izan ohi da
 - Edozein aldaketa berri probatzeko aukera zailtzen dute

Baliabide ugari ere eskatzen ditu:

- Simulazioen beharrak:
 - Ordenagailuak 20 GB RAM behar ditu gutxienez.
 - Ordenagailuaren prozesadorea ere ahaltsua izan behar da.

7. Plangintza eta baliabideak

Atal honetan proiektua gauzatzeko aurretik eginiko planifikazioa deskribatzen da. Proiektua lan paketeetan banandu (LP) da eta banan-banan azalduko dira, bakoitzean beharrezko baliabideak azalduz. Lan-pakete bakoitzean eginbehar desberdinak daude, bakoitza iraupen batekin. Lan-pakete bakoitzaren barruan ataza desberdinak egon daitezke, egin behar den lanaren arabera.

Lehenik eta behin proiekturen lan-taldea azalduko da:

7.1. Lan-taldea

Taula 7-1. Lan-taldea

Izen-Abizenak	Erantzukizuna	Rola
Iratxe Landa	Telekomunikazio ingeniartzan doktorea	Proiektuaren bideraketa, gainbegiraketa eta zuzenketa (Proiektu burua)
Marta Fernandez	Telekomunikazio ingeniartzan doktorea	Proiektuaren bideraketa, gainbegiraketa eta zuzenketa (Bigarren proiektu burua)
Aitor Landa	Ikaslea	Proiektuaren burutzea

7.2. Lan paketeen deskribapena

7.2.1. LP 1 Proiektuaren kudeaketa eta gainbegirategia

Proiektuaren zuzendariak gradu amaierako lanaren oinarriak ikasleari azaldu.

Taula 7-2. LP1.1: Proiektuaren definizioa

LP1.1: Proiektuaren definizioa	
Hasiera-data	2019/01/28
Bukaera-data	2019/01/28
Iraupena	3h
Entregagaiak	Proiektuaren izenburua eta jarraibideak
Atzak	Proiektuan egingo dena eta jarraituko diren pausoak zehaztu
Arduradunak	Proiektu buruak (PB) eta proiektuaren egilea
Baliabideak	<ul style="list-style-type: none"> • Artikuluak • Ordenagailua
Orduak	<ul style="list-style-type: none"> • 3h

Taula 7-3. LP1.2: Proiektuaren jarraipena

LP1.2: Proiektuaren jarraipena	
Hasiera-data	2019/02/28
Bukaera-data	2019/07/22
Iraupena	Egun zehatzak, Gantt diagraman zehaztuak
Entregagaiak	<ul style="list-style-type: none"> • Astean zehar eginikoak eta lortutakoak • Izandako arazoak
Atzak	Proiektua bideratzeko eta akatsak zuzentzeko proiektu egilearen eta zuzendariaren arteko bilera periodikoak
Arduradunak	Proiektu buruak (PB) eta ikaslea
Baliabideak	Ofimatika ordenagailua
Orduak	34 h

Taula 7-4. LP1.3: Proiektuaren hasieratzea

LP1.3: Proiektuaren hasieratzea	
Hasiera-data	2019/1/29
Bukaera-data	2019/2/3
Iraupena	6 egun
Entregagaiak	<ul style="list-style-type: none"> • Plangintza
Atazak	Informazioa bildu eta jarraituko den plangintza definitu
Arduradunak	Ikaslea
Baliabideak	<ul style="list-style-type: none"> • Ordenagailua
Orduak	18 h

7.2.2. LP 2 LoRa-ren parametro konfiguragarrien azterketa

Taula 7-5. LP2.: LoRa-ri buruz informatu

LP2.: LoRa-ri buruz informatu	
Hasiera-data	2019/2/4
Bukaera-data	2019/2/17
Iraupena	14 egun
Entregagaiak	<ul style="list-style-type: none"> • Konfiguratu deitezkeen parametroen eta parametro horiek aldatzearen eraginaren txostena
Atazak	<ul style="list-style-type: none"> • LoRa-ren kontzeptu garrantzitsuenak ulertu • LoRa-k baimentzen dituen parametro konfiguragarriak aztertu • Transmisioan eragina duten horiek duten eragina analizatu
Arduradunak	Ikaslea
Baliabideak	<ul style="list-style-type: none"> • Artikuluak • Ordenagailua • LoRa gailua
Orduak	42 h

7.2.3. LP 3 Erabiliko den LoRa gailuarekin trebatu eta aztertu

Taula 7-6. LP3: Erabiliko den gailu zehatzak baimentzen dituen parametroak aztertu

LP3: Erabiliko den gailu zehatzak baimentzen dituen parametroak aztertu	
Hasiera-data	2019/2/18
Bukaera-data	2019/3/7
Iraupena	18 egun
Entregagaiak	Neurketak egiteko jarraituko diren konfigurazioen txostena
Atazak	<ul style="list-style-type: none"> • Gailua erabiltzen eta konfiguratzeko ikasi • Konfiguartu daitezkeen parametroak aztertu • Interesekoak diren konfigurazioak erabaki
Arduradunak	Ikaslea
Baliabideak	<ul style="list-style-type: none"> • Artikuluak • Ordenagailua • LoRa gailua
Orduak	54 h

7.2.4. LP 4 LoRa gailuarekin urruneko eremuan neurketak egin

Taula 7-7. LP4: LoRa gailua erabiliz definituriko konfigurazioekin neurketak egin

LP4: LoRa gailua erabiliz definituriko konfigurazioekin neurketak egin	
Hasiera-data	2019/3/8
Bukaera-data	2019/3/28
Iraupena	21
Entregagaiak	Neurketen “.csv” fitxategiak
Atazak	<ul style="list-style-type: none"> • Denboran neurketak egin espektro analizatzailea erabiliz • Frekuentzian neurketak egin espektro analizatzailea erabiliz • Konfigurazioak aldatzen joan neurketak egin bitartean
Arduradunak	Ikaslea

Baliabideak	<ul style="list-style-type: none"> • Anritsu espektro analizatzailea • LoRa gailua • Ordenagailua
Orduak	63 h

7.2.5. LP 5 Prozesamendurako Matlab-eko programak garatu

Taula 7-8. LP5: Prozesamendurako Matlab-eko programak garatu

LP5: Prozesamendurako Matlab-eko programak garatu	
Hasiera-data	2019/3/29
Bukaera-data	2019/4/18
Iraupena	21 egun
Entregagaiak	<ul style="list-style-type: none"> • Kanalaren potentziak (konfigurazio desberdinetarako) Excel baten • Denbora neurketen emaitzak (konfigurazio desberdinetarako) Excel baten • Excelak aztertu erroreen bila
Atazak	<ul style="list-style-type: none"> • Banda-zabaleraren arabera kanalaren potentzia kalkulatzeko duen programa garatu (frekuentziaren domeinuan) • Seinalearen denboran aztertzen duen programa garatu: aktibo dagoen denbora eta periodoa kalkulatzeko dituen
Arduradunak	Ikaslea
Baliabideak	<ul style="list-style-type: none"> • Ordenagailua • Matlab Lizenzia • “.csv” fitxategiak
Orduak	42 h

7.2.6. LP 6 CST Studio Suite programarekin trebatu

Taula 7-9. LP6: CST Studio Suite programarekin trebatu

LP6 : CST Studio Suite programarekin trebatu	
Hasiera-data	2019/4/19
Bukaera-data	2019/5/13
Iraupena	25 egun
Entregagaiak	-
Atazak	<ul style="list-style-type: none"> • CST Studio Suitek erabiltzen ikasi, egileak eskaintzen dituen baliabideetatik eta Interneteko gainerako tutorialetatik • Irakaslearen azalpenak jaso
Arduradunak	Ikaslea
Baliabideak	<ul style="list-style-type: none"> • Ordenagailua
Orduak	50 h

7.2.7. LP 7 Antenaren SW bidezko diseinua eta optimizazioa egin

Taula 7-10. LP7: Antenaren SW bidezko diseinua eta optimizazioa

LP7: Antenaren SW bidezko diseinua eta optimizazioa egin	
Hasiera-data	2019/5/14
Bukaera-data	2019/5/26
Iraupena	13 egun
Entregagaiak	Errealitatezko antenaren antza duen antenaren diseinua
Atazak	<ul style="list-style-type: none"> • LoRa chip-ak dakarren antena neurtu eta ezaugarritu • Diseinua egin CST bidez • Diseinua optimizatu
Arduradunak	Ikaslea
Baliabideak	Ordenagailua
Orduak	39 h

7.2.8. LP 8 Simulazioak egin

Taula 7-11. LP8: Gorputz ereduak eta diseinatutako antenarekin simulazioak egin

LP8: Gorputz ereduak eta diseinatutako antenarekin simulazioak egin	
Hasiera-data	2019/5/27
Bukaera-data	2019/6/20
Iraupena	25 egun
Entregagaiak	Simulazioen emaitzak
Atazak	<ul style="list-style-type: none"> • Gorputz ereduak sartu • Simulazioak egin erabakitako frekuentzietan
Arduradunak	Ikaslea
Baliabideak	Ordenagailua
Orduak	79 h

7.2.9. LP9 Neurketen datuak bihurtu, grafikoak egin, multzokatu, konparatu eta aztertu

Taula 7-12. LP9: Neurketen datuak bildu multzokatu, konparatu eta aztertu

LP9: Neurketen datuak bildu multzokatu, konparatu eta aztertu	
Hasiera-data	2019/6/21
Bukaera-data	2019/7/4
Iraupena	14 egun
Entregagaiak	<ul style="list-style-type: none"> • Esposizio kalkuluak dituzten bukaerako excel-ak
Atazak	<ul style="list-style-type: none"> • Emaitzak aztertu eta bihurtu • Datuak konparatu • Esposizio maila eta mugekin konparatu
Arduradunak	Ikaslea
Baliabideak	Ordenagailua
Orduak	42 h

7.2.10. LP10: Egindakoak antolatu eta ondorioak atera

Taula 7-13 LP10 Egindakoak antolatu eta ondorioak atera

LP10: Egindakoak antolatu eta ondorioak atera	
Hasiera-data	2019/7/5
Bukaera-data	2019/7/18
Iraupena	14 egun
Atazak	Ondorioak atera
Arduradunak	Ikaslea
Baliabideak	Ofimatika ordenagailua
Orduak	42 h

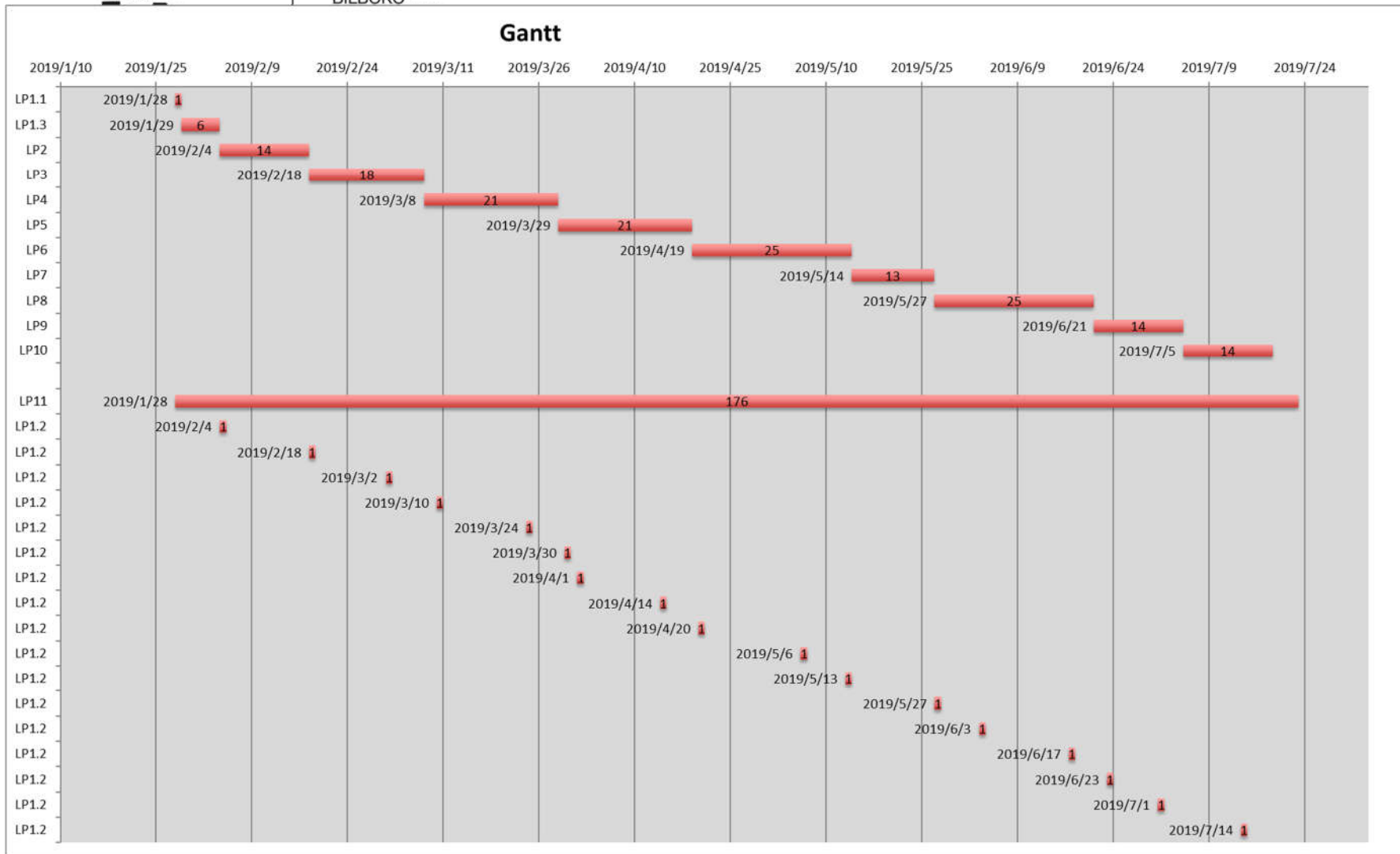
7.2.11. LP11: Dokumentazioa

Taula 7-14. LP11 Dokumentazioa

LP11: Dokumentazioa	
Hasiera-data	2019/1/28
Bukaera-data	2019/7/22
Iraupena	176
Entregagaiak	Bukaerako dokumentua
Atazak	<ul style="list-style-type: none"> • Lortutakoak dokumentatu • Ikasitakoak dokumentatu
Arduradunak	Ikaslea
Orduak	176 h

7.3.Gantt

Lan pakete guztiak denbora-lerro baten adierazi dira, Gantt sistema erabiliz.



Grafikoa 7-1. Gantt

8. Aurrekontua

Atal honetan proiektuan zehar izandako gastuen aitortpena azaltzen da.

8.1. Giza-baliabideak: barne-orduak

Partaide bakoitzaren lanordu kopurua eta horren kostuak azaltzen dira.

Taula 8-1. Berne-orduak

Langilea	Kostua (€/orduko)	Ordu kopurua	Kostua (€)
Senior ingeniaria	50	38	1900
Junior ingeniaria	30	677	20310
Barne-orduen kostu totala:			22210

8.2. Amortizazioak

Ataza honetan proiektua garatzeko beharrezkoak izan diren baliabideen kostu aitortpena egiten da.

Taula 8-2. Amortizazioak

Baliabidea	Kostua (€)	Proiekturako ordu kopurua	Kostua (€)
Ordenagailua (Matlab eta Simulazioak)	1399	453	66,98
Ordenagailua (Ofimatika)	500	298	12,35
LoRa evaluation Kit 800 (DV164140-1)	554,1	159	10,36
CST Studio suite	2000 €/hile	231	266,58
Matlab R2016b	1000	63	4,94
Amortizazioen kostu totala:			490,64

8.3. Gastuak

Berrerabili ezin diren gastuen aitorpena egiten da azpiatal honetan:

Taula 8-3. Gastuak

<i>Baliabidea</i>	<i>Kostua (€)</i>
<i>Bulego gastuak eta elektrizitatea</i>	27,5
<i>Pendrive-a</i>	12
<i>Kostu totala:</i>	39,5

8.4. Kostu aitorpena

Proiektu honetara beharrezkoa izan den gastuaren laburpena egiten da azpiatal honetan:

Taula 8-4. Kostu aitorpena

Kostu aitorpena	€
Gastuak	39,5
Giza-baliabideak	22210
Amortizazioak	490,6464588
Azpitotala	22740,14646
Ezbeharrak (azpitotalarekiko %5)	1137,007323
GUZTIRA	23877,15378

9. Arriskuen analisia

9.1. Tresnekin arazoak

Gailuen ezagutza baxuagatik edota konfigurazio oker batengatik arazoak, hala nola:

- LoRa gailuak ez transmititzea
- Anritsu Espektro analizatzailearekin neurketa okerrak egitea
- Ezaugarriak:
 - Eragina: Altua
 - Agertzea: ertaina
- Nola saihestu:
 - Informazio ugari eta fidagarria bildu

9.2. Lan-taldeko kideren baten gaixotzea

Kontuan hartu beharreko puntu garrantzitsu bat da, kide baten bajak bere eginkizunekin ez jarraitzea ekartzen baitu. Beste edonork eginkizun horiek betetzeko gai ez bada ondorio lazgarriak ekarri ditzake. Gainera, gainerako lankideen lana edota proiektua atzeratu edota geldiarazi dezake egoera honek

- Ezaugarriak:
 - Eragina: Altua
 - Agertzea: oso baxua
- Nola saihestu:
 - Kau honetan neurriak gertatu aurretik hartu behar dira, prebentzioa da garrantzitsua kasu hauetan:
 - Osasun gomendioak kontuan hartu
 - Segurtasun gomendioak kontuan hartu

9.3. Atzerapenak

Posible da proiektuan zehar, arrazoi ezberdinen ondorioz plangintza jarraitu ezin izatea eta atzerapenak gertatzea. Proiektuaren atalen baten atzerapenak proiektu osoa atzeratzea ekar lezake eta arazoa are larriagoa izatera igaroko zen.

- Ezaugarriak:
 - Eragina: Ertaina
 - Agertzea: baxua
- Nola saihestu:
 - Ando neurtu beharko da proiektuaren atal bakoitza burutzeko beharrezko denbora
 - Atzerapenak ekar ditzaketan faktoreak aurreikusi eta gertatzekotan kontingentzia-plana eduki

9.4. Datu galera

- Datuen galerak sarri gertatzen dira:
 - Datuak zituen memoria galtzea
 - Datu garrantzitsuen gainean berridaztea
 - Nahi gabeko ezabatzeak

- Ezaugarriak:
 - Eragina: ertaina
 - Agertzea: Altua

- Nola saihestu:
 - Fitxategiak hainbat toki ezberdinetan gorde
 - Bertsio desberdinak sortu, atzera-buelta eman ahal izateko

9.5. Baliabideen urritasuna

- CSTek baliabide asko behar ditu, hala nola: RAM kapazitate handia, memoria handia eta prozesadore azkarra. Honen ondorioz simulazioak gaizki edota oso astiro joatea eragin dezakete, baita simulazioa ezin jaurtitzea ere.
- Ezaugarriak:
 - Eragina: baxua
 - Agertzea: ertaina
- Nola saihestu:
 - Simulazioak optimizatzen saiatu
 - Eredu ez oso finak erabili
 - ...

Taula 9-1. Arriskuen Eragin-Probabilitate taula

		Eraginen larritasuna				
		%10	%30	%50	%70	%90
Agertze Probabilitatea	%10				2	
	%30			3		
	%50		5		1	
	%70			4		
	%90					

10. Ondorioak

Proiektu honekin, LoRa gailuen irrati komunikazioek urruneko eremuan sortutako eremu elektromagnetikoen esposizioaren ebaluaziorako metodologia oso bat garatu da. Metodologia honek beste teknologia batzuen EEM esposizioa aztertzea ahalbidetzen du.

Hurrengo urteetan, gailu eta sare hauen hazkundera handia izatea iragartzen da, horregatik, esposizio aztertze-lanen beharra dago. Eremu elektromagnetiko baten erradiaziopean dagoen gorputzak jasaten duen esposizioa, igortzen dagoen denborarekiko proportzionala da, horregatik, beharrezkoa da, paketea airean egondako denbora aztertzea. Denbora horretan eragina duten parametroen azterketa egin da lan honetan, eta hauek esposizioan nola eragin dezaketen aztertzea ahalbidetzen dituzten jarraibideak zehaztu dira.

Esposizio mailak neurtzeko beharrezko jarraibideak garatu eta baliabideak eskaini dira proiektu honetan. Baita, neurketa horiek, araudiak zehazturiko mugekin konparatzea ahalbidetzen duen magnitudeen haztatze eta bihurketak egiteko eredia ere.

Gainera, esposizio kalkulu hauek teorikoki simulazioen bidez egiteko jarraibideak ere azaltzen dira, LoRa-ak European lan egiten duen frekuentzietan lan egiten duten antena batzuk diseinatu direlarik. Gorputz eredu bat ere diseinatu da, eta horren gaineko eremu elektrikoaren balioak atera dira. SAR simulazioak ere jaurti dira, eta lortutako emaitzak eman dira. Simulazio hauek adibide modura eskaini dira, etorkizuneko beste lanetarako bidea irekiz.

Konfigurazio ezberdinetarako neurketak egin dira, eta esposizioa aztertzeko datuen multzokatzeak pentsatu eta burutu dira. Neurketei dagokienez, ikusi daiteke frogatutako konfigurazioekin nola esposizio mugak gainditzen ez diren, eta beste konfigurazio batzuk erabiltzeko edota teknologia batzuetarako irekia dago proiektu hau.

Lan honi jarraiera eman dakioke, hala nola, konfigurazio desberdin ugariarekin neurketa eta simulazioak egitearekin, eremu hurbileko metodologia baten garapenarekin, gailu askoren emisioarekin, edota gorputz eredu desberdinen gaineko simulazioekin. Metodologia hau proposa da denbora eremuan LoRa teknologiaren portaera antzekoa duten gailuen ebaluaketarako, gailuen igortze denborak kontuan hartzen baititu.

Erreferentziak

- [1] LoRa Alliance. [kontsulta data: 2019/04/14] Hemen eskuragarri: <https://lora-alliance.org/>
- [2] MOYA QUIMBITA, Michael Andres. *Evaluación de pasarela LoRa/LoRaWAN en entornos urbanos*. Master amaierako lana. Universidad Politecnica de Valencia, 2018. [kontsulta data: 2019/04/14] Hemen eskuragarri: <https://riunet.upv.es/handle/10251/109791>
- [3] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, y W. Townsley, "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things," *Sensors*, bol. 16, zkia. 9, p. 1466, 2016. [Online. Kontsulta data: 2019/03/12]. Hemen eskuragarri: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/9/1466>
- [4] J. Bardyn, T. Melly, y O. Seller, "IoT: The era of LPWAN is starting now," *European Solid-State*, 2016. [Online. Kontsulta data: 2019/03/14]. Hemen eskuragarri: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7598235/>
- [5] Medium Corporation. *Haciendo IoT con LoRa: Capítulo 1* 2016. [Online]. Hemen eskuragarri: <https://medium.com/beelan/haciendo-iot-con-lora-cap%C3%ADtulo-1-qu%C3%A9-es-lora-y-lorawan-8c08d44208e8>
- [6] Martin Christiaan Bor, Utz Roedig, Thiemo Voigt and Juan M. Alonso. "Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?" *Conference Paper*. November 2016. [Online. Kontsulta data: 2019/04/1] Hemen eskuragarri: <https://www.researchgate.net/publication/310200794>
- [7] Semtech, "LoRa Modulation Basics," num. May, pp. 1–26, 2015. [Online. Kontsulta data: 2019/04/1] Hemen eskuragarri: <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>
- [8] LoRa Alliance™ [Online. Kontsulta data: 2019/07/15] Hemen eskuragarri: <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance>
- [9] Microchip, "LoRa Technology Evaluation Suite User's Guide," Microchip, Tech. Rep., 2016 [Online. Kontsulta data: 2019/07/15] Hemen eskuragarri: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/40001847a.pdf>
- [10] Croce, D.; Gucciardo, M.; Mangione, S.; Santaromita, G.; Tinnirello, I. *Impact of LoRa Imperfect Orthogonality: Analysis of Link-Level Performance*. *IEEE Commun. Lett.* 2018, 22, 796–799. [Online. Kontsulta data: 2019/07/15] Hemen eskuragarri: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8267219>

[11] LoRa/LoRaWAN tutorial 11: Carrier Frequencies and Bandwidths. [Online. Kontsulta data: 2019/07/15] Hemen eskuragarri: <https://www.youtube.com/watch?v=Ysso5M7b-fE>

[12] LoRa/LoRaWAN tutorial 13: Symbol, Spreading Factor and Chip [Online. Kontsulta data: 2019/07/15] Hemen eskuragarri: <https://www.youtube.com/watch?v=0FCrN-uVpw>

[13] All About LoRa and LoRaWAN - LoRa: Symbol generation [Online. Kontsulta data: 2019/07/15] Hemen eskuragarri: <https://www.sghosly.com/p/lora-is-chirp-spread-spectrum.html>

[14] Bor, M.C.; Roedig, U.; Voigt, T.; Alonso, J.M. *Do LoRa low-power wide-area networks scale?* In Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, Malta, 13–17 November 2016; [Online. Kontsulta data: 2019/07/15] Hemen eskuragarri: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=2989163>

[15] Umber Noreen, Ahcène Bounceur, and Laurent Clavier *A Study of LoRa Low Power and Wide Area Network Technology* [Online. Kontsulta data: 2019/07/15] Hemen eskuragarri: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8075570>

[16] Air Time Calculator [Online. Kontsulta data: 2019/07/15] Hemen eskuragarri: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8075570>

[17] ¿Qué diferencia radiación ionizante y no-ionizante? [Online. Kontsulta data: 2019/07/15] Hemen eskuragarri: <https://curiosoando.com/que-diferencia-radiacion-ionizante-y-no-ionizante>

[18] Jorge Skvarka and Aníbal Aguirre. *Normas y estándares aplicables a los campos electromagnéticos de radiofrecuencias en América Latina: guía para los límites de exposición y los protocolos de medición* [Online. Kontsulta data: 2019/07/15] Hemen eskuragarri: <https://www.scielosp.org/pdf/rpsp/2006.v20n2-3/205-212/es>

[19] Andrés F. Romero G. *Protocolo de pruebas para evaluar el SAR (Tasa de Absorción Específica) producido por terminales móviles.*

[20] Francisco Solano Eizaguirre. Proyecto de Fin de Carrera. Julio 2013. *Ensayos de laboratorio para la medida de la tasa de absorción específica (SAR) en dispositivos móviles*

[21] Marine Lorient; Ammar Aljer; Isam Shahrour. *Analysis of the use of LoRaWAN technology in a large-scale smart city demonstrator* [Online. Kontsulta data: 2019/07/15] Hemen eskuragarri: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8125011>

[22] ICNIRP. Recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (hasta 300 GHz)

1. eranskina: Matlab kodea frekuentzian kanalaren potentzia kalkulatzeko

LeerCalcularExcel_loop

```
clear all
%%%%% Zehaztutako banda-zabalerarekin frekuentzia zentrolean
kanalaren %%%%% potentzia neurtzen da
c=1;
for c=1:1:72

FileName= ['.\\MedidasFreq5m\20190614F', num2str(c), '.csv']
datos=importfileDatosFroga(FileName); %%Potentzia datuak inportatzen
ditu
startfreq=importfileStartFreqHz(FileName)/(10^6);%% start freq
inportatzen %%Mhz
stopfreq=importfileStopFreqHz(FileName)/(10^6);%%Mhz

N=10001-1; %%lagin kopurua definitzeko

%%BW=1.62 <- 500 kHz (LoRa BW)
%%BW=1 <- de 125 kHz

if mod(c,2)==1
    BW =1
else
    BW =1.62
end

centerFreq= (startfreq+stopfreq)/2;

%% VVVVVVVVVVV
VVVVVVVVVV
%% VVVVVVVVVV   kanalaren mugak definitzeko funtzioak   VVVVVVVV
eje_freq= 1:N;
[m,n] = size(eje_freq);
salto=(stopfreq-startfreq)/n;

% %% Kanal hasieraren zuzena irudikatzeko
chStartFreq = (centerFreq-BW/2) * ones(size(datos));%%MHz
% %% Kanalaren finala
chStopFreq = (centerFreq+BW/2) * ones(size(datos));
```

```

%%% VVVVVVVVVV  cahnnel power kalkulatzeko funztioak VVVVVVVV

rbw=importfileRBWFroga(FileName)/(10^6);%%input('dame el RBW-->');

muestraInit=round((chStartFreq(1)-startfreq)/salto)+1
muestraFin=round((chStopFreq(1)-startfreq)/salto)+1

numero_muestrasCanal= (muestraFin-muestraInit)+1;

%Kanalaren potentziaren kalkuluak:
traza(1:numero_muestrasCanal)=datos(muestraInit:muestraFin); %%balioak
irauli

traza_lineal(1:numero_muestrasCanal)=10.^(traza(1:numero_muestrasCanal)
)/10);%%linealean

partel=(sum(traza_lineal(1:numero_muestrasCanal)))/numero_muestrasCanal;
power=10*log10((BW/rbw)*(partel))

Guardar_excell_freq;
end
  
```

LeerPlotearCalcularV3_tepideCualHacer.m

```

clear all
%%%%%%%% aurrekoaren kalkulu berak egiten ditu, baina kalkuluak zein
sekuentzia zenbakiri aplikatu nahi zaion eskatzen du eta egiten duena
irudikatzen du. Ez du excelean gordetzen.
c=1;
c=input('Ingrese el valor de la variable: ');

FileName= ['.\\MedidasFreq5m\20190614F',num2str(c),'.csv']
datos=importfileDatosFroga(FileName);
startfreq=importfileStartFreqHz(FileName)/(10^6);
stopfreq=importfileStopFreqHz(FileName)/(10^6);%%Mhz
N=10001-1;
BW=1;

centerFreq= (startfreq+stopfreq)/2;

eje_freq= 1:N;
[m,n] = size(eje_freq);
salto=(stopfreq-startfreq)/n;
eje_x= startfreq:salto:(stopfreq);%%-salto
  
```

```
figure(c)
plot(eje_x,datos);
hold
%% inicio de canal
chStartFreq = (centerFreq-BW/2) * ones(size(datos));%%MHz
plot(chStartFreq, datos, 'r');

%% Final de canal
chStopFreq = (centerFreq+BW/2) * ones(size(datos));
plot(chStopFreq, datos, 'r');

rbw=importfileRBWFroga(FileName)/(10^6

    muestraInit=round((chStartFreq(1)-startfreq)/salto)+1
    muestraFin=round((chStopFreq(1)-startfreq)/salto)+1

    numero_muestrasCanal= (muestraFin-muestraInit)+1;

traza(1:numero_muestrasCanal)=datos(muestraInit:muestraFin);

traza_lineal(1:numero_muestrasCanal)=10.^(traza(1:numero_muestrasCanal)/10);

partel=(sum(traza_lineal(1:numero_muestrasCanal)))/numero_muestrasCanal;
    power=10*log10((BW/rbw)*(partel))



---




---


    Guardar_excell_freq.m


---



colnames=
{'id_medida','Nombre_Fichero','startfreq','stopfreq','rbw','power'};

nomFich='resultadosFreq.xlsx';
xlswrite(nomFich, colnames, 'Power','A1');
[ndata, headertext] = xlsread(nomFich, 'Power');
tamano = size(ndata);
filas = tamano(1);
last_id = filas+2;
fila_actual = ['A' num2str(filas+2)];

exdata = [num2str(last_id) , cellstr(FileName), startfreq,
stopfreq,rbw,power];
```

```
xlswrite(nomFich, exdata, 'Power', fila_actual);
```

```
importfileRBWFroga(filename)
```

```

function T1 = importfileRBWFroga(filename)
%IMPORTFILE Import numeric data from a text file as a matrix.
% T1 = IMPORTFILE(FILENAME) Reads data from text file FILENAME for
the
% default selection.
%
% T1 = IMPORTFILE(FILENAME, STARTROW, ENDROW) Reads data from rows
% STARTROW through ENDROW of text file FILENAME.
%
% Example:
% T1 = importfile('20190614T1.csv', 4, 4);
%
% See also TEXTSCAN.

%% Initialize variables.
delimiter = ',';
startRow = 4;
endRow = 4;

%% Format string for each line of text:
% column1: double (%f)
% For more information, see the TEXTSCAN documentation.
formatSpec = '%f*s*s*s%[\n\r]';

%% Open the text file.
fileID = fopen(filename, 'r');

%% Read columns of data according to format string.
% This call is based on the structure of the file used to generate
this
% code. If an error occurs for a different file, try regenerating the
code
% from the Import Tool.
textscan(fileID, '%[\n\r]', startRow(1)-1, 'ReturnOnError', false);
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, endRow(1)-startRow(1)+1,
'Delimiter', delimiter, 'ReturnOnError', false);
for block=2:length(startRow)
    frewind(fileID);
    textscan(fileID, '%[\n\r]', startRow(block)-1, 'ReturnOnError',
false);
    dataArrayBlock = textscan(fileID, formatSpec, endRow(block)-
startRow(block)+1, 'Delimiter', delimiter, 'ReturnOnError', false);
    dataArray{1} = [dataArray{1};dataArrayBlock{1}];
end
  
```

```

%% Close the text file.
fclose(fileID);

%% Post processing for unimportable data.
% No unimportable data rules were applied during the import, so no
post
% processing code is included. To generate code which works for
% unimportable data, select unimportable cells in a file and
regenerate the
% script.

%% Create output variable
T1 = [dataArray{1:end-1}];

```

```

importfileDatosFroga(filename)

```

```

% POTENTZIA DATUAK INPORATZEN DITU
function T1 = importfileDatosFroga(filename)
%IMPORTFILE Import numeric data from a text file as a matrix.
% T1 = IMPORTFILE(FILENAME) Reads data from text file FILENAME for
the
% default selection.
%
% T1 = IMPORTFILE(FILENAME, STARTROW, ENDROW) Reads data from rows
% STARTROW through ENDROW of text file FILENAME.
%
% Example:
% T1 = importfile('20190614T1.csv', 12, 10012);
%
% See also TEXTSCAN.

%% Initialize variables.
delimiter = ',';
%%if nargin<=2
    startRow = 12;
    endRow = inf;
%%end

%% Format string for each line of text:
% column1: double (%f)
% For more information, see the TEXTSCAN documentation.
formatSpec = '%f*s*s*s*s%[\n\r]';

%% Open the text file.
fileID = fopen(filename, 'r');

%% Read columns of data according to format string.
% This call is based on the structure of the file used to generate
this

```

```

% code. If an error occurs for a different file, try regenerating the
code
% from the Import Tool.
textscan(fileID, '%[^\n\r]', startRow(1)-1, 'ReturnOnError', false);
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, endRow(1)-startRow(1)+1,
'Delimiter', delimiter, 'EmptyValue', NaN, 'ReturnOnError', false);
for block=2:length(startRow)
    frewind(fileID);
    textscan(fileID, '%[^\n\r]', startRow(block)-1, 'ReturnOnError',
false);
    dataArrayBlock = textscan(fileID, formatSpec, endRow(block)-
startRow(block)+1, 'Delimiter', delimiter, 'EmptyValue'
,NaN, 'ReturnOnError', false);
    dataArray{1} = [dataArray{1};dataArrayBlock{1}];
end

%% Close the text file.
fclose(fileID);

%% Post processing for unimportable data.
% No unimportable data rules were applied during the import, so no
post
% processing code is included. To generate code which works for
% unimportable data, select unimportable cells in a file and
regenerate the
% script.

%% Create output variable
T1 = [dataArray{1:end-1}];

```

importfileStartFreqHz(filename)

```

%START FREKUENTZIA INPORATZEN DU
function StartFreqHz = importfileStartFreqHz(filename)
%IMPORTFILE Import numeric data from a text file as a matrix.
% StartFreqHz = IMPORTFILE(FILENAME) Reads data from text file
FILENAME for the
% default selection.
%
% StartFreqHz = IMPORTFILE(FILENAME, STARTROW, ENDROW) Reads data
from rows
% STARTROW through ENDROW of text file FILENAME.
%
% Example:
% StartFreqHz = importfile('20190614F2.csv', 2, 2);
%

```



```

% See also TEXTSCAN.

% Auto-generated by MATLAB on 2019/06/19 15:53:18

%% Initialize variables.
delimiter = ',';
if nargin<=2
    startRow = 2;
    endRow = 2;
end

% Format string for each line of text:
% column2: double (%f)
% For more information, see the TEXTSCAN documentation.
formatSpec = '%*s%f*s*s%[\n\r]';

%% Open the text file.
fileID = fopen(filename,'r');

% Read columns of data according to format string.
% This call is based on the structure of the file used to generate
this
% code. If an error occurs for a different file, try regenerating the
code
% from the Import Tool.
textscan(fileID, '%[\n\r]', startRow(1)-1, 'ReturnOnError', false);
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, endRow(1)-startRow(1)+1,
'Delimiter', delimiter, 'ReturnOnError', false);
for block=2:length(startRow)
    frewind(fileID);
    textscan(fileID, '%[\n\r]', startRow(block)-1, 'ReturnOnError',
false);
    dataArrayBlock = textscan(fileID, formatSpec, endRow(block)-
startRow(block)+1, 'Delimiter', delimiter, 'ReturnOnError', false);
    dataArray{1} = [dataArray{1};dataArrayBlock{1}];
end

%% Close the text file.
fclose(fileID);

% Post processing for unimportable data.
% No unimportable data rules were applied during the import, so no
post
% processing code is included. To generate code which works for
% unimportable data, select unimportable cells in a file and
regenerate the
% script.

%% Create output variable
StartFreqHz = [dataArray{1:end-1}];
  
```

importfileStopFreqHz(filename)

```
% STOP FREKUENTZIA INPORATZEN DITU

function StopFreqHz = importfileStopFreqHz(filename)
%IMPORTFILE Import numeric data from a text file as a matrix.
% StopFreqHz = IMPORTFILE(FILENAME) Reads data from text file
FILENAME for the
% default selection.
%
% StopFreqHz = IMPORTFILE(FILENAME, STARTROW, ENDROW) Reads data
from rows
% STARTROW through ENDROW of text file FILENAME.
%
% Example:
% StopFreqHz = importfile('20190614F2.csv', 2, 2);
%
% See also TEXTSCAN.

% Auto-generated by MATLAB on 2019/06/19 16:21:23

%% Initialize variables.
delimiter = ',';
%%if nargin<=2
    startRow = 2;
    endRow = 2;
%%end

%% Format string for each line of text:
% column3: double (%f)
% For more information, see the TEXTSCAN documentation.
formatSpec = '%*s%*s%f%*s%[^\\n\\r]';

%% Open the text file.
fileID = fopen(filename,'r');

%% Read columns of data according to format string.
% This call is based on the structure of the file used to generate
this
% code. If an error occurs for a different file, try regenerating the
code
% from the Import Tool.
textscan(fileID, '%[^\\n\\r]', startRow(1)-1, 'ReturnOnError', false);
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, endRow(1)-startRow(1)+1,
'Delimiter', delimiter, 'ReturnOnError', false);
for block=2:length(startRow)
    frewind(fileID);
```

```
    textscan(fileID, '%[^\n\r]', startRow(block)-1, 'ReturnOnError',  
false);  
    dataArrayBlock = textscan(fileID, formatSpec, endRow(block)-  
startRow(block)+1, 'Delimiter', delimiter, 'ReturnOnError', false);  
    dataArray{1} = [dataArray{1};dataArrayBlock{1}];  
end  
  
%% Close the text file.  
fclose(fileID);  
  
%% Post processing for unimportable data.  
% No unimportable data rules were applied during the import, so no  
post  
% processing code is included. To generate code which works for  
% unimportable data, select unimportable cells in a file and  
regenerate the  
% script.  
  
%% Create output variable  
StopFreqHz = [dataArray{1:end-1}];
```

2. eranskina: Matlab kodea denborak kalkulatzeko

LeerTiempoNoPlotearCalcular_loop

```
%%Denbora fitxategi guztiak irakurri, denborak kalkulatu eta excelera  
exportatzen ditu egiten du
```

```
N=10001-1;  
for c=1:1:72  
FileName= ['.\\MedidasTime5m\20190614T', num2str(c), '.csv']  
datosTime=importfileDatosFroga(FileName);  
sweepTime = importfileSWTFroga(FileName)/(10^6); %%en segundos  
eje_muestras= 1:N;  
[m,n] = size(eje_muestras);  
salto=(sweepTime)/n;  
eje_tiempo= 0:salto:sweepTime;  
  
anchopulso = pulsewidth(datosTime,eje_tiempo, 'Polarity', 'Positive')  
  
periodo = pulseperiod(datosTime,eje_tiempo)  
reqMedia = 1./mean(periodo)  
  
cicloTrbjCalc = mean(anchopulso)./mean(periodo)  
Guardar_excell_tiempo_mean;  
  
end
```

LeerTiempoPlotearCalcular

```
%%Sekuentzi zenbaki bat eskatzen du, fitxategi hori irakurri, denborak  
kalkulatu eta irudikatu egiten du
```

```
N=10001-1;  
c=input('Ingrese el valor de la variable: ');  
FileName= ['.\\MedidasTime5m\20190614T', num2str(c), '.csv']  
datosTime=importfileDatosFroga(FileName);  
sweepTime = importfileSWTFroga(FileName)/(10^6); %%en segundos  
eje_muestras= 1:N;  
[m,n] = size(eje_muestras);  
salto=(sweepTime)/n;  
eje_tiempo= 0:salto:sweepTime;  
  
figure(1)  
plot(eje_tiempo, datosTime);  
risetime(datosTime,eje_tiempo);  
statelevels(datosTime);  
figure(2)
```

```

anchopulso = pulsewidth(datosTime,eje_tiempo, 'Polarity', 'Positive')

pulsewidth(datosTime,eje_tiempo, 'Polarity', 'Positive')
periodo = pulseperiod(datosTime,eje_tiempo)
avgFreq = 1./mean(periodo)

```

importfileSWTFroga(filename)

```

% SWT (Sweep time)-a inportatzen du

function T1 = importfileSWTFroga(filename)
%IMPORTFILE Import numeric data from a text file as a matrix.
% T1 = IMPORTFILE(FILENAME) Reads data from text file FILENAME for
the
% default selection.
%
% T1 = IMPORTFILE(FILENAME, STARTROW, ENDROW) Reads data from rows
% STARTROW through ENDROW of text file FILENAME.
%
% Example:
% T1 = importfile('20190614T1.csv', 4, 4);
%
% See also TEXTSCAN.

% Auto-generated by MATLAB on 2019/06/18 19:56:38

%% Initialize variables.
delimiter = ',';
%%if nargin<=2
    startRow = 4;
    endRow = 4;
%%end

%% Format string for each line of text:
% column3: double (%f)
% For more information, see the TEXTSCAN documentation.
formatSpec = '%*s%*s%f%*s%[^\\n\\r]';

%% Open the text file.
fileID = fopen(filename,'r');

%% Read columns of data according to format string.
% This call is based on the structure of the file used to generate
this

```

```

% code. If an error occurs for a different file, try regenerating the
code
% from the Import Tool.
textscan(fileID, '%[^\n\r]', startRow(1)-1, 'ReturnOnError', false);
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, endRow(1)-startRow(1)+1,
'Delimiter', delimiter, 'ReturnOnError', false);
for block=2:length(startRow)
    frewind(fileID);
    textscan(fileID, '%[^\n\r]', startRow(block)-1, 'ReturnOnError',
false);
    dataArrayBlock = textscan(fileID, formatSpec, endRow(block)-
startRow(block)+1, 'Delimiter', delimiter, 'ReturnOnError', false);
    dataArray{1} = [dataArray{1};dataArrayBlock{1}];
end

%% Close the text file.
fclose(fileID);

%% Post processing for unimportable data.
% No unimportable data rules were applied during the import, so no
post
% processing code is included. To generate code which works for
% unimportable data, select unimportable cells in a file and
regenerate the
T1 = [dataArray{1:end-1}];
  
```

Guardar_excell_tiempo_mean

```

colnames= {'id_medida','Nombre_Fichero','Sweep Time
(s)','Periodo','Tiempo activo'};
nomFich= 'resultadosTime_num.xlsx';
xlswrite(nomFich, colnames, 'Periodo','A1');
[ndata, headertext] = xlsread(nomFich, 'Periodo');
tamano = size(ndata);
filas = tamano(1);
last_id = filas+2;
fila_actual = ['A' num2str(filas+2)];

exdata = [num2str(last_id) , cellstr(FileName),
sweepTime,mean(periodo),mean(anchopulso)];

xlswrite(nomFich, exdata, 'Periodo',fila_actual);
  
```