

SUPSI

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica
Anno accademico 2016-2017

Progetto di semestre
LoRaTM e LoRaWANTM

C09594

Studenti: Michel De Vittori
Fatlind Hajdaj

Relatore: Ricardo Monleone
Correlatore: Samuel Poretti

Data: 26 gennaio 2017

Indice

Nomenclature	ix
Glossario	ix
Acronimi	ix
Abstract	xi
Progetto Assegnato	xiii
1 Introduzione	1
2 Studio delle soluzioni	3
2.1 Analisi della tecnologia LoRa TM	3
2.1.1 Chirp	5
2.1.2 Modulazione Chirp Spread Spectrum (CSS)	6
2.1.3 LoRa TM	6
2.2 LoRaWAN TM	10
2.2.1 Accesso alla rete	12
2.2.2 Comandi MAC	12
2.2.2.1 ADR - Adaptive Data Rate	13
2.2.3 Scambio dati	14
2.2.4 Uscita dalla rete	14
2.3 Tecniche di localizzazione	15
2.3.1 RSSI - Received Signal Strength Indication	15
2.3.2 ToF - Time of Flight e ToA - Time Of Arrival	16
2.3.3 TDOA - Difference Time Of Arrival	16
2.4 Analisi dei moduli presenti sul mercato	18
2.4.1 Node	18
2.4.2 Gateway	18
2.4.2.1 Single Channel	18
2.4.2.2 Multi Channel	19
3 Design e concezione	21
3.1 Specifiche	21
3.2 Progettazione Board	22
3.2.1 Componenti	25
3.2.2 Board	26
3.2.2.1 Schemi elettrici	27
3.2.2.2 PCB	33
3.3 Firmware	35
3.3.1 Verifica PCB	35

3.3.2	Network di Sensori	35
3.3.3	Distanza di trasmissione	35
3.3.4	Localizzazione Wired	36
3.3.5	Accesso LoRaWAN™	36
4	Realizzazione e test	37
4.1	Realizzazione Single Channel Gateway	37
4.1.1	Montaggio Board	37
4.2	Firmware e Test	38
4.2.1	Verifica PCB	39
4.2.2	Network di Sensori	39
4.2.3	Distanza di trasmissione	40
4.2.4	Localizzazione Wired	42
4.2.5	Accesso LoRaWAN™	46
5	Conclusioni	53
Organizzazione		55
Product Breakdown Structure	56	
Piano di Lavoro	57	
Iniziale	57	
Finale	58	
Riferimenti		59
Allegati		61

Elenco delle figure

2.1	Performance range di trasmissione LoRaWAN TM	4
2.2	Rete LPWAN	4
2.3	Trend IoT	5
2.4	Up-Chirp	6
2.5	Preambolo LoRa TM	7
2.6	Modulazione LoRa TM	8
2.7	Demodulazione LoRa TM	8
2.8	Variazione dello SF	9
2.9	Variazione della banda	9
2.10	Messaggio LoRa TM	10
2.11	Benefici della modulazione	10
2.12	Struttura a livelli della tecnologia LoRaWAN TM	11
2.13	Range vs battery life	12
2.14	Frame LoRaWAN TM	14
2.15	Determinazione della posizione tramite RSSI	15
2.16	Determinazione della posizione tramite ToF	16
3.1	Schema a blocchi <i>Localizzazione Wired</i>	23
3.2	Schema collegamento cablato	27
3.3	Schematico <i>Alimentazione e Comunicazione USB</i>	29
3.4	Schematico <i>MCU</i>	30
3.5	Schematico <i>Periferiche</i>	31
3.6	Schematico <i>Periferiche Localizzazione Wired</i>	32
3.7	PCB Layout ~1:1	33
3.8	Anteprima ~1:1 PCB Top da www.eurocircuits.com	34
3.9	Anteprima ~1:1 PCB Bottom da www.eurocircuits.com	34
3.10	Anteprima ~1:1 3D della scheda	35
4.1	Scheda montata - MSCG	37
4.2	Scheda montata - SCG/Node	38
4.3	Schede montate - Front	38
4.4	Schede montate - Back	38
4.5	Carta geografica - Test distanza di trasmissione	42
4.6	Verifica misura TDC7200	43
4.7	Differenza di tempo tra gli Interrupt <i>ValidHeader</i> di 2 schede vicine	44
4.8	Errore della localizzazione all'aumentare dell'errore di misura del TDOA	45
4.9	Esempio di localizzazione con errori di 600ns dei tempi misurati	45
4.10	Servizi di localizzazione per IoT	46
4.11	Copertura LoRaWAN TM di Swisscom SA	47
4.12	Aggiunta di un end-node alla piattaforma LPN (1)	48
4.13	Aggiunta di un end-node alla piattaforma LPN (2)	48

4.14 GUI gestione LoRaMAC	49
4.15 Join Request	50
4.16 Verifica della porta usata e del contatore di uplink	50
4.17 Piattaforma Swisscom SA	50
4.18 Adaptive Data-Rate	51

Elenco delle tabelle

2.1	Frequenze ISM	5
2.2	LoRaWAN TM power consumption	12
2.3	Comandi MAC protocollo LoRaWAN TM	13
2.4	Tipi di messaggio LoRaWAN TM	14
3.1	Numero di SCG e MSG necessari	23
3.2	Lista dei componenti	25
4.1	Condizioni climatiche	40
4.2	Misure effettuate	41

Elenco dei listati

4.1	Log file del Gateway del Network di Sensori LoRa TM	39
4.2	Log file della misura dell'IC TDC7200	43

Nomenclature

Glossario

c	Velocità della luce
beacon	È un breve messaggio, usato per la sincronizzazione

Acronimi

B	Bandwich
CSS	Chirp Spread Spectrum
DTOA	Different Time of Arrival
GND	Ground
GSM	Global System for Mobile Communications
IoT	Internet of Things
LPN	Low Power Network
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LTE	Long Term Evolution
MCU	Micro Controller Unit
MSCG	Master Single Channel Gateway
PCB	Printed Circuit Board
PPS	Pulse per Second
RSSI	Received Signal Strength Indication
SCG	Single Channel Gateway
ToA, TOA	Time of Arrival
ToF	Time of Flight
WAN	Wide Area Network

Abstract

Il problema più grande che si sta riscontrando negli ultimi anni nel mondo della tecnologia, ed in particolare nel settore del IoT, è la durata della batteria del dispositivo.

Questo progetto mira allo studio di una recente tecnica di modulazione, LoRaTM, che grazie alle sue caratteristiche intrinseche è molto efficiente; favorisce e permette la comunicazione su grandi distanze garantendo la durata della batteria.

Per la comunicazione tra nodi LoRaTM si fa capo al protocollo LoRaWANTM, il quale appartiene alla famiglia LPWAN.

Lo scopo del lavoro è di progettare e realizzare un hardware che utilizzi questa tecnologia per poter effettuare, se possibile, una localizzazione indoor, una comunicazione con una rete di tipo LoRaWANTM gestita da Swisscom SA ed una verifica della massima distanza di trasmissione.

Durante la prima parte del progetto sono stati analizzati i componenti ed è stata sviluppata la scheda. Dopo l'implementazione di un firmware per la verifica della scheda si è passati al network di sensori LoRaTM. La distanza massima di trasmissione con una potenza d'uscita di 0.1W (+20dBm) è stata misurata a circa 10km in ambiente urbano, una distanza molto buona in rapporto alla potenza di trasmissione.

In secondo luogo è stata testata la localizzazione, ma come quanto disponibile oggi sul mercato, ha dato risultati scarsi poiché l'errore TDOA nei test eseguiti risulta essere di circa 600ns (180m). Con questi valori non è possibile eseguire una localizzazione cablata puramente indoor, resta comunque fattibile localizzare oggetti in ambienti indoor con scarsa ricezione grazie alla modulazione CSS. Grazie alla predisposizione della scheda al montaggio di un GPS in futuro si potrà usufruire di una localizzazione in un'area $> 100km^2$ senza che il nodo da localizzare abbia a bordo il modulo GPS.

L'ultimo obiettivo, la connessione alla rete nazionale LPN (LoRaWANTM) di Swisscom SA, è stata verificata con pieno successo.

Progetto Assegnato

Rete di sensori con moduli LORA

Persone coinvolte

PropONENTE	Poretti Samuel
RELATORE	Monleone Ricardo
CORRELATORE	Poretti Samuel
STUDENTE	De Vittori Michel
STUDENTE	Hajdaj Fatlind

Dati generali

Codice	C09594
Anno accademico	2016/2017
Semestre	Semestre invernale
Corso di laurea	Ingegneria elettronica (Ingegneria elettronica TP)
Opzione	Nessuna opzione
Tipologia del progetto	semestrale
Stato	in corso
Confidenziale	SI
Pubblicabile	NO

Descrizione

La nuova modulazione LORA (Long RAnge) operante nelle bande ISM (nella maggioranza dei casi in Europa a 868MHz) permette, utilizzando relativamente basse potenze di trasmissione, di raggiungere considerevoli distanze di datalink arrivando all'ordine delle decine di chilometri. La particolare modulazione, che sfrutta una larghezza di banda maggiore rispetto alle modulazioni classiche permette di ottenere una sensibilità di ricezione notevole. Attualmente anche Swisscom prevede l'installazione di una rete nazionale basata su questo protocollo con il fine di agevolare lo sviluppo di applicazioni IoT sfruttando la modulazione di LORAWAN. Il lavoro di semestre mira alla continuazione di un lavoro di diploma mirato all'approfondimento di questa particolare tecnologia e alla realizzazione di una piattaforma che permetta di testare le sue potenzialità. Il protocollo consente inoltre delle funzionalità di localizzazione che saranno oggetto di studio nel presente lavoro.

Compiti

- Analisi del lavoro di diploma già svolto
- Analisi della modulazione LORA e delle sue varie applicazioni (utilizzo dei moduli per una comunicazione in rete LORAWAN e utilizzo della rete WAN Swisscom)
- Analisi, comparazione e scelta dei moduli attualmente presenti sul mercato e acquisto del materiale necessario.
- Realizzazione di un sistema prototipale formato da alcuni nodi in grado di dimostrare e verificare le potenzialità della modulazione e del sistema di localizzazione (nodi e gateway)
- Realizzazione di una rete di sensori in grado di connettersi alla rete ufficiale di Swisscom
- Realizzazione della sezione di firmware/software
- Verifica su campo dei limiti di portata del sistema e della capacità di trasmissione
- Documentazione, manuale d'uso e presentazione dei risultati del progetto

Obiettivi

- Realizzazione di un sistema prototipale composto da alcuni nodi in grado di comunicare tra loro tramite una rete LORAWAN connessa a internet e di connettersi alla rete LoRaWAN Swisscom

Tecnologie

- Software di CAD Pcb
- Ambiente di sviluppo per microcontrollore
- Ambiente di sviluppo Software
- Eventuali tools di simulazione elettrica/multifisica

Contatto esterno

Nessun contatto esterno presente

Documenti allegati

Progetto assegnato

Capitolo 1

Introduzione

Questo capitolo si prefigge di esporre i requisiti e le specifiche del progetto *LoRaTM* e *LoRaWANTM* assegnato dal relatore.

Il progetto di semestre mira allo studio di un nuovo sistema wireless che sfrutta la recente modulazione LoRaTM e alle sue possibili applicazioni; in particolar modo ci concentreremo sulla localizzazione indoor e sulla rete LoRaWANTM.

Oggi giorno un sistema molto utilizzato per la localizzazione è il GPS, quest'ultimo è basato su una rete satellitare ma evidentemente non è idoneo per localizzazioni indoor. Tuttavia una variante del progetto prevede il suo utilizzo.

Conoscere la propria posizione, o quella di altri, è una delle necessità più diffuse nel mondo digitale; infatti molte applicazioni che utilizziamo con il nostro Smartphone necessitano di un sistema di localizzazione per poter essere usate o addirittura scaricate. La gran parte degli Smartphone utilizza un sistema GPS, ottimo per localizzazioni all'aria aperta, ma appena si è all'interno di un locale la possibilità di usare questo sistema viene a mancare; dunque per risolvere il problema potrebbe essere utile utilizzare la tecnologia LoRaTM.

Un aspetto unico della tecnologia LoRaTM è la modulazione di tipo Chirp (descrizione in seguito) che le confluisce caratteristiche che la contraddistinguono da altri sistemi wireless grazie ad una portata nettamente migliore (a parità di potenza) ed una miglior efficienza.

Le reti che utilizziamo oggi sono molto preformanti, tuttavia sono molto complicate e difficilmente scalabili. Diventa quindi interessante utilizzare una rete LoRaWANTM poiché oltre a far parte alla famiglia di reti a basso consumo, LPWAN, ha un approccio alla connessione molto più semplice.

LoRaTM trova altre applicazioni interessanti tra cui la gestione di nodi di sensori, molto utile in ambiti come la domotica e l'agricoltura. La tecnologia LoRaTM nasce quindi per attenuare i problemi dovuti al consumo di energia e per garantire trasmissioni a lunga distanza.

Tante aziende telefoniche, nazionali e internazionali, si stanno muovendo in questa direzione, per arrivare ad ottenere una rete LoRaWANTM.

Capitolo 2

Studio delle soluzioni

In questo capitolo è stato analizzato e trattato tutto il materiale raccolto riguardo alla tecnologia LoRaTM e le sue possibili applicazioni. Inizialmente è stata fatta un'analisi della tecnologia, poi gli aspetti più tecnici ed infine una ricerca dei componenti che sono attualmente presenti sul mercato.

2.1 Analisi della tecnologia LoRaTM

LoRaTM (Long Range) è un nuovo sistema di modulazione che permette, grazie alle sue proprietà, di trasmettere segnali con una copertura di 10-20 km ed un consumo di energia molto basso. Questa tecnologia è brevettata dalla Semtech ed è un protocollo di comunicazione wireless a lunga distanza e basso consumo; appartiene quindi alla categoria LPWAN[18].

Attualmente le informazioni tecniche e scientifiche si trovano principalmente sul sito ufficiale di Semtech[13] e sotto LoRa Alliance[1], poiché è una tecnologia molto recente e le informazioni non si possono ancora reperire altrove.

LoRaTM è una tecnologia che è stata sviluppata per consentire comunicazioni a dispositivi mobili e a tutta la categoria di *Internet of Things (IoT)* che sono tenuti ad usare un sistema wireless.

Per ottenere performance di altissimo livello viene usata una modulazione spread spectrum a banda larga, la quale permette di ottenere una sensibilità elevata con basse potenze.

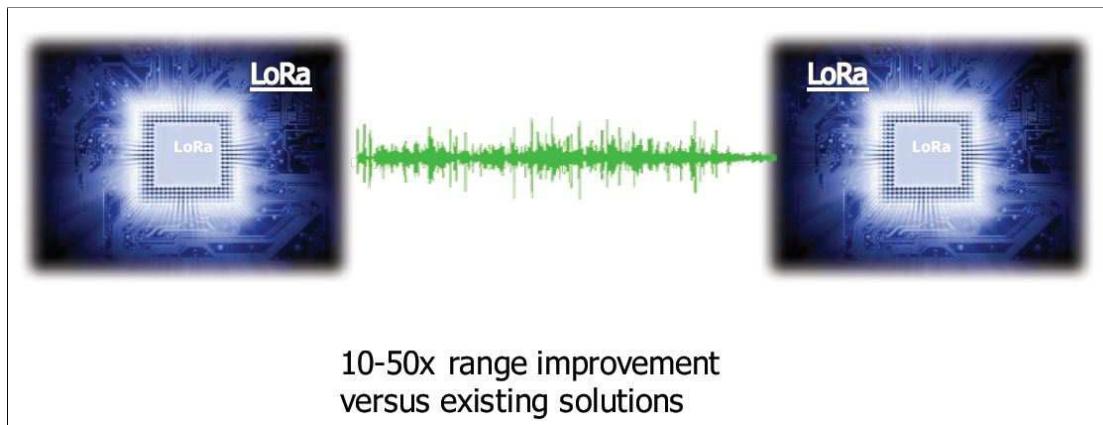


Figura 2.1: Performance range di trasmissione LoRaWAN™

Oggi i dispositivi portatili di ultima generazione (smartphone, tablet e smart-watch) utilizzano una rete di tipo LTE, la quale è gestita esclusivamente dall'operatore. I dispositivi utilizzati attualmente (GSM/UMTS/LTE) consumano molta energia e la loro struttura è molto complessa, soprattutto quando gli utenti da gestire sono molti. Le reti LPWAN sono molto più semplici da gestire, poiché è possibile aggiungere punti di connessione senza stravolgere l'intero sistema.

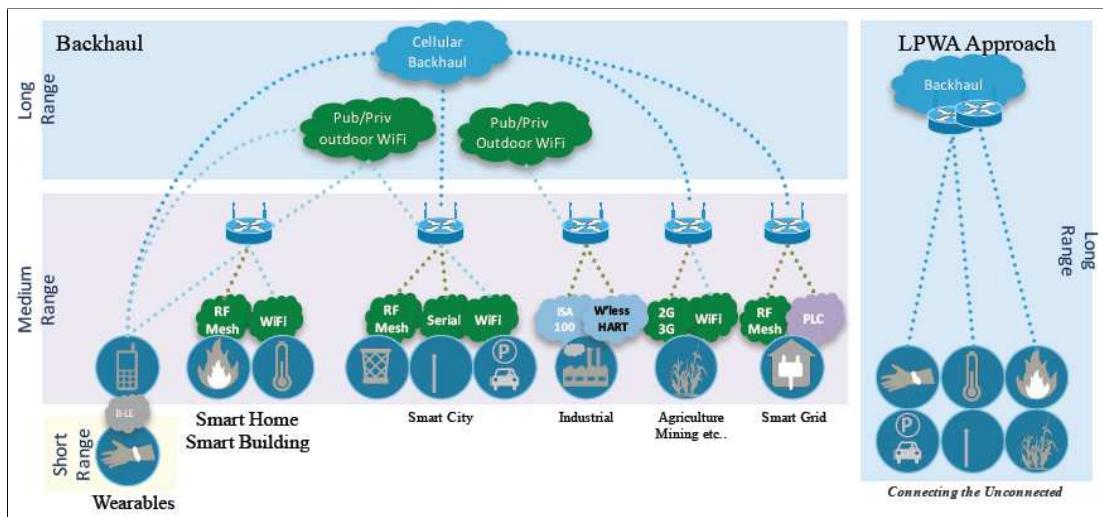


Figura 2.2: Rete LPWAN

Come si può notare dalla figura 2.2 la struttura della rete LPWAN è molto più semplice di tutte quelle reti che utilizziamo. LoRaWAN™ oltre a possedere un'architettura semplice è in grado di coprire distanze molto maggiori rispetto a tutti gli altri sistemi in uso.

La tecnologia LoRa™ sarà indispensabile poiché entro il 2020 si prevede di arrivare a collegare circa 50 milioni di oggetti alla IoT[5].

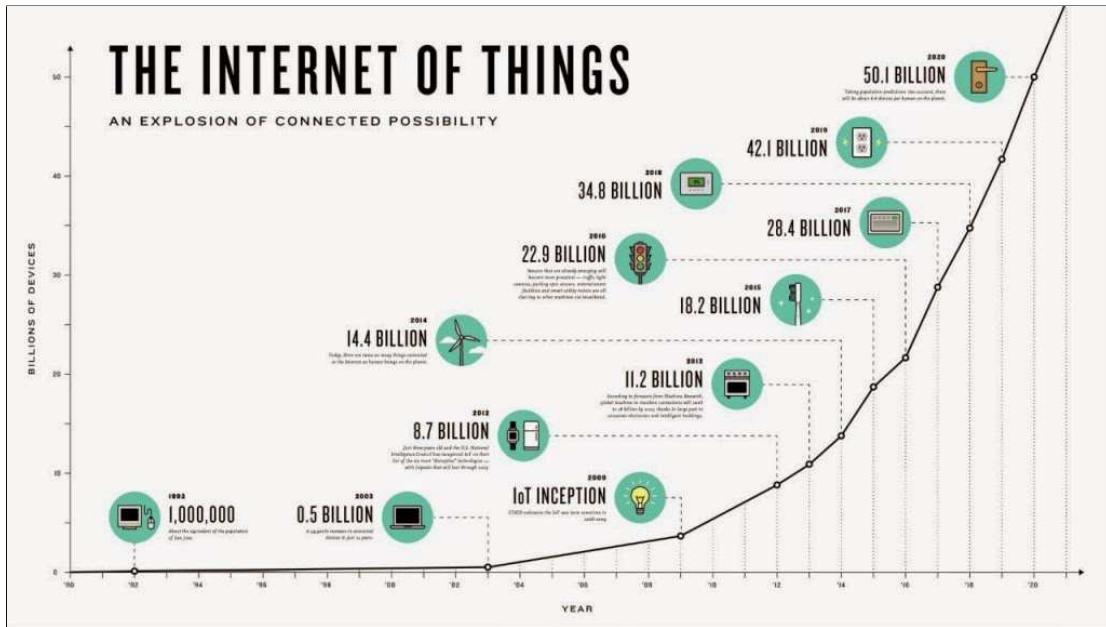


Figura 2.3: Trend IoT

Nel futuro prossimo, non sarà possibile collegare tutti questi oggetti mobili utilizzando una rete classica di tipo GSM/UTMS/LTE poiché si verrebbe a creare una rete troppo complessa. Infatti i gestori delle reti telefoniche come Swisscom puntano ad una soluzione di rete di tipo LPWAN, approfittando così di tutti i vantaggi che porta questa tecnologia.

I dispositivi provvisti di una radio LoRaTM operano nelle bande di frequenze ISM, le quali sono definite dalle regolamentazioni internazionali. Queste particolari comunicazioni wireless, quindi anche LoRaTM, operano nelle seguenti bande:

Tabella 2.1: Frequenze ISM

Europa	868 MHz
Nord America	915 MHz
Asia	433 MHz

2.1.1 Chirp

Un chirp, "Compressed High Intensity Radar Pulse", è un segnale nel quale la frequenza varia linearmente con il tempo, crescendo (up-chirp) o decrescendo (down-chirp). Trova numerose applicazioni nei radar, nei sonar, nelle comunicazioni a spettro espanso ed in alcuni tipi di laser.

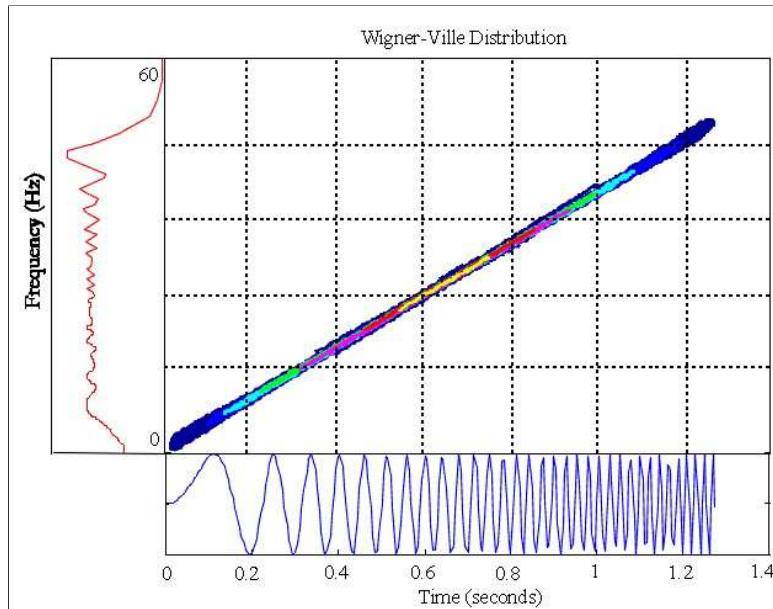


Figura 2.4: Up-Chirp

2.1.2 Modulazione Chirp Spread Spectrum (CSS)

La CSS è una modulazione di tipo spread spectrum che utilizza una frequenza modulata ad impulsi (chirp), le sue caratteristiche sono molteplici; le più importanti sono la distanza notevole che ricopre e la bassissima potenza di consumo.

La modulazione CSS è molto robusta ai rumori poiché si eseguono sweep e salti in frequenza.

La capacità del canale si calcola nel seguente modo

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

dove

- C: Capacità del canale in bis/s
- B: Larghezza di banda del segnale
- $\frac{S}{N}$: Rapporto segnale rumore (SNR)

Eseguendo delle semplificazioni ($S/N \ll 1$) si arriva alla seguente formula

$$\frac{S}{N} \approx \frac{C}{B} = \frac{N}{S} \approx \frac{B}{C}$$

si può notare che per avere una trasmissione di informazioni senza errori in un canale con noise-to-signal ratio fisso si necessita solo di aumentare la banda del segnale trasmesso.[12]

2.1.3 LoRaTM

LoRaTM è una modulazione Chirp Spread Spectrum (CSS) proprietaria di Semtech, la caratteristica di base è che permette il cambiamento del data-rate in un canale di banda

fissa per fare variare la sensibilità. Grazie al data-rate variabile lo sviluppatore può impostare LoRaTM per trasmissioni a lunga distanza o a basso consumo.

Come visto in precedenza, aumentando la banda del segnale si può compensare la degradazione del SNR di un canale radio. Nella modulazione LoRaTM lo spreading (estensione) dello spettro è raggiunta generando un chirp che varia di continuo in frequenza. Un vantaggio di tale metodo è che l'offset di tempo e frequenza tra il trasmettitore ed il ricevitore sono uguali; ciò porta alla riduzione della complessità nel design del ricevitore. La banda di frequenza dei chirp è equivalente alla banda spettrale del segnale, ciò significa che un chirp occupa tutta la banda.[12]

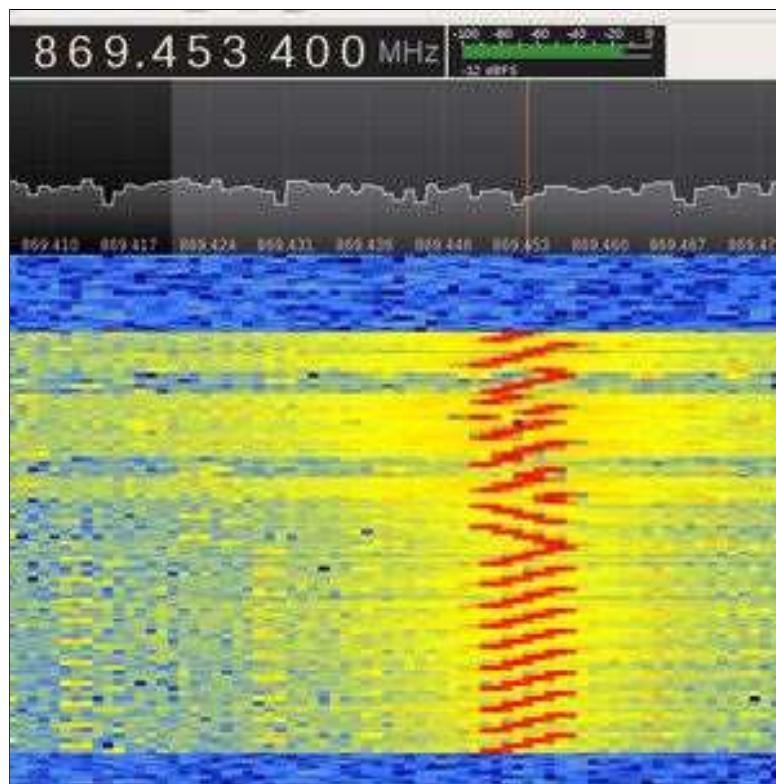
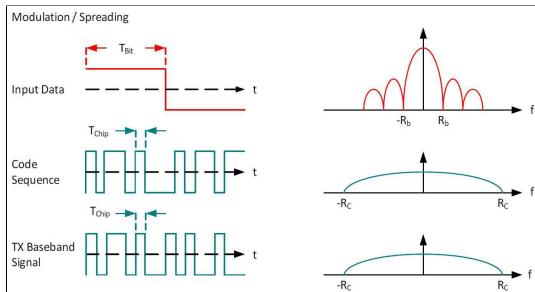
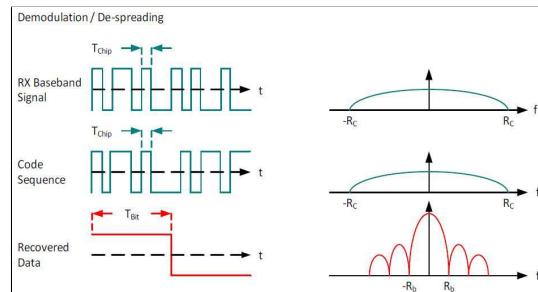


Figura 2.5: Preambolo LoRaTM

Le combinazioni tra i chirp con aumento o diminuzione della frequenza determinano le informazioni trasmesse. Con questa particolare modulazione è possibile demodulare segnali con potenze fino a 20 dB sotto il livello di rumore (grazie al guadagno intrinseco del segnale al momento del de-spreading: figura 2.7), permettendo così di avere distanze maggiori con potenze di trasmissione ridotte. Ripartendo la potenza del segnale su tutta la banda (sweep in frequenza) si aumenta la resistenza al rumore di fondo mentre eseguendo salti in frequenza (spreading o frequency hopping) si aumenta l'immunità a rumori casuali e temporanei all'interno della banda.

Grazie a questi principi si riescono a raggiungere livelli di sensibilità e rapporto segnale/rumore (SNR) molto elevati offrendo la possibilità di ricevere e demodulare segnali con potenza inferiore al rumore. Semtech indica che è possibile raggiungere fino a -130 dBm di sensibilità e un rapporto SNR di -20dB.

Figura 2.6: Modulazione LoRaTMFigura 2.7: Demodulazione LoRaTM

Il guadagno in demodulazione è definito come

$$Gp = 10 \cdot \log \frac{Rc}{Rb} [dB]$$

dove

- Rc: chip rate [Chips/second]
- Rb: bit-rate [bits/second]

come si nota, aumentando il numero di Chips al secondo o diminuendo la velocità del canale, si possono raggiungere distanze di trasmissione maggiori.

La modulazione è definita con i seguenti parametri di base:

- La larghezza di banda BW: intervallo tra la minima e la massima frequenza
- Lo spreading factor SF: misura del numero di bit codificati per simbolo
- Il coding rate CR: misura della quantità di correzione degli errori inviata

Valgono le seguenti formule teoriche

$$Rs = \frac{BW}{2^SF}$$

$$DR = SF \cdot Rs \cdot CR$$

dove

- Rs: symbol-rate
- DR: data-rate

In figura 2.8 è mostrato uno spettrogramma al variare del parametro SF.[6]

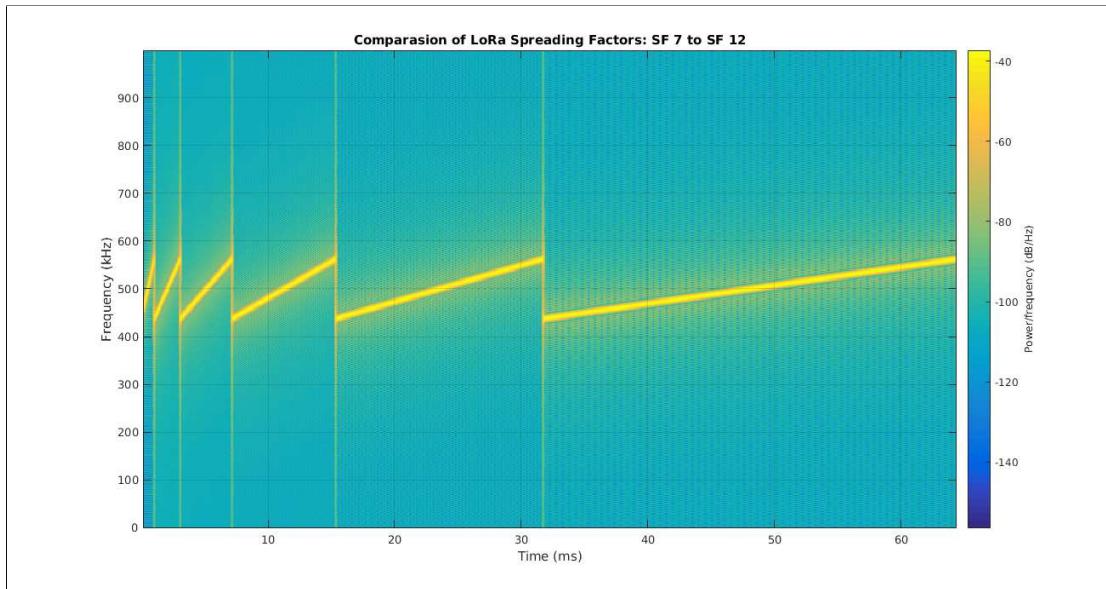


Figura 2.8: Variazione dello SF

Chairamente un SF basso confluiscce un maggior data-rate mentre un SF maggiore aumenta il over-the-air time.

In figura 2.9 si nota come il parametro BW influisce sulla sensibilità.

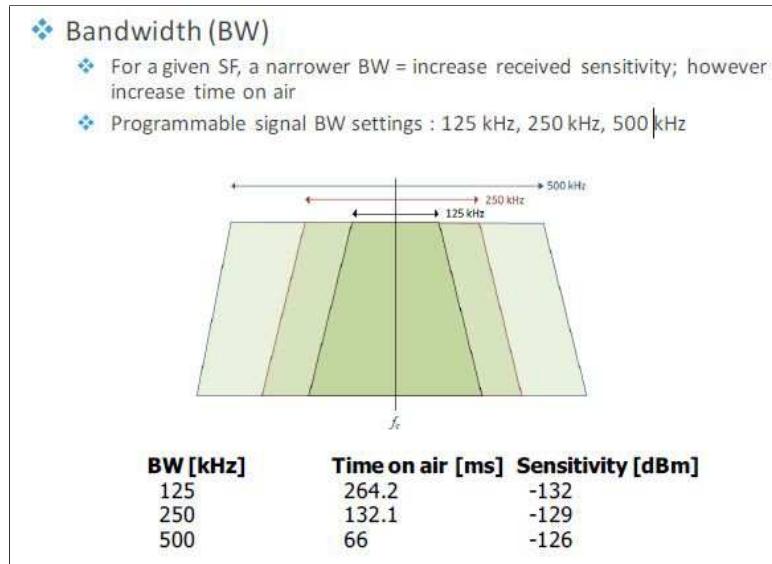


Figura 2.9: Variazione della banda

In figura 2.10 è mostrata una simulazione di un messaggio Lora.[6]

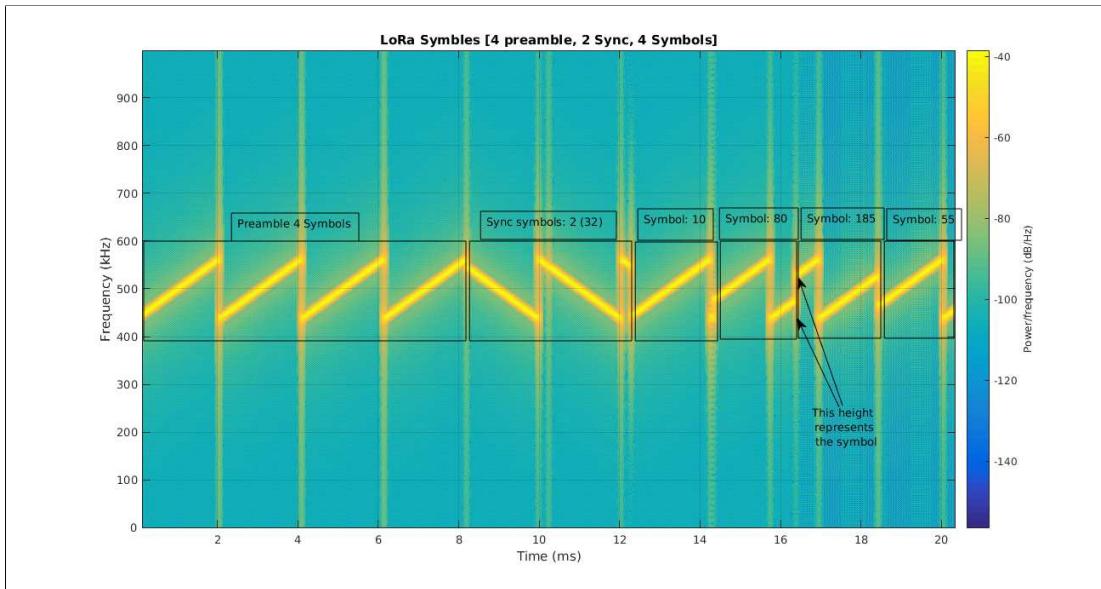


Figura 2.10: Messaggio LoRaTM

I benefici della modulazione LoRaTM sono molteplici e possono essere riassunti nella figura 2.11.

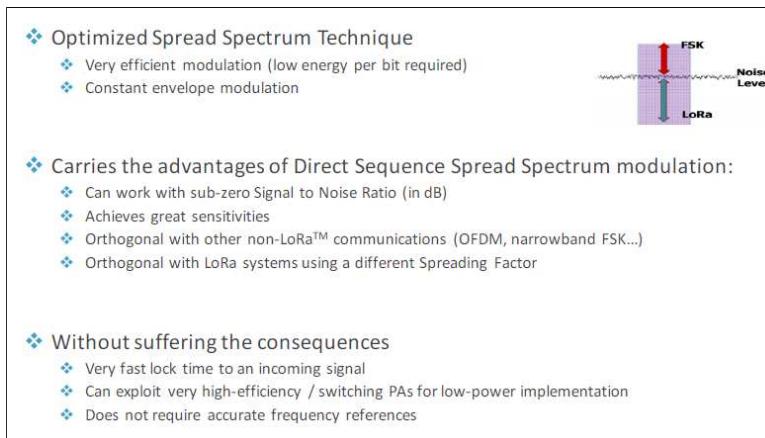


Figura 2.11: Benefici della modulazione

Per informazioni dettagliate fare riferimento alla fonte [12], [6] ed al link <https://revspace.nl/DecodingLora>.

2.2 LoRaWANTM

LoRaWANTM è un protocollo di comunicazione wireless di tipo LPWAN (Low Power Area Network) e la sua architettura di rete è a stella con un Gateway che si comporta da "ponte" tra i device (nodi) e il server.

Nel modello ISO/OSI il protocollo LoRaWANTM si alloca nel livello 3, il livello di rete. Nel sistema è compresa una codifica e un controllo di integrità dati, per garantire la

correttezza della trasmissione.

I Gateway sono connessi al server di rete tramite l'indirizzo IP, mentre i dispositivi utilizzano la comunicazione wireless verso uno o più Gateway.

La comunicazione tra i dispositivi e i Gateway si sviluppa su diversi canali di frequenza e con diverse velocità di comunicazione, tuttavia grazie alla tecnologia spread spectrum i dati con differenti velocità di trasmissione non interferiscono tra di loro, ma creano una serie di canali virtuali aumentando di molto la capacità dei Gateway.
Nella figura 2.12 sono mostrate le diverse classi di LoRaWAN™.

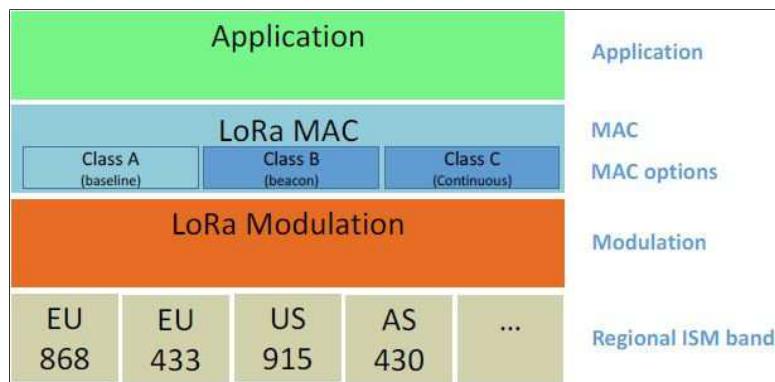


Figura 2.12: Struttura a livelli della tecnologia LoRaWAN™

Le bande regionali ISM variano a dipendenza della località geografica, come da figura 2.12 in Europa ci sono 2 bande disponibili (868Mhz e 433Mhz).

Suddivisione delle classi:

- Bi-directional end-devices (Class A): i dispositivi di classe A consentono la comunicazione bidirezionale. Il dispositivo invia le informazioni unicamente quando è necessario, rendendo la classe A idonea per applicazioni low power. Sono predisposte due finestre di ricezione (con un ritardo impostabile) dopo ogni trasmissione.
- Bi-directional end-devices with scheduled receive slots (Class B): nei dispositivi di classe B sono predisposte alcune finestre di ricezione ad intervalli regolari. Per la sincronizzazione il Gateway invia un beacon al dispositivo. Il vantaggio che riporta questa classe è che consente al server di sapere quando il dispositivo è in ascolto
- Bi-directional end-devices with maximal receive slots (Class C): i dispositivi di classe C permettono una continua ricezione di dati, quindi è un dispositivo predisposto a stare in ascolto, come il Gateway. Questa classe offre la più bassa latenza tra server e dispositivo.

L'architettura della rete LoRaWAN™ è molto semplice: i nodi comunicano con i Gateway, i quali instradano i dati ad un server di rete.

LoRaWAN™ oltre a definire questi aspetti, vincola l'utilizzo del canale di trasmissione, poiché nelle bande ISM il tempo di trasmissione deve essere minore del 1% del tempo totale.

Il consumo di energia di un modulo LoRa™ alimentato a 3.3V è diviso in tre come presentato nella tabella 2.2.

Tabella 2.2: LoRaWANTM power consumption

Stato	Consumo
ON	2.8 [mA]
Trasmissione	38.9 [mA]
Ricezione	14.1 [mA]

Uno dei problemi più importanti che si riscontra in un dispositivo mobile è la durata della batteria, infatti una motivazione per utilizzare una rete LPWAN è proprio questa, vedi figura 2.13.

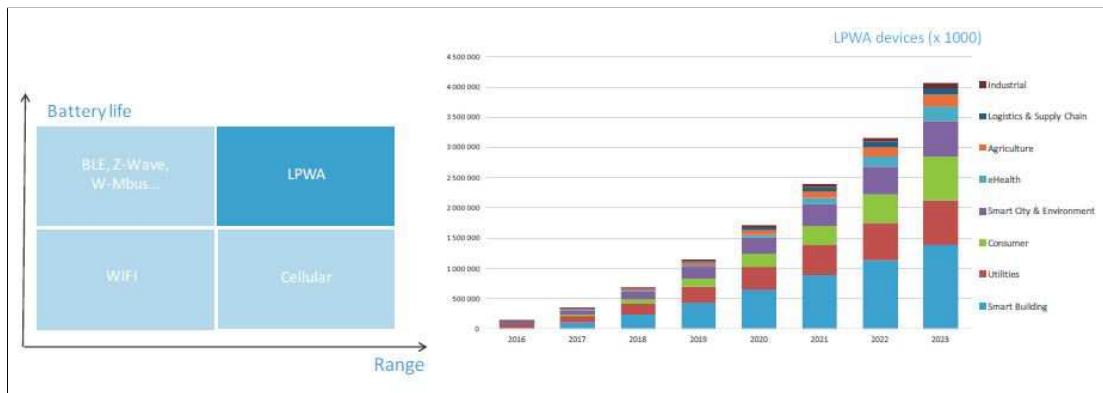


Figura 2.13: Range vs battery life

2.2.1 Accesso alla rete

Per accedere ad una rete LoRaWANTM è necessario che gli end-device eseguano il "Join", le possibili opzioni sono:

- OTAA: Over The Air Activation
È la preferita e più sicura per la connessione all'IoT. L'end-device esegue la procedura di join con il network durante il quale un DevAddr dinamico viene assegnato e la chiave di sicurezza viene negoziata col device.
- ABP: Activation By Personalization
In certi casi è necessario un DevAddr ed una chiave di sicurezza hardcoded nel end-device. Questo significa che l'attivazione è più semplice ma meno sicura.

2.2.2 Comandi MAC

Per l'amministrazione e la gestione del network sono presenti dei comandi MAC che possono essere usati esclusivamente tra il network server ed il MAC layer presente nel end-device.

In tabella 2.3 sono mostrati tutti i comandi MAC del protocollo LoRaWANTM per la classe A, le altre classi mettono a disposizione ulteriori comandi.[14]

Tabella 2.3: Comandi MAC protocollo LoRaWAN™

		Transmitted by		Short Description
CID	Command	End-device	Gateway	
0x02	LinkCheckReq	x		Used by an end-device to validate its connectivity to a network.
0x02	LinkCheckAns		x	Answer to LinkCheckReq command. Contains the received signal power estimation indicating to the end-device the quality of reception (link margin).
0x03	LinkADRReq		x	Requests the end-device to change data rate, transmit power, repetition rate or channel.
0x03	LinkADRAbs	x		Acknowledges the LinkRateReq.
0x04	DutyCycleReq		x	Sets the maximum aggregated transmit duty-cycle of a device.
0x04	DutyCycleAns	x		Acknowledges a DutyCycleReq command.
0x05	RXParamSetupReq		x	Sets the reception slots parameters.
0x05	RXParamSetupAns	x		Acknowledges a RXSetupReq command.
0x06	DevStatusReq		x	Requests the status of the end-device.
0x06	DevStatusAns	x		Returns the status of the end-device, namely its battery level and its demodulation margin.
0x07	NewChannelReq		x	Creates or modifies the definition of a radio channel.
0x07	NewChannelAns	x		Acknowledges a NewChannelReq command.
0x08	RXTimingSetupReq		x	Sets the timing of the of the reception slots.
0x08	RXTimingSetupAns	x		Acknowledge RXTimingSetupReq command.
0x80 to 0xFF	Proprietary	x	x	Reserved for proprietary network command extensions.

2.2.2.1 ADR - Adaptive Data Rate

Con il protocollo LoRaWAN™ è possibile abilitare il ADR in modo che il Gateway di riferimento mandi una richiesta di adattamento delle impostazioni alla radio LoRa™ per ottimizzare le performance del network e ridurre i consumi del nodo. Per esempio ad un nodo vicino ad un Gateway verrà richiesto di usare un data-rate alto ("time on air" basso) ed una potenza d'uscita bassa.

2.2.3 Scambio dati

LoRaWANTM si distingue in 6 differenti tipi di messaggi MAC come rappresentato in tabella 2.4.

Tabella 2.4: Tipi di messaggio LoRaWANTM

MType	Descrizione
000	Join Request
001	Join Accept
010	Unconfirmed Data Up
011	Unconfirmed Data Down
100	Confirmed Data Up
101	Confirmed Data Down
110	RFU
111	Proprietary

Tutti i pacchetti sono costruiti secondo lo schema di figura 2.14.

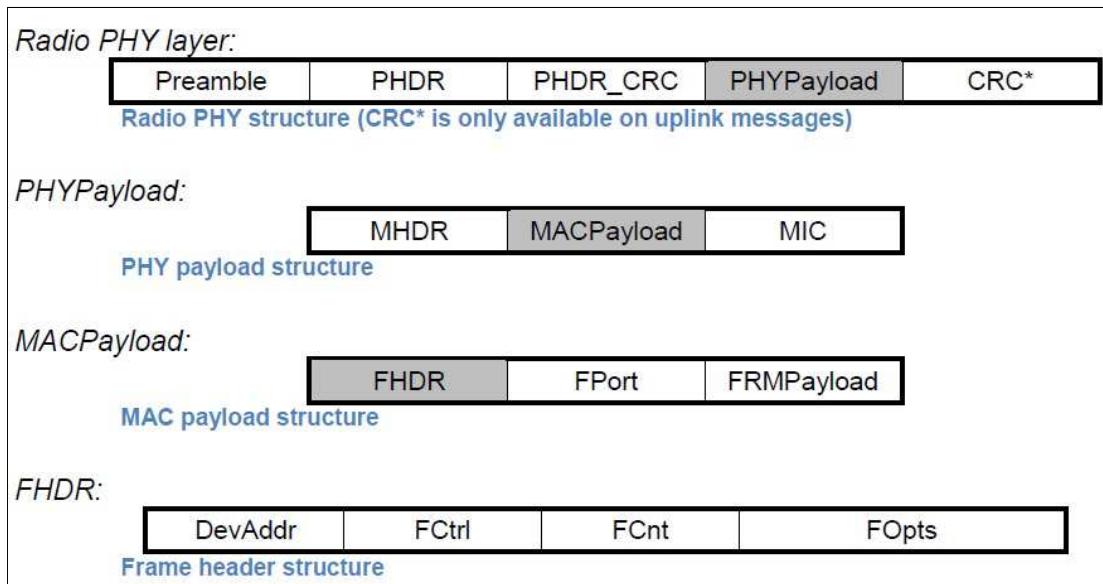


Figura 2.14: Frame LoRaWANTM

Per ulteriori informazioni consultare il documento "LoRaWAN Specification".[14]

2.2.4 Uscita dalla rete

Per uscire dalla rete non sono necessarie procedure specifiche.

Tutte le informazioni sul LoRaWANTM possono essere reperite qui.[14]

2.3 Tecniche di localizzazione

Legenda:

- Dispositivo da localizzare (nodo), si trova in modalità di trasmissione.
- Ricevitore in modalità continua (Gateway¹).

2.3.1 RSSI - Received Signal Strength Indication

Una tecnica di localizzazione è la RSSI, la quale sfrutta l'intensità del segnale ricevuto per determinare la posizione. Per localizzare un oggetto sono necessari almeno tre punti di accesso.

In un sistema RSSI la distanza fra un oggetto e un lettore è determinata dalla conversione della potenza del segnale del ricevitore. Questa tecnica è possibile poiché la potenza in ricezione diminuisce con l'aumento della distanza tra ricevitore e trasmettitore oltre ad altri fattori.[4]

Schematicamente potrebbe essere riassunto in questo modo:

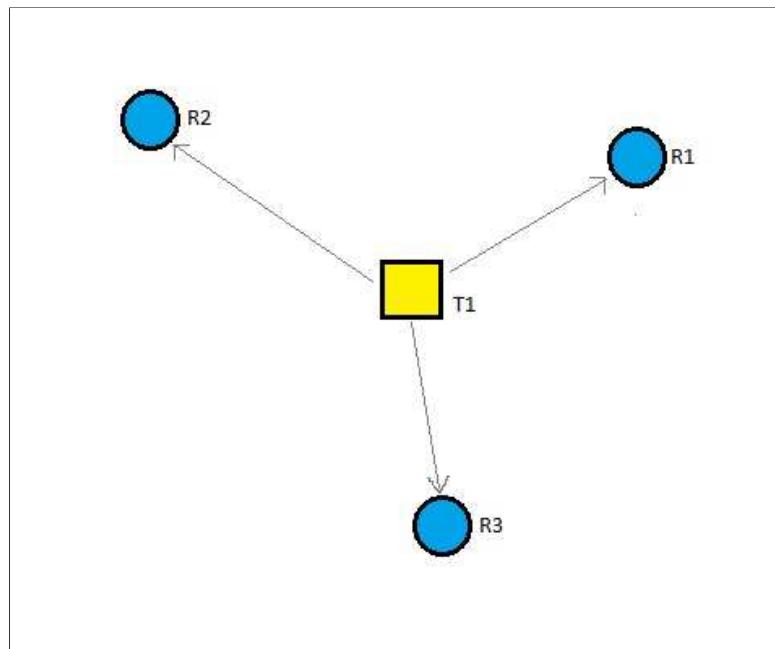


Figura 2.15: Determinazione della posizione tramite RSSI

Dove R_1 , R_2 e R_3 sono i riceventi, e T è il trasmettitore (da localizzare).

I problemi correlati a questa tecnica sono molti; per essere efficace, la tecnica di localizzazione RSSI richiede una fitta distribuzione di ricevitori di accesso, questo comporta un aumento della complessità e del costo del sistema. Tuttavia il problema più importante è che questo sistema non è affidabile perché non si può conoscere a priori il percorso del segnale e le perdite che subirà per attenuazione diretta nella materia o per riflessioni multiple.

¹È chiamato Gateway per il fatto che è perennemente in ascolto

2.3.2 ToF - Time of Flight e ToA - Time Of Arrival

Il tempo di volo ToF ("Time of Flight"), spesso chiamato ToA ("Time Of Arrival"), indica il tempo impiegato da un segnale per giungere da un trasmettitore a ricevitore. Quindi, una volta determinato il tempo è possibile stimare con grande precisione la distanza fra due dispositivi.

Molto spesso l'orario di partenza del segnale non è disponibile e per ovviare a tale problema il ricevitore R_x invia un segnale al dispositivo da localizzare T_1 e quest'ultimo risponderà al terminale R_x immediatamente. In questo modo conoscendo il tempo medio (t_{T_1}) impiegato dal dispositivo T_1 per elaborare la ricezione ed inviare la risposta si può calcolare, dopo aver misurato il tempo t_{tot} tra trasmissione e la ricezione in R_x , il ToF con la formula $ToF = \frac{t_{tot} - t_{T_1}}{2}$. Il metodo appena descritto viene chiamato specificamente "Round Trip Time" (RTT).

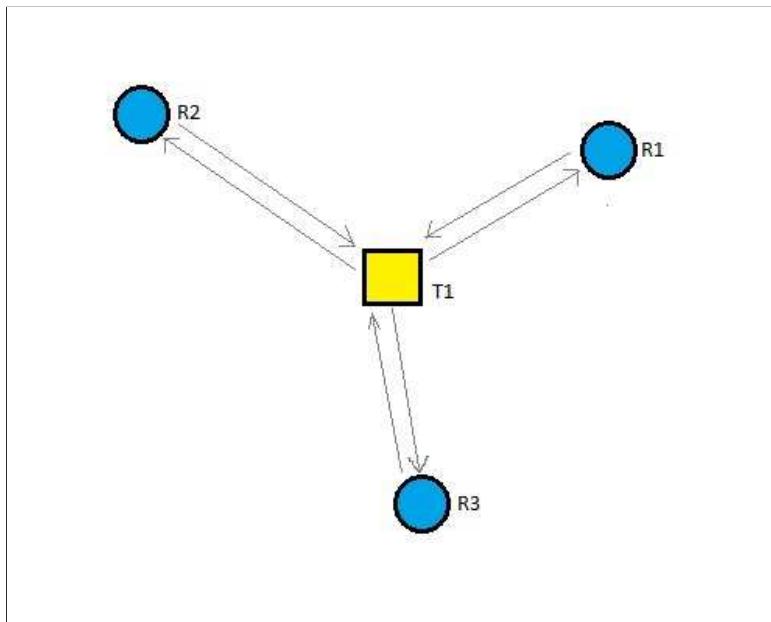


Figura 2.16: Determinazione della posizione tramite ToF

I ricevitori R_x devono essere in grado di misurare con precisione il tempo tra la partenza del segnale inviato e la ricezione della risposta per garantire un buona precisione nel localizzare l'oggetto. Inoltre il tempo T_1 deve essere sempre lo stesso. Generalmente questo tipo di tecnica è più robusta del RSSI verso riflessioni/multipath; si prende per buona la prima copia arrivata di un segnale multipath.

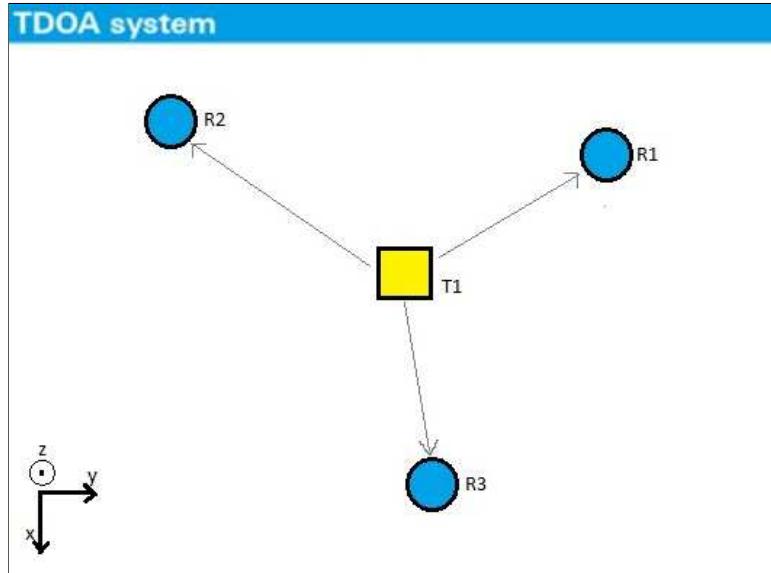
2.3.3 TDOA - Difference Time Of Arrival

Il TDOA, differenza di tempo d'arrivo, è una tecnica che viene usata dalla multilaterazione. Per utilizzare questa tecnica di localizzazione sono necessari come minimo tre ricevitori, che nel nostro caso saranno dei Gateway. Con tre Gateway la localizzazione è univoca in 2D ma se si vuole ottenere una misura in 3D è necessaria l'aggiunta di un ulteriore Gateway. La precisione della localizzazione aumenta con l'aumentare dei Gateway.

Esempio pratico di una localizzazione con tre riceventi stazionarie, d'ora in poi chiamate Gateway, e un dispositivo mobile (d'ora in poi verrà chiamato *nodo*) di cui si vuole determinare la posizione:

I tre sensori sono stati posizionati in modo strategico e quindi vi si conoscono le coordinate. Il nodo, che sarebbe il dispositivo da localizzare, evidentemente possiede delle coordinate a noi sconosciute.

La situazione è la seguente:



Sensori:

- Gateway 1: $R_1(x_1, y_1, z_1)$
- Gateway 2: $R_2(x_2, y_2, z_2)$
- Gateway 3: $R_3(x_3, y_3, z_3)$

Nodo:

- Nodo 1: $T_1(x, y, z)$

$$t_{R_1} = \frac{1}{c}(\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2})$$

$$t_{R_2} = \frac{1}{c}(\sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2})$$

$$t_{R_3} = \frac{1}{c}(\sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2})$$

Se il sito P è definito come l'origine del sistema, allora

$$t_P = \frac{1}{c} \cdot \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

quindi, le differenze dei tempo di arrivo rispetto (DTOA) al sito di riferimento saranno

$$\tau_1 = t_{R_1} - t_P = \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$\tau_2 = t_{R_2} - t_P = \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$\tau_3 = t_{R_3} - t_P = \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

risolvendo il sistema vi si trovano le coordinate del punto ignoto T_1 .

2.4 Analisi dei moduli presenti sul mercato

Tutti i moduli LoRaTM presenti sul mercato sfruttano gli IC Semtech poiché tale ditta è il proprietario del brevetto.

I moduli possono essere divisi in due categorie

1. Modulo con stack proprietario implementato
2. Modulo senza stack, interfaccia diretta con la radio

Siccome per il progetto non si vogliono limitazioni si ha optato per un modulo senza stack, il quale permette l'interfacciamento diretto con l'IC radio.

La lista aggiornata degli IC disponibili è reperibile all'indirizzo <http://www.semtech.com/wireless-rf/rf-transceivers/>.

2.4.1 Node

Il nodo è il device più minimale, può essere costruito con gli IC SX1272/73/76/77/78/79. La scelta dell'IC dipende principalmente dalla banda ISM da utilizzare e dalla sensibilità in ricezione.

2.4.2 Gateway

Il Gateway è un dispositivo di rete, ed il suo obiettivo è quello di instradare dei pacchetti all'esterno di una rete locale. Esistono essenzialmente due tipologie di Gateway, single channel e multi channel.

2.4.2.1 Single Channel

Il Gateway single channel è uno pseudo-Gateway poiché con esso è possibile gestire unicamente un singolo canale. L'IC necessario alla sua realizzazione è l'SX1276/77/78/79.

2.4.2.2 Multi Channel

Il Gateway completo è costituito da un *concentrator* che gestisce tutti i canali disponibili. La costruzione di un Gateway completo si basa sull'IC SX1301/08 con annesso uno o più IC SX1255/57.

Capitolo 3

Design e concezione

Mediante questo progetto sono state valutate le peculiarità della radio LoRaTM come la localizzazione indoor ed il network.

La localizzazione del tipo indoor fa al caso della modulazione LoRaTM perché lo spettro esteso confluiscce una maggior penetrazione negli edifici rispetto ad altri tipi di modulazione ed una distanza di trasmissione nell'ordine dei km. Questo risulta utile nella creazione di network per la misura di sensori a lunga distanza. Questa peculiarità è dovuta dal fatto che il guadagno intrinseco che il segnale subisce al momento della demodulazione spread spectrum permette di aumentare la portata, in questo modo è possibile ricevere segnale molto deboli. Oltre a ciò la demodulazione dei segnali chirp fa sì che si allarghino impulsi molto stretti che facilitano la lettura del loro tempo d'arrivo come avviene nei radar¹.

La concezione della scheda vuole garantire la piena versatilità all'uso della radio LoRaTM. Per tale motivo è stato montato un chip SX1276 anziché un modulo LoRaWANTM in modo da permettere una totale gestione mediante firmware e dunque non essere limitati dall'hardware come nel caso di moduli con Stack LoRaWANTM implementato.

Mediante la scheda deve essere possibile implementare la localizzazione ed implementare una rete LoRaTM/LoRaWANTM (dunque Gateway e Nodi).

Oltre a ciò la scheda è provvista di un modulo GPS per poter garantire un utilizzo futuro del lavoro svolto.

3.1 Specifiche

Le specifiche di base per il progetto sono le seguenti:

- Localizzazione con LoRaTM
- Network LoRaTM/LoRaWANTM
- Nodi compatibili con LoRaWANTM

Dato che il progetto è di analisi e test di una tecnologia la libertà lasciata è alta. Il progetto ha voluto approfondire meglio la localizzazione indoor mediante LoRaTM poiché

¹I radar però funzionano ad alta frequenza.

ancora non è presente sul mercato anche se il produttore Semtech² nei documenti riporta la possibilità di implementarla.[16]

3.2 Progettazione Board

La realizzazione del Single Channel Gateway (SCG) è basata sull'IC SX1276 dato che il componente supporta la banda ISM europea (868MHz) e permette l'ascolto in modalità continua di un canale oltre a supportare le classi A e B LoRaWANTM.

Con l'utilizzo dell'IC SX1276 si può realizzare unicamente un Single Channel Gateway, mentre per un vero Gateway con gestione Multi-Channel, sarebbe necessario utilizzare l'IC SX1301 (necessario alla costruzione di un Gateway Multi-Channel) ma esso non è reperibile, e dunque nel progetto ci siamo serviti di un Gateway a canale singolo.

Per quanto concerne la localizzazione è stato pensato di usufruire di due varianti.

1. Localizzazione mediante GPS:

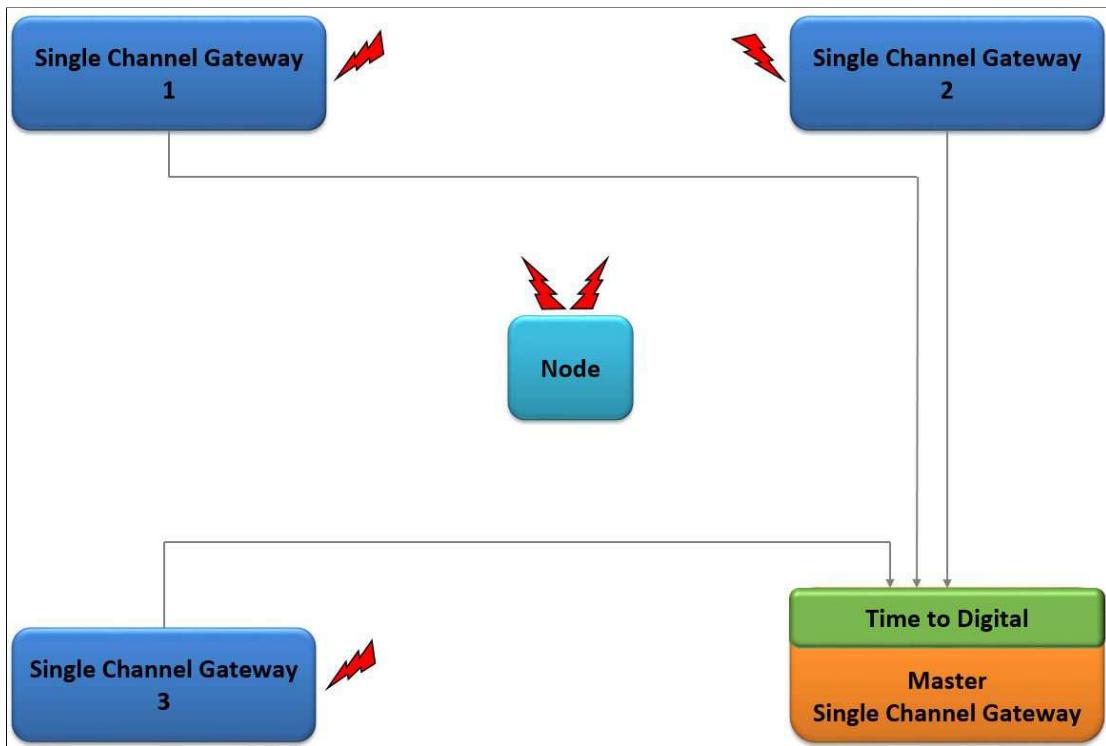
Ogni SCG è sincronizzato con l'ausilio del segnale PPS ($\pm 11\text{ns}$) di un modulo GPS. La posizione viene ricavata con la tecnica DTOA. Non è previsto un collegamento tra i Gateway.

2. Localizzazione Wired:

Per implementare questa modalità si sfrutta l'Interrupt generato dall'IC SX1276 alla ricezione di un preambolo LoRaTM o di un altro evento. Due o più SCG sono collegati via cavo (per comodità è stato usato un cavo di tipo Ethernet) ad un MSCG e la lunghezza dei cavi deve essere calcolata in modo che l'Interrupt generato dall'IC montato sul MSCG sia sempre precedente a quelli generati dai SCG. Il MSCG misura, mediante degli IC "Time to Digital", le differenze di tempo tra l'Interrupt del MSCG e gli altri. La posizione viene poi ricavata con la tecnica DTOA.

Consultando il relatore è stato pattuito di testare solamente la *Localizzazione Wired* dato il prevalente uso indoor.

²Detentore del copyright LoRaTM/LoRaWANTM

Figura 3.1: Schema a blocchi *Localizzazione Wired*

In figura 3.1 è rappresentato lo schema a blocchi della localizzazione cablata. Per il progetto è sufficiente avere un singolo nodo da localizzare mentre per quanto riguarda il numero di SCG e MSCG necessari si faccia riferimento alla tabella 3.1.

Tabella 3.1: Numero di SCG e MSG necessari

Nr. SCG	Nr. MSCG	Localizzazione 2D[21]	Localizzazione 3D[21]
-	0	✗	✗
≤ 1	1	✗	✗
2	1	✓	✗
3	1	✓	✓
≥ 3	≥ 1	✓	✓

In riferimento alla tabella 3.1 si denota come per avere una localizzazione completa (3D) è necessario disporre di almeno 3 SCG e 1 MSCG; per tale motivo la scheda è stata poi sviluppata garantendo la connessione cablata di 3 SCG.

Per garantire un'elevata versatilità la scheda è predisposta per poter essere usata nelle seguenti 3 modalità cambiando unicamente il firmware.

1. Node:

Può fungere solo da Nodo.

2. Single Channel Gateway (SCG):

Può fungere da SCG e Nodo ma non supporta la *Localizzazione Wired*.

3. Master Single Channel Gateway (MSCG):

Può fungere da SCG, Nodo e supporta la *Localizzazione Wired*.

3.2.1 Componenti

La realizzazione di una scheda MSCG necessita dei componenti elencati nella tabella 3.2.

Tabella 3.2: Lista dei componenti

Componente	Codice DigiKey	Pezzi	Prezzo Pz. \$
RFM95W - IC SX1276	RFM95W-868S2-ND	1	22.90
Connettore USB	151-1206-1-ND	1	0.70
FT232 - USB to UART	768-1007-1-ND	1	4.50
LED rosso	160-1457-1-ND	1	0.34
LED verde	160-1456-1-ND	5	0.34
Condensatore 1n	399-4819-1-ND	2	0.20
Condensatore 100n	399-1249-1-ND	20	0.10
Condensatore 4.7u	587-2254-1-ND	1	0.34
Condensatore 10u	311-1376-1-ND	1	0.22
Condensatore 22u	587-1356-1-ND	1	0.42
Ferrite 80	732-1629-1-ND	1	0.32
Connettore SMA (per SX1276)	J10225CT-ND	1	5.39
Antenna 868MHz (per SX1276)	ANT-868-CW-RCS-ND	1	7.30
Regolatore 3.3V	AZ1117CH-3.3TRG1DICT-ND	1	0.38
Regolatore 5.0V	AZ1117CH-5.0TRG1DICT-ND	1	0.38
Pulsante	CKN9112CT-ND	3	0.15
Resistenza 270	311-270ERCT-ND	6	0.10
Resistenza 1k	311-1.00KFRCT-ND	1	0.10
Resistenza 10k	311-10KERCT-ND	4	0.10
Header 6pin	3M9451-ND	2	0.42
GPS	RXM-GPS-RM-TCT-ND	0	20.30
Antenna GPS	931-1238-ND	0	12.40
Ferrite 300	541-2283-1-ND	0	0.18
Oscillatore 16MHz $\pm 2.5\text{ppm}$	631-1071-1-ND	2	2.34
Connettore SMA Antenna GPS	CONSMA002-ND	0	3.31
Connettore Ethernet	RJLSE4238101TCT-ND	4	1.37
AM26LV31E - Differential Recivier	296-24692-1-ND	4	1.37
AM26LV32E - Differential Transerecivier	296-24696-1-ND	4	1.64
TDC7200 - Time to Digital	296-44361-1-ND	4	6.81
PIC32MZ2048EFH064 - MCU	PIC32MZ2048EFH064-I/PT-ND	1	10.97
	Total		109.53

Per le schede SCG e Node non tutti i componenti elencati sono necessari e dunque non devono essere montati.

- I componenti evidenziati in rosso fanno riferimento alla localizzazione meditante GPS e per tale motivo non sono stati montati lasciando tuttavia la possibilità di utilizzarlo in futuro per una geo-localizzazione non cablata.

In seguito si espongono le motivazioni della scelta dei principali componenti:

Come produttore di MCU è stata scelta la Microchip dato che è già conosciuta agli autori del presente progetto, facilitando lo sviluppo del software. Come modello di MCU abbiamo usato un *PIC32MZ EF* per garantire la massima prestazione di calcolo per un futuro uso del GPS nella localizzazione (serve un risposta alle interruzioni elevata dato che 3ns corrispondono ad una distanza di propagazione di circa 1m).

Per quanto concerne l'IC SX1276 è stato scelto di utilizzare il modulo *RFM95W* prodotto da *Hope RF* poiché il SX1276 da solo risultava troppo complicato da saldare.

Presumendo di utilizzare i cavi di una lunghezza pari a 100 m e sapendo che la velocità di propagazione nel cavo è $c \cdot 0.64$ risulta una latenza di $100m/(c \cdot 0.64) = 521ns$.

Per questo motivo abbiamo scelto di utilizzare come Time to Digital il TDC7200, dato che supporta un range di misura da 250ns a 8ms.

La linea di trasmissione F<cablata deve essere di tipo differenziale per poter avere una buona qualità di segnale, altrimenti i disturbi e le variazioni d'impedenza della linea comprometterebbero l'informazione.

3.2.2 Board

In questa sottosezione è stato documentato lo sviluppo della scheda, l'ambiente di sviluppo utilizzato per lo sviluppo della scheda è *Altium 16*. Segue un riassunto generale delle peculiarità della board.

- Connessione USB al PC per alimentazione e comunicazioni
- Per il collegamento cablato sarà usato il cavo Ethernet data la sua facile reperibilità³
- Alimentazioni per i SGC disponibile sulla linea cablata
- Ingresso 12V su MSCG per alimentazioni SGC
- Time to Digital per la misura del DTOA
- GPS con PPS $\pm 11ns$ (da montare se richiesto)
- High Performance MCU
- Radio LoRa
- Espansioni, indicazioni LED e pulsanti

In figura 3.2 è mostrato uno schema a blocchi del collegamento cablato (necessario alla localizzazione indoor) tra le schede.

³È usato un cavo Ethernet per la sua disponibilità, non viene in alcun modo usato il protocollo Ethernet. Il requisito della scelta del cavo è che abbia almeno due coppie di doppini twisted-pair, una per il segnale differenziale ed una per l'alimentazione.

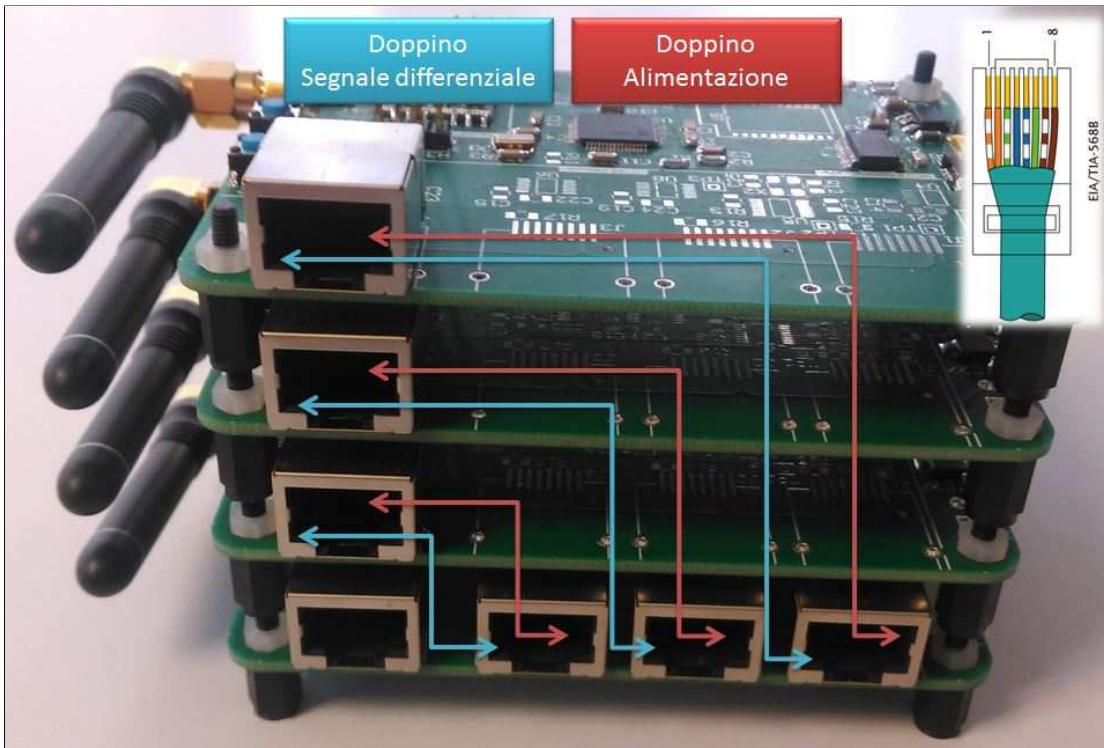


Figura 3.2: Schema collegamento cablato

Il cavo Ethernet viene usato come coppie di doppini twisted-pair nel seguente modo.

1. Segnale differenziale +
2. Segnale differenziale -
3. Non usato
4. Non usato
5. Non usato
6. Non usato
7. Alimentazione: +12V
8. Alimentazione: GND

3.2.2.1 Schemi elettrici

Dopo aver scelto i componenti di base si è passati alla creazione degli schematici.

3.2. Progettazione Board

29

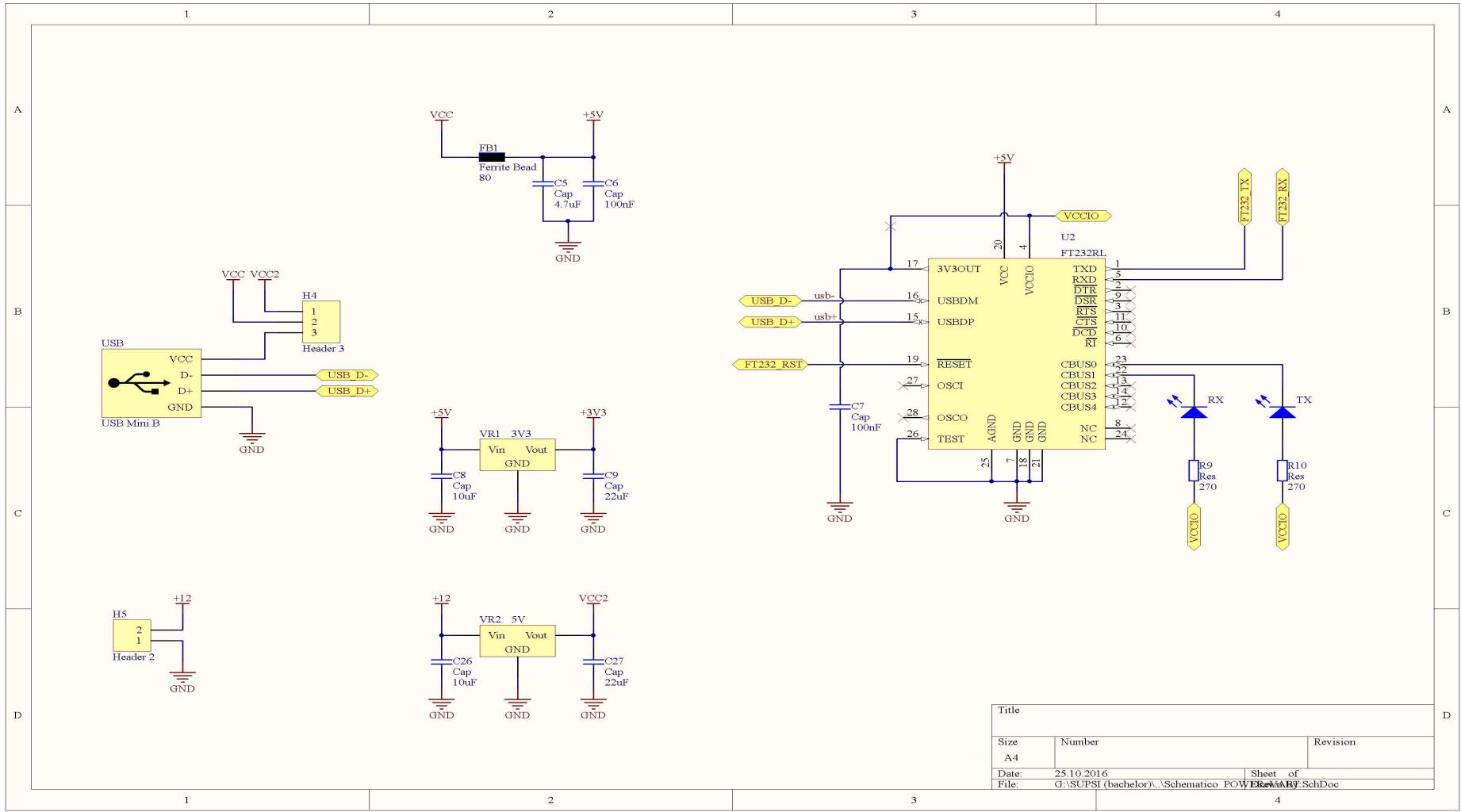


Figura 3.3: Schematico Alimentazione e Comunicazione USB

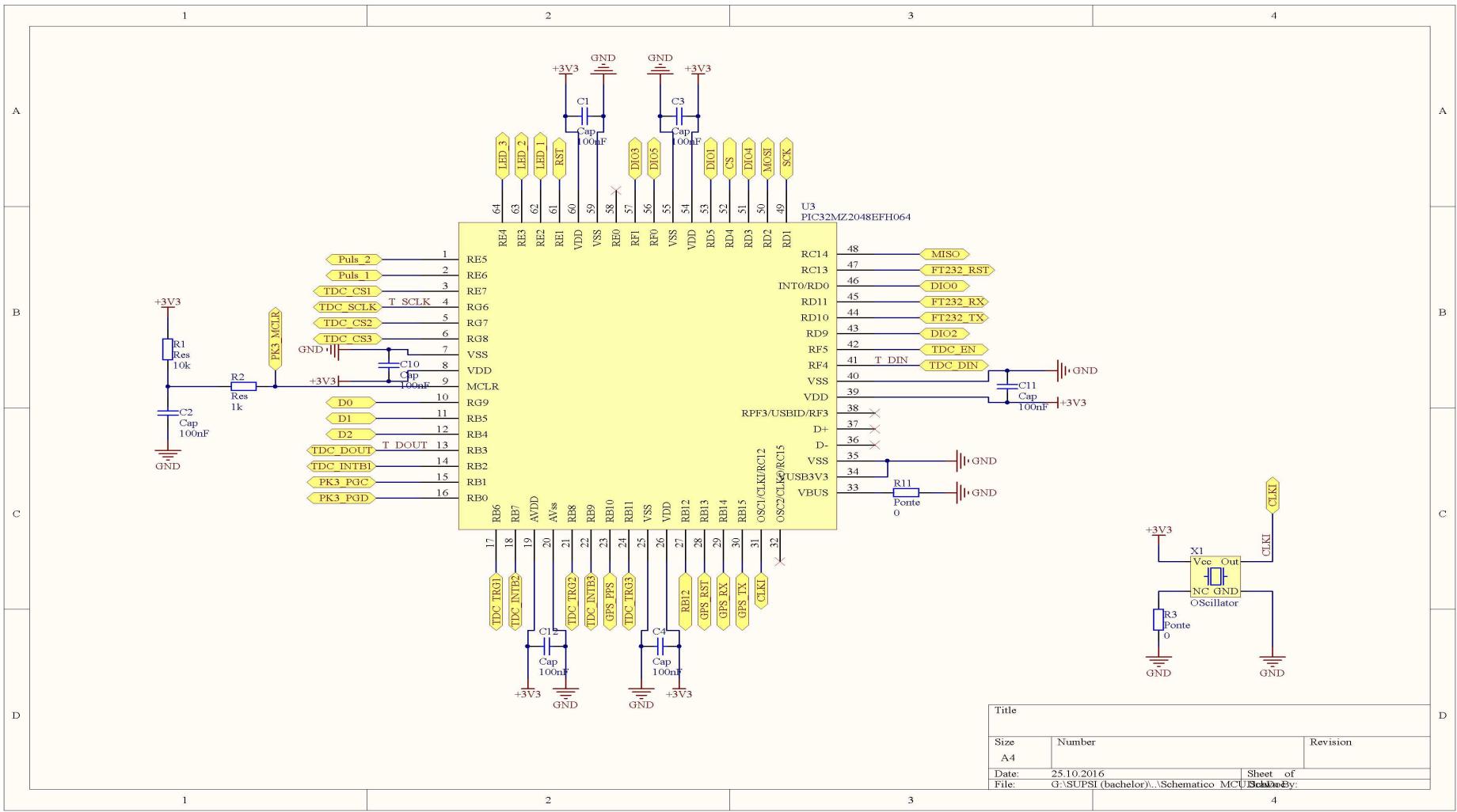


Figura 3.4: Schematico MCU

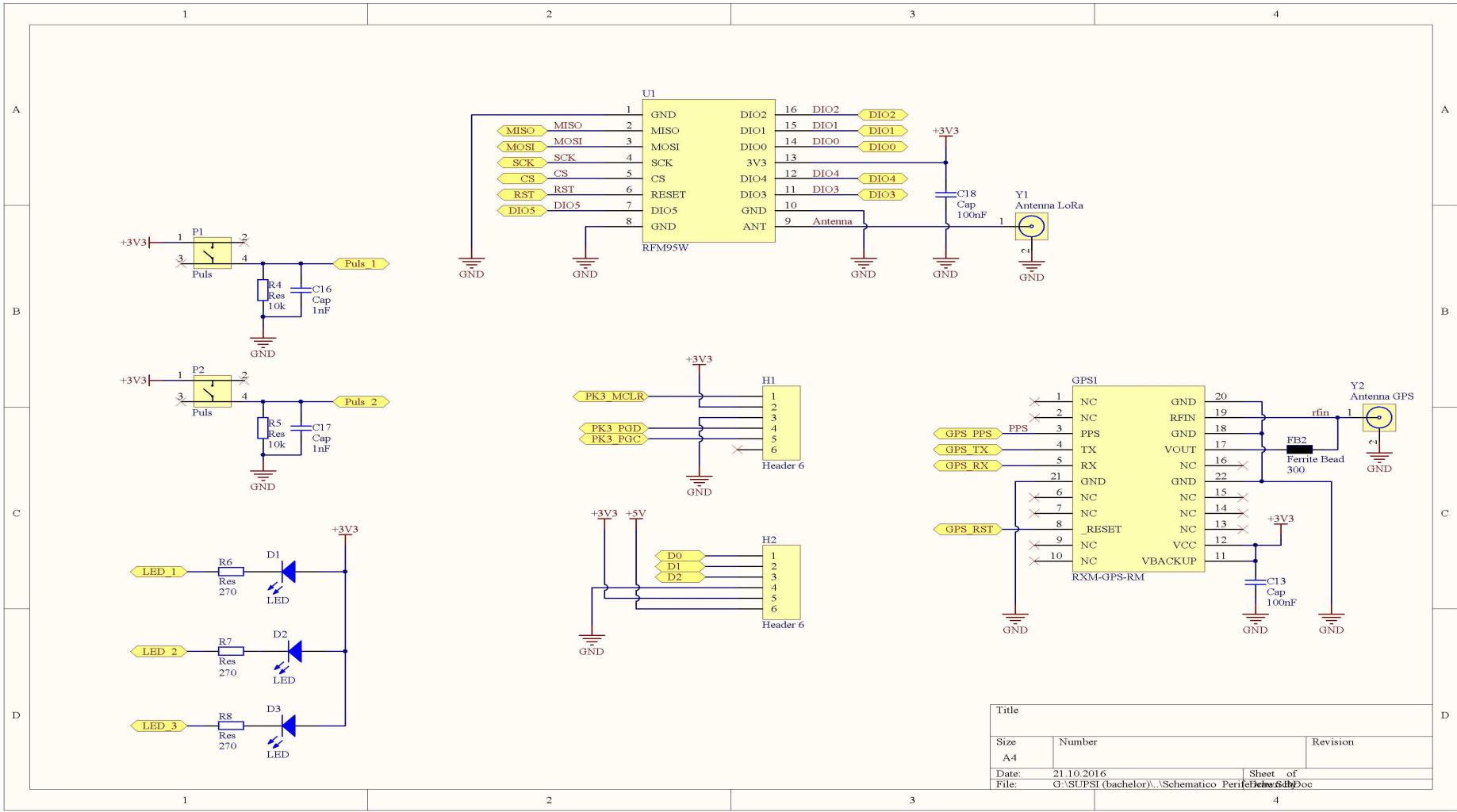


Figura 3.5: Schematico Periferiche

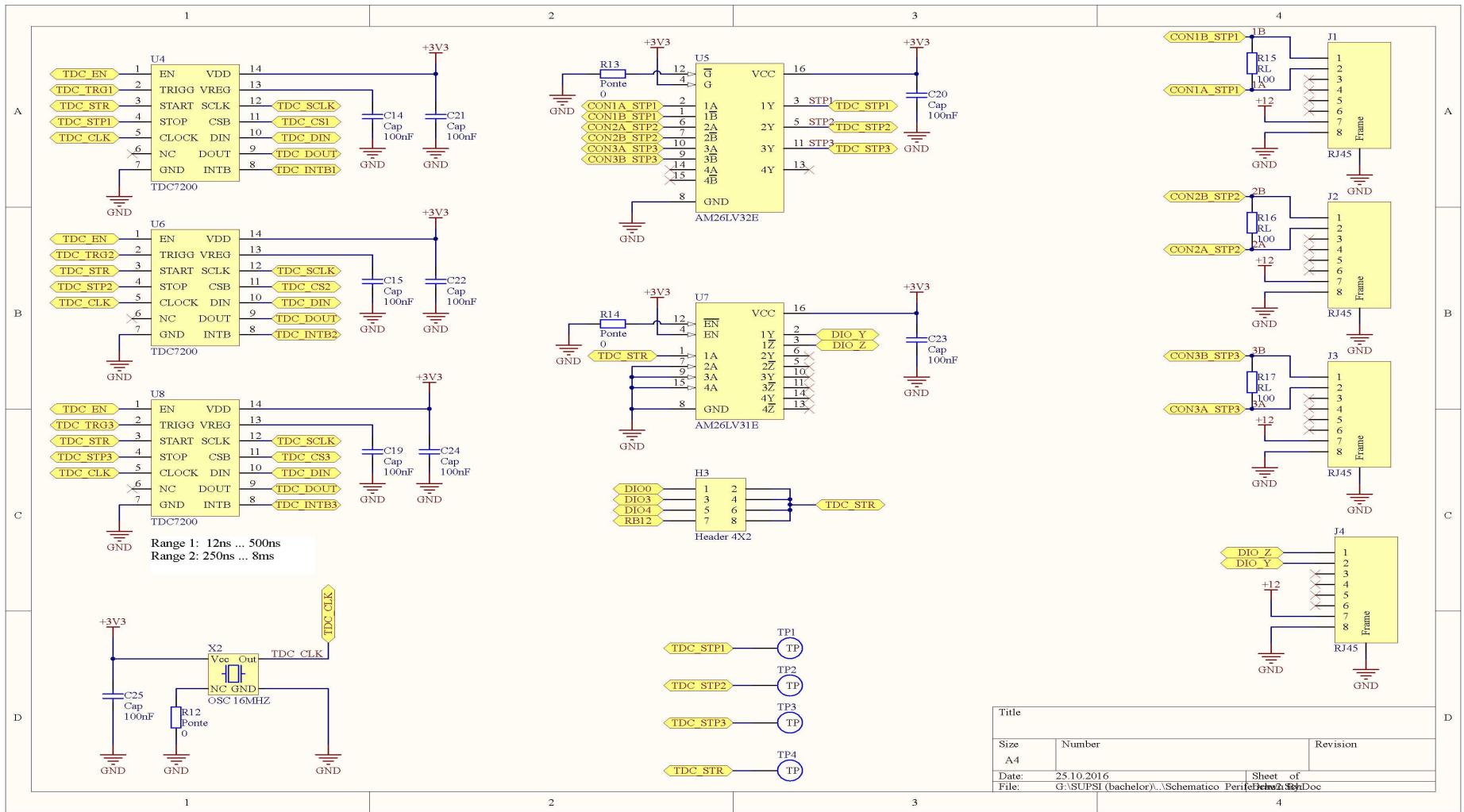


Figura 3.6: Schematico Periferiche Localizzazione Wired

3.2.2.2 PCB

Data la densità di connessioni soprattutto nella zona del MCU è stato scelto di usare un PCB 4-layer. Internamente è presente il piano di *GND* ed il piano di alimentazione $+3.3V$, i segnali sono posti sui layer esterni.

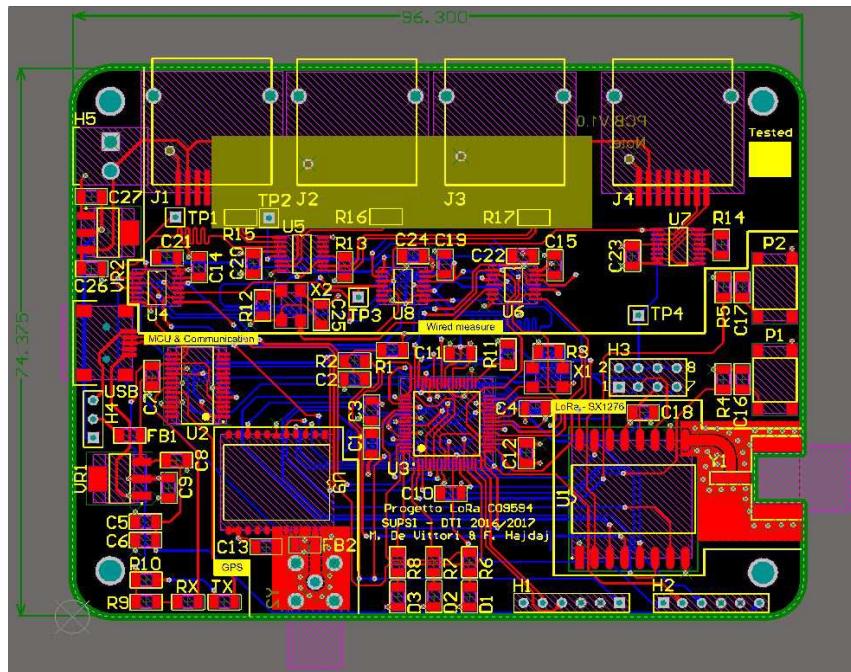


Figura 3.7: PCB Layout ~1:1

In figura 3.7 è riportato il layout finale del PCB.

Il matching di impedenza delle antenne è stato fatto usando un tool di calcolo online[20]. Per alcuni segnali critici (es. USB D+, USB D-, Linee differenziali, ...) si è usato il criterio di parità di lunghezza delle piste, parallelismo ed impedenza (90Ω per USB).

Sotto l'area dove sono montati i connettori delle antenne ($Y1$ e $Y2$) sono stati rimossi i segnali, il piano di alimentazione $+3.3V$ ed aggiunti un ulteriore piano di *GND* sui layer esterni.

Importando i file di fabbricazioni sul sito del produttore di PCB www.eurocircuits.com è stata verificata la correttezza dei file necessari per la creazione del circuito stampato.

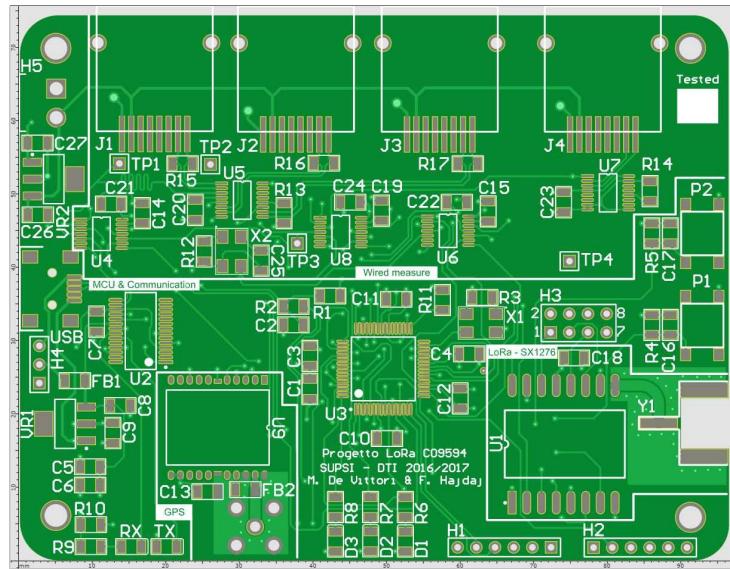


Figura 3.8: Anteprima ~1:1 PCB Top da www.eurocircuits.com

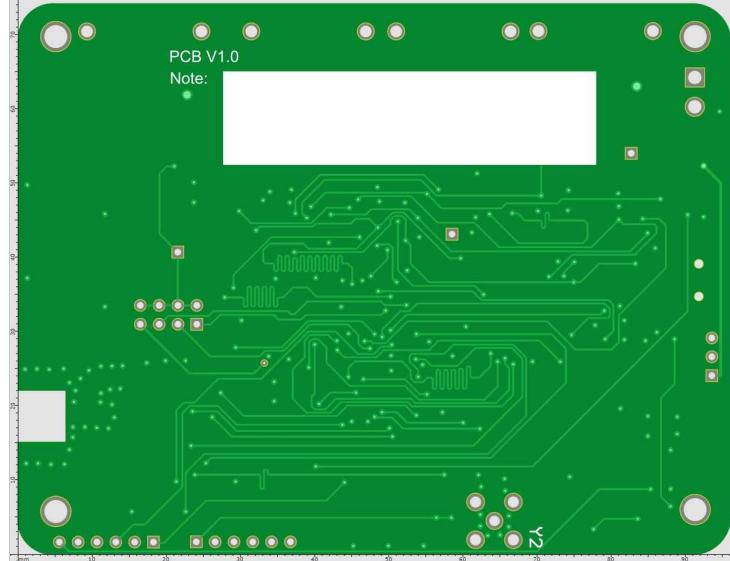


Figura 3.9: Anteprima ~1:1 PCB Bottom da www.eurocircuits.com

La figura 3.10 è stata prodotta in ambiente *Altium 16* in modo da dare immediatamente un’idea del prodotto finale assemblato.

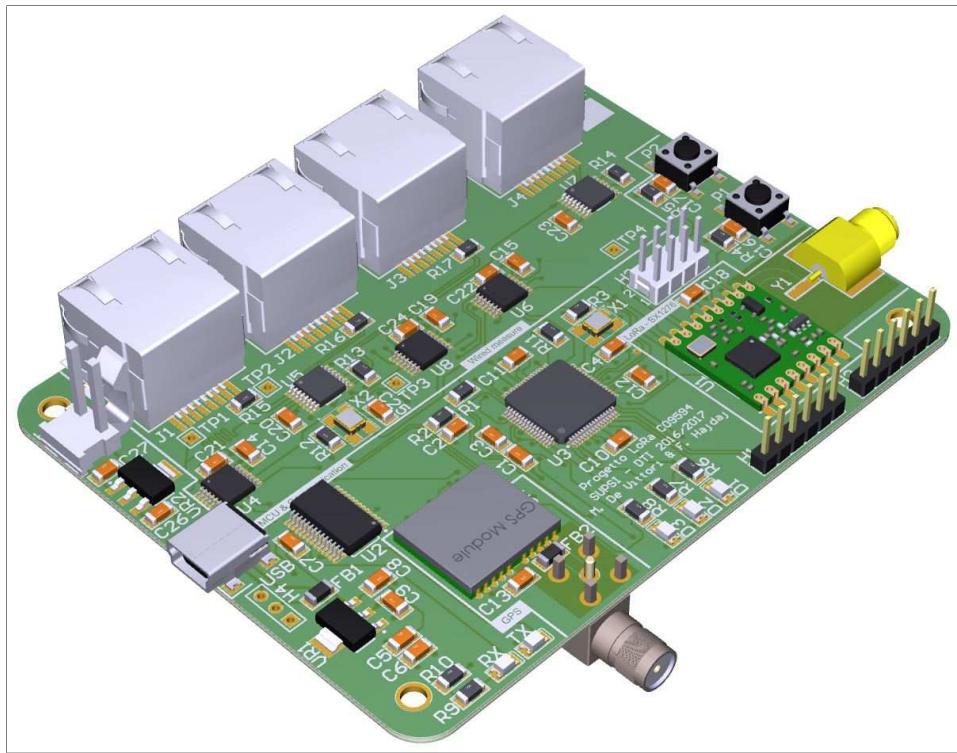


Figura 3.10: Anteprima ~1:1 3D della scheda

Dopo la verifica del PCB è stato emanato l'ordine al produttore www.eurocircuit.com.

3.3 Firmware

3.3.1 Verifica PCB

Per la verifica della correttezza del funzionamento del PCB è stato previsto un firmware che verifichi la funzionalità del modulo LoRaTM, del IC TDC7200, dei LED, dei pulsanti e della comunicazione tra PC e scheda.

3.3.2 Network di Sensori

Per la realizzazione del firmware per il network di sensori sono stati usati dei sorgenti della libreria LoRaTM[10] per la gestione del IC SX1276.

3.3.3 Distanza di trasmissione

Il firmware della verifica della distanza di trasmissione prevede l'uso del codice del "Test Network di Sensori" (vedi sezione *Network di Sensori*).

3.3.4 Localizzazione Wired

Il firmware necessario alla localizzazione è sviluppato a partire dal codice del "Test Network di Sensori" (vedi sezione *Network di Sensori*), solo la parte del MSCG è stata modificata in modo da leggere le differenze di tempo tra gli interrupt del MSG e i SCG. Dato che si tratta di localizzazione cablata i cavi dai SCG verso il MSCG devono garantire un ritardo minimo conosciuto in modo che l'interrupt di ricezione del MSCG avvenga prima di tutti dato che fornisce lo start alla misura del ritardo.

3.3.5 Accesso LoRaWANTM

Un possibile stack LoRaWANTM in linguaggio C per gli end-device di categoria A e B è fornito da IBM[7]; anche Semtech fornisce già lo stack[17] per l'implementazione. I file sorgente si trovano sul CD che accompagna questa documentazione.

Data la versatilità dell'IC SX1276 usato basta semplicemente adattare il codice all'hardware per avere un nodo compatibile LoRaWANTM per una possibile connessione a Gateway di gestori di telefonia come Swisscom.

Capitolo 4

Realizzazione e test

In questa sezione è illustrata la fase di montaggio dell'hardware e sono esposti i test eseguiti.

4.1 Realizzazione Single Channel Gateway

4.1.1 Montaggio Board

In figura 4.1 è mostrato il PCB fabbricato da *eurocircuit*. La scheda si presenta come in anteprima sul sito tranne per la copertura dei vias che non è presente nel PCB prodotto.

La saldatura dei componenti ha richiesto circa 8 ore per 4 schede. In figura 4.1 è mostrata una scheda MSCG completamente saldata.

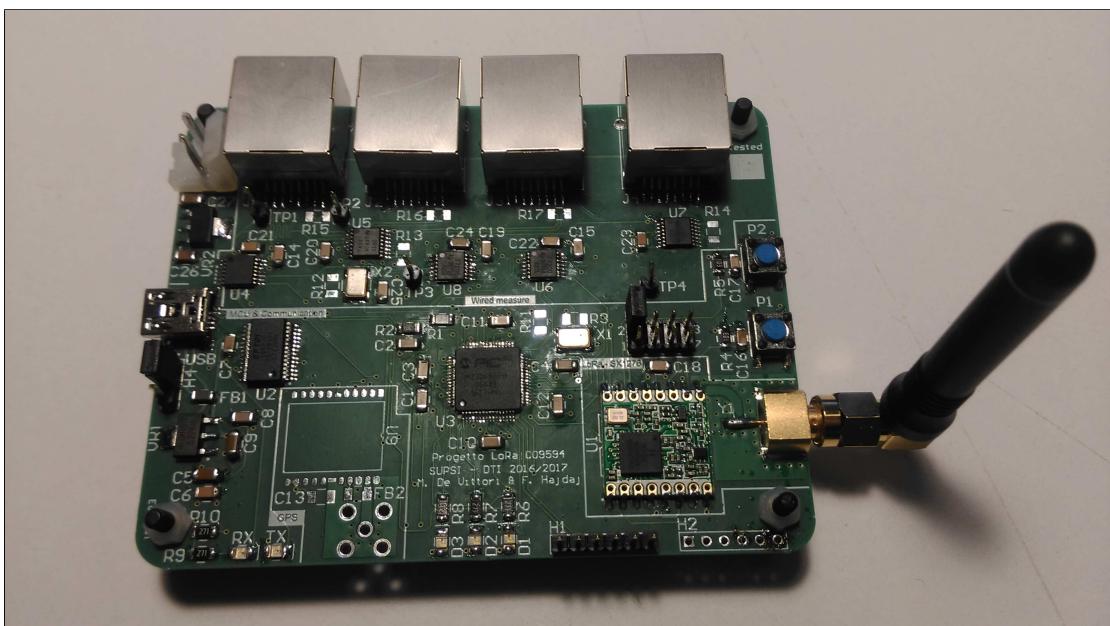


Figura 4.1: Scheda montata - MSCG

La figura 4.2 è una scheda SCG o NODE, come si nota i componenti superflui (per evitare l'acquisto inutile di componenti) non sono stati montati; pertanto tale scheda non può essere usata come MSG.

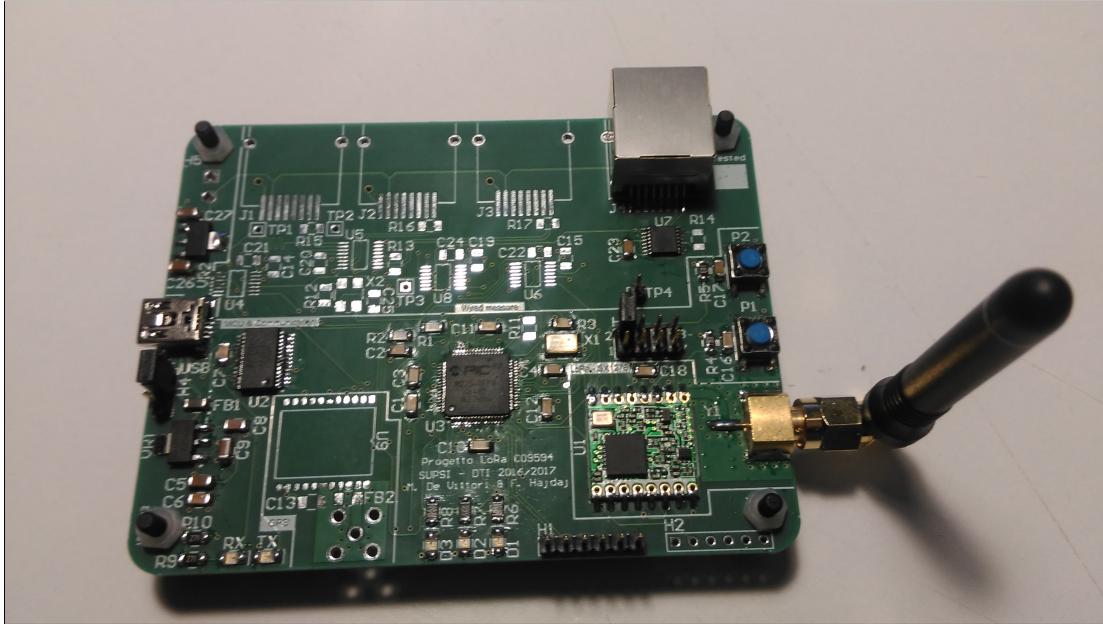


Figura 4.2: Scheda montata - SCG/Node

Le figure seguenti mostrano tutte e 4 le schede completamente montate.



Figura 4.3: Schede montate - Front

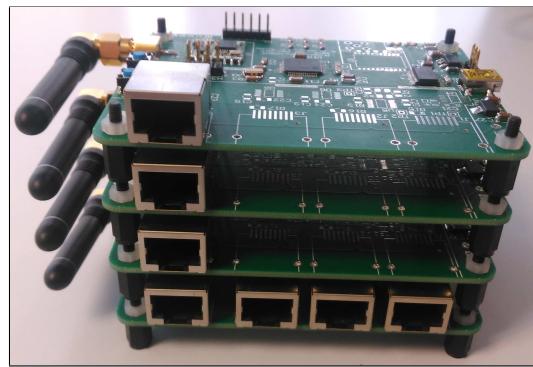


Figura 4.4: Schede montate - Back

4.2 Firmware e Test

Prima di procedere alla programmazione del firmware per il microcalcolatore è stato necessario installare sul PC i driver per l'IC FT232 e programmarlo per il corretto funzionamento dei led di segnalazione TX-RX[3].

Per quanto concerne la comunicazione *PC↔Board* è stato scelto di usare un semplice protocollo formato da caratteri/stringhe ASCII.

I programmi sono stati sviluppati con l'IDE *MPLABX v3.5* fornito direttamente dalla *Microchip*. Oltre all'IDE è stato necessario installare il compilatore *XC32*. Per accelerare

la fase di sviluppo è stato usato il framework *MPLAB Harmony* ed il *MPLAB Code Composer* che consentono di generare codice in automatico.

Tutti i codici sono presenti nel CD che accompagna questa documentazione.

4.2.1 Verifica PCB

Il firmware per la verifica del PCB è minimale, testa in maniera triviale le periferiche montate.

Nonostante la semplicità tutti i firmware sviluppati sono basati su questo in modo da non ripetere la fase di impostazione del workspace e della definizione della piedinatura.

4.2.2 Network di Sensori

Il programma "Network di Sensori" prevede l'invio di dati dai SCG al MSCG, verrà in seguito utilizzato per eseguire test di distanza e localizzazione.

Il firmware per la rete di sensori è stato implementato velocemente, è bastato creare un Gateway (MCSG o SCG) ed impostare le altre schede come nodi; tutto questo sfruttando la libreria[10] dato che con il tempo a disposizione era impossibile realizzare tale libreria. Sono state apportate molte modifiche alla libreria poiché in origine è sviluppata per Arduino. La peculiarità di questo firmware sta nel fatto che l'accesso alla radio è diretto, non c'è nessun protocollo da gestire/seguire.

Una volta programmate le 4 schede e messe in funzione è stato possibile testare il funzionamento del network. A seguire un log della messaggistica in output dal Gateway in modo da vedere i messaggi ricevuti.

```
STATUS: Initialization
SX1276 detected, starting...
Start SX1276 LF/HF calibration
Set LoRa ... ...
*****$*****
$Power ON: state 0
$Default sync word: 0x12
$LoRa mode 1: state 0
$Channel CH_10_868: state 0
$Set LoRa Power to X: state 0
$Preamble Length 8: state 0
$LoRa addr 1: state 0
$SX1272/76 configured as LR-BS. Waiting RF input for transparent RF-serial bridge

--- rxlora on BW=125, CR=5, SF=12
^packet info: dst=1, type=16, src=3, pktnum=42, payload=11, SNR=6, RSSIpkt-51
$LoRA RX: T = 19

--- rxlora on BW=125, CR=5, SF=12
^packet info: dst=1, type=16, src=4, pktnum=41, payload=11, SNR=6, RSSIpkt-61
$LoRA RX: T = 21

--- rxlora on BW=125, CR=5, SF=12
^packet info: dst=1, type=16, src=2, pktnum=40, payload=11, SNR=6, RSSIpkt-71
$LoRA RX: T = 19
```

Listato 4.1: Log file del Gateway del Network di Sensori LoRaTM

Come si nota nel listato 4.1 sono presenti tre sorgenti (**src**) distinte ed un unico destinatario (**dst**). Ogni nodo invia la temperatura interna al proprio IC SX1276 in gradi Celsius.

4.2.3 Distanza di trasmissione

Sfruttando il firmware per il test del network di sensori è stata verificata la massima distanza di comunicazione.

La tabella 4.1 riporta le condizioni climatiche al momento della fase di test.

Tabella 4.1: Condizioni climatiche

Clima	
Tempo	Nuvoloso
Temperatura	8 [°C]
Umidità	75%
Vento	5 [km/h]

La verifica della distanza di trasmissione è stata effettuata con il nodo ed il MSCG piazzati esternamente. Non c'è stata una linea visiva "pulita" tra nodo e MSCG dato che entrambi sono stati piazzati al suolo e dunque tra trasmettitore e ricevente sono stati presenti costruzioni/vegetazione.

I parametri di modulazione usati sono stati i seguenti:

1. Modulazione LoRa™ 868MHz
2. Bandwidth (BW): 125kHz
3. Coding Rate (CR): 5
4. Spreading factor (SF): 12
5. Potenza in uscita: +20dBm (100mW)

I parametri di modulazione sono stati scelti in modo da avere la massima distanza di trasmissione possibile.

Tabella 4.2: Misure effettuate

Distanza [km]	Lat	Lon	SNR [dB]	RSSI [dBm]	Dati validi
0,00	46°15'16.260"N	009°01'14.951"E	7	-72	✓
1,06	46°15'20.531"N	009°00'25.639"E	4	-111	✓
4,30	46°17'01.605"N	008°59'03.256"E	-5	-120	✓
5,27	46°17'53.625"N	008°59'39.912"E	-20	-121	✓
7,69	46°18'54.476"N	008°58'21.779"E	-19	-124	✓
11,12	46°20'44.174"N	008°57'39.677"E	-21	-125	✓/✗
12,80	46°21'38.007"N	008°57'21.790"E	-22	-121	✗

I dati danno un'idea della distanza di trasmissione utile; nel caso testato, in un ambiente urbano non denso di edifici, la distanza utile risulta essere circa 10km.

La distanza massima di trasmissione può essere notevolmente migliorata, sul mercato sono presenti dispositivi dove è già possibile raggiungere potenze in uscita di +30dBm¹ e con un antenna di +6dBi si arriva a 4W.²

È anche disponibile la versione con potenza d'uscita più elevata del modulo LoRaTM usato in questo progetto.³

Dato che questa tecnologia RF è ancora agli albori in futuro si prevedono dispositivi con potenze elevate in grado di raggiungere distanze di trasmissione superiori a 100km.

¹FCC Rules for Unlicensed Wireless Equipment operating in the ISM bands

²http://www.team-blacksheep.com/products/prod:crossfire_tx

³http://www.hoperf.com/rf_transceiver/Enhanced_Power/RFM95PW.html

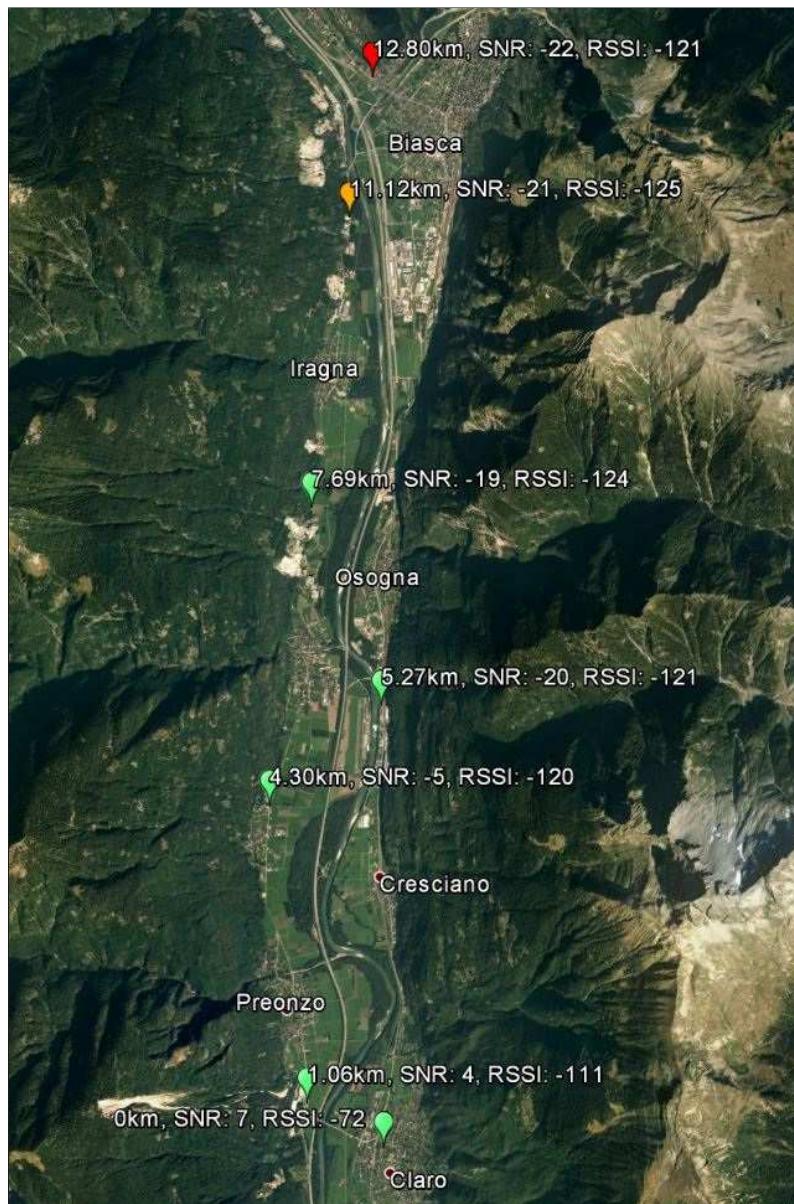


Figura 4.5: Carta geografica - Test distanza di trasmissione

La figura 4.5⁴ mostra la carta geografica con i vari punti di misura. La trasmittente si trova nel punto del rilevamento "0km".

4.2.4 Localizzazione Wired

Legenda valida per tutte le figure prese dall'oscilloscopio:

- Canale 1 collegato al TP4 della scheda MSCG.
- Canale 2 collegato al TP1 della scheda MSCG.

Per prima cosa si è verificato il corretto funzionamento nelle misure attraverso gli IC TDC7200 misurando contemporaneamente con l'oscilloscopio e con l'IC ed in seguito

⁴Realizzata con *Google Earth*

confrontando i risultati ottenuti.

Per il test è stato implementato un nodo trasmettitore e due ricevitori, un MSCG ed un SCG; il SCG è collegato al MSCG tramite il cavo predisposto. Si ricorda nel test il segnale d'interrupt *ValidHeader* del SCG deve arrivare dopo il segnale d'interrupt *ValidHeader* del MSCG poiché quest'ultimo fa da start per l'IC TDC7200.

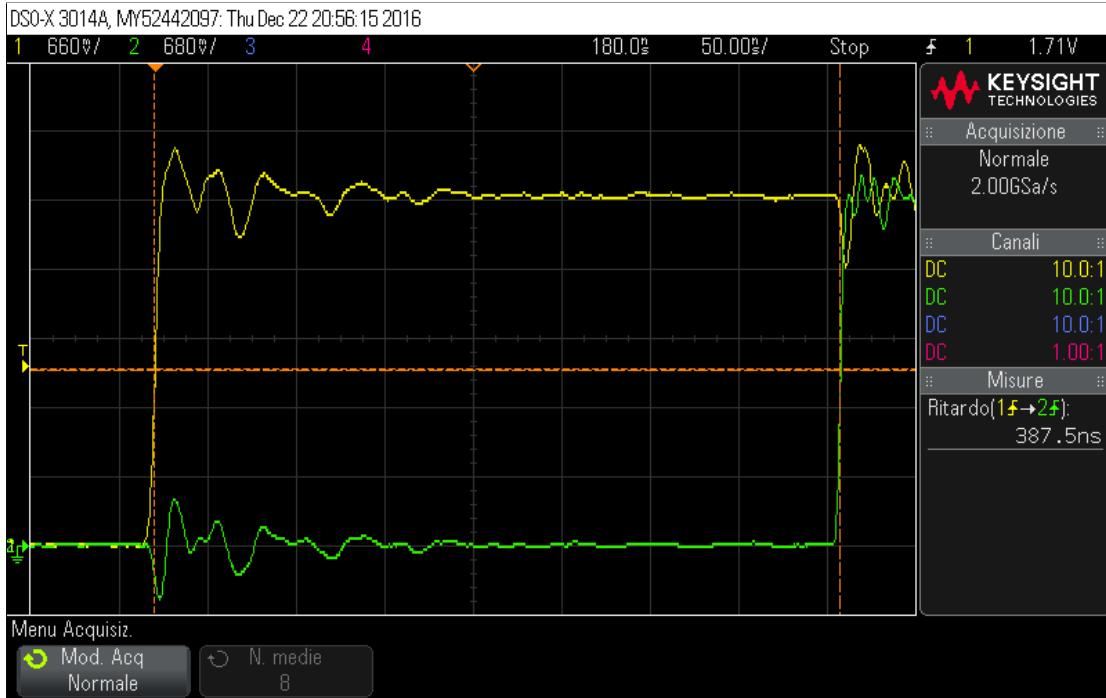


Figura 4.6: Verifica misura TDC7200

```
TDC7200(1) meas: 3.868727e-07
TDC7200(2) meas: 2.668999e-08

--- rxlora on BW=500, CR=5, SF=7
^packet info: dst=1, type=16, src=95, pktnum=1, payload=24, SNR=6, RSSIpkt-50
$LoRa RX: Messaggio da nodo LoRa
e=16, src=95, pktnum=1, payload=24, SNR=6, RSSIpkt-50
```

Listato 4.2: Log file della misura dell'IC TDC7200

Come si nota dalla figura 4.6 e dal listato 4.2 la misura rilevata tramite l'IC TDC7200 ($3.868727e - 07$) è corretta.

Dopo la verifica del funzionamento nella rilevazione delle misure si è stata analizzata la stabilità degli interrupt.

I parametri di modulazione usati sono i seguenti:

1. Modulazione LoRaTM 868MHz
2. Bandwidth (BW): 500kHz
3. Coding Rate (CR): 5
4. Spreading factor (SF): 7
5. Potenza in uscita: +20dBm (100mW)

Nella figura 4.7 sono mostrate quattro diverse misure effettuate per determinare la stabilità dell'interrupt *ValidHeader*, le aspettative erano alte ma purtroppo la variazione

tra più misure dell'interrupt è elevata e perciò la precisione della localizzazione risulta scarsa.



Figura 4.7: Differenza di tempo tra gli Interrupt *ValidHeader* di 2 schede vicine

Eseguendo più misure si arriva ad un valore medio di circa 600ns (180m). Con questi valori una localizzazione indoor cablata con cavi di 100m non è possibile poiché la differenza tra gli interrupt è troppo elevata.

Un fattore molto importante che ha limitato il nostro test è il numero di Gateway, nel test sono stati usati 3 Gateway (il minimo) è perciò l'errore nella localizzazione risulta "massimo". Una possibile soluzione è l'aumento in maniera considerevole del numero di Gateway che garantisce un aumento della precisione della localizzazione.[8]. Un'altra soluzione sarebbe integrare più tecniche di localizzazione, per esempio la tecnica RSSI, alla TDOA in modo da rendere più performante la localizzazione.

Per comprendere come influisce sull'errore in metri rispetto al nodo da localizzare è stato creato uno script MATLAB con tre Gateway (vedi figura 4.8) .

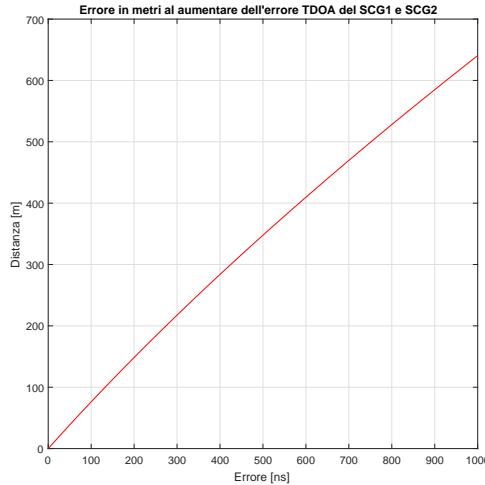


Figura 4.8: Errore della localizzazione all'aumentare dell'errore di misura del TDOA

In figura 4.9 è riportata una simulazione di un esempio concreto.

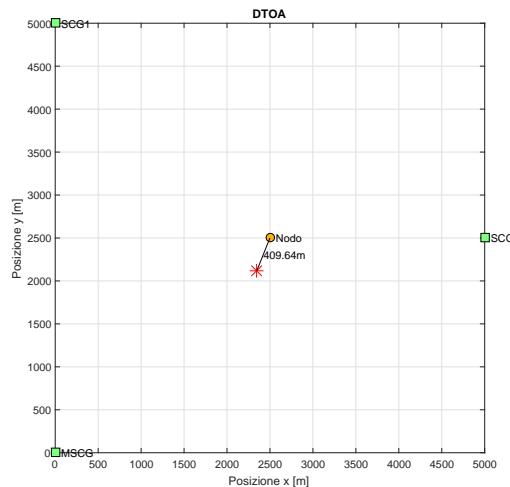


Figura 4.9: Esempio di localizzazione con errori di 600ns dei tempi misurati

L'articolo [11] fornisce molte informazioni utili come ad esempio una stima del worst-case nella localizzazione che si calcola con la formula

$$t_{error} = \frac{1}{B}$$

dove B è la banda del segnale. Nel nostro caso e per avere la precisione maggiore è necessario usare una banda di $500kHz$ che corrisponde ad un errore massimo di

$$d_{error} = c \cdot t_{error} = c \cdot \frac{1}{B} = 299'792'458 \frac{m}{s} \cdot \frac{1}{500kHz} = 599.584916[m]$$

Ulteriori informazioni inerenti il processo di sincronizzazione del segnale che determina la latenza dell'interrupt *ValidHeader* sono reperibili consultando il brevetto *EP2975814*.

La figura 4.10 dà una prima idea delle peculiarità e dei difetti dei vari servizi disponibili per la localizzazione di dispositivi IoT. Come si può constatare la precisione nella localizzazione attraverso LoRaTM risulta bassa.

	GPS	LoRa	RFID	Mobile Cellular
Mobile Node Device Cost	High	Small	Very Small	High
Infrastructure Cost	High	Small	High	High
Air Time Costs	No	No	No	Yes
Size	Medium	Small	Very Small	Big
Mobile Node Battery Lifetime	Short	Long	Very Long	Short
Communication Capability	No	Fair	Very Limited	Good
Indoor Usage	No	Yes	Yes	Yes
Optimized for Small Data Packets	No	Yes	Yes	No
Range / Distance	Global	High	Very Small	High
Precision	High	Low	High	Low
Update Rate	High	Low	High	Medium
Position Known to Infrastructure	No	Yes	Yes	Yes
Dependency on Third Parties	High	Medium	Low	High
Usage	Global	Regional	Local	Regional

Figura 4.10: Servizi di localizzazione per IoT

La ditta svizzera *Parametric Engineering GmbH*⁵ è stata incaricata di sviluppare i Gateway LoRaWANTM di seconda generazione per il supporto della localizzazione, sino ad oggi (17.01.2017) tali oggetti non sono ancora stati rilasciati su mercato.

Un futuro test molto interessante consiste nel creare/simulare (per evitare costi d'infrastruttura) una fitta rete di Gateway ed analizzare come cambia la precisione in rapporto al numero di Gateway ed alla loro posizione reciproca.

4.2.5 Accesso LoRaWANTM

Grazie alla disponibilità dell'azienda Swisscom SA è stato possibile accedere alla rete nazionale LoRaWANTM.[19] La copertura a livello svizzero, come visibile in figura 4.11, è di circa l'80% della popolazione.

⁵<http://www.parametric.ch/lora-2nd-gen-gateway-reference-design/>

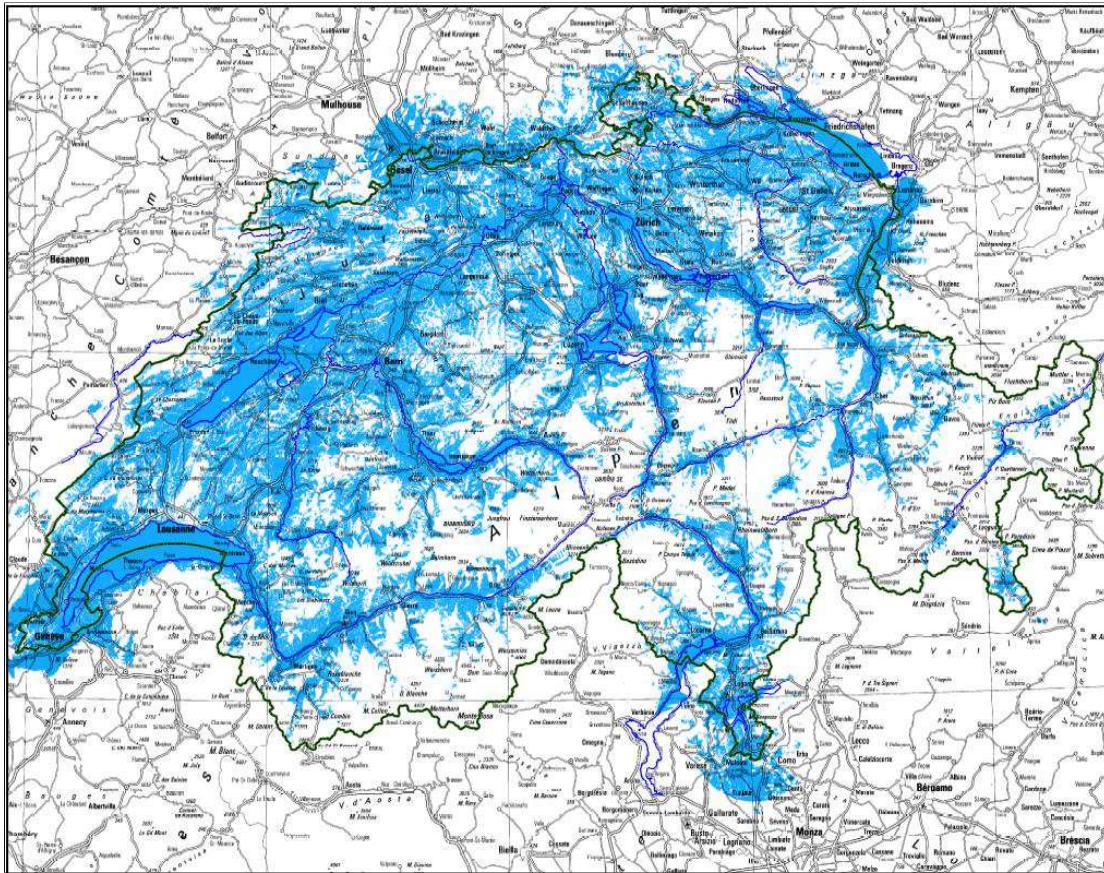


Figura 4.11: Copertura LoRaWAN™ di Swisscom SA

Lo stack usato è stato quello fornito direttamente dalla Semtech, *LoRaMAC*[15]. Le funzioni principali da adattare all'hardware sono poche:

- Comunicazione SPI: *uint8_t SX1276spi(uint8_t data)*
- Reset SX1276: *void SX1276Reset (void)*
- Tempo attuale in ms: *TimerTime_t TimerGetCurrentTime(void)*

Dopo aver aggiunto le funzioni dipendenti dall'hardware e implementato gli accorgimenti necessari per una compilazione di successo del codice si è passati alla fase di test.

Dapprima è stato necessario aggiungere, come in figura 4.12 e figura 4.13, il nodo alla piattaforma fornita da Swisscom SA.

Figura 4.12: Aggiunta di un end-node alla piattaforma LPN (1)

Per verificare la creazione del nuovo device basta controllare se è presente nella pagina principale come in figura 4.13.

Name / Type	Device EUI / Device address	Connectivity
Test 1 LoRa - LoRaWAN 1.0 class A	EFCDA8967452301 Allocated by the NAS	swisscom-cp-trial prova

Figura 4.13: Aggiunta di un end-node alla piattaforma LPN (2)

Dopo avere aggiunto il nodo con successo si è potuto avviare il programma sviluppato; dopo la fase di "Join" si presenta come in figura 4.14.

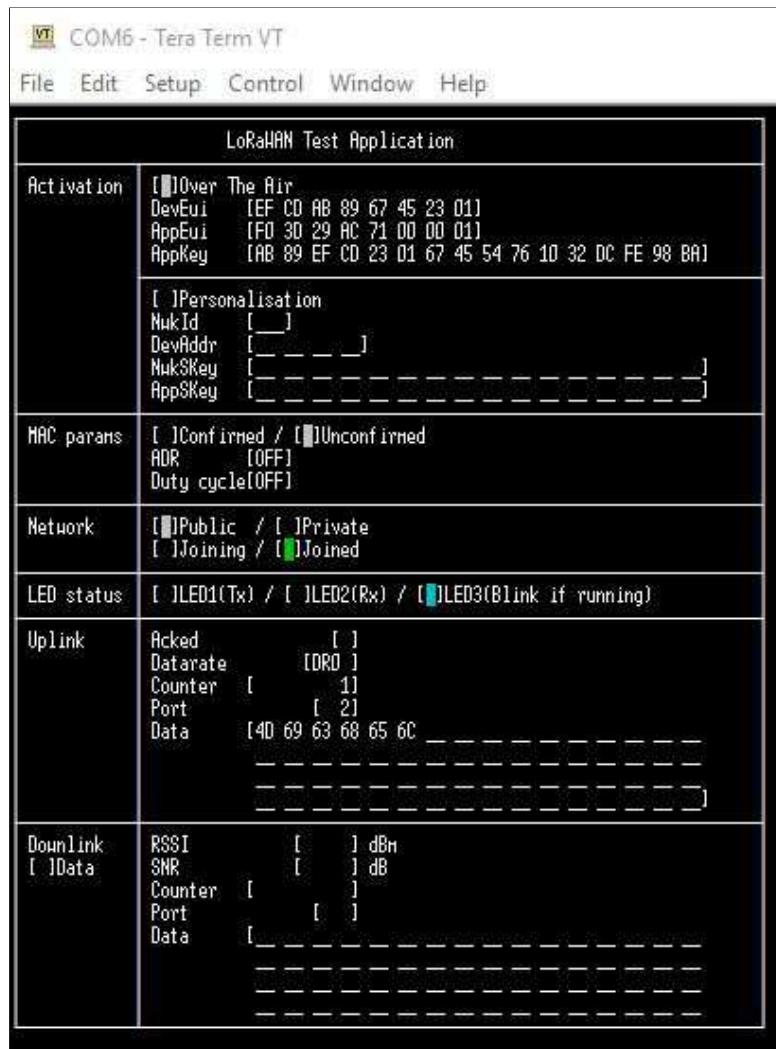


Figura 4.14: GUI gestione LoRaMAC

La prima fase per usufruire della rete consiste nella richiesta d'accesso, ovvero il "Join Request".

Nella piattaforma fornita da Swisscom SA è disponibile un logger di trasmissione, in figura 4.16 si vede la richiesta d'accesso alla rete da parte del nodo e l'accettazione del server.

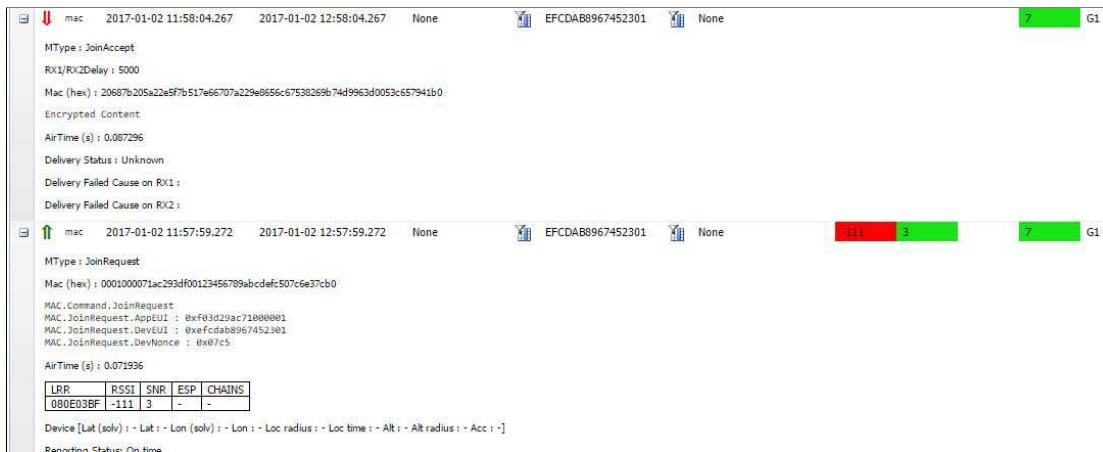


Figura 4.15: Join Request

Il firmware di test invia ogni 30s un frame come in figura 4.16.

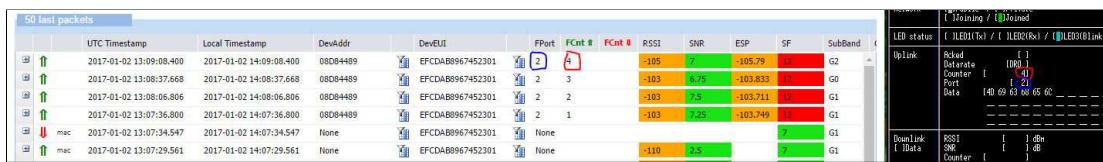


Figura 4.16: Verifica della porta usata e del contatore di uplink

In figura 4.17 si nota che non sono mostrati i dati ricevuti, in prima istanza può sembrare un malfunzionamento ma dopo aver preso contatto con la referenza⁶ in Swisscom siamo stati informati che questo è corretto poiché nella piattaforma messa a disposizione da Swisscom SA non è prevista la visualizzazione dei dati.

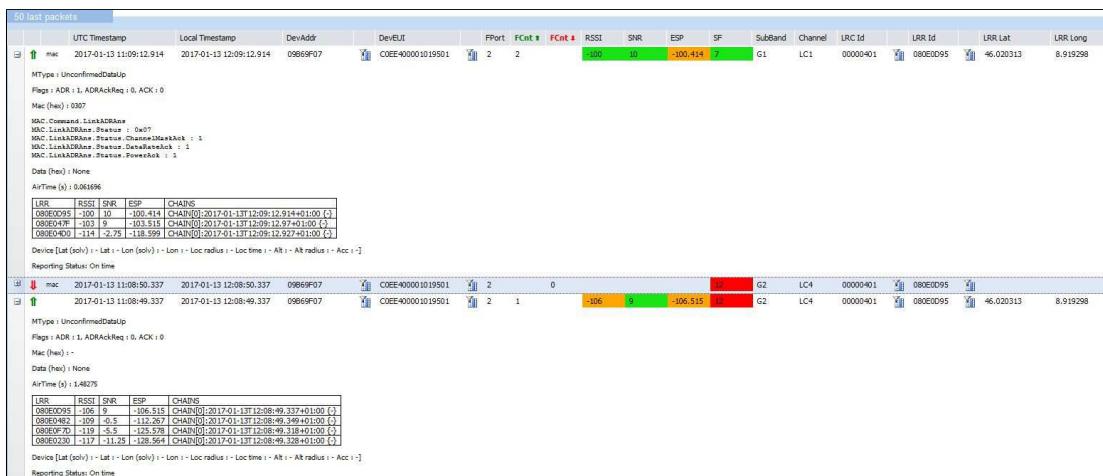


Figura 4.17: Piattaforma Swisscom SA

In figura 4.18 viene mostrata la richiesta e la risposta al ADR.

⁶Marc.Schaerl@swisscom.com

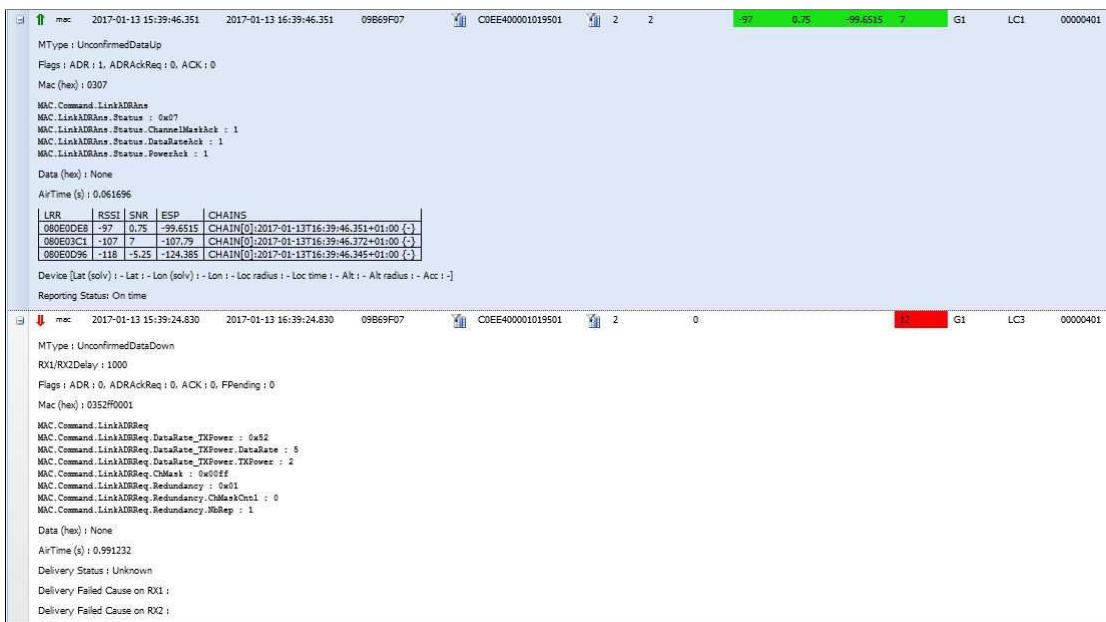


Figura 4.18: Adaptive Data-Rate

Il test d'accesso alla rete LPN si conclude qui.

Capitolo 5

Conclusioni

Il progetto è terminato in maniera soddisfacente, tutti i punti sono stati trattati anche se alcuni meritano un'ulteriore analisi.

Il network di sensori LoRaTM è stato sviluppato con successo e il test ha confermato la funzionalità.

La distanza massima di trasmissione con una potenza d'uscita di 0.1W (+20dBm) è stata misurata a circa 10km, un buon risultato in rapporto alla potenza di trasmissione. Dato che la tecnologia lo permette sul mercato sono presenti alcuni dispositivi che arrivano ad avere potenze di trasmissione, mediante amplificatori, fino a 4W (1W¹ output e guadagno +6dB in antenna); con questi dispositivi si prevede di raggiungere distanze nell'ordine delle decine di km.

La localizzazione ha dato, come quanto disponibile oggi sul mercato, risultati scarsi poiché l'errore TDOA nei test eseguiti risulta essere di circa 600ns (180m); con questi valori non è possibile eseguire una localizzazione cablata puramente indoor, resta comunque possibile localizzare oggetti in ambienti indoor con scarsa ricezione grazie alla modulazione CSS. Grazie alla disponibilità di poter montare un GPS sulle schede, in futuro si potrà usufruire di una localizzazione in un'area di 100km²; chiaramente le schede (Gateway) montanti il GPS dovranno essere all'aperto.

La connessione alla rete nazionale LPN (LoRaWANTM) di Swisscom SA è stata verificata con pieno successo.

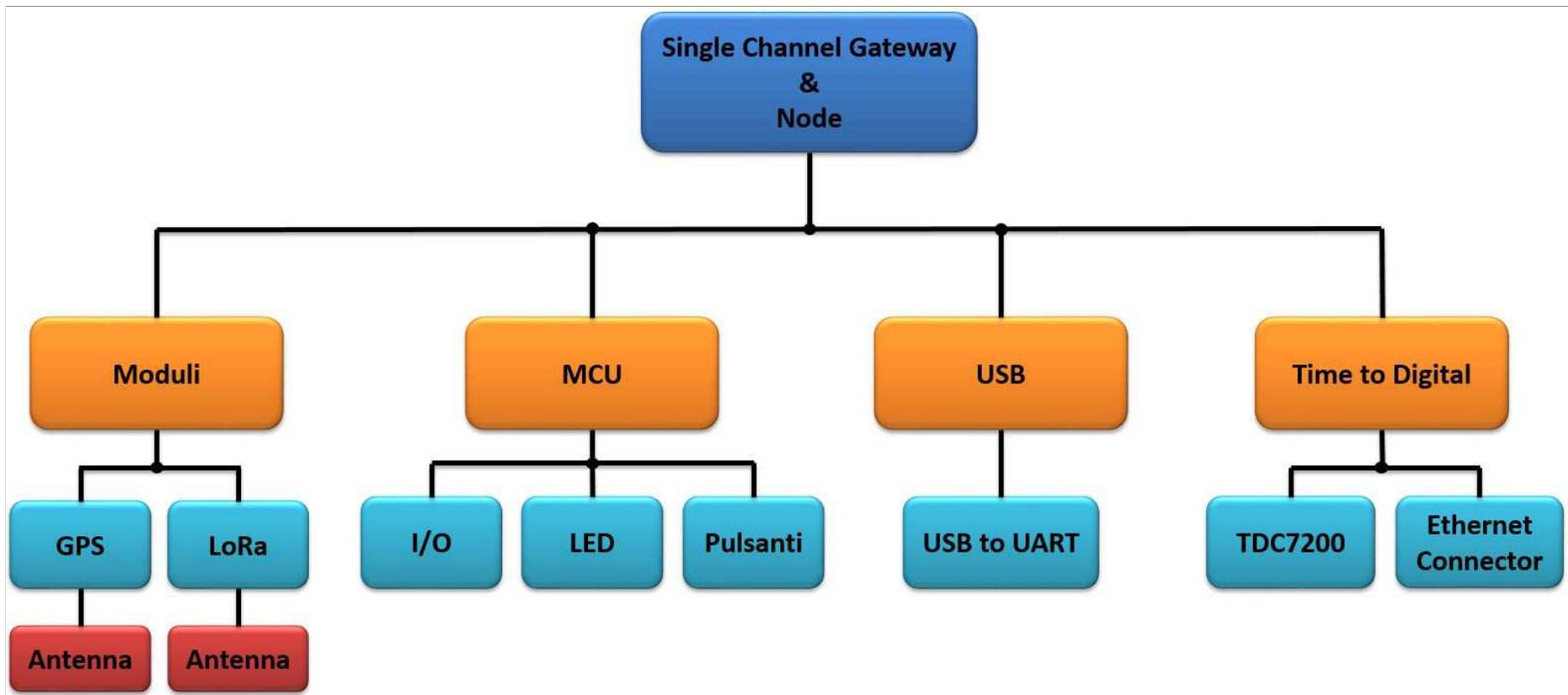
Altri punti da considerare per un ulteriore sviluppo del progetto sono elencati di seguito:

1. Redesign scheda
2. GPS su SCG per la localizzazione di nodi LoRaTM
3. Incremento della potenza di trasmissione (ISM max. 0.5W)

¹FCC Rules for Unlicensed Wireless Equipment operating in the ISM bands

Organizzazione

Product Breakdown Structure



PBS - Product Breakdown Structure

Piano di Lavoro

Iniziale

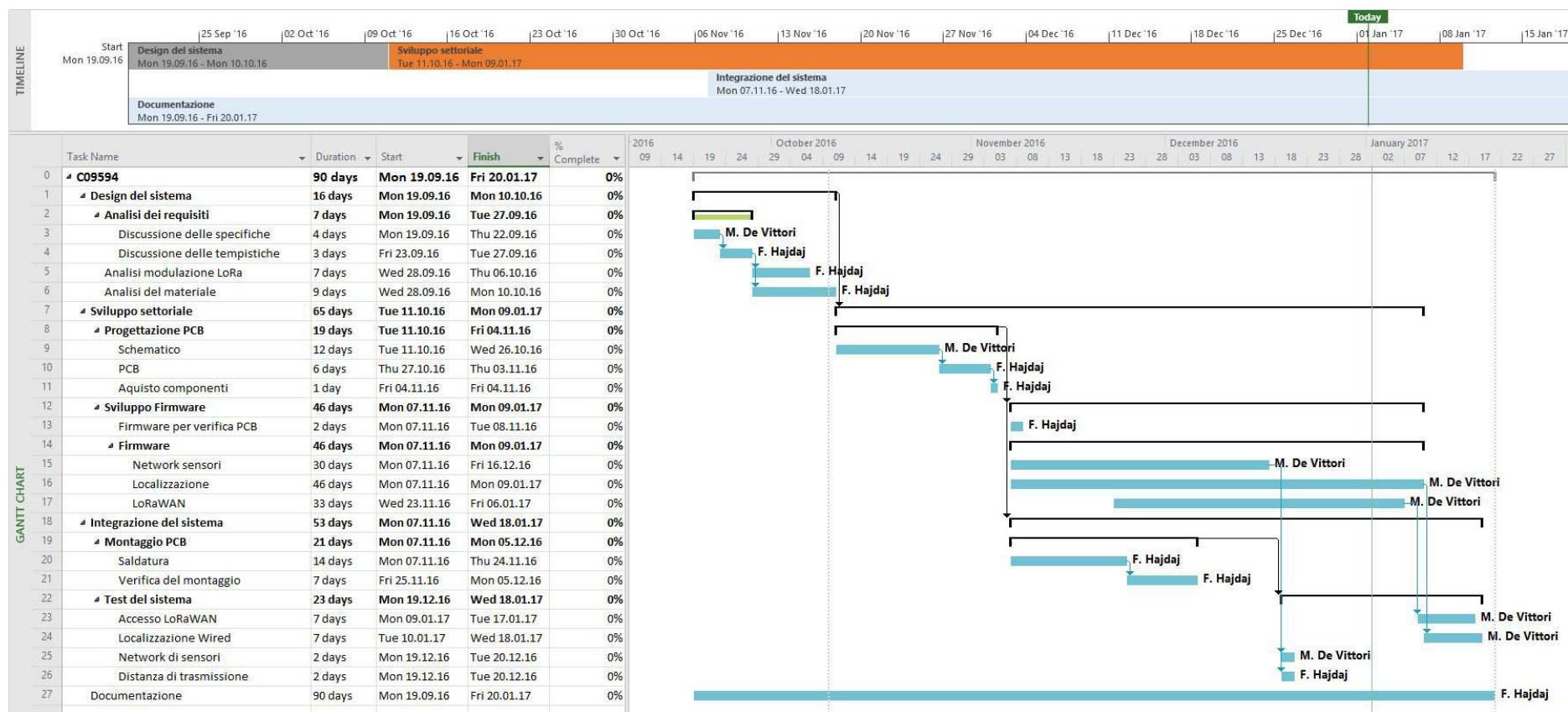


Diagramma di Gantt iniziale

Finale

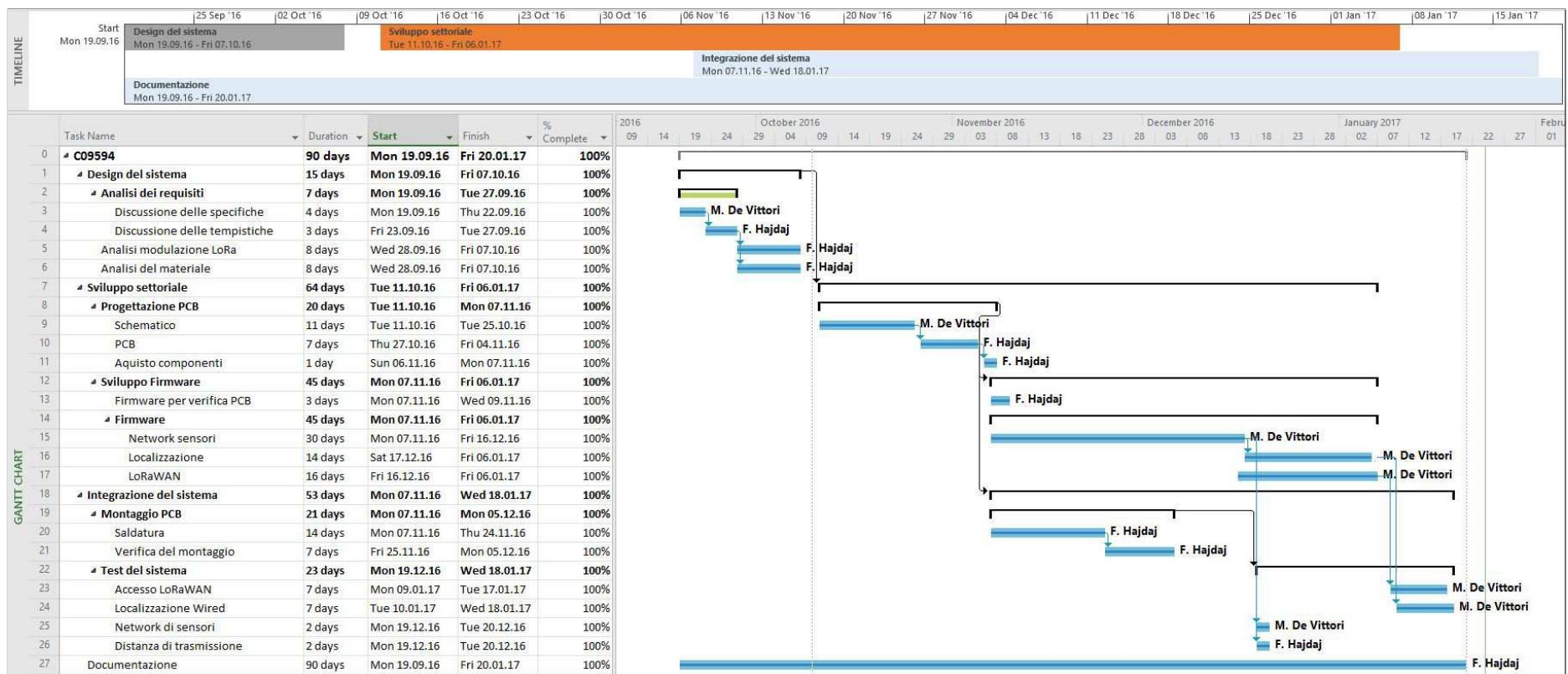


Diagramma di Gantt finale

Riferimenti

- [1] LoRa Alliance. *LoRaTM Alliance*. URL: <https://www.lora-alliance.org/>.
- [2] Peter J. Ashenden. *The Designer's Guide to VHDL*. 3rd. NELSEVIER, 2008. ISBN: 978-0-12-088785-9.
- [3] FTDI Chip. *FTDI Tools and Drivers*. URL: <http://www.ftdichip.com/>.
- [4] Waltenegus Dargie. *Evaluation of the reliability of RSSI for indoor localization*. 2012. URL: <https://www.researchgate.net/publication/261447858>.
- [5] eit Digital. *SDN as a catalyst for IoT*. URL: <https://www.eitdigital.eu/blog/article/sdn-as-a-catalyst-for-iot/>.
- [6] Sakshama Ghoslya. *LoRa Chirp Spread Spectrum Modulation*. URL: <http://sakshamaghoslyा.blogspot.ch/p/lora-is-chirp-spread-spectrum.html>.
- [7] IBM. *End-Device LoRaWANTM Library*. URL: <https://www.research.ibm.com/labs/zurich/ics/lrsc/lmic.html>.
- [8] link labs. *LoRa Localization*. 2016. URL: <https://www.link-labs.com/lora-localization/>.
- [9] Nanotron. *RTLS*. 2007. URL: http://www.nanotron.com/EN/pdf/WP_RTLS.pdf.
- [10] C. Pham. *A DIY low-cost LoRa gateway*. URL: <http://cpham.perso.univ-pau.fr/LORA/RPIgateway.html>.
- [11] Norbert Schmidt. *LoRa: A Radio Approach Towards IoT Geo Localization*. URL: <http://www.microwavejournal.com/articles/27357-lora-a-radio-approach-towards-iot>.
- [12] Semtech. *LoRa Modulation Basics*. URL: www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf.
- [13] Semtech. *LoRaTM*. URL: <http://www.semtech.com/wireless-rf/lora.html>.
- [14] Semtech. *LoRaWAN Specification*. 2015. URL: <https://www.lora-alliance.org/portals/0/specs/LoRaWAN%20Specification%201R0.pdf>.
- [15] Semtech. *LoRaWANTM Library*. URL: <https://github.com/Lora-net/LoRaMac-node>.
- [16] Semtech. *Next-Generation-LoRa-Gateway*. 2016. URL: <https://www.semtech.com/Press-Releases/2016/Semtech-Announces-Availability-of-Next-Generation-LoRa-Gateway.html>.

- [17] Semtech. *Semtech source code*. URL: <https://developer.mbed.org/teams/Semtech/>.
- [18] Semtech. *What-Is-LoRa*. 2015. URL: <https://www.lora-alliance.org/What-Is-LoRa/Technology>.
- [19] Swisscom. *Swiss LoRa Network - Slides and documentation*. 2016. URL: <https://www.mycloud.ch/s/S009935E415711A2F86374933DCECD0EF089E0878111D3B1D4FA1F3658BAAE19>.
- [20] Brian C. Wadell. *Transmission Line Design Handbook*. Calcolo impedenza piste online. Artech House, 1991, p. 79. ISBN: 0890064369. URL: <http://chemandy.com/calculators/coplanar-waveguide-with-ground-calculator.htm>.
- [21] Wikipedia. *Multilaterazione*. URL: <https://it.wikipedia.org/wiki/Multilaterazione>.

Allegati

Tutti gli allegati elencati di seguito sono presenti nel CD che accompagna questa documentazione.

ID	Descrizione	Percorso
AD1	Documentazione	\Documentazione\Report
AD1	Presentazione	\Documentazione\Speech
AD1	Poster	\Documentazione\Poster
AF1	Firmware per verifica PCB	\Firmware\Verifica_PCB
AF2	Firmware per Network di Sensori	\Firmware\Network_Sensori
AF3	Firmware per Localizzazione Wired	\Firmware\Localizzazione_Wired
AF2	Firmware per Network di Sensori	\Firmware\LoRaWAN
AH1	Progetto Altium16	\Hardware
AH2	Modelli 3D dei componenti usati	\Hardware\3D
AH3	Datasheet dei componenti usati	\Hardware\Datasheet
AH3	Driver (Windows) dei componenti usati	\Hardware\Driver
AM1	Codici MATLAB	\MATLAB
AO1	Documenti utili	\Others