



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
FACOLTÀ DI SCIENZE E TECNOLOGIE
Corso di Laurea Triennale in Informatica

**Analisi di rete LPWAN
con protocollo LoRaWAN
per monitoraggio aria**

Tesi di Laurea di:
Matteo Curti
Matr. 802690

Relatore:
Andrea Trentini

Anno Accademico 2017/2018

Indice

1	Sensori e trasduttori	5
1.1	I sensori	5
1.1.1	Classificazione dei sensori	7
1.2	I trasduttori	8
1.2.1	Tipi di trasduttori	9
1.3	Parametri caratteristici	9
1.3.1	La sensibilità	9
1.3.2	La risoluzione	10
1.3.3	La riproducibilità	10
1.3.4	L'accuratezza	10
1.3.5	Il drift	10
1.4	Acquisizione e trattamento dei segnali	11
1.4.1	Il segnale	11
1.4.2	Lettura del segnale	13
1.4.3	Campionamento o discretizzazione	14
1.4.4	Quantizzazione	14
1.4.5	Codificatore o encoder	17
2	LoRaWAN	18
2.1	Internet of Things	18
2.1.1	Connessioni wireless per connettere reti di sensori	21
2.2	LoRa	25
2.2.1	Semtech	25
2.2.2	IBM Reserch	26
2.2.3	Senet	26
2.2.4	FastNet	27
2.2.5	LoRa Alliance	27
2.3	Architettura di rete LoRa	29
2.3.1	Specifiche LoRaWAN	30
2.3.2	Protocollo LoRa	31
2.3.3	Protocollo LPWAN	39
2.3.4	Protocollo IP	47
2.3.5	Applicazioni LoRa	48
2.4	Analisi limiti LoRaWAN	53
2.4.1	Mobilità LoRa	53
2.4.2	Copertura di LPWAN nello spettro	57
2.4.3	Aspetti legislativi	66

3	Sistema di monitoraggio della qualità dell'aria	67
3.1	Obiettivo dell'analisi	67
3.2	Introduzione al problema	67
3.3	Sistema di monitoraggio	68
3.4	Modulo di rilevamento	68
3.4.1	Scelta dei sensori	68
3.5	Microcontrollore	69
3.6	Comunicazione wireless LoRa	69
3.7	Software di elaborazione dati	69
3.8	Risultati sperimentali	70
3.9	Conclusione	70
	Bibliografia	70

Elenco delle figure

1.1	Caratteristica di trasferimento ideale vs. reale	7
1.2	Schema di un trasduttore	9
1.3	Schema a blocchi di un convertitore A/D	14
2.1	Tempo di trasmissione on-the-air con diversa larghezza di banda	34
2.2	Tempo di trasmissione on-the-air con diverso fattore di diffusione	34
2.3	Schema a blocchi dell'implementazione della baseband LoRa PHY: mittente, canale AWGN e ricevitore	37
2.4	Dispositivi di classe A, gateway e NS (server di rete)	40
2.5	Macchina a stati finiti della classe LoRaWANPhy	43
2.6	Macchina a stati finiti della classe LoRaWANMac	43
2.7	Schema del flusso ADR.	52
2.8	I canali definiti 0 - 400 per 100 Hz nel range 868.180 - 868.220 MHz	57
2.9	Divisione delle tecnologie LoRa e Sigfox nell'intervallo 863,95 - 868,75 MHz	57
2.10	Divisione delle tecnologie nella gamma 868.05-868.65 MHz	58
2.11	Divisione delle tecnologie nell'intervallo 868,1 - 868,25 MHz . . .	58
2.12	Distribuzione della funzione di probabilità di collisione 2 o più dispositivi	64
3.1	Concentrazione di SO_2 , O_3 , NO_2 , CO, PM1.0, PM2.5 e PM10 . .	70

Elenco delle tabelle

2.1	Risultati delle misurazioni per verificare la copertura	35
2.2	Parametri LoRa PHY per simulazioni BER	38
2.3	Dati relativi al tempo e alla trasmissione delle tecnologie selezionate	61

Capitolo 1

Sensori e trasduttori

1.1 I sensori

I sensori rappresentano i nodi finali della rete e viene utilizzato nel sistema di monitoraggio per le letture ambientali. In [35] viene descritto che cos'è un **sensore**:

"I sensori, in un sistema di acquisizione dati, sono le interfacce fisiche tra i dispositivi di elaborazione dei segnali elettrici acquisiti in input e le corrispondenti grandezze fisiche da monitorare in funzione del tempo."

Nello stesso documento viene spiegato il **funzionamento** di un sensore:

"Un sensore è un dispositivo con la funzione di fornire in uscita un segnale elettrico, sotto forma di tensione o di corrente, del valore teoricamente proporzionale a quello della grandezza fisica in input che si desidera acquisire. Per ottenere un segnale elettrico in uscita di un valore linearmente dipendente da una qualsiasi grandezza fisica (temperatura, pressione, forza, flusso luminoso, ecc...) in input, si utilizza il sensore, il cui funzionamento si basa sulla variabilità di una grandezza fisica elettrica, per esempio resistenza, capacità o induttanza, in funzione della grandezza fisica da misurare."

Il testo continua fornendo la definizione di **caratteristica di trasferimento**:

"Si definisce caratteristica di trasferimento la curva che rappresenta l'andamento del segnale elettrico generato dal sensore in output in funzione della grandezza fisica in input. La caratteristica di trasferimento è il legame che è presente tra la variabile da misurare (ingresso) e il segnale elettrico di uscita dal sensore."

Nella pratica però accade molto raramente che tale caratteristica di trasferimento corrisponda, anche solo per approssimazione, alla **legge di proporzionalità diretta**:

$$V = k \times G \quad (1.1)$$

Oppure:

$$I = k \times G \quad (1.2)$$

"dove V è la tensione, mentre I è la corrente fornita dal sensore, k è una costante di taratura e G è la grandezza fisica da acquisire in input."

Infatti in [35] vengono riportati i motivi della mancata corrispondenza:

"Generalmente, la caratteristica di trasferimento si allontana, in modo più o meno pronunciato, dal modello ideale a causa di alcuni errori, come l'errore di offset e l'errore di linearità."

In [18] descrive la caratteristica **lineare** e **non lineare** di un sensore:

"I sensori sono detti lineari la cui caratteristica è una retta. Il funzionamento ottimale di un sensore è definito da una caratteristica lineare. La linearità è il parametro che evidenzia la deviazione tra la retta (caratteristica teorica) e la curva reale. La non linearità è il valore massimo della deviazione rispetto alla curva teorica in valore assoluto riferito al valore massimo del segnale di uscita."

Sempre nello stesso testo viene indicato un **margine di errore** per la bontà di un sensore:

"Un sensore è buono quando la sua non linearità è inferiore allo 0.1%."

L'articolo [35] spiega la presenza dell'**errore di offset**:

"L'errore di offset è presente perché il segnale elettrico fornito in uscita è diverso da zero anche quando la grandezza fisica ha valore nullo."

Ciò avviene perché la retta non passa per l'origine, la variabile d'uscita è diversa da zero in corrispondenza del valore nullo della variabile di ingresso.

Secondo [35] la **caratteristica lineare** è definita con la seguente legge:

$$V = V_{off} + k \times G \quad (1.3)$$

"dove V_{off} è la tensione di offset, k è una costante di taratura e G è la grandezza fisica da acquisire in input. Si definisce offset il valore non nullo della variabile di uscita corrispondente al valore nullo della variabile d'ingresso. L'errore di linearità è il massimo scarto, in valore assoluto, nel range nominale di funzionamento del sensore tra la caratteristica reale e la caratteristica ideale, dove per caratteristica ideale si intende la caratteristica lineare V , passante per gli estremi della caratteristica reale, nei punti $(0, V_{off})$ e (F_{max}, V_{max}) , dove F_{max} e V_{max} sono rispettivamente il valore massimo della grandezza fisica G ed il valore massimo della tensione V nel range nominale."

Nel documento [18] viene introdotto il **range di funzionamento**:

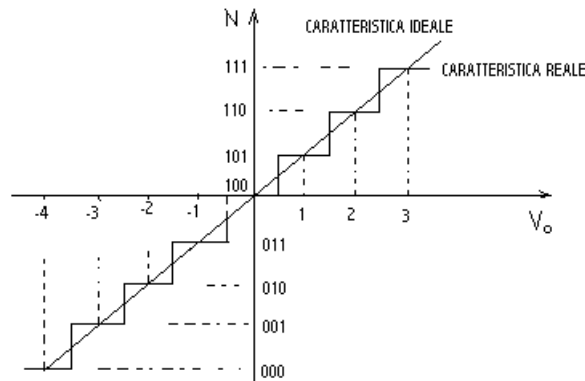


Figura 1.1: Caratteristica di trasferimento ideale vs. reale
Immagine tratta dall'articolo [29]

"Il range di funzionamento è l'intervallo dei valori che può assumere la grandezza fisica che deve essere trasdotta."

Appena la grandezza fisica esce dal range il sensore non funziona più, e ritorna a lavorare appena rientra nell'intervallo. Il range di ingresso (o campo di ingresso) definisce i limiti entro cui può variare il segnale in ingresso; mentre il range di uscita (o campo di uscita) definisce i limiti entro cui può variare il segnale in uscita.

1.1.1 Classificazione dei sensori

In [35] vengono riportate diverse classificazioni dei sensori. La prima classificazione distingue i sensori in base al **principio di funzionamento**:

1. *"Sensori attivi: se forniscono direttamente un segnale elettrico, in tensione o in corrente, in funzione della grandezza fisica;*
2. *sensori passivi: se si utilizza la variabilità di una grandezza elettrica, per es. la resistenza, la capacità o l'induttanza, in funzione della grandezza fisica, per ottenere una tensione o una corrente, inserendo il sensore in un circuito di misura."*

La seconda classificazione può essere effettuata in base al **principio fisico** utilizzato dai sensori per effettuare la misurazione:

1. *"Resistivi: si basano sulla variabilità della resistenza elettrica in funzione degli sforzi meccanici, della temperatura, del campo magnetico, dell'intensità di illuminamento;*
2. *Piezoelettrici: si basano sul campo elettrico generato nei cristalli piezoelettrici da sforzi meccanici di trazione, compressione o taglio;*
3. *Termoelettrici: si basano sulle forze elettromotrici termoelettriche generate per effetto Seebeck da giunzioni metalliche mantenute a temperature diverse dette termocoppie;*

4. *Fotovoltaici: si basano sulle forze elettromotrici generate per effetto fotovoltaico da una giunzione semiconduttrice PN, colpita da radiazioni infrarosse, visibili, ultraviolette, X, γ o da particelle cariche;*
5. *Fotoelettrici: si basano sulla fotocorrente che si ottiene, per effetto fotoelettrico, nelle celle fotoelettriche a vuoto, nei fotodiodi e nei fototransistor;*
6. *Ad effetto Hall: si basano sulle forze elettromotrici generate in particolari materiali, generalmente semiconduttori, percorsi da corrente e sottoposti a campi magnetici;*
7. *Capacitivi: si basano sulla variabilità della capacità elettrica di un condensatore in funzione dell'umidità o della costante dielettrica dell'isolante posto tra le armature;*
8. *Induttivi: si basano sulla variabilità dell'induttanza di un avvolgimento dotato di un nucleo ferromagnetico estraibile;*
9. *Elettromagnetici: si basano sulla legge dell'induzione elettromagnetica.*
10. *A riluttanza variabile: si basano sulla variabilità della riluttanza di un circuito magnetico dotato di parti mobili;*
11. *Potenziometrici: si basano sulla variabilità della tensione fornita da un partitore potenziometrico regolabile in funzione dello spostamento del cursore;*
12. *Piezoacustici e ultrasonici: si basano sulle forze elettromotrici piezoelettriche generate da particolari materiali ceramici sottoposti ad onde meccaniche;*
13. *Elettrochimici: si basano sui potenziali elettrochimici generati da celle elettrolitiche speciali, costituite da coppie di elettrodi sensibili a determinati ioni o radicali chimici, oppure sulla variabilità della conducibilità di particolari materiali in presenza di gas o vapori;*
14. *Biologici: si basano sulle forze elettromotrici generate da celle elettrolitiche speciali in presenza di enzimi o di altre biomolecole."*

1.2 I trasduttori

Nel documento [18] viene esposta la definizione di **trasduttore**:

"Il trasduttore è un dispositivo in grado di trasformare le variazioni di una grandezza fisica, normalmente non elettrica, in un'altra grandezza, di natura elettrica (tensione, frequenza o corrente)."

Sempre nello stesso testo, viene illustrata la **composizione** di un trasduttore:

"È composto da due parti: sensore e convertitore, un circuito elettronico che trasforma le variazioni di un parametro del sensore in una variazione di una grandezza elettrica."

È stato messo in evidenza che il sensore è una componente del trasduttore.

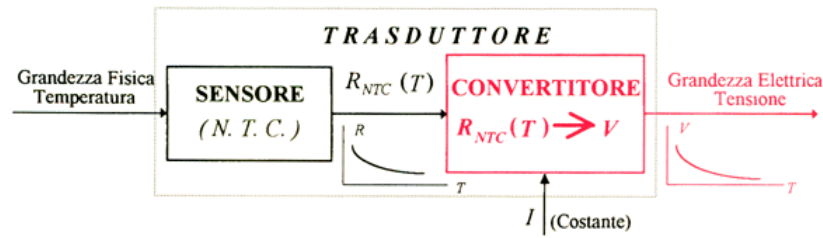


Figura 1.2: Schema di un trasduttore
Immagine tratta dall'articolo [4].

1.2.1 Tipi di trasduttori

In [18] vengono elencate due **classificazioni** per i trasduttori, la prima in base al tipo di segnale in uscita:

1. *"Analogico: quando il suo segnale di uscita è una grandezza elettrica che varia in modo continuo mantenendo una doppia corrispondenza con il valore della grandezza misurata;*
2. *"Digitale: quando il suo segnale di uscita è composto da uno o più segnali digitali che possono assumere ciascuno solo due livelli di tensione identificati come 0 e 1."*

La seconda **classificazione** è in base alla necessità di energia esterna per il loro funzionamento:

1. *"Attivi: Quando forniscono in uscita un segnale direttamente utilizzabile da circuiti di elaborazione senza nessun consumo di energia elettrica;*
2. *"Passivi: Sono quei trasduttori ai quali bisogna fornire energia elettrica perché la grandezza fisica d'uscita possa essere trasformata in una grandezza elettrica."*

1.3 Parametri caratteristici

In questa sezione vengono descritti i **parametri caratteristici** dei sensori. Essi serviranno per la valutazione della scelta del sensore nel sistema reale.

1.3.1 La sensibilità

Nel documento [18] viene definita la **sensibilità** e la relativa legge:

"La sensibilità è il rapporto tra la variazione della grandezza di uscita ΔU e la variazione della grandezza d'ingresso ΔI che la provoca.

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (1.4)$$

Più il coefficiente angolare della retta è elevato e più il trasduttore è sensibile e minore sarà il range di funzionamento. Lo strumento risulterà essere molto sensibile quando a parità di grandezza di ingresso, la grandezza di uscita è molto elevata. Il tempo di risposta è il tempo che il trasduttore impiega per raggiungere in uscita il valore di regime corrispondente al valore d'ingresso."

1.3.2 La risoluzione

In [18] viene descritta la **risoluzione** e la relativa legge:

"La risoluzione è il rapporto percentuale tra la minima variazione della grandezza di uscita in grado di essere rilevata e il valore massimo del fondo scala. La risoluzione R esprime la variazione minima di uscita rispetto al fondo scala:"

$$R = \frac{\Delta X_{out_{min}}}{\Delta X_{out_{fondoscala}}} \quad (1.5)$$

1.3.3 La riproducibilità

In [18] viene definita la **riproducibilità**:

"La riproducibilità è la capacità di un sensore di fornire sempre gli stessi valori di uscita in corrispondenza dell'ingresso."

In [34] viene precisato che:

"La costanza nel tempo delle caratteristiche del trasduttore è la resistenza all'invecchiamento."

1.3.4 L'accuratezza

In [3] viene illustrato come misurare l'**accuratezza** (o in-accuratezza):

"Per tenere presente la mancata accuratezza del dispositivo, occorre misurare le deviazioni esistenti fra i valori reali e i valori ideali. Le caratteristiche di affidabilità in un trasduttore sono relazionate alla sua vita utile ed a possibili cause di mal funzionamento nel sistema in cui è inserito. Infatti, l'accuratezza è la capacità del sensore del trasduttore di espletare la funzione per cui è stato costruito in condizioni prestabilite e per un tempo prefissato. Questo parametro è espresso in termini statistici come la probabilità che il dispositivo funzioni per un tempo o per un numero di cicli specificato. Solo di rado esso è riportato dai costruttori."

Nel funzionamento reale il sensore descrive una caratteristica che si discosta dalla funzione ideale come in figura 1.1.

1.3.5 Il drift

In [32] viene definito il **drift**:

"Il drift è la modifica temporale imprevedibile delle caratteristiche del sensore."

Il drift serve a indicare la stabilità sensitiva del sensore del trasduttore a lungo termine. Lo stesso documento evidenzia come il drift si **evolve** nel tempo:

"La curva di risposta del sensore si modifica col tempo, perché viene introdotto un errore nella misurazione del valore della grandezza in ingresso. Questo errore cresce col tempo. Il drift definisce il tempo di vita della calibrazione del sensore, ovvero quanto tempo usare la stessa curva di risposta. Usare sempre la stessa curva di risposta da luogo ad errori sulle misurazioni non tollerabili."

In [19] vengono proposte delle soluzioni al problema della variazione della curva di risposta:

"Il problema della variazione della curva di risposta del sensore nel tempo si risolve calibrando il sensore dopo una certa quantità di tempo. A seconda dell'importanza della sensibilità del sensore vengono espone le varie soluzioni al drift:

- *Un controllo di qualità che consiste nel tenere ogni sensore sotto continua osservazione per un lungo periodo (4-6 mesi), durante il quale il sensore viene continuamente ricalibrato per verificarne la stabilità. Solamente così è possibile verificare l'effettiva stabilità nel tempo del comportamento di ogni singolo sensore;*
- *I costruttori di sensori ad alta precisione, come Sea-Bird, scartano i sensori che non dimostrano una buona stabilità durante il periodo di valutazione. In funzione della tecnologia alla base del sensore e della sua costruzione la variazione può essere casuale o lineare e modellabile;*
- *In caso di variazioni casuali della risposta del sensore sono richiesti frequenti calibrazioni per avere misure affidabili;*
- *In caso di variazioni lineari e modellabili sono richieste calibrazioni meno frequenti. Nelle calibrazioni successive si utilizzano termini interpolati."*

1.4 Acquisizione e trattamento dei segnali

In questa sezione viene descritto il processo, ed i suoi componenti, dalla lettura della misura nel mondo reale ad una informazione digitale manipolabile da dispositivi elettronici.

1.4.1 Il segnale

Il documento [26] definisce il **segnale** come:

"La variazione di una qualsiasi grandezza fisica in funzione del tempo. In generale possiamo affermare che un segnale, sotto opportune ipotesi, può essere descritto matematicamente da una funzione continua."

Inoltre, nello stesso testo si aggiunge:

"Le onde di volume viaggiano all'interno della terra e seguono le leggi dell'ottica geometrica. Vi sono due tipi principali di onde di volume:

- 1. Onde P: (prime) onde di compressione e rarefazione in cui l'oscillazione delle particelle di materia avviene parallelamente alla direzione di propagazione dell'onda;*
- 2. Onde S: (seconde o di taglio) in cui l'oscillazione delle particelle avviene perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda."*

In relazione a [26] i segnali sono **classificati** in tre tipi:

- 1. "Continui o Analogici: quando il loro valore può essere misurato in ogni istante. L'aggettivo "analogico" è usato in relazione al fatto che la loro forma in uscita da un sistema è analoga a quella in ingresso.*
- 2. Discreti: quando il loro valore può essere misurato solo in determinati istanti di tempo.*
- 3. Digitali: quando si tratta di segnali discreti la cui ampiezza è associata ad un numero che ne rappresenta il valore in quell'istante. In genere per esprimere il numero viene usata, per semplicità, la base numerica binaria $\{0,1\}$."*

Secondo [26] la **teoria dei segnali** si suddivide in due grandi branche a seconda del tipo di segnale in esame:

- 1. "Segnali deterministici: quando è possibile prevedere con certezza il suo valore ad un certo istante, che viene determinato una volta conosciuti pochi parametri. Per esempio, una sinusoide di cui sia conosciuta l'ampiezza, la frequenza, e la fase ad un istante dato è un segnale deterministico.*
- 2. Segnali aleatori: quando è solo possibile prevedere solamente la probabilità che il segnale assuma un certo valore ad un dato istante. Un segnale aleatorio viene definito completamente da due funzioni, la densità di probabilità e la funzione di correlazione. La prima restituisce la probabilità che il segnale assuma un valore dato, la seconda fornisce una relazione tra i valori del segnale a istanti di tempo diversi.*

Purtroppo i segnali deterministici non esistono nella realtà, in quanto ogni segnale fisico reale possiede una certa indeterminazione per cui il suo valore non può essere mai previsto con infinita esattezza: risultano però una buona approssimazione in molti casi pratici."

1.4.2 Lettura del segnale

Per leggere un segnale bisogna utilizzare un trasduttore. In [26] vengono descritte le **caratteristiche** importanti che un trasduttore deve possedere per compiere una lettura del segnale:

- *”l’ampiezza del segnale in uscita;*
- *la sensibilità, ovvero il minimo valore misurabile;*
- *la velocità di risposta, ovvero il tempo impiegato dal sensore per fornire una risposta costante dopo una brusca variazione della grandezza da misurare.”*

Quest’ultima caratteristica dipende dalla banda passante:

”la massima frequenza di variazione del segnale a cui il sensore è in grado di funzionare.”

Inoltre, nello stesso testo viene illustrata la definizione di **rumore bianco**:

”Un trasduttore è uno strumento di misura, pertanto la tensione fornita sarà affetta da una piccola componente casuale, che porterà la misurazione a fluttuare intorno al valore medio. Si schematizza questo fenomeno considerando il segnale prodotto dal trasduttore come la somma di una parte proporzionale al segnale vero e proprio che si intende misurare, e da un segnale aleatorio, il rumore bianco.”

In [26] vengono elencate le cause delle fluttuazioni (o sorgenti di rumore):

- *”la temperatura (rumore termico);*
- *la quantizzazione della carica dell’elettrone;*
- *i campi elettrici presenti nelle vicinanze dell’apparecchio (la linea a 50 Hz);*
- *le vibrazioni meccaniche.”*

Quando il segnale prodotto dal trasduttore viene trasportato lungo una linea elettrica, amplificato o manipolato introduce rumore. I calcolatori non possono elaborare i segnali in uscita da un trasduttore. In quanto secondo [26] è necessario effettuare delle operazioni:

”Bisogna prima convertirlo in un segnale di tipo elettrico. In questo modo è possibile inviare il segnale ad una scheda di acquisizione che trasforma il segnale in una tabella di numeri binari interi, che sono gli unici dati in grado di essere elaborati dal calcolatore, che poi l’utente leggerà come numeri decimali, dopo una appropriata conversione.”

Nel documento [21] viene esposto il **processo di conversione**:

”Il processo di conversione A/D (da analogico a digitale), che trasforma il segnale originario in una sequenza di bit 0,1, è noto come tecnica PCM (Pulse Code Modulation o modulazione impulsiva codificata). Gli A/D convertono i valori di tensione in ingresso nel numero corrispondente espresso in binario.”

Il processo è effettuato tre operazioni in sequenza: campionamento, quantizzazione e codifica.

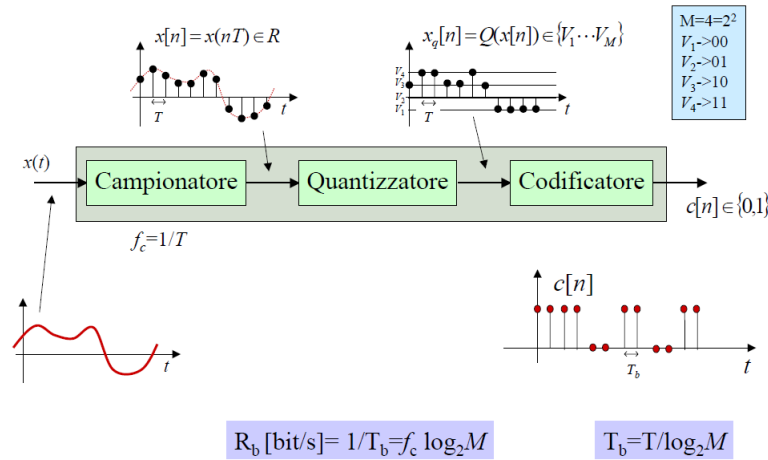


Figura 1.3: Schema a blocchi di un convertitore A/D
Materiale didattico del corso "Fondamenti di segnali e sistemi" [21].

1.4.3 Campionamento o discretizzazione

Nell'articolo [26] viene descritta la **campionamento o discretizzazione**:

"La discretizzazione consiste nel misurare l'ampiezza del segnale ad intervalli di tempo fissati. Sia ΔT l'intervallo di tempo tra due misure successive. La discretizzazione genera un vettore x di dimensione n . È evidente che l'intervallo di tempo ΔT deve essere sufficientemente piccolo da riuscire ad individuare anche piccole variazioni del segnale. L'inverso dell'intervallo ΔT si chiama frequenza di campionamento ed indica quante volte al secondo viene misurata l'ampiezza del segnale."

1.4.4 Quantizzazione

Al termine del campionamento il segnale viene quantizzato. In [26] viene descritta la **quantizzazione**:

"La quantizzazione consiste nella trasformazione delle ampiezze misurate in numeri interi binari ad N bit."

La quantizzazione può essere di due tipologie.

Uniforme

In [2] viene descritta la quantizzazione uniforme:

"Nel caso di quantizzazione uniforme, il gradino γ di quantizzazione è uniforme cioè sempre della stessa ampiezza. Questo gradino (detto anche passo di quantizzazione) viene determinato a partire dalla massima dinamica del segnale di ingresso e dal numero di bit che abbiamo a disposizione. Definiamo come $R = [x_{max}, x_{min}]$ il

range dinamico del segnale di ingresso e come n il numero di bit così da ottenere $\gamma = R/2n$. Ovviamente agendo in questo modo la quantizzazione introduce un errore, detto errore di quantizzazione. In correlazione all'errore di quantizzazione possiamo tenere in considerazione il rapporto tra segnale e rumore di quantizzazione detto SQNR. Esso rappresenta un indice di qualità relativo alla quantizzazione e l'errore di quantizzazione che, inevitabilmente si ottiene quantizzando il segnale campionato. È possibile dimostrare che questo rapporto aumenta di 6 dB per ogni bit aggiuntivo a disposizione della quantizzazione. Questo è intuitivo perché aumentando il numero di bit a disposizione per la quantizzazione, il passo γ diventa più piccolo ed il segnale analogico può venire quantizzato in maniera più precisa. Per descrivere un segnale continuo abbiamo bisogno una sequenza più lunga di valori discreti, quindi sarà maggiore il numero di bit usati e maggiore sarà l'accuratezza della descrizione. Di conseguenza più gradini ci sono minore sarà l'errore di quantizzazione.”

La quantizzazione uniforme viene effettuata dal PCM.

Non uniforme

Nel documento [36] viene descritta la quantizzazione **non uniforme**:

”La quantizzazione non uniforme (o non lineare) slega SQNR e γ dinamica. Con non uniforme si indicano intervalli spaziali differenzialmente ovvero i gradini γ non hanno la stessa dimensione.”

Nell'articolo [21] viene indicato quando si utilizza la quantizzazione non uniforme al posto di quella uniforme:

”Questa tecnica è utilizzata quando la statistica del segnale in ingresso non è uniforme.”

La fonte [16] mette in evidenza la **differenza** tra quantizzazione uniforme e non uniforme:

”Nella quantizzazione non uniforme si presentano intervalli più piccoli, e quindi più accurati, dove la concentrazione di valori dei campioni è più alta rispetto a intervalli più grandi e quindi meno accurati, dove la concentrazione di valori di campioni è più bassa. Così facendo si presta più attenzione nella quantizzazione di valori che si presentano con maggiore probabilità diminuendo così l'errore di quantizzazione.”

In [17] viene spiegato il **vantaggio** di prediligere la quantizzazione non uniforme:

”Lo scopo della quantizzazione non uniforme è quello di migliorare l'errore relativo ai bassi livelli del segnale attraverso la quantizzazione non uniforme analogica oppure la quantizzazione non uniforme digitale.”

Nello stesso testo viene illustrato un esempio come si effettua la quantizzazione non uniforme:

"Nella quantizzazione non uniforme analogica, il segnale PAM (Pulse Amplitude Modulation) prima di essere convertito in digitale attraversa un compressore analogico, sostanzialmente un amplificatore logaritmico, che ha lo scopo di amplificare i livelli più bassi del segnale PAM e di comprimere quelli alti. L'apparato ricevente PCM deve contenere un organo denominato espansore, complementare al compressore in grado di ripristinare i livelli originali. Nella quantizzazione non uniforme digitale, invece, il segnale PAM è convertito immediatamente in digitale a 12 bit. Successivamente un compressore numerico trasforma i dati in forma seriale a 8 bit. Anche la compressione numerica segue una legge logaritmica simile a quella analogica. L'apparato ricevente PCM deve contenere un organo denominato espansore, complementare al compressore, in grado di ripristinare i livelli originali. Un compressore digitale trasforma una parola a 12 bit (4096 combinazioni) in una a 8 bit (256 combinazioni). La curva del compressore analogico è approssimata con una spezzata costituita, secondo le norme CEPT (Conferenza Europea delle amministrazioni delle Poste e delle Telecomunicazioni), di 8 segmenti ricavati dividendo in 8 parti uguali l'asse delle ordinate. L'asse delle ascisse è così diviso in segmenti chiamati "segmenti di tratta". Dato in ingresso il codice a 12 bit:

$N_{in} = [S, N10, N9, N8, N7, N6, N5, N4, N3, N2, N1, N0]$

Il compressore numerico fa corrispondere il codice a 8 bit:

$N_{out} = [S, A, B, C, D, E, F, G]$

Dove S è il bit di segno (0 positivo e 1 negativo), [A, B, C] è il segmento di tratta e [D, E, F, G] è il codice binario corrispondente all'interpolazione lineare dentro la tratta."

In relazione a [16] la quantizzazione non uniforme è un processo **irreversibile**:

"La quantizzazione non uniforme è un processo irreversibile, che modifica il segnale originario, approssimandone il valore con uno vicino, ma non identico. Per questo il processo di quantizzazione introduce rumore. Il rumore di quantizzazione in uscita dal filtro di ricezione in un sistema di comunicazione è bianco e gaussiano."

Nel documento [21] viene spiegato quando è utile **combinare** la quantizzazione non uniforme con l'uniforme:

"La non linearità espande gli intervalli più vicini all'origine e comprime quelli verso il valore massimo. Per migliorare le prestazioni in presenza di segnali che possono cambiare significativamente la dinamica bisogna aumentare il numero di bit del campione oppure utilizzare quantizzazioni non uniformi. I segnali con piccola dinamica vedono piccoli intervalli di quantizzazione, segnali con grande dinamica vedono intervalli di quantizzazione grandi. La quantizzazione non lineare è ottenuto con un blocco non lineare (compressore) posto a monte di un quantizzatore uniforme. Un blocco inverso al compressore (espansore) è utilizzato dal lato di ricostruzione."

Nel caso in cui non ci si può permettere un maggior numero di bit per campionare il segnale la quantizzazione non uniforme è una soluzione versatile.

1.4.5 Codificatore o encoder

L'ultimo componente di convertitore A/D è il codificatore. In [7], il codificatore (o encoder) viene descritto come:

"Un codificatore è un circuito digitale combinatorio dotato di 2^n segnali di ingresso e di n segnali di uscita. L'attivazione di una delle linee di ingresso produce in uscita il codice corrispondente. Si utilizza in combinazione con i trasduttori digitali che forniscono in ingresso del codificatore un segnale binario. Tra ingresso e uscita del codificatore non esiste però un legame logico, come caso del decoder, perché all'interno di esso esistono delle allocazioni perenni di memoria (memorizzate dal costruttore) tali che il loro numero sia pari alle linee in ingresso (ogni linea attiva individua una locazione di memoria). Se gli ingressi attivati sono più di uno, l'uscita potrebbe assumere una configurazione binaria indesiderata. Per evitare che questo accada, i codificatori in commercio possiedono una priorità: se si attiva più di una linea in ingresso, l'uscita assumerà la configurazione associata all'ingresso con priorità maggiore tra quelli attivati."

Capitolo 2

LoRaWAN

2.1 Internet of Things

Internet of Things (IoT), ossia "Internet degli oggetti", è la possibilità di collegare qualsiasi oggetto del mondo reale ad Internet. L'articolo [9] fa presente che:

"L'Internet of Things (IoT) tocca tutti gli aspetti della vita quotidiana, coprendo una gamma di applicazioni inimmaginabile, dai dispositivi indossabili connessi, progettati per comunicare su distanze di pochi centimetri, a un'ampia varietà di applicazioni di gestione delle risorse e di monitoraggio a sensori, che potranno comunicare con uno o più gateway su distanze anche di diversi Km."

Da queste prime righe, si può intuire la prima difficoltà, connettere oggetti della stessa rete su lunghe distanze.

"Nel caso in cui siano necessarie comunicazioni a lungo raggio e non possa essere utilizzato un semplice data link wireless senza autorizzazione, le reti cellulari costituiscono un attraente mezzo di collegamento, anche se presentano alcuni inconvenienti."

Connettere oggetti della stessa rete su lunghe distanze richiede un ingente consumo energetico.

"Anche se un dispositivo IoT può essere connesso a basso costo a una rete 2G, con un consumo abbastanza contenuto da poter funzionare con alimentazione a batteria per una durata accettabile, c'è comunque qualche incertezza sul futuro delle reti 2G. Alcuni operatori hanno espresso l'intenzione di abbandonare queste reti, dato che gli abbonati sono orientati ai più moderni servizi 3G e 4G, che garantiscono ai dispositivi mobili un miglior collegamento Internet."

La scelta della tecnologia per effettuare la connessione ad Internet non è solo limitata dal consumo energetico della stessa, ma anche dalla disponibilità del servizio nel tempo:

"I dispositivi IoT si prendono in considerazione per la realizzazione di servizi di lunga durata, dai cinque agli otto anni. Occorre quindi

scegliere una connettività di rete che sia sicuramente supportata per una durata di questo periodo. A causa dell'incertezza sulla longevità delle reti 2G, gli sviluppatori devono prendere in considerazione soluzioni alternative di connettività che siano in grado di garantire, non solo la certezza di un supporto a lungo termine, ma anche il rispetto delle esigenze di basso consumo, comunicazioni a lungo raggio e basso costo, tipiche delle più diffuse applicazioni IoT. Fra i possibili candidati, la tecnologia LoRa.”

LoRa in questo momento storico rappresenta una delle tecnologie più appetibili per risolvere contemporaneamente questi tre problemi: connessioni a lungo raggio, basso consumo energetico e servizio garantito a lungo termine.

Nell'articolo [15] è stato effettuato uno studio sugli **investimenti Venture Capital (VC)** nel settore IoT.

”Gli investimenti Venture Capital (VC) in questi ultimi anni hanno subito una decisa accelerazione nel settore IoT: a livello mondiale tra il 2010 e il 2015 sono più che raddoppiati passando da 0,8 miliardi di dollari nel 2010, a circa 2 miliardi di dollari nel 2015. A livello cumulativo, il montante degli investimenti in start up specializzate nell'IoT negli ultimi sei anni ha raggiunto la quota di 7,4 miliardi di dollari, per un totale di 887 operazioni. Tra i principali investitori figurano importanti attori del Corporate VC: questo significa che le divisioni di imprese “non finanziarie” hanno l'obiettivo di investire in start up con tecnologie utili al proprio business. Tra gli operatori più attivi sono presenti Cisco Investments, Intel Capital, Google Ventures, GE Ventures e Qualcomm Ventures il cui portafoglio di investimenti in start up specializzate nell'IoT è stato stimato, nel periodo che va dal 2010 al 2015, in circa 3,2 miliardi di dollari. Questi solo alcuni dei dati emersi dal Rapporto Speciale Looking Forward di Accenture, interamente dedicato al tema dell'Internet of Things. Il percorso di trasformazione digitale in atto nelle imprese e nei mercati apre scenari economici e di business totalmente inediti, attraverso nuovi modelli di apprendimento, collaborazione, “contaminazione” fra imprese, a cavallo tra competizione e gestione. Questo processo interessa al tempo stesso sia le imprese che le istituzioni preposte alla guida dei mercati e dell'economia che devono essere in grado di porre nei tempi adeguati le condizioni infrastrutturali, regolamentari, di formazione per raggiungere in maniera efficace gli obiettivi di crescita diffusa e innovazione. Ad esempio nel 2020 oltre il 35% della popolazione delle economie mature avrà almeno un dispositivo wearable (indossabile). I consumatori si interfacceranno con ecosistemi digitali e fisici non solo grazie a device tradizionali come PC, smartphone e tablet, ma tramite una moltitudine di oggetti e sensori intelligenti. Questo fenomeno si sposa con l'opportunità di fornire migliori servizi ai consumatori: già oggi infatti il 40% dei consumatori si dichiara disponibile a condividere dati personali, a patto che questi vengano utilizzati per ricevere servizi disegnati quasi in modo sartoriale. L'applicazione dell'Internet of Things non avrà impatti diretti solo sul cliente finale, ma anche sui processi interni delle aziende volti all'interazione con i clienti stessi. Sensori e oggetti in-

telligenti posizionati in modo diffuso negli uffici e nei punti vendita consentiranno di ottimizzare i processi di gestione del cliente, favorendo la collaborazione e garantendo un migliore customer service. I grandi operatori della logistica come UPS e DHL stanno già sfruttando le reti di sensori per localizzare e gestire al meglio le loro flotte e per consentire la verifica dello stato di consegna da parte del cliente. Ad esempio in ambito B2B, i produttori di macchinari per movimento terra o attrezzature agricole potrebbero migliorare l'efficienza operativa monitorando in real time le macchine, consentendo anche operazioni di manutenzione predittiva e diminuendo i fermi macchina. Non sono però solo le grandi multinazionali ad investire nel comparto dell'Internet of Things numerosi Paesi stanno acquisendo sempre più consapevolezza delle opportunità economiche del comparto, promuovendo numerose iniziative per dare al proprio ecosistema dell'innovazione un ruolo leader che accompagni la società in questa trasformazione tecnologica. E' quanto sta accadendo in Francia, ad esempio, che ha inaugurato la "Cité de l'objet connecté" ovvero uno spazio di 10.000 metri quadrati messo a disposizione degli startupper per progettare e realizzare oggetti intelligenti e connessi; in Germania l'IoT è stato classificato come uno tra i settori prioritari in cui concentrare gli investimenti relativi al piano Industry 4.0. La Cina ha investito 800 milioni di dollari per sviluppare il comparto dell'IoT e corposi investimenti vengono portati avanti anche da Corea del Sud e Usa."

Il settore IoT secondo [15] è in forte sviluppo. Nelle sezioni successive si analizza se la tecnologia LPWAN è in grado di reggere la crescita del mercato.

Italia e IoT

Il documento [15] riporta alcune **iniziative Italiane** per favorire lo sviluppo dell'IoT:

"L'Italia sta attivando diverse iniziative per dare una spinta all'ecosistema dell'innovazione in generale e all'universo dell'IoT in particolare. Secondo la ricerca Accenture "Industrial Internet of Things" l'Italia è uno dei Paesi con le maggiori opportunità di crescita. Lo studio ha evidenziato che investimenti aggiuntivi in questo settore porterebbero a un incremento stimato di produttività pari a 197 miliardi di dollari entro il 2030. Inoltre, la vocazione alla tradizione manifatturiera rappresenterebbe un terreno fertile per l'applicazione di tutte le tecnologie di automazione dei processi industriali, per abilitare la fabbrica del futuro (Fabbrica 4.0). Inoltre il posizionamento distintivo e di eccellenza su diversi settori che stanno attualmente guidando la volata all'IoT, come i settori auto, casa, automazione e salute, può essere ulteriore spinta e volano per la trasformazione digitale anche delle filiere legate a tali comparti. Anche la Pubblica Amministrazione sembra consapevole della centralità del tema facendo del recupero del gap d'innovazione una priorità strategica per l'Italia che viene confermata da alcuni recenti interventi normativi finalizzati a supportare anche il mercato IoT".

2.1.1 Connessioni wireless per connettere reti di sensori

L'articolo [6] ripercorre brevemente la storia delle connessioni wireless per connettere reti di sensori:

”Esistono oggi opzioni sempre più interessanti per implementare collegamenti di tipo wireless nelle reti di sensori e in numerose altre applicazioni Internet of Things. Per un decennio o forse più, le reti di telefonia mobile (cellulari) hanno rappresentato l'unica tecnologia di comunicazione wireless universale disponibile per produttori e operatori di apparecchiature M2M (Machine-to-Machine) in grado di garantire una copertura praticamente globale in ogni regione abitata del pianeta. Nel caso delle applicazioni M2M, si è deciso di utilizzare la tecnologia GPRS come base per la connessione alla rete di telefonia mobile, mentre le più recenti tecnologie 3G e 4G (di terza e quarta generazione) garantiscono velocità di trasferimento sempre maggiore a fronte di un aumento dei costi di connessione. Tutte queste tecnologie per telefoni mobili evidenziano svantaggi non indifferenti per gli utilizzatori di apparecchiature M2M: la velocità di trasmissione dati è molto più elevata rispetto a quella richiesta da un gran numero di applicazioni M2M per cui i moduli cellulari integrati nelle apparecchiature IoT sono sovra-specificati e quindi troppo costosi per tali applicazioni. Senza dimenticare che le elevate tariffe che gli operatori di reti mobili impongono per collegare anche il più semplice dei dispositivi wireless sono proporzionali alle elevate velocità di trasferimento dati che la rete può supportare. Un altro aspetto da tenere in considerazione è che le prestazioni offerte dalla tecnologia per telefoni mobili tendono a deteriorarsi in condizioni ambientali severe o estreme. In sintesi, nella maggioranza delle applicazioni M2M, l'utilizzo di una rete di telefonia mobile per garantire la copertura wireless universale risulta costoso.”

Per diversi motivi sono nate nuove tipologie di reti WAN (Wide Area Network) che garantiscono sensibili risparmi in termini di consumo energetico e ulteriori spese rispetto alle tradizionali reti di telefonia mobile.

Bassi consumi abbinati a una copertura geografica

In [6] viene definita la **Low-Power WAN**:

”Le reti trattate appartengono alla categoria LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) pubblica. Gli approcci di tipo tradizionale alla connettività wireless suggeriscono che un dispositivo di rete non dovrebbe essere in grado di operare con consumi ridotti, mentre sta trasmettendo su lunghe distanze. La topologia delle reti WAN e LPWAN è a stella con una stazione BTS (Base Transceiver Station) al centro, come per la telefonia cellulare.”

Se le nuove tecnologie garantissero connessioni a lungo raggio, come la telefonia cellulare, ad un basso costo avrebbero sostituito nel mercato tutte le tecnologie datate. Questo non avviene perché il basso consumo energetico su lunghe distanze viene scambiato con un **limite** per l'utilizzo del servizio:

"A differenza dei sistemi 2G, 3G o 4G, una rete LPWAN adotta uno schema di modulazione che penalizza la velocità di trasmissione dati (throughput) al fine di garantire una maggiore tolleranza nei confronti delle interferenze e dell'attenuazione del segnale. In questo modo la potenza di trasmissione (in uscita) potrà essere molto bassa. Allo stesso tempo la tecnologia richiede ricevitori caratterizzati da una sensibilità molto elevata al fine di mantenere una connessione in presenza di segnali in ingresso relativamente deboli."

La bassa velocità di trasmissione dati non deve essere vista come uno svantaggio. Ci si aspetta che tutti gli oggetti reali connessi ad Internet siano dispositivi che producano lentamente i dati da trasmettere in rete, come ad esempio i sensori.

"Una rete LPWAN è ottimizzata per l'utilizzo in applicazioni M2M e IoT, che richiedono bassi consumi e ridotta velocità di trasferimento dati, a differenza della telefonia mobile. Una cella LPWAN può garantire un'ampia copertura, persino superiore rispetto a quella di una cella di telefonia mobile, utilizzando una potenza inferiore."

Le applicazioni M2M, che non richiedono comunicazioni in tempo reale o streaming, preferiranno molto probabilmente una rete LPWAN.

Due possibili tecnologie

Nell'articolo [6] vengono introdotte due possibili tecnologie, **SigFox** e **LoRa**, per LPWAN:

"Le nuove tecnologie LPWAN operano a frequenze comprese nelle bande ISM (Industriale, Scientifica e Medica) esente da licenze. A differenza degli operatori di reti di telefonia mobile, gli operatori di reti LPWAN non devono acquistare costose licenze per l'assegnazione di bande dello spettro radio. Il costo per creare un'infrastruttura wireless pubblica è in ogni caso notevole e il tempo richiesto per raggiungere un grado di copertura tale da permettere alle nuove reti LPWAN pubbliche di soddisfare le esigenze di una vasta platea di utenti è considerevole. Le due tecnologie LPWAN sono SigFox e LoRa."

SigFox e LoRa sono tecnologie accessibili ed avendo bassi consumi energetici offrono bassi costi di mantenimento. Più tecnologie scelgono di utilizzare le bande ISM perché sono senza licenza. Questo comporta di dover verificare che sia garantita la coesistenza di tutte queste tecnologie.

Reti pubbliche SigFox

Nel documento [6] viene descritta la tecnologia **SigFox**:

"La rete pubblica SigFox copre Francia, Spagna, Gran Bretagna e Paesi Bassi e a partire dal mese di luglio del 2015 sono state condotte numerose prove sul campo in numerose città in tutto il mondo, mentre l'installazione di una rete su scala nazionale è stata avviata in Portogallo, Danimarca, Belgio e Stati Uniti. L'obiettivo di

SigFox prevede la copertura su scala nazionale in oltre 60 Paesi entro il 2020. In Francia, SigFox possiede e gestisce la rete, sviluppa l'ecosistema locale e vende abbonamenti ai servizi di comunicazione, mentre in altri Paesi queste attività sono demandate alla responsabilità di partner SNO (SigFox Network Operator). Gli operatori SNO forniscono un servizio di comunicazione end-to-end che trasferisce in modo sicuro i dati dai dispositivi remote agli application server degli utilizzatori.”

Il documento continua descrivendo i servizi di SigFox:

”Esso offre un’interoperabilità nativa e il supporto per il roaming, elementi critici per garantire la connettività su scala globale dei dispositivi IoT. Grazie alla topologia tipica della tecnologia SigFox e alla propagazione del segnale su lunghe distanze, l’investimento richiesto per implementare una rete SigFox è molto minore rispetto a quello necessario per i sistemi cellulari tradizionali, consentendo in tal modo agli operatori SNO di fornire la connettività agli utenti OEM (original equipment manufacture) a prezzi accessibili. Un OEM che desidera abbonarsi alla rete pubblica SigFox deve disporre di un modulo client che fa girare lo stack client SigFox e un transceiver radio operante a 868 MHz in grado di effettuare la modulazione DBPSK (Differential Binary Phase-Shift Keying) per l’uplink la modulazione GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) per il downlink.”

L’articolo [6] evidenzia l’elasticità di SigFox per gli sviluppatori:

”Alcuni OEM potrebbero decidere di sviluppare in proprio il progetto o il modulo mentre molti altri opteranno per un modulo Cots già pronto all’uso certificato SigFox Ready. I gateway e tutto il software per il collegamento in rete e applicativo per il trasporto dei dati sono forniti da SigFox al fine di assicurare la medesima qualità di fruizione indipendentemente dal Paese in cui gli oggetti stanno comunicando. Poiché secondo SigFox la distanza di trasmissione in campo aperto può essere superiore a 15 km, è possibile creare una rete con copertura universale utilizzando un numero relativamente ridotto di celle. Più stazioni base possono ricevere e trasmettere lo stesso messaggio: questa diversità in ricezione nativa abbinata alla ricezione dell’interferenza dei segnali a banda ultra-stretta (UNB, Ultra Narrow Band) contribuisce a garantire un’elevata affidabilità della trasmissione.”

Lo stesso articolo procede descrivendo alcuni parametri tecnici di SigFox:

”La ridotta spaziatura tra i canali nella trasmissione in uplink (ovvero verso la rete) implica un’elevata selettività della stazione base. Questa è resa possibile dall’adozione di ricevitori SDR (Software-Defined Radio) cognitivi (che cioè effettuano una scansione dinamica dello spettro radio). In questo modo è possibile ridurre la complessità del modem del prodotto finale, che per l’OEM si traduce in una riduzione dei costi di implementazione. SigFox non utilizza uno schema

di modulazione proprietario per cui produttori di semiconduttori e costruttori di moduli possono realizzare trasmettitori e transceiver conformi alle specifiche SigFox. Un esempio è rappresentato dalla famiglia di prodotti SigFox compatibili della famiglia ATA8520x di Atmel, la quale ha anche annunciato l'introduzione di un transceiver RF SigFox completamente integrato. I moduli SigFox di tipo Cots sono caratterizzati da una sensibilità massima pari a -126dBm. La potenza di uscita irradiata per la banda ISM è stata stabilita da ETSI (European Telecommunications Standards Institute) ed è pari a 14dBm."

SigFox: prestazioni, costi e limitazioni

Il documento [6] viene spiega come mascherare alcune limitazioni ottenendo il massimo delle prestazioni:

"In un sistema SigFox il numero di trasmissioni giornaliero è limitato a 140 messaggi in uplink, ciascuno composto da un massimo di 12 byte, e a soli 4 messaggi in downlink, composti da un massimo di 8 byte. La latenza è dell'ordine di 3-5 ms. Sulla base di queste caratteristiche, SigFox è adatta all'uso in applicazioni che prevedono una trasmissione occasionale di piccoli pacchetti di dati, in cui quindi il sistema resta per lunghi periodi in uno stato di inattività (power-down) al fine di preservare la durata della batteria. I contatori per la contabilizzazione dei consumi sono un ottimo esempio di una tipica rete SigFox."

Lo stesso documento continua riassumendo i costi di SigFox:

"Gli utenti di SigFox devono pagare una quota annuale per ciascun nodo per la fornitura dei servizi di comunicazione di rete. Questa quota annuale è determinata dagli operatori di rete in ogni Paese, ma SigFox sottolinea che in ogni caso gli utenti possono beneficiare di prezzi estremamente competitivi abbinati a consumi di potenza minimi."

L'articolo [25] trae delle conclusioni dopo aver analizzato alcuni reali in cui è stata implementata SigFox:

"In conclusione, SigFox si distingue come una tecnologia a banda ultra-stretta che consente una copertura del segnale simile a quella delle reti cellulari ad un millesimo del suo fabbisogno energetico. Una rete eterogenea SigFox, basata sulla combinazione di una topologia di rete a stella ultra-LP per comunicazioni a breve distanza e SigFox, come gateway Internet per i dispositivi a bassa potenza. Seguendo questo approccio, i cluster di dispositivi IIoT (Industrial Internet of Things) sono in grado di comunicare con un vicino gateway SigFox che segnala i dati rilevati a Internet. In particolare, si è riscontrato che un sensore IoT è in grado di funzionare autonomamente durante periodi di tempo notevolmente lunghi, raggiungendo fino a 4 anni quando funziona a un ciclo di lavoro di 60 minuti ed

alimentato da una batteria da 1 Ah. Una topologia di rete combinata è in grado di coprire aree urbane relativamente grandi, così come ambienti interni che utilizzano una trasmissione ad alta efficienza energetica.”

SigFox è stata la prima tecnologia LPWAN ad essere sperimentata ed implementata nel mondo reale. In quanto tale possiede delle lacune che gli sviluppatori di LoRa hanno cercato di colmare con la propria tecnologia.

2.2 LoRa

LoRa è una piattaforma wireless a lungo raggio e a bassa potenza. Al momento è la scelta tecnologica più utilizzata per la creazione di reti IoT in tutto il mondo. Le applicazioni Smart IoT hanno migliorato il nostro modo di interagire ed affrontare alcune delle più grandi sfide che le città e le comunità devono affrontare: cambiamenti climatici, controllo dell'inquinamento, allerta preventiva e salvataggio di vite umane. Anche le imprese e le industrie ne beneficiano, grazie a miglioramenti nell'eseguire operazioni ed alla riduzione dei costi. Secondo [20]:

”LoRa è il meccanismo che lo rende intelligente connettendo praticamente tutte le cose, sensori, gateway, macchine, dispositivi, animali, persone. La tecnologia LoRa consente di connettersi al cloud, prendendo decisioni corrette e migliorando la vita delle persone. La tecnologia LoRa di Semtech è una piattaforma per le tecnologie LPWAN (Low-Power Wide Network), progettata per inviare una piccola quantità di dati su lunghe distanze.”

Essa è particolarmente adatta ai sensori ed alle applicazioni di monitoraggio del clima le quali inviano i dati ogni ora, come i sistemi di allarme rapido, il controllo dell'inquinamento e le applicazioni di monitoraggio dei cambiamenti climatici. Nelle sezioni successive sono presentate le aziende che producono prodotti LoRa.

2.2.1 Semtech

Nel campo dell'innovazione l'azienda Semtech offre la tecnologia RF wireless LoRa. L'azienda in [20] presenta i propri prodotti:

”Semtech sviluppa la tecnologia LoRa nei suoi chipset. Questi chipset sono quindi integrati nei prodotti offerti dalla vasta rete di partner IoT e integrati in LPWAN da operatori di reti mobili in tutto il mondo.”

Semtech si occupa della produzione dei propri transistor:

”Semtech fornisce il silicio che incorpora la tecnologia RF wireless LoRa. I transistor sono ottimizzati esclusivamente per le comunicazioni IoT, costruiscono la connessione tra end-point remoti, picocelli e gateway, quindi trasmettono tali informazioni al cloud per la consegna a cellulari e sistemi, rendendo il nostro mondo uno Smart Planet. I transceiver LoRa (trasmettitori) di Semtech RF sono incorporati nei sensori.”

Semtech offre soluzioni di connettività wireless integrate, lunghe e corte:

"I prodotti RF wireless sono costituiti da trasmettitori RF e ricevitori RF che coprono lo spettro di frequenze radio in banda industriale, scientifica e medica (ISM). I circuiti integrati RF wireless sono utilizzati in tutto il mondo per il controllo remoto wireless automatizzato. Inoltre, i nuovi prodotti wireless LoRa di lunga portata di Semtech sono la soluzione definitiva per eliminare i ripetitori, ridurre i costi, prolungare la durata della batteria e migliorare la capacità della rete."

2.2.2 IBM Research

In [8] il centro di ricerca di IBM con sede a Milano annuncia la collaborazione con Semtech per aiutare le aziende di telecomunicazione a lanciare nuovi servizi per l'Internet of Things:

"IBM Research (NYSE:IBM) ha annunciato una nuova tecnologia basata su wide-area network a basso consumo (LPWAN), che offre vantaggi significativi alle reti cellulari e wi-fi per le comunicazioni machine to machine (M2M). Per anni, l'enorme potenziale dell'Internet of Things (IoT) per le aziende - raccolta dati da diversi dispositivi, la loro analisi ed elaborazione per un processo decisionale più rapido e veloce - è stato frenato da difficoltà tecniche quali una durata limitata della batteria, distanze di comunicazione brevi, costi elevati e mancanza di regole."

IBM Research vuole partecipare alla creazione di un consorzio che definisce uno standard per le reti LoRa:

"Con i suoi 70 anni di attività, IBM Research continua a definire il futuro dell'informatica con più di 3.000 ricercatori in 12 laboratori situati in sei continenti. Gli scienziati di IBM Research hanno prodotto 6 Premi Nobel, 10 U.S. National Medals of Technology, 5 U.S. National Medals of Science, 6 Turing Awards, 19 membri della National Academy of Sciences e 14 membri dell'U.S. National Inventors Hall of Fame."

2.2.3 Senet

Senet è un'azienda che collabora con Semtech e IBM. In [8] viene presentata come:

"Senet è un operatore M2M Network as a Service (NaaS) con sede nel New Hampshire, sta attualmente installando 20.000 sensori Semtech LoRa con il software LRSC di IBM per monitorare i livelli del propano combustibile e delle taniche di petrolio situate presso edifici residenziali e aziende sulla east e la west coast degli Stati Uniti. Ogni ora i sensori raccolgono e trasmettono dati in modo sicuro, tra cui i livelli di carburante, lo stato degli indicatori, dei sensori e i rapporti di ricalibrazione dei sensori ai fornitori di carburante che stabiliscono quando effettuare le consegne e reintegrare le scorte."

Nello stesso articolo, Senet mette in evidenza i vantaggi ottenuti per se stessa ed anche per i suoi clienti:

"Gli indicatori di Senet sono precisi e, grazie alla tecnologia LoRa funzionano sulle lunghe distanze, riducendo i nostri costi infrastrutturali e consentendoci di ribaltare questi risparmi sui nostri clienti. I consumatori traggono inoltre vantaggio dal fatto di sapere quanto carburante è presente nel serbatoio in qualsiasi momento."

2.2.4 FastNet

In [8] viene presentata l'azienda FastNet che opera in Sud Africa:

"FastNet è fornitore leader di servizi di comunicazione di dati wireless. Con 20 anni di esperienza nell'introduzione delle comunicazioni Point-Of-Sale (POS) in Sud Africa, FastNet fornisce una rete conforme alla Payment Card Industry (PCI) affidabile, sicura, e soluzioni di comunicazione di dati end-to-end ad aziende di qualsiasi dimensione. La società è specializzata in POS, Virtual Private Network, comunicazioni machine-to-machine e tecnologia Wi-Fi. FastNet è ben posizionata per erogare un servizio di livello superiore e un'assistenza tecnica 24 ore su 24, 7 giorni su 7 in tutto il Sud Africa. FastNet è inoltre fornitore di servizi con licenza Electronic Communications Network Services (ECNS) e Electronic Communication Services (ECS) con il vantaggio di un'ampia copertura fornita da reti wireless e fisse. FastNet è una società di proprietà al 100% di Telkom SA SOC Limited."

Queste tecnologie LPWAN hanno una buona stabilità in territori dove la densità di popolazione è molto bassa, ovvero, dove sono presenti pochi edifici. Gli edifici possono ostacolare la trasmissione del segnale. Questo è uno dei problemi trattati nelle sezioni successive.

2.2.5 LoRa Alliance

Nell'articolo [8] viene descritto il primo passo verso la creazione di uno standard per tecnologie LPWAN:

"A supporto della tecnologia LPWAN, IBM, Semtech e altre società hanno co-fondato LoRa Alliance, una coalizione di aziende impegnata a standardizzare il protocollo LoRaWAN che consente questa interoperabilità."

La LoRa Alliance è un'associazione aperta e no profit, che ha come missione lo sviluppo e la standardizzazione di reti LPWAN implementate in tutto il mondo per l'attivazione di Internet of Things:

"LoRa Alliance ha lo scopo di unire hardware e software basati sullo standard LoRaWAN per gli operatori delle telecomunicazioni e gli operatori di rete consentendo loro di offrire servizi IoT ad aziende e consumatori. Dai sensori alle macchine, ai monitor fino ai computer indossabili."

Le aziende Semtech, IBM Research, Senet e FastNet sono i principali membri della LoRa Alliance. In [6] viene presentato il frutto della loro collaborazione per creare una **pila di protocolli standard** per reti di grandi dimensioni. La pila di protocolli è basata sull'insieme di tutte le tecnologie e prende il nome di LoRaWAN:

"LoRaWAN è formato da un client, un server e un firmware per l'inoltro dei pacchetti (packet forwarding). La disponibilità di LoRaWAN semplificherà l'introduzione di un gran numero di reti LoRa pubbliche e private di grandi dimensioni in un prossimo futuro."

Inoltre lo stesso articolo mette in evidenza la versatilità data dalla creazione dello standard, dove ogni componente è intercambiabile e non genera problemi di incompatibilità:

"Grazie a LoRa Alliance e alla disponibilità dello stack di protocolli LoRaWAN gli operatori di rete, compresi gli attuali operatori di reti mobile, possono disporre di un ecosistema che permette loro di ridurre i costi e accelerare l'installazione e la messa in esercizio (deployment) di reti pubbliche LoRa. Grazie alla disponibilità di moduli concentratori proposti da costruttori come Kerlink, Embit, Imst e MultiTech è possibile sviluppare in tempi rapidi l'hardware per la realizzazione di stazioni radio base che supportano la tecnologia LoRa. I concentratori forniti da Future Electronics sono corredati con il software Ibm o Actility già pre-caricato. Nel caso di utenti che desiderino collegare dispositivi su una rete privata, piuttosto che sfruttare una rete LoRa pubblica con la copertura richiesta, il software disponibile a bordo permette di accelerare e semplificare l'implementazione della rete stessa."

Il documento [9] spiega come LoRa sia facile da implementare:

"Esiste un portafoglio di moduli radio conformi alle specifiche LoRaWAN per consentire di semplificare e accelerare l'integrazione di questa tecnologia nei dispositivi IoT. I moduli Microchip, come l'RN2483, sono dispositivi plug-and-play che integrano un completo sottosistema radio con un microcontrollore, la Eeprom di identità, il front-end a radiofrequenza e i relativi circuiti, oltre a un cristallo."

Nell'articolo [6] emerge una sostanziale differenza tra la tecnologia LoRa e la precedente SigFox:

"A questo punto vale la pena segnalare che la possibilità di realizzare reti private non è prevista per gli utilizzatori della tecnologia SigFox."

Nello stesso articolo vengono riassunti i vantaggi di LoRa in una rete pubblica:

"Lo stack dei protocolli LoRaWAN gestisce la velocità di trasferimento dati e la potenza di uscita in maniera adattativa al fine di ottimizzare sia i consumi di potenza sia l'intensità del segnale. Ciò significa che una rete pubblica implementata con lo stack LoRaWAN è in grado di offrire agli utilizzatori tutti i benefici (consumi ridotti, basso costo ed elevate sicurezza) intrinseci della tecnologia LoRa."

Grazie alla creazione di uno standard e l'intercambiabilità delle componenti, LoRa possiede una trasmissione bidirezionale tendenzialmente migliore rispetto a SigFox.

2.3 Architettura di rete LoRa

In questa sezione verrà analizzata la struttura di una rete LoRa. L'articolo [1] tratta l'architettura di rete LoRa:

"In termini di architettura di rete LoRa, i nodi sono disposti secondo una topologia che viene tipicamente definita "star-of-stars" con i gateway in modalità di bridge trasparente che trasmettono messaggi dai nodi finali fino al server centrale nel backend della rete."

Il documento [5] descrive le connessioni tra le varie entità:

"I gateway sono collegati al server di rete tramite connessioni IP standard, mentre i dispositivi terminali utilizzano la comunicazione wireless a singolo hop su uno o più gateway."

In [1] vengono illustrati i tipi di comunicazione tra le diverse entità:

"La comunicazione con i nodi finali è generalmente bi-direzionale ed è anche possibile la trasmissione in multicast (invio simultaneo a più nodi), funzionalità utile in caso di aggiornamenti o invio di messaggi in blocco al sistema."

Per gli utenti che operano in campo industriale ed utilizzano reti private chiuse, Semtech ha introdotto transceiver per reti LoRa in grado di supportare un range di trasmissione di 15 km tra un nodo e un gateway. Il testo [6] indica cosa è necessario al centro della topologia a stella:

"Una rete LoRa, pubblica o privata che sia, richiede la presenza di un concentratore posto al centro della topologia a stella mentre la comunicazione è bi-direzionale alternata (half duplex) in modo nativo. Il numero di nodi collegati a un concentratore dipende dall'applicazione e dal numero di pacchetti che devono essere trasmessi in un determinato periodo di tempo. Per le applicazioni caratterizzate da un elevato numero di nodi terminali, Semtech ha sviluppato una soluzione ad hoc per il concentratore che prevede l'uso del chipset in banda base ad alta efficienza SX1301 e da due modulatori SX1257. Un concentratore realizzato a partire da questi chip è in grado di gestire fino a 10.000 nodi."

Dopo aver analizzato l'articolo [23] si può affermare che l'elettronica solitamente viene programmata per la modalità "sleep", per risparmiare energia durante il periodo di inattività. La CPU di schedulazione a bassa potenza è sempre accesa per poter riattivare periodicamente il resto del sistema programmato per acquisire i dati dai vari sensori.

Si fa riferimento al Gateway Symphony Link basato su LoRaWAN, che è la piattaforma LPWAN di LoRa Alliance, perché gode delle seguenti caratteristiche descritte in [33]:

- *"utilizza il riconoscimento per pacchetto e Symphony Link presenta tassi di errore dei pacchetti inferiori;*
- *Symphony Link è flessibile nell'adattare il ciclo di lavoro consentendo di inviare più pacchetti in un dato momento;*
- *è più flessibile in termini di controllo della potenza di trasmissione e delle velocità di trasmissione dati;*
- *la dimensione MTU fissa di 256 byte di Symphony Link consente di inviare pacchetti di varie dimensioni.*

La sensibilità RX del gateway è di -133 dBm. Il guadagno massimo RX dell'antenna gateway è -39,4 dBm. La potenza TX del nodo finale tra 12 dBm e 26 dBm è selezionata in base allo schema ADR (Adaptive Data Rate, spiegato in seguito) di LoRaWAN."

2.3.1 Specifiche LoRaWAN

Secondo [10] LoRaWAN 1.1 è l'ultima versione di LoRaWAN ed offre le seguenti funzioni:

- *"supporto per il roaming di handover: consente il trasferimento del dispositivo finale da una rete LoRaWAN a un'altra;*
- *roaming passivo: consente il trasferimento del dispositivo finale da una rete LoRaWAN con versioni precedenti. Il tutto è trasparente per il dispositivo finale;*
- *i dispositivi finali bidirezionali con slot di ricezione programmati (Classe B) fanno parte dei miglioramenti delle specifiche e sono ora ufficialmente supportati;*
- *miglioramenti di sicurezza.*

Al fine di supportare implementazioni eterogenee e non a aggiornamenti coordinati a livello globale, sia i dispositivi finali che le reti LoRaWAN 1.1 supporteranno la compatibilità con le versioni precedenti per interoperare con i loro pari LoRaWAN 1.0.x."

In relazione a [10] LoRaWAN Backend Interfaces 1.0 abilita le seguenti funzioni:

- *"Unisce il server di rete (NS), il server (JS) e il server delle applicazioni (AS).*
- *Abilita il roaming sia per LoRaWAN 1.0.x (solo per il roaming passivo) e per le reti LoRaWAN 1.1 (sia in roaming passivo che in handover).*
- *Identifica l'entità che memorizza le credenziali del dispositivo finale (comprese le chiavi di root) come JS. Può essere separato dalle reti e amministrato da un'entità indipendente dalle reti che il dispositivo finale potrebbe utilizzare. Ciò consente*

alle reti di scaricare la procedura di autenticazione su un sistema dedicato. Alla fine potrebbe essere collegato a questa terza parte.”

Il testo [10] specifica i parametri regionali LoRaWAN 1.1 rev. A:

”I parametri radio sono specifici per ogni regione. LoRa opera nelle bande ISM inferiori (UE: 868 MHz e 433 MHz, USA: 915 MHz e 433 MHz).”

2.3.2 Protocollo LoRa

LoRa è l'acronimo di Long Range, lungo raggio, che sta a riassumere il vantaggio principale di questa tecnologia wireless, senza cablatura riesce a connettere lunghe distanze. LoRa rappresenta il protocollo di livello 1 della pila ISO/OSI. Secondo [11]:

”LoRa è una modulazione radio a spettro esteso brevettata sviluppata da Cycleo (Grenoble, Francia) e acquisita da Semtech NASDAQ: SMTC nel 2012.”

Nel documento [6] viene esposto come è realizzato il livello fisico:

”LoRa è basata sulla tecnica CSS (Chirp Spread Spectrum), che la rende in grado di variare la lunghezza del cosiddetto fattore di diffusione (compreso tra 6 e 12 bit) e l'ampiezza di banda in funzione della bit rate (ovvero il numero di bit trasmessi al secondo) richiesta nel range compreso tra 20bit/s a 41kbit/s.”

La Chirp Spread Spectrum utilizzata da LoRa permette un maggiore utilizzo della banda rispetto all'Ultra Narrowband utilizzato da SigFox. Banda larga significa però molto più rumore. Questa scelta però porta alla costruzione di dispositivi più costosi. L'articolo [30] elenca i vantaggi della modulazione:

”Questa modulazione aumenta la tolleranza alla deviazione di frequenza, riducendo i costi. Inoltre rende LoRa una buona resistenza contro lo sbiadimento del multipath e l'effetto Doppler, e migliora la sensibilità del ricevitore aumentando la copertura.”

Il testo [11] riporta la sensibilità e la velocità raggiungibile dalla modulazione:

”Grazie alla straordinaria modulazione del chirp, il collegamento wireless può raggiungere una sensibilità fino a -137 dBm e fino a 157 dB di budget di collegamento. Il trade-off è la velocità dati raggiungibile, che è nell'intervallo di kilobit al secondo.”

Questi parametri permettono di capire che è una tecnologia adatta per servire l'Internet of Things e le applicazioni M2M, mentre non è assolutamente adatta, per esempio lo streaming video. Il documento [11] riporta le bande occupate da LoRa:

”LoRa può essere utilizzato su un'ampia gamma di frequenze da 137 MHz a 1020 MHz. Questo include numerose bande ISM prive di licenza come 169 MHz, 433 MHz, 868 MHz e 915 MHz.”

Questo è un fattore chiave per le implementazioni ed interoperabilità a livello mondiale. L'articolo [6] mostra lo schema di modulazione digitale:

"La tecnologia LoRa adotta uno schema di modulazione digitale completamente asincrono. La modulazione garantisce una continuità di fase tra i simboli chirp nella parte del preambolo del pacchetto. Questa funzione consente di utilizzare la sincronizzazione temporale più semplice e quindi componenti meno costosi. Una radio LoRa ha quattro parametri di configurazione: frequenza portante, fattore di diffusione, larghezza di banda e velocità di codifica. La selezione di questi parametri determina il consumo di energia, il raggio di trasmissione e la resilienza al rumore."

Lo stesso articolo, mette in evidenza le prestazioni di LoRa:

"Le elevate prestazioni che la tecnologia LoRa è in grado di offrire sono testimoniate dalla sua capacità di ricevere segnali fino a -22dB al di sotto della soglia del rumore di fondo, abbinata alla reiezioni dei canali adiacenti di almeno 69dB con un offset di 25kHz, un valore migliore di 30dB rispetto a quello che si ottiene utilizzando la modulazione FSK a 868MHz sui medesimi transceiver."

In relazione a [24], una configurazione di modulazione (data-rate, DR) è data da due parametri:

"La larghezza di banda (BW, bandwidth) e il fattore di diffusione (SF, spread factor) sono i parametri indicati dalla specifica dei parametri regionali LoRaWAN. Le larghezze di banda vanno da 125 kHz a 500 kHz a seconda della regione. La durata del simbolo chirp è data da:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2.1)$$

dove SF appartiene all'intervallo [7, 12]."

secondo lo stesso articolo, vengono mostrate delle relazioni con SF:

"Il TOA (time-on-air) dipende quindi in modo esponenziale dalla SF. D'altra parte la sensibilità del ricevitore è proporzionale alla SF. Inoltre, la tecnica dello spettro esteso è combinata con la correzione degli errori in avanti (FEC, forward error correction) con velocità di codifica in 4/5; 4/6; 4/7; 4/8."

Il documento [24] descrive il pacchetto LoRa:

"Un pacchetto LoRa costituito da un preambolo, un'intestazione, un payload e un campo CRC. Il preambolo permette al ricevitore, solitamente un Gateway LoRa, di sincronizzarsi con il messaggio in arrivo. Nell'intestazione ci sono tutte le informazioni per notificare delle informazioni al trasmettitore."

Tempo di trasmissione on-the-air

Nell'articolo [30] LoRa è stata messa alla prova a differenti combinazioni di fattori meteorologici per analizzare i limiti di questa tecnologia. Si ricorda che:

”Secondo ”LoRa Modem Designer’s Guide” della Semtech e come menzionato precedentemente, il pacchetto LoRa è costituito da un preambolo e da payload.”

Il payload può contenere un intestazione del livello successivo.

”Il tempo di trasmissione in onda è la somma del preambolo e della durata del carico utile. Il tempo di trasmissione in diretta ToA è indicato:

$$T_{oA} = T_{preamble} + T_{payload} = \quad (2.2)$$

$$= T_{sym}(L_{preamble} + L_{payload}) = \quad (2.3)$$

$$= \frac{2^{SF}}{BW} \times ((n_{preamble} + 4.25) + (8 + M)) \quad (2.4)$$

$$M = \max(\text{ceil}(\frac{8PL - 4SF + 42 - 20H}{4(SF - 2DE)} \times (CR + 4), 0)) \quad (2.5)$$

Dove la larghezza di banda BW assume valori in 62,5 kHz, 125 kHz, 250 kHz, 500 kHz, SF è il fattore di diffusione, T_{sym} è il tempo di trasmissione del simbolo, determinato da SF e BW, $n_{preamble}$ è la lunghezza del preambolo programmato, PL è il numero di byte del carico utile, $H = 0$ significa presenza dell’intestazione (header), $H = 1$ quando non è presente un’intestazione, $DE = 1$ vuol dire che è stata impostata l’ottimizzazione a bassa velocità di trasmissione dati, altrimenti $DE = 0$, CR varia da 1 a 4 (corrispondente alla velocità di codifica da 4/5 a 4/8).”

Secondo la formula 2.4, il tempo di trasmissione on-the-air è inversamente proporzionale a BW e aumenta con l’aumento di SF.

”Sono stati fatti esperimenti per verificare la relazione tra tempo di trasmissione on-air, SF e BW. L’analizzatore di spettro RSA306 è stato utilizzato per misurare il tempo di trasmissione in onda del modulo. È stato utilizzato il modulo YL-800IL con potenza di trasmissione 100 mW e lunghezza del carico utile 1 byte.”

I risultati della misurazione fatta dagli autori di [30] effettuata con diversi BW e SF sono mostrati in figura 2.1 e figura 2.2. I risultati mostrano che all’aumentare della larghezza di banda il tempo di trasmissione on-the-air diminuisce, mentre aumentando il fattore di diffusione il tempo di trasmissione on-the-air aumenta. I risultati coincidono con quanto è stato previsto in teoria.

Copertura del segnale

La preparazione della prova per valutare la copertura del segnale eseguita in [30] è la seguente:

”Le misurazioni sono state eseguite per il caso in cui un modulo YL-900IL trasmetteva i dati periodicamente (ogni due secondi) ad un modulo che fungeva da stazione base. L’antenna del modulo era ad 1,5 m di altezza e l’antenna del modulo della stazione base era ad 4 m di altezza. Non erano presenti ostacoli tra i due moduli. I moduli funzionavano in banda di frequenza 433 MHz con potenza di trasmissione di 100 mW e guadagno dell’antenna di 6 dBi.”

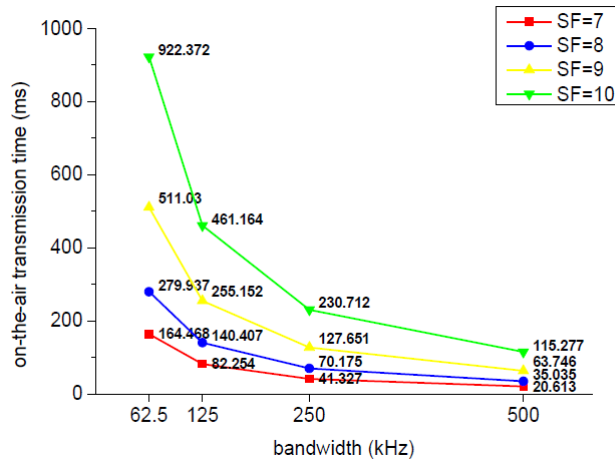


Figura 2.1: Tempo di trasmissione on-the-air con diversa larghezza di banda
Immagine tratta dall'articolo [30].

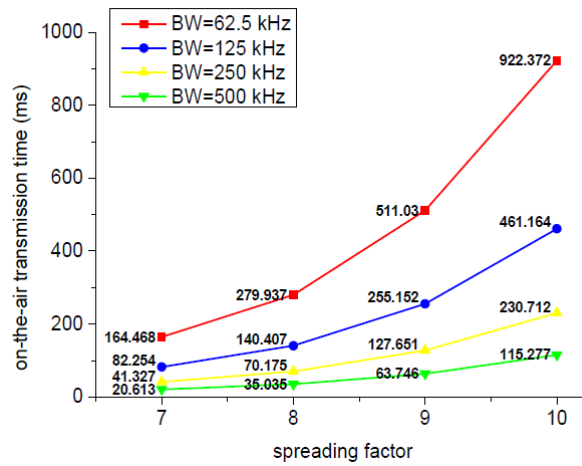


Figura 2.2: Tempo di trasmissione on-the-air con diverso fattore di diffusione
Immagine tratta dall'articolo [30].

Tabella 2.1: Risultati delle misurazioni per verificare la copertura

SF	BW (kHz)	Portata inferiore al 10% della perdita di pacchetti (m)
7	250	2910-3110
9	250	3140-3340
9	500	2130-2330
11	500	4810-5010

Le misurazioni sono state raccolte dagli autori dell'articolo [30].

Gli autori dell'articolo [30] hanno effettuato le misurazione riportati nella tabella 2.1.

"I risultati mostrano la distanza più lontana raggiunta, in metri, mantenendo la perdita dei pacchetti inferiore al 10%, con SF e BW diversi. Questo dimostra che l'aumento dell'intervallo dipende dalla diminuzione di BW o dall'aumento di SF, poiché per BW minori e SF maggiori possono migliorare significativamente la sensibilità."

Il testo continua facendo notare che la sensibilità non è l'unico parametro da tenere in considerazione:

"Tuttavia nella progettazione della rete è necessario tenere conto, oltre all'ampia copertura e al basso consumo energetico, della velocità di trasmissione e del ritardo di trasmissione. Per questo motivo nel sistema sono utilizzati SF di 7 e BW di 125 kHz rappresentano il compromesso ottimale."

Questa prova dimostra che per quanto LoRa possa connettere lunghe distanze la trasmissione deve limitare ad una certa soglia la perdita dei pacchetti. Per permettere una vasta copertura del segnale con questo limite è necessario aumentare la potenza del segnale ma ciò comporta un maggiore consumo energetico. Così facendo, si perde il vero vantaggio della tecnologia LoRa, che permette la copertura di lunghe distanze a basso consumo energetico.

LoRa PHY error model

La tecnologia LoRa in letteratura viene associata al modello della tecnologia ALOHA. Questa associazione è utile per utilizzare modelli funzionati e collaudati per misurare le prestazioni di tecnologie simili e metterle a confronto. Questo approccio però non tiene conto della diversità dei due protocolli. ALOHA quando percepisce una collisione scarta i pacchetti letti e notifica secondo gli standard del protocollo l'avvenuta collisione. LoRa quando percepisce una collisione finisce la lettura del pacchetto e procede con il controllo degli errori. Questa scelta è dovuta alla particolare modulazione di LoRa che è meno sensibile agli errori in ricezione. Pertanto i pacchetti considerati scartati dai classici modelli ALOHA in realtà vengono letti correttamente, per questo LoRa PHY error model proposto in [22] da una stima più accurata delle prestazioni di LoRa.

1. Implementazione della banda base LoRa PHY:

”Per modellare gli effetti della perdita del percorso e dell’interferenza intra-LoRa, è stato sviluppato un modello di errore per LoRa PHY. È stato misurato il bit error rate (BER) per diverse configurazioni LoRa PHY su un canale AWGN (Additive White Gaussian Noise, rumore gaussiano bianco additivo).”

Il diagramma a blocchi delle simulazioni BER è mostrato in figura 2.3.

”I bit di informazione generati nella sorgente di informazioni sono mappati ai bit di codice dall’encoder di correzione dell’errore. Questo codificatore implementa le code rate 5/4, 7/4 e 8/4 disponibili in LoRa.1, mentre il 5/4 CR è un semplice codice di controllo di parità, i CR 7/4 e 8/4 sono (7, 4) e (8, 4) codici di Hamming che correggono gli errori lineari. Questi codici possono correggere un errore di un bit e rilevare fino a due errori di bit. Successivamente, l’interleaver diagonale mischia i bit di codice in modo tale che alla sua uscita, i gruppi di bit PPM siano costituiti da bit della stessa posizione di bit di parole di codice consecutive PPM. Ad esempio, la prima parola di uscita raggruppa i bit in posizione 0 da parole in codice consecutivo PPM. PPM rappresenta la lunghezza di bit delle parole di uscita dell’interleaver. In LoRa il PPM di theinterleaver è uguale a LoRa SF. Di conseguenza, il numero di bit mappati per il simbolo LoRa è uguale a SF. A causa dell’interlacciamento, un simbolo perso nel ricevitore viene convertito in errori PPM a 1 bit su parole di codice consecutive PPM (piuttosto che un errore di bit PPM in una parola di codice senza interleaver). Dopo l’interleaver, le parole di output vengono sbiancate per aumentare l’entropia della fonte di informazioni.”

Inoltre l’autore di [22] vuole far notare che:

”Nelle simulazioni BER i bit di informazione sono tratti da una distribuzione uniforme, pertanto l’entropia della fonte di informazioni è già al massimo.”

L’articolo continua con i passaggi dopo l’interleaver:

”Prima di passare il flusso di bit sbiancato al modulatore, è prima mappato in grigio inverso. Questo produce una sequenza di numeri interi, che vengono inviati al modulatore LoRa. Al modulatore LoRa, una sequenza di campioni N complessi di time-shifted in banda base risulterà generata tramite un accumulatore di fase come indicato dal sistema 2.6, dove N , il numero di campioni per simbolo di banda base, è uguale a $2^{SF}(f_s/BW)$. Il numero intero di input determina il time-shift del up-chirp:

$$m(i) = \begin{cases} \exp(-j\pi) & (i = 0) \\ m(i-1)\exp(jf(i)) & (i = 1, \dots, N-1) \end{cases} \quad (2.6)$$

dove la frequenza istantanea $f(i)$ è data da:

$$f(i) = -\pi + \frac{i}{N}2\pi \quad (2.7)$$

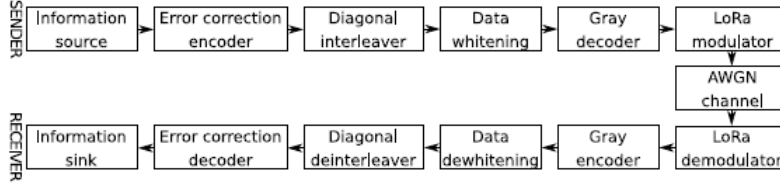


Figura 2.3: Schema a blocchi dell'implementazione della baseband LoRa PHY: mittente, canale AWGN e ricevitore

per $i = 1, \dots, N-1$. Successivamente, i campioni del simbolo LoRa vengono inviati sul canale AWGN per un determinato rapporto tra segnale e rumore (SNR) come da:

$$c(i) = m(i) + \sqrt{\frac{E_s}{2SNR}}[N(0; 1) + jN(0; 1)] \quad (2.8)$$

per $i = 0, \dots, N-1$. Dove $N(0; 1)$ è la distribuzione normale standard e $SNR = 10^{SNR_{dB}/10}$. Si noti che l'energia per simbolo è uguale a quella del modulatore LoRa.”

All'interno del ricevitore è presente il demodulatore LoRa:

”Il demodulatore LoRa che utilizza una demodulazione basata sulla correlazione in cui il simbolo ricevuto è correlato a tutti i simboli LoRa noti. La decisione su quale simbolo è stato inviato, viene effettuata selezionando il simbolo LoRa con il valore di correlazione massimo. Dopo la demodulazione, la catena di ricezione è l'opposto della catena di invio. Il tasso di errore viene misurato nei bit di informazione, dopo la correzione dell'errore. Non è stato eseguito il sovra-campionamento, pertanto continua a valere $N = 2^{SF}$.”

2. LoRa PHY BER Simulazioni:

Al fine di determinare il BER del livello fisico LoRa, sono state eseguite delle simulazioni con i parametri elencati in Tabella 2.2.

I parametri delle simulazioni condotte dagli autori di [22] sono stati riportati nella tabella 2.2.

”Le simulazioni sono state eseguite per valori SNR in passi di 1 dB negli intervalli. Successivamente, una curva esponenziale come definita dall'equazione 2.9 è stata adattata a un sottoinsieme dei valori logaritmici dei valori BER misurati.”

$$\log_{10}(BER(SNR_{dB})) = \alpha \exp(\beta SNR_{dB}) \quad (2.9)$$

Il sottoinsieme dei valori BER utilizzati per l'adattamento della curva è stato determinato come segue:

Tabella 2.2: Parametri LoRa PHY per simulazioni BER

BW (kHz)	SF	CR	SNR(dB)
125	7	1,3	[-20,0]
125	8	1,3	[-20,0]
125	9	1,3	[-20,-8]
125	10	1,3	[-20,-8]
125	11	1	[-23,-13]
125	11	3	[-25,-13]
125	12	1,3	[-26,-17]

Le misurazioni sono state effettuate dagli autori dell'articolo [22].

"I valori BER misurati pari a zero sono stati scartati. In secondo luogo, i valori BER sono stati aggiunti al sottoinsieme fino a quando il BER ha raggiunto un valore in cui la velocità di consegna del pacchetto (PDR) corrispondente è scesa sotto uno su un milione per un pacchetto di 13B. La lunghezza del pacchetto di 13B deriva dalla lunghezza minima del payload LoRa PHY per una trasmissione LoRaWAN: 1B intestazione MAC, intestazione frame 8B e 4B MIC (Message Integrity Code). Inoltre, per ogni curva si è scelto un punto di taglio SNR in modo che il PDR per un pacchetto 13B (= 108b) fosse uguale a uno su un milione nel punto limite."

Si noti che i PDR presentati tengono conto di tutti i pacchetti generati, anche i pacchetti che sono in coda per la trasmissione vengono conteggiati verso PDR. Pertanto, il PDR riflette il throughput di rete complessivo (per lo stesso numero di dispositivi e periodo di dati).

Assegnazione dei fattori di diffusione

Nel documento [22] viene discusso il problema di come assegnare il fattore di diffusione per i dispositivi terminali.

"Le SF hanno un forte impatto sui PDR. La sottostima della SF (ad esempio, l'assegnazione di una SF troppo bassa) può causare errori di ricezione a causa del basso SNR. Sovrastimare la SF (ad esempio, assegnare una SF troppo alta) può portare a un uso inefficiente del tempo di propagazione aerea."

Sono state prese in considerazione tre strategie di assegnazione di SF:

1. *"Random: assegna le SF ai dispositivi terminali secondo una distribuzione casuale uniforme."*
2. *Fixed: assegna lo stesso SF ai dispositivi terminali."*
3. *PER: per ogni dispositivo finale, trova e assegna il valore SF più basso per il quale il tasso di errore del pacchetto scende al di sotto di una determinata soglia."*

I pacchetti sono stati inviati come messaggi non confermati. La strategia PER possiede il migliore PDR.

"I PDR per le diverse soglie di PER sono molto simili e non esiste una soglia che produca il PDR più alto in tutte le dimensioni di rete considerate. Si noti che per reti di piccole dimensioni (vale a dire, meno di 100 dispositivi finali) il PDR al 75% della strategia fissa $SF = 12$ potrebbe essere sufficiente. Poiché ciò elimina la necessità di velocità di trasmissione dati attiva (ADR) in reti così piccole, il traffico downstream di ADR può essere evitato. Ovviamente l'invio a una velocità dati inutilmente elevata fa sì che un dispositivo finale spreca energia. Con l'aumentare del numero di dispositivi (vale a dire più di 1000 dispositivi finali), la strategia casuale supera le strategie fisse in termini di PDR."

Questo comportamento spiega che per le reti di maggiori dimensioni, le perdite dei pacchetti sono dovute principalmente alle collisioni. In questo caso la strategia casuale (random) riduce il numero di collisioni (rispetto a una strategia fissa) sfruttando l'ortogonalità dei diversi fattori di diffusione.

2.3.3 Protocollo LPWAN

LoRaWAN è una specifica del protocollo di livello di collegamento costruita sulla tecnologia LoRa sviluppata dalla LoRa Alliance. LoRaWAN è una specializzazione di protocollo LPWAN. Secondo il documento [20]:

"LoRaWAN è il protocollo MAC per la rete di nodi LoRa ad alta capacità. È uno standard LPWAN aperto gestito dalla LoRa Alliance. Sfrutta le funzionalità LoRa appena descritte precedentemente ed ottimizza la durata della batteria e la qualità del servizio per i nodi LoRa."

L'articolo [11] spiega le funzionalità di LoRaWAN:

"Il protocollo è completamente bidirezionale, che consente una consegna affidabile dei messaggi (conferme). Comprende la definizione della crittografia end-to-end per la sicurezza e la riservatezza dei dati, la registrazione over-the-air dei nodi finali e la funzionalità multicast. Grazie al modello di antenna distribuita e ai gateway GPS abilitati, la rete è in grado di localizzare la posizione dei nodi, anche quando sono mobili."

In [22] viene spiegata la struttura dei protocolli nei dispositivi finali e nei gateway:

"I nodi dei dispositivi finali contengono una singola coppia MAC/PHY, mentre i gateway sono costituiti da una coppia MAC/PHY per ogni fattore di diffusione supportato. Ad esempio un gateway che supporta multi-SF (cioè, in grado di ricevere tutti i LoRa SF contemporaneamente) su sei canali contiene 36 coppie MAC/PHY."

I nodi finali di una rete LoRa devono adattarsi a diverse esigenze per soddisfare i requisiti delle varie applicazioni IoT. Il protocollo LoRaWAN supporta tre classi di nodi finali.

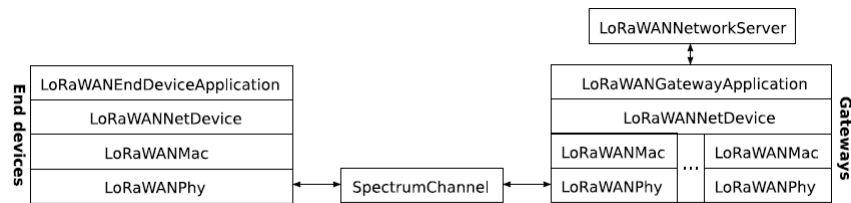


Figura 2.4: Dispositivi di classe A, gateway e NS (server di rete)
Lo schema è tratto dall'articolo [22].

Classe A – finali bidirezionali

Il documento [1] descrive la comunicazione dei nodi di Classe A:

”I nodi finali Classe A LoRaWAN permettono la comunicazione bidirezionale.”

L'articolo [14] illustra le finestre di ricezione:

”La trasmissione del collegamento verso upstream di ciascun dispositivo finale è seguita da due, brevi finestre di ricezione downlink, in ingresso al nodo.”

Nello stesso articolo viene definita la trasmissione del dispositivo di Classe A:

”Lo slot di trasmissione pianificato dal dispositivo finale si basa sulle proprie esigenze di comunicazione con una piccola variazione basata su un tempo casuale (tipo di protocollo ALOHA). Questa operazione di classe A è il più basso sistema di dispositivo di alimentazione finale per applicazioni che richiedono solo comunicazioni di downlink dal server poco dopo che il dispositivo finale ha inviato una trasmissione di uplink. Le comunicazioni in downlink dal server vengono accodate automaticamente fino al successivo uplink pianificato.”

In [1] viene spiegato perché i sensori di Classe A hanno un consumo più basso:

”I sensori Classe A sono i nodi finali LoRa caratterizzati dal più basso utilizzo di potenza in quanto consentono la ricezione di messaggi server-nodo soltanto subito dopo l'invio del segnale nodo-server. Qualsiasi altra comunicazione dal server al nodo avverrà al successivo scambio programmato.”

Nel documento [22] è spiegato lo stato del dispositivo di Classe A:

”I dispositivi terminali di classe A sono irraggiungibili per la maggior parte del tempo, le possibilità di invio al dispositivo sono scarse. Secondo lo standard, i dispositivi terminali di classe A sono obbligati ad aprire una o due finestre di ricezione dopo ciascuna trasmissione a upstream per consentire al Network Server di inviare un messaggio potenziale al dispositivo finale.”

Nello stesso documento viene spiegata come avviene la ricezione del dispositivo di Classe A:

”Quando un dispositivo terminale riceve una trasmissione downlink nella prima finestra, viene liberato dall’apertura della seconda finestra. Altrimenti, dovrebbe aprire la seconda finestra. Si noti che un dispositivo terminale ascolta sullo stesso canale l’ultima trasmissione upstream nella prima finestra di ricezione (a meno che $RX1DROffset$ non differisca da zero), mentre ascolta su un canale separato la seconda finestra. Inoltre, una classe A deve mettersi in attesa di trasmissioni upstream fino alla chiusura delle finestre di ricezione. Infine, sia i messaggi upstream che downstream possono essere inviati come messaggi confermati o non confermati.”

L’articolo [22] illustra lo schema di ritrasmissione:

”I messaggi confermati vengono inviati utilizzando uno schema di ritrasmissione semplice a discrezione del dispositivo finale, senza violare le restrizioni del ciclo di lavoro. Le (ri)trasmissioni a downstream devono attendere una finestra di ricezione aperta e il loro timing è quindi controllato dal tempo di traffico a upstream di un dispositivo finale. Tuttavia, l’NS può impostare un bit di frame in sospeso in un messaggio downstream per segnalare a un dispositivo finale che potrebbe voler aprire una finestra di ricezione prima del normale.”

Classe B – finali bidirezionali con finestre di ricezione programmate

Il documento [1] descrive le funzionalità dei dispositivi di Classe B:

”I dispositivi di Classe B LoRa forniscono le funzionalità dei classe A con l’aggiunta della possibilità di programmare intervalli di ricezione di informazioni in orari prestabiliti.”

L’articolo [14] spiega come avviene l’apertura della finestra di ricezione:

”Per consentire al dispositivo finale di aprire la finestra di ricezione all’ora pianificata, esso riceve un segnale di sincronizzazione dal gateway. Ciò consente al server di sapere quando il dispositivo terminale è in ascolto.”

Classe C – finali bidirezionali con massimo numero di slot in ingresso

Il documento [1] descrive le funzionalità dei dispositivi di Classe C:

”I sensori Classe C LoRa permettono di avere il massimo livello di trasmissione server-nodo, ovvero, hanno finestre di ricezione quasi continuamente aperte, chiuse solo durante la trasmissione. La ricezione viene inibita solo nel momento in cui il nodo sta inviando informazioni verso la rete. Questa caratteristica rende i finali di Classe C particolarmente adatti alle reti LoRa caratterizzate da flussi di dati server-nodo superiori a quelli nodo-server.”

LoRaWAN PHY Layer

Il documento [22] presenta come è implementato LoRaWAN PHY Layer:

"La classe LoRaWANPhy è stata costruita sul concetto Spectrum-Phy. La maggior parte dei modelli PHY impiegano un approccio basato sul segnale a un rapporto di rumore di interferenza (SINR) per modellare l'influenza della perdita di propagazione e interferenze intra-tecnologiche durante la ricezione di pacchetti. Ogni volta che il SINR cambia durante la ricezione dei pacchetti (ad esempio, una trasmissione interferente inizia o termina), viene avviato un nuovo blocco e il tasso di errore del blocco precedentemente ricevuto viene valutato in base al SINR costante e alla lunghezza di bit di questo blocco e al BER come fornito dal modello di errore."

Nello stesso testo viene spiegato come si filtrano i pacchetti in ricezione:

"Si noti che LoRaWANPhy avvia solo la ricezione di pacchetti per le trasmissioni con un valore SINR al di sopra del valore di interruzione SNR. Le trasmissioni entranti che cadono sotto il valore di cut-off vengono immediatamente eliminate dal PHY."

L'articolo continua esponendo come si comporta il protocollo in ricezione:

"Oltre alla modellazione di ricezione, la classe LoRaWANPhy implementa anche una macchina a stati finiti per strutturare il suo flusso di esecuzione."

La macchina a stati finiti (FSM) ha sei stati come mostrato in Figura 2.5. L'FSM funziona in questo modo:

"Le transizioni tra stati sono principalmente attivate dallo strato MAC (non mostrato nella figura). Negli stati RX_ON e TX_ON, il PHY è pronto ad avviare una ricezione o trasmissione di pacchetti. Nello stato BUSY_RX, il PHY è impegnato a ricevere una trasmissione (come per la suddetta ricezione a chunk, suddivisione del pacchetto in parti da 256 KB). Nello stato BUSY_TX, il PHY sta inviando una trasmissione. Le ricezioni e le trasmissioni in corso possono essere annullate in qualsiasi momento, come indicato dalle transizioni di stato a TRX_OFF. Si prevede che i PHY dei dispositivi di classe A rimangano per lo più in stato di inattività, mentre i PHY dei gateway dovrebbero essere nello stato RX_ON per la maggior parte del tempo."

Non ci sono differenze nelle classi PHY tra dispositivi e gateway di classe A. Pertanto, le differenze nella progettazione del ricetrasmittitore tra dispositivi terminali e gateway non sono state prese in considerazione per la costruzione di questo modello.

LoRaWAN MAC Layer

Nell'articolo [22] è presentata l'implementazione di LoRaWAN MAC Layer:

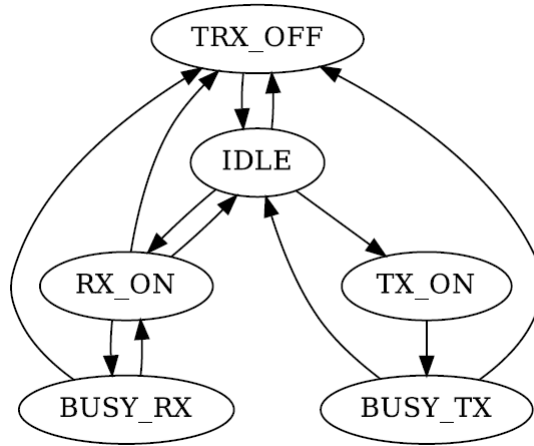


Figura 2.5: Macchina a stati finiti della classe LoRaWANPhy
Immagine tratta dall'articolo [22].

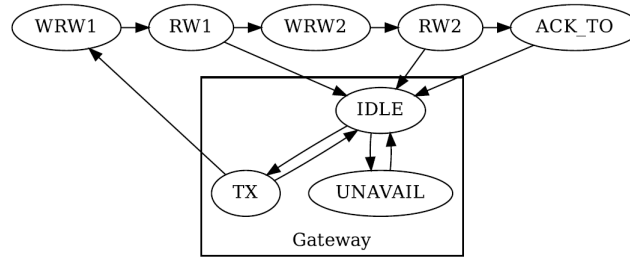


Figura 2.6: Macchina a stati finiti della classe LoRaWANMac
Immagine tratta dall'articolo [22].

"Il driver del livello PHY è la classe LoRaWANMac. La sua funzionalità include i pacchetti di accodamento per la consegna, l'apertura delle finestre di ricezione e la gestione delle ritrasmissioni sui dispositivi finali e la traccia dell'RDC di un nodo. Mentre esiste una classe LoRaWANMac per entrambi i dispositivi e gateway di classe A, la funzionalità di questa classe è diversa, ad esempio le ritrasmissioni per gateway sono gestite dall'NS. Allo stesso modo, il gateway MAC non ha il concetto di ricevere finestre poiché ascolta sempre il traffico upstream (quando non trasmette)."

Analogamente a LoRaWANPhy, la classe LoRaWANMac implementa anche un FSM come illustrato nella figura 2.6.

Mentre il livello MAC del dispositivo finale passa attraverso tutti gli stati, il livello MAC del gateway sono limitati a tre stati:

"Lo stato UNAVAIL è un caso esclusivo dei gateway, in cui il MAC è bloccato dall'invio di un pacchetto. Questo stato viene attivato

quando uno degli altri MAC sul gateway si trova nello stato TX, impedendo in tal modo le trasmissioni simultanee su diversi oggetti MAC sullo stesso gateway.”

La catena nella parte superiore della figura 2.6 è correlata alle finestre di ricezione obbligatorie per i dispositivi finali classe A nelle reti LoRaWAN.

”Dopo lo stato TX, un dispositivo terminale passa sempre allo stato WRW1. Il dispositivo finale spende un secondo (a partire dalla fine della trasmissione) in questo stato ”wait for RW1”, dopo di che apre RW1. Il dispositivo finale controlla se un preambolo PHY è stato ricevuto il simbolo LoRa 12.25 dopo l’inizio della finestra di ricezione. Se è stato rilevato un preambolo, il dispositivo continua a ricevere la trasmissione a downstream. Se non è stato rilevato un preambolo, chiude la finestra di ricezione e passa allo stato WRW2. Se il dispositivo finale riceve correttamente una trasmissione downstream in RW1, passa allo stato IDLE. Altrimenti, chiude la finestra di ricezione e passa allo stato WRW2. Nello stato WRW2, il dispositivo terminale è in attesa di aprire la seconda finestra di ricezione (nello stato RW2) dopo 2 secondi dopo la fine della trasmissione. Lo stesso controllo del preambolo PHY da RW1 viene eseguito dopo l’apertura di RW2. Se viene ricevuta una trasmissione a downstream in RW2, il dispositivo terminale passerà allo stato IDLE. In caso contrario, potrebbe passare allo stato ACK_TO (acknowledgement timeout) in cui trascorre un intervallo di tempo casuale prima di passare allo stato IDLE. Lo stato ACK_TO viene visitato solo quando il dispositivo finale prevede un riconoscimento in una delle sue finestre di ricezione (ad esempio, dopo la trasmissione di un messaggio upstream confermato). Nel caso in cui non sia previsto un riscontro, il dispositivo passa direttamente allo stato IDLE da RW2.”

Le ritrasmissioni nel caso di dispositivi finali sono gestite interamente dalla classe LoRaWANMac. Secondo [22] sono gestite in questo modo:

”Se il numero di trasmissioni rimanenti non è scaduto o non è stato ricevuto un frame downstream con il bit Ack impostato, un pacchetto di dati confermato rimarrà nella coda di trasmissione. Il numero di trasmissioni per i messaggi confermati può essere impostato tramite ”DEFAULT_NUMBER_US_TRANSMISSIONS” (in lorawan.h) ed è impostato su quattro per impostazione predefinita. Le (ri)trasmissioni successive vengono limitate in base alle limitazioni RDC della sottobanda attiva. A tal fine c’è un oggetto Singleton per nodo LoRaWAN, LoRaWANMacRDC, che tiene traccia del duty cycle di un nodo per le diverse sottobande. La classe LoRaWANMAC supporta anche l’invio di messaggi upstream non confermati più di una volta, come da linee guida nello standard LoRaWAN sul campo Numero di ripetizioni (NbRep). Questi messaggi rispediscono le limitazioni del ciclo di lavoro come qualsiasi altra normale trasmissione. Infine, la classe LoRaWANMac aggiunge 1B LoRaWANMacHeader (che codifica il tipo di messaggio) e un 4B dummy MIC al payload MAC prima di passare il pacchetto al PHY.”

Il MIC è un codice di integrità del messaggio che viene calcolato per l'intero frame e viene aggiunto alla fine del frame come da specifica del pacchetto.

Dati non confermati e confermati in upstream

La rete LoRaWAN a singolo Gateway considera nel PDR l'impatto dell'invio di dati in upstream come i messaggi MAC confermati. Ci si aspetterebbe che lo schema di ritrasmissione LoRaWAN aumenti il PDR, in quanto i messaggi non riconosciuti vengono ritrasmessi dal dispositivo finale. Infatti secondo [22]:

"Nel caso di messaggi confermati, un dispositivo terminale tenta quattro trasmissioni prima di rilasciare il messaggio. In ogni momento, i dispositivi terminali rispettano le restrizioni del ciclo di lavoro. Il PDR diminuisce quando i dati vengono inviati con maggiore frequenza e con l'aumento del numero di dispositivi finali."

In caso di messaggi MAC non confermati, la causa principale dei pacchetti non consegnati è dovuta a collisioni in cui il gateway è impegnato a ricevere una trasmissione e quindi qualsiasi altra trasmissione con la stessa velocità dati viene eliminata durante la ricezione in corso. In [22] sono stati misurati i tassi di perdita di pacchetti in base alla causa:

"Per il periodo di dati di 600 secondi, la quota di pacchetti non consegnati e scartati dovuta a collisioni è vicina al 90%. Un altro 9% dei pacchetti non consegnati viene scartato a causa di interferenze durante la ricezione. Il resto dei pacchetti non consegnati viene eliminato a causa di un valore SINR che scende al di sotto del punto di interruzione SNR."

La scelta di inviare i messaggi non confermati quattro volte aumenta il PDR per gli scenari a basso traffico, e risulta che:

"Il PDR è inferiore negli scenari in cui l'interferenza diventa il fattore limitante. Si noti che la percentuale di velocità di trasmissione più lenta nei pacchetti non consegnati è superiore a quella delle velocità di trasmissione più veloci."

Il fenomeno appena descritto è dovuto ad un maggior numero di dispositivi finali con velocità di trasmissione dati più basse. Inoltre [22] spiega che al contrario di quello che ci si potrebbe aspettare:

"Il PDR dei messaggi confermati non è sempre superiore a quello dei messaggi non confermati. Il PDR dei messaggi CON (confirmed) è solo superiore a quello di UNC (unconfirmed) nei casi in cui il carico del traffico è molto basso. Nelle simulazioni questo è solo il caso per 100, 500 e 1000 dispositivi terminali per un periodo di dati di 60'000 s e per 100 dispositivi terminali per un periodo di dati di 6000 s. In tutti gli altri casi il PDR dei messaggi confermati è inferiore."

Bisogna sempre tenere presente che un messaggio confermato viene considerato consegnato solo se il dispositivo finale riceve un riconoscimento per quel messaggio. Di conseguenza:

"Il numero di finestre di ricezione perse (per l'invio di una conferma) aumenta con l'aumentare del carico di traffico. Le finestre di ricezione vengono perse perché il gateway non è in grado di trasmettere all'inizio di una finestra di ricezione a causa delle restrizioni del ciclo di lavoro che si applicano nella sottobanda di una finestra di ricezione. Mentre CON (confirmed) e 4UNC (4 unconfirmed) hanno carichi di traffico simili per reti saturate, il PDR dei messaggi CON è inferiore a quello di 4UNC."

Questa differenza è spiegata dalle mancate conferme in downstream per i messaggi CON.

"Infine, quando un gateway invia una conferma in RW1 o RW2, tutte le ricezioni in corso sul gateway vengono interrotte."

Questa azione diminuisce ulteriormente il PDR. Per risolvere questo problema in [22] hanno introdotto più gateway nella stessa rete invece di utilizzarne uno solo come nelle reti standard:

"Le reti multigateway LoRaWAN grazie all'utilizzo di un maggior numero di gateway ottiene un miglioramento sul PDR. Si noti che per l'applicazione della strategia di allocazione SF PER 0,01, il PER al gateway più vicino viene calcolato per ogni dispositivo finale."

L'aumento della densità del gateway ha prodotto più di un effetto positivo:

"In primo luogo, consente velocità di trasmissione dati più elevate per i dispositivi finali a causa di un aumento del budget di collegamento (poiché i gateway medi appariranno più vicini). In secondo luogo, poiché le trasmissioni downstream in RW1 vengono inviate con la stessa velocità dati delle trasmissioni upstream, i riconoscimenti RW1 beneficiano delle maggiori velocità dati dei dispositivi finali. Infine, poiché le restrizioni del ciclo di lavoro si applicano per gateway, la rete LoRaWAN riconosce più messaggi man mano che la densità del gateway aumenta."

Il testo [22] continua facendo notare che:

"Per i messaggi non confermati, il PDR aumenta notevolmente all'aumentare del numero di gateway. Per i messaggi confermati, l'aumento del PDR è notevole ma non è così acuto come per i messaggi non confermati. Il numero di conferme inviate aumenta con l'aumentare del numero di gateway."

La relazione apparentemente contraddittoria tra il numero di RW persi e il numero di gateway è spiegata dal documento [22] come di seguito:

"Nelle reti LoRaWAN saturate (ad esempio, scenari con PDR bassi per messaggi non confermati), il numero di messaggi inviati ricevuti con successo aumenta con la densità del gateway. In caso di messaggi confermati, il numero più alto di messaggi upstream ricevuti indica che NS è in grado di identificare un numero maggiore di finestre di ricezione dei dispositivi finali (poiché gli RW vengono sempre

aperti dopo una trasmissione di un dispositivo finale). Quando i gateway non sono in grado di inviare queste finestre di ricezione (a causa delle restrizioni del ciclo di lavoro), il numero di RW persi aumenta. In scenari meno saturi, il numero di RW persi diminuisce all'aumentare della densità del gateway non porta a identificare più finestre di ricezione. Invece, il numero di RW persi diminuisce e vengono inviati più riconoscimenti, a vantaggio del PDR.”

I risultati dell'esperimento [22] mostrano che i messaggi confermati hanno un impatto negativo e grave sui rapporti di consegna dei pacchetti dei messaggi in upstream. La scelta di aumentare il numero di gateway ha aiutato ad alleviare questo problema ma non a risolverlo. Infatti secondo l'autore:

”I risultati dell'intervallo di dati scambiati in 600 secondi mostrano che il PDR rimane basso anche in una rete di quattro gateway.”

L'impatto dei messaggi di dati trasmessi in downstream sui messaggi in upstream è risultato trascurabile a causa della scarsità del carico di traffico di dati in downstream (sporadiche notifiche). L'articolo [22] afferma che:

”È stata trovata una piccola differenza tra l'invio di dati downstream come messaggi non confermati rispetto ai messaggi confermati in termini di downstream PDR. L'approccio di mondializzazione di tutte le interferenze come rumore ha i suoi svantaggi.”

La letteratura ha dimostrato che l'interferenza tra diversi fattori di diffusione può essere modellata accuratamente come rumore, mentre l'interferenza del cofattore di diffusione può essere modellata in modo più accurato tramite un approccio stocastico. Infine, se a causa delle limitazioni RDC (anziché della bassa qualità del collegamento) i messaggi di dati downstream non vengono recapitati correttamente si può aumentare la velocità di trasmissione dati. Così facendo aumenta la capacità della rete LoRaWAN.

2.3.4 Protocollo IP

Secondo l'articolo [9] LoRaWAN è incapsulata da IP:

”LoRa una rete è IP-based compatibile con IPv6, una caratteristica essenziale per ogni sviluppo di nuovi progetti IoT. Una rete LoRa comprende dei gateway per la connessione al server centrale di rete. Gli end-point comunicano con una topologia di rete a stella mediante un collegamento wireless single-hop ai gateway con la possibilità di collegarsi a più gateway, per garantire la ridondanza del collegamento. Per coprire una grande area è sufficiente un'infrastruttura leggera.”

L'articolo [12] riassume rapidamente un'architettura e la connessione ad Internet:

”L'architettura di una rete LoRa prevede una tipologia a stella in cui il Gateway è un bridge trasparente per i messaggi tra Devices e il Network Server. I Gateway sono connessi al Network server tramite una connessione basata su lo standard IP, mentre i Device

utilizzando una comunicazione wireless single-hop verso uno o più Gateway. La comunicazione verso i Device è in generale bidirezionale, ma può anche supportare il muticast per gestire l'aggiornamento o la distribuzione massiva di messaggi per ridurre i tempi di comunicazione.”

Nel testo [11] viene descritto il centro stella di una rete LoRa:

”Il cuore di ogni concentratore LoRa è un demodulatore LoRa multi-canale in grado di decodificare tutte le varianti di modulazione LoRa per diverse frequenze in parallelo. Un demodulatore LoRa standard per dispositivo terminale può decodificare un solo tipo di modulazione per frequenza. Attualmente, il demodulatore LoRa ampiamente utilizzato è SX1301 di Semtech. Questo chip è integrato in tutti i gateway LoRa.”

Lo stesso documento tratta le differenze tra i vari gateway in commercio:

”A causa del crescente numero di produttori di gateway, sta diventando difficile individuare le differenze tra i gateway. Per un operatore di rete su larga scala, i principali fattori di distinzione dovrebbero essere le prestazioni radio (sensibilità e potenza di invio), la connessione del chip SX1301 all'MCU gateway e la distribuzione del segnale PPS. SX1301 collegato su un bridge da USB a SPI ha una latenza più lunga sull'MCU rispetto a un SX1301 direttamente collegato al bus SPI dell'MCU. Attualmente, l'unico SPI collegato SX1301 si trova nella stazione IoT Kerlink, tutti gli altri gateway utilizzano ponti USB-to-SPI FTDI (o simili).”

Pertanto in [11] viene esposto come sincronizzare la popolazione di gateway:

”La disponibilità del segnale PPS (Pulse Per Second) consente una sincronizzazione temporale precisa sull'intera popolazione di gateway in una rete. È un attivatore chiave per i beacon a livello di rete, che può essere utilizzato per la sincronizzazione dell'ora da parte dei dispositivi finali. La distribuzione PPS è attualmente supportata solo dalla stazione IoT Kerlink, dalla scheda di riferimento SX1301 e dall'IMST iC880A.”

2.3.5 Applicazioni LoRa

L'articolo [9] introduce l'aspetto della **sicurezza** nelle reti LoRa:

”Un aspetto di notevole importanza per le applicazioni IoT è la crittazione di sicurezza incorporata nelle reti LoRa, che consente ai livelli applicazione di offrire una struttura di protezione dei dati personali o delle funzioni critiche dagli attacchi fisici o informatici.”

Le reti LoRa richiedono elevati livelli di sicurezza. Il testo [1] elenca le **crittografie** utilizzate da LoRa:

”Il raggiungimento dei necessari standard di sicurezza per le reti LoRa viene ottenuto impiegando diversi livelli di crittografia:

1. chiave univoca di rete (EUI64) che garantisce la sicurezza a livello di rete;
2. chiave unica di applicazione (EUI64) per garantire la sicurezza end-to-end a livello di applicazione;
3. chiave specifica del nodo finale (EUI128). L'impiego di questi livelli di crittografia assicura che la rete LoRa rimanga sicura lungo tutto il percorso, dal nodo fino all'applicazione."

Secondo [11] esistono due gruppi di **domini** crittografici in LoRa:

"Il dominio di rete e il dominio dell'applicazione. Il dominio di rete è responsabile dell'autenticazione dei dati del nodo finale. La paternità di tali dati è verificata tramite una chiave segreta AES128 condivisa tra il dispositivo e il server di rete. Il dominio dell'applicazione è responsabile della garanzia e della riservatezza dei dati del dispositivo. Esiste una chiave segreta AES128 condivisa tra l'applicazione utente e il nodo finale. LoRa è la soluzione più sicura disponibile sul mercato con crittografia 128AES su più livelli per tutti i dati dal sensore al server delle applicazioni e viceversa."

Nelle sotto sezioni sono presentati alcuni esempi di applicazioni installate sulle entità che compongono la rete LoRa.

Applicazione LoRaWAN del dispositivo finale

Nel testo [22] viene descritta un'applicazione chiamata LoRaWANEndDeviceApplication che rappresenta una qualsiasi applicazione installata sui dispositivi finali di classe A LoRaWAN:

"L'applicazione espone gli attributi per parametri come la velocità dei dati del dispositivo finale, la lunghezza del pacchetto e il tipo di messaggio delle trasmissioni upstream. Supporta anche variabili casuali configurabili per la selezione del canale upstream e per i tempi di generazione del pacchetto. L'applicazione è responsabile della generazione del payload MAC, in quanto tale aggiunge l'intestazione del frame LoRaWAN al payload dell'applicazione. Questa intestazione del frame codifica l'indirizzo del dispositivo finale, il contatore dei pacchetti e la porta del frame dell'applicazione. I metadati relativi alla trasmissione dei pacchetti, come il canale desiderato, la velocità dei dati e la velocità del codice, vengono trasmessi al PHY tramite un tag del pacchetto LoRaWANPhyParamsTag."

Applicazione LoRaWAN Gateway

Nel documento [22] viene descritta un'applicazione chiamata LoRaWANGatewayApplication che rappresenta una qualsiasi applicazione installata sui nodi gateway:

"L'applicazione, oltre a passare pacchetti e accettare pacchetti dal NS, supporta anche l'interrogazione dello stato RDC di un gateway dal NS. I pacchetti che devono essere inviati a downstream sono etichettati con il tag del pacchetto LoRaWANPhyParamsTag dal NS."

LoRaWANNetDevice sul gateway selezionerà la coppia MAC/PHY corrispondente agli attributi PHY che sono elencati nel tag del pacchetto (cioè, Spread Factor e canale)."

Applicazione LoRaWAN Network Server

Nell'articolo [22] viene descritta un'applicazione chiamata LoRaWANNetwork-Server che rappresenta una qualsiasi applicazione installata su un server:

"Questo oggetto singleton accetta i pacchetti upstream dai gateway e invia il traffico downstream ai dispositivi finali tramite gateway. Espone i seguenti attributi per configurare la generazione del traffico downstream:

- 1. dimensione del pacchetto;*
- 2. messaggi confermati o non confermati;*
- 3. variabile casuale per la generazione di pacchetti.*

La classe tiene traccia delle informazioni come l'indirizzo del dispositivo, i contatori dei pacchetti, l'ultima velocità dati, l'ultimo gateway (i) noto e l'ultimo tempo visto per ogni dispositivo finale. Basato sui contatori di pacchetti, è in grado di rilevare pacchetti di dati duplicati da più gateway. L'NS genera dati e riconoscimenti a downstream. A tal fine, contiene una coda di pacchetti per la memorizzazione del traffico downstream. Per ogni dispositivo finale, memorizza i timer RW1 e RW2 utilizzati per la pianificazione del traffico downstream. Quando un timer scade, l'NS passa attraverso l'elenco degli ultimi gateway noti e cerca un gateway che possa inviare immediatamente il pacchetto downstream in coda. Questi timer sono programmati ogni volta che una trasmissione upstream viene elaborata dal NS. Infine, l'NS si occupa delle ritrasmissioni per i pacchetti di dati a downstream confermati."

Adaptive Data Rate

La capacità di controllare i parametri di trasmissione, inclusi lo schema di modulazione e la potenza di uscita, consente di ridurre i costi di implementazione, migliorare l'affidabilità della rete in termini di prestazioni degli errori in condizioni sub-ottimali. Potrebbe contribuire alla riduzione della complessità della manutenzione rispetto al ridimensionamento il network. Per fare tutto questo il testo [24] propone l'**algoritmo ADR**:

"L'algoritmo ADR (Adaptive Data Rate), ampiamente accettato utilizzato nelle attuali infrastrutture di rete basate su LoRaWAN, è un meccanismo per ottimizzare la velocità di trasmissione dati, tempo di trasmissione e consumo energetico nella rete."

I parametri di trasmissione wireless negli spettri non licenziati sono regolati a livello regionale con aggiunte occasionali da parte dei regolatori del paese. Normalmente i regolamenti includono la definizione di potenza massima irradiata efficace (ERP, effective radiated power), duty-cycle, e metodi di accesso medio. Il documento [24] spiega l'influenza di ALOHA in LoRa:

"Sebbene più trasmissioni LoRa emesse simultaneamente possano essere elaborate da un singolo gateway sfruttando l'ortogonalità dei fattori di diffusione oltre all'uso di più sotto-bande di trasmissione, la natura dell'accesso ALOHA al mezzo porta inevitabilmente alla presenza di collisioni di trasmissione."

L'articolo continua spiegando l'influenza di alcuni parametri nelle collisioni:

"La dipendenza esponenziale del TOA su SF introduce un limite superiore esponenziale alle prestazioni della rete. Il throughput della rete è legato in alto o dalla velocità di collisione (DR inferiore, TOA più breve) o dalla limitazione del ciclo di lavoro (DR più alto, TOA più lungo)."

In [24] vengono illustrati gli aspetti che rendono ADR interessante:

"I sistemi che contengono nodi finali, i cui parametri di trasmissione sono costanti rispetto al tempo, sono particolarmente interessanti. Uno schema di trasmissione dinamica può essere implementato con ADR e aggiungendo ulteriori gateway. Gli operatori di rete implementano ADR perché è un modo efficiente per ottimizzare la capacità delle reti."

In [13] viene mostrato l'utilizzo di ADR:

"In una rete LoRa solo i nodi statici dovrebbero utilizzare ADR. L'ADR può anche essere utilizzato da un nodo mobile che è in grado di rilevare quando resta su un punto fisso. I nodi decidono se utilizzare o meno l'ADR, non l'applicazione o la rete. Dal momento in cui un nodo indica che desidera utilizzare ADR, la rete raccoglierà le metriche delle 20 trasmissioni più recenti dal nodo."

Questa cronologia contiene il contatore di frame, il rapporto segnale-rumore (SNR, signal-to-noise ratio) e il numero di gateway che hanno ricevuto ciascuna trasmissione. Nello stesso articolo viene descritta l'utilità di questi parametri:

"In questo modo la rete può calcolare quanto margine c'è per aumentare la velocità dei dati o ridurre la potenza di trasmissione. Ad esempio, quando la rete riceve un messaggio con velocità dati = SF12BW125 e SNR = 5.0, tale messaggio ha un margine di 25 dB. Questo è uno spreco di tempo di trasmissione ed energia. Se aumentassimo la velocità di trasmissione dati a SF7BW125 avremmo ancora un margine di 12,5 dB, ma ciò sarebbe più efficiente in termini di tempo ed energia. Potremmo persino abbassare la potenza di trasmissione per risparmiare ancora più energia e causare meno interferenze."

Lo schema in figura 2.7 delinea il flusso ADR implementato nel NetworkServer di The Things Network.

La procedura di LoRaWAN descritta in [24] applica ADR per ottenere una velocità di trasmissione dati ottimale del dispositivo finale che è illustrata di seguito:

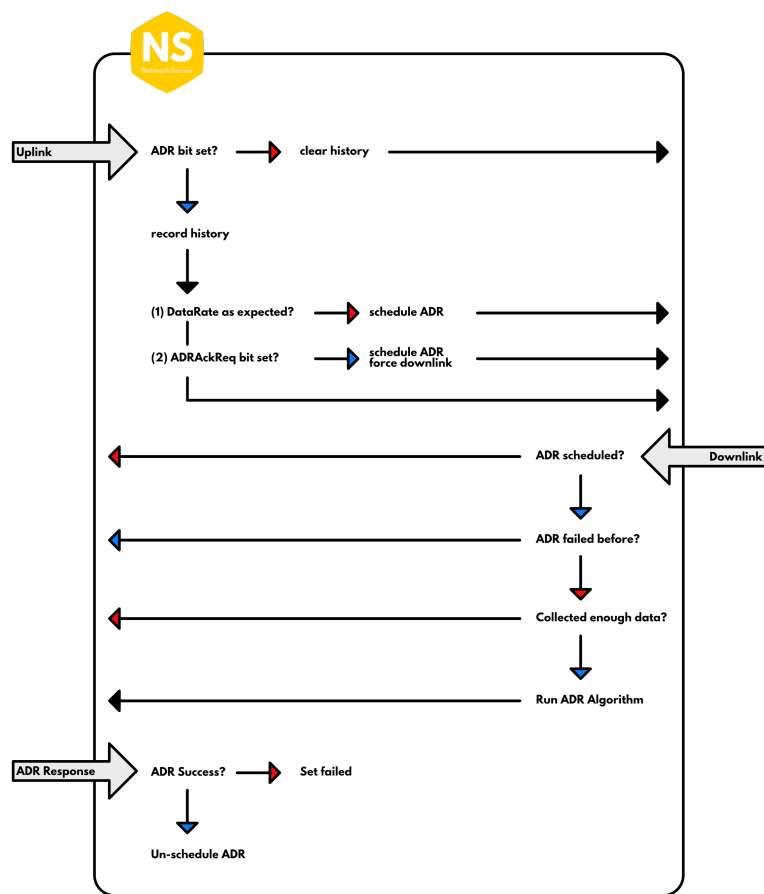


Figura 2.7: Schema del flusso ADR.
Immagine tratta dall'articolo [13].

"Inizialmente, il dispositivo terminale deve richiedere l'adattamento della velocità di trasmissione dati da NM (Network Manager) impostando il bit ADR in un'intestazione di messaggio uplink. Successivamente il dispositivo terminale regola il suo DR, il livello di potenza di trasmissione, la frequenza di ripetizione dei frame non confermati e l'insieme dei canali di uplink consentiti in base ai comandi MAC LinkADRReq ricevuti. Il dispositivo finale conferma ogni parte della configurazione richiesta su NM in un comando MAC LinkADRAAns."

Dato che l'impostazione molto ottimista del DR può rendere irraggiungibile il dispositivo end-end, la specifica LoRaWAN definisce una procedura di salvaguardia:

"Se un dispositivo terminale non riceve alcun downlink all'interno di ADR_ACK_LIMIT uplink e il DR corrente è maggiore del DR minimo, tutti gli uplink successivi vengono inviati con il set di bit di riconoscimento ADR (ADRACKReq) impostato. Se il dispositivo finale non riceve alcun downlink entro i successivi uplink ADR_ACK_DELAY, il dispositivo terminale potrebbe provare a riguadagnare la connettività passando al successivo DR inferiore fornendo un intervallo esteso. Successivamente, ogni volta che viene raggiunto ADR_ACK_DELAY, il dispositivo terminale riduce il DR di un gradino. L'end device utilizza un contatore interno ADR_ACK_CNT che viene ripristinato alla ricezione di ogni messaggio di downlink."

2.4 Analisi limiti LoRaWAN

La crescita della tecnologia LoRaWAN nei prossimi anni dipende da diversi fattori. Il mercato IoT mobile richiede che la tecnologia LoRaWAN installata sui dispositivi finali in movimento sia stabile. L'aumento dei nodi finali per le reti LoRaWAN esige una maggiore copertura del segnale ed è necessario mantenere limitato il tasso di collisione dei pacchetti. Lo sviluppo della tecnologia LoRaWAN comporta la coesistenza di un gran numero di dispositivi sulla stessa banda. Il progresso di LoRaWAN richiede la definizione di leggi per il settore pubblico.

2.4.1 Mobilità LoRa

Lo studio sperimentale descritto in [33] è stato condotto per valutare la tecnologia LPWAN in ambienti mobili, interni ed esterni, il nodo finale non era statico in un punto fisso. I risultati mostrano che le prestazioni di LPWAN sono sensibili alla minima mobilità di un gesto umano in ambiente interno. L'effetto della mobilità aumenta significativamente con l'aumentare della distanza dal gateway. Sono stati analizzati i risultati di esperimenti per valutare la mobilità della tecnologia LoRa, su persone e veicoli. L'impostazione delle prove riportate in [33] sono descritte di seguito:

"Gli esperimenti sono stati condotti in ambiente interno (al terzo piano di un edificio) ed esterno, in entrambi i casi il gateway era

posizionato a 1,5 m da terra. Una persona in possesso di un nodo finale si è spostata continuamente all'interno di un edificio a una normale velocità di camminata da un'estremità all'altra del corridoio per un periodo di 20 minuti per ciascuna misurazione. Il gateway è stato installato nel centro della stanza. Il veicolo con un nodo finale sul tettuccio è stato utilizzato per testare l'elevata mobilità in un ambiente esterno. Un parcheggio vuoto è stato sfruttato come pista di prova circolare per permettere al veicolo di mantenere una velocità costante tramite il suo sistema di controllo automatico della velocità. Il veicolo ha viaggiato continuamente sulla pista di prova circolare con velocità variabile da 5 mph a 15 mph per 20 minuti per ciascuna misurazione. Il gateway è stato posto a distanze variabili dal centro della pista di prova, {0.1, 0.3, 0.5} miglia ({0.16, 0.48, 0.8} Km)."

L'esperimento è servito per valutare il ritardo end-to-end e i tassi di perdita di pacchetti. Il ritardo end-to-end si riferisce al tempo trascorso dal punto in cui un pacchetto viene trasmesso al momento in cui il pacchetto di riconoscimento non viene ricevuto dal gateway. Le due metriche di prestazione sono misurate variando i seguenti parametri: velocità del veicolo (per esperimenti all'aperto), dimensione del pacchetto e distanza dal gateway. Si ricorda che un pacchetto deve avere una dimensione massima per evitare che si verificano errori nella trasmissione e mantenga una limitata BER (bit error rate). I risultati dell'esperimento sono descritti nelle seguenti sottosezioni in base al parametro messo in discussione.

Impatto delle dimensioni dei pacchetti

L'esperimento descritto in [33] è stato effettuato per studiare l'impatto della mobilità del nodo finale con diverse dimensioni del pacchetto. Lo scopo era capire come la mobilità influenzi le prestazioni di LPWAN e capire quale fosse la correlazione tra la mobilità e le dimensioni del pacchetto. I risultati evidenziano che:

"il ritardo medio end-to-end per i pacchetti trasmessi per 20 minuti è aumentato insieme alle dimensioni del pacchetto (correlazione positiva). Indipendentemente dalle dimensioni del pacchetto, il ritardo medio end-to-end nel caso di mobilità era sempre costantemente maggiore rispetto allo scenario di non mobilità. Il caso di mobilità rispetto al caso di non mobilità, sono stati osservati aumenti del {5,7, 8,9, 13,7}% del ritardo medio end-to-end per le dimensioni del pacchetto di {20, 80, 140} byte. Quando la distanza dal gateway è maggiore, il ritardo medio end-to-end per il caso di mobilità è aumentato significativamente anche per piccole differenze."

Questi risultati suggeriscono che il ritardo end-to-end di LPWAN è influenzato anche dalla piccola mobilità umana e viene marcato quando aumentata la distanza dal gateway. Un'altra osservazione interessante è quella le dimensioni del pacchetto che non hanno contribuito all'effetto della mobilità:

"I tassi di perdita di pacchetti risultano 0% indipendentemente dalla dimensione del pacchetto quando il gateway è posizionato vicino al nodo finale (cioè nell'edificio)."

I casi in cui si verifica un alto tasso di perdita di pacchetti può essere dovuto da un blocco di edifici alti nell'area (ambiente esterno). Nell'esperimento descritto in [30] è stato affermato che:

"Le prestazioni della tecnologia LoRa sono inevitabilmente influenzate dall'ambiente circostante, inclusi edifici, alberi, colline e onde."

Pertanto, questi fattori devono essere presi in considerazione quando si implementano reti LoRaWAN. I parametri della tecnologia LoRa come il fattore di diffusione e la larghezza di banda possono essere modificati automaticamente per migliorare la sensibilità, l'immunità alle interferenze e la copertura quando l'ambiente circostante cambia.

Impatto della distanza, ambiente mobile interno

Come menzionato precedentemente, l'impatto della mobilità in un ambiente interno diventa più significativo quando aumenta la distanza dal gateway. Bisogna valutare la correlazione tra l'impatto della mobilità e la distanza dal gateway. Di seguito vengono riportate le posizioni del gateway per questo esperimento [33]:

"Il gateway per questo studio è stato posizionato all'esterno a 0,1 e 0,3 miglia di distanza dall'edificio. Con la dimensione predefinita del pacchetto di 80 byte, sono stati misurati il ritardo medio end-to-end e i tassi di perdita di pacchetti per entrambi i casi di mobilità e non di mobilità."

I risultati della prova dimostrano:

"Il ritardo medio end-to-end per il gateway posizionato a 0,1 miglia di distanza dall'edificio, è aumentato del 57%. Il ritardo medio end-to-end è ulteriormente aumentato dell'87% con il gateway posizionato a 0,3 miglia. I tassi di perdita di pacchetti sono dello 0% quando il gateway è all'interno dell'edificio. Il tasso di perdita di pacchetti è inferiore al 2% indipendentemente dalla distanza dal gateway per il caso di non mobilità."

Il tasso di perdita dei pacchetti viene significativamente influenzato dalla piccola mobilità umana con l'aumento della distanza tra il gateway e il nodo finale. I tassi di perdita del pacchetto aumentano del 10% e del 20% per il caso di mobilità con distanze di 0,1 miglia e 0,3 miglia, sono aumenti consistenti.

Impatto delle dimensioni del pacchetto, ambiente mobile esterno

La posizione del gateway per questa prova del documento [33] viene descritta di seguito:

"Il gateway per questa prova è stato posizionato a 0,1 miglia dal centro della pista di prova."

I risultati della prova mostrano che:

"Il ritardo medio end-to-end è aumentato proporzionalmente con la velocità del veicolo. Il ritardo end-to-end più piccolo per gli esperimenti all'esterno che per gli esperimenti all'interno indipendentemente dalle dimensioni dei pacchetti."

Questo è dovuto dall'interruzione del segnale per la presenza di ostacoli nell'ambiente interno. Il ritardo medio end-to-end e la perdita di pacchetti variano con la velocità del veicolo e le dimensioni del pacchetto. Tra la mobilità (velocità del veicolo) e il ritardo medio end-to-end esiste una forte correlazione positiva. Di seguito sono esposte le misurazioni dei risultati:

"Il ritardo end-to-end superava i 450 ms, 500 ms e 600 ms quando il veicolo raggiungeva rispettivamente la velocità di 0 mph, 5 mph e 15 mph, ed il gateway era posizionato a 0,1 miglia di distanza dalla pista."

Esiste una forte correlazione positiva tra la velocità del veicolo ed i tassi di perdita del pacchetto. I tassi di perdita del pacchetto aumentano proporzionalmente con la velocità del veicolo. Infatti l'autore del testo [33] afferma:

"Quando il veicolo viaggiava a bassa velocità il tasso di perdita dei pacchetti è subito aumentato rispetto a quello del veicolo fermo."

Non esiste una correlazione tra la dimensione del pacchetto ed i tassi di perdita del pacchetto, ma non si esclude che esista una relazione di altro tipo.

Impatto della distanza, ambiente mobile esterno

Le posizioni del gateway per questa prova dell'articolo [33] sono riportate di seguito:

"Per questa prova il gateway è stato posizionato a 0,3 miglia e 0,5 miglia dal centro della pista di prova."

I risultati della prova sono i seguenti:

"Quando il veicolo è fermo, 0 mph, il tasso di perdita del pacchetto è estremamente basso indipendentemente dalla distanza dal gateway. Non appena il veicolo si mette in moto e raggiunge basse velocità come 5 mph, il tasso di perdita del pacchetto aumenta in modo significativo. Nel momento in cui la velocità del veicolo ha raggiunto 15 mph (miglia orarie, 24 Km/h) il ritardo medio end-to-end è aumentato fino al 4%, 52% e 225% per le distanze di 0,1, 0,3 e 0,5 miglia."

Il ritardo medio end-to-end è aumentato con l'aumento della velocità del veicolo, indipendentemente dalla distanza dal gateway. Il ritardo medio end-to-end è aumentato in modo fortemente positivo con l'aumento della distanza dal gateway. L'autore di [33] afferma che:

"durante la prova in cui il gateway era al centro della pista di prova già si poteva osservare l'effetto della mobilità."

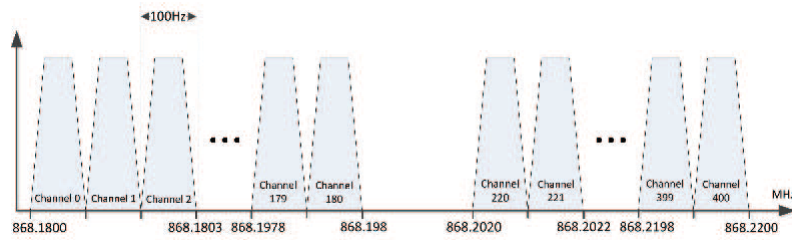


Figura 2.8: I canali definiti 0 - 400 per 100 Hz nel range 868.180 - 868.220 MHz
Immagine tratta dall'articolo [28].

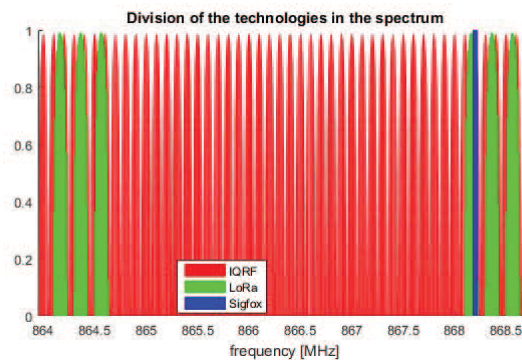


Figura 2.9: Divisione delle tecnologie LoRa e Sigfox nell'intervallo 863,95 - 868,75 MHz
Immagine tratta dall'articolo [28].

L'impatto della mobilità è maggiore in un ambiente interno rispetto all'ambiente esterno, perché l'ambiente interno possiede più ostacoli e più fonti di interferenza che interrompono il segnale. Tra il tasso di perdita dei pacchetti e la velocità del veicolo nell'ambiente esterno esiste una correlazione positiva, aumentando la velocità del veicolo aumenta il tasso di perdita dei pacchetti.

Questo studio sperimentale di quattro prove ha rivelato la relazione tra la mobilità (nodo finale in movimento) e le prestazioni di LPWAN. Le prestazioni LPWAN nel caso di nodi finali in movimento sono negative secondo i risultati. LPWAN è influenzato negativamente dalla mobilità. L'impatto della mobilità aumenta significativamente con l'aumento: della distanza dal gateway, della velocità del veicolo e della posizione del nodo finale in un ambiente interno. In futuro si auspica l'arrivo di protocolli LPWAN per affrontare il problema della mobilità che necessita una soluzione per il mercato dell'IoT mobile.

2.4.2 Copertura di LPWAN nello spettro

Tutte le tecnologie LPWAN condividono e lavorano sulla stessa banda non licenziata. Non è scontato che queste tecnologie possano coesistere tutte contemporaneamente senza sovrapporsi. Bisogna misurare con uno studio pratico le probabilità di collisione e la scalabilità effettiva delle tecnologie. Nel caso in cui la coesistenza fosse possibile (quello che ci si aspetta) bisogna inoltre verificare

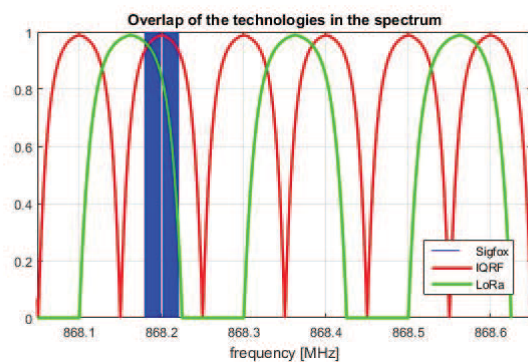


Figura 2.10: Divisione delle tecnologie nella gamma 868.05-868.65 MHz
Immagine tratta dall'articolo [28].

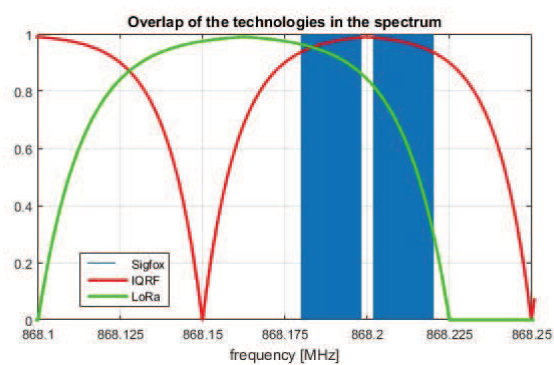


Figura 2.11: Divisione delle tecnologie nell'intervallo 868,1 - 868,25 MHz
Immagine tratta dall'articolo [28].

che al crescere del numero di nodi finali per tecnologia i parametri di coesistenza nello spettro di frequenza restano costanti. L'articolo [28] inizia descrivendo la distribuzione spettrale e i canali delle tecnologie LPWAN e SigFox che sono riportate in figura 2.8. I canali per downlink non vengono visualizzati in figura perché si trovano più in alto dei 869 MHz nello spettro e non si sovrappongono l'uno all'altro. La figura 2.9 mostra solo i canali LoRa predefiniti più importanti per l'invio di messaggi JoinReq per connettersi alla rete.

"LoRa può funzionare sui canali con quasi tutte le frequenze da 863 a 870 MHz. Sigfox copre davvero una piccola parte dello spettro. I canali di Sigfox sono rappresentati nelle figure da una sottile fascia blu. La larghezza di banda di SigFox è sottile perché è di soli 100 Hz."

La figura 2.10 mostra lo stesso spettro di frequenza con maggior dettaglio:

"Questa parte dello spettro intorno a 868 MHz (868.05-868.65 MHz), vede coesistere tutte le tecnologie. LoRa ha 3 canali principali con larghezza di banda di 125 kHz che vengono utilizzati da ogni dispositivo LoRa. Sigfox ha localizzato tutti i canali attorno a 868,2 MHz."

Lo spettro in un intervallo 868.10 - 868.25 MHz è illustrato in figura 2.11. Questa parte dello spettro contiene i canali principali che hanno una grande importanza nel problema di potenziali collisioni e di coesistenza delle tecnologie.

"In questa fascia dello spettro in cui si sovrappongono le tecnologie LPWAN. In questa parte dello spettro, in particolare intorno a 868,2 MHz, ci potrebbe essere qualche problema, perché qui potrebbero verificarsi collisioni accidentali, che potrebbero interferire e interrompere la comunicazione."

Quest'ultimo problema è stato riscontrato anche nell'esperimento [33] durante la verifica della mobilità. L'articolo [28] spiega come può aumentare la probabilità di collisione:

"La probabilità di collisioni è molto più alta in questa fascia dello spettro (868.10 - 868.25) che in tutte le altre. La crescita prevista di dispositivi che utilizzano queste tecnologie aumenta la possibilità di collisioni."

Esistono molte altre tecnologie nel mondo, oltre a LPWAN, che vengono utilizzate per vari scopi ed operano in molte bande di frequenza. Poiché l'intera banda di frequenza è un mezzo limitato e condiviso per tutti, è necessario considerare anche queste tecnologie per una possibile coesistenza con LPWAN.

"Possibili complicazioni possono aumentare, soprattutto nelle tecnologie che sono in conflitto di frequenza con le gamme di LPWAN. Per questo motivo vengono scelte le principali sei tecnologie che operano nelle frequenze simili come Personal Mobile Radio (PMR), trasmissione vocale wireless, reti mobili ecc... Le reti mobili LTE e GSM sono molto popolari e la divisione corretta di 800 o 900 MHz delle bande di frequenza secondo i documenti di definizione sono ben note."

Coprono una grande quantità di frequenze nella banda di 800 MHz ad eccezione degli intervalli di sicurezza delle reti mobili. La prima tecnologia in conflitto nello spettro è utilizzata per i dispositivi di allarme, che utilizzano una comunicazione radio per un'indicazione di allarme che può verificarsi in un luogo lontano. La tecnologia ha specificato un piccolo ciclo di lavoro (duty cycle, ciclo di lavoro o ciclo di lavoro utile, rappresenta la frazione di tempo che un'entità passa in uno stato attivo in proporzione al tempo totale considerato) e un utilizzo molto ridotto dello spettro, che contribuisce a migliorare l'affidabilità. La seconda tecnologia per la trasmissione vocale wireless è definita per un apparecchio acustico, microfoni wireless, altoparlanti, cuffie e dispositivi per l'ascolto. La tecnologia RFID (Radio Frequency Identification) utilizza ricetrasmittenti radio e tag generalmente passivi. La tecnologia RFID è uno strumento per l'identificazione e il monitoraggio degli oggetti e per evitare furti, ecc... Queste due tecnologie non hanno definito il ciclo di lavoro, poiché i dispositivi funzionano nella modalità Listen Before Talk (LBT). Anche queste tecnologie influenzeranno in qualche modo la coesistenza finale nella banda 863-870 MHz utilizzata dalle LPWAN. La barriera più grande potrebbe essere le reti mobili in base alla loro larghezza e al loro carattere, ma non si sovrappongono a LPWAN."

È molto probabile che gli sviluppatori di LPWAN abbiano scelto proprio questa banda a causa dell'assenza delle reti mobili. Le altre tecnologie si sovrappongono già a LPWAN, ma non in modo pericoloso come le reti mobili, perché hanno un diverso carattere. Infatti l'articolo [28] spiega che:

"La tecnologia per dispositivi di allarme non crea un grosso rischio per la coesistenza utilizzando una parte sottile dello spettro e un piccolo ciclo di lavoro, sebbene i dispositivi di allarme utilizzino un intervallo di comunicazione globale. In caso contrario, la tecnologia di trasmissione vocale RFID e wireless hanno un raggio di comunicazione molto limitato. È possibile affermare che queste tecnologie si possono trovare solo in piccole aree durante i concerti o attorno a cancelli di sicurezza e si verificano occasionalmente."

La bassa diffusione di tecnologie operative parallele minimizza rapidamente le possibilità di potenziali problemi con la tecnologia LoRaWAN.

Probabilità di occorrenza sul canale

In questa sottosezione viene esposto l'esperimento [28] per valutare la **probabilità di occorrenza sul canale**. Il problema è stato definito con le seguenti ipotesi:

"Tutti i calcoli e le considerazioni sulla distribuzione del tempo e sulla probabilità delle tecnologie Lora, Sigfox e IQRF (altra tecnologia LPWAN che condivide la stessa banda), sono stati fatti assumendo che tutte le tecnologie stiano lavorando su canali di frequenza di sovrapposizione."

La figura 2.9 mostra solo una singola combinazione possibile di canali per queste tecnologie.

Tabella 2.3: Dati relativi al tempo e alla trasmissione delle tecnologie selezionate

	LoRa DR0	Sigfox	IQRF low DR
Bit rate [bit/s]	250	100	1200
Max payload [B]	59	12	64
Periodo di trasmissione [s]	2.30	2.00	0.85
E_1 [s]	378.28	840.00	119.47
E_2 [%]	0.4378	0.9722	0.1383
P_E [-]	0.004378	0.009722	0.001383

E_1 = evento sul canale durante un 24 ore.

E_2 = evento sul canale durante un 24 ore.

P_E = Probabilità dell'evento sul canale.

I dati raccolti appartengono agli autori dell'articolo [28].

"Include il canale LoRa che inizia a 868.1 MHz, il canale IQRF n.50 a partire da 868.15 MHz e tutti i canali Sigfox grazie alla sua larghezza di banda."

Questi canali sono mostrati in dettaglio in figura 2.11. I risultati della prova affermano che:

"La coesistenza reciproca delle tecnologie sullo stesso canale è possibile considerando la tempistica misurata delle singole tecnologie e le loro statistiche. Per arrivare a questa conclusione sono state scelte le tempistiche che rappresentano il caso peggiore per ogni tecnologia."

La tabella 2.3 mostra il confronto e dati di queste tre tecnologie. L'autore dell'articolo [28] ha commentato i dati in tabella:

"Un periodo di trasmissione viene calcolato dalla velocità dati e dalla dimensione del messaggio. Lo strumento "Lora Modem Calculator" è stato utilizzato per i dispositivi LoRa. Viene inoltre menzionato il tempo di occorrenza per ciascuna delle varianti durante 24 ore per un confronto migliore. Un prerequisito per tutte le tecnologie è stato una trasmissione di 140 messaggi al giorno, ovvero il valore massimo definito per la tecnologia SigFox. Una parte di quel tempo è anche un periodo di messaggi di ritrasmissione che si verificano nei dispositivi SigFox e tempi di trasmissione per il downlink, che sono definiti in modo diverso per ciascuna tecnologia. Secondo il carico di tempo parametrico la variazione Sigfox possiede una bit rate di 100 bit/s e massimo carico utile di 12 B nel caso peggiore."

Questo risultato di SigFox è principalmente dovuto dal fatto che invia ogni messaggio tre volte.

"I messaggi di SigFox sono trasmessi su frequenze diverse, ma la loro posizione interferisce ancora con la zona problematica menzionata. LoRa DR0 e IQRF low DataRate risparmiano più tempo."

I risultati di SigFox sono peggiori in termini di tempo. Le ragioni sono date dalla struttura della tecnologia, in quanto utilizza le tecniche UNB, larghezza

di banda ridotta, bassa velocità in bit e un piccolo volume di dati. SigFox ha quindi scelto altre priorità nella sua politica, come la lunga autonomia e una maggiore durata della batteria a scapito della velocità o della sicurezza contro gli errori di trasmissione.

Probabilità di collisione sul canale

La probabilità che si verifichi una collisione in un canale multiplo è una questione cruciale per la coesistenza delle diverse tecnologie. L'articolo [28] riporta le ipotesi:

"Il tutto è considerato e calcolato con le varianti nel caso peggiore possibile, così da valutare il potenziale possibile di coesistenza per le tecnologie citate. La quantità approssimativa di equipaggiamento di ciascuna tecnologia è stata stimata in modo che la probabilità di collisione sia adeguata per il corretto funzionamento di tutti i processi, e per farlo bisognava verificare la quantità di tempo che ciascuna tecnologia trascorre sul canale."

Questi valori sono stati misurati e riportati dagli autori nella tabella 2.3.

"La probabilità di collisione durante un giorno (24 ore) è basata sul rapporto tra il tempo in cui la tecnologia utilizza il canale e il tempo totale."

La probabilità che avvenga l'evento è il principale valore che può essere confrontato con gli altri o utilizzato per calcolare la probabilità di collisioni.

"Le specifiche dell'autorizzazione generale numero VO-R/10/05.2014-3 definisce che il duty cycle massimo ammissibile è determinato dalla percentuale di tempo in cui il dispositivo può essere attivo sul canale. Tutte le tecnologie citate soddisfano questa condizione, sebbene SigFox con rapporto 0,009722 si adatti al limite 0,01 solo con un piccolo margine."

La probabilità calcolata di collisione descrive una situazione in cui due o più dispositivi diversi sul canale si scontrano allo stesso tempo. Dai risultati in tabella 2.3 dagli autori di [28] viene evidenziato che:

"La probabilità che due o più dispositivi diversi sul canale si scontrano allo stesso tempo è molto bassa e quindi molto inferiore alla probabilità dell'evento delle singole tecnologie. La probabilità aumenterà significativamente con il numero crescente di dispositivi e il limite sarà inevitabilmente vicino 1, evento di probabilità certa."

I problemi di coesistenza di tecnologie per un numero maggiore di dispositivi sono molto importanti per determinare i limiti della tecnologia. Il limite della quantità di dispositivi non deve essere superato per evitare il deterioramento della qualità o della disponibilità di servizi in esecuzione su queste tecnologie. I problemi relativi al calcolo della probabilità di collisione per un grande numero di dispositivi per ciascuna di queste tecnologie sono complicati.

”Gli stati problematici di collisione sono definiti per due o più dispositivi attivi simultaneamente. La complessità del calcolo aumenta per via delle variabili da considerare, perché il numero degli stati probabilistici aumenta con il numero di n dispositivi in base a:

$$S = 3n + 1 \quad (2.10)$$

dove S è il numero di stati probabilistici e n è il numero di dispositivi di ciascuna tecnologia. Il calcolo della probabilità di collisione in caso di un numero maggiore di dispositivi che utilizzano ciascuna tecnologia è definito come:

$$P(N \leq n) = 1 - n(P_L + P_S + P_I) - P'_0 \quad (2.11)$$

dove ogni parametro descrive stati specifici di probabilità come descritto di seguito. Tutte le variabili sono state calcolate dai valori già noti di probabilità degli eventi in tabella 2.3. Qui viene usato il complemento per esprimere l'evento opposto, che è etichettato come c in apice. Un prerequisito è che il numero di dispositivi n sia lo stesso per tutte le tecnologie.

$$P_L = P(L)P(L^c)^{n-1}P(S^c)^nP(I^c)^n \quad (2.12)$$

$$P_S = P(L^c)^nP(S)P(S^c)^{n-1}P(I^c)^n \quad (2.13)$$

$$P_I = P(L^c)^nP(S^c)^nP(I^c)^{n-1} \quad (2.14)$$

$$P'_0 = (P(L^c)P(S^c)P(I^c))^n \quad (2.15)$$

dove N è il numero di dispositivi di ciascuna tecnologia durante la collisione. La risultante dipendenza della probabilità di collisione su un canale è presente dopo la sostituzione nell'equazione 2.11 altrimenti troppo lunga e difficile da comprendere, quindi è divisa in sottosezioni, che illustrano chiaramente il loro utilizzo.”

La funzione di distribuzione, mostrata in figura 2.12 è basata su 2.11, dipende dall'aumento del numero totale m dei dispositivi 2.16, che è la somma dei dispositivi di ciascuna delle tre tecnologie 2.12, 2.13 e 2.14.

$$m = 3n \quad (2.16)$$

$$F(m) = 1 - (P_L + P_S + P_I)m/3 - P'_0 \quad (2.17)$$

”La funzione non è lineare come potrebbe sembrare la soluzione più semplice per il crescente numero di dispositivi.”

come nel grafico in figura 2.12.

”Tuttavia, può essere approssimata da una curva polinomiale almeno al 4° ordine. La funzione inizia da zero ed è ad uno nel limite, che è un limite previsto dalla natura del calcolo.”

Il grafico in figura 2.12 mostra la curva di probabilità del canale non occupato. L'origine della curva rappresenta l'assenza di qualsiasi dispositivo sul canale.

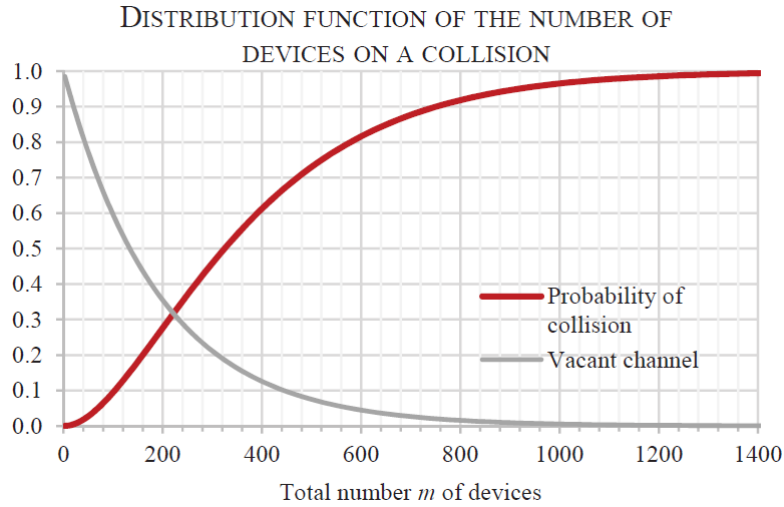


Figura 2.12: Distribuzione della funzione di probabilità di collisione 2 o più dispositivi

”La funzione decresce in modo esponenziale con il quadrato del numero n di dispositivi di ciascuna tecnologia. Questa funzione decrescente è calcolata da:”

$$P'_0 = (P(L^c)P(S^c)P(I^c))^n \quad (2.18)$$

La quantità di dispositivi sul canale deve essere fortemente limitata. Dalla figura 2.12 possiamo affermare che con 100 dispositivi c'è una probabilità del 60% che due o più di essi effettuano una collisione. Con più di 120 dispositivi le probabilità che due o più di essi collidano sono maggiori o uguali al 50%, ciò non è un risultato soddisfacente.

Capacità del canale

La capacità del canale si misura con il numero di dispositivi sul canale nello stesso momento. Il problema della coesistenza dipende da due fattori principali, che hanno i loro limiti, vale a dire la **distribuzione di frequenza** e la **distribuzione temporale**. Secondo [28]:

”La divisione del tempo è composta principalmente dalla probabilità di occorrenza delle singole tecnologie e quindi dalla probabilità di collisioni sul canale.”

Dai risultati dell'esperimento [28] si possono ipotizzare ulteriori limiti in questi sistemi di trasmissione:

”Uno dei limiti principali è la potenziale capacità massima del numero di dispositivi che operano sul canale. Si basa sull'utilizzo del canale, cioè quanto gravano i dispositivi. In altre parole, esprime i confini, in cui è possibile far funzionare il sistema senza perdere

qualità o far diminuire la disponibilità dei servizi gestiti. Alcuni parametri che determinano la qualità dei servizi sono detti Quality of Service (QoS) e Quality of Experience (QoE)."

Il numero dei dispositivi sul canale è una questione vitale per la crescita delle tecnologie. Bisogna dimensionare la propria rete in conformità con la capacità massima prestabilita di un canale rispetto ad altre possibili tecnologie sulle stesse frequenze. Inoltre:

"Per dimensionare la rete bisogna rispettare la disponibilità del servizio pianificata in base al documento SLA (Accordo sul livello di servizio), che è organizzato e tracciato tra il fornitore del servizio e l'utente."

Il dimensionamento accurato del numero di dispositivi sul canale non è del tutto possibile:

"Il dimensionamento dipende da molti fattori che descrivono lo stato del canale, la qualità, la disponibilità dei servizi usati e la probabilità di collisione con più dispositivi. Quest'ultimo parametro il termine che descrive il vero stato del canale con un certo numero di dispositivi collegati."

Dal grafico in figura 2.12 è possibile stimare approssimativamente quale potrebbe essere la capacità massima del canale (100), ma dipende anche da altri parametri dei singoli servizi operativi come la disponibilità del servizio e una modalità di implementazione dei parametri QoS e QoE per riservare e gestire i flussi di dati.

"I parametri QoS e QoE sono indicatori di un livello di qualità e quindi solo i loro protocolli reagirebbero se le condizioni si deteriorassero a causa, ad esempio, di un numero maggiore di dispositivi sul canale rispetto alla capacità massima determinata."

È importante per il corretto funzionamento dell'intera rete, il numero di dispositivi connessi non deve superare la capacità massima del canale.

"Questo limite, capacità massima del canale, è difficile da trovare senza prove sperimentali sul canale con tecnologie e servizi concreti."

Dai risultati calcolati dall'esperimento [28]:

"La probabilità di occorrenza dei dispositivi sul canale durante un giorno (24 ore), è possibile confermare che tutte le tecnologie soddisfano le condizioni del ciclo di lavoro massimo consentito. La funzione di distribuzione della probabilità di collisione per due o più dispositivi tende ad 1 per più di 1000 dispositivi attivi simultaneamente."

Al momento ci sono ancora pochi dispositivi attivi costruiti sulla base delle tecnologie LPWAN. In un prossimo futuro, LoRa e Sigfox promettono un grande sviluppo con più di migliaia di dispositivi attivi. Il problema della coesistenza della tecnologia LPWAN diventerà reale quindi è necessaria di un'evoluzione della tecnologia.

2.4.3 Aspetti legislativi

Dopo aver analizzato diversi dettagli tecnici è opportuno trattare anche gli aspetti legislativi che rappresentano un limite per le reti pubbliche secondo [9]:

”Anche se diversi Paesi europei stanno definendo il quadro legislativo per le reti LoRa, questi accordi non sono stati ancora conclusi e oggi le reti pubbliche non sono molto diffuse. In ogni caso si prevede che, una volta definiti gli aspetti legislativi, ci sarà una rapida accelerazione delle reti pubbliche LoRa.”

Sempre secondo lo stesso articolo, una volta definiti questi aspetti legislativi si presume un aumento della domanda di mercato:

”Verrà in tal modo stimolata la domanda di mercato per i dispositivi IoT Edge in tecnologia LoRa che, per il momento, non sono ancora pronti in quanto i produttori attendono il decollo di queste reti. Questa situazione sembrerebbe paradossale: solo pochi saranno capaci di iniziare lo sviluppo prima che le reti pubbliche siano disponibili, ma gli operatori di rete devono avere fiducia nel mercato per stare al passo con i tempi di introduzione delle leggi e impegnarsi nella realizzazione delle reti LoRa.”

Il documento [9] spiega come può essere estesa una rete LoRa privata ad una pubblica, una volta terminata l'attività legislativa:

”La tecnologia LoRa potrà offrire la connettività adatta alle applicazioni IoT asset-based, che dipendono dalle comunicazioni long-range a basso consumo ma, nello stesso tempo, richiedono la certezza che la rete sarà supportata per tutta la durata degli asset e dei relativi prodotti. L'aspetto più importante di questa situazione è il fatto che alcune aziende stanno pensando a un impiego nella propria rete privata LoRa, che permetterà ai clienti di connettere i dispositivi alla rete stessa per testare le loro applicazioni e definire i progetti pronti per la certificazione. Una volta completata l'attività legislativa oggi in atto in Europa, gli sviluppatori che avranno utilizzato questa rete privata per completare i loro progetti in conformità ai regolamenti approvati saranno fra i primi a presentare sul mercato i prodotti da utilizzare in rete.”

Capitolo 3

Sistema di monitoraggio della qualità dell'aria

3.1 Obiettivo dell'analisi

In questo capitolo verrà presentato un sistema di monitoraggio della qualità dell'aria in tempo reale a bassa potenza basato sulla tecnologia di comunicazione wireless LoRa, realizzato dal College of Electronic Information and Control Engineering a Pechino nel 2016. Questo sistema rappresenta un prototipo che può essere realizzato in qualunque città che intende prevenire e tenere sotto controllo l'inquinamento atmosferico.

3.2 Introduzione al problema

Negli ultimi anni, l'inquinamento atmosferico è uno dei problemi ambientali che sono stati più discussi. Secondo l'Organizzazione mondiale della sanità (OMS), l'inquinamento atmosferico, soprattutto quello da particolato (o PM), è strettamente correlato ai livelli di incidenza delle malattie e di mortalità. I maggiori rischi per la salute derivano dalle polveri sottili, ovvero le particelle di diametro fino a 10 o 25 micron (denominate rispettivamente PM10 e PM25). Le particelle di queste dimensioni vengono emesse dagli autoveicoli e da altre attività domestiche e industriali, ma possono provenire anche da fonti naturali, come il terreno o la sabbia. Le persone che vivono nei Paesi sviluppati o in via di sviluppo sono spesso esposte ad elevati livelli di inquinamento da polveri sottili. Un report del 2012 dell'Agenzia europea dell'ambiente ha rilevato che oltre l'80% delle persone che vivono nelle città dell'Unione europea è esposto a livelli di PM superiori a quelli previsti dalle linee guida dell'OMS sulla qualità dell'aria (2005). Le autorità cittadine ricevono pressioni per migliorare la qualità dell'aria. Nell'ambito dei trasporti sono state implementate varie iniziative finalizzate a ridurre gli effetti delle emissioni dei veicoli nei centri delle città. Dai dati precisi sulla qualità dell'aria sarà possibile ricavare preziose informazioni che consentiranno alle autorità locali di valutare i risultati di ciascuna iniziativa. La maggior parte dei paesi sviluppati ha introdotto stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria e del clima nelle aree popolate o al di fuori della città per

prevenire gli effetti della qualità dell'aria. La maggior parte delle stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria utilizza metodi primitivi per monitorare la qualità dell'aria, come la raccolta di campioni d'aria e l'analisi dei campioni nei laboratori. Questi metodi sono affidabili ma inefficienti e costosi. Inoltre non è possibile ottenere la concentrazione del gas e del particolato in tempo reale. Negli ultimi anni ha preso piede l'utilizzo dei sensori intelligenti per misurare la qualità dell'aria.

3.3 Sistema di monitoraggio

Nel documento [31] è stato proposto un sistema di monitoraggio dell'inquinamento atmosferico basato sulla tecnologia LoRaWAN. Questo sistema utilizza una rete di sensori wireless per raccogliere dati sulla qualità dell'aria sfruttando la rete LoRa per inviare dati di concentrazione dei gas e PM. Il sistema è composto da due parti: modulo di rilevamento e software di elaborazione dati. Il modulo di rilevamento è composto da un micro-controllore, sensori di gas e PM (NO_2 , SO_2 , O_3 , CO, PM1, PM_{10} , $PM_{2.5}$) e nodi LPWAN. Il micro-controllore STM a 32 bit è utilizzato come nucleo del modulo di rilevamento per convertire le misurazioni lette dal sensore in valori digitali. I dati vengono inviati ai nodi LPWAN utilizzando il modem LoRa. La stazione base è collegata al computer per ottenere tutti i dati dai nodi. Il software di elaborazione dati restituisce tutte le informazioni dei dati a video. Il software di elaborazione dati permette agli utenti finali di ottenere l'evoluzione storica della qualità dell'aria nelle aree monitorate.

3.4 Modulo di rilevamento

Il modulo di rilevamento è un gruppo di sensori noto come array di sensori. Il sensore deve essere selezionato in base ai parametri di precisione e basso consumo energetico. I sensori devono essere molto sensibili al gas target. Il sistema, presentato nel documento [31], può essere studiato come traccia per il posizionamento dei sensori in un'area. La tecnica di monitoraggio dell'inquinamento atmosferico, basata su l'array di sensori, richiede che i sensori siano installati in posizioni strategiche. Il sistema presentato nel documento [31] richiede l'utilizzo di quattro sensori che effettuano la lettura ambientale nello stesso momento ed in aree differenti. I sensori non devono essere troppo distanti tra loro. In questo modo è possibile fare una media della lettura ambientale. Il risultato ottenuto dalla media è più preciso di una sola lettura effettuata da un singolo sensore che potrebbe essere falsata da situazioni eccezionali e mettere il sistema in uno stato di falso allarme. Dato che il costo del singolo sensore è molto basso è possibile investire in un array di sensori numerosi per effettuare una lettura ambientale più precisa.

3.4.1 Scelta dei sensori

Gli autori del documento [31] hanno scelto due tipi di sensori per la realizzazione del sistema. I sensori elettrochimici per i gas CO, SO_2 , O_3 e NO_2 sono prodotti dalla Sensor technology. Questi sensori elettrochimici possiedono quattro elettrodi ed ottengono misurazioni più accurate rispetto ai sensori a tre elettrodi.

I sensori di particelle laser per il particolato PM_1 , PM_{10} , $PM_{2.5}$ basati sulla tecnologia di scattering laser. Questi sensori possono misurare esattamente la concentrazione di massa delle particelle $\mu g / m^3$.

3.5 Microcontrollore

L'MCU STM32103FVET6 è il componente che esegue tutta l'elaborazione dati sul nodo del sensore. L'MCU è a 32 bit con un'architettura modificata di Harvard. Ha un'ampia tensione operativa (da 2,5 V a 5,5 V) che lo rende ideale per il sistema. Dispone di tre convertitori da analogico a digitale a 12 bit (ADC) in grado di soddisfare i requisiti di risoluzione del sistema. Possiede 16 canali di ingresso. Le tensioni di uscita standard dei sensori di gas possono essere misurate tramite l'ADC. La concentrazione di PM viene inviata a MCU utilizzando UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, ricevitore trasmettitore asincrono universale). L'MCU comunica in modo seriale con il modulo LoRa utilizzando l'UART. I dati di concentrazione di gas e PM vengono inviati al modulo LoRa. L'MCU è stato programmato dagli autori del documento [31] utilizzando il linguaggio di programmazione C e il software Keil.

3.6 Comunicazione wireless LoRa

Il nodo del sensore remoto comunica con la stazione base in modalità wireless. Il modem LoRa è stato utilizzato per la comunicazione wireless. Il modem LoRa utilizza una forma di Forward Error Correction (FEC) che consente il recupero di bit di informazioni a causa della corruzione da interferenze. La chip rate (chip per secondo per Hertz) è uguale alla larghezza di banda programmata e può assumere valori di 125, 250 o 500 kHz. Il fattore di diffusione (SF) per un collegamento LoRa può essere modificato in base alla distanza di comunicazione e al tempo on-air desiderato come visto nel capitolo precedente.

3.7 Software di elaborazione dati

Il software di elaborazione dati rappresenta l'interfaccia tra sistema ed utente. Secondo [31] il software è stato sviluppato utilizzando LabVIEW (Laboratory Virtual Engineering Workbench) che è in grado di eseguire una varietà di funzionalità. All'avvio del software, l'utente deve selezionare la porta USB a cui è collegato il nodo sink. Il software verificherà la comunicazione tra la porta USB e il modulo LoRa inviando alcuni comandi in background. Una volta stabilita la comunicazione, il software è pronto per ricevere i dati dai moduli del sensore remoto. Quando la porta riceve i dati, i dati vengono elaborati e visualizzati. Tra le funzionalità messe a disposizione dell'utente ci sono: "Salva" per salvare i dati e "Playback" per recuperare i dati salvati. La combinazione di funzioni di "Salva" e "Playback" servono per valutare le tendenze della qualità dell'aria.

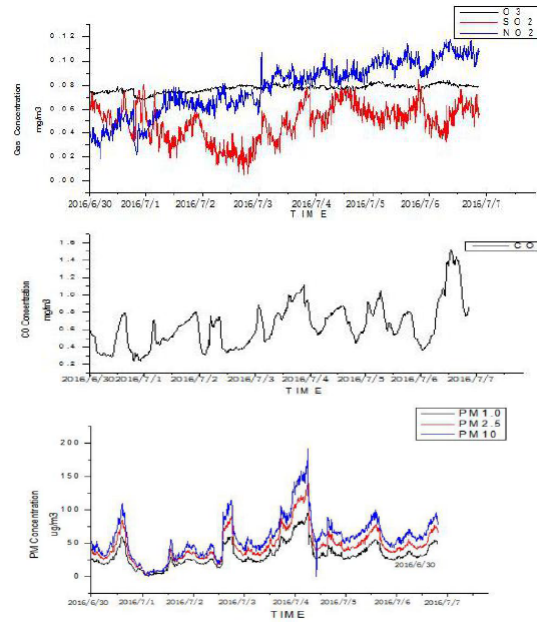


Figura 3.1: Concentrazione di SO_2 , O_3 , NO_2 , CO , $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ e PM_{10}
Immagine tratta dall'articolo [31].

3.8 Risultati sperimentali

Il sistema è stato sperimentato a Pechino. Dalle letture dei sensori si possono ottenere le tendenze della qualità dell'aria. La concentrazione di gas e PM viene misurata con un'accuratezza di $0,000001 \mu g / m^3$. I risultati raccolti dagli autori di [31] dal 30 Giugno 2016 al 7 Luglio 2016 sono riportati in figura 3.1:

"La concentrazione di SO_2 e O_3 fluttua da $0,01 \mu g / m^3$ a $0,08 \mu g / m^3$. La concentrazione di NO_2 fluttua da $0,03 \mu g / m^3$ a $0,1 \mu g / m^3$. Le concentrazioni di CO e PM hanno un'alta fluttuazione."

3.9 Conclusione

La soluzione proposta è a basso costo utilizzando la tecnologia LoRa, sensori elettrochimici e di particelle laser, rispettivamente per gas e PM. Tramite la tecnologia LoRa il sistema di monitoraggio acquisisce l'eccellente vantaggio rispetto alle altre tecnologie wireless di lunga distanza e bassa potenza. I quattro sensori elettrochimici che sono stati utilizzati rendono i dati sulla qualità dell'aria più stabili e precisi. I risultati sperimentali mostrano che il sistema può monitorare e misurare con un'ottima precisione la concentrazione di gas e PM nell'aria.

Bibliografia

- [1] Architettura di rete e classificazione dei sensori lora. <http://www.tiot.it/internet-of-things/architettura-di-rete-e-sensori-lora/>.
- [2] Campionamento e quantizzazione. <https://hdemo.com/digital-imaging-theory/campionamento-e-quantizzazione-di-immagini/>.
- [3] Caratterizzazione dei sensori. http://home.deib.polimi.it/svelto/didattica/materiale_didattico/materiale_didattico_MA/Sensori%20Caratterizzazione.pdf.
- [4] Classificazione dei trasduttori. <http://www.inftub.com/economia/finanze/CLASSIFICAZIONE-DEI-TRASDUTTOR63819.php>.
- [5] Connettività intelligente. <https://www.elettronicanews.it/connettivita-intelligente/>.
- [6] Connettività wireless: è l'ora delle reti lpwan. <https://www.elettronicanews.it/connettivita-wireless-e-lora-delle-reti-lpwan/>.
- [7] Encoder (elettronica). [https://it.wikipedia.org/wiki/Encoder_\(elettronica\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Encoder_(elettronica)).
- [8] La tecnologia di rete a basso consumo di ibm e semtech. <http://www-03.ibm.com/press/it/it/pressrelease/46335.wss>.
- [9] La tecnologia lora nei sistemi iot. <https://www.elettronicanews.it/la-tecnologia-lora-nei-sistemi-iot/>.
- [10] Lora alliance. <https://www.lora-alliance.org/>.
- [11] Lora, lorawan and loriot.io. <https://www.loriot.io/lorawan.html>.
- [12] Lorawan. <https://www.ictpower.it/tecnologia/lorawan.htm>.
- [13] Lorawan adaptive data rate. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/adr.html>.
- [14] Lorawan r1.0 open standard released for the iot. <https://www.businesswire.com/news/home/20150616006550/en/LoRaWAN-R1.0-Open-Standard-Released-IoT>.
- [15] Quale il futuro e il presente dell'iot? <http://www.techeconomy.it/2016/10/26/quale-futuro-presente-iot/>.

- [16] Quantizzazione. [https://it.wikipedia.org/wiki/Quantizzazione_\(elettronica\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Quantizzazione_(elettronica)).
- [17] Quantizzazione non lineare. www.itfalco.gov.it/files/CETF05000Q/5_2_PCM_Quantizzazione_NON_Lineare.pdf.
- [18] Sensori e trasduttori. <http://magistri.altervista.org/SISTEMI/quinta/trasduttori.pdf>.
- [19] Sensori, principi di funzionamento e teoria degli error. <http://www.commtec.com/Library/Tutorials/CTD/sensors.pdf>.
- [20] What is lora? <http://www.semtech.com/wireless-rf/internet-of-things/what-is-lora/>.
- [21] G. Bernasconi. Quantizzazione, conversione analogico digitale. http://home.deib.polimi.it/bernasco/corso_fss/matdid/dispense09.pdf.
- [22] F. Van den Abeele, J. Haxhibeqiri, I. Moerman, and J. Hoebeke. Scalability analysis of large-scale lorawan networks in ns-3. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(6):2186–2198, Dec 2017.
- [23] W. Guibene, J. Nowack, N. Chalikias, K. Fitzgibbon, M. Kelly, and D. Prendergast. Evaluation of lpwan technologies for smart cities: River monitoring use-case. In *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, pages 1–5, March 2017.
- [24] V. Hauser and T. Hégr. Proposal of adaptive data rate algorithm for lorawan-based infrastructure. In *2017 IEEE 5th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)*, pages 85–90, Aug 2017.
- [25] D. M. Hernandez, G. Peralta, L. Manero, R. Gomez, J. Bilbao, and C. Zubia. Energy and coverage study of lpwan schemes for industry 4.0. In *2017 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM)*, pages 1–6, May 2017.
- [26] Ing. Rocco Ditommaso Ing. Felice Carlo Ponzo. Introduzione all’analisi dei segnali. http://www2.unibas.it/ponzo/Sito/Monitoraggio_Strutt._files/Dispensa%20%20-%20Introduzione%20Analisi%20dei%20Segnali.pdf.
- [27] Y. S. Jang, M. R. Usman, M. A. Usman, and S. Y. Shin. Swapped huffman tree coding application for low-power wide-area network (lpwan). In *2016 International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS)*, pages 53–58, Oct 2016.
- [28] L. Krupka, L. Vojtech, and M. Neruda. The issue of lpwan technology coexistence in iot environment. In *2016 17th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME)*, pages 1–8, Dec 2016.
- [29] Marcello Lando. Caratteristica di trasferimento statica. <http://www.webalice.it/mlando/hardware/ADC.htm>.

- [30] L. Li, J. Ren, and Q. Zhu. On the application of lora lpwan technology in sailing monitoring system. In *2017 13th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, pages 77–80, Feb 2017.
- [31] Sujuan Liu, Chuyu Xia, and Zhenzhen Zhao. A low-power real-time air quality monitoring system using lpwan based on lora. In *2016 13th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)*, pages 379–381, Oct 2016.
- [32] Corrado Di Natale. Introduzione sensori. http://www.uniroma2.it/didattica/sens1/deposito/01_introduzione.pdf.
- [33] D. Patel and M. Won. Experimental study on low power wide area networks (lpwan) for mobile internet of things. In *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–5, June 2017.
- [34] Massimo Spataro. I trasduttori. http://digilander.libero.it/massimospataro/I_TRASDUTTORI_cucci.doc.
- [35] Giacomo Torzo. *Sensori*, 2015. <http://www.peoplephysics.com/sensori.pdf>.
- [36] Andrea Vigani. Campioni di tempo. http://www.musicaecodice.it/1.2_Linguaggi_del_tempo/1.2.13_Campioni.php.