



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL FINAL DE GRAU

TÍTOL DEL TFG: Estudi del consum energètic de LoRaWAN

TITULACIÓ: Grau en Enginyeria Telemàtica

AUTOR: Bernat Mir Masnou

DIRECTORS: Carles Gómez Montenegro, Rafael Vidal Ferré

DATA: 4 de setembre del 2017

Títol: Estudi del consum energètic de LoRaWAN

Autor: Bernat Mir Masnou

Directors: Carles Gómez Montenegro, Rafael Vidal Ferré

Data: 4 de setembre del 2017

Resum

La Internet de les Coses (IoT) ha aparegut a la nostra societat des de fa relativament poc i està avançant a passes agegantades. La IoT constitueix un conjunt d'objectes connectats, fent ús d'electrònica incrustada, software, sensors i protocols de comunicacions que recopilen i intercanvien informació amb diferents aplicacions a través de xarxes connectades a Internet.

Dins de les diferents tecnologies de comunicacions per a la IoT, han sorgit recentment les LPWAN, d'entre les quals, les tecnologies que han triomfat i s'han desplegat amb més èxit són les basades en el protocol LoRa/LoRaWAN. Aquestes tecnologies es caracteritzen per aconseguir unes transmissions de llarga distància i un consum energètic baix. Per assolir aquests objectius, les tecnologies LoRa/LoRaWAN s'han de configurar de la forma adequada.

Malauradament, no tots els dispositius estan connectats a la xarxa elèctrica i molts necessiten bateries externes per alimentar-se i funcionar. Això fa que la configuració anteriorment esmentada sigui crítica.

L'objectiu principal d'aquest projecte és caracteritzar el consum energètic d'aquest tipus de tecnologia utilitzant plataformes de node sensor actualment populars en el mercat i eines de laboratori com un mesurador de potència. Es realitzarà un estudi de les possibilitats que ofereixen aquests mòduls i quin és el consum energètic segons diferents paràmetres configurables. D'aquesta manera es podrà generar un model analític realista del consum de LoRa/LoRaWAN. A partir dels resultats obtinguts, es generaran resultats en termes de temps de vida de les bateries, cost energètic de les transmissions i el lliurament d'informació.

En el document, també es mostraran tots els elements que formen part d'una xarxa LoRaWAN així com la seva correcta configuració per veure com afecten els diferents paràmetres de configuració al consum de corrent del dispositiu final.

Title: A study of LoRaWAN energy consumption

Author: Bernat Mir Masnou

Directors: Carles Gómez Montenegro, Rafael Vidal Ferré

Date: September 4th 2017

Overview

The Internet of Things (IoT) has appeared and has become a hot topic in our society in the recent years and is growing a lot and quickly. The IoT is based on a group of connected objects, using embedded electronic, software, sensors and communication protocols able to collect and exchange information with different types of applications through networks connected to the internet.

Within the different communications technologies that exists for the IoT, the LPWAN has emerged where the technologies that have triumphed and have been deployed successfully are the ones based on the LoRa/LoRaWAN protocol. The main feature and the reason why this technology has all the attention is that achieves long range transmissions in exchange of a very low energy consumption. To reach these aims, all the sensors on the network have to be well configured.

Unfortunately, not all devices are powered by the electricity grid so external batteries are needed to feed all these devices to continue working.

The main objective of this project is to modulate the energy consumption of this technology using commercially sensors and laboratory tools as power analysers to achieve these aims in a realistic environment. A study will be generated based on the possibilities that offer these models and which is the associated energy consumption for the many configurable parameters that LoRa/LoRaWAN offers. Therefore, an analytical model will be generated based on the obtained results in terms of battery lifetime, energy cost of data delivery and energy consumption of the LoRa/LoRaWAN protocol.

In this document, all the necessary elements to deploy a fully LoRaWAN network will be shown as well as the correct configuration to demonstrate how these parameters affects the energy consumption of an end-device.

ÍNDIX

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓ | 1 |
| CAPÍTOL 1. TECNOLOGIES LORA/LORAWAN..... | 3 |
| 1.1. LoRa..... | 3 |
| 1.1.1. Bandes freqüencials | 4 |
| 1.1.2. Format trama física | 4 |
| 1.1.3. Xarxa LoRa..... | 5 |
| 1.2. LoRaWAN | 5 |
| 1.2.1. Restriccions i bandes freqüencials | 6 |
| 1.2.2. Format paquets LoRaWAN..... | 8 |
| 1.2.3. Xarxa LoRaWAN | 10 |
| 1.2.4. Classes | 11 |
| 1.2.5. Activació i seguretat d'un dispositiu final | 12 |
| 1.2.6. Comunicació de dades | 13 |
| CAPÍTOL 2. ENTORN EXPERIMENTAL | 16 |
| 2.1. Maquinari LoRaWAN | 16 |
| 2.1.1. Mòdul LoRaWAN | 16 |
| 2.1.2. Antena | 17 |
| 2.1.3. Placa de desenvolupament | 18 |
| 2.1.4. Gateway LoRaWAN..... | 18 |
| 2.2. Programari LoRaWAN | 19 |
| 2.2.1. ARM mbed OS..... | 20 |
| 2.2.2. Registre del mDot..... | 20 |
| 2.2.3. Programació del dispositiu final i del gateway LoRaWAN | 21 |
| 2.3. Llibreria libmDot | 23 |
| 2.3.1. Funcions rellevants..... | 23 |
| 2.3.2. Potència de transmissió..... | 24 |
| 2.3.3. Modes de transmissió..... | 24 |
| CAPÍTOL 3. MODEL ANALÍTIC | 26 |
| 3.1. Transmissions sense reconeixement..... | 26 |
| 3.2. Transmissions amb reconeixement..... | 32 |
| CAPÍTOL 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ | 36 |
| 4.1. Consum de corrent..... | 36 |
| 4.2. Temps de vida..... | 40 |
| 4.3. Cost energètic del lliurament de dades..... | 42 |
| 4.4. Retransmissions..... | 44 |

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTOL 5. CONCLUSIONS | 46 |
| 5.1. Conclusions | 46 |
| 5.2. Línies futures | 47 |
| 5.3. Estudi d'ambientació..... | 48 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 49 |
| ANNEXOS..... | 51 |
| 1. Configuració del dispositiu final | 51 |
| 2. Configuració del gateway | 56 |
| 3. Servidor de xarxa: The Things Network | 60 |
| 4. Transmissions LoRaWAN..... | 64 |

INTRODUCCIÓ

La Internet of Things (IoT) és un nou paradigma que consisteix en la interconnexió d'una xarxa d'objectes físics, també anomenats "coses", amb Internet mitjançant tecnologies amb o sense fils. La IoT permetrà una millor gestió dels recursos i donarà lloc a una gran quantitat de sistemes intel·ligents que seran capaços de recol·lectar i actuar en funció de les dades obtingudes.

Una de les tecnologies més prometedores de la Internet de les coses són les anomenades Low Power Wide Area Network (LPWAN). Aquest tipus de tecnologia proporciona una nova alternativa a les comunicacions mòbils i les Machine to Machine (M2M). Les LPWAN han atret l'interès de la indústria, l'acadèmia i els organismes d'estandardització. En aquest sentit, les LPWAN han estat objecte de la recent creació d'un grup de treball de l'IETF per desenvolupar solucions per suportar IPv6 sobre tecnologies LPWAN.

Les LPWAN prometen dispositius incrustats limitats i de baix cost amb una durada de bateria prolongada expandint així els casos d'ús de l'IoT i permeten implementar aquest tipus de solució a una escala més àmplia. Per aconseguir aquestes característiques, existeix una limitació física per la qual s'envien trames petites i, la gran majoria de tecnologies LPWAN, només poden enviar menys de 1000 bytes al dia o menys de 5000 bits per segon.

Dins d'aquest tipus de tecnologia, la més utilitzada és la Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) que permet connexions de llarga distància utilitzant una potència baixa. Tanmateix, la tecnologia LoRaWAN té certes característiques que cal entendre per a evitar un ús no òptim.

Els dispositius LoRaWAN proporcionen un gran nombre de paràmetres de transmissió configurables. Aquests aspectes són un repte per determinar la configuració adequada que, per exemple, minimitzi el cost energètic de les transmissions mentre es compleix el cas d'ús desitjat entre d'altres.

L'objectiu principal d'aquest document és dur a terme un estudi del consum energètic de LoRaWAN, considerant els diferents paràmetres configurables que permet un mòdul real LoRaWAN i quin és l'impacte que tenen aquests paràmetres al consum energètic i al temps de vida de les bateries.

El document presenta la següent organització. En el primer capítol s'introduirà les tecnologies LoRa i LoRaWAN on es definiran aquests tipus de LPWAN i les seves característiques principals, per entendre el seu funcionament. El segon capítol descriurà l'entorn utilitzat per la realització de les mesures de consum energètic. En aquest apartat s'explicarà com es configura un mòdul LoRaWAN i tot el maquinari i programari necessari per implementar una xarxa funcional. El tercer capítol presentarà un model analític desenvolupat en base als resultats obtinguts de les diferents mesures en funció dels diferents paràmetres configurats. El quart capítol mostrarà els resultats que s'han obtingut en aquest estudi. Aquest capítol se centrarà a comentar el consum de corrent, el temps de vida de les bateries i el cost energètic de les diferents transmissions, així

com les observacions més destacables. Finalment, el darrer capítol aportarà una valoració final on es comentarà l'acompliment dels objectius d'aquest estudi, així com les conclusions més rellevants obtingudes i les possibles línies futures de treball.

CAPÍTOL 1. Tecnologies LoRa/LoRaWAN

Aquest capítol introduirà les tecnologies LoRa i LoRaWAN, les més utilitzades dins de la família de tecnologies LPWAN i objecte principal d'aquest projecte. Així doncs, aquest capítol servirà per presentar les principals característiques d'aquestes dues tecnologies, constituint la base per a l'anàlisi i tasques desenvolupades en els capítols que es presentaran posteriorment.

LoRa i LoRaWAN, són tecnologies basades en la mateixa modulació LoRa, desenvolupada per Semtech, però corresponen a protocols diferents. Els mòduls LoRa implementen un simple protocol d'enllaç adient per a comunicacions P2P, mentre que LoRaWAN defineix una capa MAC i inclou la capa de xarxa, creada per la LoRa Alliance, permetent enviar dades a qualsevol estació base connectada al núvol. A continuació, s'aprofundirà en aquestes tecnologies.

1.1. LoRa

LoRa és la solució més utilitzada per a la capa física de les tecnologies LPWAN. A diferència d'altres sistemes sense fils que usen Frequency-Shift Key (FSK) com a modulació perquè s'aconsegueix un consum de potència baix, la modulació LoRa està basada en una variació de les anteriors però utilitzant una tècnica d'espectre eixamplat anomenada Chirp Spread Spectrum (CSS) que utilitza polsos chirp d'una gran amplada de banda per a codificar la informació. Les principals característiques que proporciona aquesta solució són:

- Utilitza la màxima amplada de banda en utilitzar espectre eixamplat.
- Ofereix una gran robustesa a interferències de canal o de banda estreta.
- Ofereix una gran robustesa a interferències de propagació multicamí.
- Resistent a l'efecte Doppler.

Com a resultat d'aquesta modulació, s'aconsegueixen comunicacions de llarga distància i una reducció en la potència transmesa dels dispositius finals. Addicionalment, la modulació LoRa inclou un esquema de correcció d'errors que millora la robustesa de les comunicacions afegint redundància.

Per millorar l'eficiència espectral i augmentar la capacitat de la xarxa, la modulació LoRa presenta sis factors de difusió ortogonals, anomenats spreading factors (SF), que donen com a resultat diferents taxes d'enviament de dades, data rates (DR). A mesura que s'augmenta el valor de SF s'aconsegueix un abast major a canvi d'una taxa de transmissió més baixa.

1.1.1. Bandes freqüencials

La modulació LoRa opera en un espectre ràdio que no requereix llicència. Depenent de la regió on es trobi el desplegament LoRa, cal emprar una banda freqüencial determinada. Les bandes definides per cada regió són:

- Europa: s'utilitza les bandes ISM de 867-869 MHz i 433 MHz regulades per l'ETSI. La primera banda, normalment coneguda com la de 868 MHz, és la que s'ha utilitzat en aquest projecte.
- US: la banda escollida pels Estats Units és la de 902-928 MHz.
- Xina: la banda utilitzada en la regió xinesa és la de 779-787 MHz i la de 470-510 MHz.
- Corea i Japó: utilitzen la banda 920-925 MHz.
- Índia: la banda utilitzada és la de 865-867 MHz.

1.1.2. Format trama física

Tot i que les transmissions LoRa poden utilitzar trames arbitràries, tots els transmissors i receptors tenen especificat un format de trama física.

Malgrat que l'especificació no és gaire clara pel que fa a la quantitat de bits de què consten els diferents camps de la trama, la trama física comença amb un preàmbul que consta d'una seqüència constant d'upchirps¹ que cobreixen tota la banda freqüencial. Els dos últims upchirps són els encarregats de codificar la paraula de sincronització, sync word. Aquest paràmetre consta d'1 byte i s'usa per diferenciar les xarxes LoRa que usen la mateixa banda freqüencial. Així doncs, un dispositiu que en descodificar i comprovar que aquest paràmetre no coincideix amb el que té configurat deixarà de tractar aquestes trames.

Després del preàmbul, hi ha una capçalera opcional. Aquest camp indica la mida del payload en bytes, el code rate utilitzat i, si existeix, el camp Cyclic Redundancy Check (CRC). Quan aquesta capçalera està present, es transmet amb un code rate de 4/8

El payload s'envia després de la capçalera i al final de la trama física hi ha un CRC opcional. A continuació es mostra un exemple de trama física (**Fig 1.1**).



Fig. 1.1 Estructura d'una trama física LoRa [1]

¹ Pols que creix freqüencialment en el temps

1.1.3. Xarxa LoRa

Els mòduls LoRa només poden operar en la modalitat P2P i el tipus de xarxa més utilitzada és la topologia estrella d'estrelles, la qual inclou tres tipus de dispositius com es pot veure a continuació: dispositiu final, gateway i network server (Fig 1.2).

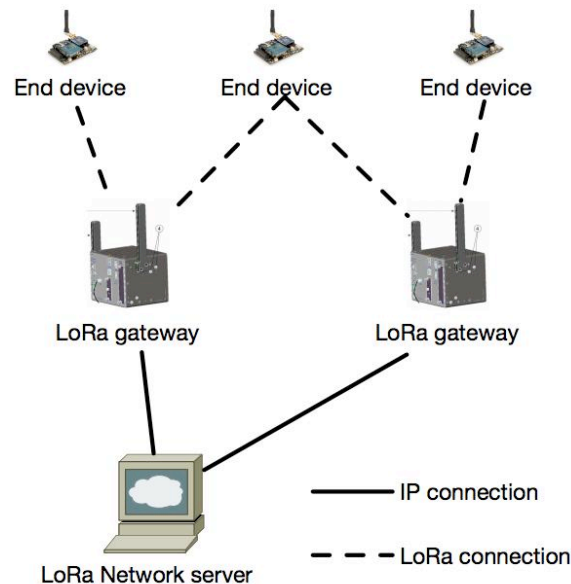


Fig. 1.2 Arquitectura d'una xarxa LoRa [2]

La comunicació entre els dispositius finals i els gateways es produeix mitjançant la modulació LoRa. Aquest tipus de transmissions no requereixen una infraestructura perquè els nodes es comuniquen directament entre ells.

1.2. LoRaWAN

LoRaWAN és un estàndard obert basat en una tecnologia sense fils per aplicacions de llarga distància, baix consum i baixa taxa d'enviament de dades desenvolupat per la LoRa Alliance. Mentre que LoRa defineix la capa física, LoRaWAN és l'encarregada de definir el protocol de comunicació i l'arquitectura de la xarxa. Aquest protocol és rellevant a l'hora de determinar el temps de vida de les bateries, la capacitat de la xarxa, la qualitat del servei, la seguretat i la varietat d'aplicacions servides per la xarxa.

Els dispositius LoRaWAN utilitzen la banda ISM (Industrial, Scientific, Medical) per comunicar-se via ràdio. En el cas de la modulació utilitzada, LoRaWAN pot utilitzar la modulació LoRa, definida per Semtech, o bé una modulació basada en FSK.

En aquest apartat es presentaran els aspectes més rellevants d'una xarxa LoRaWAN.

1.2.1. Restriccions i bandes freqüencials

L'especificació LoRaWAN estableix un conjunt de paràmetres d'operació que depenen de quina regió on es trobin els dispositius i la legislació vigent en cadascuna. Les regions europea i americana estan contemplades en l'especificació LoRaWAN, però hi ha regions que encara estan pendents de ser regulades per un comitè tècnic com la xinesa, índia, japonesa o coreana. Les principals característiques i restriccions definides es poden observar en la següent taula (**Taula 1.1**).

Taula 1.1 Resum de les característiques regionals LoRaWAN

| | <i>EU</i> | <i>US</i> | <i>Xina</i> | <i>Corea i Japó</i> | <i>Índia</i> |
|---------------------------|---------------|---------------------|------------------------|---------------------|--------------|
| <i>Freqüència (MHz)</i> | 867-869 o 433 | 902-928 | 470-510 | 920-925 | 865-867 |
| <i>Canals</i> | 10 | 64 + 16 (opcionals) | | | |
| <i>BW uplink (kHz)</i> | 125-250 | 125-500 | | | |
| <i>BW downlink (kHz)</i> | 125 | 500 | Pendent de ser definit | | |
| <i>Ptx uplink (dBm)</i> | +14 | +27 | | | |
| <i>Ptx downlink (dBm)</i> | +14 | +27 | | | |
| <i>Spreading factor</i> | 7-12 | 7-10 | | | |
| <i>Data rate (bps)</i> | 250-50000 | 980-21900 | | | |

En el cas concret d'Europa, que és el que afecta a aquest treball, es defineixen 10 canals. D'aquests canals, n'hi ha 3 que s'han d'implementar obligatòriament si s'opera a la regió europea. Aquests canals per defecte estan a les bandes: 868.10, 868.30 i 868.50 MHz on cada un utilitza 125 kHz d'amplada de banda, la modulació LoRa i permet taxes de transmissió de 0.3 kbps a 5 kbps. Dins dels 10 canals, s'ha reservat un canal per utilitzar una amplada de banda de 250 kHz a 10 kbps. A més a més, si es desitja utilitzar la modulació FSK en comptes de la LoRa, hi ha un canal destinat a aquest tipus de modulació a 50 kbps.

Un altre paràmetre que està limitat és la potència de transmissió i està definit per l'ETSI a +14 dBm, tant en transmissions de pujada com de baixada.

Adicionalment, s'introdueix una restricció pel que fa al cicle de treball, Duty Cycle, d'un 1%. Aquesta restricció es tradueix en el fet que el dispositiu final només pot estar transmetent per cada subbanda un 1% del temps com a màxim. Pel que fa als canals per defecte, aquests tenen una limitació del 0,33% i, en conjunt, formen una única subbanda per respectar la limitació esmentada. D'altra banda, la resta de canals presenta una limitació de l'1%.

Cada vegada que una trama és enviada per cada subbanda, el temps d'emissió i el temps durant el qual la trama s'està transmetent queda anotat per aquella subbanda i la mateixa subbanda no pot ser utilitzada durant el temps indicat en l'expressió **(1.1)**, $T_{off_subband}$, on $TimeOnAir$ indica el temps durant el qual la trama s'està transmetent i $DutyCycle_{subband}$ la restricció referent al cicle de treball per aquesta subbanda:

$$T_{off_subband} = \frac{TimeOnAir}{DutyCycle_{subband}} - TimeOnAir \quad (1.1)$$

Durant els instants en què la subbanda no està disponible, el dispositiu final pot transmetre per qualsevol altra subbanda lliure. Si es dona el cas en què no hi ha cap subbanda disponible, el dispositiu haurà d'esperar fins que alguna subbanda estigui disponible per poder transmetre.

A la següent figura (**Fig 1.3**), es pot observar els diferents paràmetres en funció de la modulació utilitzada, l'abast de la transmissió, el spreading factor, la taxa d'enviament de dades, l'amplada de banda i la sensibilitat del receptor.

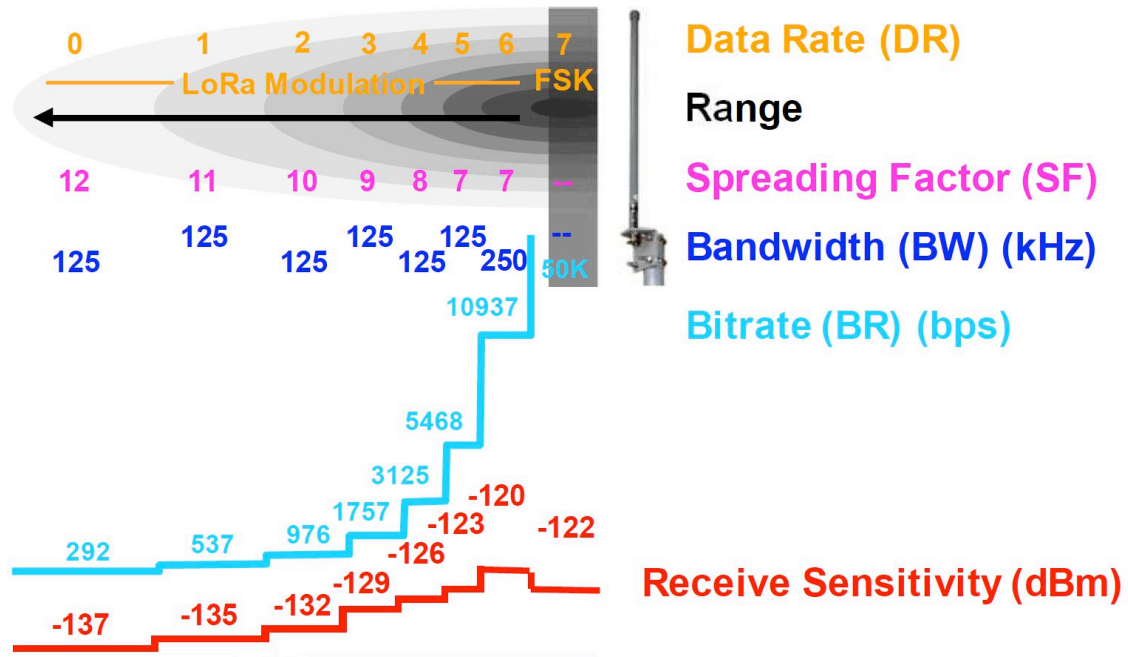


Fig. 1.3 Comparació de diferents paràmetres rellevants per a la comunicació LoRa/LoRaWAN [4]

Com s'ha comentat, el factor SF consisteix a afegir bits redundants a la comunicació, per tant, a major SF s'aconsegueix un major abast en la comunicació a canvi d'un data rate menor.

1.2.2. Format paquets LoRaWAN

Els paquets LoRaWAN estan definits per l'especificació del protocol mentre que el format de la trama física ve definit pel protocol LoRa com s'ha explicat a l'apartat 1.1.2.

Pel que fa al format de la trama definida per l'especificació LoRaWAN, tots els missatges uplink i downlink LoRaWAN tenen un payload PHY que comença amb una capçalera MAC (MHDR), seguit d'un payload MAC (MACPayload) i acaba amb un Message Integrity Code (MIC) de 4 octets (vegeu Fig 1.4).

Radio PHY layer:



PHYPayload:



MACPayload:



FHDR:



Fig. 1.4 Format paquet LoRaWAN [12]

La capçalera MAC (MHDR) consta d'1 byte i especifica el tipus de missatge i, segons la versió, la codificació que s'ha fet servir. LoRaWAN especifica els següents tipus de missatge (**Taula 1.2**).

Taula 1.2 Tipus de missatges MAC

| MType | Descripció |
|-------|-----------------------|
| 000 | Join Request |
| 001 | Join Accept |
| 010 | Unconfirmed Data UP |
| 011 | Unconfirmed Data Down |
| 100 | Confirmed Data UP |
| 101 | Confirmed Data Down |
| 110 | RFU |
| 111 | Propietari |

El payload MAC (**Taula 1.3**) inclou una capçalera de la trama que s'envia (FHDR), un camp on s'inclou el port (opcional) i el payload de la trama.

Taula 1.3 Format del payload MAC d'una trama

| FHDR | FPort | FRMPayload |
|------------|----------|------------|
| 7-23 bytes | 0-1 byte | 0-N bytes |

La capçalera de la trama (**Taula 1.4**) conté la direcció única del dispositiu, que consta de 4 bytes (DevAddr), un camp anomenat FCtrl per habilitar l'opció Adaptive Data Rate, un comptador de trames FCnt de 2 bytes i finalment un camp FOpts que permet enviar comandes MAC per administrar la xarxa de fins a 15 bytes.

Taula 1.4 Format de la capçalera d'una trama

| DevAddr | FCtrl | FCnt | FOpts |
|---------|--------|---------|------------|
| 4 bytes | 1 byte | 2 bytes | 0-15 bytes |

Pel que fa al payload de la trama, la quantitat de bytes que es poden transmetre ve especificada segons la regió en què s'operi. En l'àmbit europeu, el màxim payload MAC ve donat per la següent taula (**Taula 1.5**).

Taula 1.5 Longitud màxima d'una trama dins la regió europea

| Data Rate | M (bytes) | N (bytes) |
|-----------|------------|-----------|
| 0 | 59 | 51 |
| 1 | 59 | 51 |
| 2 | 59 | 51 |
| 3 | 123 | 115 |
| 4 | 250 | 242 |
| 5 | 250 | 242 |
| 6 | 250 | 242 |
| 7 | 250 | 242 |
| 8:15 | No definit | |

Els resultats anteriors es deriven de la capa física depenent de quin data rate s'utilitzi. El valor M defineix la màxima longitud d'informació en bytes que es poden enviar en una transmissió LoRaWAN, mentre que el camp N fa referència al mateix aspecte però en aquest cas no s'inclou el camp FOpt.

1.2.3. Xarxa LoRaWAN

LoRaWAN defineix una topologia basada en estrella d'estrelles on els components que la formen són:

- Dispositius finals: són els encarregats d'enviar informació als gateways mitjançant una comunicació ràdio LoRa o FSK.
- Gateway: d'una banda, transmet les dades que li arriben del dispositiu final cap al servidor de xarxa ja sigui via IP, Wi-Fi, satèl·lit o mitjançant alguna xarxa cel·lular. D'altra banda, transmet les dades que li arriben del servidor de xarxa cap als dispositius finals mitjançant LoRa o FSK.
- Servidor de xarxa (NS): és on resideix tota la intel·ligència i la complexitat a l'hora de filtrar les trames que li poden haver arribat des de diferents gateways. El NS comprova la integritat de les trames, planifica els reconeixements pel gateway apropiat i reenvia les trames al servidor d'aplicació, entre altres funcions.

- Servidors d'aplicacions (AS): cada aplicació rep les dades del servidor de xarxa per utilitzar-les amb la finalitat desitjada.

A diferència de les xarxes cel·lulars tradicionals, els dispositius finals no estan associats a cap gateway en concret per accedir a la xarxa. Els gateways només reenvien les dades rebudes al servidor de xarxa o dispositiu final dependent del cas i són transparents als dispositius finals. A continuació (**Fig 1.5**), es pot veure tots els components que poden formar una xarxa LoRaWAN.

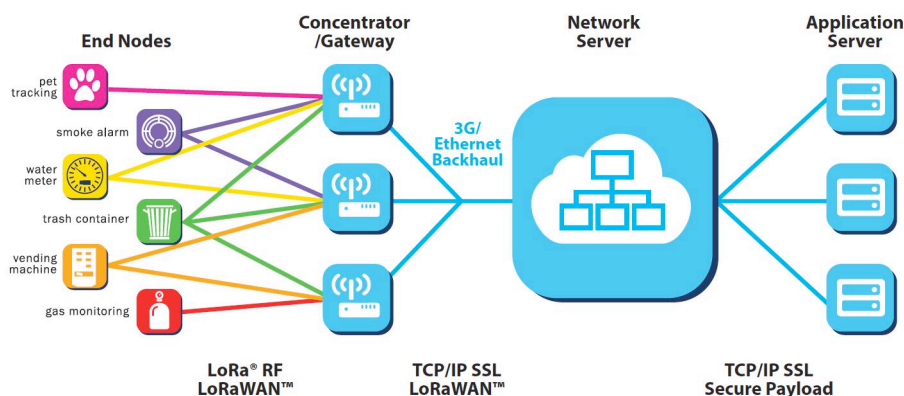


Fig. 1.5 Esquema d'una xarxa LoRaWAN [3]

1.2.4. Classes

Amb l'objectiu d'adaptar-se la gran quantitat d'aplicacions i escenaris per als que es poden fer servir els mòduls, l'especificació defineix tres tipus de classes:

- Dispositius bidireccionals (classe A): aquests dispositius suporten comunicacions bidireccionals on cada transmissió de pujada va seguida de dues finestres de recepció. Aquesta classe té la limitació que només es pot rebre informació si s'han enviat dades prèviament.

L'especificació defineix uns temps per defecte entre la transmissió i la primera finestra, i entre la primera i la segona finestra, d'1 segon. Així doncs, entre aquests intervals el dispositiu entra en mode sleep per tal de consumir poca energia com es pot observar a la següent **Fig. 1.6**.

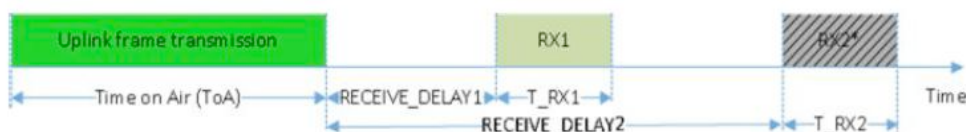


Fig. 1.6 Transmissió uplink d'un dispositiu de Classe A [5]

Es pot donar el cas que la informació requerida arribi en la primera finestra de recepció. Si es dona aquest cas, la segona finestra no cal que s'obri, obtenint així un menor consum energètic. Aquesta classe és la que ofereix un menor consum a canvi d'una major latència pel que fa a les dades downlink. La classe A ha de ser implementada per tots els dispositius finals.

- Dispositius bidireccionals amb finestres de recepció programades (classe B): a diferència de la classe A, els dispositius que implementen aquesta classe obren finestres extres en instants programats d'acord amb informació rebuda per part del gateway. Aquesta classe permet al servidor saber quan el dispositiu està escoltant i millorar l'eficiència en termes de retard, a canvi d'un increment en el consum energètic.
- Dispositius bidireccionals escoltant tota l'estona (classe C): aquests tipus de dispositius estan escoltant tota l'estona per rebre dades excepte quan estan transmetent. Aconseguen una latència molt petita en les transmissions downlink, a canvi d'un elevat consum energètic.

1.2.5. Activació i seguretat d'un dispositiu final

Abans que qualsevol dispositiu final pugui comunicar-se en una xarxa LoRaWAN, ha de ser activat. Per activar un dispositiu final, es necessita la següent informació:

- Adreça del dispositiu (DevAddr): consisteix en un identificador únic de 32 bits dins d'una xarxa. Aquesta adreça s'inclou en totes les trames i és compartida entre el dispositiu final, el servidor de xarxa i el servidor d'aplicació permetent diferenciar cada node dins la xarxa LoRaWAN i encriptar les dades de forma correcta.
- Clau de la sessió de xarxa (NwkSKey): consisteix en una clau xifrada amb AES de 128 bits. Aquesta clau és única per cada dispositiu final i és comparteix entre el dispositiu i el servidor de xarxa. La NwkSKey proporciona integritat en els missatges i protecció extrem-extrem, ja que els únics elements capaços de desencriptar la informació són el dispositiu final i el servidor de xarxa.
- Clau de la sessió d'aplicació (AppSKey): com la NwkSKey, és una clau de 128 bits xifrada amb AES única per cada dispositiu. A diferència de l'anterior, només és compartida entre el dispositiu final i el servidor d'aplicació per així obtenir seguretat a nivell d'aplicació.
- Clau d'aplicació (AppKey): consisteix en una clau única de 128 bits per garantir la seguretat extrem a extrem en l'àmbit d'aplicació. A diferència de l'AppSKey, aquesta no varia i és independent a la sessió.

Per intercanviar l'anterior informació, es poden usar dos mètodes d'activació:

- Over-the-Air-Activation (OTAA): el dispositiu final envia una petició per unir-se a la xarxa (Join Request) que conté l'identificador únic del dispositiu, l'identificador d'aplicació i la clau d'aplicació. En el cas que la

petició sigui acceptada, el servidor envia un missatge d'acceptació al dispositiu final (Join Accept) amb el que permet al dispositiu final generar les claus de sessió de xarxa i d'aplicació per transmetre la informació de forma segura.

- **Activation By Personalitzation (ABP):** aquest tipus d'activació permet estalviar tot l'intercanvi Join Request-Join Accept perquè la informació referent a les claus de sessió de xarxa i d'aplicació són generades en el temps de producció del dispositiu final. Si s'utilitza aquest mètode, el dispositiu està preparat per transmetre dades a la xarxa sense cap procediment previ. Aquest tipus d'activació es recomana només per casos molt específics, l'activació recomanada per defecte és l'OTAA.

Un cop s'ha realitzat l'activació del dispositiu de forma correcta, aquest ja pot intercanviar informació amb el servidor.

1.2.6. Comunicació de dades

En el cas del protocol LoRaWAN, els missatges uplink són iniciats pel dispositiu final i són retransmesos per un o més gateways fins al servidor. D'altra banda, els missatges downlink són els enviats pel servidor de xarxa a un únic dispositiu final i retransmès per un únic gateway.

Els missatges que s'envien dins d'una xarxa LoRaWAN poden o no requerir confirmació per part del servidor. En el cas de missatges que no requereixin confirmació (vegeu **Fig. 1.7**), el dispositiu final envia la informació, que és retransmesa pel gateway fins al servidor de xarxa i, si és el cas, aquest li envia la informació al servidor d'aplicació.

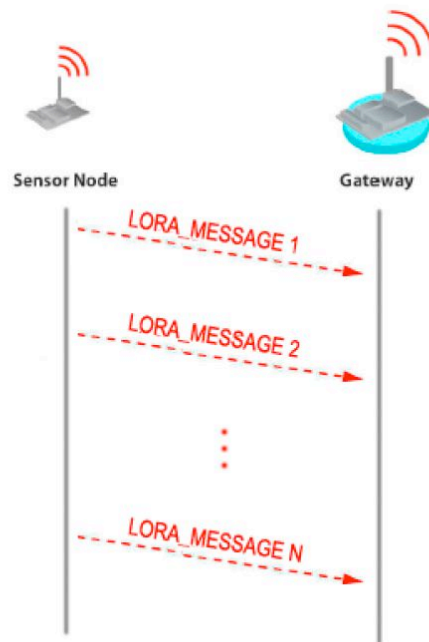


Fig. 1.7 Flux d'una transmissió sense reconeixement [6]

En canvi, si el missatge requereix confirmació (vegeu **Fig. 1.8**), l'intercanvi de dades no acaba al servidor de xarxa. El NS és l'encarregat d'escollir el millor camí a través dels possibles gateways fins al dispositiu final per enviar el missatge de confirmació. En el cas dels dispositius de classe A, el dispositiu final només podrà rebre el reconeixement si s'ha enviat dades prèviament. Altrament, s'hauria d'esperar a la següent transmissió.

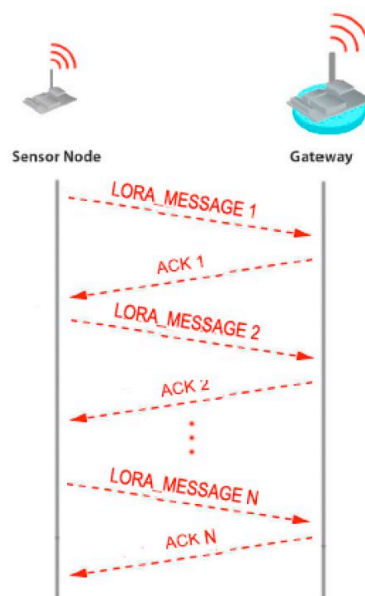


Fig. 1.8 Flux d'una transmissió amb reconeixement [6]

Si un dispositiu final transmet un missatge amb confirmació i aquest reconeixement no és rebut en les dues properes finestres de recepció (vegeu **Fig. 1.9**), el dispositiu retransmet la trama fins que rebí la confirmació en les següents finestres o fins que s'arriba al nombre màxim de retransmissions permeses per la capa MAC (8 retransmissions per defecte). Durant aquestes retransmissions, s'utilitza un DR diferent seguint l'especificació i es reenvia la trama quan el temps d'espera del reconeixement ha expirat (definit pel paràmetre ACK_TIMEOUT), que s'escull aleatòriament entre 1 i 3 segons.

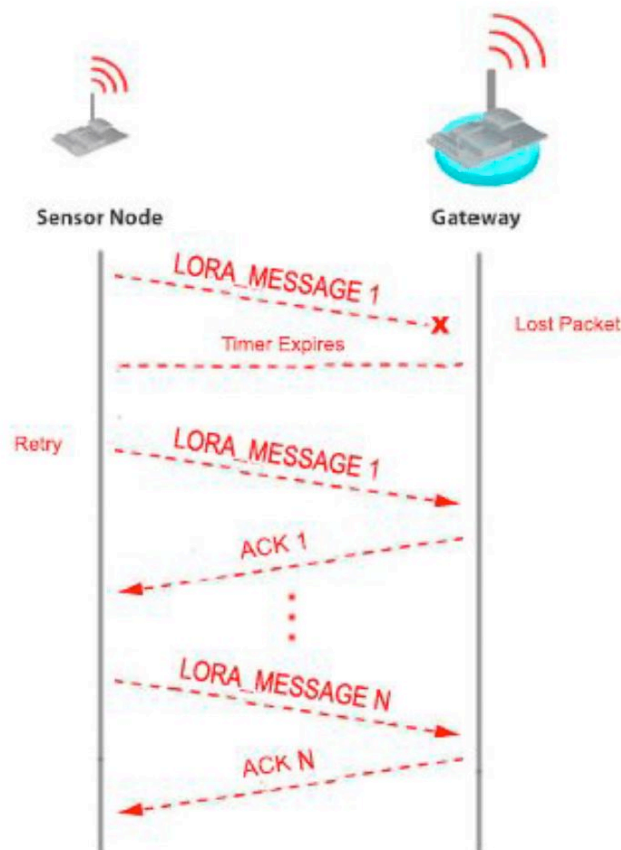


Fig. 1.9 Retransmissions durant una transmissió amb reconeixement [6]

CAPÍTOL 2. Entorn experimental

En aquest capítol es descriuran tots els elements necessaris per a desplegar la xarxa LoRaWAN emprada en aquest projecte, tant pel que fa a maquinari com de programari.

2.1. Maquinari LoRaWAN

Per tal de desplegar una xarxa i enviar dades des d'un dispositiu LoRaWAN a un servidor de xarxa, es necessita el següent maquinari:

- Mòdul LoRaWAN: és l'encarregat d'inicialitzar la comunicació i enviar les dades al gateway utilitzant una interfície ràdio.
- Gateway LoRaWAN: s'encarrega de retransmetre les trames que li arriben del mòdul al servidor de xarxa.

Adicionalment al maquinari anterior, en aquest projecte s'ha utilitzat una placa de desenvolupament per tal de programar els dispositius LoRaWAN.

2.1.1. Mòdul LoRaWAN

Per a la realització d'aquest projecte, s'ha escollit el mòdul MultiConnect mDot (**Fig 2.1**). Aquests dispositius són compatibles amb l'especificació LoRaWAN 1.0.1 de la LoRa Alliance.



Fig. 2.1 Mòduls LoRaWAN Multiconnect mDot [11]

Les principals característiques que ofereix aquest tipus de dispositius són:

- Preu molt competitiu i transmissions LoRaWAN de fins a 16 km.
- Presenta una gran immunitat al soroll i una alta capacitat de penetració en els edificis.
- Permet utilitzar diferents modulacions, entre les quals s'inclou la LoRa i la FSK.
- Depenent del model, suporta les freqüències 868MHz o 915MHz. En el cas d'aquest projecte s'ha escollit la primera, ja que és la utilitzada a l'àmbit europeu.
- Utilitza un processador ARM Cortex-M4 de baixa potència
- Suporta el sistema mbed ARM per tal de programar el mòdul mitjançant fitxers binaris. Addicionalment, suporta comandes AT pel port sèrie si es desitja.
- Permet configurar la potència de transmissió fins a 14 dBm i 20 dBm depenent si s'està utilitzant el mDot-868 o mDot-915 i es pot alimentar amb 3.3V o 5V

Addicionalment, aquest mòdul gaudeix d'una gran comunitat de desenvolupadors i d'una llibreria que permet configurar la gran varietat de paràmetres que es comentarà més endavant.

2.1.2. Antena

L'antena utilitzada per realitzar les transmissions via ràdio és la propietària de Multitech AN868-915A-1HRA amb un guany de 3 dBi com la de la **Fig.2.2**.



Fig. 2.2 Antena compatible amb la banda 868 MHz [15]

2.1.3. Placa de desenvolupament

Per tal de provar, programar i avaluar el mòdul MultiConnect mDot, s'ha utilitzat la placa de desenvolupament MTUDK2 del mateix fabricant (**Fig 2.3**).

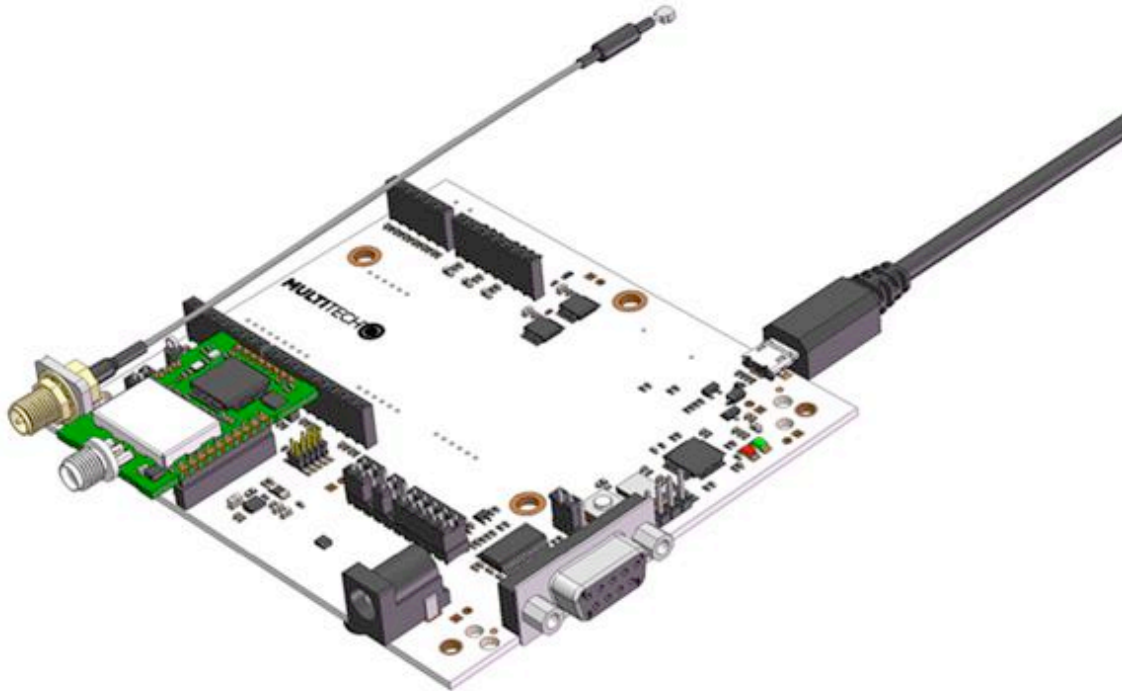


Fig. 2.3 Placa de desenvolupament MTUDK2 de Multitech [16]

Amb el dispositiu mDot connectat a la placa mitjançant una connexió Micro-USB, es pot comunicar amb un ordinador. Un cop es connecta, l'ordinador detecta la taula com una unitat d'emmagatzematge externa de manera que es pot copiar el fitxer programat en format binari a la taula.

Alternativament al mètode anterior, també es pot programar el mDot mitjançant comandes pel port sèrie a través del port DB-9 que inclou la placa de desenvolupament.

2.1.4. Gateway LoRaWAN

El gateway és un dispositiu indispensable en una xarxa LoRaWAN per tal de reenviar les trames que arriben dels dispositius finals fins al servidor de xarxa via Ethernet, Wi-Fi o alguna xarxa cel·lular (p.ex. 3G).

Per aquest treball s'ha utilitzat el gateway *Kerlink LoRa IoT Station* com el de la següent figura (**Fig 2.4**).



Fig. 2.4 Gateway Kerlink LoRa IoT Station [14]

Aquest gateway permet operar en les bandes 868 i 915 MHz. Pel que fa al backhaul, permet la connexió via Ethernet i les xarxes cel·lulars 2G/3G. El gateway Kerlink permet ser instal·lat en entorns exteriors, ja que compleix amb la protecció IP67.

El Kerlink LoRa IoT Station corre sobre un sistema Linux, permetent ser configurat des de qualsevol lloc amb connexió a Internet mitjançant una connexió segura Secure Shell (SSH) i instal·lar programes per tal de tractar els paquets entrants.

Pel que fa al tractament dels paquets LoRaWAN que arriben al gateway, s'ha utilitzat el packet forwarder de Semtech [27]. Aquest programa s'executa en el gateway, permetent retransmetre els paquets rebuts a través d'un enllaç IP/UDP. Addicionalment, permet enviar trames GPS en format beacon per tal de coordinar tots els nodes de la xarxa.

2.2. Programari LoRaWAN

Per tal de desplegar tot el maquinari anteriorment descrit, es necessita el programari adequat per tal de configurar-lo. Aquest apartat descriurà tot el software que s'ha utilitzat per tal de programar els elements necessaris per desplegar la xarxa LoRaWAN usada en el projecte.

2.2.1. ARM mbed OS

L'OS mbed és un sistema operatiu open-source, dissenyat per a la Internet de les coses, que inclou les funcions necessàries per a desenvolupar mòduls que usen qualsevol model dels processadors ARM Cortex-M (4 en el cas del mDot). Aquest sistema operatiu està basat en el llenguatge de programació C gràcies al fet que aquest llenguatge de baix nivell permet programar el hardware d'una forma eficient i ofereix un gran rendiment pels dispositius incrustats.

Per tal de compilar el codi pels dispositius finals, s'utilitza el compilador GNU Compiler Collection (GCC) creat pel Projecte GNU i de programari lliure que suporta C. Aquest compilador permet convertir un projecte escrit en llenguatge C en un arxiu binari capaç de ser instal·lat al mòdul mDot mitjançant la placa de desenvolupament MTUDK2.

A part d'utilitzar el GCC, per tal de compilar el projecte, s'ha d'especificar l'objectiu (*target*) del microcontrolador (MCU). En el cas de la placa MTUDK2, el microcontrolador usat és el propietari de Semtech F411RE.

Un cop es disposa del compilador i del microcontrolador, el sistema mbed és capaç de compilar el projecte i convertir-lo en un fitxer binari. ARM proporciona un compilador online per tal de generar els binaris però en aquest projecte s'ha optat per fer la instal·lació al mateix ordinador i generar el fitxer localment per aconseguir una compilació més ràpida.

Per tal que el dispositiu mDot executi aquest fitxer, s'ha d'introduir a la placa de desenvolupament tal com està indicat a la **Fig. 2.3**. A continuació, mitjançant connexió Micro-USB, l'ordinador és capaç de detectar la placa com una unitat d'emmagatzematge permetent així consumir el fitxer.

2.2.2. Registre del mDot

Per tal de millorar el desenvolupament del dispositiu mDot en local i observar quins paràmetres estan configurats, s'ha utilitzat CoolTerm (vegeu **Fig. 2.5**) com a aplicació terminal pel port sèrie.

Com s'ha comentat, la llibreria permet obtenir els valors mitjançant *gets* i es poden mostrar mentre s'està executant el projecte mitjançant el terminal CoolTerm.



Fig. 2.5 Aplicació terminal CoolTerm [12]

A continuació (Fig. 2.6), es mostren els *logs* que permet generar la llibreria. Aquesta eina és útil perquè permet fer un seguiment dels passos pels quals ha passat el dispositiu final i si s'ha donat algun error. Per exemple, si es configura un missatge més gran del permès per aquella taxa de transmissió, el dispositiu final mostrarà un missatge indicant que no pot enviar les dades.

```

[INFO] mDot Ready
[INFO] version: 2.0.15-mbed127
[INFO] setting public network mode
[INFO] Set radio to Public Mode
[INFO] Initialize datarates...
[INFO] Initialize channels...
[INFO] setting app eui
[INFO] setting app key
[INFO] setting TX spreading factor
[INFO] enabling ACKs
[INFO] setting join mode to AUTO_OTA
[INFO] Initialize datarates...
[INFO] Initialize channels...
[INFO] Set radio to Public Mode
[INFO] Saved session was not Joined
[INFO] saving config

```

Fig. 2.6 Logs generats pel dispositiu final mentre s'està configurant

2.2.3. Programació del dispositiu final i del gateway LoRaWAN

Amb tots els elements presentats anteriorment, es pot programar un dispositiu final per tal d'unir-se i enviar dades en una xarxa LoRaWAN.

Pel que fa a la programació del dispositiu final (vegeu **Annex 1**), s'ha partit de la plantilla que ofereix Multitech [27] que explica com utilitzar el mDot i la llibreria libmDot per a comunicacions LoRaWAN. Aquesta plantilla permet

configurar el mode d'unió a la xarxa i introdueix les bases per programar el dispositiu per tal que entri al mode sleep entre les transaccions del dispositiu final i el gateway. Pel que fa al mode d'unió, s'ha utilitzat OTAA amb les claus generades pel servidor de xarxa per tal de protegir les comunicacions entre el dispositiu final i el servidor de xarxa.

Un cop programat el dispositiu final amb la llibreria libmDot, s'ha de generar el binari (vegeu apartat **2.2.1**) per tal que es pugui instal·lar al mòdul. Amb el dispositiu final connectat a la placa de desenvolupament i la taula connectada a l'ordinador mitjançant una connexió micro-USB (com a la **Fig. 2.7**), es pot instal·lar el binari mitjançant la unitat d'emmagatzematge que proporciona la placa de desenvolupament.

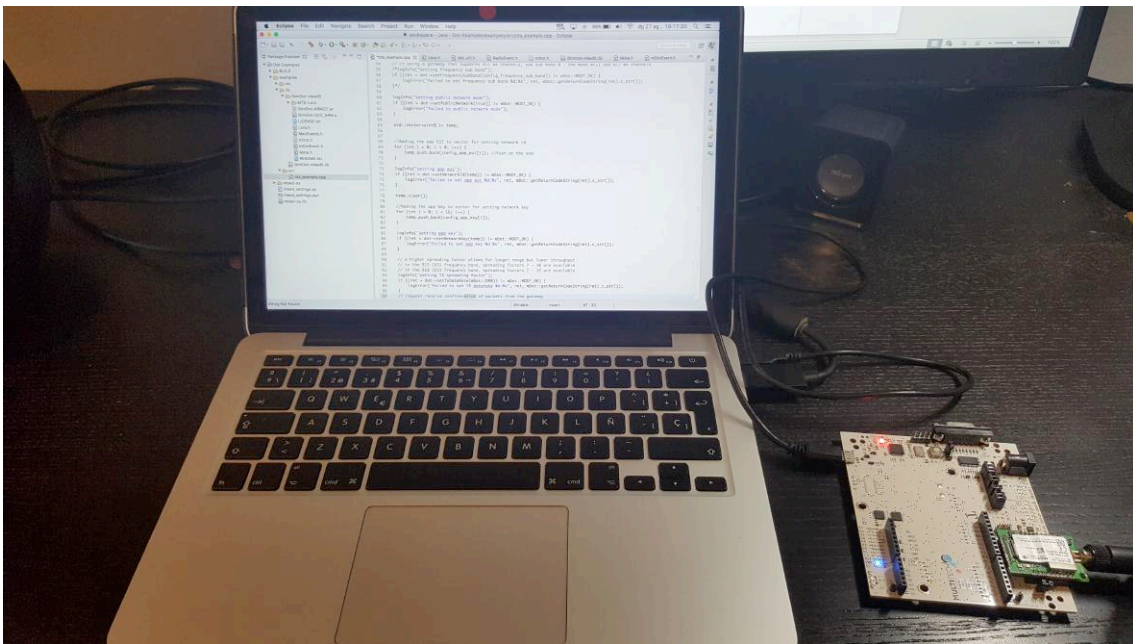


Fig. 2.7 Entorn de treball per a programar el dispositiu final

Paral·lelament a aquest procediment, s'ha de programar el gateway (vegeu **Annex 2**) i el servidor de xarxa (vegeu **Annex 3**) per tal que reenvii les trames entrants cap al servidor de xarxa i per tractar les dades respectivament. Com s'ha comentat, el gateway utilitza el *packet_forwarder* de Semtech per retransmetre les trames entrants siguin del dispositiu final o del servidor de xarxa.

Així doncs, per tal d'enviar trames d'un dispositiu final al servidor de xarxa, el dispositiu final i el servidor de xarxa han de tenir les mateixes claus configurades i el gateway ha de tenir corrent el *packet_forwarder*.

2.3. Llibreria libmDot

Per tal de configurar tots els paràmetres del dispositiu final, Multitech proporciona un conjunt de llibreries basades en C que permeten modelar els sensors amb la finalitat desitjada. La llibreria més adequada i estable pel MultiConnect mDot és la libmDot-mbed5. Aquest apartat presentarà les principals característiques d'aquesta llibreria.

2.3.1. Funcions rellevants

Les funcions més importants i necessàries perquè un dispositiu final es pugui connectar a una xarxa LoRaWAN i enviar dades al seu servidor de xarxa, es troben resumides a la següent taula (**Taula 2.1**).

Taula 2.1 Funcions principals de la llibreria libmDot-mbed5

| Funció | Descripció |
|--|--|
| <code>getld().c_str()</code> | Obté la versió de la llibreria |
| <code>resetConfig()</code> | Reinicia tota la configuració als paràmetres per defecte. Necessari cada cop que s'inicialitza el mDot |
| <code>setPublicNetwork (const bool& on)</code> | Indica si el dispositiu opera en una xarxa pública o privada. |
| <code>setNetworkId(vecotr<uint8_t>& id)</code> | Configura l'ID de l'aplicació |
| <code>setNetworkKey(vector <uint8_t>& id)</code> | Configura la clau d'aplicació |
| <code>setTxDataRate(uint8_t& dr)</code> | Configura el data rate o bé el spreading factor |
| <code>setAck(uint8_t retries)</code> | Permet requerir reconeixement al gateway. Si és 0, no requereix confirmació però si el valor està entre 1-8 requereix confirmació i configura el nombre de retransmissions |
| <code>setTxPower(uint8_t& ptx)</code> | Configura la potència del dispositiu. Per defecte està configurada a 11 dBm |
| <code>setJoinMode(uint8_t& join)</code> | Permet configurar l'accés a la xarxa via OTAA o ABP |
| <code>saveConfig()</code> | Guarda tota la configuració al mòdul |
| <code>joinNetwork()</code> | Envia les trames join al gateway per tal d'incorporar-se a la xarxa |
| <code>send(uint8_t& data)</code> | Envia la informació desitjada. El màxim que pot enviar està definit al capítol 1.2.2 |

| | |
|---|---|
| sleep(uint32_t interval, bool& deep) | Permet que el mòdul entri en un estat adormit per consumir menys energia durant l'interval indicat. A més a més, permet una modalitat deepsleep on el consum és menor |
|---|---|

Les funcions anteriorment descrites juntament amb el programari descrit a l'apartat **2.2.**, permeten a un dispositiu final unir-se i transmetre informació en una xarxa LoRaWAN.

2.3.2. Potència de transmissió

La llibreria libmDot permet configurar els dispositius finals amb diferents nivells de potència. La potència de transmissió ve limitada per les regulacions locals depenent de la freqüència utilitzada. Així doncs, la llibreria no diferencia de si s'està operant en la regió europea o americana sinó que és el mateix dispositiu el que controla aquest factor.

Els valors que es poden configurar són els compresos entre 2 dBm – 20 dBm. Per defecte, s'usa una potència de transmissió de 11 dBm, que és la utilitzada en aquest projecte.

2.3.3. Modes de transmissió

Quan es transmet una trama, la modulació LoRa té 3 paràmetres configurables: l'amplada de banda, el coding rate, el spreading factor i el data rate.

El coding rate utilitzat en aquest projecte és l'indicat per defecte 4/5. Aquest valor es pot modificar en les següents variants: 4/5, 4/6, 4/7 i 4/8.

Pel que fa als valors amplada de banda, spreading factor i data rate, la llibreria els tracta com un conjunt. La funció anteriorment descrita a l'apartat **2.3.1**, *setTxDataRate*, permet introduir els paràmetres SF_7 – SF_12 o DR0-DR7 per l'àmbit europeu SF_7 – SF_10 per a l'àmbit americà. L'amplada de banda ve definida pel spreading factor o el data rate utilitzats.

A continuació (**Taula 2.2**) es pot veure una taula que resumeix les diferents opcions de transmissió que permet la llibreria per un àmbit europeu.

Taula 2.2 Paràmetres de transmissió configurables per l'àmbit europeu

| Data rate | Spreading factor | Amplada de banda |
|-----------|------------------|------------------|
| DR0 | SF12 | 125 kHz |
| DR1 | SF11 | 125 kHz |
| DR2 | SF10 | 125 kHz |
| DR3 | SF9 | 125 kHz |
| DR4 | SF8 | 125 kHz |
| DR5 | 7 | 125 kHz |
| DR6 | 7 | 250 kHz |
| DR7 | FSK | |

CAPÍTOL 3. Model analític

Aquest capítol presentarà un model analític dels paràmetres principals de rendiment energètic del protocol LoRaWAN com són el consum de corrent, el temps de vida d'un dispositiu final (alimentat amb bateria) i el cost energètic d'entrega d'informació.

Aquest capítol es dividirà en els dos grans casos que es poden donar en una transmissió pel que fa a la fiabilitat de la mateixa, i que afecten als models anteriorment comentats: transmissions sense reconeixement i transmissions amb reconeixement.

Com a dispositiu final, s'utilitzarà el dispositiu presentat en l'apartat **2.1.1.** utilitzant la modalitat classe A i els diferents data rates des de DR0 a DR5, ambdós inclosos. Durant aquestes mesures, s'ha utilitzat la potència de transmissió per defecte d'11 dBm i trames amb el màxim payload permès en cada cas.

El gateway utilitzat ha estat el Kerlink LoRa IoT Station (vegeu **2.1.4.**) i com a servidor de xarxa s'ha utilitzat The Things Network (vegeu **Annex 3**). Aquestes mesures s'han realitzat en un entorn interior, on el gateway i el dispositiu final estaven separats aproximadament a uns 2 metres de distància.

3.1. Transmissions sense reconeixement

L'objectiu d'aquest apartat és modelar el consum de corrent mitjà en transmissions que no requereixen confirmació (I_{avg_unACK}). Per tal de calcular aquest valor, es tindran en compte tots els estats pels quals passa una transmissió LoRaWAN des de l'estat inicial (mode sleep) fins que acaba la transmissió i torna a aquest estat inicial amb els temps i corrents associats a cada estat. L'entorn utilitzat per a realitzar les mesures es pot observar a la **Fig. 3.1.**

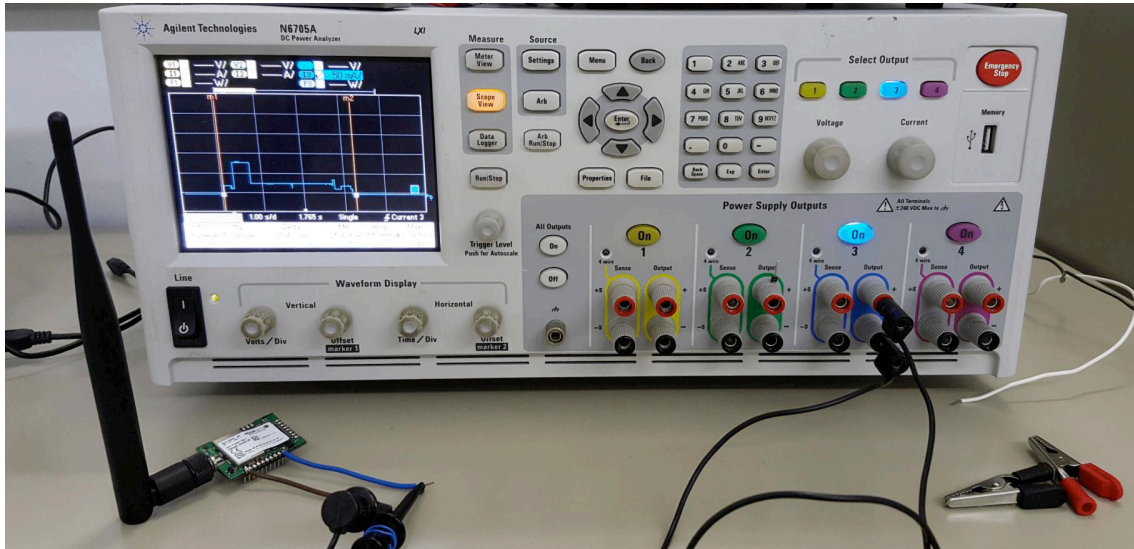


Fig. 3.1 Entorn de treball per la realització de les mesures

Per tal d'obtenir les mesures, s'ha utilitzat un analitzador de potència Agilent N6705A [19] alimentant el mòdul a 5V.

Per arribar a l'objectiu d'obtenir un consum de corrent en l'estat adormit tal com indica el full d'especificacions del dispositiu final de $40 \mu\text{A}$, s'han trobat diversos problemes perquè la llibreria utilitzada no estava del tot ben documentada i ha calgut la realització de múltiples proves per aconseguir-ho. Amb l'ajuda de la comunitat que dona suport a aquest protocol s'han resolt aquests problemes i s'ha aconseguit configurar el dispositiu final per tal que consumís $45 \mu\text{A}$.

La següent figura (**Fig. 3.2**) il·lustra el conjunt d'estats que es produeixen a l'enviar una trama sense reconeixement amb DR0.

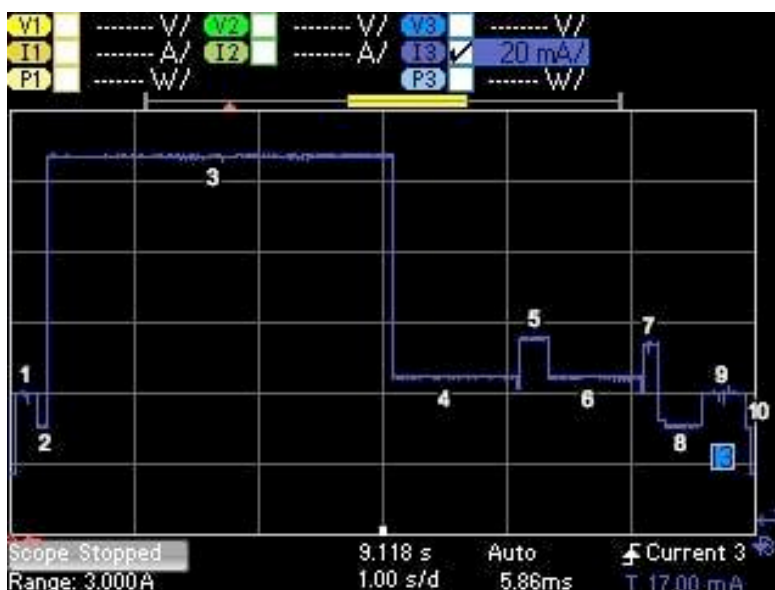


Fig. 3.2 Perfil del consum de corrent en una transmissió sense reconeixement amb DR0

A partir de les mesures obtingudes de tots els possibles DRs sense reconeixement, s'ha observat que es donen els mateixos estats independentment de la taxa utilitzada.

A la **Taula 3.1** es poden observar tots els estats que es donen durant una transmissió sense reconeixement. Inicialment, el dispositiu està en estat adormit, caracteritzat per tenir un consum 3 ordres de magnitud inferior als altres estats. Quan el sensor inicialitza el procés d'enviament de dades, el primer estat que es dona és el de wake up (estat 1) seguit d'una preparació ràdio (estat 2) per dur a terme la transmissió. Un cop el dispositiu està preparat, pot transmetre (estat 3) les dades desitjades al gateway. Com es tracta d'una implementació basada en la classe A, el dispositiu espera un temps (estat 4) i obre la primera finestra de recepció (estat 5). Després de la primera finestra, el dispositiu es torna a esperar (estat 6) per, al cap d'aproximadament 1 segon, obrir la segona finestra (estat 7). Finalment, el dispositiu final apaga la ràdio (estat 8), acaba de processar la informació necessària (estat 9) i acaba d'apagar (estat 10) totes les interfícies per tornar a l'estat adormit (estat 11).

Taula 3.1 Estats i consums associats a una transmissió sense reconeixement

| # Estat | Descripció | Duració | | Consum de corrent | |
|---------|-------------------------|------------|-------------------|-------------------|------------|
| | | Variabe | Valor (ms) | Variable | Valor (mA) |
| 1 | Wake up | T_{wu} | 168.2 | I_{wu} | 22.1 |
| 2 | Preparació ràdio | T_{pre} | 83.8 | I_{pre} | 13.3 |
| 3 | Transmissió | T_{tx} | (vegeu Taula 3.2) | I_{tx} | 83.0 |
| 4 | Espera 1a finestra | T_{w1w} | 983.3 | I_{w1w} | 27.0 |
| 5 | 1a finestra de recepció | T_{rx1w} | (vegeu Taula 3.2) | I_{1w} | 38.1 |
| 6 | Espera 2a finestra | T_{w2w} | Eq (4) | I_{w2w} | 27.1 |
| 7 | 2a finestra de recepció | T_{rx2w} | 33.0 | I_{2w} | 35.0 |
| 8 | Apagada ràdio | T_{off} | 147.4 | I_{off} | 13.2 |
| 9 | Post-processat | T_{post} | 268.0 | I_{post} | 21.0 |
| 10 | Seqüència d'apagada | T_{seq} | 38.6 | I_{seq} | 13.3 |

| | | | | | |
|----|-------|-------------|--------|-------------|--------------------|
| 11 | Sleep | T_{sleep} | Eq (3) | I_{sleep} | $45 \cdot 10^{-3}$ |
|----|-------|-------------|--------|-------------|--------------------|

Essent T_{Notif} el temps entre dues transmissions consecutives (període), T_i i I_i el temps i intensitat associat a l'estat i , es pot calcular el consum mitjà d'una transmissió LoRaWAN com:

$$I_{avg_unACK} = \frac{1}{T_{Notif}} \sum_{i=1}^{N_{states}} T_i \cdot I_i \quad (3.1)$$

on N_{states} són 11 en una transmissió sense reconeixement. El temps que el dispositiu final està en mode sleep (T_{sleep}) es pot calcular com:

$$T_{sleep} = T_{Notif} - T_{act} \quad (3.2)$$

on T_{act} és la suma de tots els estats relacionats amb la transmissió, és a dir, tots excepte T_{sleep} :

$$T_{act} = T_{wu} + T_{pre} + T_{tx} + T_{w1w} + T_{rx1w} + T_{w2w} + T_{rx2w} + T_{off} + T_{post} + T_{seq} \quad (3.3)$$

A continuació es modelaran els estats T_{tx} , T_{rx1w} i T_{w2w} que poden variar depenent del DR utilitzat. L'estat T_{w2w} depèn de T_{rx1w} i es pot obtenir com:

$$T_{w2w} = RECEIVE_DELAY_2 - RECEIVE_DELAY_1 - T_{rx1w} \quad (3.4)$$

on $RECEIVE_DELAY_1$ és el temps entre la transmissió i l'obertura de la primera finestra i $RECEIVE_DELAY2$ és el temps entre la transmissió i l'obertura de la segona finestra.

En aquest projecte s'ha utilitzat la taxa de transmissió DR0 per a T_{rx2w} (la qual estava configurada per defecte en el dispositiu emprat en el projecte). Per aquest motiu, aquest paràmetre no varia depenent del DR utilitzat.

Per calcular el temps de transmissió via ràdio, T_{tx} , es té en compte el procediment LoRaWAN, la modulació utilitzada (en aquest cas LoRa) i els paràmetres regionals. T_{tx} pot expressar-se com el temps necessari per enviar el preàmbul i el missatge físic, $T_{preamble}$ i $T_{PHYMessage}$ respectivament, com:

$$T_{tx} = T_{preamble} + T_{PHYMessage} \quad (3.5)$$

on la duració del paquet LoRa és la suma de la duració del preàmbul i el missatge físic transmès. La longitud del preàmbul es pot calcular com [17]:

$$T_{preamble} = T_{sym} \cdot (N_{pre} + 4.25) \quad (3.6)$$

on N_{pre} és la longitud programada del preàmbul i T_{sym} és el temps d'un símbol que depèn del SF utilitzat i l'amplada de banda (en Hz) com l'equació següent:

$$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (3.7)$$

La duració del missatge físic (en segons), $T_{PHYMessage}$, es pot calcular com:

$$T_{PHYMessage} = T_{sym} \cdot N_{PHY} \quad (3.8)$$

N_{PHY} defineix el nombre de símbols que formen el payload i es pot avaluar de la següent forma:

$$N_{PHY} = 8 + \max \left[\text{ceil} \left[\frac{28 + 8 \cdot PL + 16 \cdot CRC - 4 \cdot SF}{4 \cdot (SF - 2 \cdot DE)} \right] \cdot (CR + 4), 0 \right] \quad (3.9)$$

on PL és el nombre de bytes del payload; SF és el Spreading Factor utilitzat (valors entre 7 i 12); CR és el coding rate utilitzat, de 4/5 a 4/8 amb valors d'1 a 4; CRC indica la presència (1) o no (0) d'aquest camp; DE val 1 si s'ha utilitzat DR baixos (amb SF11 o de SF12) per tal d'evitar problemes derivats de variacions del cristall de referència de l'oscil·lador. La funció *ceil* indica que la part indicada entre brackets s'ha d'arrodonir a l'enter superior i la funció *max* compara el resultat de la funció *ceil* i retorna el valor més alt d'entre 0 o bé el resultat de la funció *ceil*.

Un cop modelat T_{tx} , a continuació es determinarà la duració d'una finestra de recepció on no s'ha detectat cap preàmbul. Aquest cas es dona en ambdues finestres si és una transmissió sense reconeixement. En aquest projecte s'ha detectat un comportament diferent pel que fa a les dues finestres.

La primera finestra, T_{rx1w} , es pot modelar com:

$$T_{rx1w} = N_{dsym} \cdot T_{sym} \quad (3.10)$$

on el dispositiu final roman en l'estat de recepció durant N_{dsym} símbols. Aquest camp té un valor de 8 símbols si el SF utilitzat és el SF11 o SF12, i per la resta té un valor de 12 símbols.

En referència a la segona finestra, T_{rx2x} , el dispositiu usa la tècnica Channel Activity Detection (CAD). Aquest mètode redueix el temps d'escolta del canal, ja que si no es rep cap senyal entrant, el dispositiu final decideix aviat parar d'escoltar en aquesta finestra obtenint així un menor consum. Aquesta duració pot ser calculada com:

$$T_{rx2w} = \frac{2^{SF} + 32}{BW} \quad (3.11)$$

La següent taula (**Taula 3.2**) resumeix els valors T_{tx} , T_{rx1w} i T_{rx2w} anteriorment modelats depenent de la taxa d'enviament de dades, un CR de 4/5 i una amplada de banda de 125 kHz. Pel que fa a la informació enviada, s'ha tingut en compte el cas d'un enviament amb el payload màxim permès i també el de l'enviament d'una trama sense payload.

Taula 3.2 Resultats seguin el model anteriorment descrit depenent del DR utilitzat.

| DR | SF | T_{sym} | $T_{preamble}$ | T_{rx1w} | T_{rx2w} | DE | FRM Payload | | T_{tx} màx | T_{tx} min |
|----|----|-----------|----------------|------------|------------|----|----------------|----------------|--------------|--------------|
| | | | | | | | Màx (bytes) | Min (bytes) | | |
| 0 | 12 | 32.77 | 401.41 | 262.14 | 33.02 | 1 | 51 | 0 | 2793.5 | 991.8 |
| 1 | 11 | 16.38 | 200.70 | 131.07 | 16.64 | 1 | 51 | 0 | 1560.6 | 577.5 |
| 2 | 10 | 8.19 | 100.35 | 98.30 | 8.45 | 0 | 51 | 0 | 698.4 | 288.7 |
| 3 | 9 | 4.10 | 50.18 | 49.15 | 4.35 | 0 | 115 | 0 | 676.9 | 144.4 |
| 4 | 8 | 2.05 | 25.09 | 24.58 | 2.30 | 0 | 242 | 0 | 707.1 | 72.2 |
| 5 | 7 | 1.02 | 12.54 | 12.29 | 1.28 | 0 | 242 | 0 | 399.6 | 41.2 |

Com s'ha comentat anteriorment, les bateries encarregades d'alimentar els dispositius finals són un factor molt important en el desplegament d'una xarxa LoRaWAN. Un cop tenim la intensitat mitjana d'una transmissió sense reconeixement, I_{avg_unACK} , es pot calcular el temps de vida en hores, $T_{lifetime_unACK}$, d'una bateria de capacitat $C_{battery}$ (expressada en mA·h) com:

$$T_{lifetime_unACK} = \frac{C_{battery}}{I_{avg_unACK}} \quad (3.12)$$

Finalment, un altre paràmetre important quan s'envien trames LoRaWAN és el cost energètic de cada enviament, $EC_{delivery_unACK}$. Aquest paràmetre proporciona l'energia consumida pel dispositiu final per cada bit transmès en una transmissió sense reconeixement com:

$$EC_{delivery_unACK} = \frac{I_{avg_unACK} \cdot V \cdot T_{notif}}{L_{delivery_unACK}} \quad (3.13)$$

on el numerador indica l'energia consumida pel dispositiu durant T_{notif} , V indica el voltatge utilitzat i $L_{delivery_unACK}$ indica la quantitat d'informació, en bits, que s'ha entregat de forma satisfactòria per cada trama enviada pel dispositiu final.

3.2. Transmissions amb reconeixement

En aquest apartat es modelarà el consum de corrent pel que fa a transmissions amb reconeixement. En aquest tipus de transmissions, es pot donar el cas que el reconeixement sigui rebut en la primera o en la segona finestra. Així doncs, el model analític tindrà en compte ambdues opcions i també assumirà que no hi ha errors en la transmissió (Bit Error Rate igual a 0).

Així doncs, el corrent mitjà consumit en una transmissió amb reconeixement, I_{avg_ACK} , es pot calcular com:

$$I_{avg_ACK} = p_{1win} \cdot I_{avg_ACK_1} + p_{2win} \cdot I_{avg_ACK_2} \quad (3.14)$$

on $I_{avg_ACK_1}$ i $I_{avg_ACK_2}$ són els consums mitjans del dispositiu final si el reconeixement es detecta a la 1a o 2a finestra respectivament i p_{1win} i p_{2win} les probabilitats associades.

L'especificació LoRaWAN dóna llibertat pel que fa a la recepció del reconeixement per tal que s'ajusti millor a l'aplicació desitjada. Per aquest motiu, s'ha assumit una probabilitat del 50% per a la recepció del reconeixement per part del NS en ambdues finestres. Val a dir que, durant la

realització de les proves, s'ha detectat que el grup DR0-DR3 sempre rebia el reconeixement a la segona finestra mentre que el grup DR4-DR5 la podria rebre tant en la primera com en la segona (tot i que majoritàriament es rebia a la primera finestra).

A la següent figura (**Fig. 3.3**) es pot observar dues transmissions amb reconeixement on es rep la confirmació en la primera i la segona finestra.

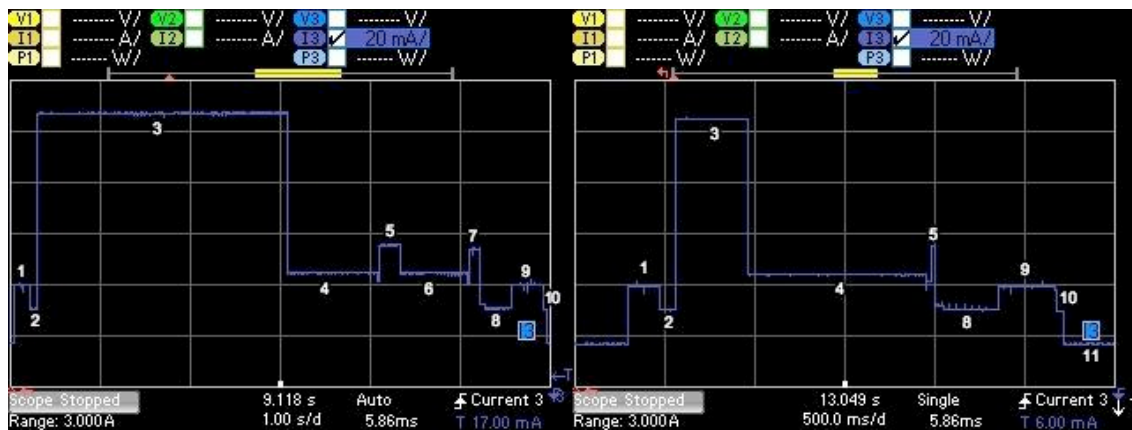


Fig. 3.3 Estats que es donen en dues transmissions amb reconeixement utilitzant DR0 (esquerra) i DR5 (dreta). En el primer cas la confirmació es rep en la segona finestra mentre que amb DR5 es rep a la primera finestra.

En el cas que l'ACK es rebí a la primera finestra, el nombre d'estats d'una transmissió es veu reduït, ja que el dispositiu final no ha d'obrir la segona finestra, estalviant-se així aquest estat i el delay entre la primera i segona finestra. D'altra banda, s'observa un increment en la duració de la primera finestra, T_{1w} , i en el temps d'apagada ràdio, T_{off} , ja que el reconeixement ha de ser rebut i posteriorment processat.

El consum mitjà en el cas $I_{avg_ACK_1}$ pot ser calculat de la mateixa manera que s'ha calculat I_{avg_unACK} (equacions (3.1)-(3.11)) amb T_{w2w} i T_{2w} iguals a 0 i la resta de valors com els especificats a la taula anterior.

D'altra banda, per tal de modelar $I_{avg_ACK_2}$, el comportament que presenta el dispositiu final és molt similar a una transmissió sense reconeixement, ja que el conjunt d'estats són els mateixos però s'han observat dues grans diferències:

- T_{2w} dura més que en una transmissió sense reconeixement pel fet que el dispositiu final ha de rebre l'ACK.
- T_{off} també s'incrementa perquè ha de processar l'ACK rebut a T_{2w} .

La següent taula (**Taula 3.3**), permet veure els estats i consums associats a una transmissió amb reconeixement.

Taula 3.3 Estats i consums associats a una transmissió amb reconeixement

| # Estat | Descripció | Duració | | Consum de corrent | |
|---------|-------------------------|-------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| | | Variable | Valor (ms) | Variable | Valor (mA) |
| 1 | Wake up | T_{wu} | 169.2 | I_{wu} | 22.1 |
| 2 | Preparació ràdio | T_{pre} | 80.4 | I_{pre} | 13.7 |
| 3 | Transmissió | T_{tx} | (vegeu Taula 3.2) | I_{tx} | 82.8 |
| 4 | Espera 1a finestra | T_{w1w} | 988.4 | I_{w1w} | 27.1 |
| 5 | 1a finestra de recepció | T_{1w} | (vegeu Taula 3.2) | I_{1w} | 31.8 |
| 8 | Apagada ràdio | T_{off} | 337.8 | I_{off} | 13.4 |
| 9 | Post-processat | T_{post} | 272.5 | I_{post} | 20.9 |
| 10 | Seqüència d'apagada | T_{seq} | 37.5 | I_{seq} | 13.4 |
| 11 | Sleep | T_{sleep} | Eq (2) | I_{sleep} | $45 \cdot 10^{-3}$ |

Així doncs, $I_{avg_ACK_2}$ es pot calcular tal com es calcula I_{avg_unACK} (equacions (3.1)-(3.11)) usant els temps associats que corresponen a una transmissió amb reconeixement. La següent taula (**Taula 3.4**), permet veure la duració i consums del la 2a finestra de recepció i l'apagada ràdio.

Taula 3.4 Estats i consums associats a una transmissió amb reconeixement pels estats 2a finestra de recepció i apagada ràdio

| #Estat | Descripció | Duració | | Consum de corrent | |
|--------|-------------------------|-----------|-------------------|-------------------|------------|
| | | Variable | Valor (ms) | Variable | Valor (mA) |
| 7 | 2a finestra de recepció | T_{2w} | (vegeu Taula 3.2) | I_{2w} | 38.0 |
| 8 | Apagada ràdio | T_{off} | 337.8 | I_{off} | 13.4 |

Pel que fa al temps de vida d'una bateria utilitzant transmissions amb reconeixement, hi ha certa variació pel que fa a la utilitzada en transmissions sense reconeixement. En aquest cas, el I_{avg_ACK} (definit a **(3.14)**) varia respecte a I_{avg_unACK} (definit a **(3.1)**), ja que en el primer cas s'introdueix un factor probabilístic perquè es pot donar el cas que el reconeixement sigui rebut a la primera finestra o bé a la segona. Així doncs, el temps de vida, $T_{lifetime_ACK}$ d'una bateria de capacitat $C_{battery}$ (expressada en mA·h) es pot calcular com:

$$T_{lifetime_ACK} = \frac{C_{battery}}{I_{avg_ACK}} \quad (3.15)$$

Finalment, el cost energètic de cada enviament de dades, $EC_{delivery_ACK}$, segueix el raonament anterior i es pot calcular com:

$$EC_{delivery_ACK} = \frac{I_{avg_ACK} \cdot V \cdot T_{notif}}{L_{delivery_ACK}} \quad (3.16)$$

on, igual que a l'equació **(3.13)**, el numerador indica l'energia consumida pel dispositiu durant T_{notif} , V indica el voltatge utilitzat i $L_{delivery_ACK}$ indica la quantitat d'informació, en bits, que s'ha entregat de forma satisfactòria per cada trama enviada pel dispositiu final.

CAPÍTOL 4. Resultats i discussió

En aquest capítol es presentaran i discutiran els resultats obtinguts de les mesures realitzades amb el dispositiu final mDot, utilitzant el model analític definit al capítol 3.

El mencionat capítol està dividit en quatre apartats:

- Consum de corrent del dispositiu final
- Temps de vida de la bateria del dispositiu final
- Cost energètic de l'enviament de dades per cada bit útil entregat
- Retransmissions

En tots els apartats es tindran en compte transmissions sense reconeixement i amb reconeixement utilitzant les diferents taxes de transmissió de DR0 a DR5. Pel que fa a la longitud de la trama, es tindrà en compte el màxim payload permès, tal com està definit a la secció **1.2.2**, i també l'enviament d'1 sol byte de payload.

4.1. Consum de corrent

Un dels paràmetres de rendiment més importants dels dispositius finals que implementen el protocol LoRaWAN és el consum de corrent mitjà. Aquest paràmetre és clau, ja que el temps de vida dels dispositius finals que s'alimenten amb bateries en depèn de manera directa. D'altra banda, aquest paràmetre influeix en la presa de decisions a l'hora de desplegar la tecnologia, com ara en l'elecció de les bateries, per tal d'aconseguir un determinat temps de vida.

Pel que fa a les transmissions sense reconeixement, el consum de corrent s'ha calculat com indica l'equació **(3.1)**. S'han dut a terme diverses proves per veure quin era el consum (i la durada) de cada estat on les diferències entre les diferents proves s'han considerat menyspreables.

A la següent gràfica (**Fig. 4.1**) es pot observar els diferents consums de corrent, I_{avg_unACK} , associats a cada DR en funció del temps entre notificacions per a transmissions sense reconeixement.

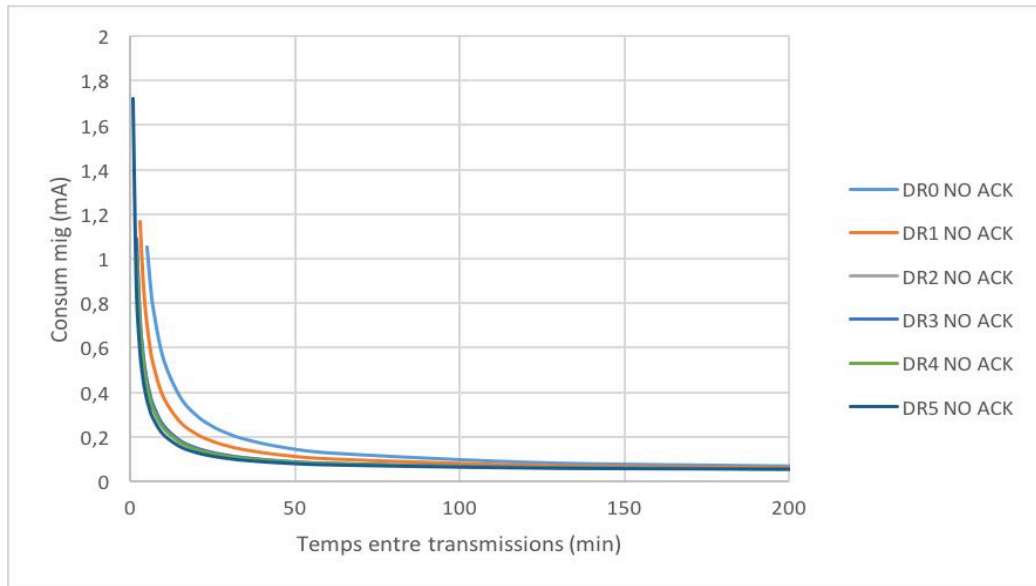


Fig. 4.1 Consum mitjà durant transmissions sense reconeixement

Com es pot observar a la figura anterior, a mesura que augmenten els temps entre transmissions, el corrent mitjà tendeix asimptòticament al consum que té l'estat sleep ($\approx 45 \mu\text{A}$ segons les mesures), ja que el dispositiu roman més temps en aquest estat mentre que els estats amb un consum superior es veuen reduïts. Es pot apreciar una diferència entre DRs, per a temps entre transmissions baixos, deguda a que els temps de transmissió i recepció decreixen a mesura que augmenta la taxa de transmissió.

A continuació (vegeu **Fig. 4.2**) s'avaluarà el consum mitjà en transmissions amb reconeixement. Seguint el raonament anterior, s'utilitzarà l'equació (3.14) per tal de determinar $I_{\text{avg_ACK}}$. Com s'ha comentat anteriorment, en aquest cas, no es tindran en compte possibles errors en les transmissions.

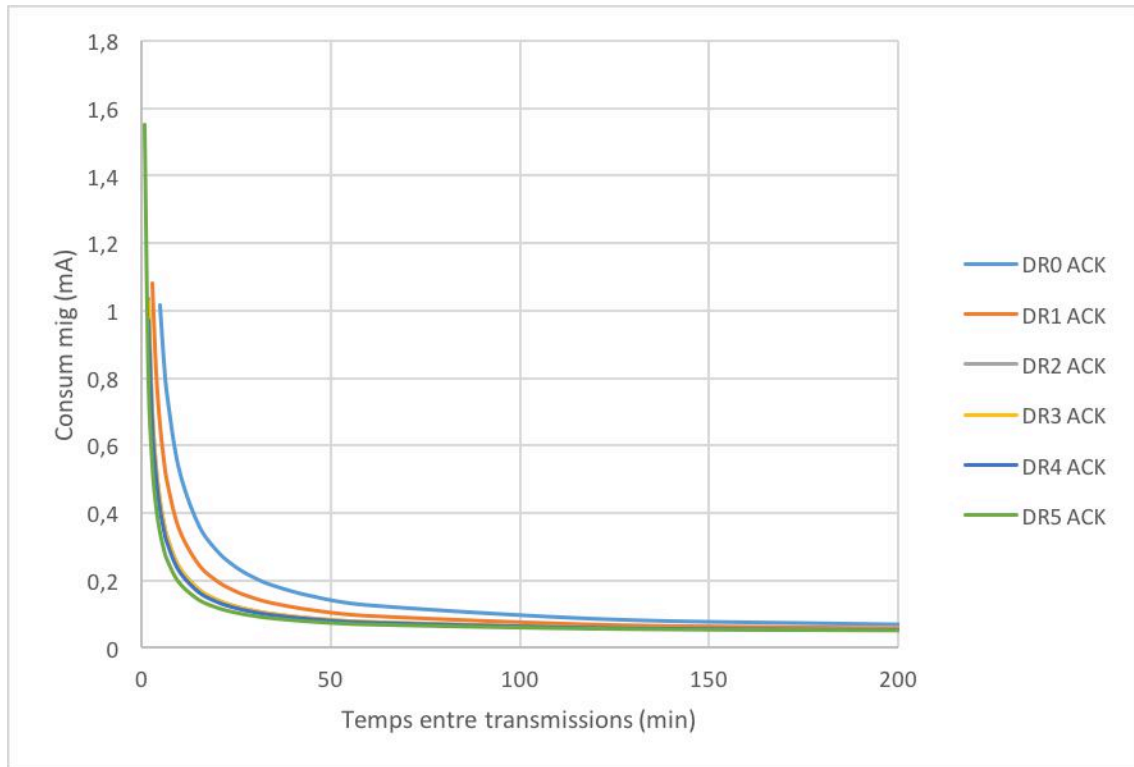


Fig. 4.2 Consum mitjà durant transmissions amb reconeixement

Com es pot observar, el consum mitjà segueix el mateix comportament pel que fa a tendències que en transmissions sense reconeixement.

Pel que fa a la comparació entre els consums de transmissions amb i sense reconeixement, les primeres tenen un consum mitjà menor perquè el reconeixement pot ser rebut en la primera o en la segona finestra. En el cas que es rebí en la primera finestra, el consum es veu reduït en comparació amb una transmissió sense reconeixement mentre que si es rep en la segona finestra, el consum és superior, ja que ha de processar el reconeixement rebut per part del NS. Així doncs, el consum mitjà en una transmissió amb reconeixement és probabilísticament inferior a la d'una transmissió sense reconeixement. Per a temps entre transmissions baixos i un DR alt, com per exemple 30 segons i DR5, la diferència que s'aprecia està al voltant del 10% entre el mode sense i amb reconeixement.

A continuació (**Fig. 4.3**) es compararà el consum en transmissions amb reconeixement utilitzant el màxim payload permès i només enviant 1 byte (de forma teòrica) amb el DR0 i el DR5. Òbviament, la transmissió quan només s'envia 1 byte consumeix menys corrent, donant lloc a una diferència considerable comparat amb l'ús del màxim payload. D'igual forma que les anteriors figures, el consum de corrent tendeix al valor de l'estat sleep a mesura que el temps entre transmissions s'incrementa.

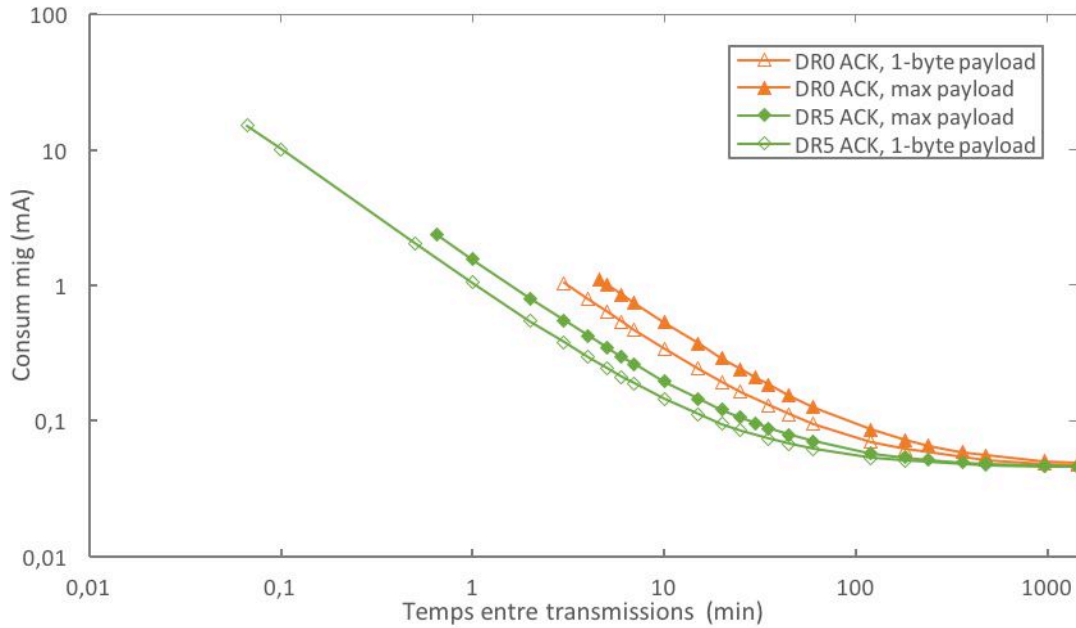


Fig. 4.3 Comparació de consum mitjà entre comunicacions utilitzant el màxim payload permès i enviant 1 byte a taxes de transmissió de DR0 i DR5

Com ja s'ha comentat, els valors inicials referents als temps entre transmissions varien depenent del DR utilitzat. A la següent taula (**Taula 4.1**) es pot veure una comparació dels temps mínims entre transmissions per respectar el cicle de treball de l'1% depenent del DR i modalitat de transmissió utilitzada.

Taula 4.1 Comparació temps mínim entre transmissions depenent de la modalitat i la taxa d'enviament de dades utilitzada i longitud del payload

| Modulació | Temps mínim (s), 1 byte | | Temps mínim (s), màx payload | |
|-----------|-------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|
| | Sense reconeixement | Amb reconeixement | Sense reconeixement | Amb reconeixement |
| DR0 | 141,96 | 138,78 | 279 | 275,4 |
| DR1 | 79,8 | 78 | 153,6 | 152,4 |
| DR2 | 28,2 | 27,9 | 69 | 69 |
| DR3 | 15,6 | 14,94 | 67,8 | 66,6 |
| DR4 | 8,15 | 8,52 | 61,8 | 61,5 |
| DR5 | 3,99 | 3,99 | 39,3 | 39,3 |

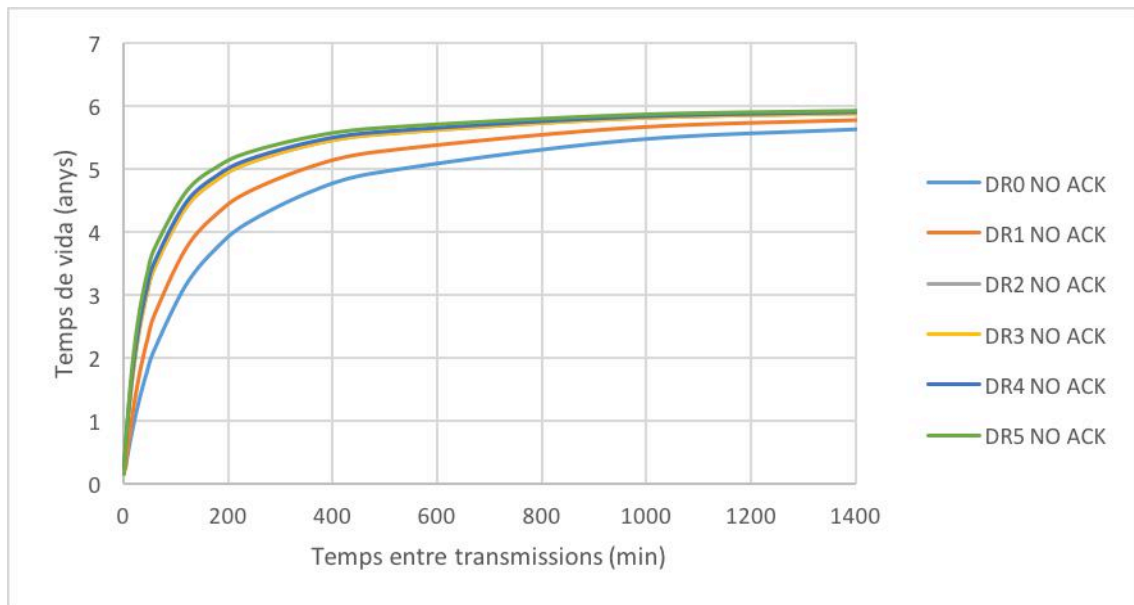
Idealment, el temps mínim entre transmissions amb o sense reconeixent haurien de ser iguals perquè per respectar el cicle de treball de l'1% només es té en compte el temps durant el qual s'està transmetent (estat 3 en una transmissió). En la taula anterior, hi ha unes petites diferències entre els resultats per a les transmissions amb i sense reconeixement degut a les mesures realitzades amb l'anàlitzador de potència.

Pel que fa a l'impacte del payload a l'hora de respectar aquesta restricció, a mesura que augmenta la taxa de transmissió, augmenta la diferència del temps entre transmissions per respectar aquest cicle de treball. Aquest fet es dona perquè s'augmenta la taxa de bits mentre que el payload es manté constant, obtenint una duració menor de l'estat de transmissió. El fet d'enviar moltes trames freqüentment suposa un gran impacte pel que fa a la duració de les bateries com es discutirà al següent apartat.

4.2. Temps de vida

L'elecció de la bateria que alimentarà el dispositiu és una decisió capital a l'hora de desplegar una xarxa LoRaWAN amb èxit. Per calcular quin és el temps de vida en transmissions sense i amb reconeixement s'han utilitzat les equacions (3.12) i (3.15) respectivament. El tipus de bateria utilitzada pels càlculs s'ha decidit d'acord amb solucions existents en el mercat [20], on la capacitat escollida ha estat de 2400 mA·h.

A continuació (**Fig. 4.4**) es mostren dues gràfiques on es representa el temps de vida de la bateria (en anys) en funció del temps entre transmissions.



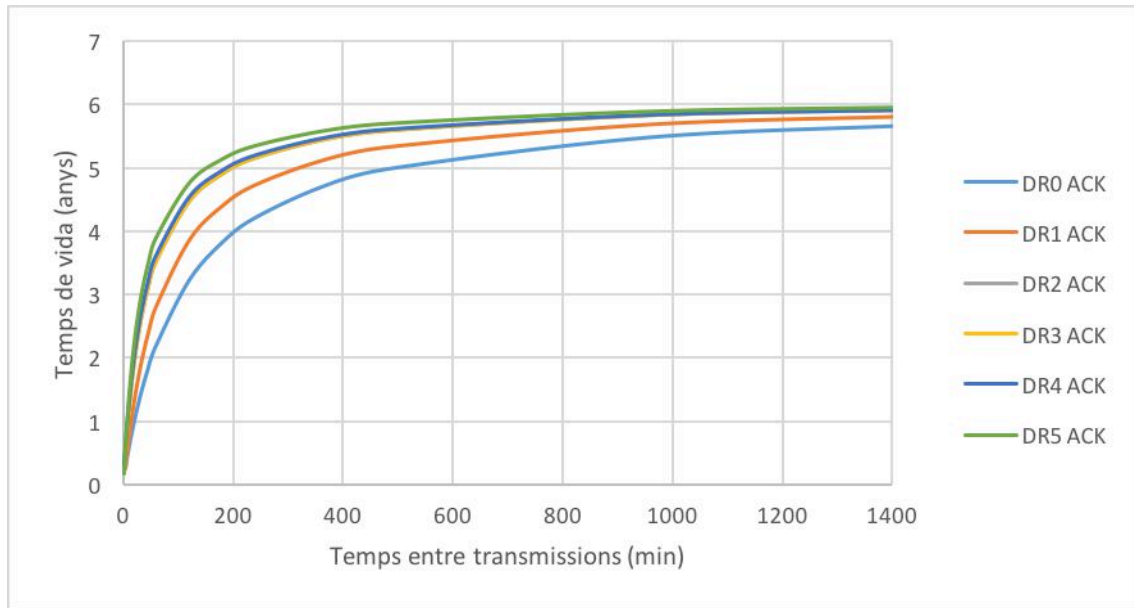


Fig. 4.4 Temps de vida expressat en anys per transmissions sense (amunt) i amb (sota) reconeixement per les diferents taxes de transmissió.

Les diferències en el temps de vida de les bateries en transmissions sense i amb reconeixement són relativament del mateix ordre que les obtingudes per als resultats de corrent. A partir dels resultats obtinguts, es pot afirmar que el fet de requerir o no ACK no influeix de forma considerable en el temps de vida de les bateries., ja que, per exemple, enviant trames cada minut amb DR5 hi ha una diferència d'aproximadament un 8%.

En el cas que el grup DR0-DR3 rebés el reconeixement a la primera finestra, augmentaria el temps de vida de les bateries perquè s'aconseguiria un consum menor. Enviant una trama cada 5 minuts amb DR0, s'obtindria un augment en el temps de vida de les bateries d'un 7%.

Com era d'esperar, el temps de vida creix a mesura que augmenta T_{notif} i tendeix asimptòticament al valor de 6,19 anys de vida. Aquest valor s'obtindria si no s'enviés cap trama (i.e. $T_{\text{notif}} = \infty$) i el dispositiu final sempre estigués en estat adormit.

D'altra banda, es demostra que per transmissions freqüents de, per exemple, 5 min s'aconsegueix un temps de vida per sota l'any (entre 0,26 i 0,72 anys) depenent del data rate utilitzat i a mesura que s'augmenta el T_{notif} es poden aconseguir diversos anys de vida.

A continuació (**Fig. 4.5**) es valorarà l'impacte del payload en el temps de vida de les bateries. Igual que a la secció 4.1, es valoraran trames amb el màxim payload i trames on només s'envia 1 byte d'informació.

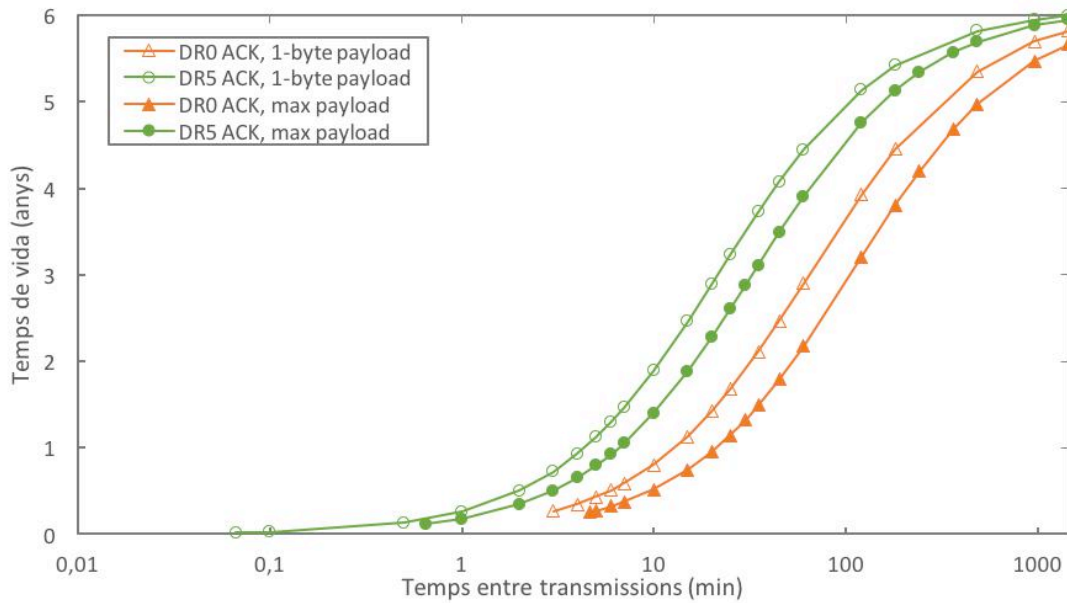


Fig. 4.5 Comparació en el temps de vida enviant trames amb el màxim payload i amb 1 sol byte en transmissions amb reconeixement.

L'impacte de la longitud del payload és major per un T_{notif} menor amb diferències que poden superar el 52% en comparació amb el màxim payload. A mesura que creix el temps entre transmissions, aquest impacte es veu reduït pel fet que el dispositiu final està més temps en l'estat sleep on, per exemple, utilitzant DR5 i 60 minuts entre transmissions, les diferències estan al voltant del 14%.

4.3. Cost energètic del lliurament de dades

En aquesta secció s'avaluarà l'últim dels paràmetres de rendiment energètic més importants d'una xarxa LoRaWAN, el cost energètic del lliurament de dades. Per calcular aquest paràmetre en transmissions sense i amb reconeixement s'utilitzaran les equacions (3.13) i (3.16) respectivament, assumint que s'alimenta el dispositiu final amb una bateria a 3,6 V.

La següent figura (**Fig. 4.6**) mostra el cost energètic d'una transmissió sense reconeixement utilitzant el màxim payload possible per cada taxa de transmissió. Les diferències entre requerir o no confirmació no es poden apreciar en un mateix gràfic, i per aquesta raó es mostra únicament el cas de transmissió sense reconeixement.

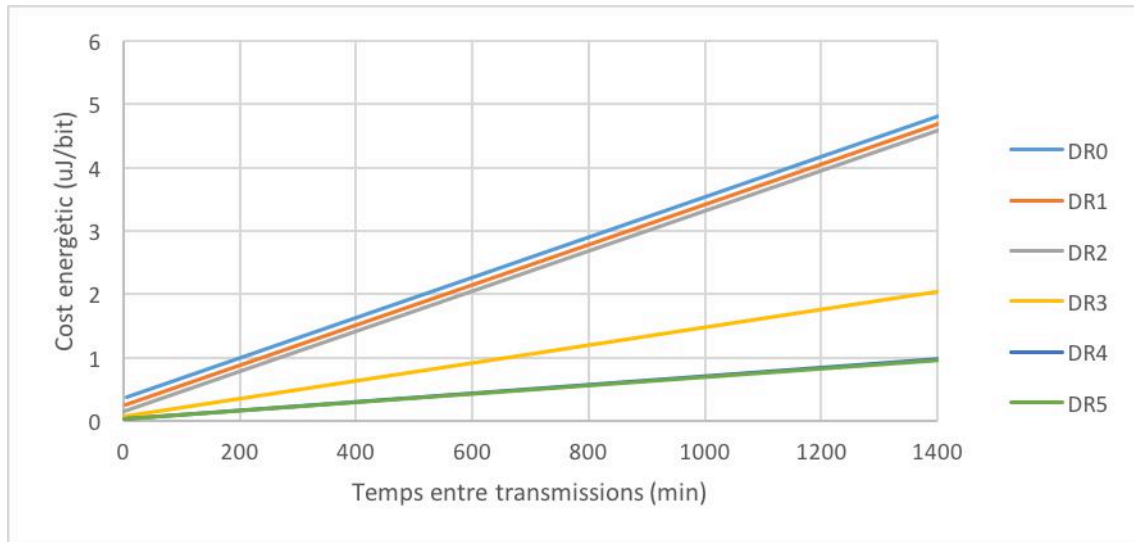


Fig. 4.6 Cost energètic d'una transmissió LoRaWAN utilitzant el màxim payload permès i les diferents taxes de transmissió

L'anterior figura representa l'energia necessària per entregar cada bit al receptor. Aquest paràmetre té una tendència lineal creixent en funció del temps entre transmissions, ja que a un major temps la I_{avg} tendeix al I_{sleep} . Així doncs, en mitjana, l'energia perduda durant el temps de sleep tindrà cada cop més pes a mesura que creix el temps entre transmissions.

La diferència que s'aprecia entre els diferents DRs es dona perquè es considera la longitud màxima permesa del payload on per DR0-DR1-DR2 és de 51 bytes, DR3 de 115 bytes i DR4-DR5 de 242 bytes. Pel cas concret del primer grup, DR0 presenta un major cost energètic que els altres DRs del seu grup perquè utilitza una taxa de bits menor, fet que augmenta la duració de la transmissió i les finestres de recepció. Aquesta justificació aplica d'igual forma en comparar DR1 amb DR2.

A continuació (**Fig. 4.7**), tal com s'ha fet amb els anteriors paràmetres de rendiment, es valorarà l'impacte del payload en el cost energètic.

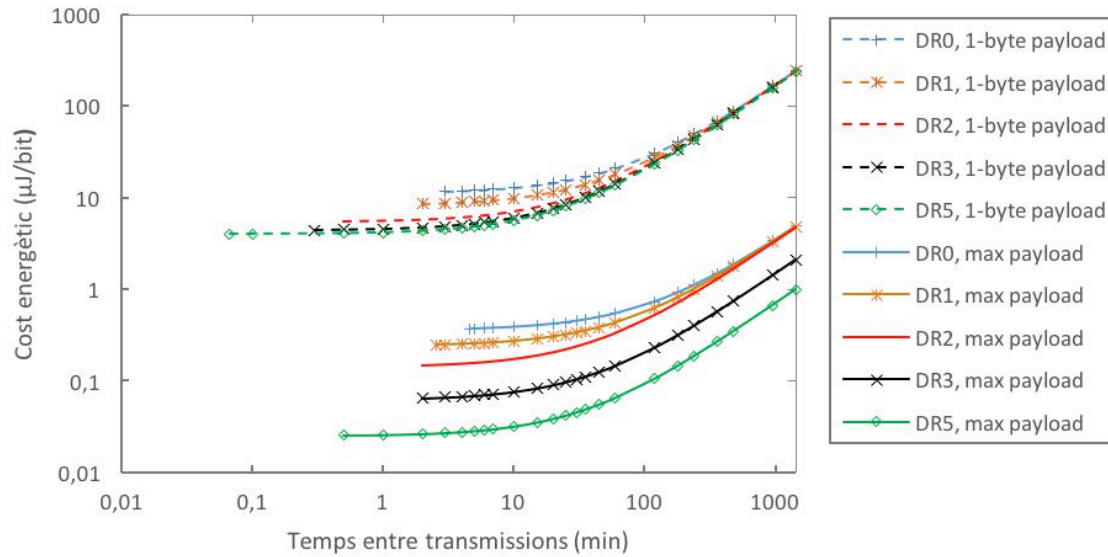


Fig. 4.7 Comparació entre el cost energètic d'una transmissió depenent del DR i el payload utilitzat

Com es pot observar, el fet d'enviar només 1 byte augmenta el cost energètic per cada bit útil entregat fins a dos ordres de magnitud en comparació amb el màxim payload.

4.4. Retransmissions

Per acabar aquest capítol, es mostrarà quin és el comportament que té el dispositiu final davant de retransmissions. El model analític i, per conseqüència, les gràfiques que s'han generat per mostrar els paràmetres de rendiment més importants, han considerat transmissions sense errors. Ara bé, en un entorn real és probable que durant una transmissió es produeixi algun error i s'hagi de retransmetre la trama.

El nombre de retransmissions per un mateix missatge on es requereix reconeixement és a discreció del dispositiu final i pot ser diferent per a cada sensor tot i que també es pot ajustar des del servidor de xarxa. Així doncs, aquest paràmetre és configurable pel dispositiu final a través de la llibreria libmDot, en el cas del dispositiu emprat en aquest projecte. A continuació (**Fig. 4.9**) es pot veure una transmissió on no s'ha rebut reconeixement per part del gateway i s'ha de retransmetre la trama.

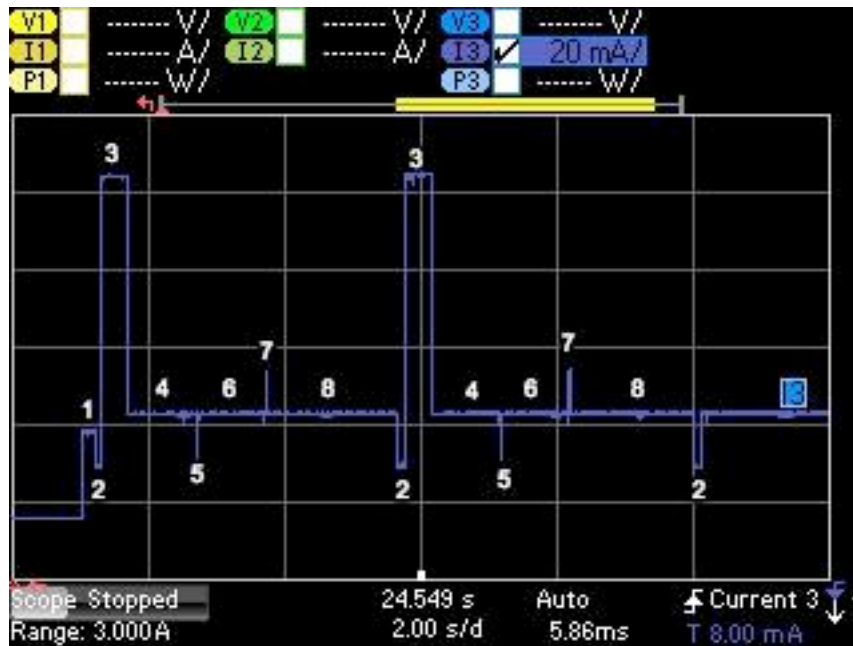


Fig. 4.1 Retransmissió d'un missatge utilitzant DR5

Per a la realització d'aquesta prova, s'ha establert el nombre d'intents del dispositiu final en 2 en el cas que no es rebi cap reconeixement per part del servidor de xarxa.

Per simular aquest comportament, s'ha apagat el gateway mentre el dispositiu estava transmetent perquè així no rebi cap reconeixement. Un cop el dispositiu final ha enviat una trama amb reconeixement i no s'ha rebut, s'inicia el procés de retransmissió. Aquest procés presenta certa variació pel que fa als estats si els comparem amb una transmissió normal amb reconeixement (vegeu **Fig. 3.3**).

En el cas de les retransmissions, un cop no s'ha rebut confirmació al final de la segona finestra (estat 7), hi ha un *delay* previ (estat 8) a tornar a retransmetre. Finalment, quan ha retransmès totes les trames sense rebre el reconeixement per part del gateway, el dispositiu final deixa de transmetre i torna a l'estat adormit.

Un punt crucial en aquest procés és que el dispositiu final no torna a l'estat adormit entre transmissió i transmissió, fet que produeix un consum I_{avg} major i, per conseqüència, una reducció en el temps de vida de les bateries.

CAPÍTOL 5. Conclusions

Aquest capítol presentarà les conclusions obtingudes durant la realització d'aquest projecte. A més a més, s'ha inclòs un apartat de línies futures que es podrien considerar per a projectes futurs i un estudi d'ambientació per aquest projecte.

5.1. Conclusions

L'objectiu principal d'aquest projecte era estudiar el rendiment energètic d'un dispositiu final que implementa el protocol LoRaWAN, considerant els diferents paràmetres configurables, mitjançant la realització de mesures reals per poder generar un model analític en funció dels resultats obtinguts. Així doncs, el resultat final del projecte, en referència als objectius proposats, es consideren aconseguits.

Per a la realització d'aquest projecte s'ha utilitzat programari i maquinari LoRaWAN, junt amb eines de laboratori, usades en l'actualitat per així aconseguir una caracterització del consum de corrent realista. Gràcies a aquest entorn experimental, s'ha pogut generar un model de consum per un dispositiu LoRaWAN que implementa la classe A, considerant les diferents taxes de transmissió durant l'enviament de dades amb i sense reconeixent, i mesurant l'impacte que té la longitud del payload en els diferents paràmetres de rendiment.

Un dels punts clau d'aquest projecte era comprovar el consum del sensor en l'estat adormit, ja que, normalment, aquest és l'estat en el qual el dispositiu roman més temps i esdevé capital en el temps de vida de les bateries. Tot i que aquest consum és baix ($45\mu\text{A}$), el suport hardware per al protocol LoRaWAN encara està lluny d'altres tecnologies de baixa potència com Bluetooth Low Energy (BLE), on el consum en estat adormit és de $1\mu\text{A}$.

Un resultat que a priori resultaria contraintuïtiu és la diferència de consum que hi ha entre transmissions sense i amb reconeixement on les primeres presenten un consum major. Aquest fet és degut al fet que la confirmació es pot rebre en la primera o en la finestra, així doncs, les transmissions amb reconeixement presenten un consum probabilísticament menor.

Depenent de quin DR s'utilitzi i quin temps hi hagi entre transmissions, hi ha un major o menor impacte sobre el consum de corrent depenent de si es requereix reconeixements o no. Utilitzant una taxa de transmissió i temps entre notificacions baixos com DR0 i 5 minuts entre transmissions, el consum amb reconeixements és un 4% menor que sense reconeixements. A mesura que augmenta el DR, l'impacte és major i, per exemple, utilitzant DR5 i 1 minut entre transmissions, el fet de requerir reconeixements consumeix un 10% menys que si no es requereixen.

Pel que fa a la duració de la bateria d'un dispositiu final, s'han obtingut uns resultats que es poden considerar satisfactoris per a un ampli ventall d'escenaris d'IoT. La capacitat de bateria assumida per obtenir els resultats ha estat de 2400 mA·h. S'ha demostrat que per una freqüència alta d'enviament de dades, com per exemple de 5 minuts, s'obté una duració propera a 1 any. D'altra banda, per una freqüència d'enviament molt baixa com, per exemple, 1 transmissió al dia, es pot aproximar fins als 6 anys de vida.

El paràmetre on la longitud del payload té un major impacte és el cost energètic del lliurament de dades. La diferència que s'ha pogut apreciar entre enviar el màxim payload permès i el fet d'enviar 1 byte arriba fins als dos ordres de magnitud.

Finalment, s'ha pogut simular un entorn on el dispositiu final no rep el reconeixement per part del gateway. En aquest cas, el consum es veu força afectat i, consegüentment, també la duració del temps de vida de la bateria.

Concloent, aquest treball ha resultat útil per al desenvolupament d'un model analític del comportament que presenta un dispositiu final LoRaWAN. Durant la realització d'aquest treball, no s'ha trobat cap document que cobrés aquesta necessitat, fet que fa més important haver generat aquest model. Els resultats obtinguts podran ser utilitzats per facilitar les decisions d'un administrador a l'hora d'escollir la bateria, taxa de transmissió o el mode d'enviament de dades.

5.2. Línies futures

Hi ha certs aspectes de la tecnologia LoRaWAN que no han pogut ser estudiats en aquest projecte i seria interessant veure quin és el comportament que presenten en dispositius finals. De cara al consum, es podria fer un model pel que fa a transmissions amb errors on la taxa d'error fos diferent de zero, ja que el model generat ha considerat que no hi ha errors en les transmissions.

D'altra banda, l'especificació LoRaWAN proporciona un mecanisme anomenat Adaptive Data Rate (ADR) que optimitza l'elecció de la taxa de transmissió, el temps en el qual s'està transmetent i el consum d'energia de la xarxa. Aquest mecanisme es trobaria suportat pel dispositiu final i és aquest el que decideix utilitzar-lo o no. Si està activat, és el servidor de xarxa el que escull, basat en les trames rebudes, quin és el marge de taxes que pot habilitar per tal de millorar la transmissió. Seria interessant veure com afecta aquest mecanisme al consum de corrent dels dispositius finals i a les transmissions de dades.

Pel que fa a les proves, s'han dut a terme en un àmbit interior de laboratori. En futurs projectes, es podria situar el gateway i els dispositius a l'exterior per veure quin és l'impacte de les infraestructures en l'abast de les transmissions i generar un model basat en els resultats obtinguts.

5.3. Estudi d'ambientació

Els dispositius finals han de ser alimentats mitjançant bateries externes que poden ser perjudicials per al medi ambient.

Per a la realització d'aquest treball s'han escollit piles de liti per alimentar els dispositius finals. Aquestes piles es podrien recarregar mitjançant plaques solars per a evitar llançar-les cada vegada que s'exhaurissin. D'altra banda, aquestes bateries només suporten entre 300 i 1000 recàrregues [24] i al final han de ser substituïdes per unes de noves.

A més a més, els dispositius finals poden recol·lectar informació referent a la qualitat de l'aire i la pol·lució, detecció de radiació, temperatura i altres aspectes que poden ajudar a obtenir una millor gestió del medi ambient.

Bibliografia

- [1] Leverage. Leverage – LoRa & LoRaWAN Primer, Dec (2016). Recuperat de <https://www.leverage.com/research-papers/lora-lorawan-primer>
- [2] Aloÿs A.; Jiazi Y.; Thomas C.; William T. “A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things”. *Sensors* **2016**, 16, 1466.
- [3] LoRa Alliance. — What is LoRa? Recuperat de <https://www.lora-alliance.org/What-Is-LoRa/Technology>
- [4] Microchip. Masters 2015 — Getting up and Running with LoRaWAN Long Range Networking. Recuperat de <http://manualzz.com/doc/7522395/lorawan%E2%84%A2-network-protocol>
- [5] Konstantin M.; Juha P.; Tuomo H. “Analysis of the Capacity and Scalability of the LoRa Wide Area Network Technology”. *ResearchGate GmbH* **2016**
- [6] Rubén P. “Evaluación de LoRa/LoRaWAN para escenarios de Smart City”. *Universitat Politècnica de Catalunya* **2017**, 33-36
- [7] Casals, L.; Mir, B.; Vidal, R.; Gomez, C. “Modeling the energy performance of LoRaWAN”. *Sensors* **2017**, 17 (pendent de revisió)
- [8] Orange. Orange Connected Objects & Partnerships — LoRa Device Developer Guide. Recuperat de <https://partner.orange.com/wp-content/uploads/2016/04/LoRa-Device-Developer-Guide-Orange.pdf>
- [9] Jonathan D. “LoRaWAN – Low Power WAN Protocol for IoT”. *ResearchGate GmbH* **2016**. Recuperat de <https://www.researchgate.net/publication/310843889>
- [10] Adelantado, F.; Vilajosana, X.; Tuset-Peiro, P.; “Understanding the limits of LoRaWAN”. *ResearchGate GmbH*. Recuperat de <https://www.researchgate.net/publication/305683193>
- [11] LoRaWAN Multitech mDot. Long Range 868/915MHz LoRa Module — Recuperat de <https://www.multitech.com/documents/publications/data-sheets/86002171.pdf>
- [12] LoRa Specifications. LoRa Alliance. Recuperat de <https://www.lora-alliance.org/technology>
- [13] Farrell S. “LoRaWAN Overview” (draft). Recuperat de <https://tools.ietf.org/html/draft-farrell-lpwan-lora-overview-00>
- [14] Kerlink LoRa IoT Station. Recuperat de http://www.kerlink.fr/images/Kerlink/fiches_produit/LoRa-IoT-Station.pdf

- [15] Antena LoRa AN868-915A-1HRA. Recuperat de <https://www.multitech.com/models/95217911LF>
- [16] Multitech mDot. MTDOT Developer Guide. Recuperat de <https://www.multitech.com/documents/publications/manuals/s000612.pdf>
- [17] Semtech SX1272/73. Recuperat de <http://www.semtech.com/images/datasheet/sx1272.pdf>
- [18] The Things Network. LoRaWAN. Recuperat de <https://www.thethingsnetwork.org/wiki/LoRaWAN/Home>
- [19] Agilent Technologies. Agilent N675A DC Power Analyzer — Quick Fast Sheet. Recuperat de http://www.alliedelec.com/images/products/mkt/pb/agilent/quickfactsheets/analyzers/N6705A%205989-8615ENDI_Allied.pdf
- [20] Sensors LoRaWAN. Recuperat de <http://www.adeunis-rf.com/en/products/lorawan-products/lorawan-sensors>
- [21] ARM mbed. Developer Site. Recuperat de <https://developer.mbed.org/teams/MultiTech/code/libmDot/>
- [22] CoolTerm. Recuperat de <http://freeware.the-meiers.org/>
- [23] GNU ARM Embedded Toolchain. Recuperat de <https://launchpad.net/gcc-arm-embedded>
- [24] Bateria de litio: ventajas y desventajas de uso. Recuperat de <http://nmeza.over-blog.com/article-bateria-litio-ventajas-desventajas-85929438.html>
- [25] LoRa network packet forwarder project. Recuperat de https://github.com/Lora-net/packet_forwarder
- [26] Minaburo, A.; Toutain, L.; Gomez, C. "LPWAN Static Context Header Compression (SCHC) and fragmentation for IPv6 and UDP", IETF Internet Draft, July 2017 (work in progress).
- [27] Plantilla per programar el dispositiu final MultiTech mDot. Recuperat de <https://developer.mbed.org/teams/MultiTech/code/DotExamples/?platform=MTS-mDot-F411>

Annexos

Els següents apartats componen tot allò que per problemes d'espai no pot estar en el cos de la memòria del projecte però són fonamentals per a la seva realització.

A continuació s'explicarà la completa configuració d'un dispositiu final per tal d'implementar el protocol LoRaWAN, la configuració del gateway per tal que reenvii els missatges entrants, el servidor de xarxa utilitzat: The Things Network i les captures obtingudes de les transmissions LoRaWAN realitzades per aquest projecte.

1. Configuració del dispositiu final

Aquest capítol presentarà la correcta configuració d'un dispositiu final, concretament el Multitech mDot, per tal que pugui adherir-se i comunicar-se en una xarxa LoRaWAN.

A continuació es mostrarà el codi utilitzat per tal d'unir-se a una xarxa i enviar dades. Primer de tot, es durà a terme la configuració del mòdul on es determinen les claus de xarxa i d'aplicació, es configura la xarxa com a pública, la taxa de transmissió, el mode de transmissió i les retransmissions i el mode per unir-se a la xarxa.

Un cop configurat el mòdul, s'intenta unir a la xarxa mitjançant missatges Join i, si la resposta ha estat satisfactòria, es comença a enviar dades. Quan s'ha enviat la trama, el mòdul calcula el temps que ha d'estar en l'estat adormit per, un cop complet aquest temps, tornar a transmetre.

```
#include "mbed.h"
#include "mDot.h"
#include "MTSLog.h"
#include <string>
#include <vector>
#include <algorithm>
////////////////////////////////////
// * these options must match the settings on your gateway //
// * edit their values to match your configuration           //
// * frequency sub band is only relevant for the 915 bands //
// * either the network name and passphrase can be used or //
//     the network ID (8 bytes) and KEY (16 bytes)          //
////////////////////////////////////
static std::string network_name = "MultiTech";
static std::string network_passphrase = "MultiTech";
```

```

static uint8_t config_app_eui[] = { 0xXX, 0xXX, 0xXX, 0xXX,
    0xXX, 0xXX, 0xXX, 0xXX };
static uint8_t config_app_key[] = { 0xXX, 0xXX, 0xXX, 0xXX,
    0xXX, 0xXX, 0xXX, 0xXX, 0xXX, 0xXX, 0xXX, 0xXX, 0xXX,
    0xXX, 0xXX };
// deepsleep consumes slightly less current than sleep
// in sleep mode, IO state is maintained, RAM is retained, and
// application will resume after waking up
// in deepsleep mode, IOs float, RAM is lost, and application
// will start from beginning after waking up
// if deep_sleep == true, device will enter deepsleep mode

mDot* dot = NULL;

int main() {
    int32_t ret;
    std::vector<uint8_t> data;
    std::string data_str = "Data to be send";

    dot = mDot::getInstance();

    // print library version information
    logInfo("version: %s", dot->getId().c_str()); //-> pointer
member

    // reset to default config so we know what state we're in
    dot->resetConfig();

    dot->setLogLevel(mts::MTSLog::INFO_LEVEL);

    logInfo("setting public network mode");
    if ((ret = dot->setPublicNetwork(true)) != mDot::MDOT_OK) {
        logError("failed to public network mode");
    }

    std::vector<uint8_t> temp;

    //Adding the app EUI to vector for setting network id
    for (int i = 0; i < 8; i++) {
        temp.push_back(config_app_eui[i]); //Push at the end
    }

    logInfo("setting app eui");
    if ((ret = dot->setNetworkId(temp)) != mDot::MDOT_OK) {
        logError("failed to set app eui %d:%s", ret,
mDot::getReturnCodeString(ret).c_str());

```

```
}

temp.clear();

//Adding the app key to vector for setting network key
for (int i = 0; i < 16; i++) {
    temp.push_back(config_app_key[i]);
}

logInfo("setting app key");
if ((ret = dot->setNetworkKey(temp)) != mDot::MDOT_OK) {
    logError("failed to set app key %d:%s", ret,
mDot::getReturnCodeString(ret).c_str());
}

// a higher spreading factor allows for longer range but
lower throughput
// in the 915 (US) frequency band, spreading factors 7 - 10
are available
// in the 868 (EU) frequency band, spreading factors 7 - 12
are available
logInfo("setting TX spreading factor");
if ((ret = dot->setTxDataRate(mDot::DR0)) != mDot::MDOT_OK)
{
    logError("failed to set TX datarate %d:%s", ret,
mDot::getReturnCodeString(ret).c_str());
}
// request receive confirmation of packets from the gateway
logInfo("enabling ACKs");
if ((ret = dot->setAck(2)) != mDot::MDOT_OK) {
    logError("failed to enable ACKs %d:%s", ret,
mDot::getReturnCodeString(ret).c_str());
}
// set join mode to AUTO_OTA so the mDot doesn't have to
rejoin after sleeping
logInfo("setting join mode to AUTO_OTA");
if ((ret = dot->setJoinMode(mDot::AUTO_OTA)) !=
mDot::MDOT_OK) {
    logError("failed to set join mode %d:%s", ret,
mDot::getReturnCodeString(ret).c_str());
}

// save this configuration to the mDot's NVM
logInfo("saving config");
if (! dot->saveConfig()) {
    logError("failed to save configuration");
}
}
```

```

//*****
// end of configuration
//*****

// attempt to join the network
logInfo("joining network");
while ((ret = dot->joinNetwork()) != mDot::MDOT_OK) {
    logError("failed to join network %d:%s", ret,
mDot::getReturnCodeString(ret).c_str());
    // in the 868 (EU) frequency band, we need to wait until
another channel is available before transmitting again
    osDelay(std::max((uint32_t)1000, (uint32_t)dot-
>getNextTxMs()));
}
for (std::string::iterator it = data_str.begin(); it !=
data_str.end(); it++)
    data.push_back((uint8_t) *it);

while (true) {
    //Deep sleep approach
    // send the data to the gateway
    if ((ret = dot->send(data)) != mDot::MDOT_OK) {
        logError("failed to send", ret,
mDot::getReturnCodeString(ret).c_str());
    } else {
        logInfo("successfully sent data to gateway");
    }
    // in the 868 (EU) frequency band, we need to wait until
another channel is available before transmitting again
    uint32_t sleep_time = std::max((uint32_t)10000,
(uint32_t)dot->getNextTxMs()) / 1000;
    logInfo("going to sleep...");

    // go to deepsleep and wake up automatically sleep_time
seconds later
    // third argument (false) means SLEEP instead of
DEEP_SLEEP mode
    dot->sleep(sleep_time, mDot::RTC_ALARM);
}
return 0;
}

```

Un cop està programat, s'ha de generar el binari per tal que la taula el pugui instal·lar al dispositiu final. Com s'ha comentat al **Capítol 2**, s'utilitza el compilador GCC per tal de generar el binari pel microcontrolador F411RE. Així doncs, mitjançant un terminal podem generar el binari mitjançant la següent comana.

```
mbed compile -t GCC_ARM -m MTS_MDOT_F411RE
```

Al executar l'anterior comana, el terminal dóna un resum de les principals característiques de la compilació del binari.

```

Compile [ 94.3%]: rt_List.c
Compile [ 94.7%]: rt_Mailbox.c
Compile [ 95.1%]: rt_MemBox.c
Compile [ 95.5%]: rt_Memory.c
Compile [ 95.9%]: Thread.cpp
Compile [ 96.3%]: rt_Mutex.c
Compile [ 96.7%]: rt_OsEventObserver.c
Compile [ 97.1%]: rt_Robin.c
Compile [ 97.6%]: rt_Semaphore.c
Compile [ 98.0%]: rt_System.c
Compile [ 98.4%]: rt_Time.c
Compile [ 98.8%]: rt_Timer.c
Compile [ 99.2%]: rt_Task.c
Compile [ 99.6%]: test_env.cpp
Compile [100.0%]: rt_CMSIS.c
Link: Dot-Examples
Elf2Bin: Dot-Examples
+-----+-----+-----+
| Module          | .text | .data | .bss |
+-----+-----+-----+
| Fill            | 297   | 8     | 16   |
| Misc            | 139619 | 2440 | 4573 |
| features/frameworks | 44   | 0     | 0    |
| features/net    | 24    | 0     | 0    |
| hal/common      | 4034  | 24    | 437  |
| hal/targets    | 9710  | 4     | 1244 |
| rtos/rtos      | 857   | 4     | 0    |
| rtos/rtx       | 7307  | 20    | 6790 |
| Subtotals       | 161892 | 2500 | 13060 |
+-----+-----+-----+
Allocated Heap: unknown
Allocated Stack: unknown
Total Static RAM memory (data + bss): 15560 bytes
Total RAM memory (data + bss + heap + stack): 15560 bytes
Total Flash memory (text + data + misc): 164392 bytes
Image: ./BUILD/MTS_MDOT_F411RE/GCC_ARM/Dot-Examples.bin

```

Fig. I-1 Compilació d'un programa utilitzant la llibreria libmDot per a un dispositiu final

L'últim pas és connectar la placa de desenvolupament al PC per tal de passar-li

el binari i executar-lo al dispositiu final. S'ha de tenir en compte que cada nou binari que s'executi en el sensor sobreescriu l'anterior.

2. Configuració del gateway

Per a la realització d'aquest projecte s'ha utilitzat com a gateway el Kerlink lot Station (vegeu **Fig. 2.4**). Aquest gateway permet connexions remotes via SSH pel que es pot configurar des de qualsevol punt amb connexió a Internet.

Per tal d'enviar les dades que rep d'un dispositiu final cap al servidor de xarxa s'ha utilitzat el packet forwarder de Semtech [25]. Aquest programa corre en el host del gateway i reenvia les trames via IP/UDP al servidor de xarxa corresponent.

El gateway es configura mitjançant el fitxer `global_conf.json` com el següent.

```
{
  "SX1301_conf": {
    "lorawan_public": true,
    "clksrc": 1,
    "radio_0": {
      "enable": true,
      "type": "SX1257",
      "freq": 867500000,
      "rssi_offset": -166.0,
      "tx_enable": true
    },
    "radio_1": {
      "enable": true,
      "type": "SX1257",
      "freq": 868500000,
      "rssi_offset": -166.0,
      "tx_enable": false
    },
    "chan_multiSF_0": {
      "enable": true,
      "radio": 1,
      "if": -400000
    },
    "chan_multiSF_1": {
      "enable": true,
      "radio": 1,
      "if": -200000
    },
    "chan_multiSF_2": {
      "enable": true,
      "radio": 1,
      "if": 0
    }
  }
}
```

```
    },
    "chan_multiSF_3": {
      "enable": true,
      "radio": 0,
      "if": -400000
    },
    "chan_multiSF_4": {
      "enable": true,
      "radio": 0,
      "if": -200000
    },
    "chan_multiSF_5": {
      "enable": true,
      "radio": 0,
      "if": 0
    },
    "chan_multiSF_6": {
      "enable": true,
      "radio": 0,
      "if": 200000
    },
    "chan_multiSF_7": {
      "enable": true,
      "radio": 0,
      "if": 400000
    },
    "chan_Lora_std": {
      "enable": true,
      "radio": 1,
      "if": -200000,
      "bandwidth": 250000,
      "spread_factor": 7
    },
    "chan_FSK": {
      "enable": true,
      "radio": 1,
      "if": 300000,
      "bandwidth": 125000,
      "datarate": 50000
    },
    "tx_lut_0": {
      "pa_gain": 1,
      "mix_gain": 8,
      "rf_power": 0,
      "dig_gain": 3
    },
    "tx_lut_1": {
      "pa_gain": 1,
      "mix_gain": 9,
      "rf_power": 1,
```

```
    "dig_gain": 3
  },
  "tx_lut_2": {
    "pa_gain": 1,
    "mix_gain": 10,
    "rf_power": 3,
    "dig_gain": 3
  },
  "tx_lut_3": {
    "pa_gain": 1,
    "mix_gain": 11,
    "rf_power": 5,
    "dig_gain": 3
  },
  "tx_lut_4": {
    "pa_gain": 1,
    "mix_gain": 13,
    "rf_power": 8,
    "dig_gain": 3
  },
  "tx_lut_5": {
    "pa_gain": 2,
    "mix_gain": 9,
    "rf_power": 10,
    "dig_gain": 3
  },
  "tx_lut_6": {
    "pa_gain": 2,
    "mix_gain": 10,
    "rf_power": 12,
    "dig_gain": 3
  },
  "tx_lut_7": {
    "pa_gain": 2,
    "mix_gain": 11,
    "rf_power": 14,
    "dig_gain": 3
  },
  "tx_lut_8": {
    "pa_gain": 2,
    "mix_gain": 13,
    "rf_power": 17,
    "dig_gain": 3
  },
  "tx_lut_9": {
    "pa_gain": 3,
    "mix_gain": 9,
    "rf_power": 19,
    "dig_gain": 3
  },
}
```



```
"tx_lut_10": {
  "pa_gain": 3,
  "mix_gain": 10,
  "rf_power": 21,
  "dig_gain": 3
},
"tx_lut_11": {
  "pa_gain": 3,
  "mix_gain": 11,
  "rf_power": 23,
  "dig_gain": 3
},
"tx_lut_12": {
  "pa_gain": 3,
  "mix_gain": 12,
  "rf_power": 25,
  "dig_gain": 3
},
"tx_lut_13": {
  "pa_gain": 3,
  "mix_gain": 13,
  "rf_power": 26,
  "dig_gain": 3
},
"tx_lut_14": {
  "pa_gain": 3,
  "mix_gain": 14,
  "rf_power": 28,
  "dig_gain": 3
},
"tx_lut_15": {
  "pa_gain": 3,
  "mix_gain": 15,
  "rf_power": 29,
  "dig_gain": 3
}
},
"gateway_conf": {
  "gateway_ID": "AA555A0000000002",
  "server_address": "router.eu.thethings.network",
  "serv_port_up": 1700,
  "serv_port_down": 1700,
  "keepalive_interval": 10,
  "stat_interval": 30,
  "push_timeout_ms": 100,
  "forward_crc_valid": true,
  "forward_crc_error": true,
  "forward_crc_disabled": false
}
}
```

El gateway no fa cap mena de filtratge, la seva funcionalitat és única i exclusivament reenviar les trames LoRaWAN que li arriben cap al servidor de xarxa especificat pel fitxer anterior (en aquest cas, The Things Network). El NS és l'encarregat de decidir quins paquets són vàlids i quins no.

Un cop configurat el gateway, només cal executar el codi compilat del `packet_forwarder` mitjançant la línia de comandes per reenviar les trames entrants cap al servidor de xarxa indicat al `global_conf.json`.

```
INFO: global_conf.json does contain a JSON object named SX1301_conf, parsing SX1301 parameters
INFO: lorawan_public 1, clksrc 1
INFO: Configuring TX LUT with 16 indexes
INFO: radio 0 enabled (type SX1257), center frequency 867500000, RSSI offset -166.000000, tx enabled 1
INFO: radio 1 enabled (type SX1257), center frequency 868500000, RSSI offset -166.000000, tx enabled 0
INFO: Lora multi-SF channel 0> radio 1, IF -400000 Hz, 125 kHz bw, SF 7 to 12
INFO: Lora multi-SF channel 1> radio 1, IF -200000 Hz, 125 kHz bw, SF 7 to 12
INFO: Lora multi-SF channel 2> radio 1, IF 0 Hz, 125 kHz bw, SF 7 to 12
INFO: Lora multi-SF channel 3> radio 0, IF -400000 Hz, 125 kHz bw, SF 7 to 12
INFO: Lora multi-SF channel 4> radio 0, IF -200000 Hz, 125 kHz bw, SF 7 to 12
INFO: Lora multi-SF channel 5> radio 0, IF 0 Hz, 125 kHz bw, SF 7 to 12
INFO: Lora multi-SF channel 6> radio 0, IF 200000 Hz, 125 kHz bw, SF 7 to 12
INFO: Lora multi-SF channel 7> radio 0, IF 400000 Hz, 125 kHz bw, SF 7 to 12
INFO: Lora std channel> radio 1, IF -200000 Hz, 250000 Hz bw, SF 7
INFO: FSK channel> radio 1, IF 300000 Hz, 125000 Hz bw, 50000 bps datarate
INFO: global_conf.json does contain a JSON object named gateway_conf, parsing gateway parameters
INFO: gateway MAC address is configured to AA555A0000000002
INFO: server hostname or IP address is configured to "router.eu.thethings.network"
INFO: upstream port is configured to "1700"
INFO: downstream port is configured to "1700"
INFO: downstream keep-alive interval is configured to 10 seconds
INFO: statistics display interval is configured to 30 seconds
INFO: upstream PUSH_DATA time-out is configured to 100 ms
INFO: packets received with a valid CRC will be forwarded
INFO: packets received with a CRC error will be forwarded
INFO: packets received with no CRC will NOT be forwarded
INFO: [main] concentrator started, packet can now be received
INFO: [down] PULL_ACK received in 34 ms
INFO: [down] PULL_ACK received in 34 ms
^C
##### 2017-08-17 08:25:29 GMT #####
### [UPSTREAM] ###
# RF packets received by concentrator: 0
# CRC_OK: 0.00%, CRC_FAIL: 0.00%, NO_CRC: 0.00%
# RF packets forwarded: 0 (0 bytes)
# PUSH_DATA datagrams sent: 0 (0 bytes)
# PUSH_DATA acknowledged: 0.00%
### [DOWNSTREAM] ###
# PULL_DATA sent: 2 (100.00% acknowledged)
# PULL_RESP(onse) datagrams received: 0 (0 bytes)
```

Fig. II-1 Logs del projecte `packet_forwarder` per reenviar trames LoRaWAN

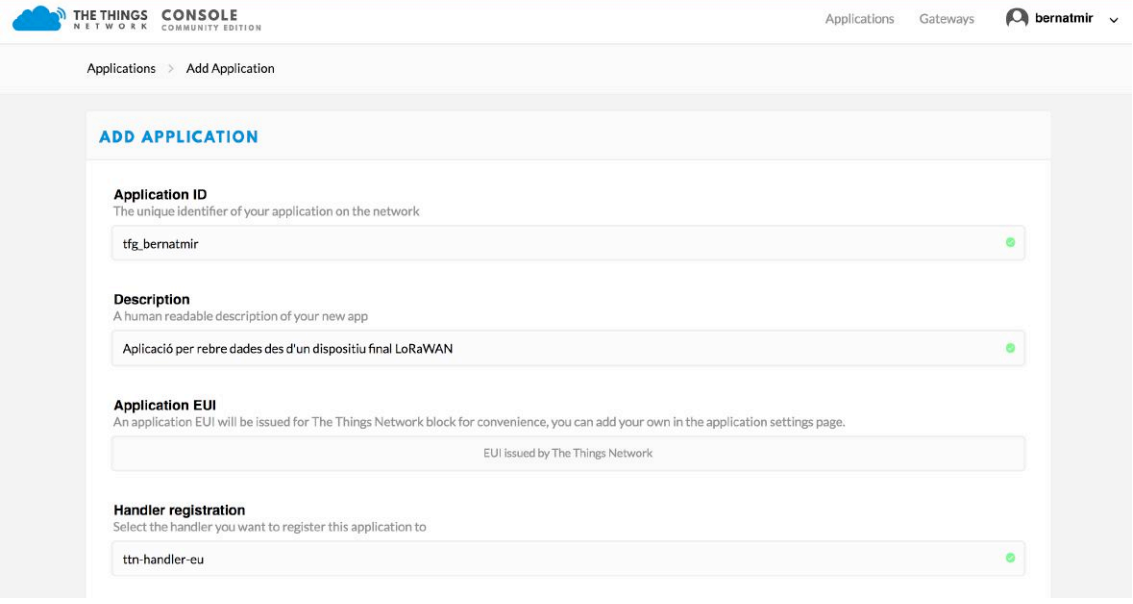
Com es pot observar a l'anterior figura, el `packet forwarder` habilita els canals de la banda 868 MHz per la modulació LoRa i, addicionalment, habilita 1 canal per la modulació FSK. Les proves que s'han realitzat en aquesta modulació no han estat satisfactòries perquè el DR que utilitza FSK és el 7 i el gateway no està preparat per aquesta taxa de transmissió.

3. Servidor de xarxa: The Things Network

Hi ha diversos servidors de xarxa que permeten implementar aplicacions LoRaWAN de forma gratuïta però limitada. Per aquest projecte, s'ha decidit

utilitzar el servidor de xarxa The Things Network que compleix les necessitats del treball.

Primer de tot, ens hem de registrar a través del portal web per tal de crear una aplicació. Un cop estem registrats, s'ha de crear l'aplicació que farà servir el dispositiu final.



The screenshot shows the 'ADD APPLICATION' page in the The Things Network Console. The page has a header with the logo and 'CONSOLE COMMUNITY EDITION', navigation links for 'Applications' and 'Gateways', and a user profile for 'bernatmir'. The main content area is titled 'ADD APPLICATION' and contains four sections:

- Application ID:** The unique identifier of your application on the network. The input field contains 'tfg_bernatmir'.
- Description:** A human readable description of your new app. The input field contains 'Aplicació per rebre dades des d'un dispositiu final LoRaWAN'.
- Application EUI:** An application EUI will be issued for The Things Network block for convenience, you can add your own in the application settings page. The input field contains 'EUI issued by The Things Network'.
- Handler registration:** Select the handler you want to register this application to. The input field contains 'ttn-handler-eu'.

Fig. III-1 Creació d'una aplicació al servidor de xarxa

L'Application EUI és generat pel NS i serveix per identificar l'aplicació de manera única. Un cop creada l'aplicació, s'han de registrar els dispositius que l'utilitzaran.

REGISTER DEVICE [bulk import devices](#)

Device ID
This is the unique identifier for the device in this app. The device ID will be immutable.
modul

Device EUI
The device EUI is the unique identifier for this device on the network. You can change the EUI later.
<> 00 80 00 00 00 00 A5 3F 8 bytes

App Key
The App Key will be used to secure the communication between you device and the network.
this field will be generated

App EUI
70 B3 D5 7E F0 00 62 59

Cancel Register

Fig. III-2 Registre d'un dispositiu final al servidor de xarxa

Un cop creada l'aplicació i registrat un dispositiu final, cal programar el sensor amb l'identificador únic d'aplicació i la clau a escala d'aplicació que indica el servidor de xarxa. Aquestes claus han estat generades pel NS però poden ser modificades si es desitja.

Applications > tfg_bernatmir > Devices > modul

DEVICE OVERVIEW

Application ID tfg_bernatmir

Device ID modul

Activation Method OTAA

Device EUI <> 00 80 00 00 00 00 A5 3F

Application EUI <> 70 B3 D5 7E F0 00 6A 8D

App Key <>

Status ● never seen

Frames up 0 [reset frame counters](#)

Frames down 0

Fig. III-3 Resum de la informació rellevant d'un dispositiu final

Finalment, un cop tenim tota la informació anterior configurada, el dispositiu ja

pot començar a transmetre cap al servidor de xarxa. The Things Network habilita una pestanya per consultar les dades rebudes.

| | | | | | |
|------------|----|---|------|---|---|
| ▲ 17:34:45 | 68 | 1 | mod1 | 32 34 32 6D 61 78 69 6D 50 61 79 6C 6F 61 64 5F 64 72 35 5F 32 34 32 6D 61 78 69 6D 50 61 | > |
| ▼ 17:34:33 | 67 | 0 | mod1 | Downlink sent | > |
| ▲ 17:34:33 | 67 | 1 | mod1 | 32 34 32 6D 61 78 69 6D 50 61 79 6C 6F 61 64 5F 64 72 35 5F 32 34 32 6D 61 78 69 6D 50 61 | > |
| ▼ 17:34:09 | 66 | 0 | mod1 | Downlink sent | > |
| ▲ 17:34:09 | 66 | 1 | mod1 | 32 34 32 6D 61 78 69 6D 50 61 79 6C 6F 61 64 5F 64 72 35 5F 32 34 32 6D 61 78 69 6D 50 61 | > |
| ▼ 17:33:56 | 65 | 0 | mod1 | Downlink sent | > |

Fig. III-4 Dades transmeses per un dispositiu final

Metadata

```
{
  "time": "2017-04-09T16:41:48.529769471Z",
  "frequency": 868.3,
  "modulation": "LORA",
  "data_rate": "SF7BW250",
  "coding_rate": "4/5",
  "gateways": [
    {
      "gtw_id": "eui-aa555a0000000002",
      "timestamp": 1602983596,
      "time": "2017-04-09T16:37:57.837384Z",
      "channel": 8,
      "rssi": -32,
      "snr": 10.2,
      "rf_chain": 1,
      "latitude": 43.658066,
      "longitude": 10.436827
    }
  ]
}
```

Fig. III-5 Detall d'una transmissió utilitzant DR6

Adicionalment, el servidor de xarxa permet configurar diferents paràmetres com el mètode d'activació a OTAA o ABP o la clau d'aplicació.

SETTINGS

Description
A human-readable description of the device

Device EUI
The serial number of your radio module, similar to a MAC address

00 80 00 00 00 00 A5 40 8 bytes

Application EUI

70 B3D57E F0 00 62 59

Activation Method

OTAA ABP

App Key
The key your device will use to set up sessions with the network

EB D5 F0 74 5C C6 3F 59 D7 3A 99 46 A2 1E 4F 95 16 bytes

Frame Counter Width

16 bit 32 bit

Frame Counter Checks

Delete Device Cancel Save

Fig. III-6 Paràmetres configurables d'un dispositiu final

4. Transmissions LoRaWAN

Aquest apartat mostrarà la comparació de les diferents transmissions que s'han realitzat per aquest projecte dependent de la taxa de transmissió.

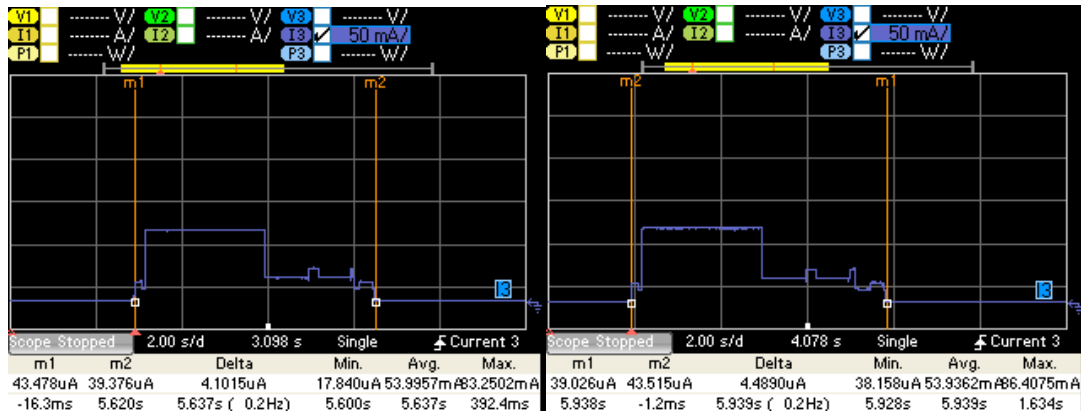


Fig IV-1 Transmissió LoRaWAN utilitzant DR0 sense confirmació (esquerra) i amb confirmació (dreta)

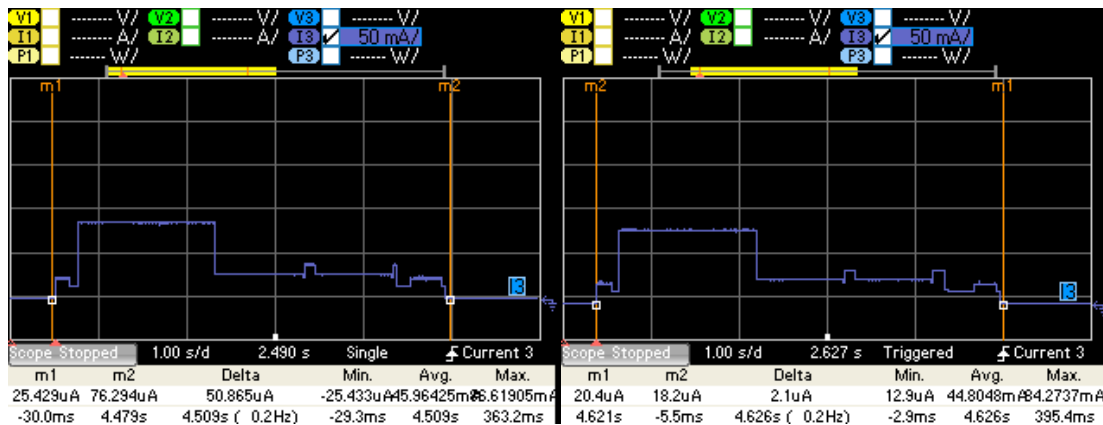


Fig IV-2 Transmissió LoRaWAN utilitzant DR1 sense confirmació (esquerra) i amb confirmació (dreta)

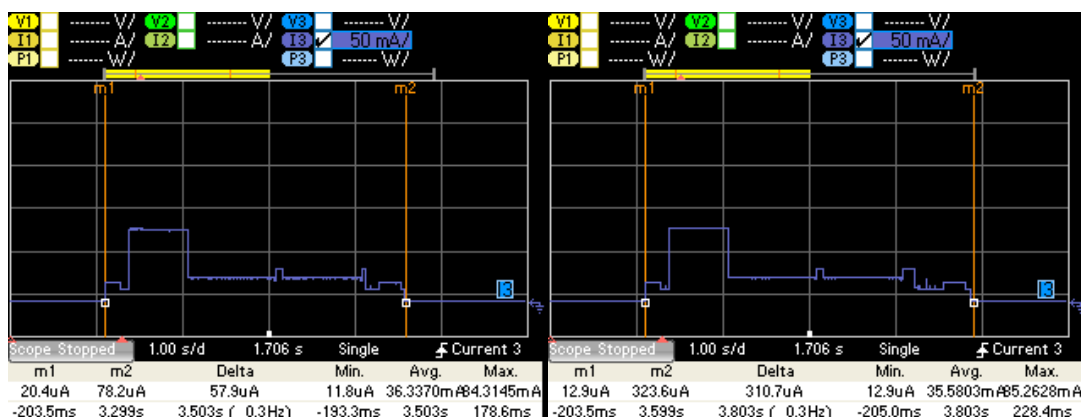


Fig IV-3 Transmissió LoRaWAN utilitzant DR2 sense confirmació (esquerra) i amb confirmació (dreta)

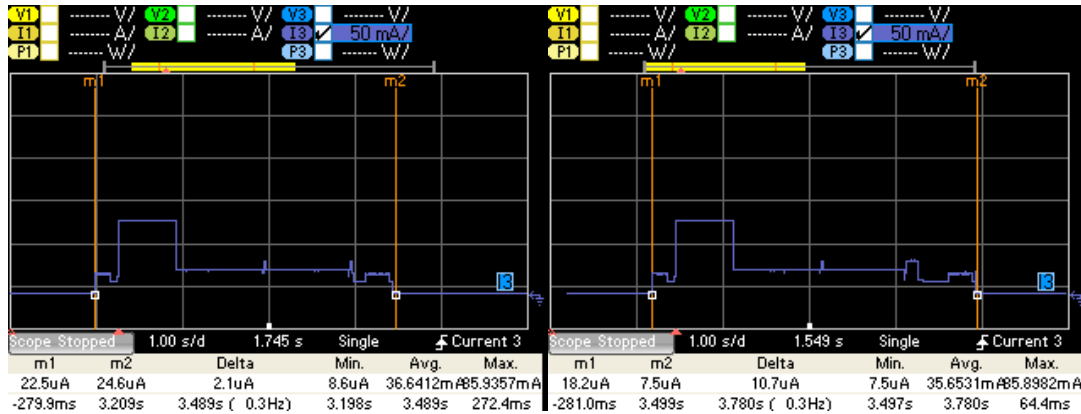


Fig IV-4 Transmissió LoRaWAN utilitzant DR3 sense confirmació (esquerra) i amb confirmació (dreta)

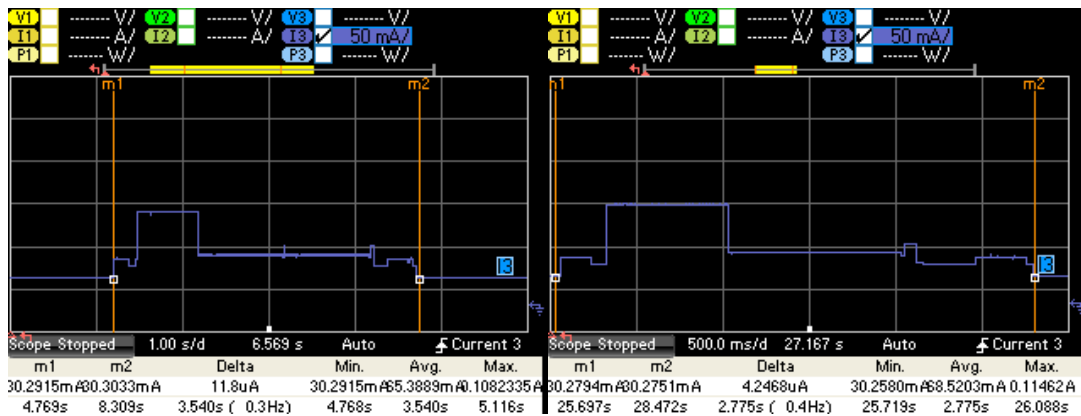


Fig IV-5 Transmissió LoRaWAN utilitzant DR4 sense confirmació (esquerra) i amb confirmació (dreta)

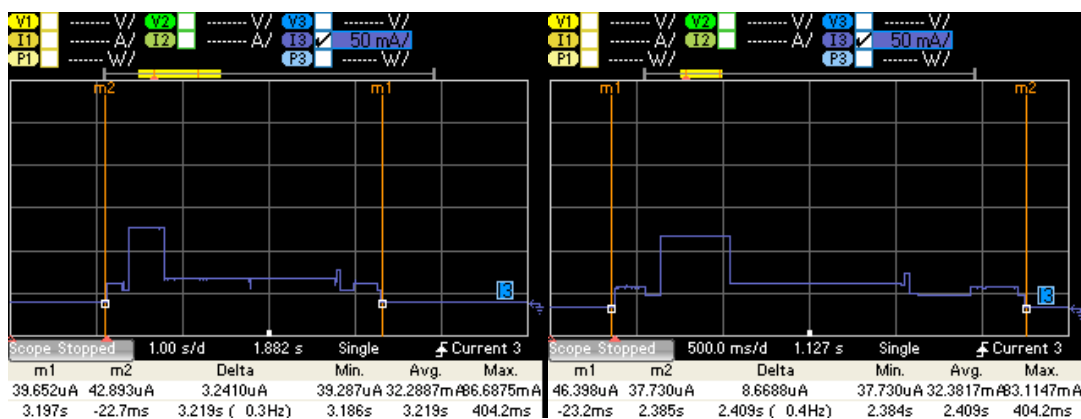


Fig IV-6 Transmissió LoRaWAN utilitzant DR5 sense confirmació (esquerra) i amb confirmació (dreta)

Pel que fa a les transmissions amb reconeixement, es pot observar que, majoritàriament, el grup DR0-DR3 rep la confirmació a la segona finestra mentre que el grup DR4-DR5 rep la confirmació a la primera finestra.