



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE

Corso di Laurea in Ingegneria elettronica

Dipartimento di (DPIA) Dipartimento Politecnico di
Ingegneria e Architettura

Tesi di Laurea

LORA AND IOT

Relatore:

Prof. Antonio Abramo

Laureando:

Enrico Tolotto

Correlatore:

Prof.

Anno Accademico 2016/2017.

Sommario

La richiesta di device dotati di una connessione wireless è in continuo aumento, seguendo il trend del *Internet delle cose*(IoT). Questa continua crescita ha portato alla creazione di nuove tecnologie, le quali sono in competizione per aggiudicarsi la maggioranza del mercato. In questo campo le cosiddette (LPWAN) *Low Power Wide Area Networks* sono in forte aumento, grazie alla loro connettività a lungo raggio sfruttando bande d frequenza libere. Questa tesi si focalizzerà sulla tecnologia LoRaTM, implementata attraverso l'utilizzo del framework open-source KuraTM sviluppato da EurotechTM.

Note

■ Riscrivere	6
■ Completare e riscrivere	20
■ Trovare termine per multipath	20
■ Modificare e riscrivere	22
■ Riscrivere	22
■ Rivedere i vari punti e cambiare il linguaggio	23
■ Aggiungere immagine e finire la spiegazione	24
■ Riguardare ultimo punto della documentazione pagina 14	25
■ Chiedere se il termine protocollo è appropriato	25
■ Aggiunger link	30

Indice

Indice	v
Elenco delle figure	vii
1 IoT	1
1.1 La diffusione dell'Internet delle cose	2
1.2 Business	3
1.3 Big Data	4
1.4 La tecnologia alla base dell'IoT	4
2 IoT	7
3 LPWAN	11
3.1 LPWAN	11
3.2 NB-IoT	12
3.3 LTE-M	13
3.4 EC-GSM-IoT	13
3.5 Sigfox	14
3.6 LoRaWAN	16
3.7 Osservazioni	16
4 LoRa	19
4.1 LoRa	19
4.2 CSS	20
4.3 LoRaWAN	25
4.4 Frequenze	27
5 Implementazione	29
5.0.1 SX1301	29
5.0.2 ReliaGATE	30
5.0.3 Architettura del software	30

5.0.4 Semtech packet forwarder	30
5.0.5 LoRa Gateway Bridge	33
5.0.6 ESF	33
5.0.7 Realizzazione	33
5.0.8 Mqtt Bridge Config	35
5.0.9 Misurazioni	37
5.0.10 Osservazioni	37

Bibliografia**41**

Elenco delle figure

1.1	Numero di dispositivi per anno	2
1.2	Numero di dispositivi per anno	3
1.3	Layer del IoT	5
2.1	Layer del IoT	9
3.1	Comparazione tipologia di reti	12
3.2	Modalità di funzionamento NB-IoT	13
3.3	Mappa copertura SigFox	15
3.4	Capacità delle reti LPWA	17
3.5	Comparazione feature reti LPWAN	17
4.1	Comparazione tra UNB e SSP	19
4.3	Comparazione simbolica dei vari SF	22
4.4	Struttura pacchetto Lora	23
4.5	Pacchetto codificato dal layer fisico	24
4.6	Struttura interna ricevitore SX1301	24
4.7	Struttura rete a stella LPWAN	25
4.8	Stack del protocollo della rete LoRaWAN	26
5.1	Caratteristiche elettriche SX1301	31
5.2	Architettura del software	32
5.3	Architettura del software	34
5.4	Architettura del software	36
5.5	Architettura del software	37
5.6	Architettura del software	38
5.7	Copertura Lora	39

Capitolo 1

IoT

Internet delle cose (Internet of Things, IoT) è un paradigma riferito all'estensione di internet al mondo degli oggetti. Nel 1999 il ricercatore britannico Kevin Ashton durante una presentazione teorizzò per primo un mondo nel quale oggetti dotati di sensori, interagiscono utilizzando la rete. La continua evoluzione delle tecnologie wireless e satellitari ha permesso l'ideazione di oggetti sempre più connessi, in grado di generare una grande mole di informazioni e dati. Oltre ai computer smartphone e tablet, sempre più oggetti di uso quotidiano dispongono di una connessione ad internet. Smartwatch e smart band , lampadine e prese elettriche "intelligenti" , sono già da tempo reperibili nel mercato con un prezzo accessibile a tutti . Data la bassa complessità del hardware implementato in questi devices, essi necessitano di appoggiarsi ad un server esterno per l'elaborazione dei dati. Sfruttando la connessione ad internet, gli oggetti riescono ad instaurare uno scambio di dati bidirezionale tra loro ed il server; infatti l'oggetto dopo aver trasformato gli input ricevuti dal mondo esterno in dati, invia l'informazione al server il quale, dopo un'e-laborazione degli stessi, formula dei comandi da inviare all'oggetto.

Nel mondo dell'IoT i dati condivisi sono in continuo aumento, innescando una serie di progressi importanti anche da un punto di vista economico, andando ad incidere significativamente sulla "catena del valore" (value chain). Attraverso lo studio delle informazioni presenti ,si potrà aumentare l'efficienza di un servizio oppure migliorare la user experience di una applicazione ecc. Muovendoci verso un modo sempre più connesso, nove problematiche riguardanti la privacy e la sicurezza emergono. Molto spesso per ridurre i costi di produzione e di sviluppo di questi oggetti smart, le aziende tendo a ridurre gli investimenti nell'R&D (Ricerca

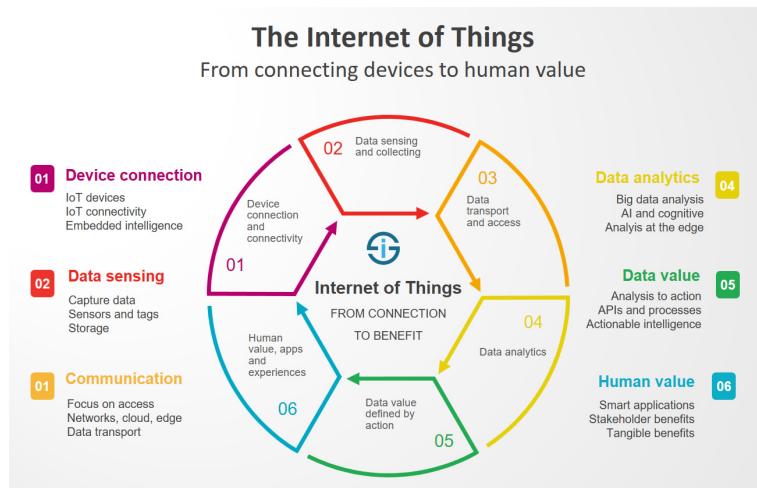


Figura 1.1: Numero di dispositivi per anno

e Sviluppo), andando a produrre dispositivi con un software non aggiornato o con componenti hardware di bassa qualità. Sono già numerosi i casi di attacchi hacker i quali, avvalendosi delle fallo presenti nei dispositivi, riescono ad entrare in possesso della rete ai cui il dispositivo è collegato

1.1 La diffusione dell'Internet delle cose

Nel 2008 il numero di oggetti quali personal-computer, server, telefoni cellulari, connessi ad internet ha superato il numero di persone presenti nell'intero pianeta. Il continuo sviluppo tecnologico, la sempre maggior facilità d'uso e l'abbattimento dei costi, ha reso disponibile al mondo consumer tecnologie che fino a poco tempo fa erano destinate ad aziende ed università. Con l'avvento dell'IoT si prevede una crescita esponenziale di devices connessi ad Internet; secondo una stima da parte di Gartner, il numero di smart device presenti nell'anno 2020, sarà superiore a 20 miliardi ?? Inoltre è proprio il lato consumer che ne fa da padrone con ben \$5.2 miliardi di dollari investi in prodotti quali smart TV, set-top box e smart cars.

Categoria	2016	2017	2018	2019
Consumer	3963	5244,3	7063,3	12863
Business	1418	2135,4	4152,7	6171
Totale	6381	8380	11196	20415

Tabella 1.1: Stima di dispositivi IoT (Milioni di unità) Gartner[1]

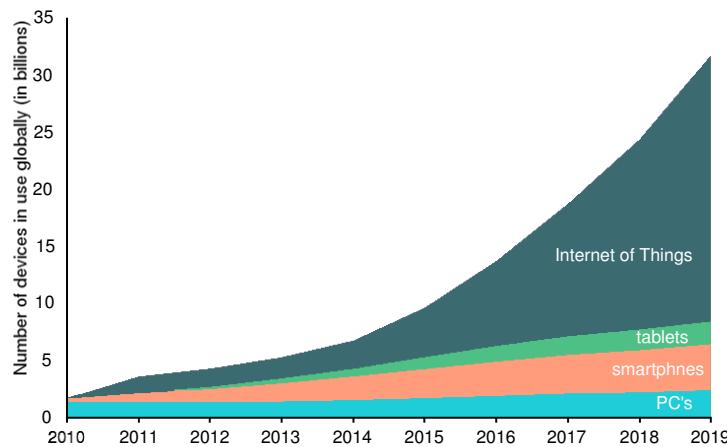


Figura 1.2: Numero di dispositivi per anno

1.2 Business

Considerando le statistiche precedenti immediato notare come l'IoT sia un business che agisce in maniera tutti i settori in maniera trasversale. Se da molto tempo si parla di domotica e smart city, tramite l'abbattimento dei costi dei vari dispositivi nuovi mercati e nuove possibilità di investimento sono nate. Prendiamo come esempio l'agricoltura di precisione, che grazie a sensori in grado di estrapolare dati come l'umidità del suolo, l'indice di piovosità e l'umidità delle foglie, permettono all'agricoltore, tramite l'analisi dei dati raccolti, di capire quando è il momento di intervenire per il trattamento delle colture; permettendo l'incanalazione delle risorse impiegate, aumentando la produttività . Questo voleva essere solo un esempio della vastità delle opportunità offerte dall'IoT. Gartner, si stima che entro il 2020 la cifra investita nell'industria del IoT sarà pari a circa \$3,000,000 milioni di dollari con un investimento annuo di circa \$500,000 milioni di dollari [1].

1.3 Big Data

Oltre all'innumerabile quantità di dati che verrà prodotta da questi milioni di devices intelligenti, noi stessi, navigando il web produciamo una grande quantità di dati. Con il termine Big Data si vuole rappresentare l'insieme di tutti i dati eterogenei che ogni giorno vengono prodotti e scambiati nella rete. Con il progredire della tecnologia il dataset (aggregazione di dati) a disposizione delle aziende è in continuo aumento. Secondo un articolo pubblicato da Verizon, si stima che il 92% delle aziende usa meno del 25% dei dati raccolti e che solo la metà di esse prevede di riuscire a fare fruttare più del 25% di dati nei prossimi due anni [?]. Con "Data mining" o "Data analytics" si identificano tutte le tecniche e le metodologie finalizzate all'estrazione di sapere e conoscenza partendo da una vasta mole di dati. L'enorme disponibilità di ogni sorta di informazione è una prospettiva apre innumerevoli scenari di ricerca; ad esempio, predire con largo anticipo la diffusione di una malattia epidemica permette di prioritizzare gli interventi sanitari preventivi nelle aree più bisognose. Pur avendo benefici incontestabili, per'ò, si presenta la possibilità, seppur remota, di risalire alle fonti di questa conoscenza e ai dati personali di singoli, specifici individui. Con "dato personale" si intende qualsiasi informazione che identifica o rende identificabile una persona fisica. Generalmente si distingue tra dati identificativi (dati anagrafici, fotografie, ...) e dati sensibili, che possono rivelare "l'origine razziale ed etnica, le convinzioni religiose, filosofiche o di altro Oggi-giorno, gran parte delle aziende sono impegnate nell'attuazione del data mining, considerandolo un investimento a lungo termine. E molto comune che un dataset includa, nella sua forma originale, informazioni che sono riconducibili a specifici individui - un nome, una data di nascita, un indirizzo IP. Ciò diventa potenzialmente pericoloso nel momento in cui si dispone di una chiave per collegare dati su uno stesso individuo provenienti da fonti diverse - informazioni sanitarie, preferenze e opinioni espresse sui social network, dati collegati alle spese online e ai metodi di pagamento.

1.4 La tecnologia alla base dell'IoT

Nell'industria il concetto di M2M (Machine to Machine) non è un concetto nuovo, già Kevin Ashton, durante la presentazione in cui introdusse il

termine IoT, comprese le potenzialità della tecnologia RFID applicate alla supply chain. Dal 1999 ad oggi molte cose sono cambiate, ma molte domande non hanno ancora trovato una risposta. Come accadde agli albori di Internet, quello che manca al modo dell'IoT è una standardizzazione dei protocolli e del linguaggio con cui questi oggetti devono comunicare. Già alcune aziende del calibro di Samsung con la piattaforma artik , Zigbee con DotDot e Google con Weave. Ognuna di queste soluzioni punta a creare un linguaggio comune per i vari oggetti smart, in questo modo il sviluppo e l'integrazione risulterà più semplice, velocizzando il time to market dei prodotti. Oltre alla mancanza di un linguaggio comune , l'IoT necessita anche di uno una architettura bottom up suddivisa in tre livelli.

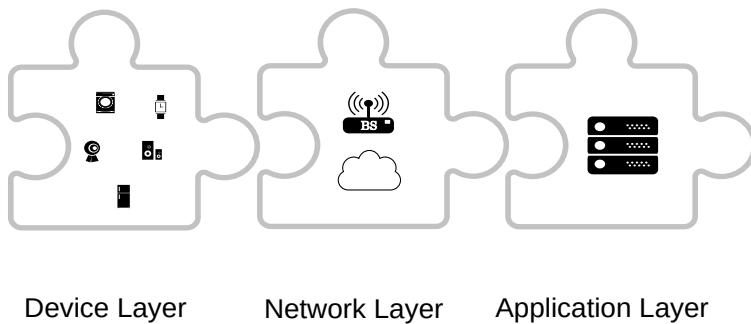


Figura 1.3: Layer del IoT

- **Device layer** o sensor layer, è il layer più basso. Esso raggruppa tutti i gli oggetti "smart". Questo layer è quello che mette in comunicazione il mondo reale con gli altri layer superiori. A loro spetta lo scopo di convertire una misura fisica in un segnale interpretabile da altri calcolatori. La maggior parte di questi sensori, utilizzerà una connessione Bluetooth, ZigBee, Wifi o una si baserà su una rete LPWAN per comunicare il dato al layer superiore.
- **Network layer** o mediation layer raggruppa l'intera infrastruttura di rete e gateway che ricevono i dati da i vari sensori. Questo layer è semplicemente un layer di mediazione dove l'informazione (dato) non viene alterata ma semplicemente trasmesso all'Application layer.
- **Application layer** è il layer nel quale l'informazione viene immagazzinata ed elaborata. Questo layer è il più importante, e qui dove

[Riscrivere](#)

il dato viene trasformato da una semplice misurazione fisica ad una possibile revenue per l'azienda che lo gestisce.

Con questa tesi si vuole approfondire lo stato dell'arte del network layer andando a esporre le principali tecnologie ad oggi presenti sul mercato. In particolare verrà posta l'attenzione sulla tecnologia LoRaWAN e l'integrazione con il framework Kura/ESF sviluppato da Eurotech.

Capitolo 2

IoT

Sempre più spesso si parla di Internet delle cose o IoT, con questo termine si intende un'evoluzione delle applicazioni legate al settore mobile, al settore della home automation e al settore embedded. In questo scenario ogni oggetto ,il quale implementa un sensore al suo interno, disporrà di una connessione ad Internet. Avvalendosi di questa connessione , i vari dati raccolti potranno essere inviati ad un server il quale avrà il compito di elaborarli e fornire delle applicazioni in grado di adattarsi all'utente finale. Sebbene il numero di dispositivi "smart" è in rapida crescita, i servizi che l'IoT offre saranno il vero valore aggiunto. Aziende e enti pubblici stanno investendo e mettendo a disposizione sempre più servizi in grado di adattarsi, in modo dinamico, a seconda dei dati raccolti tramite i vari consumatori . Gartner stima che entro l'anno 2020, saranno presenti circa 20 miliardi di dispositivi IoT e che l'investimento annuo in questo settore sarà pari a circa \$5000 milioni di dollari [1].

Categoria	2016	2017	2018	2019
Consumer	3963	5244,3	7063,3	12863
Business	1418	2135,4	4152,7	3171
Totale	6381	8380	11196	20415

Tabella 2.1: Stima di dispositivi IoT (Milioni di unità) Gartner[1]

In contrasto a tutto ciò, la capacità delle aziende di applicare tecniche di data analytics, per far fruttare la grande quantità di dati ricevuti, deve ancora maturare. Secondo un articolo pubblicato da Verizon, si stima che il 92% delle aziende usa meno del 25% dei dati raccolti e che solo il 50%

di esse prevede di riuscire a fare fruttare più del 25% di dati nei prossimi due anni [5]

Questa rapida crescita ha portato alla ricerca e sviluppo di nuove soluzioni tecnologiche per supportare il carico di dispositivi simultaneamente connessi . Per non alterare il *QoS* Quality of Service , hardware e software dovranno essere rivisti insieme alla network topology utilizzata. I punti fondamentali sui quali queste tecnologie sono state sviluppate sono:

- **Scalabilità:** Dato l'elevato numero di devices previsti nei scenari urbani ed industriali, la network technology alla base della rete dovrà essere adattabile, in modo dinamico, al carico di dispositivi connessi.
- **Costo unitario:** Il costo del end device, dovrà essere conveniente per garantire la più ampia fetta di mercato.
- **Durata della batteria:** La maggior parte dei dispositivi sarà limitata tramite batteria. Inoltre ogni device dovrà garantire una durata minima dell batteria di circa una decina d'anni.
- **Costo computazionale:** La modulazione, alla base di queste nuove tipologie di rete, dovrà essere concepita in modo da non richiedere un costo computazionale elevato .
- **Raggio d'azione:** La necessità di utilizzare questi devices in ambienti difficili o rurali, rende necessario poter instaurare una comunicazione con devices che si trovano a chilometri di distanza.
- **Sicurezza:** Lo scambio dei dati dovrà avvenire in maniera sicura, implementando algoritmi di cifratura dei dati o procedure di handshaking.
- **Tolleranza ai guasti:** Il mal funzionamento o il guasto di un nodo della rete, non dovrà compromettere il funzionamento dell'intera rete a lui connessa.

Vari tipi di architetture di rete sono stati proposti per realizzare questa nuova infrastruttura. Per quanto le varie proposte si basano su tecnologie differenti, è possibile individuare tre layer comuni

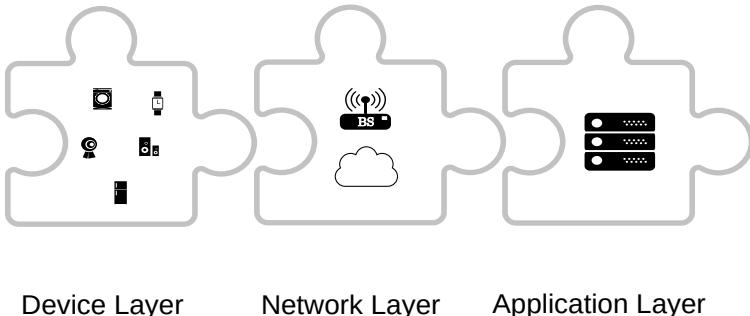


Figura 2.1: Layer del IoT

- **Device layer** o sensor layer, è il layer più basso. Esso raggruppa tutti i gli oggetti "smart". Questo layer è quello che mette in comunicazione il mondo reale con gli altri layer superiori. Esistono diversi tipi di sensori ognuno con Sensor layer which is the lowest layer consisting of integrated smart objects along with the sensors. These sensors empower the interconnection of the real-world and the physical measurements for real-time information process. There are a variety of sensors where each is used with different purposes. The sensors can measure air quality, temperature, electricity and movement. In addition, sensors can have a memory to record a definite number of measurements [8–10]. A sensor can measure a physical property for further conversion into understandable signal. Most sensors entail connectivity to the sensor gateways (aggregators) in the form of personal area network (PAN), such as Bluetooth, ZigBee, and Ultra-Wideband (UWB) or a local area network (LAN), and including WiFi and Ethernet connections. The wireless sensor networks (WSNs) represents sensors using low data rate connectivity and low power that form networks.
- **Network layer** La struttura della rete, la quale permette di connettere i vari devices in modo che possano scambiare i dati tra di loro o inviarli ad un data-center.
- **Application layer** il quale interpreta e utilizza i dati ricevuti.

Attualmente sono diversi i concorrenti che provano ad affermarsi nel settore del IoT proponendo soluzioni diverse. Nei seguenti capitoli sarà

effettuata un analisi generale delle varie soluzioni proposte, in particolare verrà analizzata la tecnologia Lora ed il protocollo LoRaWAN.

Capitolo 3

LPWAN

Il principale problema che si presenta nella ottica del IoT è avere una infrastruttura di rete capace di gestire il traffico di milioni di dispositivi contemporaneamente connessi. Fino ad oggi la principale tecnologia wireless usata nelle comunicazioni M2M *Machine to Machine* è stata la rete cellulare. La scelta della rete 2G, 3G, 4G è svantaggiosa nel ambito del IoT poiché offre data-rate molto maggiore rispetto a quello normalmente utilizzato dalle applicazioni M2M, comportando l'uso di moduli radio sovradimensionati e andando ad aumentare di molto il prezzo per unità. Inoltre, l'elevato consumo energetico e il prezzo svantaggioso degli abbonamenti offerti dagli operatori telefonici, ha portato alla ricerca di nuove soluzioni basate su frequenze ISM o licenziate. In questo capitolo verranno elencate le principali tecnologie presenti nel mercato, mettendone in evidenza le differenze che le contraddistinguono.

3.1 LPWAN

Per colmare il gap tra tecnologie esistenti e la necessità di connettere milioni di devices diversi, sono nate le LPWAN *Low power wide area network*. Con questo termine, si identificano tutte quelle reti ideate appositamente per l'IoT, le quali garantiscono una ampio raggio di azione, andando a sacrificare il bit rate e la complessità dei moduli radio.

In questo contesto, i maggiori competitor sono Lora, Sigfox, NB-IoT, EC-GSM-IoT e LTE-M. Anche se ognuna di queste reti punta a ottenere la leadership del mercato, esse implementano soluzioni tecniche molto diverse tra di loro, ognuna delle quali ha vantaggi e svantaggi a seconda del contesto nel quale viene utilizzata.

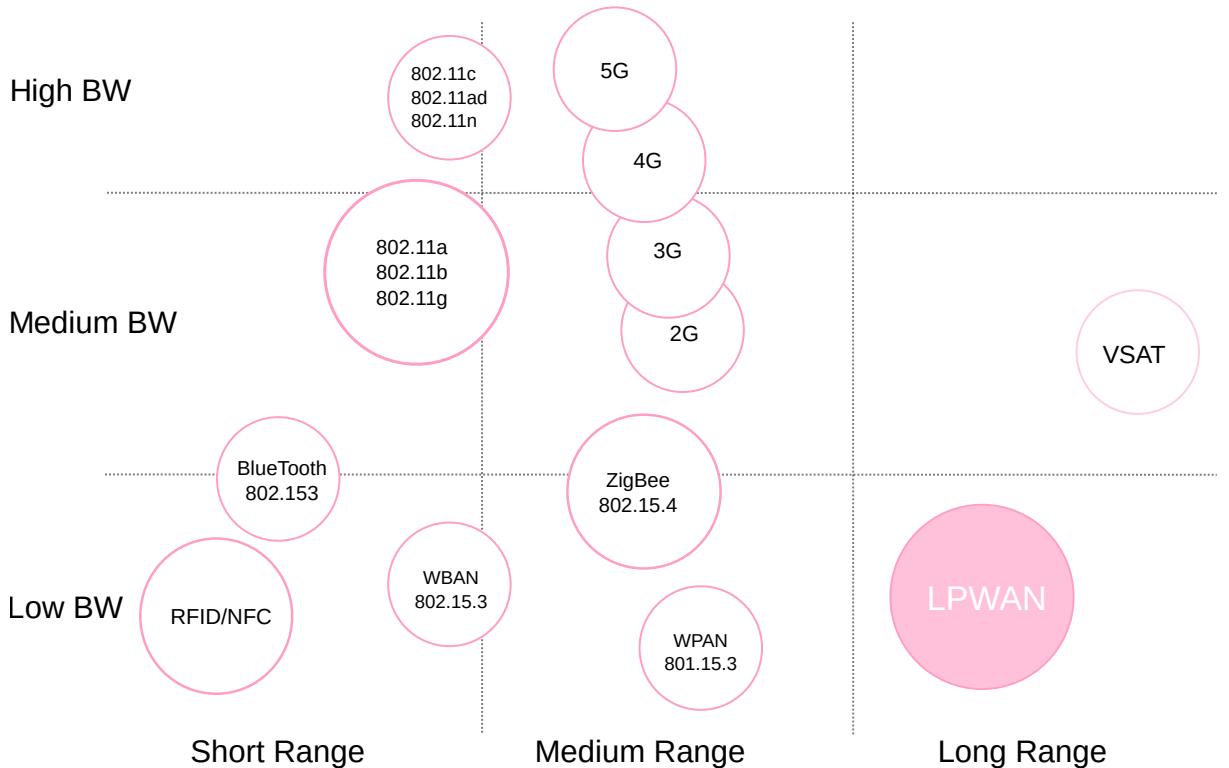


Figura 3.1: Comparazione tipologia di reti

3.2 NB-IoT

Narrowband IoT (NB-IoT) o LTE Cat NB1 è uno standard certificato nella release 13 del 3GPP, la quale riutilizza le infrastrutture già presenti, quali 2G, 3G, 4G per la rapida realizzazione di una rete LPWA per l'IoT. Focalizzandosi sulla durata della batteria, i moduli NB-IoT risultano avere un costo all'unità minore del 75% rispetto ad un normale modulo LTE. Basato su frequenze licenziate, NB-IoT è in grado di offrire tre diversi scenari di sviluppo [2]

- *standalone*, utilizzando qualsiasi spettro disponibile del operatore.
- *guard band*, utilizzando lo spettro libero presente tra due bande radio, per prevenire interferenze.
- *in band*, utilizzando lo stesso spettro della banda LTE.

L'obiettivo che NB-IoT si prefigge è quello di mettere a disposizione una tecnologia con una elevata copertura ed un basso data-rate. La possibili-

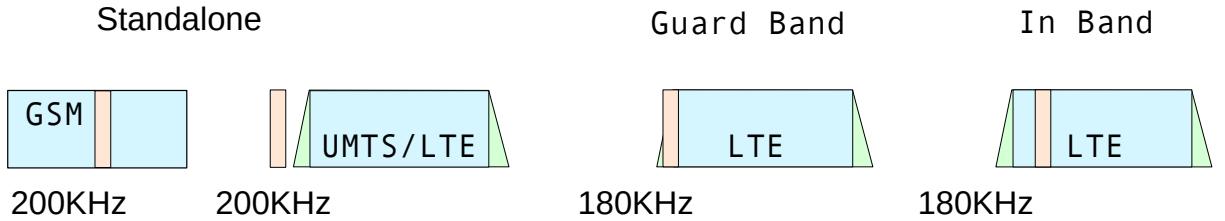


Figura 3.2: Modalità di funzionamento NB-IoT

tà di riutilizzare strutture già esistenti, ed il basso costo per device , rendendo NB-IoT, una delle tecnologie che sta riscuotendo maggiore successo nel abito IoT.

3.3 LTE-M

Dalla realise 8 del 3GPP, diverse nuove tipologie di rete LTE sono disponibili. La categoria che offre le migliori performance batteria/data-rate è la categoria LTE Cat-M1 o LTE-M. LTE-M a differenza del NB-IoT, rispecchia LTE in pieno, quindi implementa due moduli di ricezione, è full duplex supportando la Frequency Division Multiplexing (FDM) e Time Division Multiplexing (TDM). Risultando adatto per applicazioni con esigenze diverse da quelle del NB-IoT, è in grado di raggiunger i 5Mbps in uplink e 10[Mbps] in downlink teorici. Questo tipo di connessione sarà utile per tutte quelle applicazioni in cui è richiesta una elevata sicurezza del dato da trasmettere, come ad esempio applicazioni di video-sorveglianza o automotive .Questa tecnologia ,già disponibile negli Stati Uniti tramite la rete Verizon, è in fase di roll out per molti operatori europei.

3.4 EC-GSM-IoT

EC-GSM-IoT si basa su funzionalità aggiuntive a partire da EGPRS che consentono ad una rete GSM/EDGE di essere predisposta per fornire servizi IoT. Lo standard è stato pensato in particolare per quei Paesi, come quelli in via di sviluppo, dove una rete LTE non è ancora disponibile. L'occupazione spettrale di ogni canale corrisponde a 200 kHz. Tuttavia, al fine di dispiegare EC-GSM-IoT, si richiede una banda utile di 2.4 MHz per permettere il frequency hopping , che, con l'aggiunta di 2 canali di guar-

dia di 200 kHz ciascuno agli estremi della banda, porta l'occupazione di banda complessiva a 2.8 MHz. La potenza di trasmissione del Il data rate di picco raggiungibile sia in DL sia in UL è di 491 kbps, mentre il valore mediato nominale è di 98 kbps sia in DL sia in UL. Al fine di soddisfare i requisiti di capacità (più di 50.000 terminali in ogni singolo settore di una cella trisetoriale).

La figura 3.1 riassume in breve le varie caratteristiche delle reti cellulari facenti parte della categoria LPWA

	LTE-M	NB-IoT	EC-GSM-IoT
Dispiegamento	In-band LTE	In-band LTE, Guard-band LTE, Stand-alone	In-band GSM
Copertura radioelettrica	155.7 dB (20 dBm)	164 dB (23 dBm)	154 dB (23 dBm) 164 dB (33 dBm)
Canalizzazione	1.08 MHz	180 KHz	200 kHz
Banda minima richiesta	1.4 MHz	180 kHz (In-band LTE, Guard-band LTE) 200 kHz (Stand-alone)	2.4 MHz (con servizi voce GSM) 600kHz (senza servizi voce GSM)
Duplexing	HD-FDD, FD-FDD, TDD	HD-FDD	HD-FDD
Data rate di picco	HD-FDD e FD-FDD 1 Mbps DL HD-FDD e FD-FDD 1 Mbps UL	In-band LTE 170 kbps DL Stand-alone 226.7 kbps DL 250 kbps UL	491 kbps DL 491 kbps UL
Data rate mediati nominali	FD-FDD 800 kbps DL FD-FDD 1 Mbps UL HD-FDD 300 kbps DL HD-FDD 375 kbps UL	21.25 kbps DL 62.5 kbps UL	98 kbps DL 98 kbps UL
Classi di potenza dei terminali	20 dBm / 23 dBm	20 dBm / 23 dBm	23 dBm / 33 dBm

Tabella 3.1: Comparazione reti cellulari per l'IoT

3.5 Sigfox

SigFox, azienda francese, sta sviluppando in partnership con altri operatori di rete una soluzione LPWAN basata sulla sua tecnologia. Sigfox punta alla costruzione di una rete mondiale proprietaria basata su frequenze ISM. Correntemente SigFox è presente in Francia, Belgio, Olanda e Portogallo come illustrato nella figura 3.3.

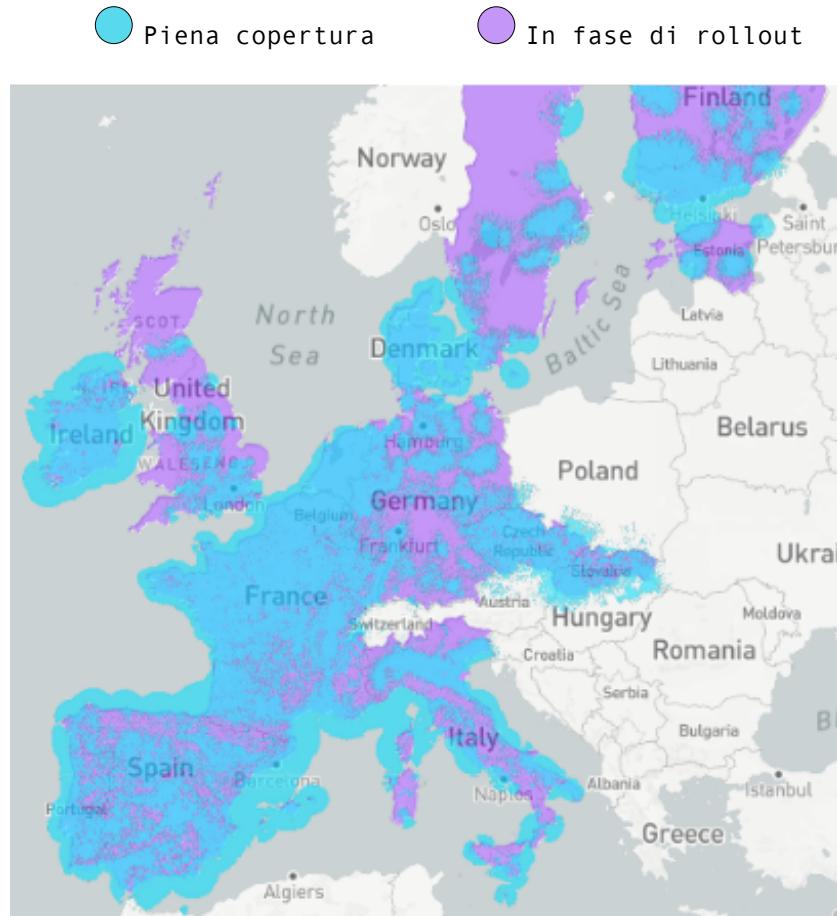


Figura 3.3: Mappa copertura SigFox

Gli end-devices comunicano con le varie base stations usando una modulazione (BPSK) *Binary Phase Shift Keying* con una banda di soli 100[Hz]. Per via delle regolazioni vigenti nello spettro ISM, è per garantire una durata della batteria pari ad una decina di anni, il numero massimo di messaggi inviabili in un giorno è 140, con lunghezza del payload pari a 12[byte] e un throughput pari a 100[bps]. SigFox si colloca come rete LPWAN con il minore throughput, limitando il numero di use-case possibili. Inizialmente SigFox supportava solo comunicazioni unidirezionali, successivamente, ha introdotto la possibilità di avere una comunicazione bidirezionale, limitando il numero di byte trasmissibili da gateway a devices a 4-8 bytes per giorno.

3.6 LoRaWAN

LoraWAN è una tecnologia di modulazione wireless semi-proprietaria sviluppata da Semtech. Essa è composta da un layer fisico ,proprietario, che prende il nome di *Lora*[3] , e una parte libera chiamata LoRaWAN[4] nella quale viene definito un protocollo di comunicazione, il quale usa LoRa come layer fisico. Basandosi su una tecnica di comunicazione a *spread spectrum*, LoRa è in grado di instaurare una comunicazione bidezionale tra device e gateway. I punti chiave dei questa tecnologia, sono il grande raggio di copertura , il basso consumo energetico e la capacità di adattare in maniera dinamica il data rate, il quale può variare dai 0.3 ai 50[Kbps] a seconda dell'utilizzo. Come per SigFox, la tecnologia sviluppata da Semtech, si basa sulle bande ISM, inoltre Essendo il protocollo LoRaWAN open source, si ha la possibilità di creare delle reti pubbliche o private senza disporre di alcuna licenza, riducendo così il time to market di questa tecnologia. Progetti come The Things Network mirano a creare una rete LoRa ,pubblica è privata, a livello globale.

3.7 Osservazioni

In questo mercato frammentato, non è semplice capire quale tecnologia sia adatta a ricoprire una data applicazione. Essendo questi standard molto giovani, è difficile comprendere le reali potenzialità di ognuna di queste soluzioni. Quello che è possibile prevedere, sarà un incremento esponenziale di device che stanno alla base della piramide in figura 3.4, devices i quali potranno essere utilizzati in innumerevoli settori, non ancora esplorati dalle tecnologie attuali, come per esempio i contatori della dell'acqua, applicazioni per l'agricoltura di precisione ecc.

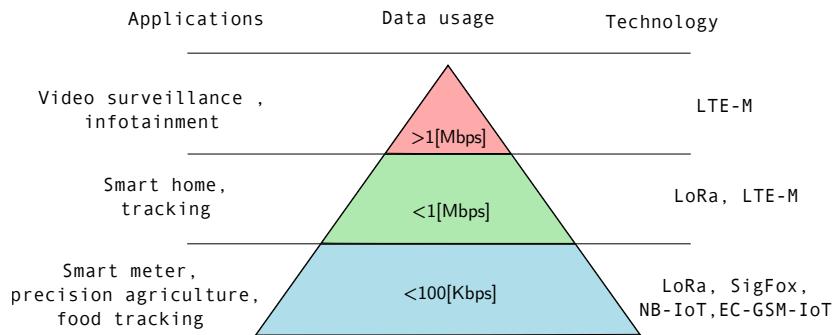


Figura 3.4: Capacità delle reti LPWA

Per le aziende, che si apprestano ad investire sul mondo dell'IoT, la scelta della corretta tecnologia su cui andare a sviluppare i loro servizi non risulta semplice, in quanto, fattori quali sicurezza, aggiornamenti software, affidabilità devono essere ancora testate a pieno. Con la figura 3.5 si vuole riassumere in breve i punti chiave delle tecnologie appena trattate.



Figura 3.5: Comparazione feature reti LPWAN

Nel prossimo capitolo verrà analizzata in dettaglio la soluzione che

Semtech propone, approfondendo il layer fisico *Lora* e la struttura del protocollo LoRaWAN.

Capitolo 4

LoRa

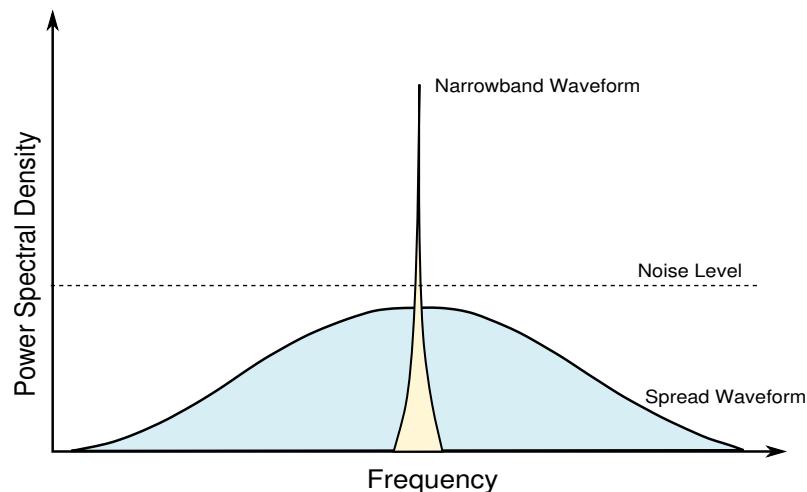


Figura 4.1: Comparazione tra UNB e SSP

4.1 LoRa

Lora è una tecnologia di modulazione wireless semi-proprietaria sviluppata da Semtech. Lora è composta da un layer fisico ,proprietario, che prende il nome di *Lora*[3] , e una parte libera chiamata LoRaWAN[4], la quale definisce un protocollo di comunicazione, il quale usa LoRa come layer fisico. I punti chiave di questa tecnologia, sono il grande raggio di copertura e il basso consumo energetico per effettuare uno scambio

dati. Per le comunicazioni , vengone utilizzata la banda ISM, grazie alle quale è possibili costruire una rete ,che implementa questa tecnologia, senza possedere alcuna licenza.

Completare e riscrivere

4.2 CSS

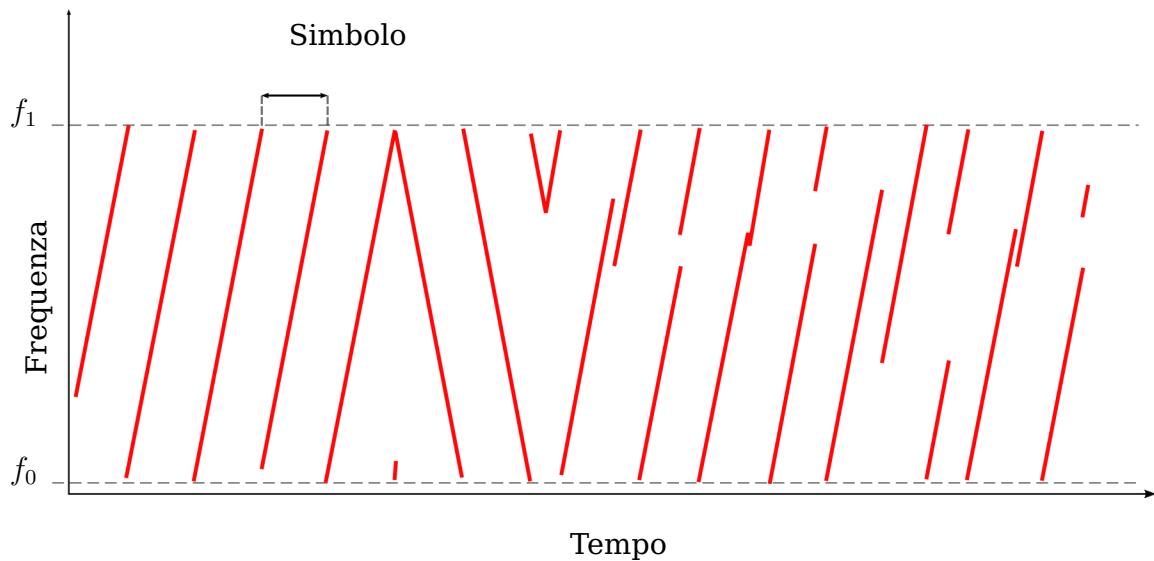
Alla base del layer fisico troviamo la modulazione Chirp Spread Spectrum (CSS). Questo tipo di modulazione, ottenuta facendo variare in modo lineare, la frequenza di un segnale sinusoidale di durata finita, chiamato chirp. In questo modo è possibili distribuire l'informazione su di un spettro maggiore rispetto a quello normalmente utilizzato. In questo modo è possibile ottenere numerosi vantaggi quali

- Uno spettro idealmente rettangolare, il quale utilizza tutta la capacità del canale e fornisce un ottima densità spettrale di potenza rispetto agli altri tipi di trasmissione.
- **Segnali di tipo Chirp** possono essere sovrapposti in modo tale da poter variare il data-rate e l'energia per bit in modo adattativo per aumentare l'efficienza complessiva.
- **Hanno guadagno programmabile**, il quale permette di raggiungere distanze considerevoli mantenendo un buon SNR .
- **Ottima risoluzione nel asse del tempo**, quindi ottimi per coprire lunghe distanze.
- **Immuni al effetto Doppler**
- **Immuni alle degenerazioni per effetto di multipath**

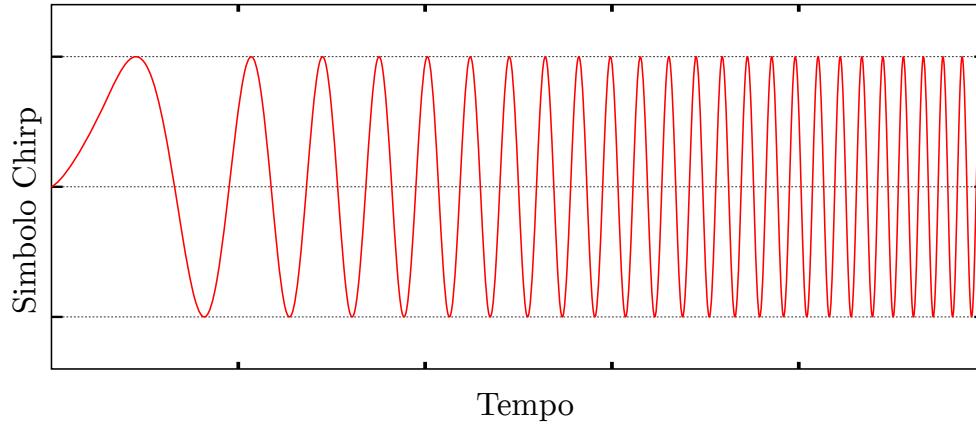
Trovare termine per multipath

Un segnale di tipo *Chirp* assume valori compresi nella banda di frequenza $B = [f_0, f_1]$, il suo andamento è di tipo monotono , crescente o decrescente compreso tra le due frequenze f_0 e f_1 . Quindi possiamo parlare di *Up-chirp* o di *down-chirp*.

Uno degli aspetti principali del layer fisico, è la possibilità di adattare il numero di bit codificati in un simbolo in base alle varie esigenze. Questo parametro che prende il nome di *Spread Factor*, permette a parità di potenza impiegata nella trasmissione, di ottenere distanze maggiori andando ad aumentare il tempo totale di trasmissione secondo la seguente



(a) Segnale Chirp nel dominio della frequenza



(b) Simbolo codificato col metodo Chirp nel dominio del tempo

formula: In questo modo è possibile, inviare segnali a distanze maggiori, utilizzando la stessa potenza trasmittiva.

Questo è possibile grazie ad un adattamento permettendo a parità di potenza di riuscire a raggiungere distanze maggiori andando a varia- re, quello che nella documentazione ufficiale è chiamato *Spread Factor*. Tutto ciò significa che (SF) rappresenta 2^{SF} bits in un simbolo. Un diffe- rente SF implica anche un tempo di comunicazione secondo la formula

$$T_s = \frac{2^{\text{SF}}}{B}. \quad (4.1)$$

Dalla quale si evince che andando ad aumentare lo spread factor di una unità, mantenendo una lunghezza di banda fissa B , otteniamo un raddoppio nel tempo di trasmissione. Il fatto di avere messaggi più lunghi, conferisce un robustezza superiore alle interferenze e al rumore. In discapito a tutto ciò, il fatto di dover codificare il messaggio con un maggiore numero di simboli, aumenta la possibilità di errore alla ricezione.

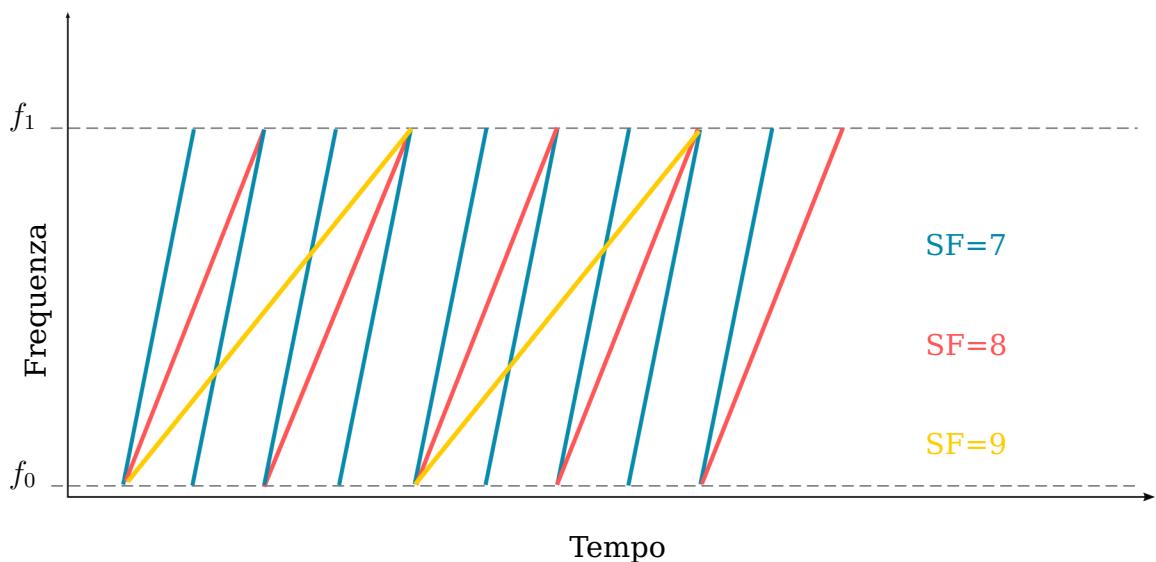


Figura 4.3: Comparazione simbolica dei vari SF

Questa nuovo modo di trasmettere i vari dati porta con se molti van- taggi.

- La modulazione Lora è semplice da implementare nei dispositivi, quindi i moduli radio al loro interno saranno economici.

- Resistente alle interferenze in banda e fuori banda.
- Resistente all'effetto Doppler, in questo modo è possibili utilizzare cristalli non molto accurati al interno dei devices, in modo tale da abbattere i costi di produzione.
- Il modulo di ricezione è altrettanto semplice da costruire, quindi non molto costoso.

Analizzando lo spettrogramma di una comunicazione Lora è possibile distinguere in modo semplice le varie parti che compongono il pacchetto trasmesso.

Rivedere i vari punti e cambiare il linguaggio

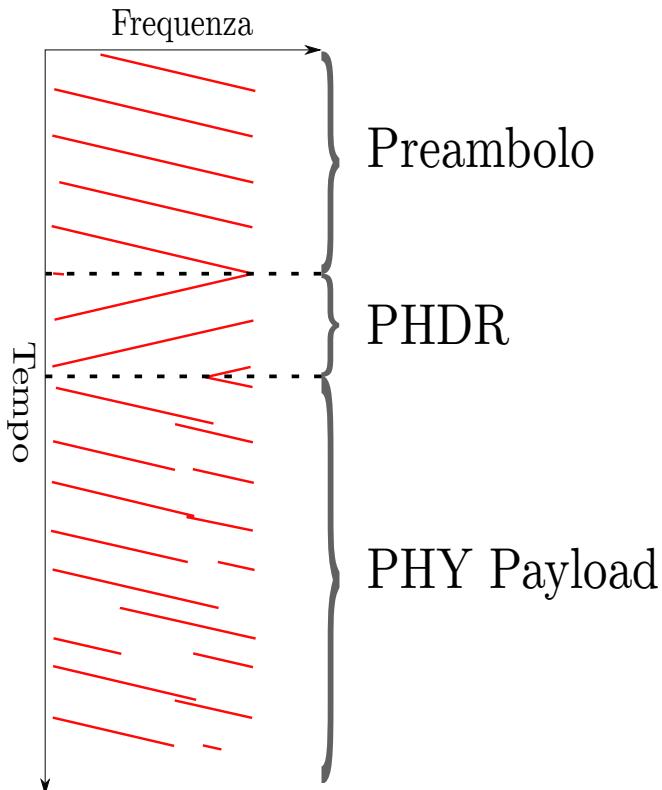


Figura 4.4: Struttura pacchetto Lora

Osservando l'immagine precedente è facile notare come è strutturato un pacchetto. La prima parte della trasmissione, nonché il preamble stesso è codificato con una serie di *up-chirp*. In questo modo il gateway riesce a sintonizzarsi sulla stessa frequenza del dispositivo trasmittente.

Successivamente vengono inviati una serie di *down-chirp* i quali rappresentano l'header codificato dal layer fisico, dove sono presenti dei bit di controllo e correzione degli errori. L'ultima parte rappresenta il payload codificato dal PHY, in questa parte, formata solo da *up-chirp* sono presenti dei salti, i quali sono un chiaro segno della presenza di dati codificati.

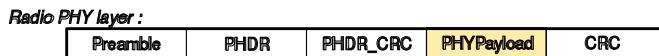


Figura 4.5: Pacchetto codificato dal layer fisico

Aggiungere immagine e finire la spiegazione

Per quanto riguarda la struttura interna dei moduli radio, non si hanno molte informazioni dato che la tecnologia è proprietaria di Semtech. Nella documentazione ufficiale è presente una rappresentazione grafica dei vari blocchi presenti al interno dei moduli radio.

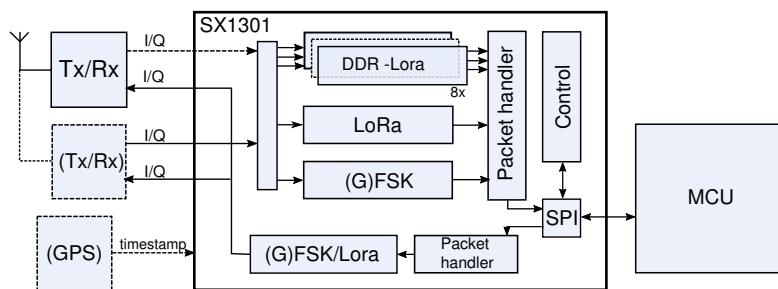


Figura 4.6: Struttura interna ricevitore SX1301

Dalla figura 4.6 è evidente che il gateway rimane in ascolto su 8 frequenze diverse, le quali permettono di coprire tutti i vari SF. Tutto ciò è possibile anche grazie al fatto che i vari SF sono quasi ortogonali fra di loro, perciò il ricevitore è in grado di ricevere pacchetti da SF diversi contemporaneamente. Questo tipo di ricevitore può demodulare fino ad un massimo di 8 pacchetti contemporaneamente. Inoltre questa topologia permette di avere vari vantaggi

- I vari nodi della rete, possono cambiare frequenza in ogni trasmissione in modo casuale, andando a migliorare di molto la robustezza del sistema alle varie interferenze.

- Non è necessario avere tabelle contenenti informazioni riguardanti il data-rate dei vari nodi. Ogni data-rate viene demodulato contemporaneamente.
- È possibile utilizzare più antenne nel gateway per realizzare il cosiddetto true antenna diversity, per aumentare la robustezza al multi-path

Riguardare ultimo punto della documentazione pagina 14

4.3 LoRaWAN

Chiedere se il termine protocollo è appropriato

La parte non proprietaria del protocollo è chiamata *LoRaWAN*, in essa viene descritta la topologia di rete, la struttura dei pacchetti e le varie classi di device possibili.

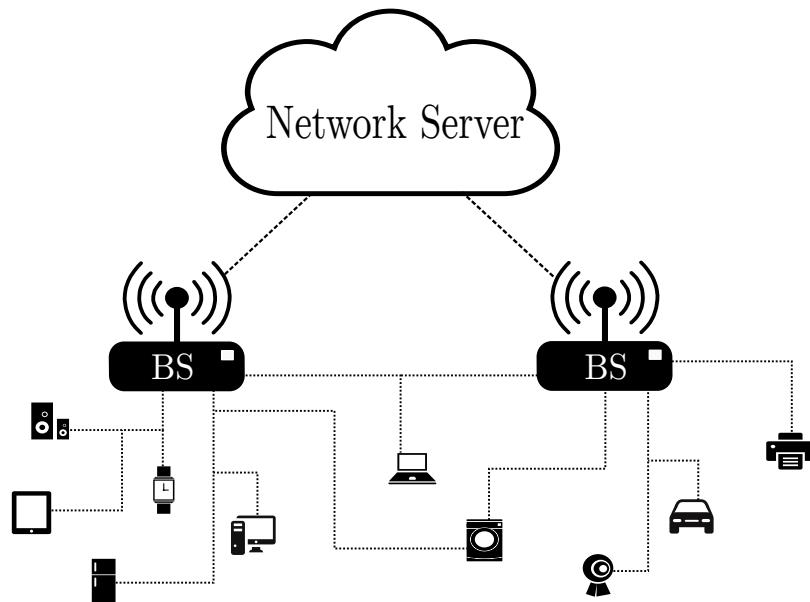


Figura 4.7: Struttura rete a stella LPWAN

La topologia di rete utilizzata, è una topologia a stella, nella quale molti dispositivi sono connessi e comunicano con uno o più base station. Le BS non sono altro che dei ponti per poter trasmettere i messaggi ricevuti dai vari devices all Network Server, tramite una connessione ethernet, 3G o 2G. Per come è strutturata la rete, un messaggio inviato da

un singolo device, può essere ricevuto e inoltrato da più BS all Network Server.

Il NS ha il compito di interpretare e scartare i vari messaggi duplicati che arrivano, selezionare la BS più adatta per inviare il messaggio di downlink creando un database di tutti i vari devices presenti nella rete. Nella figura 4.8 è rappresentato lo stack del protocollo degli end-devices, gateway e network-server.

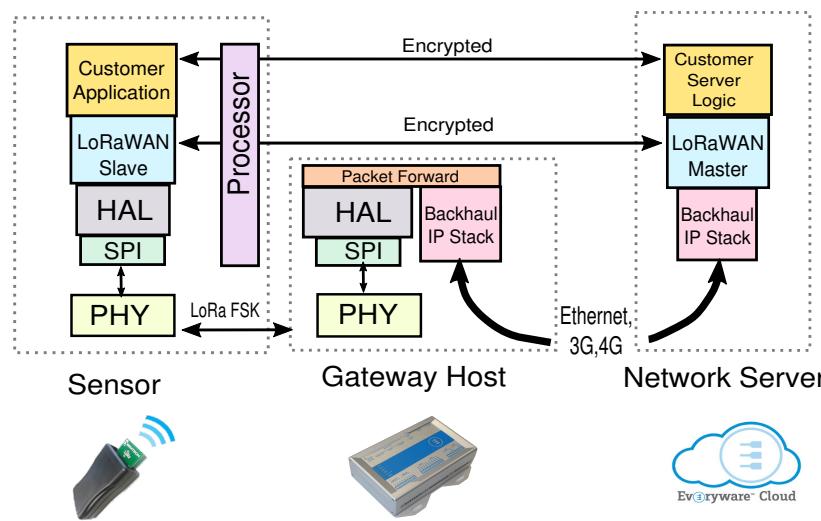


Figura 4.8: Stack del protocollo della rete LoRaWAN

Esistono tre classi di devices, le quali specificano i vari use-case per possibili.

- **Class A** è la modalità di funzionamento predefinita. In questa modalità il device si occupa solo di trasmettere i vari messaggi in maniera completamente asincrona. Eseguita la trasmissione, due finestre di ascolto vengono aperte nel end-device. La prima finestra rimane in ascolto nella stessa frequenza in cui il dato è stato comunicato, mentre la seconda rimane in ascolto su una frequenza nota a priori e comunicata tramite il MAC.
- **Class B** sono devices i quali sono sincronizzati con il NS tramite beacon packets. In questo modo hanno la possibilità di ricevere dati in un determinata finestra di tempo. In questa classe rientrano interruttori , attuatori ecc..

- **Class C** è riservata ai devices che hanno la possibilità di essere alimentati direttamente dalla rete elettrica, quindi possono mantenere il ricevitore costantemente in ascolto.

4.4 Frequenze

A seconda della regione in cui operano i devices, lo standard LoRaWAN definisce quali frequenze vengono occupate in base alle regolamentazione vigente in Europa Cina e Stati Uniti. Per ognuna di queste regioni, vengono definite la struttura del payload, la frequenza, lo spreading factor, e la massima lunghezza possibile del payload. Inoltre tutte le fre-

Stato	Frequenza [MHz]
Europa	868-870
US	902-928
China	779-787

Tabella 4.1: Bande di frequenza per le varie regioni

quenze sono comprese nelle bade ISM, e non sono particolarmente elevate, rendendole preferibili per le lunghe distanze rispetto a frequenze quali 2.4 [GHz] e 5[GHz]

Capitolo 5

Implementazione

Utilizzando il modulo SX1301 in combinazione con il gateway prodotto da Eurotech ReliaGATE 10-11, si è andato a sviluppare un software in grado di ricevere i pacchetti inviati da dispositivi LoRa e inviarli ad un Broker Mqtt.

5.0.1 SX1301

Nella tabella 5.1 sono riportate le caratteristiche elettriche massime del chip SX1301. Il Chip, supporta tensioni di alimentazione fino a 4V e come è possibile osservare il range di temperatura in cui il chip può operare è molto ampio, rendendolo ideali per applicazioni esterne ed interne.

Parameter	Symbol	Conditions	Value
IO power supply to VSS	$V_{DDIO,ABSMAX}$		-0.5 V to 4.0 V
Core power supply to VSS	$V_{DDCORE,ABSMAX}$		-0.5 V to 2.0 V
Storage temperature	$T_{J,STORE}$		-50 °C to 150 °C
Junction temperature	$T_{J,ABSMAX}$		-40 °C to 125 °C
Pin voltage on IO and Clock pins	$V_{DPIN,ABSMAX}$		-0.3 V to $V_{DDIO} + 0.3$ V
Peak reflow temperature	T_{PKG}		260 °C
Latchup	I_{LUP}	JESD78D, class I	+/-100 mA
Humidity	H_R		0 – 95 %
ESD	HBM	Human Body Model JESD22-A114 CLASS 2	2 kV
	CDM	Charged Device Model JESD22-C101 CLASS III	300 V

Tabella 5.1: Caratteristiche elettriche SX1301

Utilizzando i valori nominali riportati nella tabella 5.2, si hanno valori di corrente pari a 1[uA] in idle e di 5[mA] in pieno funzionamento. Il chip è equipaggiato con un connettore sma al quale è collegata una antenna

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Digital IO supply	V _{DDIO}	Operating Conditions for Electrical Specification	3.0		3.6	V
Digital core supply	V _{DDCORE}	Operating Conditions for Electrical Specification	1.75		1.85	V
Ambient operating temperature	T _A	With chip paddle soldered to PCB ground plan with minimum 100 cm ² air exposed area and heat sink	-40		85	°C

Tabella 5.2: Caratteristiche elettriche SX1301

omindirezionale, ideata per la frequenza 868[MHz] con un guadagno pari a 3dB.

5.0.2 ReliaGATE

Il gateway a cui è collegato il modulo SX1301 è il ReliaGATE 10-11 prodotto da Eurotech. Al suo interno troviamo un processore Texas Instruments TI AM335X Cortex-A8 equipaggiato con 512MB di RAM e 4GB di storage eMMC. Il ReliaGATE offre una vasta gamma di porte tra cui 232/485, 2CAN bus, 2 porte USB e 2 porte Ethernet, inoltre ha connettività Bluetooth, WiFi e GPS. Al suo interno è installato Everyware™ Software Framework (ESF), la versione commerciale del software Kura.

5.0.3 Architettura del software

Lo scopo di questa tesi era riuscire ad implementare dei moduli osgi, installabili al interno del framework ESF, in grado di controllare il comportamento del devices SX1301. In particolare utilizzando l'utility messa a disposizione da Semtech per l'interfacciamento con il dispositivo denominata packet forwarder, e l'utility LoRa Gateway Bridge , sotto licenza MIT, sviluppata da brocaar .

5.0.4 Semtech packet forwarder

Il packet forwarder, è un software il quale riceve o invia pacchetti radio Lora , tramite una connessione SPI con il device SX1301. Nel caso di ricezione di un pacchetto, l'applicativo incapsula i dati ricevuti in un formato IP/UDP, e li ritrasmette nella rete internet/intranet. Per la sua



Figura 5.1: Caratteristiche elettriche SX1301

configurazione viene utilizzato un file Json nel quale trviamo tutte le varie opzioni di configurazione per i moduli radio presenti al interno del chip.

```

1   "SX1301_conf": {
2     "lorawan_public": true,
3     "clksrc": 1,
4     "radio_0": {
5       "enable": true,
6       "type": "SX1257",
7       "freq": 867500000,
8       "rssioffset": -166.0,
9       "tx_enable": true
10      },
11    "radio_1": {
12      "enable": true,
13      "type": "SX1257",
14    }
  
```

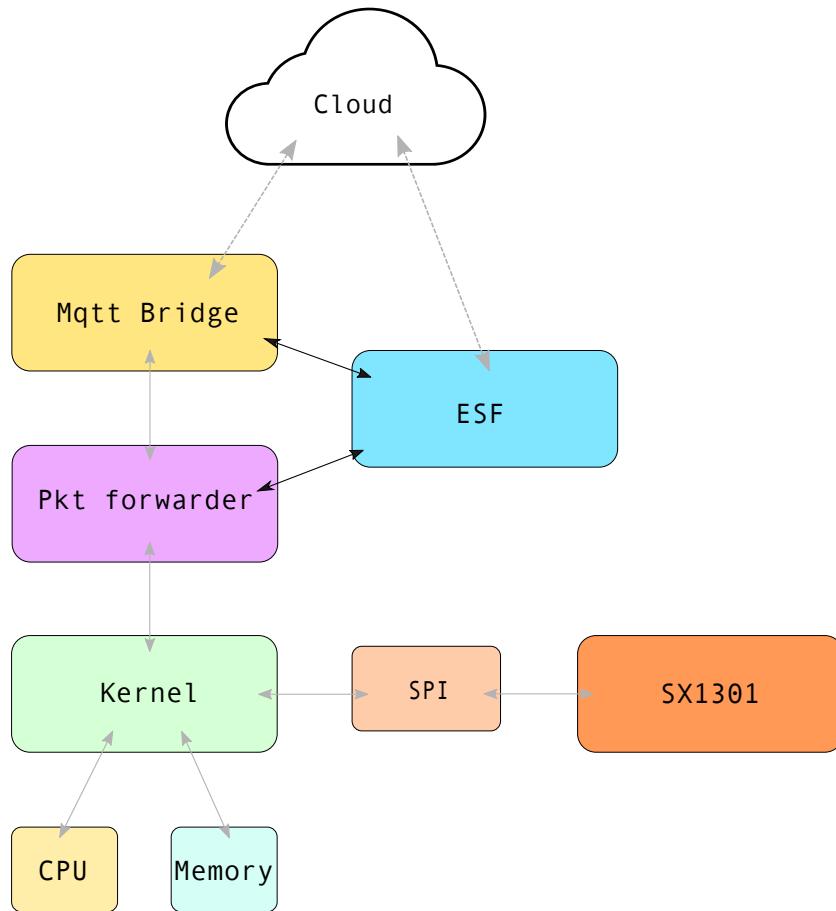


Figura 5.2: Architettura del software

```

15      "freq": 868500000,
16      "rssI_offset": -166.0,
17      "tx_enable": false
18  },
19  "chan_multisf_0": {
20      "enable": true,
21      "radio": 1,
22      "if": -400000
23  },


---


173  "gateway_conf": {
174      "gateway_ID": "AA555A0000000000",
175      "server_address": "0.0.0.0",
  
```

```

176     "serv_port_up": 1703,
177     "serv_port_down": 1702,
178     "keepalive_interval": 10,
179     "stat_interval": 30,
180     "push_timeout_ms": 100,
181     "forward_crc_disabled": false,
182     "forward_crc_valid": true,
183     "forward_crc_error": false
184 }
```

5.0.5 LoRa Gateway Bridge

LoRa Gateway Bridge, è l'applicativo il quale riceve i vari pacchetti UDP inviati dal packet forwarder e li trasmette ad un Broker MQTT. Il software è scritto nel linguaggio GO. Per renderlo interfacciabile con ESF, sono state apportate delle modifiche al codice, in particolare è stata aggiunta la possibilità di specificare il publish e il subscribed topic, i quali erano hard-coded.

5.0.6 ESF

Everyware software framework, è la versione commerciale del software Kura preinstallata nel ReliaGATE 10-11. ESF si pone l'obiettivo di offrire un container Java/OSGi per le applicazioni M2M. Gli applicativi installati in ESF sono sviluppati come OSGi Declarative Service, dando la possibilità di configurare i vari applicativi del gateway tramite una semplice interfaccia web.

5.0.7 Realizzazione

Per gestire i due software preinstallati si è optato per la creazione di due applicativi osgi distinti. Il primo applicativo chiamato Lora Config si pone il compito di leggere ed interpretare il file di configurazione utilizzato dal programma *Packet Forwarder*, per poi andare ad esporre i punti principali al utente finale. La libreria utilizzata per manipolare i file di tipo Json è

```
import com.eclipsesource.json
```

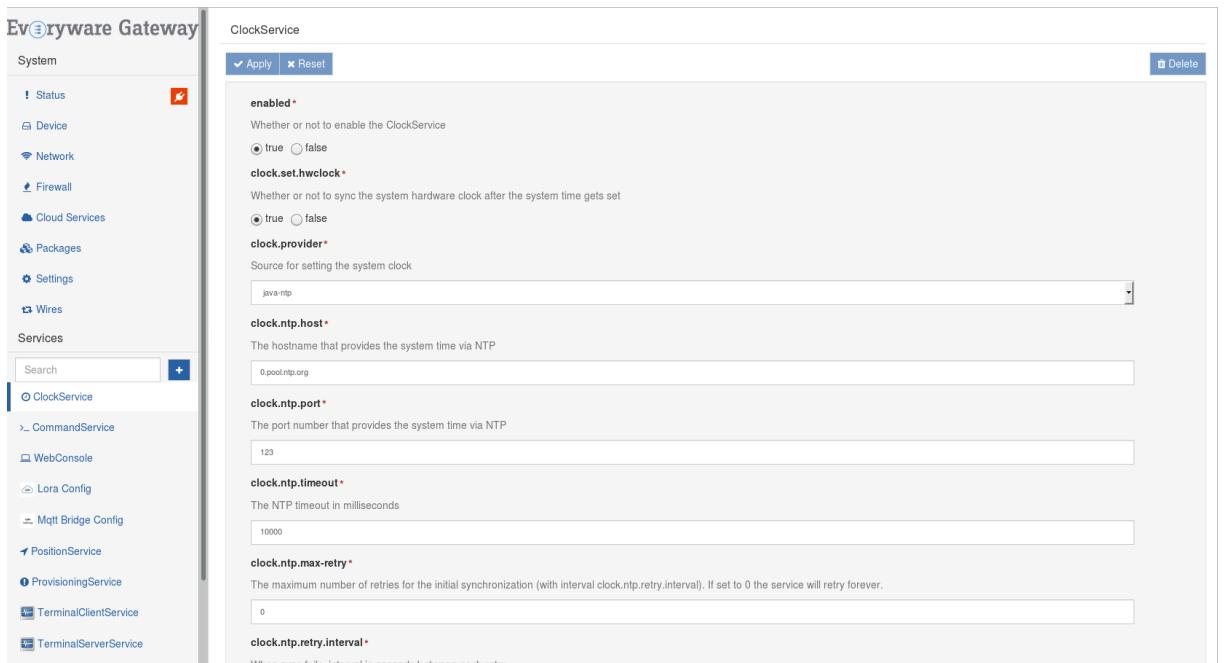


Figura 5.3: Architettura del software

Tramite la quale vengono riempiti i campi della classe LoraSettings. Il file Json, come detto precedentemente è composto da due parti. Nella prima parte troviamo tutte le impostazioni per la configurazione del SX1301, nella seconda parte sono presenti le impostazioni per il forward dei pacchetti. Per questa ragione due classi diverse sono state create, SX1301Configuration e GatewayConfiguration, accessibili tramite la classe LoraSettings.

```

1  public class LoraSettings {
2      public static final String KEY_GATEWAY_CONFIG = "gateway_conf";
3      public static final String KEY_SX1301 = "SX1301_conf";
4      private SX1301Configuration sx1301Conf;
5      private GatewayConfiguration gatewayConf;
6  }

```

Per applicare le modifiche eseguite alla configurazione, è necessario che l'applicativo sia riavviato. Per eseguire questa operazione, si è scelto di utilizzare la libreria

```
import com.apache.commons.exec
```

la quale fornisce delle *API* per chiamare processi esterni, in particolare si è scelto di utilizzare l’utility di sistema *pkill* per terminare il processo del pkt forwarder.

```

1   public void startPktForwarder() {
2       DefaultExecutor pktExecutor = new DefaultExecutor();
3       CommandLine pktCmdLine = new CommandLine(KEY_PKT_BIN);
4       pktCmdLine.addArgument("start");
5       pktExecutor.setExitValue(0);
6       try {
7
8           pktExecutor.execute(pktCmdLine);
9           s_logger.info("start PKT");
10      } catch (Exception e) {
11          s_logger.warn("Couldn't start pkt forwarder");
12      }
13  }
14
15  public void stopPktForwarder() {
16      DefaultExecutor pktExecutor = new DefaultExecutor();
17      CommandLine pktCmdLine = new CommandLine("pkill");
18      pktCmdLine.addArgument("basic_pkt_fwd");
19      pktExecutor.setExitValue(0);
20      try {
21
22          pktExecutor.execute(pktCmdLine);
23          s_logger.info("Stop PKT");
24      } catch (Exception e) {
25          s_logger.warn("Couldn't stop pkt forwarder");
26      }
27  }

```

5.0.8 Mqtt Bridge Config

Il secondo bundle creato ha lo scopo di esporre all’utente un facile modo per configurare *Lora Gateway Bridge*. Anche in questo caso è necessario il riavvio del applicativo per fare in modo che le modifiche abbiano effetto, anche in questo caso è stata usata la libreria

Lora Config

Apply Reset Delete

gateway.ID *
Lora MAC gateway.
AA555A0000000000

server.address *
Udp server address.
0.0.0.0

server.port.forward *
Port of the forwarded UDP packet.
1780

server.port.receiving *
Port of the receiving UDP packet.
1782

keepalive.interval *
Keep alive interval.
10

stat.interval *
Interval between statistics notifications.
30

push.timeout.ms *
Push notification timeout in ms.
100

forward.crc.valid *
Enable forward of crc.
 true false

forward.crc.error *
Enable forward of package with incorrect crc.
 true false

forward.crc.disabled *
Enable forward package crc.
 true false

Figura 5.4: Architettura del software

```
import com.apache.commons.exec
```

Tramite questo bundle l'utente finale ha la possibilità di decidere

- il topic sul quale pubblicare i messaggi ricevuti in formato UDP dal *pkt forwarder*.
- il topic al quale rimanere in ascolto .
- su quale indirizzo e porta mandare/ricevere i pacchetti UDP.
- a quale broker Mqtt iscriversi.
- l'username e password per connettersi al broker.

The screenshot shows a configuration interface for an MQTT bridge. At the top, there are buttons for 'Apply' and 'Reset'. On the right side, there is a 'Delete' button. The configuration fields include:

- mqtt.settings.publish.topic***: Name of the topic for the forwarded packets. Value: Enrico/Topic/3
- mqtt.settings.subscribed.topic***: Name of the subscribed topic. Value: MAC_address/rx
- mqtt.settings.udp.server.and.port***: Udp server and port. Value: 0.0.0.0:1780
- mqtt.settings.server.and.port***: Address and port of the mqtt broker. Value: tcp://test1.mosquitto.org:1883
- mqtt.settings.username**: Username. Value: (empty)
- mqtt.settings.password**: Password. Value: (empty)

Figura 5.5: Architettura del software

5.0.9 Misurazioni

In via sperimentale, è stato scelto di installare il gateway ReliaGate 10-11 ad una altezza di 11m. Configurato il gateway per l'utilizzo del broker open source mosquitto.org. La prova di ricezione è stata condotta per tentativi, cercando di testare la massima distanza di trasmissione del dispositivo LoRa Mote.

Per constatare l'avvenuta ricezione del messaggio è stata utilizzata l'applicazione Android gratuita MyMQTT, tramite la quale è possibile iscriversi ad un topic predefinito ed rimanere in ascolto dei messaggi pubblicati in esso.

5.0.10 Osservazioni

Come è facile osservare dalla mappa in figura 5.7, la distanza massima raggiunta varia molto a seconda della conformazione del territorio. In assenza di edifici in linea d'aria, punto 8 nella figura 5.7, è stato possibile inviare un pachetto lora ad una distanza di 8.2[km]. Nelle effettuare



Figura 5.6: Architettura del software

la prova è stato scelto di inviare al server Mqtt solo i pachetti ricevuti correttamente riga 10

```
1      "gateway_ID": "AA555A0000000000",
2      "server_address": "0.0.0.0",
3      "serv_port_up": 1703,
4      "serv_port_down": 1702,
5      "keepalive_interval": 10,
6      "stat_interval": 30,
7      "push_timeout_ms": 100,
8      "forward_crc_disabled": false,
9      "forward_crc_valid": true,
10     "forward_crc_error": false
11 }
```

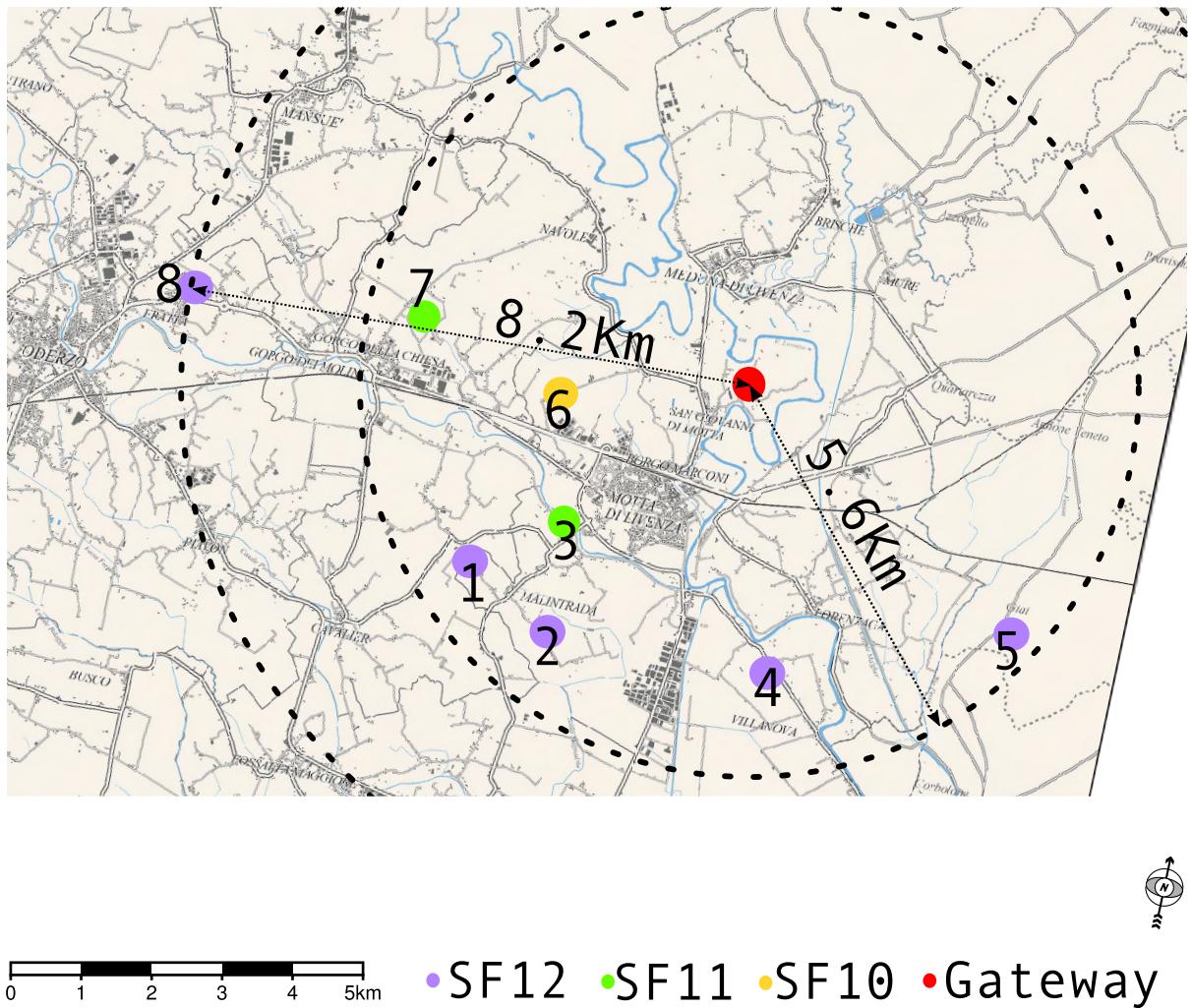


Figura 5.7: Copertura Lora

Bibliografia

- [1] Gartner. Gartner says 8.4 billion connected 'things' will be in use in 2017, up 31 percent from 2016. *[Online]*, 2016. <http://www.gartner.com/newsroom/id/3598917>.
- [2] LTD Hauwei Technologies co. Nb-iot white paper. *[Online]*, 2015. http://www.huawei.com/minisite/iot/img/nb_iot_whitepaper_en.pdf.
- [3] Semtech. An1200.22 lora™ modulation basics. *[Online]*, 2015. <http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>.
- [4] Semtech. Lorawan 101 a technical introduction. *[Online]*, 2017. https://docs.wixstatic.com/ugd/ecc1a_20fe760334f84a9788c5b11820281bd0.pdf.
- [5] Verizion. State of the market: Internet of things 2016. *[Online]*, 2016. <https://www.verizon.com/about/sites/default/files/state-of-the-internet-of-things-market-report-2016.pdf>.