

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
CAMPUS DI CESENA

Scuola di Ingegneria e Architettura
Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica per l'Energia e
l'Informazione

Analisi Sperimentale delle Prestazioni di Nodi Wireless LoRa in Presenza di Interferente

Relazione finale in
Laboratorio di Reti e Programmazione Dispositivi Mobili

Relatore
Prof. Ing. Enrico Paolini
Correlatore
Dr. Ahmed Elzanaty

Presentata da
Eleonora Landini

Anno Accademico 2017-2018

Indice

1	Introduzione	6
2	La Tecnologia LoRa	9
2.1	I Dispositivi LoRaWAN	10
2.1.1	Sigfox	11
2.1.2	LoRa	12
2.1.3	Weightless	13
2.1.4	NB-IOT	14
2.1.5	RPMA	15
2.2	Lo Standard LoRa	17
2.2.1	Le diverse bande di frequenza ISM	17
2.2.2	La modulazione LoRa	18
2.2.3	Il livello MAC LoRa	22
2.2.4	Il Livello di Applicazione	24
3	Il Kit di Sviluppo	27
3.1	Specifiche della Tecnologia utilizzata	30
3.2	Impostazioni Applicazione su The Things Network	34
3.3	Impostazioni del Gateway	35
3.4	Impostazioni dei Nodi	36
3.5	Impostazioni Applicazione Client	43
4	Risultati delle Misurazioni	45
4.1	Misure con un unico nodo	48
4.1.1	SF 7	49
4.1.2	SF 8	50
4.1.3	SF 9	51
4.1.4	SF 10	52

4.1.5	SF 11	53
4.2	Misure in presenza di interferente	54
4.2.1	Differenza di 6 dB	56
4.2.2	Differenza di 9 dB	59
5	Conclusioni	70

Elenco delle figure

2.1	Architettura di una rete LoRa [1]	11
2.2	Struttura dei diversi livelli dei nodi LoRa [9]	17
2.3	Modulazione e processo di Spreading [2]	19
2.4	Demodulazione [2]	20
2.5	Trasmissione di messaggio in Uplink e finestre di ricezione [9]	23
2.6	Finestre di ricezione del messaggio in Uplink [17]	23
2.7	Schermata della LoRa Development Utility	25
3.1	Foto dei due Nodi LoRa RN 2483 in dotazione	28
3.2	Il Gateway LoRa utilizzato per le misure	29
3.3	Interfaccia dell'applicazione sul sito The Things Network. In alto a destra sono presenti le varie opzioni con cui si può modificare l'applicazione o controllare il flusso dei messaggi sulla stessa [13].	34
3.4	Panoramica della LoRa Development Utility per la parte riguardante il gateway	36
3.5	Schermata delle impostazioni iniziali dei nodi sulla Development Kit Utility	37
3.6	Pagine dei dettagli dei dispositivi assegnati all'applicazione su The Things Network [14]	39
3.7	Schermata MAC Channels del canale 0	41
3.8	Visualizzazione dei canali disattivati	42
4.1	Schermata della pagina web di The Things Network dove si può osservare il traffico del gateway. In particolare, sotto la voce airtime si trova il ToA effettivo [16].	47
4.2	Confronto tra le cdf empiriche dei due nodi trasmettenti una alla volta con SF7	61

4.3	Confronto tra le cdf empiriche dei due nodi trasmittenti uno alla volta con SF8	62
4.4	Confronto tra le cdf empiriche dei due nodi trasmittenti uno alla volta con SF9	64
4.5	Confronto tra le cdf empiriche dei due nodi trasmittenti uno alla volta con SF10	65
4.6	Confronto tra la cdf empirica del nodo abp01 utilizzato singolarmente e quella dello stesso nodo in presenza di interferente .	68

Elenco delle tabelle

2.1	Confronto tra le tecnologie descritte, da [4]. (NA = Non Applicabile; ND = informazione Non Disponibile)	16
2.2	Bande di frequenze ISM delle varie zone geografiche. [8] * = la banda ISM assegnata alla zona asiatica viene denominata AS923MHz e vengono poi divise tra i diversi paesi le varie larghezze di banda.[8]	18
3.1	Formato del messaggio in Uplink [7]	30
3.2	Grandezza massima del payload [7]	30
3.3	Corrispondenze tra SF, Bande, Data Rate [7] e Bit Rate	31
3.4	Corrispondenze tra canali, frequenze portanti e Duty Cycle [7]	32
3.5	Confronto tra gli indici utilizzati per identificare l'intensità di Potenza Trasmessa e la Effettiva Potenza Trasmessa in dBm [7]	43
4.1	Corrispondenza tra numero di simboli del preambolo e spreading factor	47

Capitolo 1

Introduzione

L'Internet of Things sta emergendo come insieme di tecnologie integrate, nuove soluzioni e servizi, che si prevede possano cambiare il modo in cui vivono le persone e in cui si producono, o si sfruttano, beni [12]. L'utilizzo e lo sviluppo della tecnologia denominata Internet of Things è aumentato in modo considerevole negli ultimi anni e si pensa che possa cambiare definitivamente il modo in cui si interagisce con la tecnologia negli anni a venire. L'obiettivo dell'Internet of Things, o internet delle cose, è quello di permettere agli oggetti di comunicare e di essere controllati via remoto, combinando infrastrutture di internet già esistenti con sistemi di comunicazione wireless ottimizzati. È ciò che permette la diretta integrazione e comunicazione tra il mondo fisico e quello digitale [5].

Pertanto, grazie a questa tecnologia, una "cosa", che può essere un sensore, oggetti di utilizzo quotidiano, macchinari industriali, cartelle mediche, viene connessa ad internet e può essere sfruttata in moltissimi campi sia ordinari che di natura industriale, per esempio nel campo dell'agricoltura o quello meteorologico.

E' stimato che nel 2020 saranno più di 28 miliardi i dispositivi connessi come IoT. Per poter ottenere questo risultato però si deve giocare su diversi fattori:

- sul costo per unità dei dispositivi;
- sul consumo di ogni unità, poiché più consumano e necessariamente meno duratura nel tempo avranno;

- una rete che possa supportare un grande numero di oggetti connessi, in quanto l'obiettivo è quello di connettere più cose possibili allo stesso network;
- una copertura di rete che sia molto ampia, per potere raggiungere più elementi possibili [19].

Come si evince da quanto appena detto gli oggetti che si vogliono connettere con la tecnologia dell'Internet of Things devono avere un basso consumo di energia; si parla quindi di dispositivi che possono mandare messaggi saltuari, con una cadenza per esempio anche settimanale o mensile, e che possono essere alimentati a batteria, quindi non prони a ricevere o trasmettere ad alte potenze.

La tecnologia che soddisfa i bisogni sopra citati di potenze poco ingenti, buona copertura e scalabilità di rete prende il nome di Low Power Wide Area Network, LPWAN, ed è quella che verrà utilizzata per gli scopi dell'elaborato.

L'obiettivo di questa trattazione è testare le prestazioni nella trasmissione dei nodi LoRa a brevi distanze in ambienti indoor. In un primo momento sono state effettuate misure con un solo dispositivo, per valutare la percentuale di perdita di pacchetti su una discreta quantità di trasmissioni e la perdita di potenza del canale durante queste. Successivamente sono state eseguite misure utilizzando i due nodi in contemporanea, in maniera che uno dei due svolgesse il compito di interferente sull'altro. La registrazione di queste trasmissioni è stata fatta con lo scopo di valutare l'interferenza sulla comunicazione, impostando parametri identici su entrambi i dispositivi eccetto che per la potenza trasmessa, e verificare l'aderenza del funzionamento reale a quanto riportato in alcuni documenti, in particolare in [4]. Le misure sono state rilevate sviluppando due applicazioni java e poi manipolate.

Nel capitolo 2 vengono confrontate le caratteristiche principali dei dispositivi che fanno utilizzo di tecnologie IoT LoRaWAN. Viene inoltre analizzata in dettaglio la tecnologia LoRa, utilizzata nelle acquisizioni, facendo riferimento alle specifiche più recenti. Si descrivono infine in generale le infrastrutture su cui si basa la comunicazione tra i dispositivi LoRa e pertanto elencate le proprietà riguardanti le frequenze di lavoro, il livello fisico, il livello MAC e quello applicativo.

Nel Capitolo 3 sono esposte nel dettaglio le caratteristiche della tecnologia a

disposizione, secondo le proprie specifiche. Viene descritto come sono stati preparati i dispositivi e come impostare i parametri necessari per iniziare le trasmissioni.

Nel Capitolo 4 viene descritto con precisione come si sono svolte le diverse trasmissioni. La trattazione dei risultati viene divisa in misure fatte con un solo dispositivo e misure in presenza di interferente. In questo ultimo caso si analizza anche la comunicazione effettuata con diversi valori di potenza trasmessa. Si discutono quindi i risultati ricavati dai dati ricevuti durante le misure.

Nel Capitolo conclusivo vengono esposte le considerazioni fatte in luce delle misure ottenute e discussi possibili sviluppi futuri per questo genere di studio.

Capitolo 2

La Tecnologia LoRa

Si è già brevemente introdotto che cosa sono gli LPWAN, anche chiamati LoRaWAN, ossia Long Range Wide Area Networks; ora è bene fare luce sulla basilare differenza tra questi e le tecnologie utilizzate dagli utenti per connettersi tra loro.

Il fulcro del progetto è stato spostato dal “connettere le persone” al “connettere le cose” [4]. E’ quindi interessante considerare il motivo per cui è stato scelto di rivoluzionare la tecnologia a partire proprio dal Livello Fisico (Physical Layer o PHY) e dal Livello MAC (Medium Access Control).

Sono stati svolti esperimenti in cui si è tentato di adattare i prodotti LPWAN alla linea 4G LTE ma, oltre ai problemi riguardanti la copertura di rete e il consumo di energia, è risultato che le difficoltà maggiori di questo tipo di collegamento sono a livello di MAC. Più nello specifico, se si unissero i due tipi di utilizzo della rete, il RACH (Random Access Channel), utilizzato per l’accesso competitivo degli utenti della telefonia cellulare, sarebbe invaso da un numero estremo di dispositivi: questi affollerebbero il server di richieste producendo come risultato una difficile gestione della rete e dei possibili disservizi [4]. Inoltre è utile aggiungere che le bande di frequenza usate per le trasmissioni cellulari sono molto costose, limitate e necessitano di licenza [19]. Per questi motivi è stato pensato che la maniera più efficiente per sviluppare i dispositivi LoRaWAN sia quella di tenere separati i canali di accesso di utenti cellulari e dispositivi LPWAN. Ciò viene realizzato creando una rete separata: questa comporta costi aggiuntivi, che però vengono bilanciati dal guadagno che un livello fisico dedicato può portare agli oggetti utilizzati. L’obiettivo è quindi quello di realizzare congiuntamente un livello fisico e un protocollo MAC in grado di gestire una grande densità di oggetti

che: trasmettono in maniera intermittente, hanno una ridotta quantità di informazioni ulteriori al dato, una copertura di rete estesa e una richiesta di energia minima [4]. Gli oggetti, protagonisti della comunicazione, vengono denominati ED, End Devices, mentre i gateway sono chiamati BS, Base Stations. La comunicazione tra ED e BS si svolge in due modi:

- Messaggi in Uplink. Gli ED iniziano una trasmissione verso una o più BS, e questa, una volta ricevuto il dato, lo inoltra al server a cui è collegata.
- Messaggi in Downlink. Presenti in quasi tutte le tecnologie LoRaWAN, i Downlink sono i messaggi in cui il server inizia una trasmissione verso una stazione base e questa lo inoltra ad uno specifico ED; spesso questo tipo di messaggi ha la funzione di risposta da parte del server successivamente ad una trasmissione in Uplink andata a buon fine, ma esistono anche tecnologie che integrano questa possibilità con quella di programmare messaggi in Downlink indipendenti da Uplink.

Ogni nodo manda il messaggio in Uplink a tutti i gateway nel suo raggio di trasmissione in modalità broadcast, mentre ogni gateway, se ha la possibilità di eseguire un Downlink, risponde solo al nodo che si è messo in contatto con esso. Di seguito si illustrerà sommariamente come le maggiori aziende che stanno investendo nello sviluppo della tecnologia LoRaWAN hanno deciso di realizzare i loro prodotti, e quali sono le differenze tra questi.

2.1 I Dispositivi LoRaWAN

Come già esposto in precedenza, lo scopo dei dispositivi LoRaWAN è quello di mettere in connessione il maggior numero possibile di dispositivi, a grandi distanze, con il minor numero di gateway. Per realizzare ciò alcune aziende hanno sviluppato delle tecnologie con diverse caratteristiche: diverse larghezze di banda, frequenze di trasmissione, modulazioni nel livello fisico e protocolli MAC. Caratteristica comune a tutti i prodotti di ogni marca è la struttura: essa è quella a “stella di stelle”, come si può vedere dalla Figura 2.1, e fa in modo che ogni End Device, ossia ogni singolo oggetto, si connetta ad uno o più gateway, ed ogni gateway si connetta a sua volta con struttura a stella ad un server via ethernet, quindi tramite un indirizzo IP. I prodotti presi in esame sono quelli della Sigfox, Semtech, Weightless, NB-IoT e Ingenu.

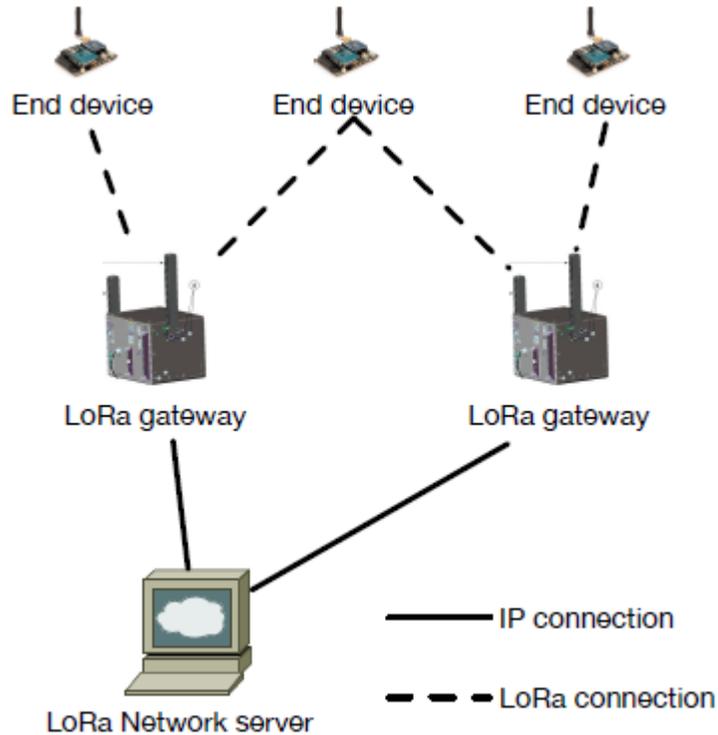


Figura 2.1: Architettura di una rete LoRa [1]

2.1.1 Sigfox

Questa azienda francese ha deciso di creare un Livello Fisico di tipo UNB, Ultra Narrow Band, quindi banda ultra stretta; questa viene determinata tale quando l'incertezza della frequenza è maggiore della larghezza della banda. Il PHY UNB usato nella rete Sigfox è semplice: vettori di dati binari vengono inviati in modalità broadcast con una modulazione BPSK, Binary Phase Shift Keying, ad una bit rate, velocità di trasmissione di bit, molto bassa, $R_b = 100$ bps. Il segnale trasmesso occupa quindi una banda di circa 100Hz. La novità interessante risiede nel fatto che possono essere eseguite diverse trasmissioni a frequenze nominali scelte in una banda molto più larga; la larghezza di banda utilizzata è tipicamente 192kHz nella banda ISM degli 868 MHz in Europa, e rispettivamente 915 MHz in America. E' noto che i segnali a banda stretta soffrono spesso di "flat fading", affievolimento dovuto alla ricezione di repliche di segnale, sfasate nel tempo, originate dai diversi percorsi

che può aver intrapreso il segnale nella sua propagazione. Per questo motivo nei dispositivi Sigfox è presente il supporto al Frequency Hopping, ossia ai salti di frequenza, per incrementare l'affidabilità della comunicazione. Un parametro molto importante da considerare è la precisione dell'oscillatore, che a causa della strettezza della banda, deve essere piuttosto elevata. Per quanto riguarda il livello MAC della tecnologia Sigfox, in associazione con il livello fisico UNB è presente l' RFTDMA, Random Frequency and Time Division Multiple Access, che corrisponde ad un protocollo basato sull'ALOHA, senza informazione preliminare sull'occupazione o meno del canale che si vuole utilizzare per la trasmissione. I benefici di questo protocollo sopprimono al bisogno di oscillatori precisi, quindi permettono un costo minore dei componenti per realizzare il dispositivo. Tuttavia, l'accesso non controllato al mezzo di propagazione, porta a interferenze o collisioni di messaggi durante le trasmissioni simultanee dei dispositivi. Il caso peggiore si verifica quando si tenta di mettere in comunicazione due ED alla stessa distanza dalla stazione base, il gateway: in questo caso si verifica la perdita del messaggio. Per aumentare l'affidabilità della tecnologia, ogni trasmissione può essere ripetuta fino a tre volte. Riguardo al consumo energetico, è consentito trasmettere ad un massimo di 14 dBm in Europa, e rispettivamente 21.7 dBm in America: pertanto, questo può essere tenuto molto basso e permette di avere una buona durata nei nodi alimentati a batteria [4]. Dalle specifiche fornite dalla Sigfox si evince che ogni stazione base può rilevare fino a un milione di oggetti connessi [11], e ha una copertura di rete che può arrivare a 63 km [4].

2.1.2 LoRa

I prodotti della Semtech denominati LoRa seguono la standardizzazione stipulata nella LoRa Alliance. Essendo questa la tecnologia utilizzata per gli scopi dell'elaborato, verranno descritti in maggiore dettaglio nel prossimo paragrafo. La comunicazione tra End Device e Gateway viene condotta attraverso diversi canali di frequenza e velocità di trasmissione [9]. I prodotti LoRa hanno alla base del loro livello fisico la modulazione CSS, Chirp Spread Spectrum, che a differenza della UNB fa uso di una banda più larga per corrispondere ai Data Rate considerati. Grazie alla modulazione CSS, l'incertezza degli oscillatori può arrivare fino a 40 ppm e quindi ciò permette di realizzare dispositivi poco costosi. Questo tipo di modulazione si basa sull'utilizzo dello spreading factor, parametro ottenuto tramite la continua

variazione della frequenza portante del segnale. Per una copiosa quantità di dispositivi connessi, viene utilizzato anche in questo caso il Frequency Hopping. Come nel caso Sigfox questa tecnologia usufruisce delle bande ISM delle diverse zone geografiche. Per quanto concerne il Livello MAC, si ispira al protocollo ALOHA puro, ossia senza slot temporali. Se l'ADR, Adaptive Data Rate, è attivo allora si sta utilizzando il LoRa MAC, che permette di controllare spreading factor, l'occupazione di banda, e la potenza trasmessa per ogni nodo, in modo da massimizzare la durata della batteria e la capacità di copertura di rete in generale. Anche in questo caso la massima potenza a cui si può trasmettere è sempre 14 dBm in Europa e 21,7 dBm in America, quindi la durata della batteria è molto buona [4].

2.1.3 Weightless

L'azienda Weightless ha in produzione tre tipi di dispositivo: Weightless-N, Weightless-P e Weightless-W. Ogni tipologia di oggetto è mirata ad un diverso tipo di utilizzo, perciò le differenze tra i dispositivi possono essere anche marcate, ma tutte rispettano le richieste base della tecnologia LoRaWAN.

- Weightless-N. Basato sulla tecnologia Narrow Band, utilizza la modulazione DBPSK, Differential Binary Phase Shift Keying. I data rate dichiarati vanno dai 30 ai 100 kbps e la banda in cui trasmettono è quella ISM degli 868 MHz. Come nei casi precedenti viene utilizzato il Frequency Hopping in modo da sopperire a eventuali interferenze e disturbi. In ambiente urbano, con numerosi ostacoli, la massima distanza di funzionamento è 5 km. Questo tipo di comunicazione non supporta la risposta dal gateway, pertanto il collegamento è solo in uplink.
- Weightless-P. Questi dispositivi supportano anche le risposte dalle stazioni base, i downlink, sincronizzando nel tempo le risposte. Il downlink permette una maggiore affidabilità nel trasporto dell'informazione, grazie ai protocolli di "acknowledgement", ossia i segnali di accettazione. Per questo tipo di prodotti viene eseguito un accesso multiplo in canali a banda stretta, 12.5 KHz, tramite le modulazioni FDMA (Frequency-Division Multiple Access) e TDMA (Time-Division Multiple Access). La distanza massima raggiunta per le trasmissioni è circa di 2 km.
- Weightless-W. L'ultimo modello sfrutta la banda degli spazi bianchi TV, che è quella dei 470-790 MHz, e utilizza le modulazioni 16-QAM

e DBPSK. E' presente anche qui la possibilità di comunicazione sia in uplink che in downlink e c'è una particolarità differente da tutte le altre: la trasmissione dalla stazione base avviene ad una potenza che è 20 dB più elevata di quella dell'End Device. Ciò è permesso dal canale dell'ED che trasmette in una frequenza con una larghezza di banda 64 volte più piccola di quella della BS (Base Station). Per supportare l'accoppiamento tra uplink e downlink viene utilizzato il Time Division Duplexing. La copertura in ambiente indoor arriva fino a 5 km, mentre quello outdoor fino a 10 km [4].

2.1.4 NB-IOT

La Narrow Band Internet of Things è stata creata dalla 3GPP in supporto dell'Internet of Things Cellulare (CIoT) in modo da essere una tecnologia composta da basse complessità e capacità di trasmissione. Essa è costruita sulle basi dello standard LTE, ma sono state rimosse diverse funzionalità in modo da rendere il suo standard il più semplice possibile e da ridurre sia i costi del dispositivo sia il consumo di batteria. Questa tecnologia opera sulle stesse frequenze con licenza della LTE e utilizza la modulazione QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) [3]. I dispositivi NB-IoT lavorano su una larghezza di banda di circa 180kHz, che è l'ampiezza di un PRB (Physical Resource Block) secondo quanto riportato dallo standard 3GPP, e può venire divisa in 12 (come per la tecnologia LTE) o 48 canali, rispettivamente di ampiezza 15kHz e 3,75kHz l'uno [12]. Questi dispositivi sono in grado di inviare sia messaggi in Uplink che in Downlink [3]. Gli End Device prendono il nome di UE, ossia User Equipment, mentre le stazioni base quello di eNB, evolved Node B. La maggior parte delle risorse radio in Uplink di questa tecnologia vengono utilizzate dalla NPUSCH (Narrow Band Uplink Shared Channel), dove gli UE possono inviare liberamente messaggi senza interferenze degli altri utenti grazie alla programmazione delle trasmissioni. La rimanente parte del piano tempo-frequenza è dedicata al NPRACH (Narrowband Physical Random Access Channel) usato per effettuare la procedura di accesso casuale. Quando l'applicazione necessita di inviare un pacchetto alla rete viene trasmesso un preambolo per informare l' eNB dell'intenzione di iniziare la comunicazione, poi viene eseguito un processo di handshake che permette all' UE di avere un indirizzo temporaneo. In questa procedura c'è il rischio di collisione tra i vari preamboli inviati alla stazione base e solo uno dei preamboli inviati ha la trasmissione garantita [12].

2.1.5 RPMA

L'ultimo prodotto è stato inizialmente sviluppato dalla On-Ramp Wireless, poi rinominata Ingenu. I dispositivi RPMA, Random Phase Multiple Access, sono basati sulla modulazione DSSS, Direct-Sequence Spread Spectrum, che è quella su cui pone fondamento la CSS, e la banda di trasmissione è la ISM dei 2.4 GHz. Prima di essere trasmesso da ogni nodo, il segnale passa attraverso diversi tipi di modulazioni, e lo stesso avviene quando viene ricevuto, attraversando tre blocchi di demodulazione, in modo da adattare i data rate alle condizioni di propagazione. La precisione degli oscillatori in questo caso è fino alle 10 ppm. Ingenu dichiara che un gateway è capace di creare una copertura di rete per 1000 dispositivi, con una distanza che raggiunge dalla stazione base dai 2 ai 10 km [4]. Di seguito è presente una tabella che mostra un confronto tra le tecnologie appena descritte.

Come è rappresentato dalla Tabella 2.1, quasi tutti i prodotti illustrati lavorano nelle bande di frequenza ISM sotto il GHz: le uniche a non far parte di questo gruppo sono la RDMA, che utilizza la ISM dei 2.4GHz, la Wightless-W che usa gli spazi bianchi delle frequenze TV e la NB-IoT, che utilizza la banda di frequenze dedicata alla tecnologia LTE. Tutti supportano la risposta da parte delle BS, tranne i dispositivi Wightless-N. Altra differenza che si può osservare è quella della scelta del Livello fisico e della sua modulazione: i dispositivi LoRa, Wightless-W e RPMA fanno utilizzo dello spreading factor, mentre le altre tecnologie utilizzano bande strette o ultrastrette.

	Sigfox	Lora TM	Weightless			Ingenu	3GPP
				N	P	W	
Banda ISM	868/915 MHz Sì	868/915 MHz Sì	Sub-GHz Sì	Sub-GHz Sì	470-790 MHz No	LTE No	2,4 GHz Sì
Livello Fisico	UNB	CSS	NB	NB	DSSS	QPSK	RPMA
Spreading Factor	NA	2^7-2^{12}	NA	NA	$1-2^{10}$	NA	2^4-2^{13}
Larghezza di banda del canale tipica	192 kHz	500-125 kHz	ND	12,5 kHz	6-8 MHz	180 kHz	1 MHz
Raw data rate (kbps)	0,1	27-0,37	30-100	0,2-100	1-10000	50 [3]	0,06-30
Range (km)	63	22	5	2	10	35 [20]	10-2
Downlink	Sì	Sì	No	Sì	Sì	Sì	Sì

Tabella 2.1: Confronto tra le tecnologie descritte, da [4]. (NA = Non Applicabile; ND = informazione Non Disponibile)

2.2 Lo Standard LoRa

Per raggiungere gli scopi di questa tesi sono stati utilizzati due nodi RN2483 e un gateway della tecnologia LoRa, sviluppata da Semtech e venduta da Microchip. In precedenza è già stato accennato che lo standard LoRa rispetta le specifiche del documento della LoRa Alliance. Ora verrà spiegato in dettaglio come funzionano e come sono fatti questi dispositivi seguendo la struttura fornita dalla Figura 2.2.

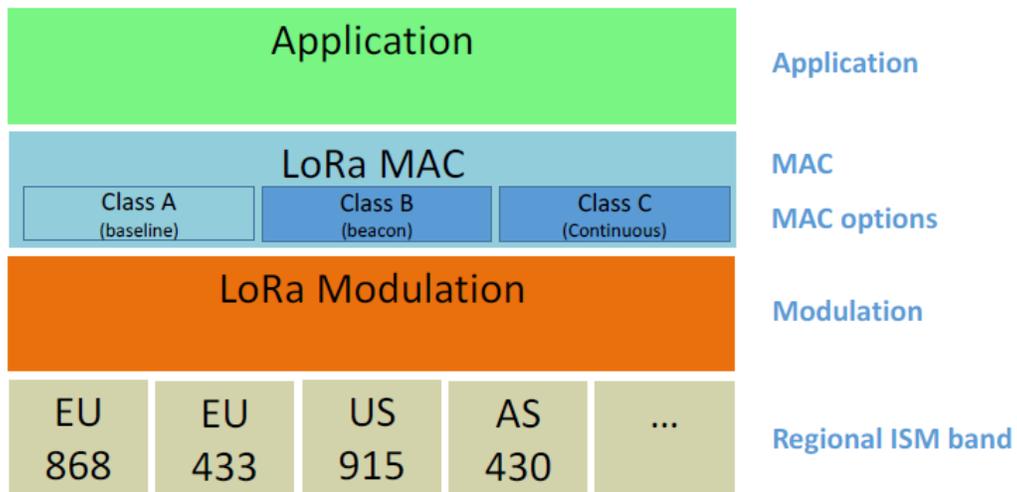


Figura 2.2: Struttura dei diversi livelli dei nodi LoRa [9]

2.2.1 Le diverse bande di frequenza ISM

Come già detto in precedenza, uno dei punti di forza delle tecnologie LoRa-WAN è che lavorano nelle bande gratuite ISM. Per ogni zona geografica è noto che ci sono bande di frequenze ISM diverse, come rappresentato dall'ultima riga della Figura 2.2. Per la zona Europea vengono utilizzate le frequenze dalla 863 alla 870 MHz, possono essere utilizzati due tipi di modulazione, LoRa e GFSK. I cosiddetti canali, ossia le larghezze di banda utilizzate per le comunicazioni, possono essere scelti liberamente dagli utenti però in questa zona geografica è obbligatorio avere implementati su ogni End Device 3 canali con larghezza di banda 125 kHz quando si utilizza la modulazione

LoRa: 868.1 MHz, 868.3 MHz e 868.5 MHz. Inoltre il Duty Cycle totale per la trasmissione dei canali deve essere minore dell'1% [8]. Infine la massima potenza trasmessa dai nodi è 14 dBm. Le regolamentazioni per l'uso delle bande ISM cambiano per ogni area geografica. Per esempio, per quanto riguarda la zona degli Stati Uniti: si lavora nelle frequenze dei 902-928 MHz, la modulazione è solo quella LoRa, vi è una divisione delle frequenze in 72 canali per i messaggi in Uplink e in 8 per quelli in Downlink e infine la massima potenza trasmessa è di 21 dBm. Nella Tabella 2.2 vengono riportate le bande ISM per tutte le zone geografiche riportate nella specifica [8].

Europa		Stati Uniti	Cina		Korea del Sud	India	Altri Paesi Asiatici*	Australia
863-870 Mhz	433 Mhz	902-928 Mhz	470-510 Mhz	779-787 Mhz	920-923 Mhz	865-867 Mhz	923 Mhz	915-92 Mhz

Tabella 2.2: Bande di frequenze ISM delle varie zone geografiche. [8]

* = la banda ISM assegnata alla zona asiatica viene denominata AS923MHz e vengono poi divise tra i diversi paesi le varie larghezze di banda.[8]

2.2.2 La modulazione LoRa

Il Livello Fisico di questa tecnologia è composto dalla modulazione LoRa, sviluppato dalla LoRa Alliance, e si ispira alla CSS (Chirp Spread Spectrum), basata a sua volta sulla DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum).

La modulazione DSSS

I segnali con cui ci si ritrova a lavorare sono molto deboli, pertanto il Rapporto Segnale Rumore risulta spesso negativo.

La Direct Sequence Spread Spectrum, sfruttando la larghezza di banda per recuperare informazioni da segnali debolissimi, è molto adatta per questo tipo di comunicazione perché è in grado di aumentare il raggio di azione delle reti di comunicazione, al costo però di una minore velocità di trasmissione (anche chiamata Data Rate) [4]. Nei sistemi DSSS, la fase portante del trasmettitore cambia in corrispondenza di una sequenza di simboli codificata. Questo processo si ottiene di norma moltiplicando il segnale che porta le informazioni volute con un codice di “diffusione”, o Spreading, anche conosciuto appunto

come Sequenza di Chip [2].

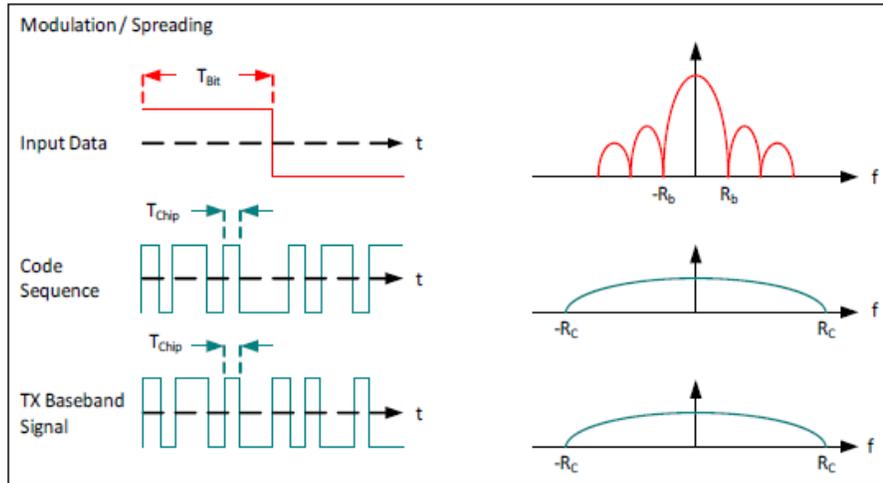


Figura 2.3: Modulazione e processo di Spreading [2]

Come mostrato nella Figura 2.3, la durata di ogni bit del segnale informativo che si vuole inviare viene divisa per SF piccoli chip, con SF Fattore di Diffusione, o spreading factor [4]. Quindi la sequenza di chip ha una frequenza maggiore del segnale iniziato e si amplia la larghezza di banda del segnale originaria. Vengono chiamati chip i “bit” di codice più corti per distinguerli dai bit non codificati contenuti nel segnale da inviare [2]. La sequenza di chip usata dal trasmettitore è nota al ricevitore [4], perciò quando viene ricevuto il segnale, questo viene ri-moltiplicato per la sequenza iniziale e quindi la sua larghezza di banda risulta compressa fino a raggiungere l’ampiezza iniziale [2] (Figura 2.4).

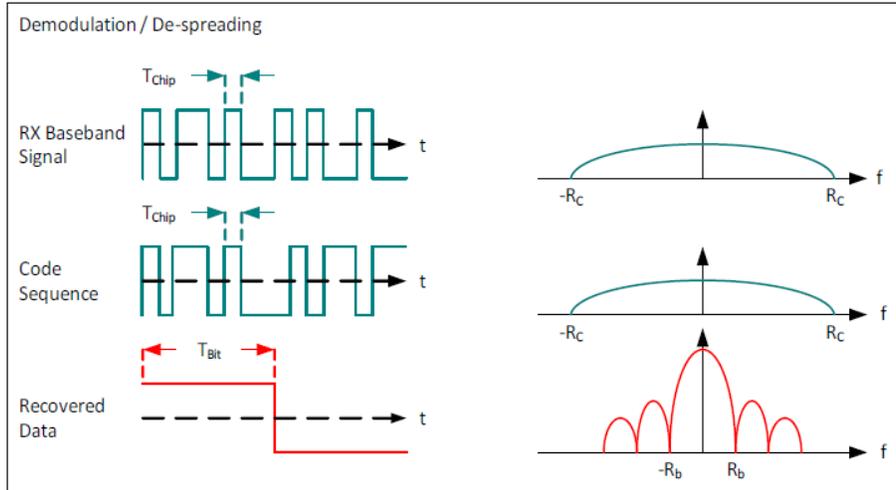


Figura 2.4: Demodulazione [2]

Matematicamente, più è lungo il codice di spreading (la sequenza di chip), maggiore sarà il tempo richiesto dal ricevitore per fare una correlazione lungo l'intera stringa della sequenza di codice. Questo può rappresentare un problema in apparecchi a bassa potenza che non possono essere “always-on” e che quindi necessitano di ripetute e rapide sincronizzazioni per il breve tempo in cui sono accesi [2].

La LoRa Spread Spectrum

La modulazione LoRa ottiene lo spreading dello spettro generando un segnale chiamato Chirp che varia continuamente in frequenza. Un vantaggio di questo metodo è che gli offset di tempo e frequenza tra trasmettitore e ricevitore sono equivalenti, riducendo quindi considerevolmente le difficoltà nella realizzazione del ricevitore. La larghezza di banda di questo Chirp è uguale alla larghezza di banda dello spettro del segnale. Il segnale da inviare viene quindi campionato attraverso la sequenza di chip e poi modulato in modo da diventare il segnale composto dai simboli chiamati Chirp [2].

La relazione tra la velocità di trasmissione dei bit, la velocità di trasmissione di simbolo e la velocità di trasmissione di chip viene espressa come:

$$R_b = SF \frac{1}{2^{SF}} \frac{1}{BW} \text{ bit/s} \quad (2.1)$$

dove:

SF (spreading factor) = 7...12

BW (modulation Band Width) = 125kHz, 250kHz, 500kHz

La Bit Rate, velocità di trasmissione di bit è definita come segue.

Dapprima si definisce il periodo di simbolo T_s :

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad \text{s} \quad (2.2)$$

Pertanto la symbol rate, velocità di trasmissione di simbolo, R_s , è il reciproco di T_s :

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{BW}{2^{SF}} \quad \text{symb/s} \quad (2.3)$$

Infine si definisce come chip rate, velocità di chip, R_C come:

$$R_C = R_s 2^{SF} \quad \text{chip/s} \quad (2.4)$$

La modulazione LoRa include anche una variabile di correzione di errore, chiamata Code Rate, che migliora la robustezza del segnale trasmesso, alle spese della ridondanza. Si definisce quindi la bit rate nominale del segnale che porta le informazioni come:

$$R_b = SF \frac{4}{\frac{4+CR}{2^{SF}} BW} \quad (2.5)$$

Dove:

SF = spreading factor (7...12)

CR = Code Rate (1...4)

BW = larghezza di banda della modulazione (Hz) [2]

Dato:

$$\text{Coding Rate} = \frac{4}{4 + CR} \quad (2.6)$$

Si può riscrivere la Bit Rate nominale, Velocità di Trasmissione di bit, come:

$$R_b = SF \frac{\text{Coding Rate}}{\frac{2^{SF}}{BW}} \quad \text{bit/s} \quad (2.7)$$

Queste equazioni vengono utilizzate per calcolare la bit rate dei messaggi in Uplink e Downlink distinguendoli a seconda dello spreading factor.

In sintesi, la modulazione LoRa avviene come quanto segue.

I bit del segnale da trasmettere vengono divisi in "parole" da SF bit. Ci sono 2^{SF} parole in codice, mappate sui 2^{SF} possibili offset. Viene utilizzata la codifica di Gray per ridurre la bit error rate, quando un simbolo è sbagliato. La chip rate rimane invariata e uguale a R_S , quindi a cambiare è la durata del Chirp, quando cambia lo spreading factor. Uno spreading factor alto corrisponde ad un lungo Chirp. In particolare, i nodi ai confini della copertura di rete del gateway utilizzano alti SF, mentre per dispositivi vicini si usano bassi SF[4].

2.2.3 Il livello MAC LoRa

Il Livello MAC implementato originariamente su ogni dispositivo LoRa si basa sul protocollo ALOHA puro [12]. Questo protocollo funziona in modo tale che i dispositivi che devono inviare pacchetti possono mandarli a tutte le stazioni in ascolto, in qualsiasi momento sia disponibile il dato da inviare; è quindi una comunicazione di tipo broadcast. Quando un messaggio viene ricevuto dalla stazione ricevente questa manda un messaggio di acknowledgement che conferma la ricezione del pacchetto; se due messaggi vengono inviati nello stesso canale nello stesso istante si verifica una collisione e, anche se i frame non si sovrappongono completamente, entrambi i messaggi vengono persi. Se si verifica questa evenienza, la stazione ricevente non invia alcun messaggio e quindi i dispositivi che hanno cercato di inviare un messaggio attendono un tempo casuale prima di tentare di inviare nuovamente il messaggio. La casualità del tempo atteso prima del re-invio è essenziale in questo tipo di comunicazione, poiché, se entrambi i pacchetti venissero inviati nuovamente nello stesso istante, ci sarebbe ancora una collisione e la conseguente perdita dei dati.

Sfruttando il protocollo ALOHA i nodi LoRa inviano quindi i messaggi in Uplink quando il dato è pronto per essere inviato. Partendo da questa base, Semtech ha sviluppato un protocollo più elaborato che garantisce più elasticità nella trasmissione.

Innanzitutto esistono tre tipi di dispositivi LoRa: tutti i nodi hanno implementata la classe A, mentre la B e la C sono estensioni applicabili o meno.

- La classe A supporta la comunicazione bi-direzionale, ma questa viene sempre inizializzata dagli End Device in maniera completamente asin-

crona. Dopo ogni trasmissione in Uplink, il nodo apre (almeno) due finestre di ricezione dopo un tempo fissato come in Figura 2.5, aspettando un qualsiasi messaggio o comando di ritorno dal server.[11]

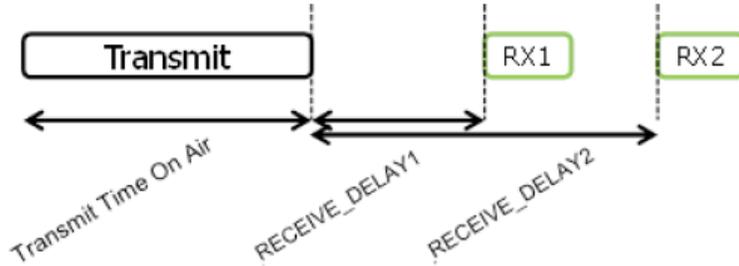


Figura 2.5: Trasmissione di messaggio in Uplink e finestre di ricezione [9]

Se il server non risponde in nessuna delle due finestre di ricezione, la successiva opportunità sarà dopo la successiva trasmissione in Uplink del dispositivo (situazione 1 della Figura 2.6. Il server può rispondere solo nella prima finestra (punto 2 della Figura 2.6) o nella seconda (situazione 3 nella Figura 2.6).

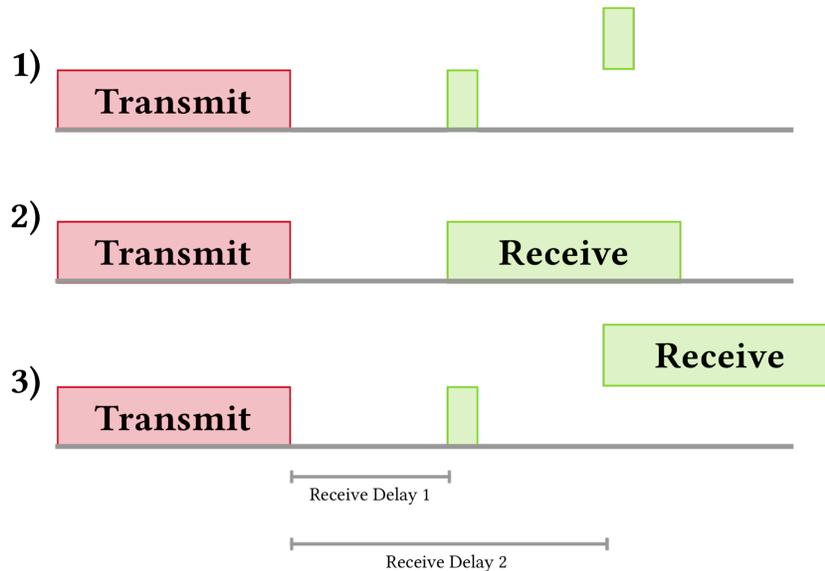


Figura 2.6: Finestre di ricezione del messaggio in Uplink [17]

- I dispositivi di classe B estendono le funzionalità della classe A implementando delle finestre di ricezione programmate per i messaggi di Downlink dal server. Utilizzando dei segnali temporizzati trasmessi dal gateway, i nodi aprono periodicamente delle finestre di ricezione, così si rende possibile un Downlink senza che in precedenza vengano inviati messaggi in Uplink.
- Infine i nodi di classe C estendono la classe automaticamente implementata tenendo una finestra di ricezione sempre aperta, a meno che non stiano trasmettendo. Questo permette una comunicazione con bassa latenza, ma va ad aumentare molto il consumo di energia rispetto ai dispositivi di classe A [9].

2.2.4 Il Livello di Applicazione

Per quanto riguarda il livello applicativo, la tecnologia LoRa fornisce diverse opzioni. Comprando i prodotti della Microchip è possibile scaricare dal sito, insieme ai manuali per l'utilizzo, l'interfaccia grafica utente, chiamata LoRa Development Utility, per poter controllare le comunicazioni. Una volta connessi via seriale nodi e gateway al computer in cui è installata l'interfaccia grafica, si possono gestire tutti i loro parametri e iniziare l'invio di messaggi in Uplink o Downlink (Figura 2.7).

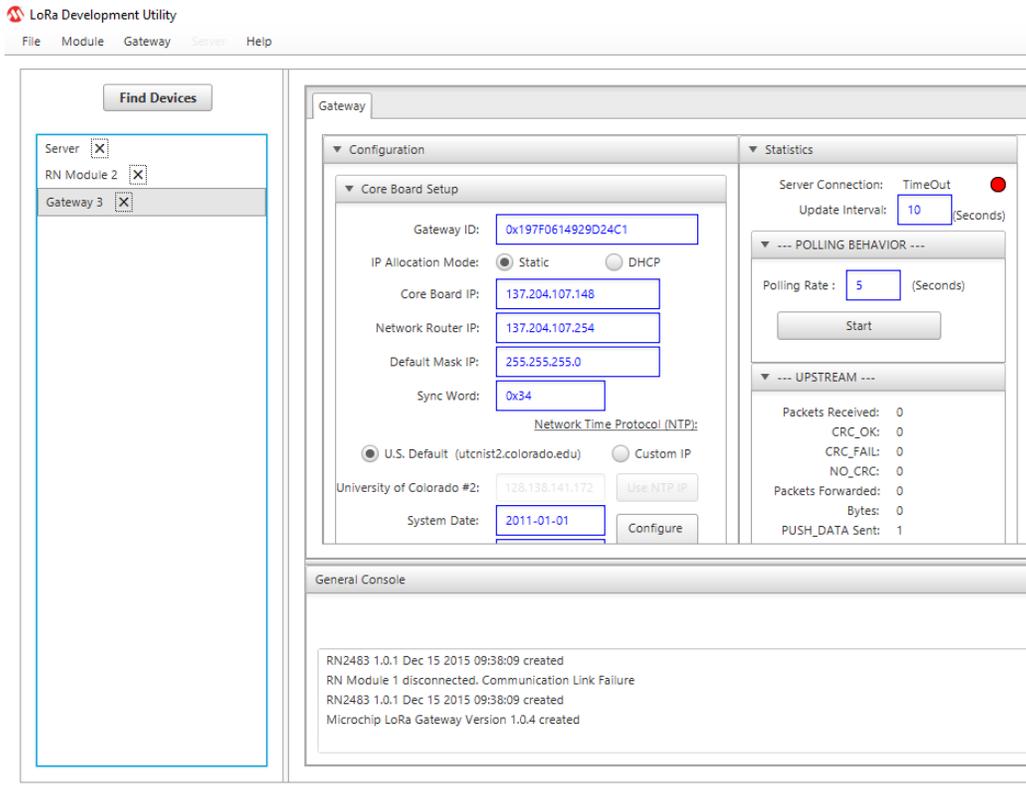


Figura 2.7: Schermata della LoRa Development Utility

Un'altra opzione è quella utilizzare i servizi offerti dal sito chiamato The Things Network (thethingsnetwork.org). Questo sito è interamente dedicato allo sviluppo della tecnologia LoRa e fornisce indicazioni e istruzioni su come utilizzare i nodi LoRa, anche implementando altre tecnologie come per esempio ARDUINO o aggiungendo integrazioni per esempio usando HTML. Uno dei maggiori servizi offerti da The Things Network è quello di fornire una guida su come sviluppare applicazioni su diverse piattaforme per poter controllare le comunicazioni tra gateway e nodi, facendo uso del server creato appositamente per i dispositivi LoRa. Per poter utilizzare queste piattaforme bisogna prima creare delle applicazioni su The Things Network, assegnarvi dei dispositivi e almeno un gateway. Una volta fatto ciò si utilizza uno dei software di sviluppo, da scegliere tra Go, Java, Node-RED e Node.js, e si crea un'applicazione che permette di connettersi al server di The Things Network tramite il Client Server.

In ogni caso, chiaramente, per poter far funzionare il gateway e quindi la ricezione e l'invio dei pacchetti, questo deve essere connesso ad internet e quindi ad un server. Dal punto di vista applicativo vi è un'altra differenza da sottolineare. Si può utilizzare il server sopra citato di The Things Network oppure creare un proprio server come spiegato nel manuale per l'utilizzo della LoRa Development Utility.

Capitolo 3

Il Kit di Sviluppo

Per eseguire le misure sono stati utilizzati due nodi LoRa RN 2483 (Figura 3.1) ed un gateway LoRa, composto da una LoRa Gateway Radio Board (Figura 3.2b), responsabile della ricezione e trasmissione dei messaggi, e un LoRa Gateway Core Board (Figura 3.2a), a cui vengono trasmessi i pacchetti ricevuti dalla Radio Board, poi inoltrati al server [6].

Per ottenere le misure sono stati utilizzati sia i servizi forniti da The Things Network sia l'interfaccia grafica messa a disposizione da Microchip. Come detto in precedenza per poter avviare la comunicazione è necessario che il gateway sia connesso ad un server. Per le misurazioni effettuate si è deciso di utilizzare il server di The Things Network. Per quanto riguarda il lato applicativo è stata sviluppata un'applicazione in Java usando un Client per connettere il pc in uso al server di The Things Network e vedere quanto ricevuto dal gateway.

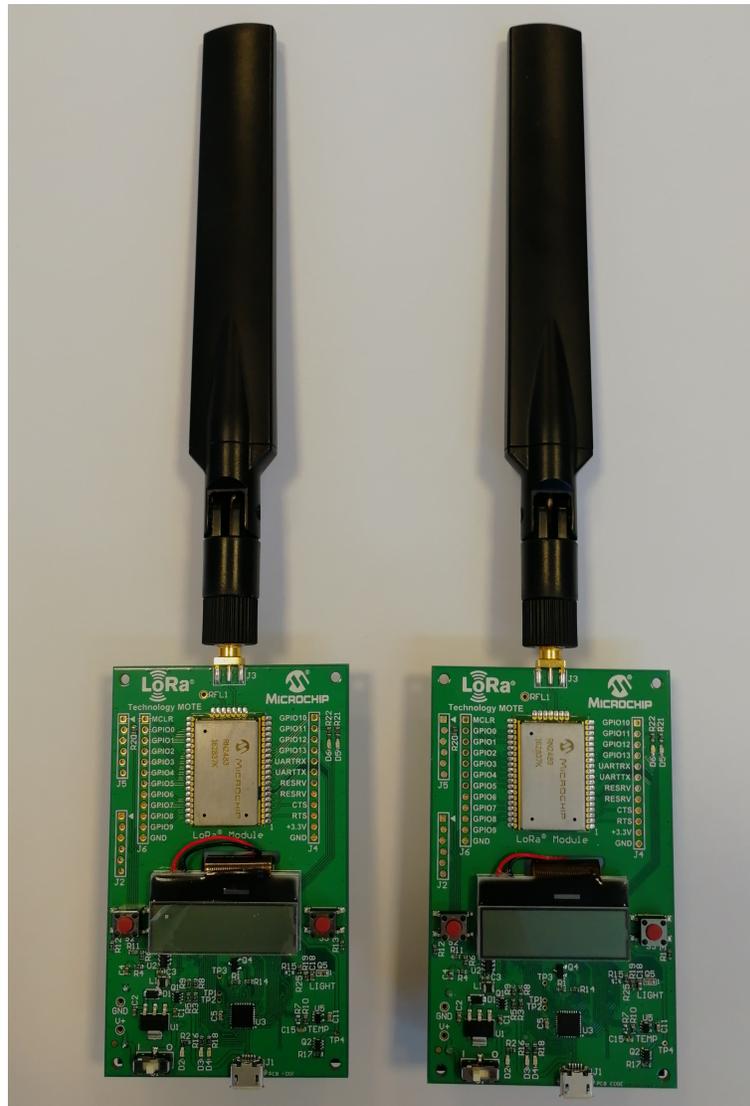


Figura 3.1: Foto dei due Nodi LoRa RN 2483 in dotazione



(a) LoRa Gateway Core Board



(b) LoRa Gateway Radio Board

Figura 3.2: Il Gateway LoRa utilizzato per le misure

3.1 Specifiche della Tecnologia utilizzata

Come illustrato in precedenza ogni zona geografica presenta diverse specifiche; quelle utilizzate per le misurazioni effettuate in questa tesi fanno riferimento alle frequenze ISM 863-870 MHz Europee. I prodotti rispettano le specifiche fornite da Semtech nel 2015 pertanto i valori dei diversi parametri sono stati presi da quel manuale invece che da quello più recente [7]. Per gli scopi di questa tesi sono stati inviati solo messaggi di tipo Uplink, con un header composto da 13 byte: i messaggi saranno formati come nella Tabella 3.1. In essa la sezione Preamble rappresenta i simboli occupati dal preambolo, che è obbligatorio in ogni messaggio in Uplink, e del cui valore si parlerà successivamente.

Preamble	Header	PHYPayload
nPreamble symbols	13 byte	0... M byte

Tabella 3.1: Formato del messaggio in Uplink [7]

La variabile M rappresenta il massimo numero di bit di cui può essere composto il payload; essa cambia a seconda del data rate, come mostrato nella Tabella 3.2.

Data Rate	M
0	59B
1	59B
2	59B
3	123B
4	230B
5	230B
6	230B

Tabella 3.2: Grandezza massima del payload [7]

Nella Tabella 3.3 sono riportate le corrispondenze tra i diversi spreading factor, le larghezze di banda a cui lavorano, l'indice della velocità di trasmissione e la velocità di trasmissione di bit. Per trovare la velocità di trasmissione di bit si utilizza l'equazione (2.5), considerando una Code Rate = 1, quindi una Coding Rate = 4/5, SF da 7 a 12 e una larghezza di banda pari a 125 kHz. Si avrà quindi:

$$R_b = SF \frac{\text{Coding Rate}}{\frac{2^{SF}}{BW}} = \frac{SF \text{ Coding Rate } BW}{2^{SF}} = \frac{SF \frac{4}{5} 125000}{2^{SF}} \quad (3.1)$$

Pertanto:

$$R_b_{SF7} = \frac{7 \frac{4}{5} 125000}{2^7} = 5468,75 \text{ bit/s} \quad (3.2)$$

$$R_b_{SF8} = \frac{8 \frac{4}{5} 125000}{2^8} = 3125 \text{ bit/s} \quad (3.3)$$

$$R_b_{SF9} = \frac{9 \frac{4}{5} 125000}{2^9} = 1757,81 \text{ bit/s} \quad (3.4)$$

$$R_b_{SF10} = \frac{10 \frac{4}{5} 125000}{2^{10}} = 976,56 \text{ bit/s} \quad (3.5)$$

$$R_b_{SF11} = \frac{11 \frac{4}{5} 125000}{2^{11}} = 537,11 \text{ bit/s} \quad (3.6)$$

$$R_b_{SF12} = \frac{12 \frac{4}{5} 125000}{2^{12}} = 292,97 \text{ bit/s} \quad (3.7)$$

SF	Larghezza di Banda	Data Rate	Bit Rate
7	125 kHz	5	5468,75 bit/s
8	125 kHz	4	3125 bit/s
9	125 kHz	3	1757,81 bit/s
10	125 kHz	2	976,56 bit/s
11	125 kHz	1	537,11 bit/s
12	125 kHz	0	292,97 bit/s

Tabella 3.3: Corrispondenze tra SF, Bande, Data Rate [7] e Bit Rate

Nei nodi utilizzati sono automaticamente abilitati i primi 3 canali di trasmissione: ad ogni canale corrisponde una frequenza portante ed un Duty Cycle, come mostrato nella Tabella 3.4. In precedenza è stato spiegato che le larghezze di banda vengono divise in canali per consentire ad un numero maggiore di dispositivi di comunicare con il gateway con un numero ridotto di interferenze. Date le condizioni iniziali riportate, una volta iniziata la comunicazione in Uplink, i messaggi verranno inviati su uno dei tre canali in maniera casuale. Per rispettare le regolamentazioni date dalla LoRa Alliance, ogni canale avrà un Duty Cycle dello 0,33% poichè la somma dei Duty Cycle dei canali attivi deve essere $\leq 1\%$.

Canale	Frequenza portante	Duty Cycle
0	864,10MHz	0,33%
1	864,30MHz	0,33%
2	864,50MHz	0,33%

Tabella 3.4: Corrispondenze tra canali, frequenze portanti e Duty Cycle [7]

Un altro parametro essenziale per le misure che sono state eseguite è il tempo di trasmissione, o ToA (Time on Air), poichè da esso e dal duty cycle dipende la frequenza con cui si possono inviare messaggi. Per calcolare il ToA si procede utilizzando le equazioni presenti in [21].

Prima di tutto si ricava il tempo di simbolo T_s dall'equazione (2.2).

Viene calcolato il tempo per la trasmissione del preambolo (presente nel formato del messaggio trasmesso nella Tabella 3.1):

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4, 25) T_s \quad (3.8)$$

dove $n_{preamble}$ è il numero di simboli di preambolo programmati.

Il numero di simboli di cui sono composti payload e header è dato da:

$$payloadsymb = 8 + max \left(\left\lfloor \frac{8 (M + 13) - 4 SF + 28 + 16 - 20 H}{4 (SF - 2 DE)} (CR + 4) \right\rfloor, 0 \right) \quad (3.9)$$

Dove:

- M = numero dei byte di cui è composto il payload;
- SF = Spreading Factor;

- $H = 0$ quando l'header è abilitato e 1 quando è disabilitato;
- $DE = 1$ quando l'ottimizzatore per bassi data rate è attivato e 0 quando è disabilitato;
- $CR =$ Code Rate.

L'header qui considerato è attivo e di 13 byte, quindi $H = 0$; $DE = 0$, in quanto l'ottimizzazione non è attiva; il Code Rate è 1. Pertanto l'equazione si può sviluppare come segue:

$$payloadsymb = 8 + max \left(\left\lfloor 5 \frac{8 (M + 13) - 4 SF + 44}{4 SF} \right\rfloor, 0 \right) \quad (3.10)$$

Il tempo di trasmissione di payload e header è:

$$T_{payload} = payloadsymb T_s \quad (3.11)$$

In conclusione il tempo di trasmissione del pacchetto totale comprensivo di preambolo, payload e header è:

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload} = ToA \quad (3.12)$$

Una volta che si è a conoscenza del tempo di trasmissione dei pacchetti si può calcolare il tempo di attesa, TtW (Time to Wait), ossia l'intervallo di tempo che è necessario aspettare tra una trasmissione e l'altra per rispettare il Duty Cycle. Risulta [7]

$$TtW = \frac{ToA}{DC_{canale}} - ToA \quad (3.13)$$

dove DC_{canale} è il Duty Cycle del canale considerato.

Se non si rispetta il TtW si riceve un messaggio dall'applicazione, `no_free_channel`, che significa che non è presente nessun canale libero in grado di inviare il messaggio.

Per eseguire le misure scopo di questa tesi andranno preparati tutti i parametri appena descritti e fatte le dovute impostazioni sui dispositivi, come verrà ora spiegato.

3.2 Impostazioni Applicazione su The Things Network

Per poter utilizzare il server di The Things Network è necessario creare un'applicazione, come spiegato sul sito stesso, e registrare i propri dispositivi. Solo una volta fatto ciò è possibile comunicare con i dispositivi e connettere il gateway alla rete. Per creare una nuova applicazione è sufficiente scegliere un nome identificativo, dare una descrizione scritta sull'utilizzo dell'app e inserire la sigla della regione in cui ci si trova. Per le misure effettuate è stato scelto come ID "eleonoralandiniabp", descrivendola come applicazione per la trasmissione di messaggi ABP in uplink e come regione "eu", che è la sigla identificativa per l'Europa (Figura 3.3).

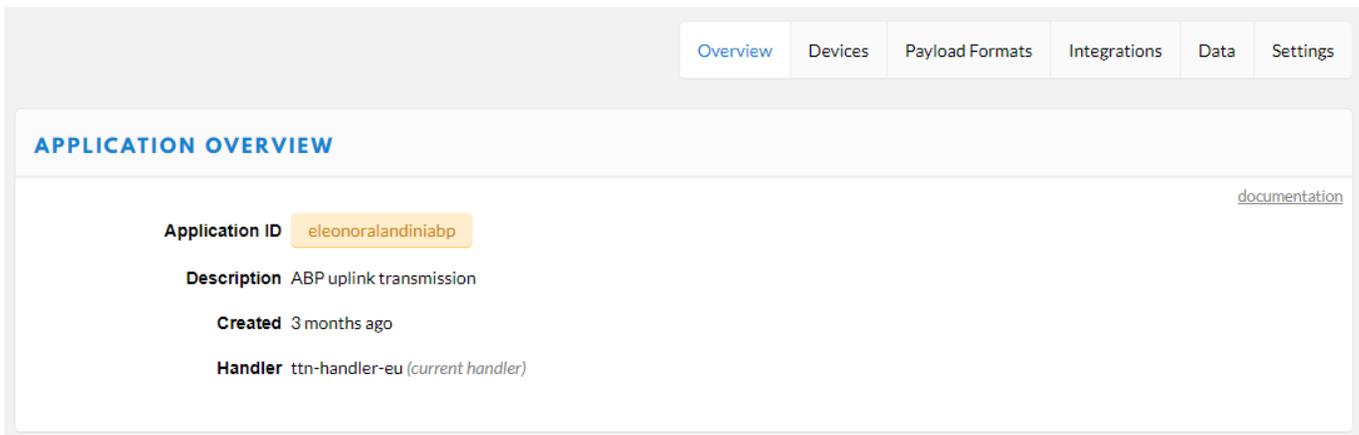


Figura 3.3: Interfaccia dell'applicazione sul sito The Things Network. In alto a destra sono presenti le varie opzioni con cui si può modificare l'applicazione o controllare il flusso dei messaggi sulla stessa [13].

Una volta fatto ciò sono stati registrati i due nodi in dotazione, sempre seguendo le istruzioni sul sito di The Things Network. I nodi vengono automaticamente registrati come OTAA, per cui una volta scelto un ID per ogni nodo è necessario andare a modificare nelle impostazioni il tipo di autenticazione. La differenza tra i due tipi di comunicazione verrà spiegata nella sezione dedicata alle impostazioni sui nodi.

3.3 Impostazioni del Gateway

Per eseguire le impostazioni sul gateway in dotazione è stata utilizzata la LoRa Development Utility; sono stati impostati l'indirizzo IP fisso del server di The Things Network, il Core Board IP, Network Router IP e il Default Mask IP, Figura 3.4. Core Board IP e Network Router IP sono due IP forniti dal polo universitario e sono stati occultati per motivi di sicurezza. Il gateway è stato registrato sul sito The Things Network con l'ID 0xAD4BAD4BAD4BAD4B e dallo stesso sito è possibile verificare la ricezione e l'invio dei pacchetti controllando il traffico dati del gateway. Per iniziare la comunicazione, è stato connesso al cavo ethernet con IP fisso fornito dal polo universitario e alimentato tramite un cavo con presa micro USB collegato ad un caricabatterie da cellulare. Il dispositivo è stato poi posto ad un lato della stanza ad un'altezza di circa 1,5 metri. Una volta acceso, questo si connette ad internet tramite l'indirizzo IP; si può controllare che sia effettivamente online sul sito The Things Network oppure direttamente nello schermo presente sul gateway stesso.

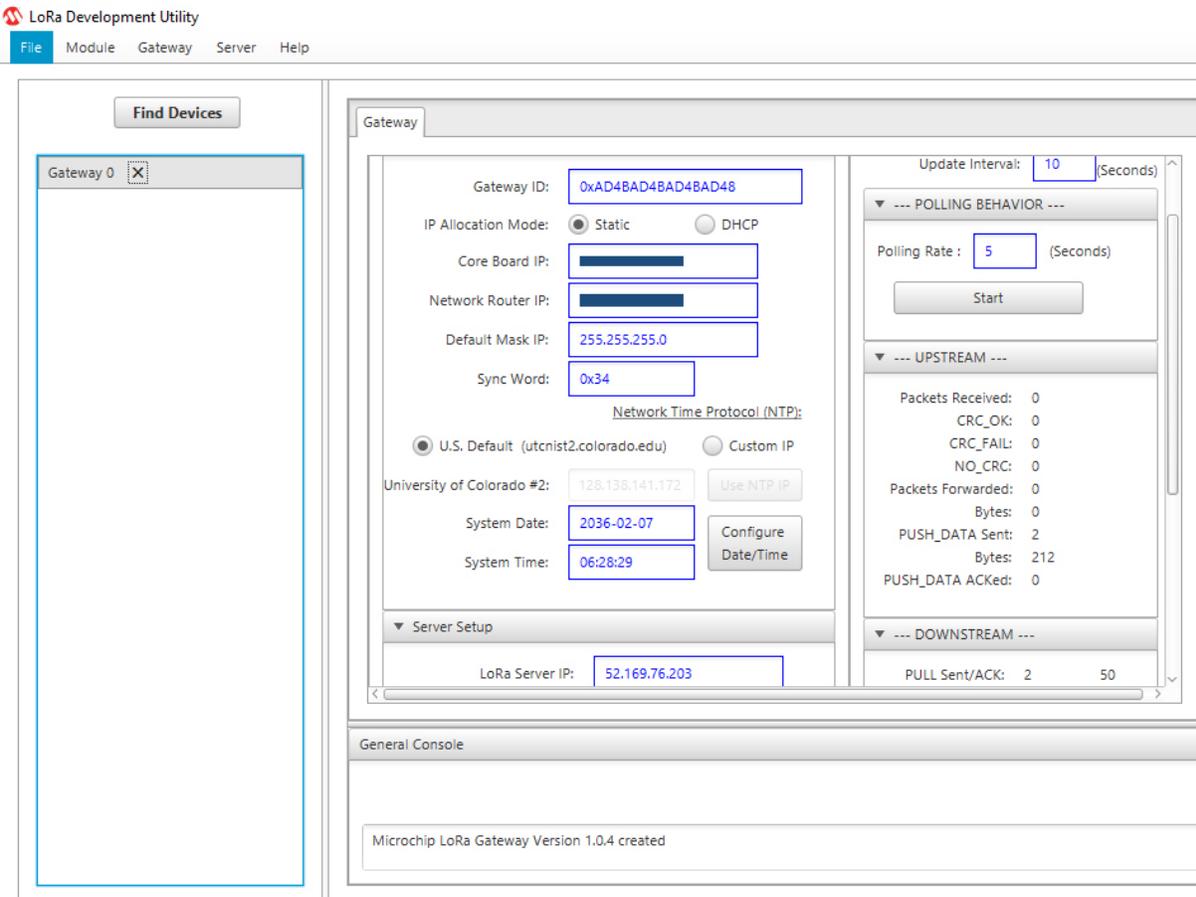


Figura 3.4: Panoramica della LoRa Development Utility per la parte riguardante il gateway

3.4 Impostazioni dei Nodi

L'impostazione dei nodi avviene sia utilizzando la LoRa Development Utility sia utilizzando il codice Java che gestisce i nodi, il tutto via seriale. La prima cosa da fare è collegare i nodi al computer utilizzato e aprire la LoRa Development Utility come nella schermata in Figura 3.5 (i parametri sono stati occultati per motivi di sicurezza).

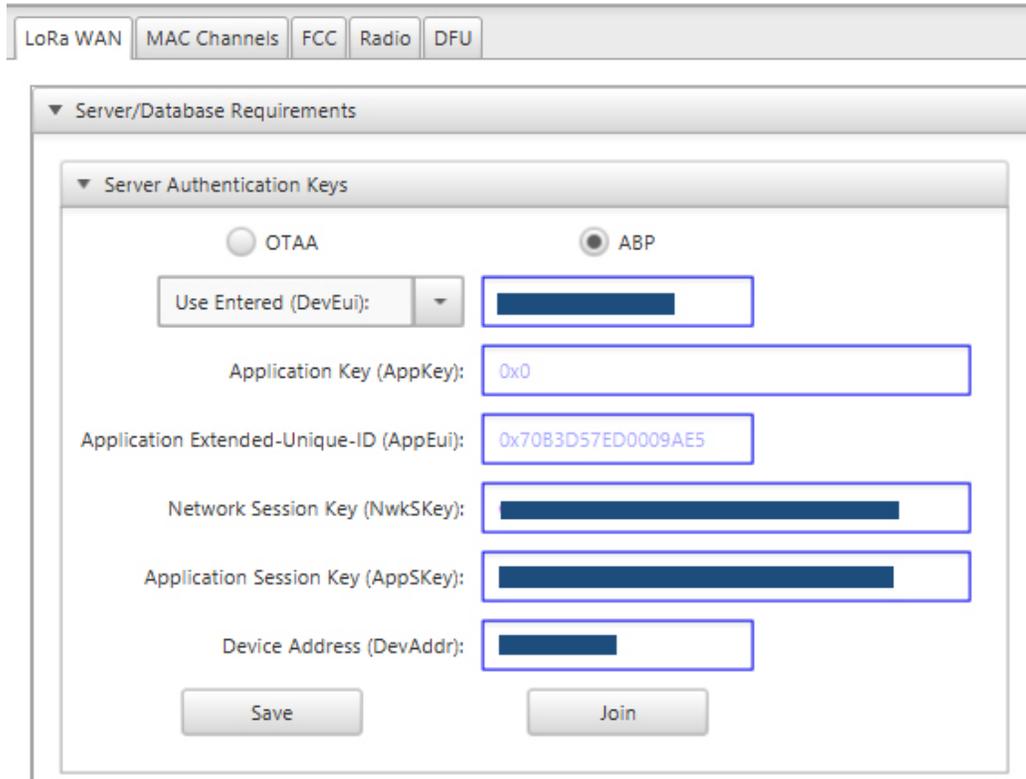


Figura 3.5: Schermata delle impostazioni iniziali dei nodi sulla Development Kit Utility

Come si nota, nella la sezione Server Authentication Keys si possono scegliere due tipologie di autenticazione del dispositivo: OTAA, Over-The-Air Activation, e ABP, Activation By Personalization. Per potere connettere alla rete il proprio dispositivo si devono inserire diversi parametri, a seconda del tipo di autenticazione scelto:

- il DevEui, che è l'ID unico e globale dell'End Device che si sta utilizzando;
- la AppKey, o Application Key, che è specifica all'ED in uso può venire scelta dal proprietario e generata automaticamente. Questa viene derivata con tutta probabilità da una chiave specifica dell'applicazione in cui è stato registrato il dispositivo ed è in completo controllo del provider dell'applicazione. Ogni volta che un nodo si collega alla rete con un'attivazione del tipo over-the-air questa serve per derivare la

NwkSKey e la AppSKey relative al dispositivo utilizzato, in modo da criptare e verificare la comunicazione e i dati scambiati;

- la AppEUi, Application Identifier. Questo è l'identificativo esclusivo dedicato al proprietario dell'applicazione a cui è assegnato il dispositivo. Questo parametro è conservato all'interno del dispositivo prima dell'attivazione;
- la NwkSKey, ossia la Network Session Key specifica per l'ED in uso. Viene utilizzata sia dal server che dal nodo per calcolare e verificare il MIC (Message Integrity Code) di tutti i messaggi scambiati per assicurare la correttezza dei dati;
- la AppSkey, che è la Application Session Key specifica per il dispositivo. La utilizzano sia il server della rete che il nodo per criptare e decriptare il payload dei messaggi relativi all'applicazione.
- il DevAddr, Device Address. Consiste di 32 bit e identifica il nodo all'interno della rete corrente [7].

I parametri appena elencati si trovano nella pagina web dove sono presenti i dettagli dei dispositivi registrati sotto una certa applicazione, come mostrato nella Figura 3.6.

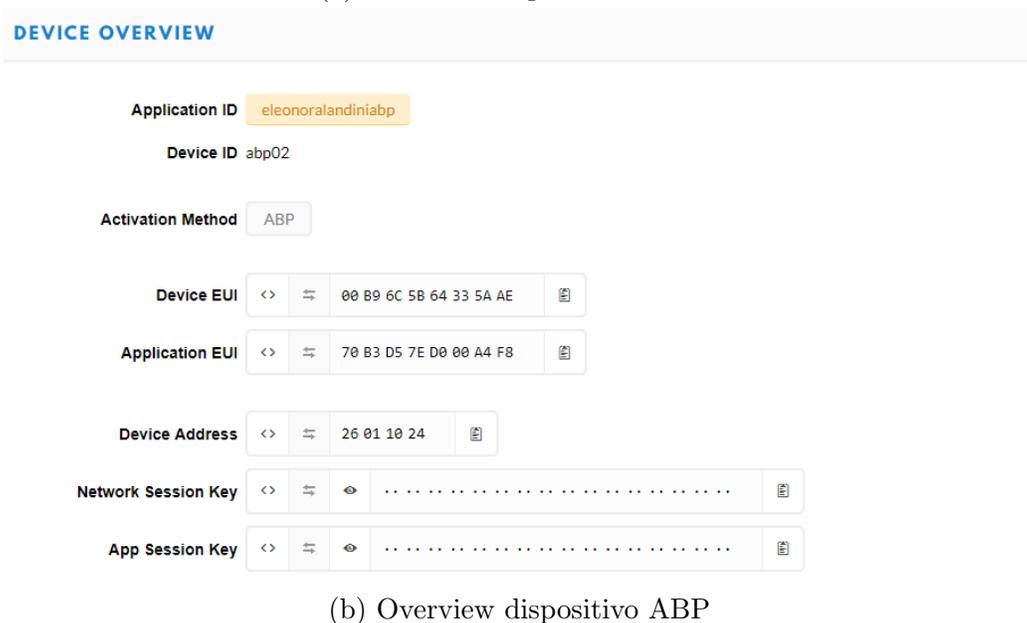
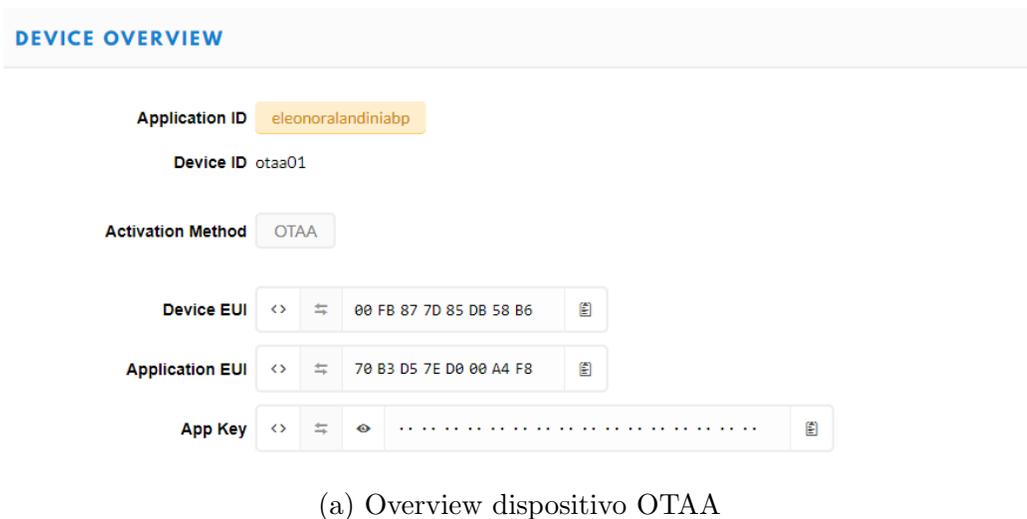


Figura 3.6: Pagine dei dettagli dei dispositivi assegnati all'applicazione su The Things Network [14]

Se si sceglie di utilizzare l'attivazione del tipo over-the-air bisogna inserire il DevEUI, la AppKey e la AppEUI, copiandoli dalla rispettiva sezione, come illustrato nella Figura 3.6b. Per questo tipo di attivazione è necessario eseguire una procedura di connessione alla rete prima di cominciare con gli

scambi di messaggi con il server, cliccando il tasto Join presente nella Figura 3.5. Una volta che il server ha risposto positivamente alla richiesta di connessione alla rete, vengono derivate la NwrSKey e la AppSKey e vengono inviate al dispositivo per fare in modo di avere una connessione sicura e criptata. Se invece si fa uso del tipo di attivazione ABP, è necessario inserire DevAddr, NwkSKey e AppSKey, copiandoli dalla pagina specifica del nodo ABP utilizzato (Figura 3.6a). In questo caso le chiavi necessarie per criptare i messaggi scambiati con il server sono già salvate all'interno dei nodi [7], pertanto, cliccando il tasto Join nella schermata di Figura 3.5, si effettuerà una connessione soltanto fittizia, poichè il dispositivo è effettivamente già connesso alla rete. Durante le indagini preliminari per effettuare le misure è emerso che la modalità di attivazione di tipo OTAA risulta spesso difficile da utilizzare a causa dei frequenti rifiuti del server al momento della connessione. Tenendo conto di questo fenomeno è stato scelto di usare sempre la modalità ABP, in modo da avere una connessione stabile. Premendo il tasto Save presente nella Figura 3.5, i parametri verranno salvati sul dispositivo in uso e si potrà evitare di doverli inserire nuovamente una volta chiusa l'interfaccia grafica.

Per poter realizzare gli scopi di questo elaborato e quindi analizzare le prestazioni di nodi LoRa in un ambiente indoor si è scelto di caratterizzare anche il calcolo della Channel Loss; per poter fare ciò è necessario disabilitare due dei tre canali automaticamente attivi per l'invio delle trasmissioni. Utilizzando la LoRa Development Utility, una volta eseguita la connessione dei nodi alla rete, si seleziona la schermata MAC Channels (come mostrato nella Figura 3.7) e si clicca il tasto Disable All Channels, appunto per disabilitare tutti i canali attualmente attivi; successivamente si mette in funzione solo il primo canale cliccando sulla spunta di Enable Channel.

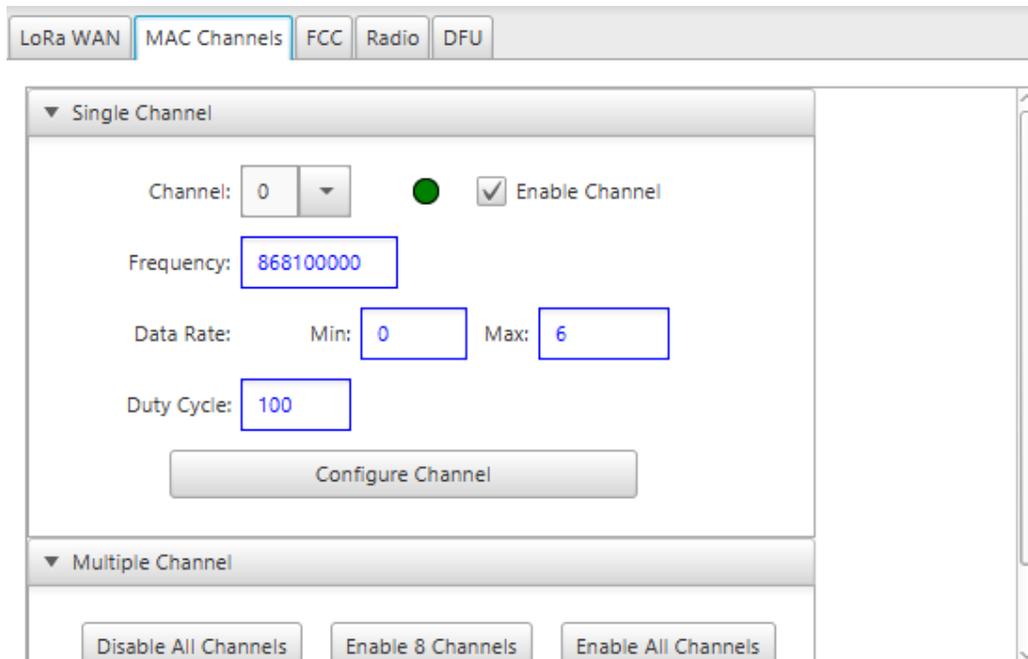


Figura 3.7: Schermata MAC Channels del canale 0

Per verificare di avere un solo canale attivo si possono selezionare i due canali successivi e controllare che siano entrambi disabilitati (Figura 3.8).

L'abilitazione di un solo canale permette anche di aumentare il Duty Cycle da 0,33% per canale a 1% per canale, e quindi aumentare la frequenza dell'invio di messaggi in Uplink; è stato quindi modificato il valore inserito in precedenza nella sezione dedicata al Duty Cycle da 302, come era nelle Figure 3.8a e 3.8b, a 100, come nella Figura 3.7. Per rendere permanenti le modifiche effettuate è necessario premere il tasto di configurazione del canale in Figura 3.7. Infine è consigliabile salvare le caratteristiche applicate al nodo nella schermata di Figura 3.5 e poi rieseguire il Join.

▼ Single Channel

Channel: 1 Enable Channel

Frequency: 868300000

Data Rate: Min: 0 Max: 5

Duty Cycle: 302

Configure Channel

(a) Schermata del canale 1

▼ Single Channel

Channel: 2 Enable Channel

Frequency: 868500000

Data Rate: Min: 0 Max: 6

Duty Cycle: 302

Configure Channel

(b) Schermata del canale 2

Figura 3.8: Visualizzazione dei canali disattivati

Eseguite queste impostazioni è necessario chiudere l'interfaccia grafica e passare all'applicazione in linguaggio Java. È stato sviluppato un programma che ogni volta che viene eseguito, inserendo i corretti valori, svolge le seguenti funzioni in questo ordine:

- inserisce e salva i parametri di DevAddr, NwkSKey e AppSKey ed effettua la connessione alla rete;
- imposta il valore del data rate;
- imposta il valore di power index. Questo valore corrisponde alla potenza trasmessa dall'antenna omnidirezionale presente su ogni nodo; i valori a cui corrispondono i diversi indici di potenza sono riportati nella Tabella 3.5;

Indice di Potenza Trasmessa	Configurazione (ERP)
0	20 dBm (se supportato)
1	14 dBm
2	11 dBm
3	8 dBm
4	5 dBm
5	2 dBm

Tabella 3.5: Confronto tra gli indici utilizzati per identificare l'intensità di Potenza Trasmessa e la Effettiva Potenza Trasmessa in dBm [7]

- imposta la lunghezza del payload, rispettando la Tabella 3.2;
- imposta il TtW tra una trasmissione e l'altra.

Ogni volta che si inserisce un payload composto da un numero di byte diverso viene calcolato il ToA delle trasmissioni e il rispettivo TtW. Dopo aver modificato quest'ultimo nell'applicazione Java, vengono effettuate le misure utilizzate per l'analisi delle prestazioni. Per potere tenere traccia di tutti i messaggi inviati è stata implementata la possibilità di esportare i dati necessari in fogli Excel.

3.5 Impostazioni Applicazione Client

Per potere monitorare i messaggi ricevuti è stata creata un'applicazione in linguaggio Java di tipo Client per connettersi al server di The Things Network, seguendo le istruzioni fornite dal sito stesso [15]. Utilizzando il Javadoc, messo a disposizione sempre da The Things Network [15], è stato poi possibile estrapolare tutte le informazioni necessarie dai messaggi ricevuti. Anche in questo caso è stata aggiunta la funzionalità di esportazione dei dati interessati in un file Excel.

Per poter dare inizio alle misure è necessario eseguire prima l'applicazione Client e poi quella che fa partire le trasmissioni dai nodi. Avvenuto ciò si potrà osservare in tempo reale:

- il dispositivo che sta trasmettendo, il numero di messaggi inviati e l'orario di invio degli stessi dalla console del compilatore Java riguardante l'applicazione seriale;

- il dispositivo ricevente, il numero di messaggi ricevuti, il contatore del nodo e l'orario dalla console del compilatore riguardante l'applicazione Client;
- i dettagli sui messaggi ricevuti dal gateway come in Figura 4.1 (nel successivo capitolo);
- i dettagli su tutte le trasmissioni ricevute dal server mediante la pagina web dall'applicazione su The Things Network, nella sezione Data (di cui si può vedere la presenza nella Figura 3.3);
- i dettagli sui messaggi ricevuti separatamente per ogni nodo in uso attraverso la sezione Device, che si trova all'interno dell'applicazione di The Things Network. Cliccando sul nodo in uso e poi successivamente su Data si possono vedere gli scambi di informazioni per ogni singolo nodo [14].

Capitolo 4

Risultati delle Misurazioni

Come esposto in precedenza i dati delle trasmissioni effettuate dai nodi al server sono stati salvati su file Excel.

Per quanto riguarda i messaggi inviati, sono stati salvati:

- l'indice di trasmissione, per tenere conto di quanti messaggi sono stati inviati;
- l'orario di ricezione, fino ai millisecondi. Sarà molto utile per controllare la sincronizzazione dei due nodi nelle misure con interferente;
- l'ID del dispositivo che ha inviato il messaggio;
- il contenuto del payload con codifica esadecimale, per controllare quali messaggi non sono stati ricevuti;
- il numero di bit di cui è composto il payload.

I dati che sono stati esportati per ogni trasmissione ricevuta sono:

- l'indice di trasmissione, per tenere conto di quanti messaggi sono stati ricevuti;
- l'orario di ricezione, fino ai millisecondi;
- l'ID del dispositivo che ha trasmesso il messaggio;
- il contatore dei messaggi inviati dal nodo. Utile per individuare quali messaggi sono stati persi nella trasmissione.

- il contenuto del payload con codifica esadecimale;
- il numero di bit di cui è composto il payload;
- il data rate, che riporta automaticamente lo spreading factor e la larghezza di banda in uso;
- il rapporto segnale rumore del messaggio ricevuto in dB [10];
- la media dei rapporti segnale rumore fino alla trasmissione attuale;
- il valore di RSSI, Received Signal Strength Indicator, in dBm [10]. Questo rappresenta la potenza del segnale ricevuto e sarà funzionale per i calcoli di Channel Loss e probabilità di fallimento della ricezione dei pacchetti in presenza di interferente;
- il valore medio della RSSI calcolato fino all'ultimo messaggio ricevuto;
- il canale di ricezione, per controllare che ci sia effettivamente solo un canale abilitato.

Una informazione essenziale per potere iniziare le misure è il tempo di trasmissione dei messaggi inviati; esso è stato calcolato utilizzando le equazioni (3.8) - (4.81). Per essere certi di avere a che fare con il ToA effettivo di trasmissione sono state eseguite delle misure di prova con tutti gli spreading factor utilizzati. Successivamente sono stati confrontati i risultati delle suddette equazioni con il tempo riportato nella schermata in Figura 4.1. Dai confronti eseguiti è emerso che, per ottenere una corrispondenza tra i calcoli e quanto riportato in Figura 4.1, è necessario utilizzare preamboli di lunghezze diverse a seconda dello SF. È stata pertanto ricavata la Tabella 4.1.

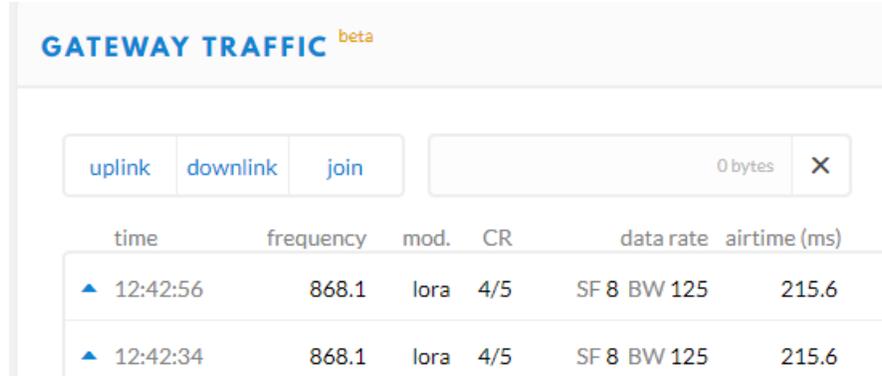


Figura 4.1: Schermata della pagina web di The Things Network dove si può osservare il traffico del gateway. In particolare, sotto la voce airtime si trova il ToA effettivo [16].

$n_{preamble}$	SF
8	7
8	8
8	9
8	10
13	11

Tabella 4.1: Corrispondenza tra numero di simboli del preambolo e spreading factor

Una volta ottenuto il ToA corretto e quindi la certezza di non incorrere nell'errore di no_free_channel, viene calcolato il tempo di attesa, dalla (3.13):

$$TtW = \frac{ToA}{DC_{canale}} - ToA = \frac{ToA}{0,01} - ToA = \quad (4.1)$$

$$= ToA \left(\frac{1}{0,01} - 1 \right) = \quad (4.2)$$

$$= 99 \cdot ToA \quad (4.3)$$

4.1 Misure con un unico nodo

Tutte le misure fatte con un solo nodo sono state eseguite con il nodo chiamato abp02. Il power index utilizzato per tutte le trasmissioni è quello pari a 2 quindi, secondo la Tabella 3.5, corrispondente ad una potenza trasmessa di 11dBm. Gli spreading factor utilizzati per la sperimentazione vanno dal 7 all'11 (quindi data rate da 5 a 1) coerentemente con la Tabella 3.3. Lo spreading factor 12, tramite cui è possibile la trasmissione nei punti più remoti della rete, è stato escluso in quanto quello meno adatto ad una valutazione di prestazioni in ambiente indoor. L'obiettivo di queste misure è valutare la percentuale di perdita di pacchetti, o Packet Loss Rate, e la Channel Loss, la perdita di potenza nel canale di trasmissione.

$$\text{Packet Loss Rate} = 1 - \frac{N_{Rx}}{N_{Tx}} \quad (4.4)$$

Dove:

N_{Rx} = numero di pacchetti ricevuti

N_{Tx} = numero di pacchetti trasmessi

$$\text{Channel Loss} = \sum_{i=1}^{N_{Rx}} \frac{RSSI_i - P_{Tx_i}}{N_{Rx}} \quad (4.5)$$

Dove:

$RSSI_i$ = valore i-esimo della potenza del segnale ricevuto

P_{Tx_i} = valore i-esimo della potenza trasmessa

Per ogni misura effettuata è stata utilizzata sempre la stessa potenza trasmessa, pertanto, sostituendo P_{Tx_i} con $P_{Tx} = 11\text{dBm}$ l'equazione (4.5) diventa

$$\text{Channel Loss} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{Rx}} RSSI_i - N_{Rx} P_{Tx}}{N_{Rx}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{Rx}} RSSI_i}{N_{Rx}} - P_{Tx} \quad (4.6)$$

Quindi risulta

$$\text{Channel Loss} = RSSI_{mean} - P_{Tx} \quad (4.7)$$

dove

$RSSI_{mean}$ = valore medio delle potenze ricevute

4.1.1 SF 7

Sono stati impostati:

- data rate pari a 5 (corrispondente a SF7 come mostrato nella Tabella 3.3;
- un payload $M = 100$ byte;
- $N_{Tx} = 100$ numero di trasmissioni.
- $n_{preamble} = 8$;

Viene calcolato il ToA con le equazioni (2.2), (3.8); (4.81).

$$T_{s,SF7} = \frac{2^7}{125000} = 1,02 \text{ ms} \quad (4.8)$$

$$T_{preamble,SF7} = (8 + 4,25) \cdot 1,02 \text{ ms} = 12,54 \text{ ms} \quad (4.9)$$

$$payloadsymb_{SF7} = 8 + \max \left(\left[5 \frac{8(100 + 13) - 4 \cdot 7 + 44}{4 \cdot 7} \right], 0 \right) = 173 \quad (4.10)$$

$$T_{payload,SF7} = 173 \cdot 1,02 \text{ ms} = 177,15 \text{ ms} \quad (4.11)$$

$$ToA_{SF7} = T_{preamble,SF7} + payloadsymb_{SF7} = 12,54 \text{ ms} + 177,15 \text{ ms} = 189,69 \text{ ms} \quad (4.12)$$

$$TtW_{SF7} = 99 \cdot 189,69 \text{ ms} = 18,78 \text{ s} \quad (4.13)$$

Considerando questo è stato impostato un tempo tra una trasmissione e l'altra pari a 19 secondi, prima di dare inizio alle misure.

Sono stati ricevuti 94 messaggi pertanto, con $N_{Rx} = 94$:

$$\text{Packet Loss Rate} = 1 - \frac{94}{100} = 6\% \quad (4.14)$$

È stato rilevato un $RSSI_{mean} = -63,56$ dBm.

$$\text{Channel Loss} = -63,56 \text{ dBm} - 11 \text{ dBm} = -74,56 \text{ dBm} \quad (4.15)$$

4.1.2 SF 8

Sono stati impostati:

- data rate pari a 4 (corrispondente a SF8 come mostrato nella Tabella 3.3);
- un payload $M = 30$ byte;
- $N_{Tx} = 100$ numero di trasmissioni.
- $n_{preamble} = 8$;

Viene calcolato il ToA con le equazioni (2.2), (3.8); (4.81).

$$T_{s,SF8} = \frac{2^8}{125000} = 2,05 \text{ ms} \quad (4.16)$$

$$T_{preamble,SF8} = (8 + 4,25) \cdot 2,05 \text{ ms} = 25,09 \text{ ms} \quad (4.17)$$

$$payloadsymb_{SF8} = 8 + \max \left(\left[5 \frac{8(30 + 13) - 4 \cdot 7 + 44}{4 \cdot 8} \right], 0 \right) = 68 \quad (4.18)$$

$$T_{payload,SF8} = 68 \cdot 2,05 \text{ ms} = 139,26 \text{ ms} \quad (4.19)$$

$$ToA_{SF8} = T_{preamble,SF8} + payloadsymb_{SF8} = 25,09 \text{ ms} + 139,26 \text{ ms} = 164,35 \text{ ms} \quad (4.20)$$

$$TtW_{SF8} = 99 \cdot 164,35 \text{ ms} = 16,27 \text{ s} \quad (4.21)$$

Considerando questo è stato impostato un tempo tra una trasmissione e l'altra pari a 17 secondi, prima di dare inizio alle vere e proprie misure.

Sono stati ricevuti 98 messaggi pertanto, con $N_{Rx} = 98$:

$$\text{Packet Loss Rate} = 1 - \frac{98}{100} = 2\% \quad (4.22)$$

È stato rilevato un $RSSI_{mean} = -49,36$ dBm.

$$\text{Channel Loss} = -49,36 \text{ dBm} - 11 \text{ dBm} = -60,36 \text{ dBm} \quad (4.23)$$

4.1.3 SF 9

Sono stati impostati:

- data rate pari a 3 (corrispondente a SF9 come mostrato nella Tabella 3.3);
- un payload $M = 10$ byte;
- $N_{Tx} = 100$ numero di trasmissioni.
- $n_{preamble} = 8$;

Viene calcolato il ToA con le equazioni (2.2), (3.8); (4.81).

$$T_{s,SF9} = \frac{2^9}{125000} = 4,10 \text{ ms} \quad (4.24)$$

$$T_{preamble,SF9} = (8 + 4,25) \cdot 4,10 \text{ ms} = 50,18 \text{ ms} \quad (4.25)$$

$$payloadsymb_{SF9} = 8 + \max \left(\left[5 \frac{8(10+13) - 4 \cdot 7 + 44}{4 \cdot 9} \right], 0 \right) = 38 \quad (4.26)$$

$$T_{payload,SF9} = 38 \cdot 4,10 \text{ ms} = 155,65 \text{ ms} \quad (4.27)$$

$$ToA_{SF9} = T_{preamble,SF9} + payloadsymb_{SF9} = 50,18 \text{ ms} + 155,65 \text{ ms} = 205,82 \text{ ms} \quad (4.28)$$

$$TtW_{SF9} = 99 \cdot 205,82 \text{ ms} = 20,377 \text{ s} \quad (4.29)$$

Considerando questo è stato impostato un tempo tra una trasmissione e l'altra pari a 21 secondi, prima di dare inizio alle vere e proprie misure.

Sono stati ricevuti 97 messaggi pertanto, con $N_{Rx} = 97$:

$$\text{Packet Loss Rate} = 1 - \frac{97}{100} = 3\% \quad (4.30)$$

È stato rilevato un $RSSI_{mean} = -60,44$ dBm.

$$\text{Channel Loss} = -60,44 \text{ dBm} - 11 \text{ dBm} = -71,44 \text{ dBm} \quad (4.31)$$

4.1.4 SF 10

Sono stati impostati:

- data rate pari a 2 (corrispondente a SF10 come mostrato nella Tabella 3.3);
- un payload $M = 10$ byte;
- $N_{Tx} = 100$ numero di trasmissioni.
- $n_{preamble} = 8$;

Viene calcolato il ToA con le equazioni (2.2), (3.8); (4.81).

$$T_{s,SF10} = \frac{2^{10}}{125000} = 8,19 \text{ ms} \quad (4.32)$$

$$T_{preamble,SF10} = (8 + 4,25) \cdot 8,19 \text{ ms} = 100,35 \text{ ms} \quad (4.33)$$

$$payloadsymb_{SF10} = 8 + \max \left(\left[5 \frac{8(10 + 13) - 4 \cdot 7 + 44}{4 \cdot 10} \right], 0 \right) = 33 \quad (4.34)$$

$$T_{payload,SF10} = 33 \cdot 8,19 \text{ ms} = 270,34 \text{ ms} \quad (4.35)$$

$$ToA_{SF10} = T_{preamble,SF10} + payloadsymb_{SF10} = 100,35 \text{ ms} + 270,34 \text{ ms} = 370,69 \text{ ms} \quad (4.36)$$

$$TtW_{SF10} = 99 \cdot 370,69 \text{ ms} = 36,70 \text{ s} \quad (4.37)$$

Considerando questo è stato impostato un tempo tra una trasmissione e l'altra pari a 37 secondi, prima di dare inizio alle vere e proprie misure.

Sono stati ricevuti 95 messaggi pertanto, con $N_{Rx} = 95$:

$$\text{Packet Loss Rate} = 1 - \frac{95}{100} = 5\% \quad (4.38)$$

È stato rilevato un $RSSI_{mean} = -51,37$ dBm.

$$\text{Channel Loss} = -51,37 \text{ dBm} - 11 \text{ dBm} = -62,37 \text{ dBm} \quad (4.39)$$

4.1.5 SF 11

Sono stati impostati:

- data rate pari a 1 (corrispondente a SF11 come mostrato nella Tabella 3.3);
- un payload $M = 10$ byte;
- $N_{Tx} = 50$ numero di trasmissioni.
- $n_{preamble} = 13$;

Viene calcolato il ToA con le equazioni (2.2), (3.8); (4.81).

$$T_{s,SF11} = \frac{2^{11}}{125000} = 16,38 \text{ ms} \quad (4.40)$$

$$T_{preamble,SF11} = (8 + 4,25) \cdot 16,38 \text{ ms} = 282,62 \text{ ms} \quad (4.41)$$

$$payloadsymb_{SF11} = 8 + \max \left(\left[5 \frac{8(10 + 13) - 4 \cdot 7 + 44}{4 \cdot 11} \right], 0 \right) = 33 \quad (4.42)$$

$$T_{payload,SF11} = 33 \cdot 16,38 \text{ ms} = 540,67 \text{ ms} \quad (4.43)$$

$$ToA_{SF11} = T_{preamble,SF11} + payloadsymb_{SF11} = 282,62 \text{ ms} + 540,67 \text{ ms} = 823,30 \text{ ms} \quad (4.44)$$

$$TtW_{SF11} = 99 \cdot 823,3 \text{ ms} = 81,51 \text{ s} \quad (4.45)$$

Considerando questo è stato impostato un tempo tra una trasmissione e l'altra pari a 82 secondi, prima di dare inizio alle vere e proprie misure.

Sono stati ricevuti 47 messaggi pertanto, con $N_{Rx} = 47$:

$$\text{Packet Loss Rate} = 1 - \frac{47}{50} = 6\% \quad (4.46)$$

È stato rilevato un $RSSI_{mean} = -53,45$ dBm.

$$\text{Channel Loss} = -53,45 \text{ dBm} - 11 \text{ dBm} = -64,45 \text{ dBm} \quad (4.47)$$

4.2 Misure in presenza di interferente

Le misure con interferente sono state effettuate con i nodi alla stessa distanza dal gateway, uno a fianco all'altro. Il dispositivo registrato come abp02 è stato utilizzato come interferente impostando su di esso una potenza minore rispetto a quella impostata sull' abp01. L'obiettivo di queste misure è di verificare parte di quanto dichiarato nella Tabella 1 del documento [4]. In questa tabella è riportato che se due dispositivi inviano pacchetti contemporaneamente sullo stesso canale almeno una delle due trasmissioni non verrà ricevuta. Se la differenza nelle potenze ricevute è minore di 6 dB, nessuno dei messaggi verrà ricevuto. Se la differenza è non inferiore a 6 dB allora la trasmissione proveniente dal dispositivo con potenza maggiore potrà essere ricevuta.

Per caratterizzare la probabilità di perdita del pacchetto è stata utilizzata la formula della probabilità di outage per le trasmissioni wireless in ambienti indoor. Pertanto nel nostro caso risulta

$$P_{outage} = P(RSSI_1 - RSSI_2 < 6) \quad (4.48)$$

dove:

P_{outage} = probabilità di disservizio, quindi perdita del messaggio;
 $RSSI_1, RSSI_2$ = potenza del segnale ricevuto rispettivamente di abp01 e abp02.

Considerando i termini di Path Loss e shadowing log-normale, la formula della potenza ricevuta in una radiocomunicazione in ambiente indoor è

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} - A_{Tx} + G_{Rx} - A_{Rx} - PL + S \quad (4.49)$$

dove:

P_{Tx} = potenza trasmessa dal dispositivo;
 G_{Tx}, G_{Rx} = guadagno delle antenne rispettivamente trasmittente e ricevente;
 A_{Tx}, A_{Rx} = attenuazione dei connettori rispettivamente in trasmissione e in ricezione;

PL = Path Loss in ambiente indoor, variabile che dipende dalla frequenza portante di trasmissione, dal numero di muri interposti tra trasmettitore e ricevitore e dalla distanza tra trasmettitore e ricevitore;

S = Shadowing, variabile aleatoria che tiene conto della variabilità della potenza ricevuta.

Quindi le potenze dei segnali ricevuti rispettivamente da abp01 e abp02 sono:

$$RSSI_1 = P_{Tx1} + G_{Tx1} - A_{Tx1} + G_{Rx1} - A_{Rx1} - PL_1 + S_1 \quad (4.50)$$

$$RSSI_2 = P_{Tx2} + G_{Tx2} - A_{Tx2} + G_{Rx2} - A_{Rx2} - PL_2 + S_2 \quad (4.51)$$

Considerando le equazioni (4.50) e (4.51), si può osservare che:

- i guadagni delle antenne e le attenuazioni dei connettori sono uguali per abp01 e per abp02;
- il guadagno e l'attenuazione del ricevitore sono gli stessi, poichè il ricevitore è uno solo, il gateway;
- i Path Loss sono uguali, essendo i entrambi dispositivi posti alla stessa distanza, hanno zero muri interposti tra essi e il ricevitore e trasmettono sulla stessa frequenza portante.

Pertanto i valori appena elencati possono essere incorporati in una generica costante K che con la sottrazione delle potenze ricevute viene eliminata:

$$RSSI_1 = P_{Tx1} + K + S_1 \quad (4.52)$$

$$RSSI_2 = P_{Tx2} + K + S_2 \quad (4.53)$$

$$P_{outage} = P(P_{Tx1} + K + S_1 - (P_{Tx2} + K + S_2) < 6) \quad (4.54)$$

$$P_{outage} = P(P_{Tx1} + K + S_1 - P_{Tx2} - K - S_2 < 6) \quad (4.55)$$

$$P_{outage} = P(P_{Tx1} + S_1 - P_{Tx2} - S_2 < 6) \quad (4.56)$$

Quindi:

$$P_{outage} = P(S_2 - S_1 > P_{Tx1} - P_{Tx2} - 6) \quad (4.57)$$

Poichè, $S[\text{dB}] \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{dB}^2)$, la differenza $S_2 - S_1$, indicata come $S_{1,2}$, soddisfa

$$S_{1,2}[\text{dB}] \sim \mathcal{N}(0, \sigma_1^2 + \sigma_2^2) \quad (4.58)$$

In conclusione la probabilità di outage viene caratterizzata come segue:

$$P_{outage} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{P_{Tx1} - P_{Tx2} - 6}{\sqrt{2} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)} \right) \quad (4.59)$$

Essa dipende quindi solamente dalla differenza delle potenze trasmesse e dalla varianza dello shadowing.

4.2.1 Differenza di 6 dB

È stato scelto di effettuare misurazioni con una differenza tra le potenze trasmesse pari a 6 dB in virtù dell'equazione (4.59) e delle proprietà della funzione erfc. Così facendo il numeratore dell'argomento della funzione di errore complementare si annulla:

$$P_{outage,6dB} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{6 - 6}{\sqrt{2} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(0) = \frac{1}{2} \quad (4.60)$$

$$P_{outage,6dB} = 50\% \quad (4.61)$$

Ciò significa che in queste condizioni la Packet Loss Rate non dipende dallo shadowing e dovrebbero venire persi sempre la metà dei messaggi inviati. Per ottenere la differenza di 6 dB al nodo abp01 è stato assegnato un power index pari a 1 e al nodo abp02, interferente, uno pari a 3. Coerentemente con la Tabella 3.5 questi due indici corrispondono a 14 dBm e 8 dBm. Le misure sono state effettuate inviando 100 trasmissioni contemporaneamente dai due nodi impostando lo stesso spreading factor. Viene poi confrontato il valore di Packet Loss Rate ottenuto (dalla equazione (4.4)) con quello atteso di 50%.

SF7

Sono stati impostati:

- data rate pari a 5 (corrispondente a SF7 come mostrato in Tabella 3.3);
- un payload $M = 100$ byte;

Avendo assegnato gli stessi parametri scelti nel paragrafo 4.1.1, si possono utilizzare i calcoli ottenuti precedentemente; perciò si imposta un tempo di attesa tra le trasmissioni pari a 19 secondi prima di iniziare con le misure. Sono stati ricevuti 50 messaggi, pertanto la Packet Loss Rate risulta essere:

$$\text{Packet Loss Rate} = 1 - \frac{50}{100} = 50\% \quad (4.62)$$

SF8

Sono stati impostati:

- data rate pari a 4 (corrispondente a SF8 come mostrato nella Tabella 3.3);
- un payload $M = 50$ byte;
- $n_{preamble} = 8$;

Per calcolare il ToA, si fa riferimento al tempo di simbolo calcolato nell'equazione (4.16) e al tempo di preambolo calcolato nell'equazione (4.17).
Risulta

$$payloadsymb_{SF8} = 8 + \max \left(\left[5 \frac{8(50 + 13) - 4 \cdot 7 + 44}{4 \cdot 8} \right], 0 \right) = 93 \quad (4.63)$$

$$T_{payload,SF8} = 93 \cdot 2,05 \text{ ms} = 190,46 \text{ ms} \quad (4.64)$$

$$ToA_{SF8} = T_{preamble,SF8} + payloadsymb_{SF8} = 25,09 \text{ ms} + 190,46 \text{ ms} = 215,55 \text{ ms} \quad (4.65)$$

$$TtW_{SF8} = 99 \cdot 215,55 \text{ ms} = 21,34 \text{ s} \quad (4.66)$$

Considerando questo è stato impostato un tempo tra una trasmissione e l'altra pari a 22 secondi, prima di dare inizio alle vere e proprie misure. Sono stati ricevuti 50 messaggi, pertanto la Packet Loss Rate risulta essere:

$$\text{Packet Loss Rate} = 1 - \frac{85}{100} = 15\% \quad (4.67)$$

SF9

Sono stati impostati:

- data rate pari a 3 (corrispondente a SF9 come mostrato nella Tabella 3.3);
- un payload $M = 10$ byte;

Avendo assegnato gli stessi parametri scelti nel paragrafo 4.1.3, si possono utilizzare i calcoli ottenuti precedentemente; perciò si imposta un tempo di attesa tra le trasmissioni pari a 21 secondi prima di iniziare con le misure. Sono stati ricevuti 53 messaggi, pertanto la Packet Loss Rate risulta essere:

$$\text{Packet Loss Rate} = 1 - \frac{53}{100} = 47\% \quad (4.68)$$

SF10

Sono stati impostati:

- data rate pari a 2 (corrispondente a SF10 come mostrato nella Tabella 3.3);
- un payload $M = 5$ byte;
- $n_{preamble} = 8$;

Per calcolare il ToA, si fa riferimento al tempo di simbolo calcolato nell'equazione (4.32) e al tempo di preambolo calcolato nell'equazione (4.33). Risulta

$$payloadsymb_{SF10} = 8 + \max \left(\left\lfloor 5 \frac{8(10+13) - 4 \cdot 7 + 44}{4 \cdot 10} \right\rfloor, 0 \right) = 28 \quad (4.69)$$

$$T_{payload,SF10} = 28 \cdot 8,19 \text{ ms} = 229,38 \text{ ms} \quad (4.70)$$

$$ToA_{SF10} = T_{preamble,SF10} + payloadsymb_{SF10} = 100,35 \text{ ms} + 229,38 \text{ ms} = 329,73 \text{ ms} \quad (4.71)$$

$$TtW_{SF10} = 99 \cdot 329,73 \text{ ms} = 32,64 \text{ s} \quad (4.72)$$

Considerando questo è stato impostato un tempo tra una trasmissione e l'altra pari a 33 secondi, prima di dare inizio alle vere e proprie misure.

Sono stati ricevuti 71 messaggi, pertanto la Packet Loss Rate risulta essere:

$$\text{Packet Loss Rate} = 1 - \frac{71}{100} = 29\% \quad (4.73)$$

Per due SF il risultato ottenuto è molto prossimo a quello atteso, mentre per gli altri due sono stati notati discreti scostamenti. Questi ultimi possono avere diverse giustificazioni:

- il fatto di non aver inserito il fast fading nel modello della potenza ricevuta (fenomeno che verrà spiegato meglio alla fine del paragrafo successivo);
- il fatto di aver preso un numero non elevato di misure (ci si aspetta che prendendo, ad esempio, 1000 misure anzichè 100 i risultati migliorino).

4.2.2 Differenza di 9 dB

Queste ultime misure sono state fatte impostando una differenza di 9 dB tra le potenze trasmesse dei due nodi, perciò l'equazione (4.59) diventa:

$$P_{outage,9dB} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{9 - 6}{\sqrt{2} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{3}{\sqrt{2} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)} \right) \quad (4.74)$$

In questo caso la probabilità di perdita dei pacchetti dipende anche dalla varianza dello shadowing.

Le misure sono pertanto state effettuate in questo ordine:

1. sono state eseguite 100 trasmissioni con il nodo interferente abp02, impostando un power index uguale a 4, corrispondente (Tabella 3.5) ad una potenza trasmessa di 5 dBm;
2. sono stati inviati 100 messaggi con il nodo abp01, utilizzando lo stesso spreading factor della trasmissione precedente e impostando un power index pari a 1 e quindi una potenza trasmessa di 14 dBm (Tabella 3.5);
3. sono state inviate 100 trasmissioni dai nodi abp01 e abp02 in contemporanea mantenendo tutti i parametri precedentemente impostati.

Successivamente, utilizzando i dati esportati su Excel, è stata calcolata la probabilità di perdita dei pacchetti facendo uso dell'equazione (4.74). L'unica incognita dell'equazione ora è la varianza dello shadowing; questa viene calcolata come la somma delle varianze calcolate sui valori di RSSI raccolti con le prime due trasmissioni.

Una volta calcolata la probabilità di outage, questa è stata confrontata con la percentuale di pacchetti persi data dalla terza trasmissione, calcolata con la stessa formula dell'equazione (4.4). Infine, utilizzando Matlab, sono stati prodotti dei grafici che riportano le cdf empiriche delle potenze ricevute durante le trasmissioni. È stato fatto il confronto tra le cdf empiriche delle

trasmissioni singole dei due nodi, per potere osservare l'effettiva differenza tra gli RSSI dei due dispositivi. Inoltre è stato fatto un confronto anche tra la cdf del nodo abp01 quando trasmette singolarmente e quella di quando invia pacchetti contemporaneamente all'interferente abp02.

SF7

Sono stati impostati:

- data rate pari a 5 (corrispondente a SF7 come mostrato nella Tabella 3.3);
- un payload $M = 100$ byte;

Avendo assegnato gli stessi parametri scelti nel paragrafo 4.1.1, si possono utilizzare i calcoli ottenuti precedentemente; perciò si imposta un tempo di attesa tra le trasmissioni pari a 19 secondi prima di iniziare con le misure.

I risultati ottenuti sono:

1. $\sigma_2^2 = 8,0195$;
2. $\sigma_1^2 = 2,8404$;
3. 73 pacchetti ricevuti.

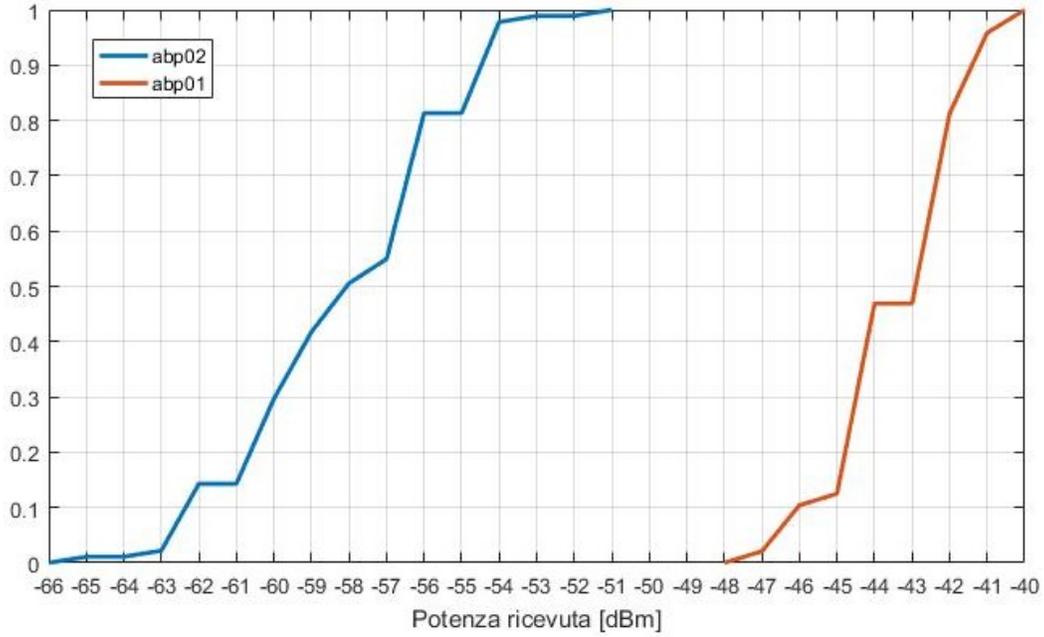


Figura 4.2: Confronto tra le cdf empiriche dei due nodi trasmettenti uno alla volta con SF7

$$P_{outage,SF7} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{3}{\sqrt{2} (8,0195 + 2,8404)} \right) = 18,13\% \quad (4.75)$$

$$\text{Packet Loss Rate} = 1 - \frac{73}{100} = 27\% \quad (4.76)$$

La differenza tra il risultato ottenuto e quello atteso è dell'8,77%.

SF8

Sono stati impostati:

- data rate pari a 4 (corrispondente a SF8 come mostrato nella Tabella 3.3);
- un payload $M = 50$ byte;

Avendo assegnato gli stessi parametri scelti nel paragrafo 4.2.1 sotto la voce SF8, si possono utilizzare i calcoli ottenuti precedentemente; perciò si imposta un tempo di attesa tra le trasmissioni pari a 21 secondi prima di iniziare con le misure.

I risultati ottenuti sono:

1. $\sigma_2^2 = 3,2799$;
2. $\sigma_1^2 = 0,9683$;
3. 82 pacchetti ricevuti.

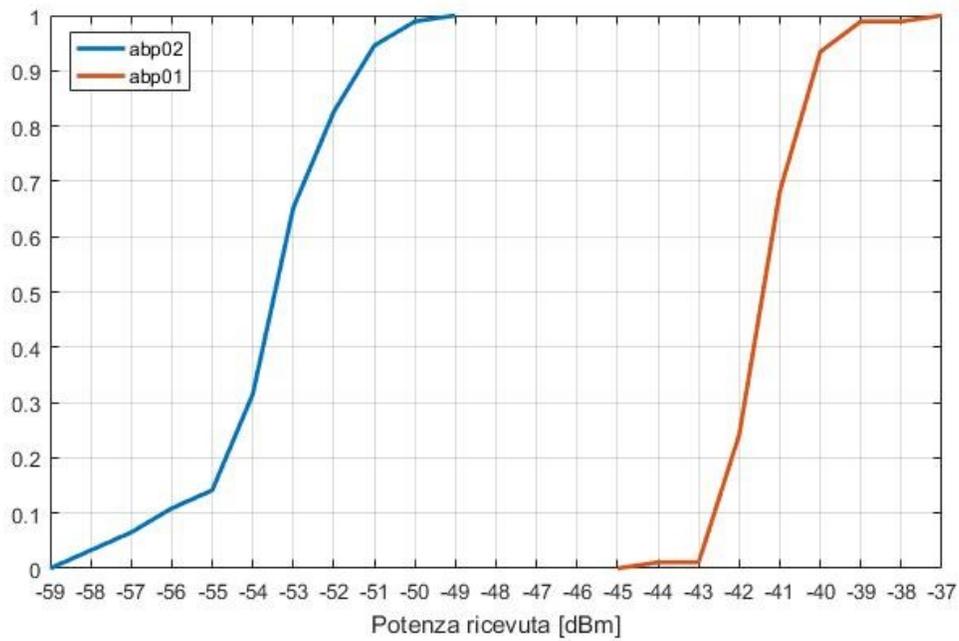


Figura 4.3: Confronto tra le cdf empiriche dei due nodi trasmettenti uno alla volta con SF8

$$P_{outage,SF8} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{3}{\sqrt{2(3,2799 + 0,9683)}} \right) = 7,28\% \quad (4.77)$$

$$\text{Packet Loss Rate} = 1 - \frac{82}{100} = 18\% \quad (4.78)$$

La differenza tra la Packet Loss Rate ottenuta e quella prevista è del 10,72%.

SF9

Sono stati impostati:

- data rate pari a 3 (corrispondente a SF9 come mostrato nella Tabella 3.3);
- un payload $M = 20$ byte;
- $n_{preamble} = 8$;

Per calcolare il ToA, si fa riferimento al tempo di simbolo calcolato nell'equazione (4.24) e al tempo di preambolo calcolato nell'equazione (4.25).

$$payloadsymb_{SF9} = 8 + \max \left(\left\lfloor 5 \frac{8(10+13) - 4 \cdot 7 + 44}{4 \cdot 9} \right\rfloor, 0 \right) = 48 \quad (4.79)$$

$$T_{payload,SF9} = 38 \cdot 4,10 \text{ ms} = 196,61 \text{ ms} \quad (4.80)$$

$$ToA_{SF9} = T_{preamble,SF9} + payloadsymb_{SF9} = 50,18 \text{ ms} + 196,61 \text{ ms} = 246,78 \text{ ms} \quad (4.81)$$

$$TtW_{SF9} = 99 \cdot 246,78 \text{ ms} = 24,43 \text{ s} \quad (4.82)$$

Considerando questo è stato impostato un tempo tra una trasmissione e l'altra pari a 25 secondi, prima di dare inizio alle vere e proprie misure.

I risultati ottenuti sono:

1. $\sigma_2^2 = 3,8272$;
2. $\sigma_1^2 = 2,1004$;
3. 73 pacchetti ricevuti.

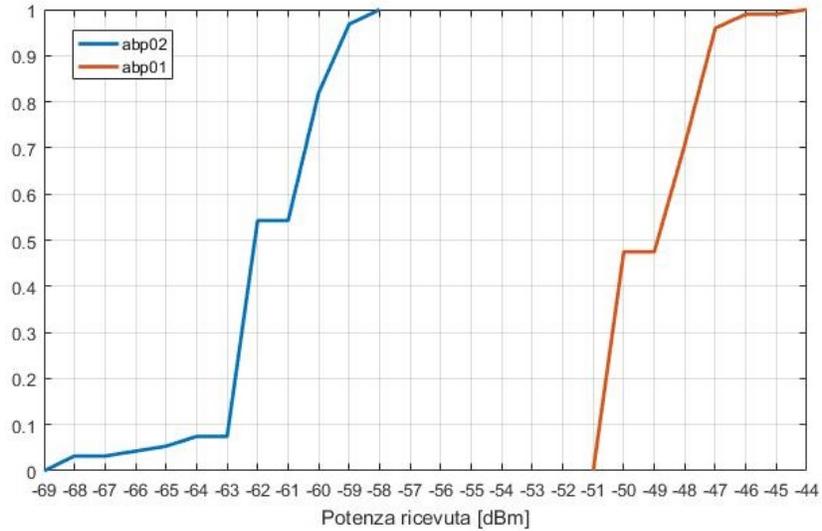


Figura 4.4: Confronto tra le cdf empiriche dei due nodi trasmettenti uno alla volta con SF9

$$P_{outage,SF9} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{3}{\sqrt{2} (3,8272 + 2,1004)} \right) = 10,89\% \quad (4.83)$$

$$\text{Packet Loss Rate} = 1 - \frac{69}{100} = 31\% \quad (4.84)$$

La differenza tra il risultato ottenuto e quello atteso è del 20,11%.

SF10

Sono stati impostati:

- data rate pari a 2 (corrispondente a SF10 come mostrato nella Tabella 3.3);
- un payload $M = 5$ byte;

Avendo assegnato gli stessi parametri scelti nel paragrafo 4.2.1 sotto la voce SF10, si possono utilizzare i calcoli ottenuti precedentemente; perciò si imposta un tempo di attesa tra le trasmissioni pari a 33 secondi prima di iniziare

con le misure.

I risultati ottenuti sono:

1. $\sigma_2^2 = 6,0946$;
2. $\sigma_1^2 = 1,9807$;
3. 93 pacchetti ricevuti.

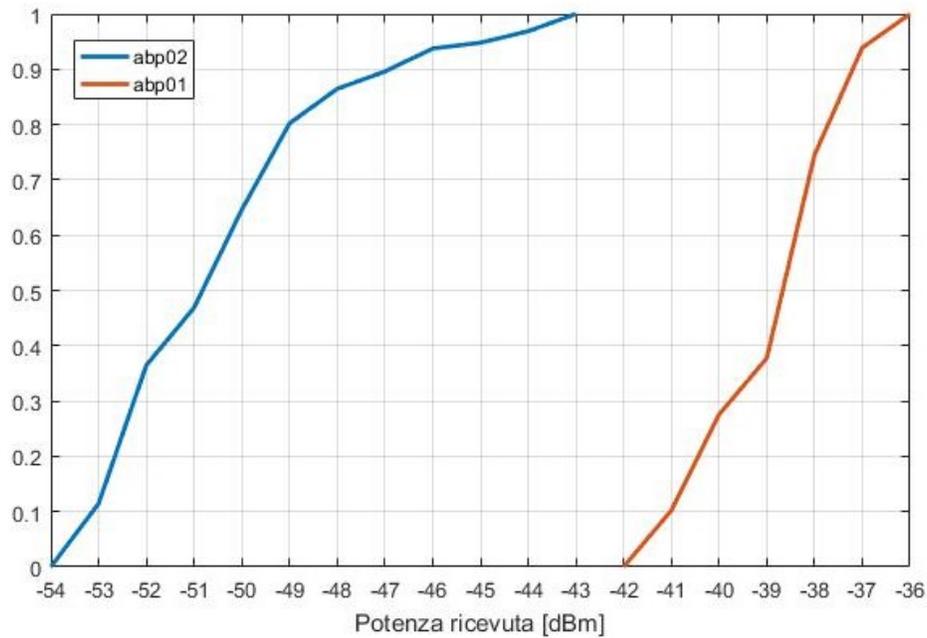


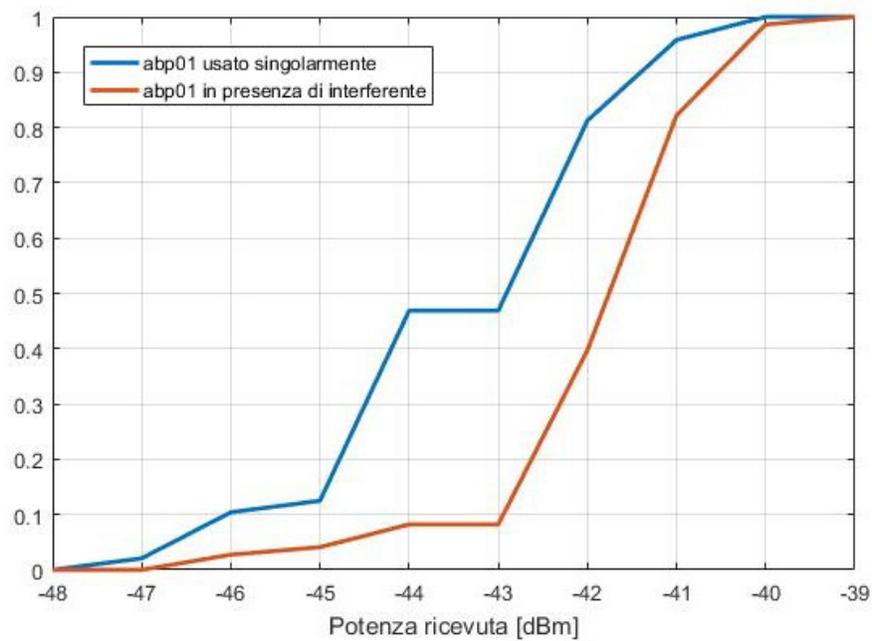
Figura 4.5: Confronto tra le cdf empiriche dei due nodi trasmettenti uno alla volta con SF10

$$P_{outage,SF10} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{3}{\sqrt{2(6,0946 + 1,9807)}} \right) = 14,56\% \quad (4.85)$$

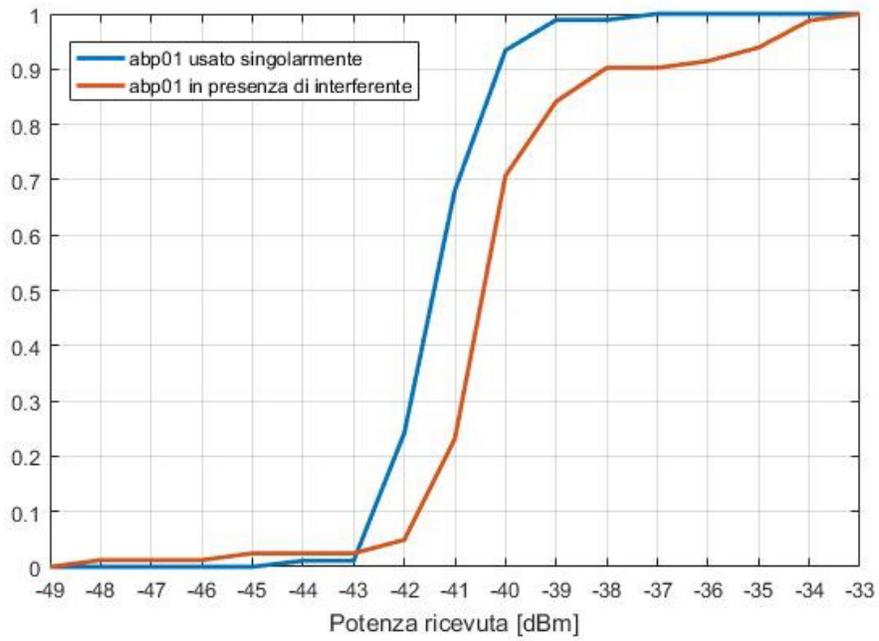
$$\text{Packet Loss Rate} = 1 - \frac{93}{100} = 7\% \quad (4.86)$$

In questo caso la Packet Loss Rate è risultata minore della probabilità di non ricevere trasmissione del 7,56%.

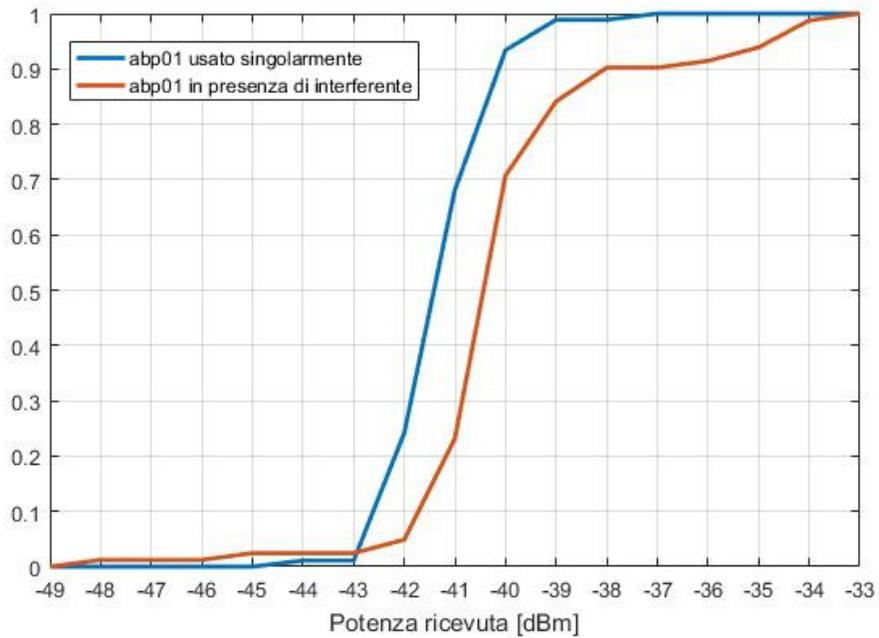
Nella Figura 4.6 si possono osservare i confronti tra la cdf empirica del nodo abp01 ottenuta con le misure di potenza ricevuta nel caso di trasmissione singola e in presenza di interferente. Dai grafici riportati si nota che, in quasi tutti i casi di trasmissione in presenza di interferenza, la cdf ha una pendenza leggermente minore rispetto a quella riferita al nodo che invia singolarmente. Ciò significa che i valori di potenza ricevuti in presenza di interferente sono distribuiti con varianza maggiore rispetto a quelli del caso senza interferente, ma non significativamente differenti.



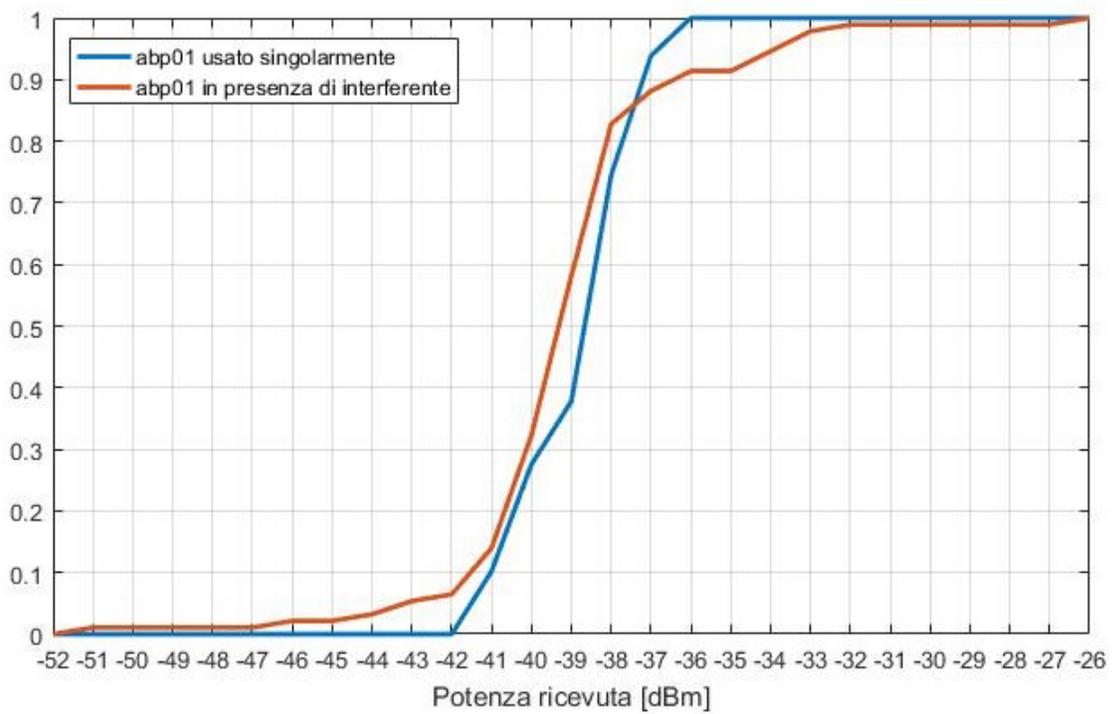
(a) SF7



(b) SF8



(c) SF9



(d) SF10

Figura 4.6: Confronto tra la cdf empirica del nodo abp01 utilizzato singolarmente e quella dello stesso nodo in presenza di interferente

La discrepanza tra i calcoli effettuati per la probabilità di perdita di pacchetti teorica e i risultati ottenuti può dipendere dal modello della comunicazione di canale scelto. Si è infatti deciso di tenere conto del Path Loss e dello shadowing ma non del fading veloce. Il fading veloce, anche chiamato multipath fading, è un tipo di distorsione del segnale ricevuto causato dalla dinamicità dei segnali wireless. A causa di riflessione, diffrazione e diffusione i segnali radio possono attraversare diversi percorsi per andare da trasmettitore a ricevitore, anche se essi sono entrambi fermi: questo fenomeno può causare dei ritardi [18] e delle interferenze distruttive che fanno perdere il messaggio.

Capitolo 5

Conclusioni

Lo scopo di questo elaborato è stato di osservare le prestazioni di due nodi della tecnologia LoRa in ambiente indoor. Per raccogliere i dati sono state sviluppate due applicazioni con linguaggio di programmazione Java, in grado di inviare il numero necessario di trasmissioni dai dispositivi attraverso la connessione seriale.

Sono stati eseguiti due tipi di misure:

- con un solo nodo, con l'obiettivo di osservare la perdita di pacchetti e la perdita di potenza del canale;
- con due nodi trasmettenti contemporaneamente, ponendone uno come interferente, per verificare la perdita di trasmissioni in caso di differenza ≤ 6 dB nelle potenze ricevute.

I dati ricevuti tramite le misure effettuate con due nodi sono poi stati manipolati attraverso l'utilizzo di fogli Excel, permettendo così di poter calcolare la probabilità di perdita del pacchetto attraverso l'uso della funzione di errore complementare. Confrontando la probabilità di missed detection con la percentuale di messaggi persi, si è potuto osservare quanto le prestazioni ottenute in ambienti indoor rispecchino ciò che viene dichiarato dalla documentazione riguardante l'interferenza nello stesso canale con stesso SF. Dai risultati si evince che è molto complesso riuscire a controllare le potenze ricevute in maniera lineare, anche considerando nel modello della comunicazione di canale sia il Path Loss che la variabile aleatoria dello shadowing. La differenza tra i risultati attesi e quelli effettivi può essere dovuta al parametro del fading veloce, che per questa sperimentazione non è stato considerato.

Come sviluppi futuri per questa sperimentazione si potrebbero ripetere misure simili, con differenza di potenza trasmessa maggiore di quella utilizzata in questo elaborato, per verificare se l'aderenza ai calcoli eseguiti potrebbe avere un incremento o meno.

Un'altra opzione potrebbe essere quella di aumentare il numero delle misure, per potere osservare se si ottengono risultati diversi.

Dato che nodi utilizzati non sono stati creati per mandare messaggi in successione ma in maniera saltuaria, si potrebbe aumentare il tempo di attesa tra le trasmissioni, per verificare se in questa maniera possono aumentare le prestazioni e quindi essere più vicini ai risultati teorici. Ciò potrebbe però comportare ulteriori modifiche nelle condizioni dell'ambiente in cui sono immersi i nodi, quindi una maggiore discrepanza con la teoria.

Infine si potrebbe cercare di mitigare la distorsione causata dal fading veloce, che dipende dalla distanza tra trasmettitore e ricevitore. Si potrebbero ripetere le stesse misure in punti diversi dell'ambiente indoor scelto per la sperimentazione, ponendo i dispositivi sempre alla stessa distanza dal gateway; così facendo si andrebbe a creare un modello della comunicazione di canale comprensivo del multipath fading.

Bibliografia

- [1] Thomas Clausen Aloÿs Augustin1 Jiazi Yi e William Mark Townsley. «A Study of LoRa: Long Range and Low Power Networks for the Internet of Things». In: <http://www.mdpi.com/journal/sensors> (2016).
- [2] *AN1200.22 - LoRaTM Modulation Basics*. Semtech. 2015.
- [3] W. Ayoub et al. «Towards IP over LPWANs technologies: LoRaWAN, DASH7, NB-IoT». In: *2018 Sixth International Conference on Digital Information, Networking, and Wireless Communications (DINWC)*. 2018.
- [4] Jean-Marie Gorce Claire Goursaud. «Dedicated networks for IoT : PHY / MAC state of the art and challenges. EAI endorsed transactions on Internet of Things.» In: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01231221> (2015).
- [5] *LoRa Device Developer Guide*. Orange Connected Objects & Partnerships. April 2016.
- [6] *LoRa® Technology Gateway User's Guide*. Microchip Technology Inc. 2016.
- [7] *LoRaWANTM 1.0 Specification*. Semtech. 2015.
- [8] *LoRaWANTM 1.1 Regional Specification*. Semtech. 2017.
- [9] *LoRaWANTM 1.1 Specification*. Semtech. 2017.
- [10] *LoRaWANTM Backend Interfaces 1.0 Specification*. Semtech. 2017.
- [11] Andrea Zanella Lorenzo Vangelista e Michele Zorzi. «Long-Range IoT technologies: the dawn of LoRa». In: (2015).
- [12] Michele Paffetti Luca Feltrin Alberto Marri e Roberto Verdone. «Preliminary evaluation of NB-IOT technology and its capacity». In: (2017).

-
- [13] The Things Network. 2018. URL: <https://console.thethingsnetwork.org/applications/eleonoralandiniabp/>.
- [14] The Things Network. 2018. URL: <https://console.thethingsnetwork.org/applications/eleonoralandiniabp/devices>.
- [15] The Things Network. 2018. URL: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/applications/java/>.
- [16] The Things Network. 2018. URL: <https://console.thethingsnetwork.org/gateways/eui-ad4bad4bad4bad48>.
- [17] The Things Network. *LoRaWAN Overview*. 2018. URL: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/>.
- [18] *Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz*. ITU-R. June 2017.
- [19] Ramon Sanchez-Iborra e Maria-Dolores Cano. «State of the Art in LPWAN Solutions for Industrial IoT Services». In: <http://www.mdpi.com/journal/sensors> (2016).
- [20] Rashmi Sharan Sinha, Yiqiao Wei e Seung-Hoon Hwang. «A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT». In: *ICT Express* (2017). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517300061>.
- [21] *SX1272/3/6/7/8: LoRa Modem. Designer's Guide. AN1200.13*. Semtech. July 2013.