

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
TESI DI LAUREA

SINCRONIZZAZIONE TRA
DISPOSITIVI SU POWER LINE
COMMUNICATIONS PER
SMARTGRID

RELATORE: Prof. Erseghe Tomaso

CORRELATORE: Prof. Tomasin Stefano

LAUREANDO: *Gallina Massimo*

Padova, 24 aprile 2012

Indice

Sommario	1
1 Introduzione	2
2 Smart Grid	4
2.1 Il concetto di Smart Grid	4
2.2 Dalla rete elettrica tradizionale alle Smart Grid	10
2.2.1 La rete elettrica esistente	10
2.2.2 Evoluzione della rete elettrica	12
2.2.3 Coesistenza tra due generazioni di rete elettrica	14
3 Power Line Communications (PLC)	16
3.1 Definizione di Power Line Communications (PLC)	16
3.2 Storia di PLC	18
3.2.1 Ultra Narrowband e Narrowband PLC	19
3.2.2 Broadband PLC	19
3.3 Caratterizzazione del canale PLC	20
3.3.1 Modello di canale	20
3.3.2 Modello di rumore	22
3.3.3 Schemi di modulazione	23
3.4 PLC applicate alle Smart Grid	27
3.4.1 PLC per reti ad alta tensione	27
3.4.2 PLC per reti a media tensione	28
3.4.3 PLC per reti a bassa tensione	29
3.4.4 Confronto tra tecnologie PLC	31

4	Protocolli di PLC	33
4.1	PRIME	33
4.1.1	Livello fisico (PHY)	35
4.1.2	Livello MAC	41
4.1.3	Livello Convergence (CL)	49
4.2	G3-PLC	52
4.2.1	Livello MAC	56
4.2.2	Confronto tra PRIME e G3-PLC	60
4.3	HomePlug Green PHY	61
4.3.1	HomePlug AV	63
4.3.2	HomePlug Green PHY	64
4.4	IEEE P1901	66
4.4.1	Livello MAC e livelli PLCP	67
4.4.2	FFT-OFDM PHY	67
4.4.3	Wavelet-OFDM PHY	68
4.5	Protocolli ENEL	69
4.5.1	SITRED	69
4.5.2	LonTalk	70
5	TI PLC Development Kit e Laboratorio	71
5.1	TI PLC modems	71
5.1.1	Texas Instruments e Smart Grid	72
5.1.2	Il kit fornito da Texas Instruments	72
5.1.3	TMS320F28335 DSP	74
5.2	Code Composer Studio	79
5.3	Laboratorio	86
5.3.1	Il quadro elettrico per le Smart Grid	86
5.3.2	Generatori e carichi programmabili	89
5.3.3	Fonti di energia rinnovabile	92
5.3.4	Banco di lavoro	93
6	Sincronizzazione	96
6.1	Sincronizzazione temporale	97
6.1.1	Metodi di sincronizzazione temporale	97
6.1.2	Calcolo del Round Trip Time (RTT)	99

6.1.3	Anomalia	102
6.1.4	Calcolo e correzione dell'offset di tempo	104
6.2	Sincronizzazione in frequenza	106
6.2.1	Calcolo dell'offset di frequenza	106
6.2.2	Correzione dell'offset di frequenza	109
6.3	Sincronizzazione di un nodo alla rete	114
7	Conclusioni	122
	Bibliografia	125

Sommario

Lo scopo di questa tesi è quello di fornire una panoramica sull'ambiente delle Smart Grid, sull'evoluzione della rete elettrica esistente e sui miglioramenti portati da questa tecnologia. Verrà fatta una presentazione anche delle Power Line Communications (PLC), una tecnologia di comunicazione che si propone come struttura di comunicazione per la Smart Grid, analizzandone anche l'articolato modello di canale. Verranno presi in considerazione vari protocolli di PLC, applicabili ad un ambiente smart grid, con particolare interesse verso PRIME, il protocollo che sarà poi implementato nel progetto di tesi. L'obiettivo del progetto consiste nel gestire la sincronizzazione tra due dispositivi PLC forniti da Texas Instruments attraverso un Development Kit, riferendosi alla tecnologia Smart Grid e al protocollo PRIME. Sarà quindi sviluppato un algoritmo che corregge il clock di un nodo Slave, sincronizzandolo al nodo Master. Per fare questo verranno illustrate le varie tecniche adottate nel procedimento, dalla stima del Round Trip Time, al calcolo e correzione dell'offset di tempo fino al calcolo e correzione dell'offset di frequenza, e infine verranno illustrati i risultati raggiunti dall'algoritmo.

Capitolo 1

Introduzione

La Smart Grid può essere vista come un'evoluzione fondamentale della rete elettrica esistente. La rete elettrica presenta infatti degli svantaggi. È costituita principalmente da quattro livelli, generazione, trasmissione, distribuzione e utilizzazione, e la sua struttura risulta essere di tipo gerarchico. Questa struttura impedisce alle aziende fornitrici di elettricità di avere un controllo in tempo reale dei servizi offerti e allo stesso tempo impedisce agli utenti finali un ruolo attivo nella gestione dell'energia. Altri punti deboli della rete esistente sono rappresentati dai ritardi negli investimenti per migliorare e aggiornare la struttura uniti alla crescente richiesta di elettricità. Questi fattori hanno portato quindi all'incapacità nel gestire picchi di richiesta o anomalie e guasti che si presentano nei vari livelli della rete.

La Smart Grid rappresenta la possibilità di gestire la distribuzione di energia in modo intelligente, e sta quindi attirando un interesse sempre crescente. L'idea introdotta dalla Smart Grid infatti consiste nel dare un ruolo più attivo agli utenti nella gestione del consumo di energia e nello stesso tempo di fornire alle aziende un controllo dinamico dei servizi. La Smart Grid inoltre è un sistema in grado di far fronte in modo automatico ai problemi che si possono presentare nel funzionamento della rete elettrica, come ad esempio prevedere possibili guasti e prendere le appropriate decisioni. Anche l'introduzione nel mercato di nuove tecnologie sta dando una forte spinta alla ricerca e allo sviluppo nelle smart grid. Infatti, fonti di energia rinnovabile come il fotovoltaico e l'eolico, l'immagazzinamento di energia in accumulatori, i Plug-in (Hybrid) Electric Vehicles (PHEV), e i programmi di Demand Side Management (DSM) e Demand Response (DR),

che hanno la necessità di essere integrati alla rete elettrica, hanno come soluzione naturale l'implementazione della Smart Grid.

Alcuni passi verso l'aggiornamento della rete elettrica con la Smart Grid sono già stati fatti; per esempio lo sviluppo delle tecnologie ha portato all'introduzione di Automated Meter Reading (AMR), Advanced Metering Infrastructure (AMI), e microgrid.

In questo scenario le Power Line Communications (PLC) rivestono un ruolo molto interessante. Infatti, sono una delle possibili tecnologie, se non la più adatta, per sviluppare la comunicazioni nell'ambiente smart grid. La PLC consiste in una tecnologia di comunicazione che permette di trasmettere dati sui cavi della rete elettrica esistente, portando quindi contemporaneamente energia e informazione ai dispositivi connessi. Un vantaggio evidente delle PLC è rappresentato dal fatto che i mezzi di comunicazione sono già esistenti in quanto rappresentati dai cavi elettrici. La difficoltà nella tecnologia PLC è data invece dalla trasmissione nel canale, il cui modello si presenta molto complicato.

Diversi protocolli di PLC, applicabili alle Smart Grid, stanno venendo proposti e sono stati oggetto di studio nella tesi. Tra quelli più importanti di sicuro troviamo PRIME, G3-PLC, IEEE P1901 e HomePlug, oltre ai protocolli utilizzati nel primo sviluppo di Smart Grid in Italia da ENEL.

Il progetto sviluppato nella tesi si occupa in particolare della gestione della sincronizzazione via PLC tra dei dispositivi forniti da Texas Instruments, che implementano il protocollo open source di PLC, PRIME.

La tesi è quindi strutturata nel seguente modo: il Capitolo 2 presenta il concetto della Smart Grid, dandone una definizione e spiegando l'evoluzione della rete elettrica; il Capitolo 3 si occupa invece di introdurre la tecnologia delle PLC, le possibili applicazioni nel campo delle Smart Grid, e un'analisi del modello di canale; i protocolli di PLC analizzati saranno successivamente illustrati nel Capitolo 4; il Capitolo 5 presenta il development kit fornito da Texas Instruments e il laboratorio utilizzati nello sviluppo del progetto di sincronizzazione, il cui sviluppo sarà spiegato dettagliatamente in tutti i passaggi nel Capitolo 6. Infine, nell'ultimo capitolo verranno riassunte le conclusioni dedotte dal lavoro di tesi.

Capitolo 2

Smart Grid

2.1 Il concetto di Smart Grid

Il concetto di Smart Grid può essere visto in diversi modi e può avere diverse definizioni. Cerchiamo quindi di fare chiarezza nella definizione di Smart Grid e di fare il punto della situazione sui motivi che stanno portando allo sviluppo di questa nuova tecnologia, basandoci su [1], [2], [3], [4], [5].

La rete elettrica presente oggi è sotto molti aspetti (che vedremo nei prossimi paragrafi) non efficiente. Per questo si sta sviluppando una nuova generazione di rete elettrica: le Smart Grid. Questa nuova idea di rete elettrica andrà a coprire i maggiori difetti della rete esistente. Le smart grid forniranno alle società un vasto controllo delle proprie risorse e servizi, e avranno la capacità di risolvere i guasti al sistema in modo automatico.

Le reti elettriche esistenti sono progettate per essere gestite attraverso un vecchio modello di cyber-infrastruttura centralizzato, denominato *Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)*. Quindi, il concetto di Smart Grid, che comprende monitoraggio ad ampio raggio, comunicazioni bidirezionali e funzionalità di controllo avanzate, dovrà colmare le inadeguatezze tecnologiche presenti nel sistema SCADA.

Le Smart Grid possono essere definite come l'insieme di tutte le tecnologie, i concetti e gli approcci che permettono di sostituire la struttura gerarchica di generazione, trasmissione, e distribuzione, con un ambiente end-to-end, intelligente e completamente integrato, dove i processi economici, gli obiettivi, e i bisogni di tutti gli interessati siano soddisfatti attraverso lo scambio efficiente di dati, servizi

e transazioni.

Una Smart Grid permette ai consumatori di interagire con il sistema di gestione dell'energia per ottimizzare il proprio utilizzo di energia e per ridurre i propri costi. Una Smart Grid inoltre è anche un sistema in grado di risolvere automaticamente i vari problemi che si presentano: può prevedere gli imminenti guasti e prendere le giuste azioni correttive per evitare o alleviare i problemi al sistema.

Una Smart Grid utilizza IT (Information Technology) da una parte per migliorare continuamente l'uso delle proprie risorse, e dall'altra per minimizzare i costi operazionali e di manutenzione.

La smart grid è dunque un'integrazione di componenti, sottosistemi, e funzionalità, controllata da un sistema di comando e controllo distribuito ed estremamente intelligente.

Applicando la definizione data di Smart Grid al campo pratico, si capisce come le smart grid non possono andare a sostituire completamente la rete elettrica esistente, ma piuttosto affiancarsi ad essa. Le smart grid quindi devono coesistere con la rete elettrica, migliorandola con le proprie capacità e funzionalità aggiuntive.

La necessità di modernizzare la rete elettrica è conseguenza dei limitati investimenti fatti nel settore negli ultimi anni, ma anche, allo stesso tempo dei nuovi bisogni che sono nati dall'esigenza di integrare le fonti di energia rinnovabile (*Renewable Energy Sources*) nel sistema di trasmissione e le *Distributed Energy Resources (DER)* (sistemi fotovoltaici, sistemi eolici, ...) nel sistema di distribuzione o nelle abitazioni, dall'immagazzinamento decentralizzato per compensare alle variazioni naturali delle sorgenti eoliche o fotovoltaiche, dai *Plug-in (Hybrid) Electric Vehicles (PHEV)* che possono causare importanti aumenti di carico in sezioni di rete, dalle *microgrids*, e dal permettere una partecipazione attiva agli utenti attraverso i programmi di *Demand Side Management (DSM)* e *Demand Response (DR)*.

Lo sviluppo delle smart grid è un punto di convergenza tra l'ingegneria informatica e delle telecomunicazioni implementate nella rete elettrica. I problemi maggiori del sistema elettrico sono situati sulla rete di distribuzione elettrica: è quindi da questo punto che partirà la revisione della rete. Anche la comunicazione e la gestione dei dati giocano però un ruolo fondamentale nella modernizzazione

2. SMART GRID

del sistema. Questi elementi chiave portano le aziende a implementare nei loro dispositivi futuri un livello di intelligenza.

Le smart grid porteranno vari miglioramenti: svilupperanno la generazione distribuita di energia, implementeranno l'integrazione di fonti alternative di energia e la gestione delle emissioni di carbonio, permetteranno alle aziende di fare un migliore uso delle proprie risorse attraverso Demand Response (DR), peak shaving e un servizio di controllo di qualità.

Alcuni stati hanno già cominciato il passaggio alla nuova tecnologia, ma in generale tutte le regioni del mondo avranno bisogno di investimenti significativi per arrivare a disporre delle smart grid. Le "reti intelligenti" sono un ambiente in piena evoluzione che si svilupperà con velocità diverse nelle varie zone del mondo a seconda delle tecnologie, delle attività commerciali ed economiche, e dei regolamenti e delle leggi di ogni regione.

Le principali caratteristiche che una rete elettrica futura dovrà possedere possono essere riassunte nei seguenti punti:

- **Flessibilità:** la rete deve soddisfare tutti i bisogni degli utenti, e allo stesso tempo deve poter essere implementata con possibili nuove soluzioni o tecnologie.
- **Accessibilità:** l'accesso alle rete deve essere garantito a tutti gli utenti, comprese le sorgenti di energia rinnovabile che si stanno sviluppando ultimamente.
- **Affidabilità:** la rete deve assicurare una fornitura affidabile e di qualità.
- **Considerazioni economiche:** la competizione e le norme devono portare a un miglioramento e a uno sviluppo della rete elettrica. L'innovazione deve essere la chiave per una gestione efficiente dell'energia.

Anche e soprattutto le Smart Grid, quindi dovranno cercare di soddisfare queste caratteristiche; a questo scopo i principali obiettivi nello sviluppo delle Smart Grid sono:

- sviluppare nuove soluzioni tecniche che possano essere implementate rapidamente ed economicamente, e costruire standard e protocolli condivisi che permettano un'ampia scelta di soluzioni.

- sviluppare sistemi di telecomunicazioni e di elaborazione che offrano servizi innovativi alle aziende e ai loro clienti
- regolare le norme e la struttura commerciale delle varie regioni, per quelle soluzioni e quei sistemi che lavorano in modo costante
- assicurare compatibilità con le vecchie strutture, sfruttando i vantaggi degli investimenti esistenti, e ottenendo una coesistenza efficace tra i nuovi e vecchi dispositivi di rete.

Possiamo ora riassumere le principali qualità analizzate finora, che caratterizzano le Smart Grid. Esse sono:

- *Intelligenti*: integrano sensori “intelligenti” e apparecchiature di controllo e quindi in grado di effettuare calcoli, comunicare, misurare.
- *Motivanti*: consentono una partecipazione attiva da parte dei consumatori. Le Smart Grid permetteranno comunicazioni in tempo reale tra consumatore ed ente distributore. Queste comunicazioni forniranno ai consumatori le informazioni, gli strumenti per il controllo e le opzioni che rendono possibile adattare il consumo di energia o impegnarsi in nuovi mercati dell’energia elettrica in base alle preferenze individuali (sia legate direttamente all’utilità dell’energia elettrica, sia a motivazioni extra-economiche quali sono le preoccupazioni ambientali). I gestori di rete tratteranno i consumatori disponibili come risorse nella gestione quotidiana della rete, facilitando così lo spostamento del picco di domanda e la formulazione dei prezzi in tempo reale.
- *Aperte*: accettano l’energia da qualsiasi fonte di combustibile e sostengono le nuove tecnologie, i nuovi servizi e i nuovi mercati. Le smart grid integrano perfettamente tutti i tipi e formati di generazione elettrica e i sistemi di accumulo. Queste nuove tecnologie, alcune delle quali ormai collaudate sul mercato, devono essere messe in linea con processi semplificati per l’interconnessione e standard universali di interoperabilità, per supportare un livello di convenienza plug-and-play. Grandi centrali, comprese le fonti pulite dal punto di vista ambientale, come i campi eolici e fotovoltaici e gli avanzati impianti nucleari, continueranno a svolgere un ruolo importante, anche se saranno introdotte un gran numero di risorse distribuite minori.

2. SMART GRID

- *Incentrate sulla qualità*: in quanto permettono di prevenire buchi di tensione, picchi, disturbi e interruzioni.
- *Capaci di autodiagnosi e riparazione*: riconoscono e rispondono automaticamente a disturbi e si riprendono velocemente da essi.
- *Robuste*: resistono sempre più ad attacchi deliberati, disastri naturali ed eventi accidentali.

Nella Tabella 2.1 si mostrano le differenze tra la rete elettrica esistente e la rete elettrica futura.

Rete esistente	Smart Grid
Elettromeccanica	Digitale
Comunicazioni unidirezionali	Comunicazioni bidirezionali
Generazione centralizzata	Generazione distribuita
Rete gerarchica	Rete meshed
Minimo uso di sensori	Ampio uso di sensori
Nessun monitoraggio	Self-Monitoring
Ripristino manuale	Self-Healing
Incline a guasti e blackout	Protezione adattativa e isolamento guasti
Controlli e test manuali	Controlli e test da remoto
Controllo limitato	Controllo completo
Scelte del cliente limitate	Scelte del cliente ampie

Tabella 2.1: Smart Grid vs Rete esistente

L'idea è quindi quella di passare dalla rete elettrica esistente, illustrata nella Figura 2.1, alla rete elettrica del futuro, la Smart Grid, mostrata in Figura 2.2, che andrà ad aggiungere tutte le caratteristiche discusse finora.

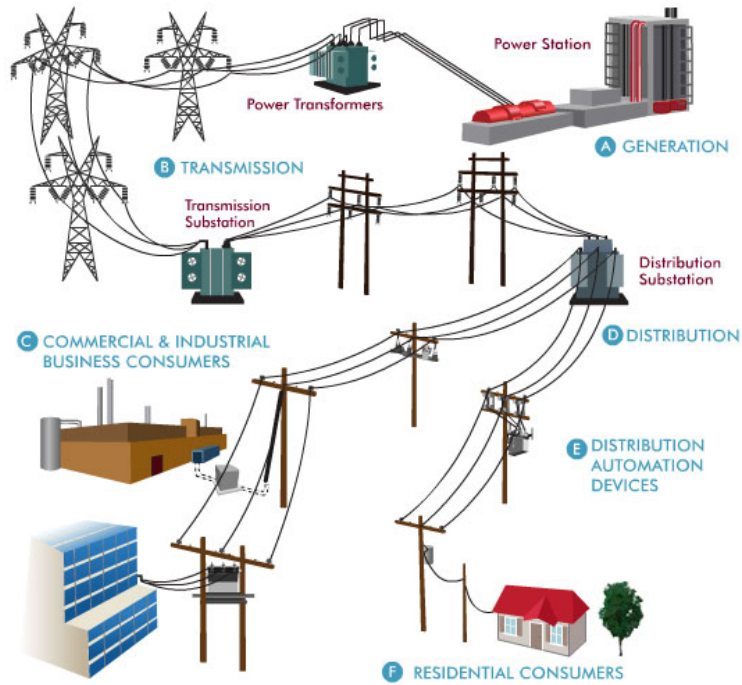


Figura 2.1: Rete elettrica esistente

SMART GRID

A vision for the future — a network of integrated microgrids that can monitor and heal itself.

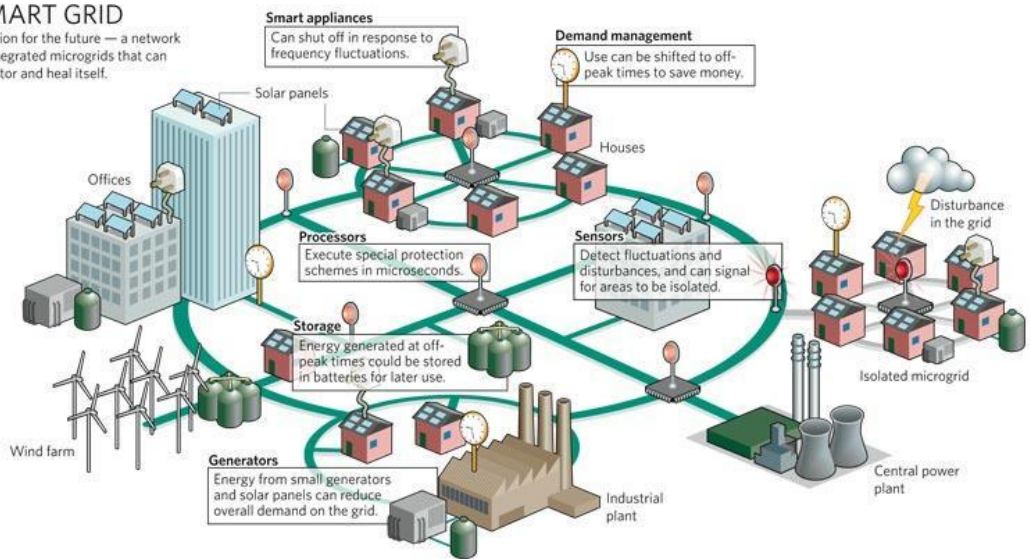


Figura 2.2: Smart Grid [6]

2.2 Dalla rete elettrica tradizionale alle Smart Grid

2.2.1 La rete elettrica esistente

Il sistema elettrico tradizionale è formato da quattro componenti principali: la generazione, la trasmissione, la distribuzione e l'utilizzazione. La rete elettrica consegna l'energia elettrica dai punti di produzione ai consumatori tramite i due principali sistemi: quello di trasmissione e quello di distribuzione. Gli elettrodotti portano l'energia ad altissima tensione (tra i 220 e i 380 kV) dalle centrali elettriche fino alle stazioni ricevatrici alle porte delle città o dei distretti di distribuzione. Qui enormi autotrasformatori (con potenze che vanno dai 100 ai 400 MW) riducono la tensione secondo le esigenze della distribuzione primaria, con tensioni che possono essere di 150, 132 o 60 kV; attraverso elettrodotti aerei o in cavo (con isolamento ad olio o in gomma etilenpropilenica EPR) l'energia elettrica giunge negli impianti di trasformazione AT/MT (alta tensione / media tensione), denominati cabine primarie, dove, con trasformatori di potenza compresa tra i 10 e i 60 MW, viene ulteriormente abbassata ad una tensione che, a seconda dei distributori, può variare tra gli 8.4 kV e i 20 kV, per essere immessa poi nella rete elettrica a media tensione. L'elettricità prosegue su elettrodotti minori su tralicci e pali in aree di campagna, oppure in cavi isolati nel sottosuolo urbano, fino alle sottostazioni di media tensione (cabine secondarie). Nelle cabine secondarie di media tensione (MT) altri trasformatori (con potenze comprese tra 50 e 1000 kW) riducono la tensione al valore finale di consegna all'utente, in Italia 400 V trifase. Da questo punto fino al contatore dell'utente si può parlare di consegna di energia elettrica, la quale avviene utilizzando cavi isolati e, più raramente e nel caso di località rurali, su linee aeree su palo [7]. Un esempio di una rete elettrica esistente è fornito in Figura 2.1.

L'industria elettrica ha operato da sempre in modo differente e indipendente nelle sottoreti di generazione, trasmissione e distribuzione, e questo ha portato a livelli diversi di sviluppo in ognuna di esse.

Come si vede dalla Figura 2.3, la rete elettrica esistente è un sistema estremamente gerarchizzato. In questo sistema le aziende fornitrici non riescono ad avere un'informazione real-time sui parametri dei servizi che vengono offerti ai terminali. Inoltre, la rete è organizzata per far fronte ai picchi di richiesta di

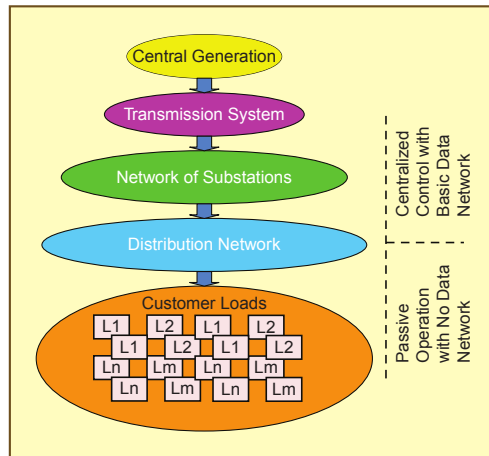


Figura 2.3: Schema della rete elettrica esistente [1]

elettricità; questi picchi avvengono però in modo occasionale, così da rendere la rete inefficiente. Oltretutto, l'aumento nella richiesta di elettricità insieme al ritardo negli investimenti per migliorare la rete, ha portato a un peggioramento nella stabilità del sistema. In questo scenario, un'imprevista richiesta aggiuntiva, o un'anomalia nella rete di distribuzione, può portare a dei guasti che causano blackout.

Per facilitare la risoluzione dei problemi e la manutenzione delle risorse, le aziende hanno introdotto varie funzioni per comandare e controllare la rete. Un esempio ampiamente diffuso è il sistema *Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)* [1]. Il modello SCADA comprende i seguenti componenti: una *Human-Machine Interface (HMI)*, uno SCADA Master Server supervisore, un set di *Remote Terminal Unit (RTU)* e un *Programmable Logic Controller*, un set di *Intelligent Electronic Device (IED)*, e una rete di comunicazione che abilita la comunicazione tra il Master supervisore e gli RTU e tra gli RTU e gli IED [2]. Un esempio di rete elettrica di tipo SCADA è rappresentato nella Figura 2.4.

Sistemi come questo permettono però solo un controllo limitato, e la rete di distribuzione continua a non supportare un controllo real-time. Questa situazione è diffusa in tutte le regioni del mondo: per esempio, in America del Nord, dove è presente una delle reti elettriche più avanzate al mondo, meno di un quarto della rete di distribuzione è fornita di sistemi informatici e di telecomunicazione [1].

Quindi la situazione è che oggi il sistema elettrico in tutto il mondo invecchia, è inefficiente, altamente inquinante e incapace di soddisfare le future esigenze

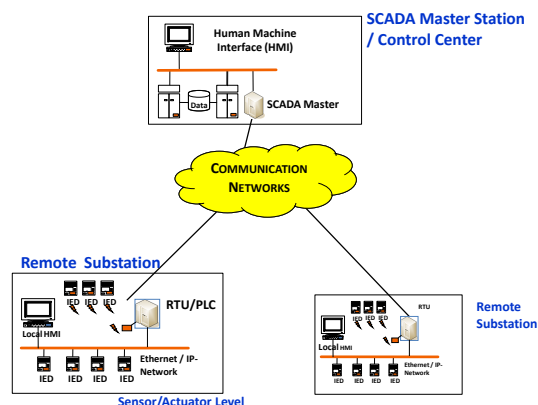


Figura 2.4: Rete elettrica SCADA [2]

energetiche senza modifiche operative e ingenti investimenti di capitale [5].

2.2.2 Evoluzione della rete elettrica

Quasi tutte le interruzioni di corrente e i disturbi (circa il 90%) avvengono nella rete di distribuzione: è da qui quindi che ha inizio l'evoluzione verso le smart grid.

I più recenti investimenti si sono focalizzati soprattutto nei dispositivi di misurazione, cioè nei contatori elettrici. Il primo passo a riguardo è stato l'utilizzo dei dispositivi AMR (*Automated Meter Reading*) nella rete di distribuzione; gli AMR permettono alle società di leggere da remoto i dati e gli stati dei consumi e gli eventuali allarmi dei servizi locali dei clienti. Si è capito presto però che gli AMR non possono risolvere tutti i problemi presenti nella rete elettrica, soprattutto la gestione dal lato cliente. Infatti il sistema di comunicazione implementato da tali dispositivi è unidirezionale; la capacità degli AMR è quindi limitata al fatto di accedere ai dati del contatore, senza però lasciare agli utenti la possibilità di gestire i propri consumi. Gli AMR non supportano dunque completamente il passaggio alle smart grid.

Gli AMR sono stati quindi abbandonati; le aziende hanno spostato il loro interessi e investimenti verso dei nuovi dispositivi: gli AMI (*Advanced Metering Infrastructure*). Gli AMI permettono alle società una comunicazione bidirezionale con i contatori, in modo da abilitare anche la capacità di modificare i parametri dei servizi forniti ai clienti. In altre parole questi nuovi dispositivi permettono alle aziende di raggiungere i propri obiettivi nella gestione dei carichi.

L'affermazione degli AMI ha contribuito all'evoluzione della rete verso le smart grid. Infatti, uno dei principali fattori nella scelta degli AMI è se questi implementino o meno l'eventuale compatibilità con le future tecnologie delle Smart Grid.

Il prossimo passo verso le smart grid è quello di sfruttare in modo corretto l'infrastruttura AMI per implementare una strategia distribuita di gestione e controllo sulla rete elettrica.

L'evoluzione delle smart grid passerà quindi attraverso l'integrazione di strutture intelligenti chiamate microgrid. Le microgrid sono definite come reti interconnesse di sistemi energetici distribuiti (carichi o risorse) che possono funzionare sia collegati che separati dalla rete elettrica. Le smart microgrid integrano i seguenti elementi:

- Incorporano centrali elettriche in grado di soddisfare la domanda locale di energia e di riimmettere l'energia non utilizzata nella rete. Centrali di questo tipo sfruttano fonti di energia rinnovabile (vento, sole, ...). Alcune microgrid sono equipaggiate anche di centrali in grado di recuperare il calore disperso; i sistemi che implementano questa funzionalità sono denominati CHP (Combined Heat and Power).
- Forniscono servizi a molteplici tipi di carichi (residenziali, industriali, d'ufficio).
- Utilizzano capacità di immagazzinamento locale e distribuito, in modo da ottimizzare le performance delle fonti di energia rinnovabile.
- Incorporano contatori intelligenti e sensori in grado di misurare vari parametri (potenza attiva, potenza reattiva, tensione, corrente, ...).
- Incorporano un'infrastruttura di comunicazione che permette ai componenti della rete di scambiarsi informazioni e comandi con sicurezza ed affidabilità.
- Incorporano carichi, contatori ed elettrodomestici in grado di comunicare il proprio stato e di accettare i comandi per regolare i propri servizi in base ai bisogni di clienti o società.
- Incorporano un "core" intelligente, che appare al lato utente sotto forma di applicazione di gestione, che permette di controllare e dare istruzioni a tutti i nodi della rete [1].

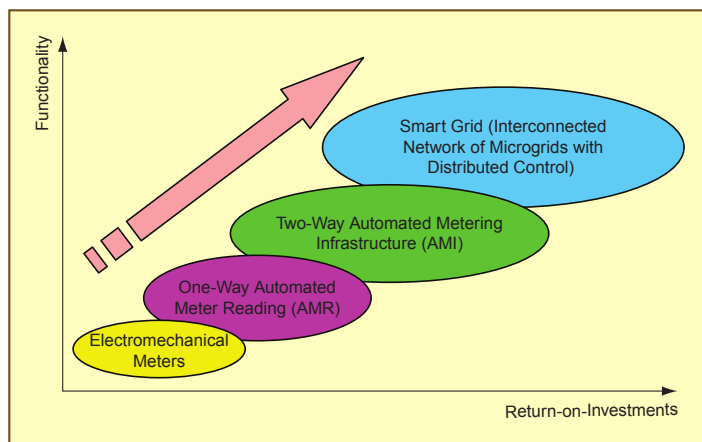
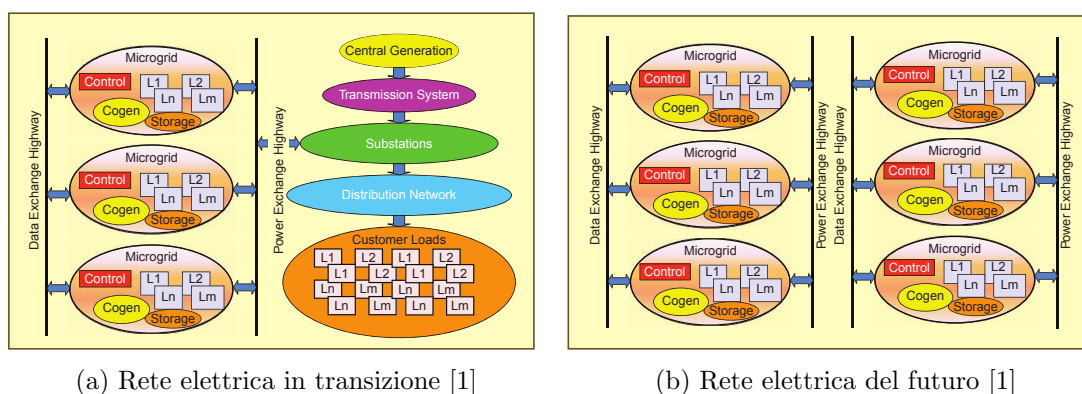


Figura 2.5: Evoluzione dei dispositivi [1]



(a) Rete elettrica in transizione [1]

(b) Rete elettrica del futuro [1]

Figura 2.6: Evoluzione rete elettrica

La Figura 2.5 mostra l'evoluzione dei dispositivi utilizzati nelle reti elettriche.

2.2.3 Coesistenza tra due generazioni di rete elettrica

Inizialmente le smart grid non andranno a sostituire completamente la rete elettrica tradizionale; nell'immediato futuro si assisterà piuttosto ad una coesistenza tra la vecchia e la nuova rete, con funzionalità e dispositivi che saranno adattati gradualmente alla nuova tecnologia. In un futuro non troppo distante si prevede che le smart grid saranno composte dall'integrazione di più microgrid, come viene mostrato dallo schema di Figura 2.6b. Mentre la rete di transizione sarà invece una soluzione ibrida tra rete tradizionale e microgrid, come mostrato dalla Figura 2.6a.

Il passaggio dalla rete elettrica tradizionale alle smart grid non è tuttavia un'operazione senza difficoltà; i problemi più importanti si incontrano nell'integrare i vari dispositivi, funzionalità e sistemi nella nuova rete. Infatti, l'assenza di protocolli e standard universali che assicurino un linguaggio comune a tutti i componenti rappresenta un grosso ostacolo.

La maggiore difficoltà incontrata dalle aziende nel passaggio alle smart grid però non è l'assenza di tecnologie, che anzi si stanno sviluppando velocemente, ma piuttosto il fatto che queste nuove tecnologie non sono ancora state testate in un ambiente ad ampia scala che rispecchi le reti elettrica reale. Quindi, data la grande responsabilità che le società hanno nel fornire i servizi ai clienti, esse non si possono avventurare senza un'adeguata preparazione e senza considerare i possibili rischi, in queste nuove soluzioni [1].

Si può concludere, prendendo spunto da [2], che la Smart Grid ad oggi è, più che un progetto vero e proprio, solamente una “visione”, che necessita di passi avanti per poter essere implementata effettivamente.

Capitolo 3

Power Line Communications (PLC)

In questo capitolo faremo un'introduzione su quale è stato lo sviluppo delle tecnologie PLC nelle varie classi (UNB, NB e BB), dopo aver fornito una definizione generale dello standard [2], [8]. Dopodiché andremo ad analizzare il canale PLC, basandoci su [9]; come vedremo si dimostrerà molto diverso dai modelli di canale rappresentati da altri standard di comunicazione. Questo comportamento atipico è dovuto anche ai tipi di rumore presenti nel canale PLC, come si vede in [9], [10]. Per completare la caratterizzazione, andremo ad analizzare alcuni schemi di modulazione. Infine, concluderemo il capitolo analizzando l'implementazione delle PLC sulle Smart Grid, ai vari livelli di rete elettrica, e cercando di capire quale tecnologia PLC sia la migliore soluzione per le applicazioni Smart Grid, prendendo spunto da [2].

3.1 Definizione di Power Line Communications (PLC)

La Power Line Communication (PLC) è una tecnologia di comunicazione che permette di trasmettere dati sui cavi della rete elettrica esistente. Questo significa, che sfruttando questa tecnologia, si potrà contemporaneamente portare energia ai dispositivi e implementare opzioni di comando e gestione, attraverso i cavi elettrici.

Le PLC possono essere divise in tre diverse classi:

- *Ultra Narrowband (UNB)*: questo tipo di tecnologie lavorano a bassissimi data rate (~ 100 bps) nel campo delle Ultra Low Frequency (0.3-3 kHz) o nella parte superiore delle Super Low Frequency (30-300 Hz). Riescono a raggiungere distanze molto lunghe, anche superiori a 150 km. Le UNB-PLC sono una tecnologia già “matura”, che viene implementata da almeno due decenni in campo pratico, ma purtroppo sono di uso proprietario.
- *Narrowband (NB)*: sono le tecnologie che operano nelle bande di frequenza VLF/LF/MF (3-500 kHz); in questo range sono incluse la banda europea CENELEC (3-148.5 kHz), la banda americana FCC (10-490 kHz), la banda giapponese ARIB (10-450 kHz) e la banda cinese (3-500 kHz). Le NB-PLC possono essere a loro volta suddivise tra:
 - *Low Data Rate (LDR)*: tecnologie single-carrier con capacità di data rate di pochi kbps.
 - *High Data Rate (HDR)*: tecnologie multicarrier capaci di data rate che vanno dalle decine di kbps a 500 kbps.
- *Broadband (BB)*: sono le tecnologie che operano alle frequenze di tipo HF/VHF (1.8-250 MHz) e raggiungono valori di data rate a livello fisico che variano tra qualche Mbps a qualche centinaio di Mbps.

Per quanto riguarda le NB-PLC, nelle diverse regioni del mondo ci sono differenti allocazioni della banda di frequenza. Le principali organizzazioni che regolano l'uso delle bande in frequenza sono:

- CENELEC: European Committee for Electrotechnical Standardization
- ARIB: Association of Radio Industries & Businesses
- EPRI: Electric Power Research Institute
- FCC: Federal Communications Commission

La Tabella 3.1 riporta le frequenze rese disponibili per le NB-PLC da queste organizzazioni.

Un'altra divisione che può essere fatta è tra PLC su linee a corrente alternata (AC) e PLC su linee a corrente continua (DC); la maggior parte delle società si sta comunque indirizzando verso le Power Line Communications su linee AC.

3. POWER LINE COMMUNICATIONS (PLC)

Regione	Organizzazione	Banda di frequenza [kHz]
Europa	CENELEC	3-95
		95-125
		125-140
		140-148.5
Giappone	ARIB	10-450
Cina	EPRI	3-90
		3-500
USA	FCC	10-490

Tabella 3.1: Bande di frequenza disponibili nelle varie regioni

3.2 Storia di PLC

La comunicazione su power lines (PL) è una vecchia idea, che ebbe inizio nei primi anni del 1900. Da allora le compagnie hanno sfruttato questa tecnologia per implementare controllo e gestione remota dei dispositivi, usando inizialmente soluzioni *single carrier narrowband (NB)*, che lavoravano a frequenze basse e con data rate massimi di qualche kbps. Con il passare del tempo, sono nate altre soluzioni, come le PLC broadband (BB) che operano ad alte frequenze (2 – 30 MHz) e raggiungono data rate di 200 Mbps. Negli ultimi anni l'interesse delle industrie si è spostato verso le cosiddette “high data rate NB-PLC”, che si basano su schemi multicarrier e lavorano a frequenze tra i 3 e i 500 kHz.

Le prime applicazioni PLC implementate dalle industrie riguardavano le comunicazioni di dati e voce nelle linee ad alta tensione. Le linee dell'alta tensione cominciarono ad essere usate come mezzo di comunicazione per la voce a partire dal 1920.

Quando cominciarono ad essere introdotte le comunicazioni digitali, le tecnologie PLC furono usate per applicazioni di controllo e di misurazione, raggiungendo però data rate di solo qualche centinaio di bps.

Un altro campo in cui le industrie si interessarono inizialmente per le PLC è il controllo dei carichi, che permette quindi di abilitare o meno un dispositivo al consumo di energia. Le società cominciarono ad usare il *Ripple Carrier Signaling*

per controllare i picchi di richiesta di energia dal 1930.

3.2.1 Ultra Narrowband e Narrowband PLC

Le Ultra Narrowband PLC (UNB-PLC) sono state sfruttate negli ultimi vent'anni per fornire applicazioni AMR/AMI: due soluzioni proposte sono il *Turtle System* e il *TWACS*. Entrambe utilizzano disturbi di tensione per comunicazioni dalla sotto-stazione al contatore, e disturbi di corrente per comunicazioni dal contatore alla sotto-stazione. Il *Turtle System* è usato soprattutto per applicazioni AMR, mentre il *TWACS* viene utilizzato in applicazioni AMI e DR.

Per quanto riguarda le PLC Narrowband, c'è stata una richiesta sempre più forte di elevati data rate: in Europa, questo ha portato CENELEC a emettere nel 1992 lo standard EN 50065, che permette le comunicazioni su rete elettrica di distribuzione a bassa tensione, in un range di frequenze da 3 kHz a 148.5 kHz. Lo standard definisce quattro bande:

- A (3 – 95 kHz): riservato esclusivamente a società elettriche.
- B (95 – 125 kHz): disponibile per qualunque applicazione.
- C (125 – 140 kHz): sistemi di in-home networking con protocollo Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA).
- D (140 – 148.5 kHz): sistemi di allarme e sicurezza.

In altre nazioni, le norme sono diverse. Per esempio, in USA e in Asia l'uso fino a frequenze di 500 kHz è permesso da FCC e ARIB. FCC e ARIB, a differenza di CENELEC, non forniscono però una banda esclusiva per le società; in questo modo chiunque può utilizzare tutti i 500 kHz di banda. Inoltre non implementano un protocollo di coesistenza, come accade invece nella banda C di CENELEC.

3.2.2 Broadband PLC

Le Broadband PLC (BB-PLC) sono state usate inizialmente per applicazioni Internet, per poi spostarsi verso il campo dell' *Home Area Network* (HAN).

Le prime ricerche su applicazioni Internet con BB-PLC in Europa cominciarono per conto di Nortel and Norweb Communications, Siemens e Ascom verso la fine degli anni '90, senza ottenere però risultati soddisfacenti. L'European

Community finanzia un progetto pluriennale denominato *The Open PLC European Research Alliance* (OPERA), che sta ottenendo i migliori sviluppi nel campo dell'accesso Internet per le tecnologie BB-PLC.

Gli interessi delle società del settore, date le difficoltà nell'ottenere buoni risultati nelle applicazioni Internet, hanno iniziato a spostarsi verso le *in-home application* nei primi anni 2000. Nell'ultimo decennio varie compagnie hanno lavorato in questo settore, tra cui HomePlug Powerline Alliance (HomePlug), Universal Powerline Association (UPA), High Definition Power Line Communication (HD-PLC) Alliance, and The HomeGrid Forum, ottenendo data rate a livello fisico sempre crescenti, da 14 Mbps, a 85 Mbps, fino a raggiungere i 200 Mbps.

3.3 Caratterizzazione del canale PLC

In questa sezione, andremo a studiare il canale usato per le comunicazioni PLC; per prima cosa cercheremo di fornire un modello per il canale di trasmissione, per poi definire un modello di rumore e discutere i vari tipi di modulazioni possibili da implementare nella Power Line Communications.

3.3.1 Modello di canale

Una delle più affascinanti possibilità di utilizzo delle PLC riguarda il cosiddetto "last mile", cioè le linee a bassa tensione che collegano le sottostazioni di energia elettrica agli utenti finali. Questo campo di sviluppo non è però privo di difficoltà: per esempio, la rete elettrica presenta molte ramificazioni che degradano la qualità del segnale per via del gran numero di riflessioni. Un altro esempio è rappresentato dai forti effetti di cross-coupling tra i cavi elettrici.

Un tipico esempio di rete di accesso a bassa tensione presente in Europa è rappresentato nella Figura 3.1. Il canale della rete elettrica può essere visto come una struttura a stella in cui ogni braccio porta a un utilizzatore. Questa tipologia di rete porta a varie riflessioni che peggiorano la qualità dei segnali ad alta frequenza, portando ad un canale selettivo in frequenza; tale comportamento è rappresentato dai "notch" del grafico della risposta in frequenza di Figura 3.1. In aggiunta, anche l'attenuazione dipendente dalla frequenza deve essere considerata. Anche questo effetto dipende dalla topologia di rete e si sovrappone al

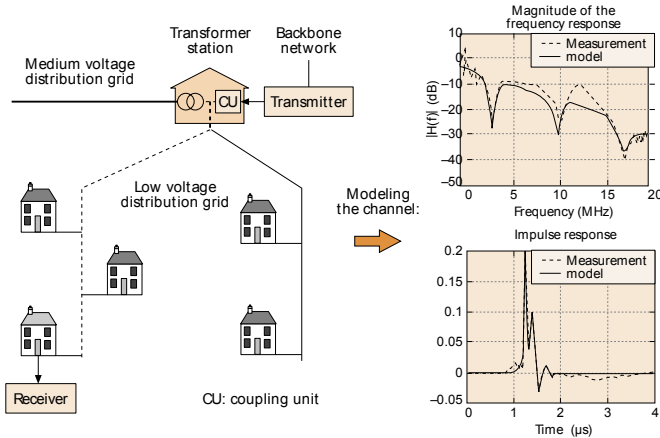


Figura 3.1: Esempio di rete di accesso a bassa tensione [9]

comportamento selettivo in frequenza. Infatti, in tutti i collegamenti della rete elettrica si può osservare una caratteristica “low-pass”.

L’approccio più corretto per descrivere il canale di trasmissione è dunque quello basato sulla propagazione multipath. Almeno due modelli di questo tipo sono stati proposti.

Il primo descrive la risposta impulsiva del canale come la sovrapposizione di N impulsi di Dirac, che rappresentano la sovrapposizione dei segnali da N percorsi differenti. Ognuno di questi impulsi è moltiplicato per un fattore ρ_i e ritardato di un tempo τ_i . Il fattore ρ_i rappresenta il prodotto tra i coefficienti di riflessione e di trasmissione lungo ogni percorso. Questo modello di canale rappresenta la funzione di trasferimento in questo modo:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \rho_i e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (3.1)$$

Questo tipo di modello permette di riprodurre realisticamente i notch della funzione di trasferimento del canale e quindi è adatto a descrivere canali “indoor” dove le caratteristiche “low-pass” del canale non sono rilevanti.

Per i canali che invece mostrano un comportamento “low-pass”, è stato proposto un modello adattivo che contiene un fattore di attenuazione aggiuntivo. Questo modello rappresenta la sovrapposizione di segnali provenienti da N percorsi diversi, ognuno dei quali è caratterizzato da un weighting-factor g_i e dalla lunghezza d_i . L’attenuazione dipendente dalla frequenza è modellata dai parametri a_0 (offset di attenuazione), a_1 (incremento di attenuazione) e k (esponente

3. POWER LINE COMMUNICATIONS (PLC)

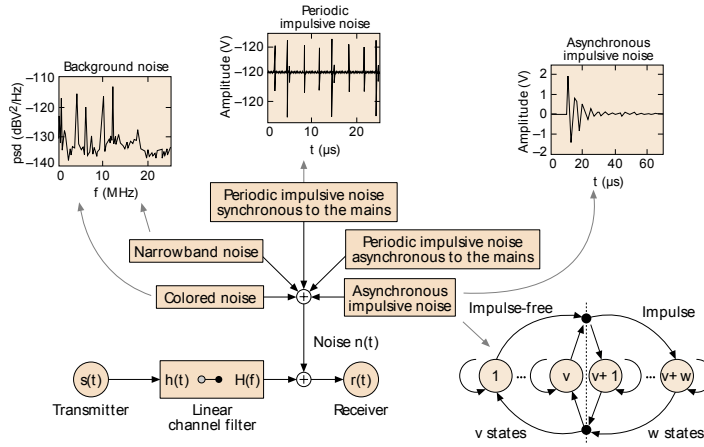


Figura 3.2: Rumori su Power Line [9]

di attenuazione). La funzione di trasferimento del canale PLC è:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i e^{-(a_0 + a_1 f^k) d_i} e^{-j2\pi f \frac{d_i}{v_p}} \quad (3.2)$$

Nell'equazione (3.2) il primo esponenziale rappresenta l'attenuazione e il secondo la componente dovuta alle riflessioni; v_p è invece la velocità di propagazione. Un valore tipico del numero di percorsi N è compreso tra i 5 e i 50.

3.3.2 Modello di rumore

Per le PLC non è importante solamente il modello di canale di trasmissione; anche il modello di rumore gioca un ruolo fondamentale in questo standard di comunicazione. Infatti, a differenza di altri canali di comunicazione, il canale della rete elettrica non può essere descritto come un canale *Additive White Gaussian Noise* (AWGN). L'insieme di interferenze che caratterizzano il canale PLC è molto articolato: non è presente solo un rumore colorato di sottofondo, ma anche interferenze narrowband e diversi tipi di disturbi impulsivi. La Figura 3.2 descrive lo scenario del rumore nella rete elettrica.

I rumori che caratterizzano il canale PLC possono essere quindi separati in quattro classi principali: rumore colorato, rumore narrowband, rumore impulsivo sincrono e rumore impulsivo asincrono.

- *Rumore colorato*: questo tipo di rumore è caratterizzato da una power spectral density (psd) relativamente bassa, che decresce all'aumentare della

frequenza. Può essere considerato come la somma di più fonti di rumore bianco, e può essere tempo variabile.

- *Rumore narrowband*: è dovuto principalmente a dei segnali sinusoidali modulati. Questo tipo di interferenza è generato da stazioni radio broadcast e da onde corte nel range di frequenza di 1-22 MHz. Il livello di interferenza varia più volte durante il giorno.
- *Rumore impulsivo sincrono rispetto alla frequenza principale*: questo tipo di rumore impulsivo si ripete solitamente a multipli della frequenza principale (60/50 Hz). Ha una breve durata di qualche microsecondo e una psd che diminuisce al crescere della frequenza. E' generato dagli alimentatori che operano in modo sincrono alla frequenza principale.
- *Rumore impulsivo asincrono rispetto alla frequenza principale*: questo è il tipo di rumore maggiormente dannoso per la trasmissione. La sua durata varia da pochi microsecondi a qualche millisecondo e presenta tempi di inter-arrivo aleatori. La sua psd può essere 50 dB superiore rispetto la psd del rumore di sottofondo. Dunque, a certe frequenze, durante trasmissioni di elevate quantità di dati, è in grado di cancellare dei blocchi di simboli.

3.3.3 Schemi di modulazione

Come abbiamo visto, le proprietà di un canale power line si differenziano in modo consistente rispetto ad altri tipi di canali ben conosciuti; questo porta a prestare particolare attenzione alla scelta dello schema di modulazione da utilizzare per sfruttare al meglio il canale e per garantire una solida resistenza al rumore. In questo capitolo andremo ad analizzare dei possibili schemi presi in considerazione per il canale PLC, che vengono mostrati in Figura 3.3.

Modulazione Single-Carrier

Per le applicazioni a basso costo e a basso data rate, le modulazioni Single-Carrier (per esempio la FSK) possono rappresentare una buona soluzione. Queste modulazioni sono le più basilari, e sono centrate ad una singola frequenza principale f_0 . Le informazioni sono portate attraverso le variazioni di fase, frequenza, o

3. POWER LINE COMMUNICATIONS (PLC)

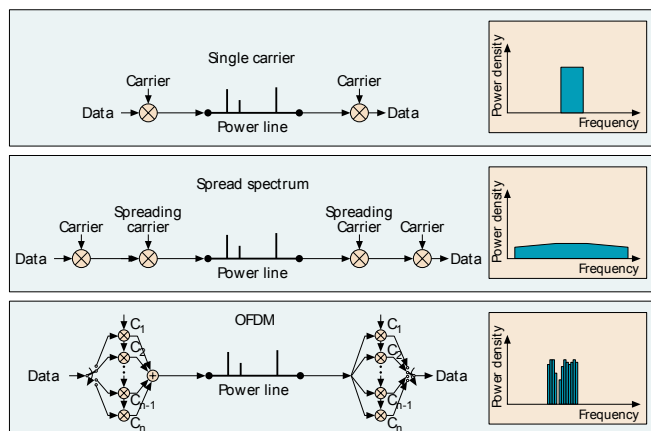


Figura 3.3: Metodi di trasmissione per Power Line Communication [9]

ampiezza della portante. A seconda di queste variazioni, il segnale generato può avere una banda B centrata alla frequenza f_0 più o meno larga.

Un fattore che può caratterizzare uno schema di modulazione è l'efficienza spettrale, il quale indica il numero di bit per secondo che lo schema può inviare con una larghezza di banda di 1 Hz. La modulazione a singola portante non riesce ad ottenere valori di efficienza spettrale maggiori di 1 bit/(s · Hz).

Le performance che si riescono ad ottenere non sono molto efficienti, anche per i notch e le caratteristiche low-pass del canale. Inoltre, già i segnali con data rate molto al di sotto di 100 kb/s, presentano un'interferenza di intersimbolo molto pesante. Pertanto, l'applicazione di equalizzatori di canale molto costosi non può essere evitata, il che cancella completamente il vantaggio della semplicità di tali schemi di modulazione.

Modulazione Spread Spectrum

La tecnica di modulazione Spread Spectrum (SST) risulta resistente alle interferenze dovute al rumore narrowband, e per questo può essere una buona scelta per la PLC. Un ulteriore vantaggio di questa modulazione è la bassa power spectral density dei segnali trasmessi. Inoltre, l'accesso al mezzo è regolato attraverso il Code-Division Multiple Access (CDMA), che permette accesso multiplo senza bisogno di una sincronizzazione globale.

In un sistema di questo tipo viene utilizzata una singola frequenza portante f_0 e un diverso codice di trasmissione $p_i(t)$, ortogonale a qualsiasi altro codice

assegnato, è implementato per ogni partecipante. Al ricevitore il segnale viene recuperato applicando lo stesso codice usato in trasmissione.

Ogni nuovo partecipante porta un aumento del rumore di sottofondo; in questo modo, più partecipanti diventano attivi, più aumenta la probabilità di disturbi. Il parametro fondamentale per valutare l'efficienza del sistema è il *processing gain* (P_G), che è definito come il rapporto tra la larghezza di banda di trasmissione e la larghezza di banda dopo la modulazione.

$$P_G = \frac{B_t}{B_d} \quad (3.3)$$

Nei sistemi CDMA, il valore di *processing gain* deve essere elevato per evitare interferenze e rumore narrowband dagli altri partecipanti. Con un basso P_G , la robustezza alle interferenze e ai rumori viene persa e la qualità del segnale diventa inaccettabile per tutti i partecipanti.

Per elevati valori di data rate e per un alto P_G , è logico aspettarsi una grande larghezza di banda di trasmissione B_t . Questo però rappresenta un problema: infatti, a causa della selettività in frequenza, in trasmissione è presente uno spettro "fessurato", che non permette bande larghe. Questo significa che il vantaggio principale del CDMA viene completamente perso per le comunicazioni power line.

I sistemi che implementano la tecnica CDMA possono essere una possibile soluzione per valori di data rate al massimo di 1 Mbps.

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

Come visto per la modulazione Spread Spectrum, anche l'OFDM presenta una buona robustezza a vari tipi di interferenza e permette l'accesso multiplo. A differenza del SST, però l'OFDM divide lo spettro utilizzato in numerosi sottocanali a banda stretta.

Utilizzando la tecnica OFDM, i dati del canale vengono passati attraverso un convertitore seriale-parallelo, che divide i dati in un numero di sottocanali paralleli. Ad ognuno degli N sottocanali viene applicata una modulazione, così che ci siano N modulazioni, alle frequenze f_0, f_1, \dots, f_{N-1} , chiamate sotto-portanti. Il tipo di modulazione applicata a un singolo sottocanale può essere diversa da quella applicata agli altri, a seconda della qualità del canale. L'attenuazione e il ritardo di gruppo sono costanti per ogni sottocanale, a causa delle proprietà di canale a banda stretta.

3. POWER LINE COMMUNICATIONS (PLC)

Lo schema OFDM offre vari vantaggi rispetto alle altre possibili tecniche. Per prima cosa ogni sottocanale parallelo ha un data rate che è $1/N$ rispetto al data rate originale. Questo fa sì che la durata di simbolo di ciascun sottocanale aumenti di N volte. Inoltre, la parte finale del simbolo viene aggiunta al suo inizio per formare il cosiddetto “prefisso ciclico”, la cui lunghezza è dipendente alla lunghezza del ritardo di percorso. Questo risolve il problema dell’*Inter-Symbol Interference* (ISI): un semplice equalizzatore lineare può bastare per rimuovere l’ISI.

Un altro vantaggio dell’OFDM è la resistenza ai canali selettivi in frequenza. Infatti, i sottocanali in cui il rapporto segnale rumore (SNR) rimane sotto una certa soglia, possono venire “spenti”. I sottocanali che presenteranno al contrario un alto SNR verranno utilizzati per portare più bit, per esempio applicando una modulazione con costellazione di più alto livello. Questa tecnica è chiamata *bit loading*, e per essere implementata ha bisogno di usare un segnale “pilota” per stimare il canale. Nelle PLC, il segnale pilota viene ripetuto periodicamente per la varianza temporale del canale, e l’algoritmo usato è di tipo *rate-adaptive*, cioè massimizza il data rate, mantenendo costante l’error rate.

Per tutti questi motivi l’OFDM è quindi lo schema di modulazione che più di ogni altro è adatto alle applicazioni PLC.

La Tabella 3.2 riassume il confronto tra le varie tecniche.

Schema di modulazione	Efficienza spettrale [b/(s·Hz)]	Max data rate [Mb/s]	Robustezza alla distorsione di canale	Robustezza al rumore impulsivo	Flessibilità e adattabilità	Costi di sistema	Aspetti EMC e norme
Spread Spectrum Techniques	< 0.1	≈ 0.5	-	0	-	-	+
Single-carrier broadband, no equalizer	1 – 2	< 1	-	+	-	++	-
Single-carrier broadband, with equalizer	1 – 2	≈ 2	+	+	0	-	-
Multicarrier broadband, with equalizer	1 – 4	≈ 3	+	0	0	-	0
OFDM	>> 1	> 10	++	0	++	-	+

Tabella 3.2: Confronto tra diversi metodi di trasmissione per PLC

3.4 PLC applicate alle Smart Grid

Sono molti gli esempi dove la tecnologia PLC viene applicata all'idea di Smart Grid. In questo capitolo andremo ad analizzare le varie applicazioni di PLC su Smart Grid nei diversi livelli di tensione, dalle linee ad alta tensione a quelle a bassa tensione.

Per prima cosa definiamo i tre livelli di tensione:

- Alta tensione: tensioni maggiori di 30 kV.
- Media tensione: tensioni comprese tra 1 kV e 30 kV.
- Bassa tensione: tensioni comprese tra 50 V e 1 kV.

3.4.1 PLC per reti ad alta tensione

Le maggiori novità apportate dal concetto di smart grid riguardano soprattutto la rete di distribuzione; anche la rete di trasmissione però sarà interessata in futuro da cambiamenti e da trasformazioni per aggiornare la rete elettrica.

La possibilità di avere una rete di comunicazione sicura e affidabile nel lato trasmissione è molto importante per poter supportare applicazioni come stima dello stato della rete, espansione della rete con stazioni remote e loro gestione, e controllo della rete elettrica.

E' stato stabilito che le PLC lavorino nelle linee ad alta tensione AC o DC nella banda di frequenza di 40-500 kHz, dove riescono a raggiungere data rate di qualche centinaio di kbps. Le PLC sono molto importanti nelle reti HV (High Voltage) perché assicurano una buona affidabilità nella comunicazione, a dispetto di un costo contenuto e alle lunghe distanze raggiunte.

Le linee HV sono caratterizzate da un'attenuazione di canale che presenta un comportamento tempo-invariante; per queste caratteristiche possono essere considerate una buona guida d'onda. Il rumore è rappresentato principalmente dall'effetto corona, e può variare di qualche decina di dB a seconda dell'influenza climatica.

In generale confrontate con le linee a media e a bassa tensione, quelle ad alta tensione rappresentano un mezzo di comunicazione migliore, e con un'attenuazione minore.

3. *POWER LINE COMMUNICATIONS (PLC)*

Le PLC su reti HV hanno raggiunto data rate di 320 kbps in una banda di 32 kHz, e distanze di 100 km. Presentano una efficienza spettrale molto elevata, nell'ordine di 10 bits/s/Hz. Ad oggi l'uso di PLC su reti ad alta tensione è piuttosto diffuso: infatti, migliaia di linee sono state installate in più di 120 paesi, per una lunghezza totale di qualche milione di chilometri. Le PLC su reti HV non è ancora stato standardizzato, ma l'IEC TC57/WG20 ha cominciato a lavorare per aggiornare il vecchio standard per PLC analogici, lo IEC 60495, al fine di includere anche le PLC digitali.

Oltre a fornire connettività per la trasmissione, le PLC su reti ad alta tensioni risultano interessanti anche per l'utilizzo che possono avere nel rilevamento remoto di guasti. Per esempio si riescono a rilevare rotture dell'isolante, rotture di cavi, corto circuiti, ...

3.4.2 PLC per reti a media tensione

Un'importante caratteristica delle future smart grid sarà la capacità di trasferire dati sullo stato delle reti a media tensione. Le informazioni sullo stato degli apparecchi e sulle condizioni del flusso di energia saranno trasferite tra le sottostazioni della rete elettrica. Tradizionalmente, però, le sottostazioni al livello di media tensione non implementano caratteristiche di comunicazione, e quindi la possibilità di sfruttare la rete elettrica esistente attraverso le PLC, senza bisogno di dover installare nuove linee di comunicazione, è una prospettiva molto interessante. Le comunicazioni tra sottostazioni (IED) richiedono una connettività a bassa velocità che corrisponde bene alle caratteristiche delle PLC.

Un'ulteriore applicazione possibile a livello MV (Medium Voltage), è il controllo di guasti, per assicurare la più lunga durata di vita possibile ai cavi elettrici. Le tecniche odierne vengono implementate manualmente sul posto, e sono molto costose. Un esempio sono le tecniche basate sul Time Domain Reflectometry. I progressi tecnologici stanno spingendo verso tecniche diagnostiche remote ed economiche. E' in fase di studio un metodo di monitoraggio remoto su reti MV che sfrutta l'accoppiamento di segnali PLC fino a 95 kHz (banda CENELEC-A).

Le PLC possono essere sfruttate nelle reti a media tensione anche per rilevare fenomeni di *islanding*. Una tecnica che si è rivelata essere molto efficiente ed economica rispetto ad altre tecniche tradizionali è rappresentata dall'uso di Low

Data Rate Narrowband PLC (LDR-NB PLC) per iniettare un segnale nella rete MV.

3.4.3 PLC per reti a bassa tensione

Nel campo delle reti a bassa tensione, le applicazioni PLC su Smart Grid riguardano fondamentalmente quattro punti: AMR/AMI, Vehicle-to-Grid communication, DSM (Demand Side Management) e la gestione di energia in-home.

- *Automatic Meter Reading/Advanced Metering Infrastructure (AMR/AMI)*

I primi tipi di dispositivi AMR/AMI sviluppati erano basati su PLC Ultra Narrowband (UNB-PLC). Nonostante questi sistemi siano caratterizzati da data rate molto bassi, i segnali UNB-PLC si propagano facilmente attraverso i trasformatori di bassa e media tensione. Inoltre, i segnali UNB-PLC sono in grado di percorrere molto lunghe (~ 150 km).

Anche la tecnologia NB-PLC è stata implementata nel campo degli AMI. La capacità dei segnali High Data Rate Narrowband PLC (HDR NB-PLC) di raggiungere valori maggiormente elevati di data rate rispetto a quelli UNB-PLC è compensata dalla minore distanza raggiungibile e, a volte, dall'incapacità di passare i trasformatori. Infatti, non tutte le tecnologie di Power Line Communication offrono la stessa affidabilità nel passare attraverso i trasformatori della rete distribuzione. Il circuito equivalente di un trasformatore contiene varie capacità e induttanze, che producono un comportamento "low-pass". La combinazione di capacità e induttanze genera un comportamento risonante a diverse frequenze, che aggiunge quindi una certa selettività in frequenza. I trasformatori presentano dunque varie finestre a banda stretta con caratteristiche di bassa attenuazione, che vanno da regioni di Low Frequency (LF) a Very High Frequency (VHF). Queste finestre permettono ai segnali NB-PLC, nella maggioranza dei casi, di passare i trasformatori di tensione.

Un problema che può capitare di dover affrontare è la congestione della rete, causata per esempio quando più contatori cercano di accedere al canale allo stesso momento. Gli AMI basati su tecnologia PLC riescono in questi casi

3. *POWER LINE COMMUNICATIONS (PLC)*

ad evitare le congestioni di rete, a differenza di soluzioni wireless, come ad esempio ZigBee o WiFi.

- *Vehicle-to-Grid Communications*

Un PHEV (Plug-in (Hybrid) Electric Vehicles) carica la sua batteria quando è connesso a un EVSE (Electric Vehicle Supply Equipment). La disponibilità di un collegamento di comunicazione tra un veicolo e l'EVSE è il fattore chiave di questo tipo di applicazioni.

Le tecnologie PLC sulle Vehicle-to-Grid Communications presentano alcuni vantaggi rispetto ad altre soluzioni. Il principale è la possibilità di stabilire un'associazione fisica non ambigua tra il veicolo e l'EVSE, che porta dei vantaggi in termini di sicurezza ed autenticazione. Vari test hanno dimostrato che la migliore tecnologia power line applicata alle Vehicle-to-Grid Communications è la NB-PLC.

- *Demand Side Management (DSM)*

Una delle principali applicazioni di DSM nella rete LV (low Voltage) è rappresentata dal Demand Response (DR). Il DR si riferisce all'abilità nel gestire le richieste di energia in base alle variazioni non deterministiche delle fonti di energia come il solare e l'eolico. DR è dunque un sistema in grado di gestire i picchi di richiesta e di fornire ai consumatori un controllo maggiore dell'energia. L'implementazione di DR richiede dei collegamenti tra le società e gli elettrodomestici degli utenti.

Il più grande sistema di controllo del mondo ha funzionato per molto tempo utilizzando tecnologia UNB-PLC. Quindi un sistema di tipo DR/AMI può operare in modo corretto sfruttando una rete di comunicazione a basso data rate.

Le PLC Broadband (BB-PLC) non sempre possono essere sfruttate per le applicazioni DR a causa delle forti attenuazioni che il segnale PLC subisce sulla rete a bassa tensione. Infatti, in molti casi la distanza dei collegamenti diretti tra gli elettrodomestici e i punti di iniezione del segnale da parte delle società (contatori, trasformatori MV/LV) è troppo grande. Le BB-

PLC possono soddisfare solamente i casi di controllo indiretto, per esempio attraverso un gateway.

Le NB-PLC rappresentano invece una buona soluzione per le applicazioni DR sia per controllo remoto diretto che indiretto, soprattutto per il minore *path loss* a basse frequenze.

- *Ambiente In-Home*

Applicando la tecnologia Smart Grid all'ambiente domestico ci si aspetta che cambierà il modo in cui gli utenti gestiscono il proprio consumo di energia.

La casa è un ambiente multi-protocol e multi-vendor. Una grande varietà di soluzioni BB-PLC continua ad essere installata da parte dei consumatori senza tenere conto di una convergenza per le applicazioni Smart Grid. In questo scenario, le BB-PLC sembrano poter essere una buona soluzione per bilanciare efficacemente le diverse caratteristiche delle varie applicazioni installate.

3.4.4 Confronto tra tecnologie PLC

Qual'è la migliore soluzione Power Line Communications applicata al campo delle Smart Grid? UNB, NB oppure BB? La scelta di quale sia la migliore soluzione deve basarsi non solo su argomenti tecnici, ma anche sulle norme e sugli aspetti economici.

L'uso di PLC per Smart Grid porta comunque dei vantaggi in generale. Unisce le funzioni di comunicazione e di sensoristica, così che un dispositivo PLC possa funzionare sia come modem che come sensore. Possono essere usate per rilevare un dispositivo dannoso per la rete ed evitare guasti. Un altro vantaggio è rappresentato dal fatto di utilizzare la rete elettrica esistente come mezzo di comunicazione: questo infatti riduce nettamente i costi. Inoltre, le PLC forniscono alle aziende un mezzo di comunicazione che è sotto il loro diretto e completo controllo.

Le NB-PLC presentano però dei punti di forza rispetto alle tecnologie di tipo BB-PLC, che possono essere riassunte nei seguenti punti:

3. POWER LINE COMMUNICATIONS (PLC)

	$f = 100 \text{ kHz}$	$f = 10 \text{ MHz}$
Low Voltage	1.5-3	160-200
Medium Voltage (OH)	0.5-1	30-50
Medium Voltage (UG)	1-2	50-80
High Voltage	0.01-0.09	2-4

Tabella 3.3: Path loss in dB/km per PLC (OH: overhead, UG: underground)

- *Facilità di aggiornamento alle future versioni:* le soluzioni NB-PLC possono essere implementate facilmente come modem utilizzando un DSP (Digital Signal Processor), cosa che invece non è possibile con i dispositivi BB-PLC.
- *Uniformità:* L'unica banda di frequenze per le PLC disponibile in tutto il mondo è la CENELEC, perchè l'uso di altre bande in alcuni paesi è vietata.
- *Coesistenza:* Le reti NB-PLC possono coesistere con le reti BB-PLC attraverso il FDM (Frequency Division Multiplexing).
- *Ottimizzazione:* Alcune soluzioni di tipo BB non sono progettate appositamente per le smart grid, ma per l'accesso Internet o per l'home networking. Invece le soluzioni HDR NB-PLC sono proposte espressamente per applicazioni Smart Grid.

Anche i valori di *path loss*, presentati dalla Tabella 3.3, mostrano come le soluzioni a banda stretta siano più efficienti rispetto a quelle a banda larga.

Si può quindi affermare che, per la serie di motivi elencati sopra, le NB-PLC sembrano rappresentare una soluzione migliore rispetto alle BB-PLC nelle applicazioni su Smart Grid.

Capitolo 4

Protocolli di PLC

In questo capitolo riassumiamo le caratteristiche di alcuni protocolli proposti per le Power Line Communications, applicabili all'idea delle Smart Grid.

La nostra analisi si è concentrata soprattutto su standard PLC di tipo narrowband, in quanto, come visto anche nel precedente capitolo, sembra essere la tecnologia migliore per essere implementata nel progetto delle Smart Grid.

In particolare ci siamo soffermati su due standard narrowband, PRIME e G3-PLC, che sono stati oggetto di studio per essere implementati nel nostro progetto, basandoci rispettivamente su [11], [12] e su [13], [14], [15], [16], [17]. Tra questi due standard sarà proposto anche un confronto sulle prestazioni.

Prenderemo in considerazione, anche se in modo più superficiale, anche alcuni protocolli a banda larga (broadband), come per esempio HomePlug GreenPHY [19] o IEEE P1901 [4], ed andremo a fare una breve introduzione sui protocolli utilizzati da ENEL nello sviluppo delle smart grid in Italia [20], [21], [22].

4.1 PRIME

Il progetto PRIME (PowerLine Intelligent Metering Evolution) è stato lanciato da Iberdola al fine di definire uno standard aperto di PLC che possa implementare le future caratteristiche della rete, come l'interfacciamento in tempo reale degli utenti e l'evoluzione delle smart grid.

Questo progetto ingloba vari partecipanti: società, costruttori di contatori, progettisti, ecc. I membri principali sono i seguenti:

- Advanced Digital Design

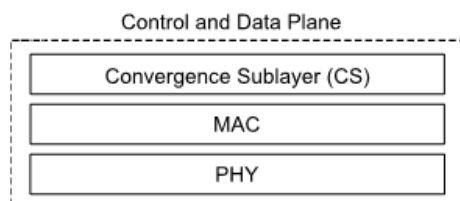


Figura 4.1: Livelli del protocollo PRIME [11]

- Current Technologies International
- Iberdola
- Landis & Gyr
- ST Microelectronics
- USyscom
- ZIV Medida

PRIME è uno standard a livello fisico (PHY) e MAC, aperto, e incline alla ricerca di interoperabilità tra le apparecchiature di operatori diversi. PRIME definisce un sistema di trasmissione PLC a banda stretta implementato sulla rete elettrica a bassa tensione. La Figura 4.1 mostra i livelli di comunicazione proposti dallo standard.

Il livello Convergence Sublayer (CS) associa il traffico di dati alla connessione MAC corretta. Sono definiti più tipi di Convergence Sublayer, al fine di permettere il flusso di diversi tipi di dati.

Il livello MAC provvede a tutte le funzionalità tipiche MAC: accesso al sistema, allocazione di banda, gestione delle connessioni e risoluzione della topologia di rete. È definito per un ambiente Master-Slave connection-oriented, ed è ottimizzato per reti elettriche a bassa tensione.

Il livello fisico (PHY) si occupa di trasmettere e ricevere i MAC PDU (Packet Data Unit) tra i nodi vicini (Neighbor Nodes). Si basa su uno schema di modulazione OFDM nella banda di frequenza CENELEC-A (3-148.5 kHz), e può raggiungere data rate di 130 kbps.

Nei prossimi paragrafi analizzeremo in maniera più dettagliata le caratteristiche dei livelli del protocollo PRIME.

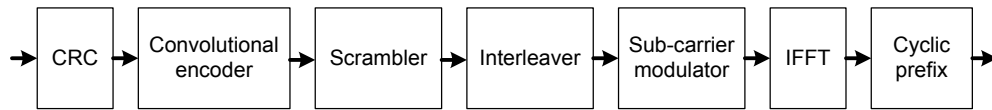


Figura 4.2: Diagramma a blocchi del trasmettitore a livello PHY [12]

4.1.1 Livello fisico (PHY)

Il livello PHY di PRIME è progettato per trasmettere e ricevere su reti elettriche di distribuzione a 50-60 Hz AC. Le entità di livello fisico sfruttano una banda di frequenze che va dai 3 kHz ai 95 kHz, come definito da EN50065-1, e quindi compresa nella banda A di CENELEC. È noto però che le frequenze al di sotto di 40 kHz presentano alcuni problemi nelle linee elettriche a bassa tensione, come per esempio: il carico d'impedenza visto dal trasmettitore è spesso al di sotto di 1Ω , il rumore colorato di sottofondo aumenta alle basse frequenze, il comportamento tempo-variante degli elettrodomestici a basse frequenze per quanto riguarda la funzione di trasferimento e il rumore del canale. Di conseguenza i segnali di livello PHY di PRIME utilizzano solamente la banda di frequenza da 41.992 kHz a 88.867 kHz, cioè hanno una larghezza di banda di 47 kHz, che consiste nella parte migliore della banda A di CENELEC.

Lo schema di trasmissione di PRIME è basato sulla modulazione OFDM, implementata con meccanismi di Forward Error Correction (FEC) e di data interleaving. La rappresentazione del trasmettitore di livello PHY si può vedere dal diagramma a blocchi di Figura 4.2.

Dal lato trasmettitore, il livello PHY riceve in ingresso una MPDU (MAC Packet Data Unit) dal livello MAC e genera in output un pacchetto fisico. Il processo consiste nei seguenti passi. Dopo aver ricevuto il MPDU dal livello MAC, il CRC viene accodato all'header PHY (il CRC per il payload viene calcolato dal MAC layer), e se definito dai livelli superiori viene applicato al pacchetto fisico il codice convoluzionale. Il passo successivo consiste nello scrambler, che viene implementato indipendentemente al fatto che sia stato abilitato il FEC. Se il FEC è abilitato, l'uscita dello scrambler viene passata attraverso l'interleaver, altrimenti il pacchetto PHY finisce direttamente al blocco di modulazione. Lo schema di modulazione utilizzato può essere scelto tra DBPSK, DQPSK e D8PSK. L'ultimo passo nel processo di trasmissione consiste nell'OFDM, costituito dai blocchi IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) e prefisso ciclico.

L'utilizzo della tecnica OFDM rappresenta una delle maggiori innovazioni di PRIME, rispetto alla tradizionale soluzione di single-carrier usata solitamente per le Power Line Communications narrowband. I principali vantaggi di OFDM rispetto agli schemi a singola portante consistono nei miglioramenti riguardo l'attenuazione ad alte frequenze nei canali PL lunghi, le interferenze narrowband e il comportamento selettivo in frequenza dovuto al multipath. Inoltre l'equalizzazione del canale è semplificata, perché l'OFDM utilizza più segnali narrowband modulati a bassi rate, rispetto ad un unico segnale a banda larga modulato a grandi rate. Anche il problema dell'ISI viene gestito in modo efficace dall'OFDM, grazie all'uso del prefisso ciclico.

La decisione di PRIME di utilizzare lo schema di modulazione OFDM risolve tre problemi fondamentali:

- È richiesta una minore precisione per la sincronizzazione del ricevitore; questo porta a una riduzione significativa dei costi.
- Si ottiene una maggiore robustezza al rumore impulsivo.
- Si ottiene un miglior sfruttamento dello spettro; questo è un punto critico per i canali limitati in larghezza di banda, come quello usato da PRIME.

Il segnale PRIME OFDM è diviso in 97 sottoportanti ugualmente spaziate, di cui 96 utilizzate per trasmissione dati e 1 “pilota”. La lunghezza di simbolo è di 2240 μs , di cui 192 di prefisso ciclico. I parametri di un segnale PRIME OFDM sono riassunti nella Tabella 4.1, con clock di 250 kHz.

La Tabella 4.2 mostra invece il data rate di livello fisico durante la trasmissione di payload, e la massima lunghezza raggiungibile dai MSDU per le varie combinazioni di modulazione e codifica.

Dopo aver elencato i parametri del livello PHY, andiamo ora a presentare i vari blocchi del trasmettitore PRIME a livello fisico.

Codificatore convoluzionale

Il meccanismo di codifica utilizzato da PRIME consiste in un codice convoluzionale, che rispetto a un codice a blocchi, presenta per i tipi di rumore che affliggono un canale PLC delle migliori caratteristiche. Si può notare, però, che in certi casi, per esempio con costellazione binaria, i segnali misurati siano buoni anche in

Parametro	Valore
Base Band Clock (kHz)	250
Subcarrier spacing (Hz)	488.28125
Number of data subcarriers	84 (header), 96 (payload)
Number of pilot subcarriers	13 (header), 1 (payload)
FFT interval (samples)	512
FFT interval (μs)	2048
Cyclic Prefix (samples)	48
Cyclic Prefix (μs)	192
Symbol interval (samples)	560
Symbol interval (μs)	2240
Preamble period (μs)	2048

Tabella 4.1: Parametri di un segnale PHY PRIME OFDM

	DBPSK		DQPSK		D8PSK	
	On	Off	On	Off	On	Off
Convolutional Code (1/2)						
Information bits per subcarrier (N_{BPSK})	0.5	1	1	2	1.5	3
Information bits per OFDM symbol (N_{BPS})	48	96	96	192	144	288
Raw data rate (kbps)	21.4	42.9	42.9	85.7	64.3	128.6
Maximum MSDU length with 63 symbols (in bits)	3016	6048	6040	12096	9064	18144
Maximum MSDU length with 63 symbols (in bytes)	377	756	755	1512	1133	2268

Tabella 4.2: Data rate a livello PHY e lunghezza di MDSU per combinazioni di modulazioni e codifica

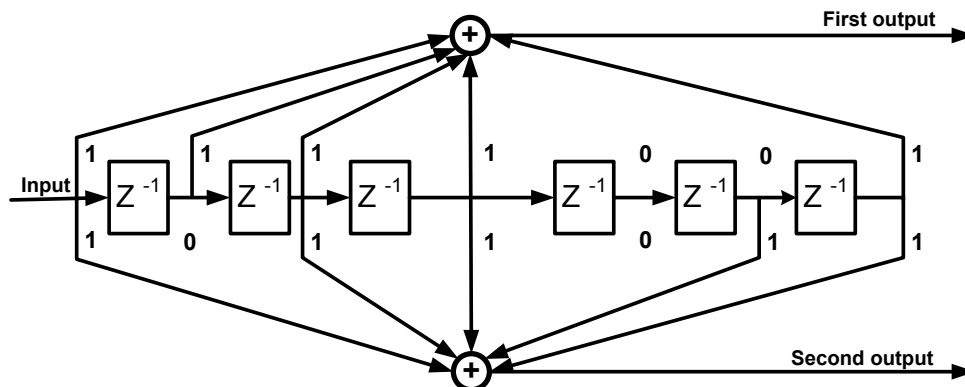


Figura 4.3: Codificatore convoluzionale [12]

assenza di codifica. La scelta di implementare o meno il meccanismo di codifica è quindi opzionale e viene presa dai livelli superiori al PHY.

Il codificatore utilizzato nello standard PRIME è un codificatore con rate binario $1/2$, non ricorsivo, non sistematico, con lunghezza di vincolo (*constraint length*) di $k = 7$ e distanza libera di 10. I polinomi generatori sono 1111001 e 1011011. La Figura 4.3 rappresenta appunto il codificatore convoluzionale appena illustrato.

Scrambler

Lo scrambler, a differenza del codificatore convoluzionale, è sempre utilizzato. Il suo compito è quello di “randomizzare” il flusso di bit al fine di evitare di presentarsi di lunghe sequenze di bit identici. In questo modo il *crest factor* in uscita dall’IFFT viene ridotto. Lo scrambler è quindi un metodo per diminuire il Peak to Average Power Ratio del segnale OFDM.

Interleaver

L’interleaver è applicato se e solo se è stato attivato il codice convoluzionale. Le sottoportanti del segnale OFDM sono ricevute con ampiezze diverse, a causa delle interferenze narrowband di un tipico canale PLC. I “buchi” presenti nello spettro di frequenze possono portare a perdita di affidabilità per alcune sottoportanti; si hanno quindi dei bit errati che si presentano in burst, piuttosto che in modo casuale. L’interleaver viene applicato per mischiare i bit errati prima della deco-

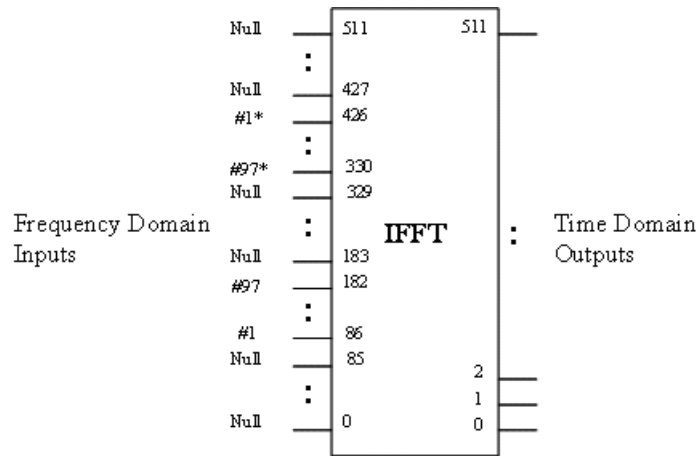


Figura 4.4: Mappatura delle sottoportanti [12]

difica. Al trasmettitore i bit codificati vengono permutati in modo da separare i bit errati.

La payload del PPDU viene modulata come un segnale multicarrier differential phase shift keying, con una sottoportante “pilota” e 96 sottoportanti di dati. L’header viene modulato con la DBPSK con 13 sottoportanti “pilota” e 84 di dati.

Il flusso di bit in uscita dall’interleaver viene diviso in gruppi di M bit. La Figura 4.4 mostra come vengono mappate le 96 sottoportanti nel caso in cui sia usata una IFFT complessa di 512 punti.

Dopo la IFFT il simbolo viene esteso ciclicamente di 48 campioni per formare il prefisso ciclico.

Struttura del pacchetto PHY

Analizziamo adesso la struttura di un pacchetto PHY, che si può vedere in Figura 4.5.

Ogni pacchetto PHY comincia con un *Preamble* di durata 2.048 ms, seguito da una serie di simboli OFDM, ognuno di 2.240 ms. I primi due simboli costituiscono l’*Header* del pacchetto, mentre i successivi M simboli formano il *Payload*. Il valore di M è segnalato dall’Header, e può essere al massimo 63.

Il Preamble è fondamentale per la sincronizzazione, e ha bisogno di avere una buona agilità in frequenza per evitare attenuazioni dovute dalla selettività in frequenza, e eccellenti proprietà di autocorrelazione.

4. PROTOCOLLI DI PLC

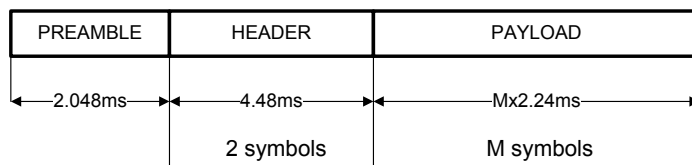


Figura 4.5: Struttura di un pacchetto PHY [12]

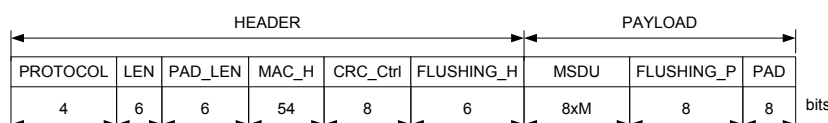


Figura 4.6: Header e payload di una PPDU [12]

La forma d'onda del Preamble è

$$S_{CH}(t) = A \cdot \text{rect}(t/T) \cdot \cos[2\pi(f_0 t + 1/2\mu t^2)] \quad (4.1)$$

dove $T = 2048\mu s$, $f_0 = 41992Hz$ (start frequency), $f_f = 88867Hz$ (final frequency), e $\mu = (f_f - f_0)/T$. A determina la potenza media del preambolo, data da $A^2/2$.

I primi due simboli OFDM seguenti il preamble formano l'header del pacchetto. Ognuno di questi due simboli è composto da 13 sottoportanti pilota e da 84 sottoportanti dati. Le 13 sottoportanti di tipo pilota hanno il compito di stimare l'errore di campionamento iniziale e l'offset di frequenza. L'header è modulato con una DBPSK e trasmette 84 bit per simbolo. La modalità FEC è sempre attivata nella trasmissione dell'header.

La payload del pacchetto può invece essere modulata con una modulazione tra DBPSK, DQPSK, D8PSK, a seconda delle caratteristiche del canale. La modulazione viene scelta dal livello MAC, che valuta gli errori nelle precedenti trasmissioni o il valore di SNR. Per i simboli che compongono il payload è opzionale anche la scelta di abilitare o meno la codifica convoluzionale. Ogni simbolo OFDM di questo tipo è composto da 96 sottoportanti dati e da 1 pilota. Ognuna delle sottoportanti dati ha un bit-load di 1, 2 o 3 bit.

I campi che costituiscono l'header e il payload del PPDU sono riportati in Figura 4.6.

Livello di potenza

Per quanto riguarda i livelli di potenza, PRIME deve rispettare i limiti imposti dalla normativa EN50065-1. PRIME definisce un metodo di misurazione della PSD trasmessa per determinare la conformità: l'amplificatore di potenza deve essere in grado di iniettare un livello di segnale finale di $120dB\mu V_{rms}$ ($1V_{rms}$).

4.1.2 Livello MAC

Un sistema PRIME è composto da sottoreti che presentano una struttura ad albero. I nodi che compongono le sottoreti sono di due tipi: *Base Node* e *Service Node*.

- **Base Node:** Il Base Node è la radice dell'albero e svolge il compito di master node. Gestisce le risorse e le connessioni nella sottorete, fornendo connettività al resto dei nodi. In ogni sottorete deve esserci un solo Base Node, che inizialmente è l'unico nodo della sottorete; gli altri nodi dovranno compiere un processo di registrazione per iscriversi alla sottorete.
- **Service Node:** i Service Node possono essere sia una foglia che un ramo dell'albero. Questi nodi sono inizialmente disconnessi dalla sottorete e, seguendo un processo di registrazione, possono connettersi ad essa. I Service Node hanno due compiti principali: connettersi alla sottorete ed inoltrare i dati dei loro vicini in modo di propagare la connettività.

Un Base Node non può cambiare funzionalità, mentre un Service Node può passare dallo stato "Terminal" allo stato "Switch" e viceversa. Il cambiamento della funzionalità del Service Node avviene attraverso determinati processi. La Figura 4.7 rappresenta i vari stati che un Service Node può implementare e i processi che permettono queste transizioni.

Riassumiamo brevemente le caratteristiche dei tre possibili stati:

- **Disconnected:** Questo è lo stato iniziale di ogni Service Node; in questo stato un nodo non è in grado né di comunicare né di inoltrare traffico di altri nodi vicini. La funzione principale di un nodo Disconnected è quella di ricercare una sottorete nelle sue vicinanze e di provare a registrarsi ad essa.

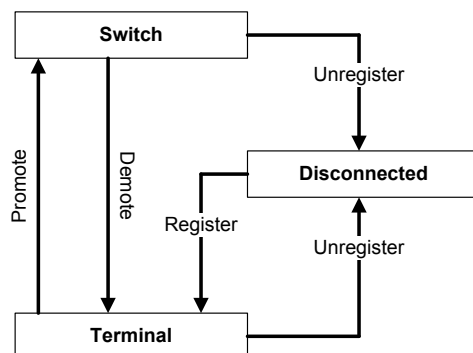


Figura 4.7: Stati di un Service Node [12]

- **Terminal:** In questo stato un Service Node ha la funzionalità di trasmettere traffico, dopo essersi connesso, ma non è in grado di inoltrare il traffico di altri nodi. E' una foglia della sottorete.
- **Switch:** Un Service Node in stato Switch implementa tutte le funzionalità di un nodo Terminal, ma in più ha la capacità di inoltrare dati da e verso altri nodi della sottorete. Nella struttura ad albero rappresenta un ramo.

I processi che regolano i cambiamenti da uno stato all'altro sono elencati sotto:

- **Registration:** È il processo con cui un Service Node viene incluso nella lista dei nodi registrati del Base Node. Dopo il suo completamento un Service Node diventa effettivamente parte della sottorete. Rappresenta la transizione tra gli stati Disconnected e Terminal.
- **Unregistration:** È il processo con cui un Service Node viene rimosso dalla lista nodi del Base Node, e può essere iniziato sia dal Base Node che dal Service Node. Il processo Unregistration porta il Service Node allo stato Disconnected.
- **Promotion:** Questo processo permette a un Service Node di ottenere anche la funzionalità di inoltrare dati di altri nodi, e diventare un ramo dell'albero. Con questo processo un nodo passa dallo stato Terminal allo stato Switch. Naturalmente il processo Promotion non può essere intrapreso da un nodo Disconnected.

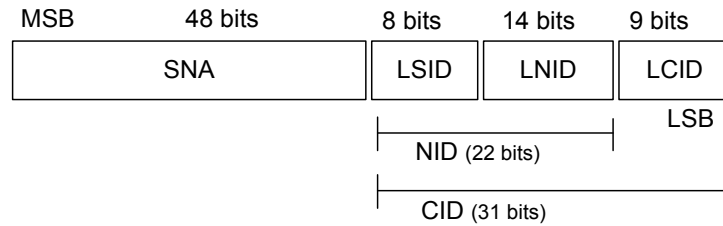


Figura 4.8: Struttura di indirizzamento [12]

- **Demotion:** Rappresenta la transizione da switch a Terminal. Con questo processo un Service Node cessa di essere un ramo dell'albero e perde la capacità di inoltrare traffico.

Indirizzamento

Ad ogni nodo viene assegnato un indirizzo MAC di 48 bit (EUI-48; IEE Std 802-2001), che lo identifica univocamente. L'EUI-48 del Base Node identifica in modo univoco la sottorete, in quanto esiste un solo Base Node per sottorete. L'indirizzo del Base Node prende il nome di *Subnetwork Address* (SNA).

Uno Switch Node è identificato nella sottorete dal *Local Switch Identifier* (LSID), un valore di 8 bit. Il LSID è assegnato dal Base Node durante un processo Promotion. Uno Switch Node è quindi identificato universalmente dall'accoppiata SNA e LSID. Il valore 0 per il LSID è riservato al Base Node.

Durante un processo di registrazione, un nodo riceve il suo *Local Node Identifier* (LNID), lungo 16 bit. Il LNID assieme al SID dello Switch Node attraverso cui un nodo si è connesso alla rete, identifica il nodo nella sottorete. Questa accoppiata di LNID e SID forma un identificatore chiamato NID. SNA e NID identificano univocamente ogni nodo. LNID=0 è riservato per lo Switch Node.

Un *Local Connection Identifier* (LCID) è associato ad ogni instaurazione di connessione. Questo identificatore è lungo 6 bit e definisce una specifica connessione di un nodo. La combinazione di NID e LCID viene chiamata CID e identifica univocamente le connessioni nella sottorete. Ogni connessione è definita universalmente dall'accoppiata SNA e CID. La struttura completa di indirizzamento è rappresentata in Figura 4.8.

Ogni Service Node della sottorete ha inoltre un livello nella struttura. Ai nodi connessi direttamente al Base Node è assegnato il livello 0, mentre il livello degli altri Service Node è quello dello Switch Node a cui sono connessi aumentato di 1.

Compiti del Base Node

Il Base Node è il responsabile nel creare e gestire una sottorete. I suoi compiti nel dettaglio sono:

- **Trasmissione di beacon:** Il Base Node e gli Switch Node trasmettono un beacon in broadcast a tutta la sottorete ad un intervallo di tempo prestabilito. Il Base Node invia un beacon per frame, mentre gli Switch Node trasmettono i beacon con una frequenza decisa dal Base Node.
- **Promotion e Demotion di Terminal e Switch:** Tutte le richieste di promozione devono essere inviate al Base Node, che mantiene una tabella con tutti i nodi switch registrati e assegna un LSID alla nuova richiesta. Il Base Node è anche responsabile delle decisioni di Demotion.
- **Gestione della registrazione dei dispositivi:** Tutte le richieste di registrazione alla sottorete da parte dei nuovi dispositivi vengono inviate al Base Node, che decide se accettarle oppure rifiutarle. Se accetta la richiesta di registrazione, il Base Node assegna al nuovo dispositivo un LNID. Il Base Node gestisce anche i processi di de-registrazione dei nodi.
- **Instaurazione e gestione delle connessioni:** Il Base Node è sempre interrogato per la creazione di una connessione, sia se deve essere un endpoint, sia se deve svolgere compiti di coordinamento.
- **Gestione dell'accesso al canale:** L'uso del canale da parte dei dispositivi è controllato (contention-free) per certi intervalli di tempo e libero (contention-based) per altri. Il Base Node ha il compito di decidere quale meccanismo e per quanto tempo implementarlo, oltre a gestire l'accesso al canale durante il periodo di contention-free.
- **Distribuzione di sequenza random per ricavare chiavi criptate:** Le chiavi criptate sono ricavate da una sequenza random di 128 bit, che il Base Node si occupa di generare periodicamente e distribuire a tutta la sottorete per garantire un'infrastruttura sicura.
- **Gestione di gruppi multicast:** Il base Node ha anche il compito di curare i gruppi multicast nella sottorete e di gestirne i processi.



Figura 4.9: Struttura di un Frame di livello MAC [12]

Accesso al canale

L'accesso al canale nelle sottoreti PRIME include sia meccanismi di Carrier Sense Multiple Access (CSMA/CA) che di Time Division Multiplexing (TDM). Il tempo è diviso in unità di astrazione per l'utilizzo del canale, chiamate "Frame". Ogni Frame è composto da tre sotto-parti, ed è rappresentato in Figura 4.9: la prima parte del Frame è riservata alla trasmissione dei beacon, seguita da un *Shared Contention Period* (SCP) e da un *Contention Free Period* (CFP).

Elenchiamo le caratteristiche delle varie parti del Frame:

- *Beacon*: Le beacon PDU (BPDU) vengono inviate dal Base Node e dagli Switch Node al fine di informare tutti i dispositivi appartenenti alla sottorete sulla struttura del frame per l'accesso al canale. Il Base Node trasmette una beacon per frame, mentre i Service Node trasmettono beacon ad una frequenza stabilita dal Base Node. Le BPDU contengono informazioni sulla struttura e sulla durata del frame, compreso il tempo riservato al SCP e al CFP.
- *Shared Contention Period (SCP)*: È presente in ogni frame con una durata che può variare da frame a frame, e durante questo periodo ogni dispositivo può cercare di accedere al canale liberamente. Eventuali collisioni nell'accesso al canale vengono evitate tramite il meccanismo CSMA/CA.
- *Contention Free Period (CFP)*: Il CFP non è necessariamente presente all'interno di ogni frame. Durante questo periodo, per accedere al canale, i dispositivi devono chiedere il consenso al Base Node, che, a seconda dello stato del canale, decide di assegnare un determinato intervallo di tempo dedicato al singolo dispositivo o di rifiutare la richiesta.

Compiti degli Switch Node

Il Base Node non può comunicare con tutti i nodi della sottorete. Quindi il livello MAC implementa una funzione di switching per estendere la scalabilità e il range della rete. Questa funzione è svolta dagli Switch Node, cioè ogni Service Node che ha terminato un processo di Promotion. Gli Switch Node non devono per forza essere connessi direttamente al Base Node, ma possono essere collegati ad esso attraverso altri Switch Node.

I principali compiti degli Switch Node sono quindi i seguenti due:

- **Trasmissione di Beacon PDU (BPDU):** Ogni Switch Node trasmette un BPDU a intervalli di tempo fissi allo scopo di sincronizzare i nuovi dispositivi e mantenere la sincronizzazione dei nodi già esistenti nella sottorete, e di trasmettere informazioni di controllo ai dispositivi connessi.
- **Inoltro pacchetti:** Gli Switch Node sono responsabili di ritrasmettere i pacchetti da i dispositivi presenti nel loro “dominio” verso il Base Node e viceversa.

Gli Switch Node non implementano funzioni di controllo, come per esempio la registrazione o la gestione di connessioni, che sono lasciate totalmente al Base Node. Questa scelta porta il vantaggio di avere una piccola complessità e di conseguenza un piccolo costo per gli Switch Node.

Ogni Switch Node inoltre mantiene una tabella degli altri Switch Node che sono connessi alla sottorete tramite esso; questa tabella prende il nome di *Switching Table*. La Switching Table viene continuamente aggiornata ed è sufficiente per l’inoltro di pacchetti da e verso i Terminal Node.

Il protocollo PRIME implementa a livello MAC anche uno schema di ritrasmissione per fornire una migliore efficienza. Il meccanismo scelto da PRIME è l’ARQ (Automatic Repeat reQuest) di tipo “Selective Repeat”, che fornisce la migliore efficienza. L’implementazione della funzione di ARQ non è però vincolante per essere conforme al protocollo PRIME. Ogni nodo può implementare o meno tale funzionalità.

Sicurezza

Un’altra funzione del livello MAC è quella di garantire riservatezza, autenticazione e integrità dei dati sfruttando un metodo di connessione sicura e una politica di

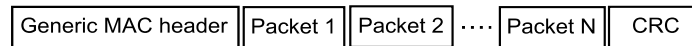


Figura 4.10: Struttura di un GPDU [12]

gestione delle chiavi.

Vengono considerati due possibili profili, a seconda delle diverse necessità di sicurezza che si possono incontrare nelle varie sottoreti.

- *Profilo 0*: Le trasmissioni basate su questo profilo avvengono senza nessun tipo di crittografia.
- *Profilo 1*: Le comunicazioni che sfruttano il Profilo 1 sono fatte con crittografia dati e CRC (Cyclic Redundancy Check) mediante la tecnica AES (Advanced Encryption Standard), che utilizza chiavi di 128 bit.

Struttura del MAC PDU (MPDU)

Ci sono diversi tipi di MAC PDU, ognuno dei quali con scopi differenti.

1. *Generic MAC PDU (GPDU)*

Questo tipo è il PDU più frequente nelle comunicazioni della rete ed è usato sia per scopi di controllo sia per trasmettere dati. La struttura di un Generic MAC PDU è rappresentata dalla Figura 4.10, e comprende un Generic MAC Header, uno o più pacchetti e un CRC per il rilevamento di eventuali errori. L'inclusione di più pacchetti è una funzionalità chiamata *packet aggregation*.

Il Generic MAC Header ha una lunghezza di 3 byte e contiene informazioni su tutti i pacchetti contenuti nel GPDU, come per esempio la direzione della trasmissione, il livello nell'albero del dispositivo che ha trasmesso, un header check sequence di 8 bit, ...

Ogni pacchetto contiene un header e un payload, come si può vedere dalla Figura 4.11.

L'header ha una lunghezza di 6 byte, di cui i primi 4 del primo pacchetto formano con i 3 byte del Generic MAC Header il *MAC Header* dal punto di vista del livello PHY.

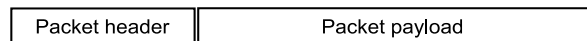


Figura 4.11: Struttura di un pacchetto [12]

2. *Promotion Needed PDU (PNPDU)*

I PNPDU vengono inviati dai Service Node che sono nello stato Disconnected al fine di connettersi alla sottorete. I Terminal Node che ricevono i PNPDU iniziano un processo di promozione, che se accettato li porterà ad essere Switch Node. Una volta diventati Switch, questi nodi permetteranno al dispositivo che ha inviato il PNPDU di registrarsi alla sottorete.

3. *Beacon PDU (BPDU)*

Le BPDU sono trasmesse dal Base Node e dagli Switch Node. Lo scopo delle Beacon PDU è quello di informare tutti i dispositivi su vari aspetti della sottorete, come per esempio: struttura del frame per accedere al canale, profilo di sicurezza, Subnetwork Address (SNA), ... Le BPDU vengono usate dai Service Node anche come meccanismo di sincronizzazione.

4. *Pacchetti di controllo MAC*

Le informazioni di controllo del livello MAC vengono distribuite attraverso i pacchetti di controllo. Esistono vari tipi di pacchetti di controllo che portano informazioni diverse a seconda del tipo. La Tabella 4.3 elenca tutti i tipi di pacchetti di controllo MAC, con una breve descrizione.

Esempio di sottorete PRIME

Andiamo ora a vedere un esempio di indirizzamento dei dispositivi in una sottorete PRIME, rappresentato in Figura 4.12.

Inizialmente, l'unico nodo della sottorete è il Base Node con $NID = (LSID, LNID) = (0,0)$. Tutti gli altri nodi sono disconnessi (4.12a).

Nella seconda fase, tutti i nodi disconnessi cercano di registrarsi alla rete, ma solo le richieste dei nodi B, C, D ed E vengono accettate, e quindi ad essi

viene assegnato un LNID e diventano nodi della sottorete a livello 0 essendo direttamente connessi al Base Node (4.12b).

I nodi F, G e H inviano dei pacchetti PNPDU per connettersi alla sottorete; di conseguenza i nodi B e D iniziano un processo di promozione per divenire Switch ed estendere la sottorete. Ai nodi B e D viene quindi assegnato un SID che useranno per le funzioni di Switch, mentre il NID assegnato loro in fase di registrazione sarà utilizzato per funzionalità di Terminal (4.12c).

Terminato il processo di promozione, i nodi F, G e H possono registrarsi alla sottorete tramite gli Switch Node B e D. Anche a loro, come a tutti i nodi registrati, viene assegnato un LNID. I nodi F, G e H sono nodi di livello 1 perché connessi alla rete attraverso Switch Node di livello 0 (4.12d). La struttura della sottorete è ora completa.

4.1.3 Livello Convergence (CL)

Il Convergence Layer (CL) è suddiviso in due sottolivelli:

- **Common Part Convergence Sublayer (CPCS)**: fornisce un insieme di servizi generici.
- **Service Specific Convergence Sublayer (SSCS)**: contiene servizi specifici di un determinato livello applicazione.

I SSCS sono tanti quanti sono i possibili livelli applicazione, mentre il CPCS è un'unica parte comune.

Ci possono essere quindi diversi CL, a seconda del tipo di traffico che deve essere trasmesso al livello MAC. Il CL può essere di tipo IP (IPv4, IPv6), di tipo IEC 61334-32 o di tipo NULL.

La struttura del livello Convergence di PRIME è proposta nella Figura 4.13.

Common Part Convergence Sublayer (CPCS)

Il solo servizio svolto dal CPCS è la segmentazione e il riassettaggio (SAR): divide le SDU a livello Convergence in segmenti di lunghezza fissata. I segmenti di dati vengono riassetati dal SAR di destinazione prima di essere inviati al livello applicazione.

4. PROTOCOLLI DI PLC

Tipo	Nome pacchetto	Descrizione pacchetto
1	REG	Gestione registrazione
2	CON	Gestione connessione
3	PRO	Gestione promozione
4	BSI	Indicazione su Beacon Slot
5	FRA	Cambiamenti della struttura del Frame
6	CFP	Richieste di Contention Free Period
7	ALV	Keep Alive
8	MUL	Gestione multicast
9	PRM	Gestione robustezza PHY
10	SEC	Informazioni sulla sicurezza

Tabella 4.3: Pacchetti di controllo MAC

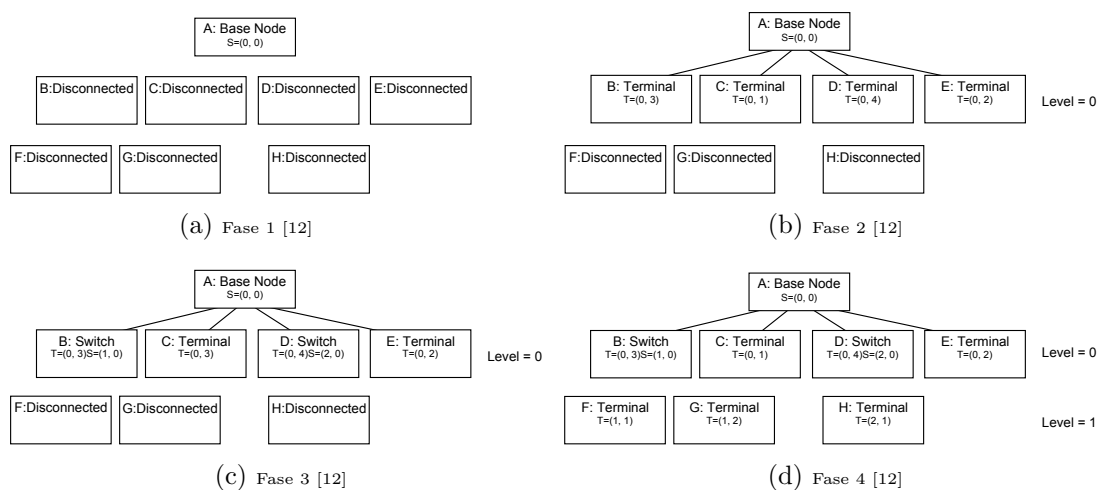


Figura 4.12: Esempio di indirizzamento in una sottorete PRIME

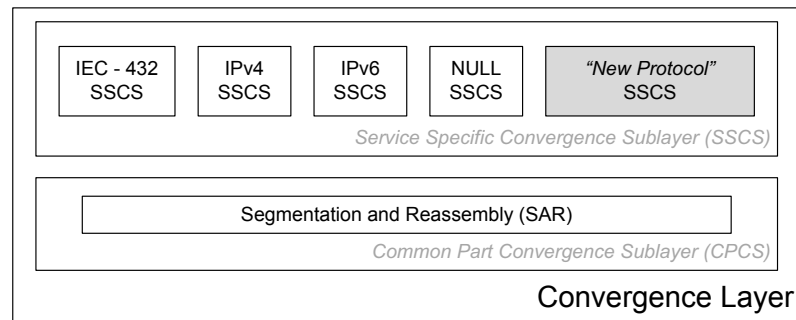


Figura 4.13: Struttura del Convergence Layer (CL) [12]

NULL Service-Specific Convergence Sublayer (NULL SCS)

Il NULL SCS fornisce al livello MAC un SCS trasparente verso i livelli superiori. Questo tipo di SCS è il più semplice possibile e minimizza il sovraccarico. È utilizzato per applicazioni che non necessitano di nessun servizio specifico.

IPv4 Service-Specific Convergence Sublayer (IPv4 SCS)

L'IPv4 SCS fornisce un efficiente metodo per trasferire i pacchetti IPv4 sulla rete PRIME. Alcune convenzioni devono essere seguite:

- Un Service Node può trasferire pacchetti IPv4 sia al Base Node che ad altri Service Node
- Il Base Node svolge il ruolo di router tra la sottorete PRIME e il resto della rete. Può avere anche la funzione di NAT (Network Address Translation).
- È supportato un solo percorso per un indirizzo IPv4 locale.
- Un Service Node può usare un indirizzo IPv4 statico o far ricorso a un DHCP per ottenere un indirizzo IPv4.
- Il Base Node implementa la risoluzione di indirizzi IPv4 in EUI-48. Ogni Service Node registra il suo indirizzo IPv4 e il suo EUI-48 al Base Node, e qualsiasi altro Service Node può richiedere al Base Node di risolvere un indirizzo IPv4 in un EUI-48.
- Il CL implementa il routing di pacchetti IPv4.
- Il CL di tipo IPv4 è di tipo “connection-oriented”.

- L'IPv4 SSCS esegue la compressione dell'header TCP/IPv4; questa funzionalità è opzionale.
- Supporta il broadcasting e il multicasting di pacchetti IPv4.

IEC 61334-4-32 Service-Specific Convergence Sublayer (IEC 3133 61334-4-32 SSCS)

Questo CL fornisce le funzioni per le applicazioni che utilizzano i servizi di IEC 61334-4-32. IEC 3133 61334-4-32 SSCS implementa dei servizi che permettono di far lavorare insieme un protocollo “connectionless” come lo IEC 61334-4-32 e un livello di tipo “connection-oriented” come il MAC di PRIME.

In questo SSCS un Service Node può scambiare dati solo con il Base Node, a differenza dell'IPv4 SSCS.

IPv6 Service-Specific Convergence Sublayer (IPv6 SSCS)

L'IPv6 SSCS fornisce un efficiente metodo per trasferire i pacchetti IPv6 sulla rete PRIME.

Un Service Node può trasferire pacchetti sia al Base Node che ad altri Service Node. Come per L'IPv6 SSCS, anche qui il Base Node ha la funzione di router tra la sottorete PRIME e il resto della rete, oltre ad essere un possibile NAT. Anche gli altri nodi della sottorete possono svolgere il ruolo di gateway.

4.2 G3-PLC

G3-PLC è stato sviluppato per soddisfare le esigenze delle industrie di avere a disposizione uno standard di comunicazione su Power Line, che possa consentire l'implementazione di Smart Grid. G3-PLC favorisce comunicazioni sulla rete elettrica esistente ad alta velocità, altamente affidabili e di lunga portata. Questo protocollo implementa la capacità di attraversare i trasformatori, in modo da ridurre i costi delle infrastrutture, e permette il traffico di pacchetti IPv6, al fine di supportare le comunicazioni su linee elettriche nel futuro.

G3-PLC è un protocollo di Power Line Communication a banda stretta (NB-PLC), e fornisce le migliori prestazioni su reti a media o a bassa tensione. È in grado di coesistere con altri standard come IEC 61334, IEEE P1901 e ITU G.hn.

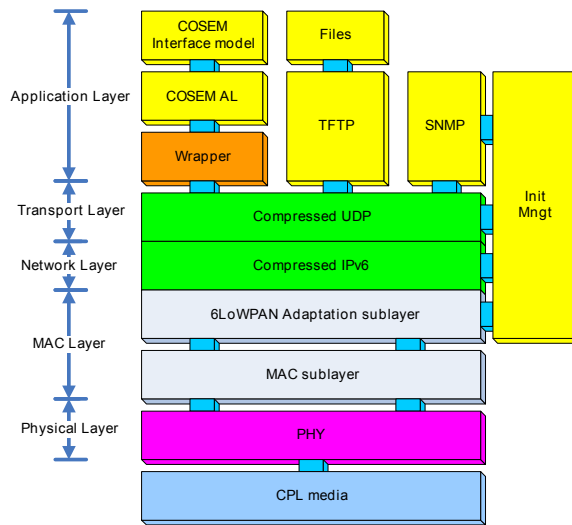


Figura 4.14: Struttura dei livelli del protocollo G3-PLC [16]

Inoltre, può funzionare anche in canali rumorosi, attraverso l'implementazione della modalità "Robust".

Lo stack protocollare di G3-PLC è rappresentato in Figura 4.14.

Il livello Application rispetta gli standard ANSI C12.19/C12.22, IEC 62056-61/62 (DLMS/COSEM). I livelli Transport e Network sono basati rispettivamente su UDP e IPv6.

G3-PLC implementa i livelli fisico (PHY) e MAC. Per quanto riguarda il livello PHY, G3 supporta frequenze dai 10 kHz ai 490 kHz, e quindi è compatibile con CENELEC, ARIB e FCC. È basato su uno schema di modulazione OFDM, con vari tipi di costellazioni (DBPSK, DQPSK). Il data rate massimo raggiungibile è di 33.4 kbps per CENELEC e di 250 kbps per FCC. In questo capitolo ci concentreremo in particolare sulla banda CENELEC.

Il livello MAC è suddiviso in due parti: un *6LoWPAN Adaptation Sublayer* che permette il trasferimento di pacchetti IPv6 sulla rete elettrica, e un *MAC Sublayer* basato sullo standard 802.15.4 che fornisce l'interoperabilità.

Analizziamo ora i livelli del protocollo G3-PLC più approfonditamente.

Livello fisico (PHY)

Il livello fisico si basa su uno schema di modulazione OFDM, che combinato a tecniche avanzate di codifica, permette di far fronte ai molti disturbi presenti in

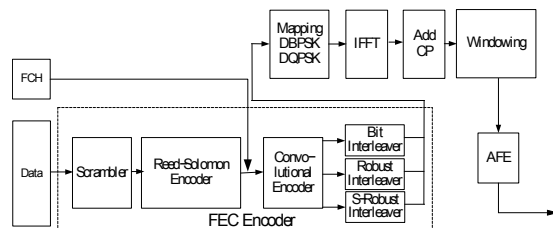


Figura 4.15: Diagramma a blocchi del livello PHY di G3-PLC [14]

un canale Power Line (selettività in frequenza, interferenze narrowband, rumore colorato, rumore impulsivo, ...).

In Figura 4.15 è mostrato il diagramma a blocchi del livello PHY di G3-PLC.

La banda di frequenza viene divisa in un certo numero di sottocanali, che possono essere visti come più portanti indipendenti modulate con PSK. La codifica convoluzionale di rate $1/2$ e la codifica Reed-Solomon forniscono dei bit ridondanti che permettono al ricevitore di recuperare i bit persi a causa dei rumori di sottofondo e impulsivi sul canale. Uno schema di interleaving è utilizzato all'ingresso del decodificatore per diminuire la correlazione del rumore in ricezione.

Il segnale OFDM è generato dal blocco IFFT, e ogni sottoportante può avere una modulazione differente (DBPSK o DQPSK). Un simbolo OFDM è formato aggiungendo, ad ogni blocco in uscita dall'IFFT, un prefisso ciclico di lunghezza sufficiente per evitare interferenze con i successivi simboli OFDM o le sottoportanti vicine.

G3-PLC implementa una tecnica per stimare la qualità del canale: a seconda della qualità del segnale ricevuto, il ricevitore decide quale schema di modulazione sia la migliore soluzione. Inoltre, i sottocanali con un valore basso di SNR vengono rilevati dal sistema, che interrompe la trasmissione di dati su queste sottoportanti.

Il sistema può lavorare in due modalità: *Normal* oppure *Robust*. Nella modalità *Normal* il FEC è composto da un codificatore convoluzionale e da un codificatore Reed-Solomon, mentre in funzionamento *Robust*, oltre ai classici due codificatori, viene implementata anche un Repetition Code (RC). Il RC ripete ogni bit quattro volte, aumentando in questo modo la robustezza delle comunicazioni alle interferenze di canale. Questa scelta porta, però anche a degli svantaggi: infatti il throughput di sistema viene ridotto di un fattore 4.

G3-PLC utilizza la porzione di banda di CENELEC-A che va da 35.9 a 90.6

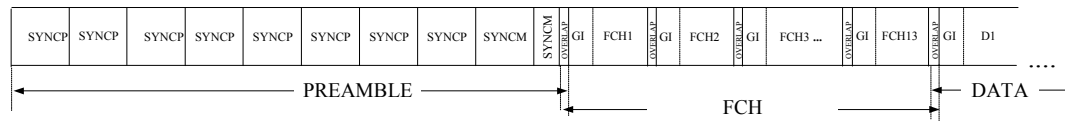


Figura 4.16: Struttura di livello PHY di G3-PLC [14]

kHz. Uno schema OFDM con modulazione DBPSK o DQPSK per portante viene implementato raggiungendo data rate fino a 33.4 kbps. Ogni simbolo OFDM divide i dati da trasmettere in 36 sottocanali.

Un tipico pacchetto di livello PHY è rappresentato nella Figura seguente 4.16.

Ogni pacchetto PHY inizia con un *Preamble*, che viene utilizzato per operazioni di sincronizzazione e di “detection”, ed è formato da 9.5 simboli. Il Preamble è seguito da 13 simboli che compongono il *Frame Control Header* (FCH); il FCH trasporta importanti informazioni sul pacchetto, come per esempio il tipo di pacchetto, il suo indice, la sua lunghezza, . . . I simboli del FCH sono protetti con un CRC5. Infine, dopo Preamble e FCH, vengono trasmessi i simboli che trasportano dati.

G3-PLC fornisce anche la possibilità di inviare un pacchetto di tipo ACK/NACK che consiste nelle sole parti di Preamble e FCH.

I parametri fondamentali del livello PHY del protocollo G3-PLC, sono riassunti nella Tabella 4.4.

Le funzioni svolte dal livello PHY sono elencate di seguito:

- *Frammentazione*: Questa funzione permette di dividere un pacchetto MAC scambiato tra due nodi vicini in più segmenti di lunghezza ottimale alle caratteristiche del collegamento.
- *Generazione di PHY Protocol Data Unit (PHY PDU)*: Ci sono due tipi di PHY PDU: “PHY Data Frame” e “PHY Check Frame”, la prima per la trasmissione dati e la seconda per operazioni di controllo (ACK/NACK).
- *Scrambling/Interleaving/FEC*: Implementano la correzione di errori di trasmissione.
- *Modulazione OFDM*: Divide la banda CENELEC-A in sottoportanti, che vengono modulate con DBPSK o DQPSK.

Parametro	Valore
Base Band Clock (kHz)	400
Frequency band (kHz)	35.9-90.6
Subcarrier spacing (kHz)	1.5625
Number of subcarriers	36
FFT interval (samples)	256
Cyclic Prefix (samples)	30
Preambe length (samples)	9.5
Preambe length (μs)	$715 \cdot 9.5 = 6792$
FCH length (samples)	13
FCH length (μs)	$735 \cdot 13 = 9555$
Data Rate (DQPSK) (kbps)	12.10–34.16
Data Rate (DBPSK) (kbps)	3.271–20.009
Data Rate (DBPSK Robust) (kbps)	2.423–5.592

Tabella 4.4: Parametri del livello PHY di G3-PLC

- *Trasmissione nella banda CENELEC-A*: La trasmissione è adatta per reti a bassa e media tensione.
- *Misurazione del SNR*: Questa funzione permette di dedurre la qualità del canale.
- *Stima del canale*: Permette di determinare le caratteristiche ottimali per la comunicazione tra due nodi vicini.

4.2.1 Livello MAC

I dispositivi che compongono una rete G3-PLC possono essere di due tipi:

- **Full-Functional Device (FFD)**: Un FFD può lavorare in tre diverse modalità: coordinatore della Personal Area Network (PAN), coordinatore, dispositivo. Un FFD può comunicare sia con altri FFD che con gli RFD, ed è un dispositivo che implementa tutte le funzioni MAC del protocollo IEEE 802.15.4.

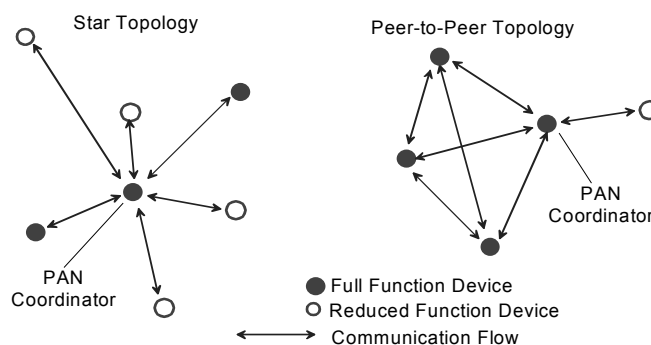


Figura 4.17: Topologie di rete di G3-PLC [17]

- **Reduced-Function Device (RFD):** Un RFD è un dispositivo che implementa solo un insieme ridotto delle funzionalità MAC del IEEE 802.15.4; ha risorse di processo e di memoria limitate, e quindi non può svolgere il ruolo di coordinatore. Un RFD, a differenza del FFD, può comunicare solamente con altri RFD.

La struttura della rete G3-PLC può essere di due tipi, rappresentati in Figura 4.17:

- **Star topology:** Consiste in un Coordinatore di rete centrale attorniato dagli altri nodi della rete, che possono comunicare solo con il Coordinatore. Dunque, per trasmettere un messaggio tra due nodi, il messaggio deve passare attraverso il Coordinatore, che lo inoltrerà al nodo destinatario. Questa topologia di rete ha però degli svantaggi: non ci sono percorsi alternativi in caso di guasto al canale tra il Coordinatore e nodo trasmettitore o ricevitore, e inoltre, il nodo Coordinatore può rivelarsi un collo di bottiglia per il sistema.
- **Peer-to-peer topology:** Anche in questo tipo di struttura esiste un coordinatore di rete. A differenza della struttura a stella però, ogni dispositivo può comunicare con qualsiasi altro nel suo raggio ed il sistema abilita anche una funzione multi-hop per permettere di raggiungere tutti i dispositivi della rete. Ci sono quindi percorsi alternativi tra i vari nodi, che evitano così blocchi del sistema dovuti a guasti sui collegamenti. Una rete peer-to-peer automatizza le operazioni di organizzazione e di “risanamento”.

A livello MAC ogni nodo della rete deve avere una *Neighbor Table*, che contiene le informazioni su tutti i dispositivi nel proprio raggio. Questa tabella possiede le informazioni che servono ai livelli MAC e PHY per instaurare la comunicazione con i nodi vicini. Viene aggiornata ogni volta che un pacchetto viene ricevuto da un nodo vicino.

Come già accennato in precedenza, il livello MAC di G3-PLC si divide in due sottolivelli: il MAC Sublayer e il 6LoWPAN Adaptation Sublayer.

MAC Sublayer

Il MAC Sublayer si basa sul protocollo IEEE 802.15.4, e quindi le sue funzionalità deriveranno da questo protocollo. In G3-PLC i pacchetti beacon non vengono trasmessi in modo periodico, come avviene per esempio per PRIME; vengono trasmessi solo su richiesta, e quindi viene implementata la modalità “non-beacon”. Questo fa sì che non ci sia congestione di traffico dovuto all’invio ciclico di beacon. Un’altra particolarità del protocollo G3-PLC è l’assenza del periodo di Contention Free Period (CFP) nel frame di accesso al canale.

Le funzioni svolte dal MAC Sublayer possono essere riassunte nei seguenti punti:

- *Generazione di MAC Protocol Data Unit (MAC PDU)*: Ci sono tre tipi di MAC PDU: il MAC Data Frame, che aggiunge al pacchetto proveniente dal sottolivello 6LoWPAN dei campi dell’header come il numero sequenziale di pacchetto e gli indirizzi dei nodi mittente e destinatario; Il MAC Check Frame che porta informazioni di controllo come i parametri dello stato del canale, il Beacon Frame, che trasmette le caratteristiche dei nodi attivi sulla rete, come l’indirizzo MAC e il ruolo (coordinatore, dispositivo semplice, ...).
- *Metodo di accesso al canale CSMA/CA*: G3-PLC implementa un CSMA/CA Unslotted per evitare collisioni nelle operazioni di accesso al canale.
- *Trasferimento dati affidabile al nodo vicino (meccanismo ACK)*: Il MAC Sublayer implementa un meccanismo di ACK/NACK per informare il trasmettitore sullo stato della comunicazione.
- *Sicurezza*: Viene utilizzata una crittografia dei dati basato sul metodo AES-128 CCM.

- *Selezione rete (PAN) e indirizzament dei nodi*: Il MAC Sublayer associa due tipi di indirizzo ad ogni dispositivo: un “long address” in formato EUI-64, ricavato dall’indirizzo EUI-48 univoco di ogni dispositivo, e un “short address” di 16 bit assegnato dinamicamente attraverso il protocollo LBP (6LoWPAN Bootstrap Protocol). Il numero di rete (PAN) è assegnato nella configurazione del coordinatore.
- *Active scan dei nodi vicini*: Questa funzionalità è attivata quando un dispositivo viene inizializzato o quando viene disconnesso dalla rete; il dispositivo invia un pacchetto MAC di “active scan” a cui tutti i nodi vicini attivi risponderanno con un Beacon Frame. Una volta ricevute le risposte, il nodo le riordina in base a vari parametri (indirizzo MAC, numero di rete, qualità del segnale, ...) e classifica i nodi in ordine di interesse. Il resto della comunicazione avviene a livello 6LoWPAN e implementa il protocollo LBP, e include autenticazione, distribuzione chiavi, inizio configurazione. La comunicazione LBP viene attivata con il primo nodo nella lista; in caso di fallimento si passa al prossimo nodo nella lista delle risposte.

6LOWPAN Adaptation Sublayer

In questo sottolivello viene tenuta una *Routing Table*, che contiene l’indirizzo del nodo destinazione (short address), l’indirizzo del prossimo hop (short address), lo stato del percorso e il tempo di vita.

Le funzioni del 6LoWPAN Adaptation Sublayer sono:

- *Compressione di Internet e Transport header*: Il sottolivello 6LoWPAN può comprimere gli header dei pacchetti dei livelli Internet a Transport, come mostrato nell’esempio di Figura 4.18.
- *Frammentazione*: Questa funzione permette di dividere un pacchetto Ipv6 in segmenti più piccoli e più adatti al trasferimento su PLC.
- *Generazione di 6LoWPAN PDU*: Ci sono due tipi: il 6LoWPAN Data Frame, che aggiunge vari campi di header al pacchetto Ipv6, e il Check Frame che serve per implementare i protocolli LBP e LOAD (Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing).
- *Riordinamento dei pacchetti*.

- *Trasferimento dati end-to-end affidabile (meccanismo ACK).*
- *Ritrasmissione di pacchetti MAC (unicast, multicast, broadcast):* Questa funzionalità si basa sulle informazioni ricavate dalla Routing Table.
- *Routing in modalità Mesh:* Il sottolivello 6LoWPAN calcola il percorso ottimo tra due nodi della rete PLC utilizzando il protocollo LOAD. Spieghiamo questo processo attraverso un esempio, basato sulla Figura 4.19, dove il nodo A vuole trovare il percorso ottimo verso B:
 - Il nodo A manda in broadcast un messaggio RREQ con un costo totale nullo.
 - Tutti i nodi della rete in grado di propagare il messaggio (C, D, E ed F) aggiungono il loro indirizzo di 16 bit al pacchetto e aumentano il costo di percorso del costo del tratto A-x, dove x=C, D, E o F. Se il nodo x ha già un percorso verso B, inoltra il messaggio lungo tale percorso, altrimenti lo invia in broadcast.
 - Il nodo B riceve più messaggi RREQ provenienti da diversi percorsi, che sono memorizzati nel corpo del messaggio. B sceglie il percorso con il minimo costo e invia un messaggio RREP di risposta ad A lungo la stessa tratta.
 - Ogni nodo, quando riceve il messaggio RREP, aggiorna il nodo B nella Routing Table.
- *Sicurezza e configurazione iniziale:* In questo sottolivello sono implementate varie funzioni riguardanti la sicurezza; per esempio, il controllo degli accessi e l'autenticazione, l'integrità, l'anti-replay e la Prevention of Denial Service (DoS), la generazione e distribuzione di chiavi, l'allocazione di short address di 16 bit, sono tutte funzionalità di questo livello. Inoltre, viene anche eseguita la configurazione iniziale dei dispositivi.

4.2.2 Confronto tra PRIME e G3-PLC

Riportiamo, in questo paragrafo, un confronto tra i due protocolli di NB-PLC appena presentati: PRIME e G3-PLC. La Tabella 4.5 presenta appunto i parametri dei due protocolli.

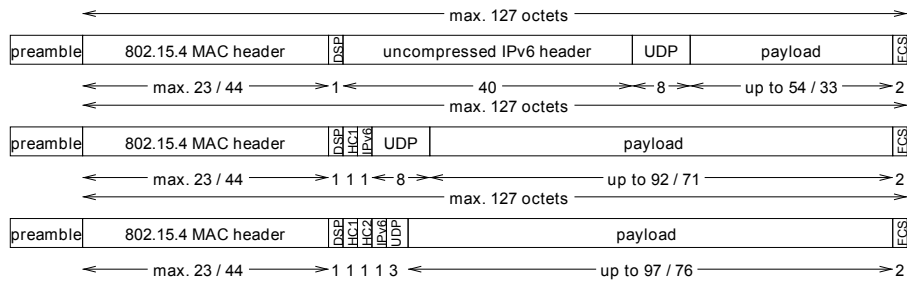


Figura 4.18: Compressione del pacchetto 6LoWPAN [18]

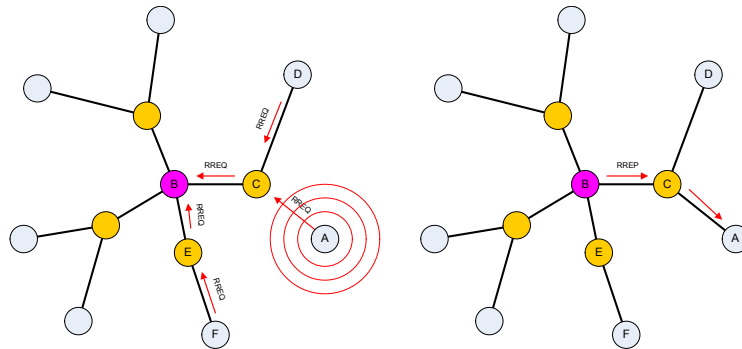


Figura 4.19: Funzionamento del protocollo LOAD per il routing [16]

4.3 HomePlug Green PHY

L'HomePlug Green PHY (HomePlug GP) è un protocollo per PLC BroadBand ed è il risultato del lavoro svolto dallo Smart Energy Technical Working Group e dall'HomePlug Alliance. Lo scopo di questo protocollo è quello di supportare le applicazioni Smart Grid su Home Area Network (HAN), riducendo i costi e i consumi di potenza del precedente protocollo di HomePlug (HomePlug AV) e nello stesso tempo mantenendone le capacità di interoperabilità, affidabilità e copertura. HomePlug GP è in grado di convivere con il protocollo IEEE P1901, oltre che con HomePlug AV.

Lo sviluppo di HomePlug GP si basa quindi completamente su HomePlug AV; per questo, prima di andare ad analizzare più in dettaglio il protocollo, andiamo a descrivere brevemente HomePlug AV.

4. *PROTOCOLLI DI PLC*

Parametro	PRIME	G3-PLC
Sampling frequency (kHz)	250	400
Frequency range (kHz)	42-89	10-490
Data Rate range (kbps)	21-128	2.4-34
Symbol length (μs)	2240	735
Preamble length (μs)	2048	6792
Header length (μs)	4480	9555
PHY PDU length (ms)	8.77	17.27
Bit per symbol	48-288	2-25
Number of subcarriers	97	36
Subcarrier spacing (Hz)	488	1562.5
Forward Error Correction (FEC)	convolutional code	convolutional code Reed-Solomon code repetition code
Interleaving	per OFDM symbol	per data packet
Modulation	DBPSK, DQPSK, D8PSK	DBPSK, DQPSK
Network topology	Tree	Mesh
Beacon configuration	Beacon enabled	Non-Beacon enabled
Voltage	Low	Low and Medium

Tabella 4.5: Parametri del livello PHY di G3-PLC

4.3.1 HomePlug AV

La specifica HomePlug AV include i livelli MAC e PHY ed è completamente interoperabile con lo standard IEEE P1901. La Tabella 4.6 riporta i parametri chiave del livello fisico (PHY) di HomePlug AV. Si può notare una larghezza di banda di 28 MHz, con un range di frequenze dai 2 MHz ai 30 MHz. Il livello PHY del protocollo è basato su uno schema di modulazione OFDM.

Parametro	Valore
Range di frequenze (MHz)	2-30
Modulazione	OFDM
Numero di sottoportanti	1155
Distanza tra sottoportanti (kHz)	24.414
Modulazioni supportate per sottoportante	BPSK, QPSK, 16QAM, 256QAM, 1024QAM
FEC	Turbo Code (Rate 1/2 o Rate 16/21)
Data rate (Mbps)	ROBO: 4-10 Adaptive bit loading: 20-200

Tabella 4.6: Parametri del livello PHY di HomePlug AV

HomePlug AV implementa anche l'*adaptive bit loading*, che consiste nel permettere ad ogni sottoportante OFDM di essere modulata in base alla potenza del segnale ricevuto, in modo da ottenere le migliori prestazioni di data rate. Una sottoportante con potenza di segnale ricevuto bassa avrà modulazione BPSK, una con potenza di segnale elevata sarà modulata con una 1024 QAM al fine di sfruttare la sua qualità per trasportare più dati. Lo svantaggio dell'*adaptive bit loading* sta però nel dover far conoscere la potenza di segnale ricevuta di ogni sottoportante al trasmettitore, attraverso l'invio di un pacchetto. Questo pacchetto dovrà quindi essere inviato periodicamente per mantenere i dati sulla condizione del canale in forma di *tone map*. I *tone map* descrivono il livello di segnale di ogni sottoportante per simbolo OFDM, e ogni dispositivo deve mantenere il *tone map* di qualsiasi altro dispositivo della rete: in una rete AV (AVLN) con N dispositivi, ognuno dovrà possedere $N - 1$ *tone map*. Questo naturalmente avrà come conseguenza l'introduzione di un grado di complessità significativo.

Ogni rete AVLN è controllata da un dispositivo con il ruolo di Central Coordinator (CCo), che trasmette periodicamente dei beacon per sincronizzare la rete

alla linea AC e per inviare messaggi di gestione. L'intervallo di beacon è di due cicli di linea AC (33.3 ms su 60 Hz, 40 ms su 50 Hz).

Il livello MAC di HomePlug AV utilizza come schema base di accesso al canale il CSMA, mentre il TDMA è implementato opzionalmente. Inoltre, HomePlug AV definisce quattro diversi livelli di *Channel Access Priorities*: da CAP3 (priorità massima) a CAP0 (priorità minima). Durante il *Priority Resolution Period*, che consiste di due *Priority Resolution Slot* (PRS0 e PRS1), i dispositivi trasmettono i *Priority Resolution Symbol* al fine di stimare l'ordine di priorità di accesso al canale.

4.3.2 HomePlug Green PHY

Ora che abbiamo fatto un rapido riassunto delle caratteristiche del protocollo HomePlug AV possiamo passare ad analizzare HomePlug Green PHY. HomePlug GP si basa totalmente su HomePlug AV, introducendone alcune semplificazioni. La Tabella 4.7 mostra il confronto tra i livelli PHY dei due protocolli.

Parametro	HomePlug AV	HomePlug GP
Range di frequenze (MHz)	2-30	2-30
Modulazione	OFDM	OFDM
Numero di sottoportanti	1155	1155
Distanza tra sottoportanti (kHz)	24.414	24.414
Modulazioni supportate per sottoportante	BPSK, QPSK, 16QAM, 256QAM, 1024QAM	QPSK
FEC	Turbo Code (Rate 1/2 o Rate 16/21)	Turbo Code (Rate 1/2)
Data rate (Mbps)	ROBO: 4-10 Adaptive bit loading: 20-200	ROBO: 4-10

Tabella 4.7: Confronto tra i parametri del livello PHY di HomePlug AV e HomePlug GP

Una delle maggiori differenze tra i due protocolli consiste nel picco di data rate: HomePlug AV supporta fino a 200 Mbps, che sono assolutamente eccessivi per le applicazioni Smart Grid. Quindi i valori di data rate possono essere ridotti, il che porta a riduzioni anche nei costi e nel consumo di potenza. HomePlug GP riduce i picchi di data rate a soli 10 Mbps, attraverso la limitazione della modulazione delle sottoportanti OFDM al solo QPSK, ed eliminando la necessità di utilizzare l'adaptive bit loading e i tone map. Queste misure permettono di sviluppare dispositivi a basso costo e a bassa potenza in grado di interagire con i protocolli HomePlug AV e IEEE P1901, e di mantenere la stessa affidabilità e copertura. I valori di data rate di 10 Mbps proposti da HomePlug GP sono decisamente adatti

a supportare le applicazioni smart grid, ed inoltre risultano essere all'incirca 100 volte più alti rispetto a quelli proposti da altri protocolli di PLC come PRIME e G3, che operano a frequenza più basse.

Nella modalità ROBO, utilizzata da HomePlug GP, i dati vengono trasmessi in maniera ridondante sulle sottoportanti. HomePlug GP implementa tre diversi tipi di ROBO, che si differenziano per i data rate, e quindi per il grado di ridondanza.

Modalità	PHY rate	Numero di copie
Mini-ROBO	3.8 Mbps	5
Standard ROBO	4.9 Mbps	4
High Speed ROBO	9.8 Mbps	2

Tabella 4.8: Modalità ROBO

A livello MAC HomePlug GP utilizza gli stessi meccanismi di CSMA e di Priority Resolution di HomePlug AV. Il meccanismo di TDMA non viene però implementato.

Se dispositivi HomePlug GP operano in presenza di dispositivi HomePlug AV e sono in grado di accedere al canale nella stessa maniera, il throughput HomePlug AV può essere disturbato. Per evitare tale fenomeno, un meccanismo chiamato *Distributed Bandwidth Control* (DBC), è implementato dal protocollo HomePlug GP: con questo meccanismo il tempo di accesso al canale per i dispositivi HomePlug GP è limitato al 7%.

Un'ulteriore novità introdotta da HomePlug GP è il *Power Save Mode*, una speciale funzione per ridurre i consumi di potenza dei dispositivi. In questa modalità i dispositivi possono essere nello stato Awake, cioè in cui possono trasmettere e ricevere dati su power line, o nello stato Sleep, dove non sono in grado di ricevere o trasmettere. Per ottenere una buona efficienza è necessario che i dispositivi della rete entrano ed escano dallo stato Awake in maniera coordinata.

Infine, HomePlug Green PHY supporta anche le applicazioni della tecnologia di Plug-in Electric Vehicle (PEV).

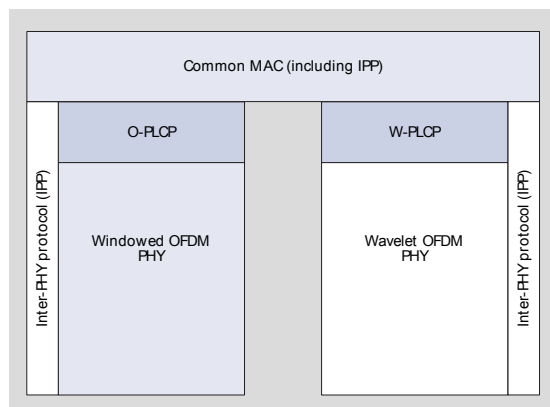


Figura 4.20: Architettura di IEEE P1901 [4]

4.4 IEEE P1901

Il IEEE P1901 Working Group fu fondato nel 2005 con lo scopo di unificare le varie tecnologie di PLC e sviluppare uno standard che lavori ad alta velocità (> 100 Mb/s) e a frequenze minori di 100 MHz, adatto sia ad applicazioni di Home Network che ad applicazioni di accesso. Nel 2008 furono definite quindi tre tecnologie PLC sui livelli fisico (PHY) e MAC: PHY/MAC basato su FFT-OFDM, PHY/MAC basato su Wavelet-OFDM ed un PHY/MAC compatibile con il protocollo ITU-T G.9960. L'obiettivo del protocollo IEEE P1901 è quindi quello di far coesistere le varie tecnologie PLC; infatti, il livello PHY di FFT-OFDM 1901 favorisce la compatibilità con dispositivi basati su HomePlug AV, mentre il livello PHY di Wavelet-OFDM 1901 facilita la compatibilità con dispositivi basati sulle specifiche di HD-PLC Alliance.

La soluzione pensata da IEEE P1901 consiste in un livello MAC comune, con la capacità di supportare due livelli PHY diversi (Windowed FFT-OFDM e Wavelet-OFDM). In aggiunta è stato sviluppato anche una parte compatibile con l'ITU-T G9960, sempre sui livelli PHY e MAC. La Figura 4.20 rappresenta l'architettura base di IEEE P1901, appena descritta.

IL MAC comune gestisce i due differenti livelli PHY attraverso un livello intermedio chiamato *Physical Layer Convergence Protocol* (PLCP). Esistono due PLCP: O-PLCP che gestisce le iterazioni tra il MAC e il Windowed OFDM PHY, e W-PLCP che invece gestisce le iterazioni del livello MAC con il Wavelet-OFDM PHY. Un altro elemento fondamentale dello standard IEEE 1901 è l'*Inter-*

System Protocol (ISP), una funzionalità opzionale che permette ai dispositivi basati sulle diverse tecnologie di IEEE P1901 di condividere efficacemente il canale a seconda del diverso livello PHY. Inoltre l'ISP permette anche a questi dispositivi di coesistere con dispositivi basati invece sul protocollo ITU-T G9960.

4.4.1 Livello MAC e livelli PLCP

La rete IEEE 1901 è basata su un'architettura Master-Slave. Il Master (QoS Controller) autorizza e autentica le stazioni slave, che possono comunicare con qualsiasi altra stazione nella rete. Inoltre può assegnare degli slot temporali alle stazioni implementando un accesso al canale ibrido tra CSMA/CA e TDMA. Il frame di accesso al canale è suddiviso in un *Contention Free Period* (CFP) e un *Contention Period* (CP); durante il CFP le stazioni che presentano richieste di low-delay/low-jitter sono abilitate ad accedere al canale in modo esclusivo. Le trasmissioni durante il CFP sono gestite completamente dal QoS Controller. Il CFP inizia con un beacon, che viene trasmesso periodicamente dal QoS Controller, e termina quando l'ultimo data stream è stato trasmesso. Il resto del *Beacon Cycle* è occupato dal CP.

Il livello MAC di IEEE 1901 supporta anche un Frequency Division Multiplexing (FDM) per permettere la coesistenza tra reti In-Home e reti di accesso. Altre importanti funzionalità implementate in questi livelli sono la frammentazione, il data bursting, il group-ACK e il Selective Repeat ARQ.

4.4.2 FFT-OFDM PHY

Il livello fisico basato su FFT-OFDM utilizza un massimo di 1893 portanti nella banda di frequenza che va da 1.8 MHz a 48 MHz, arrivando a valori massimi di data rate di circa 400 Mbps. Ogni sottoportante OFDM può trasportare 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 o 12 bit utilizzando modulazioni QAM, sulla base del livello di SNR di ogni sottoportante. Il FEC implementato da questo livello PHY consiste nel Turbo Codice convoluzionale. Inoltre, il FFT-OFDM PHY implementa un meccanismo di adattamento al canale che rileva quando è più probabile la presenza di rumore, migliorando in questo modo le prestazioni del sistema in presenza di rumore periodicamente tempo variante.

4. PROTOCOLLI DI PLC

La Tabella 4.9 riassume i parametri base del livello PHY basato su FFT-OFDM.

Parametro	Valore
Metodo di comunicazione	Fast Fourier Transform (FFT) OFDM
FFT points	4096
Frequenza di campionamento (MHz)	100
Lunghezza di simbolo (μs)	40.96
Guard interval (μs)	Varia in base alla condizione della linea: 5.56(12%), 7.56(16%), 47.12(53%)
Modulazione (per sottoportante)	2-, 4-, 8-, 16-, 64-, 256-, 1024-, 4096-QAM
Banda di frequenaza (MHz)	2-30 (opzionale 2-48)
FEC	Turbo Codice convoluzionale
Massima velocità di trasmissione (Mbps)	432 (8/9 CTC)
Modalità	Normal ROBO, mini ROBO, high-speed ROBO, frame control

Tabella 4.9: Parametri del livello FFT-OFDM PHY

4.4.3 Wavelet-OFDM PHY

La caratteristica fondamentale del livello PHY basato su Wavelet-OFDM consiste nel fatto che il tradizionale blocco FFT e rectangular/raised-cosine windowing utilizzati nell'OFDM convenzionale, vengono qui sostituiti dal *Perfect Reconstruction Cosine Modulated Filter Bank*. Un aspetto interessante del Wavelet-PFDM è che non è più necessario inserire un *guard interval* tra i simboli.

Il Wavelet-OFDM PHY utilizza 512 sottoportanti, di cui 338 portano informazione, nella banda di frequenza 2-28 MHz. L'uso di frequenze fino a 50 MHz è opzionale e porta ad un data rate massimo di circa mezzo Gbps. Ogni sottoportante viene modulata con una costellazione M-PAM (M=2, 4, 8, 16, 32). Il FEC utilizzato da questo livello fisico di IEEE 1901 consiste di un Reed-Solomon (RS) e un codice convoluzionale obbligatori; in aggiunta un opzionale codice Low Density Parity Check (LDPC) può essere implementato.

La Tabella 4.10 riporta i parametri fondamentali del Wavelet-OFDM PHY.

Parametro	Valore
Metodo di comunicazione	Wavelet OFDM
Discret Wavelet transform points	512 (opzionale 1024)
Frequenza di campionamento (MHz)	62.5 (opzionale 125)
Lunghezza di simbolo (μs)	8.192
Guard interval	Non necessario
Modulazione (per sottoportante)	D2PAM, 2-, 4-, 8-, 16-, 32-QAM
Banda di frequenaza (MHz)	2-28 (opzionale 2-50)
FEC	RS, RS-CC, LDPC (opzionale)
Massima velocità di trasmissione (Mbps)	450 (239/255 RS)
Modalità	MAC header, TMI/FL payload

Tabella 4.10: Parametri del livello Wavelet-OFDM PHY

4.5 Protocolli ENEL

ENEL è riconosciuta come un'azienda di riferimento a livello internazionale per lo sviluppo della rete elettrica verso la tecnologia Smart Grid. Infatti, grazie alla realizzazione di alcuni progetti, come *Telegestore*, l'automazione e il telecontrollo, ENEL garantisce al cliente la possibilità di conoscere in tempo reale l'energia prelevata, quella auto-prodotta e quella reimpressa in rete, la tariffa in atto e la fascia della giornata in cui è più conveniente spostare i propri consumi [20].

Andiamo quindi in questo capitolo a fare un breve resoconto sui protocolli PLC utilizzati da ENEL nel suo sviluppo verso le Smart Grid, basandoci su [21],[22].

4.5.1 SITRED

SITRED è un protocollo di tipo proprietario lanciato dalla stessa ENEL nel 1991, per avviare un progetto di telegestione dei contatori. Il progetto poi si svilupperà appieno nei primi anni 2000 (*Telegestore*), portando ad avere nel 2011 più di 37 milioni di contatori realizzati con questa tecnologia.

SITRED è un protocollo a livello PHY, MAC e Applicazione. Utilizza una modulazione narrowband basata sulla FSK, nella banda CENELEC-A, che garantisce una buona affidabilità attraverso le diverse reti, riducendo i costi dei transceiver, ma limitando la velocità raggiungibile a 2400 baud. Il livello Applicazione di SITRED implementa tutte le funzione necessarie per lo scambio

efficiente di dati tra i nodi della rete e alcune funzionalità di gestione di rete, come la ricerca automatica di contatori e l'auto-configurazione di rete. Inoltre, per la sicurezza dei dati questo protocollo supporta la crittografia, l'autenticazione e la protezione ad attacchi.

4.5.2 LonTalk

L'altro protocollo utilizzato da ENEL nel progetto Telegestore è LonTalk, che fa parte alla tecnologia LonWorks, del gruppo Echelon Corporation. LonTalk implementa tutti i sette livelli dello stack ISO/OSI. Il livello Applicazione è in particolare simile a quello sviluppato da SITRED. Le comunicazioni di LonTalk sono basate sullo scambio di pacchetti e sul peer-to-peer. Questo protocollo è in grado di raggiungere data rate di 3-6 kbps con una modulazione narrowband nel range di frequenze 115-132 kHz. Viene implementato al fine di ridurre allo stesso tempo sia i consumi energetici sia i costi e la frequenza di interventi di manutenzione.

Verso la fine del 2008, la tecnologia LonTalk è stata standardizzata da ISO e IEC, dando così vita allo standard ISO/IEC 14908.

Capitolo 5

TI PLC Development Kit e Laboratorio

Questo capitolo, scritto in collaborazione con Michele Tasca [23] e Francesco Trentini [24], tratta del materiale e del laboratorio utilizzati durante la tesi per sviluppare il progetto sulle Smart Grid. Nella prima parte andiamo a presentare il kit fornitoci da Texas Instruments, entrando anche in alcuni dettagli. La seconda parte si concentra invece sul software utilizzato per implementare i progetti, fornendo anche un esempio base di progetto. L'ultima parte, infine, va ad illustrare il laboratorio sperimentale di Smart Grid messo in piedi per testare fisicamente i progetti sviluppati.

5.1 TI PLC modems

Il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione (DEI) dell'Università di Padova sta attualmente studiando il mondo delle Smart Grids, attraverso un team multidisciplinare di ricerca che collabora su diversi ambiti: dall'elettronica di potenza alle misure, dalle telecomunicazioni al controllo. Al fine di studiare e testare le comunicazioni power line è stato utilizzato un kit PLC di laboratorio fornito da Texas Instruments (TI). In questa sezione viene fatto brevemente il punto sul ruolo di Texas Instruments nel campo Smart Grid e presentato nel dettaglio il kit utilizzato nei test di laboratorio.

5.1.1 Texas Instruments e Smart Grid

Texas Instruments offre una ampia scelta di prodotti per la tecnologia Smart Grid. Le proposte di TI vanno da dispositivi hardware ad implementazioni a livello software. Una delle maggiori aree di sviluppo di TI riguarda i modem PLC, con lo sviluppo di vari development kit. Andiamo quindi a capire i motivi di questa scelta e la proposta di TI, seguendo quanto riportato in [25].

La tecnologia Power Line Communications è in grado di aumentare il livello di intelligenza e di affidabilità di una vasta gamma di applicazioni smart grid, tra cui contatori elettrici intelligenti, illuminazione, energia solare, automobili elettriche ricaricabili, elettrodomestici intelligenti, domotica, controllo dei carichi, e networking. Texas Instruments offre quindi una robusta tecnologia Low Frequency Narrowband PLC adatta ai contatori intelligenti e ad applicazioni di controllo, che garantisce integrità ai dati trasmessi e nello stesso tempo riduce il consumo di potenza e i costi di sistema. Texas Instruments mette a disposizione degli sviluppatori anche una piattaforma, la *TI plcSUITE*, che offre librerie di protocolli e modulazioni programmabili. L'area di PLC di TI fornisce agli sviluppatori il supporto ad ogni livello delle Smart Grid, dalle sottostazioni delle aziende alla Home Area Network (HAN).

La tecnologia PLC proposta da TI fornisce ai progettisti delle soluzioni hardware e software complete per introdurre capacità di flessibilità, efficienza e affidabilità ad una vasta gamma di applicazioni. Le soluzioni di PLC proposte da TI sono in grado di supportare diversi protocolli e schemi di modulazione in un'unica piattaforma hardware e con un software con struttura flessibile. La flessibilità della piattaforma permette inoltre agli sviluppatori di ottimizzare le prestazioni hardware e software per le specifiche condizioni di lavoro semplificando la progettazione di prodotti end-to-end. Basandosi sull'architettura dei microcontrollori C2000, gli sviluppatori possono scegliere la giusta combinazione di capacità del processore e delle periferiche al fine di aggiungere PLC ad un progetto esistente o di implementare un'applicazione completa di Power Line Communications.

5.1.2 Il kit fornito da Texas Instruments

Il kit di laboratorio fornito da TI e utilizzato nei test di laboratorio è il *C2000 Power Line Modem Developer's Kit V2*. Il C2000 Power Line Modem Developer's

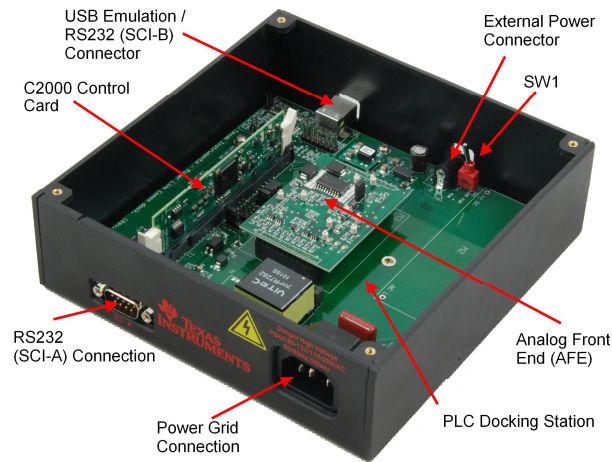


Figura 5.1: TI PLC Development Kit [26]

Kit V2 permette di sviluppare software per modem PLC, e contiene:

- Componenti Hardware: due development board, ognuna delle quali contiene un F28335 MCU control card, una docking station e un AFE board
- Software di PLC che supporta lo standard PRIME
- Tutti i cavi necessari per l'alimentazione e la connessione
- Software Code Composer Studio per programmare i modem

Con il Development Kit sono fornite inoltre delle librerie software per il protocollo PRIME e la documentazione sulle Application Programming Interface (API) dei vari livelli dello standard (PHY, MAC e CL).

Il cuore del kit è quindi costituito dai due modem PLC, che supportano in particolare lo standard PRIME, e che vengono presentati in Figura 5.1.

I principali componenti e caratteristiche del Development Kit sono riportati in [26] e riassunti di seguito.

- DSP control card con un microcontrollore F28335 di Texas Instruments.
- Scheda madre AFE con un amplificatore operazionale OPA564 e un amplificatore programmabile di guadagno PGA112 di TI.
- Frequenze di lavoro tra i 40 e i 90 kHz (banda CENELEC-A).
- Data rate da 21 kbps a 128 kbps.

- Trasmissione con OFDM e FEC.
- Utilizza 96 sottoportanti per portare informazione.
- Modulazione Differential Phase (DBPSK/DQPSK/D8PSK).
- La modalità PRIME-ROBO implementa codifica/decodifica Reed-Solomon e Repetition Code con modulazione DBPSK.
- Codificatore convoluzionale/decodificatore di Viterbi.
- Bit Interleaving per ridurre gli effetti di rumore.
- CRC8 nell'header e CRC32 nei dati per il rilevamento di errori.
- Randomizzazione dei dati per distribuire la potenza uniformemente.
- Controllo di guadagno automatico.
- Rilevamento zero-crossing.
- Supporta i livelli dello standard PRIME PHY, MAC, IEC61334-4-32LLC e IPv4 Convergence Layer.
- Interfaccia RS-232 per la porta di diagnosi.
- Interfaccia seriale per host data port interface: UART, SPI, ecc.
- LED e test point per firmware e hardware debug.
- USB/JTAG per il download del firmware.

5.1.3 TMS320F28335 DSP

La F28335, rappresentata in Figura 5.2, fa parte della famiglia dei TMS320C2000 Digital Signal Controller (DSC). Presenta un'architettura a 32-bit fixed-point e include una single-precision (32-bit) IEEE 754 floating-point unit (FPU). È una scheda veramente efficiente, basata sul linguaggio C/C++, che permette agli utenti di sviluppare il proprio software di controllo di sistema in un linguaggio ad alto livello. Inoltre permette di sviluppare algoritmi matematici utilizzando C/C++. Il dispositivo è efficiente sia con compiti di DSP sia con compiti di controllo di sistema che tipicamente sono svolti da microcontrollori; questa efficienza

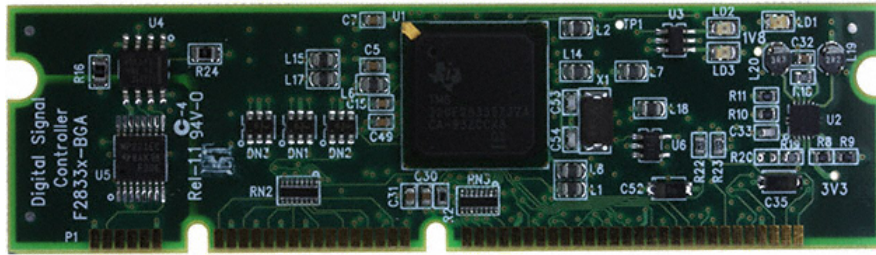


Figura 5.2: TMS320F28335 ControlCARD (TMDSCNCD28335) [25]

permette quindi di eliminare la necessità di di un secondo processore. Le capacità di processo 32 x 32-bit MAC 64-bit permettono al controllore di gestire problemi ad alta risoluzione matematica in modo efficiente. In aggiunta a quanto già detto, la rapida risposta agli interrupt con il salvataggio automatico di registri critici fa sì che il dispositivo sia in grado di gestire più eventi asincroni con una latenza minima. Il dispositivo è dotato di pipeline protetta ad otto livelli di profondità con accesso alla memoria di tipo pipeline. Questo permette l'esecuzione di operazioni ad alta velocità senza fare ricorso ad una costosa memoria ad alta velocità [27]. Un diagramma a blocchi del DSP F28335 è rappresentato in Figura 5.3.

Caratteristiche

Il DSP TMS320F28335 sviluppato da TI presenta le seguenti importanti caratteristiche [27]

- Alte prestazioni di tecnologia CMOS statica
 - Fino a 150 MHz (6.67 ns Cycle Time)
 - 1.9 V /1.8 V Core, 3.3V I/O Design
- CPU a 32 bit ad alte prestazioni (TMS320C28x)
 - Unità Floating-Point (FPU) a precisione singola IEEE-754
 - Operazioni MAXC 16x16 e 32x32
 - Architettura Harvard Bus
 - Veloci esecuzioni e risposte agli interrupt
 - Modello unificato di programmazione della memoria
 - Codice efficiente (C/C++ e Assembly)

5. TI PLC DEVELOPMENT KIT E LABORATORIO

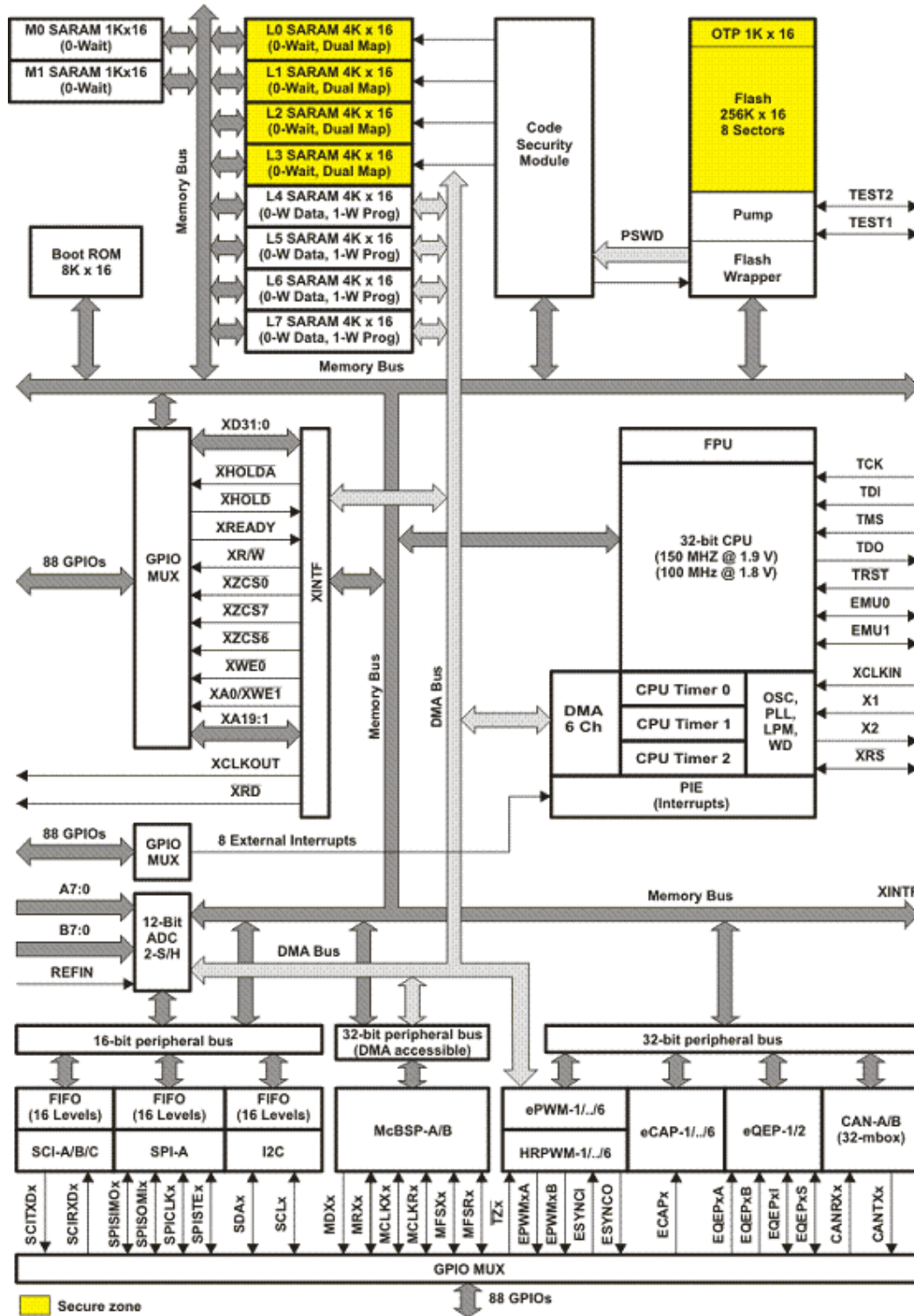


Figura 5.3: Functional Block Diagram of the F28335 DSP [27]

- Controllore DMA a sei canali (per ADC, McBSP, ePWM, XINTF e SARAM)
- Interfaccia esterna a 16 o 32 bit (XINTF)
 - oltre 2M x 16 indirizzi raggiungibili
- On-Chip Memory
 - 256K x 16 Flash, 34K x 16 SARAM
 - 1K x 16 OTP ROM
- Boot ROM(8Kx16)

Memorie

Il DSP F28335 ha tre tipi di memoria: memoria flash, memoria SARAM e memoria ROM. Tutti i blocchi di memoria dei dispositivi C28x sono mappati sia sul program space che sul data space.

Le dimensioni della memoria flash sono $256K \times 16$, ed è divisa in otto settori da $32K \times 16$. Il DSP contiene anche una memoria OTP singolo da $1K \times 16$. Chi utilizza la scheda può cancellare, programmare e convalidare individualmente singoli settori della memoria flash senza andare a toccare gli altri settori. Comunque, non è possibile utilizzare un settore della flash o l'OTP per eseguire algoritmi che cancellano/programmano altri settori.

La F28335 contiene due blocchi di Single-Access RAM (SARAM), M0 e M1, ognuno di dimensioni $1K \times 16$. I dispositivi C28x presentano al programmatore una mappa di memoria unificata. Quindi, chi utilizza le schede può usare M0 e M1 per eseguire codice oppure per variabili di dati. Inoltre, contiene $32K \times 16$ di SARAM, divisi tra otto blocchi (da L0 a L7, ognuno di 4K).

La Boot ROM è programmata attraverso il programma boot-loading. Dopo l'inizializzazione del dispositivo il bootloader verifica lo stato dei pin GPIO per determinare quale modalità di boot eseguire. Le opzioni sono: jump to flash, jump to OTP, jump to SARAM, jump to XINTF, o la chiamata di una delle routine di caricamento. Dopo il processo di selezione e se il caricamento del boot è completo, il processore continua l'esecuzione del programma partendo dal punto determinato dalla modalità di boot scelta. La Tabella 5.1 rappresenta tutte le

possibili opzioni di boot. La Boot ROM contiene anche delle tabelle standard, come per esempio di forme d'onda SIN/COS, da utilizzare in algoritmi matematici correlati [27].

GPIO84	GPIO85	GPIO86	GPIO87	Modalità
1	1	1	1	Jump to Flash
1	1	1	0	SCI-A boot
1	1	0	1	SPI-A boot
1	1	0	0	I2C-A boot
1	0	1	1	eCAN boot
1	0	1	0	McBSP-A boot
1	0	0	1	Jump to XINT x16
1	0	0	0	Jump to XINT x32
0	1	1	1	Jump to OTP
0	1	1	0	Parallel GPIO I/O boot
0	1	0	0	Jump to SARAM
0	0	1	1	Branch to check boot mode
0	0	1	0	Branch to Flash, skip ADC calibration
0	0	0	1	Branch to SARAM, skip ADC calibration
0	0	0	0	Branch to SCI, skip ADC calibration

Tabella 5.1: Selezione della modalità di boot

Periferiche

L'interfaccia JTAG (Joint Test Action Group) emula una connessione seriale, ed è connessa al DSP attraverso la porta SCI-B. Questa porta viene utilizzata per caricare il firmware sviluppato nel modem PLC, per il debugging e come interfaccia seriale standard. Nel dispositivo è presente anche un'altra interfaccia seriale, la SCI-A, che rispetta lo standard RS-232 e può essere usata per connettere altri dispositivi seriali esterni.

Tutte le periferiche integrate al DSP sono elencate di seguito:

- Sei canali Direct Memory Access (DMA).
- Tre 32-bit CPU-Timers.
- Sei moduli enhanced Pulse Width Modulator (ePWM).
- Sei moduli enhanced Capture (eCAP).
- Due moduli enhanced Quadrature Encoder Pulse (eQEP).

- Un modulo enhanced analog-to-digital converter (ADC).
- Due moduli enhanced Controller Area Network (eCAN).
- Tre moduli serial communications interface (SCI-A, SCI-B, SCI-C).
- Un serial peripheral interface (SPI-A).
- Un modulo inter-integrated circuit (I2C).
- Due moduli multichannel buffered serial port (McBSP-A, McBSP-B).
- Digital I/O and shared pin functions.
- External Interface (XINTF).

5.2 Code Composer Studio

Code Composer Studio (CCStudio) è un Integrated Development Environment (IDE) per i processori embedded di Texas Instruments (TI) [25]. CCStudio consiste di un set di strumenti da utilizzare per sviluppare ed eseguire applicazioni embedded. Comprende compilatori per ogni dispositivo della famiglia TI, ambiente per modificare il codice sorgente, ambiente per eseguire il progetto, debugger, profiler, simulatori, sistemi operativi real-time e altre caratteristiche.

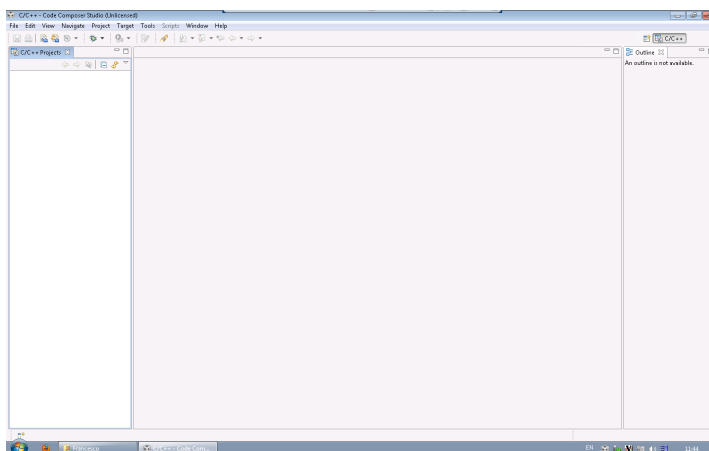
Code Composer Studio si basa sulla struttura del software open source *Eclipse*. La struttura software di Eclipse fu originalmente sviluppata come una struttura libera per creare strumenti di sviluppo. Eclipse offre una struttura software per eseguire software in ambienti di sviluppo.

Durante lo svolgimento del lavoro di tesi è stata utilizzata l'ultima versione disponibile di CCStudio, la 4.2.4. CCStudio è stata utilizzato al fine di programmare i DSP F28335 compresi nel PLC Development Kit descritto precedentemente.

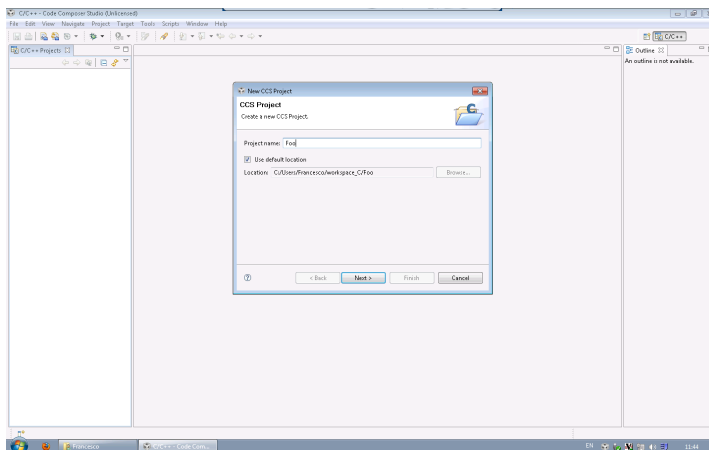
Di seguito sono presentati due importanti punti da conoscere allo scopo di creare e sviluppare firmware per i modem. Il primo gruppo (da Figura 5.4a a Figura 5.6c) mostra la procedura per creare un nuovo progetto di CCStudio per il dispositivo DSP F28335 e alcuni punti chiave per l'utilizzo dell'IDE. Il secondo gruppo di figure (Figura 5.7 e Figura 5.8) fa riferimento a come importare un progetto base, chiamato "test_tx_rx.c", e fornito con il kit. In particolare, questo

progetto è stato modificato allo scopo di mettere tutte le librerie a disposizione in una cartella “globale” che ne permettesse l’uso nei diversi computer. Ulteriori dettagli sull’utilizzo di CCStudio sono presenti in [28].

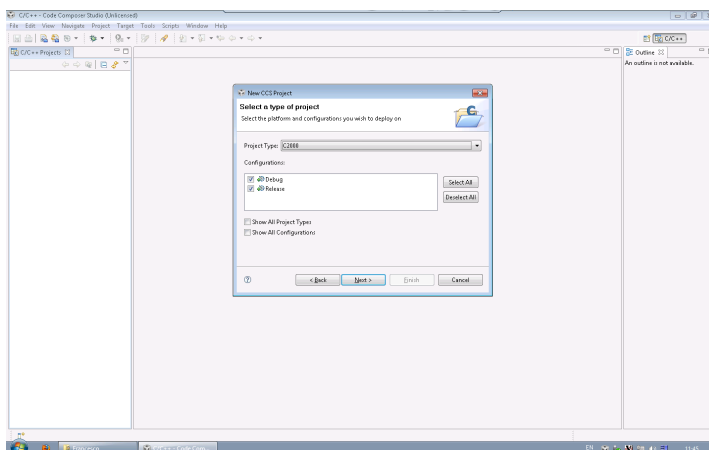
I progetti realizzati nel presente lavoro di tesi sono stati salvati in un apposito *repository* svn del dipartimento, e sono accessibili ad esempio mediante il software *TortoiseSVN*. Tra questi file la cartella `project` si riferisce al progetto base da importare per la creazione di un firmware per le schede del kit considerato.



(a) Schermata iniziale dell'IDE



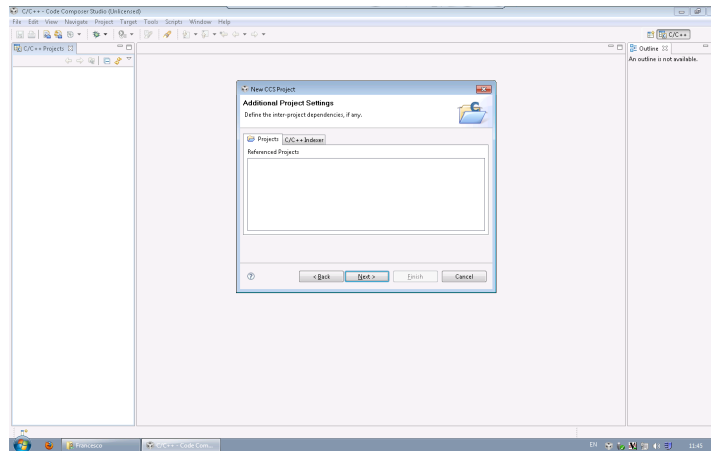
(b) Creazione di un nuovo progetto CCStudio



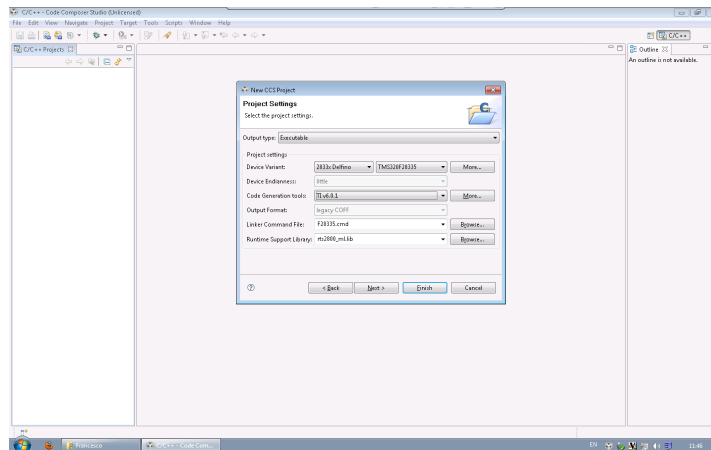
(c) Selezione del tipo di progetto: famiglia dei dispositivi DSP

Figura 5.4: Creazione di un nuovo progetto vuoto (Part 1-3)

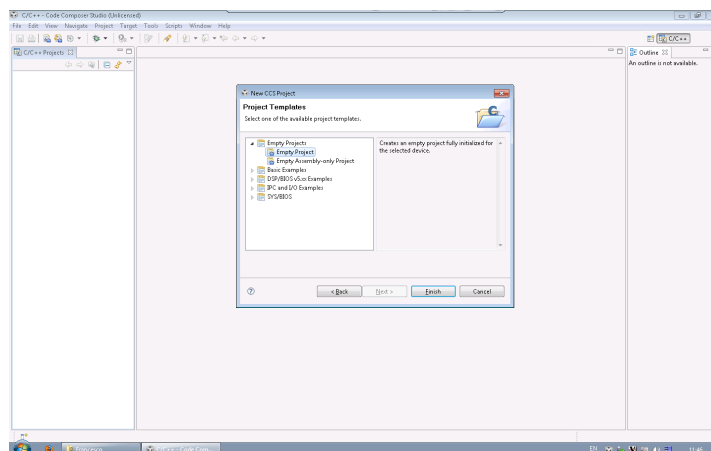
5. TI PLC DEVELOPMENT KIT E LABORATORIO



(a) Impostazioni aggiuntive del progetto



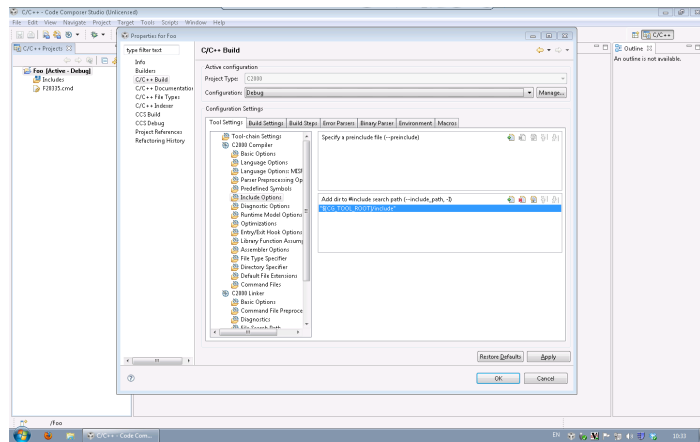
(b) Selezione del modello di DSP (a F28335), del linker command files e della libreria di supporto runtime



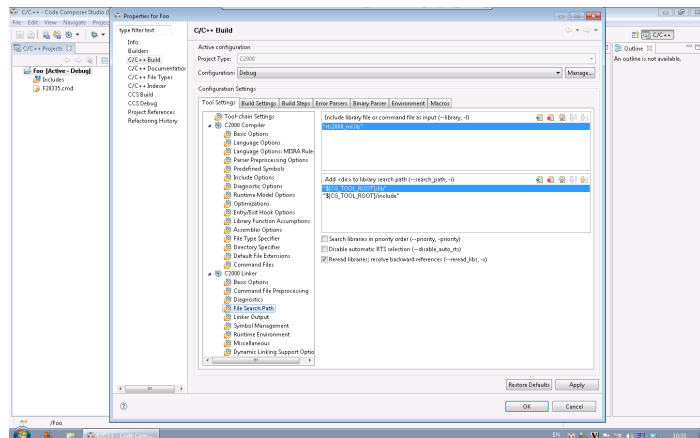
(c) Modelli di progetto vuoto

Figura 5.5: Creazione di un nuovo progetto vuoto (Part 2-3)

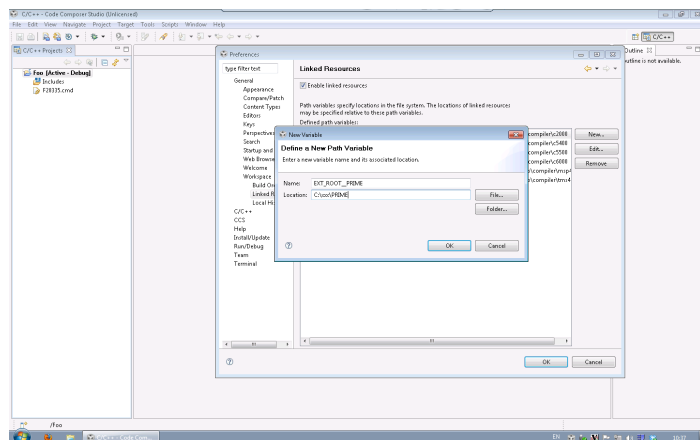
5.2 CODE COMPOSER STUDIO



(a) Proprietà del progetto: aggiunge i percorsi dei file header di tutte le librerie richieste



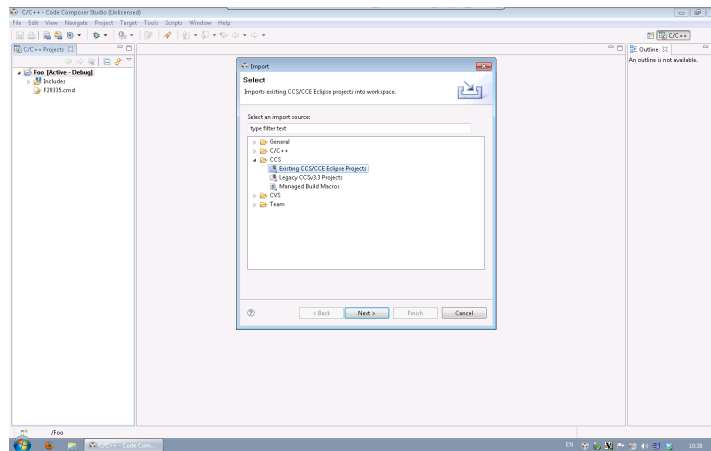
(b) Proprietà del progetto: aggiunge i percorsi dei file binari di tutte le librerie richieste



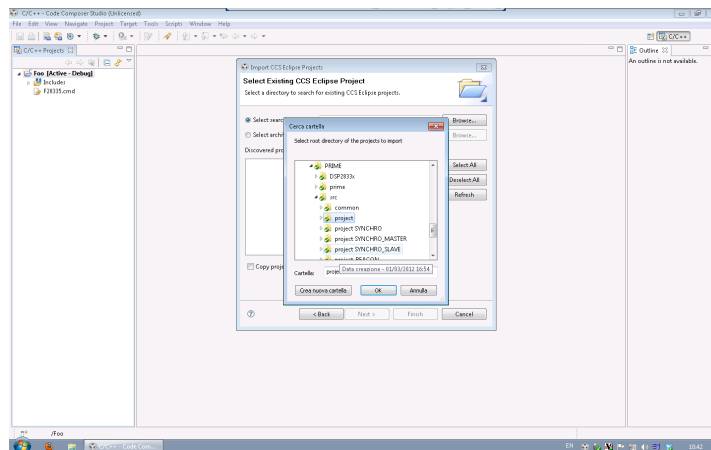
(c) Preferenze IDE: creazione e gestione di variabili IDE per risolvere il percorso

Figura 5.6: Creazione di un nuovo progetto vuoto (Part 3-3)

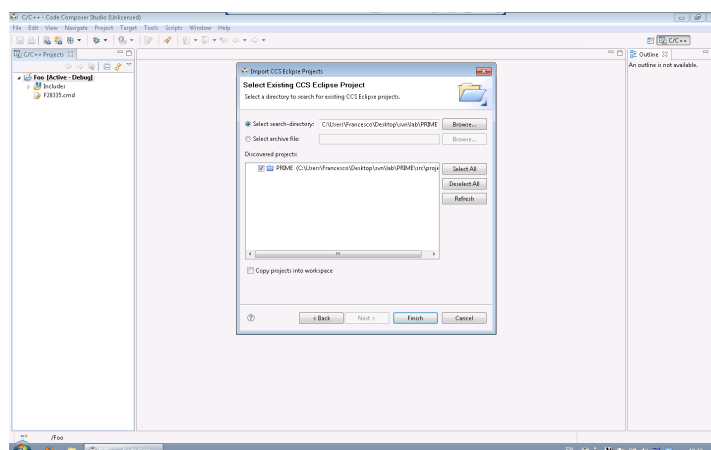
5. TI PLC DEVELOPMENT KIT E LABORATORIO



(a) Importazione di un progetto di CCStudio v.4



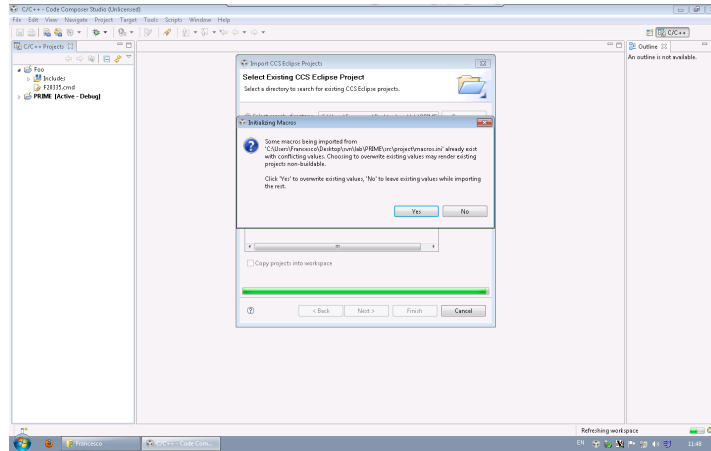
(b) Selezione del progetto base PRIME utilizzato nella tesi



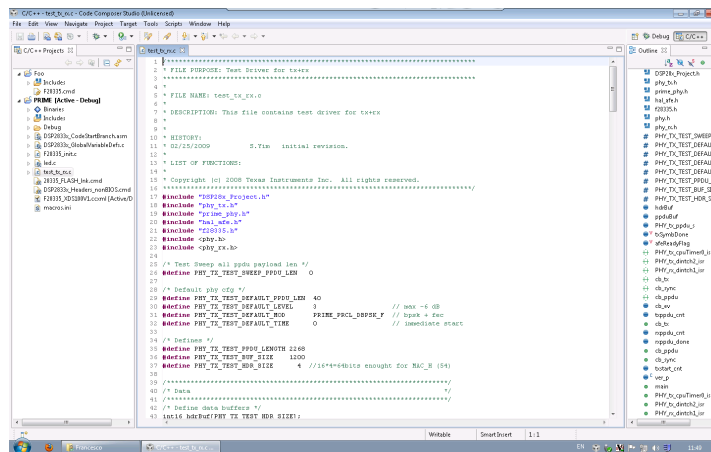
(c) Fine della procedura di importazione

Figura 5.7: Procedura di importazione di un progetto CCStudio (Part 1-2)

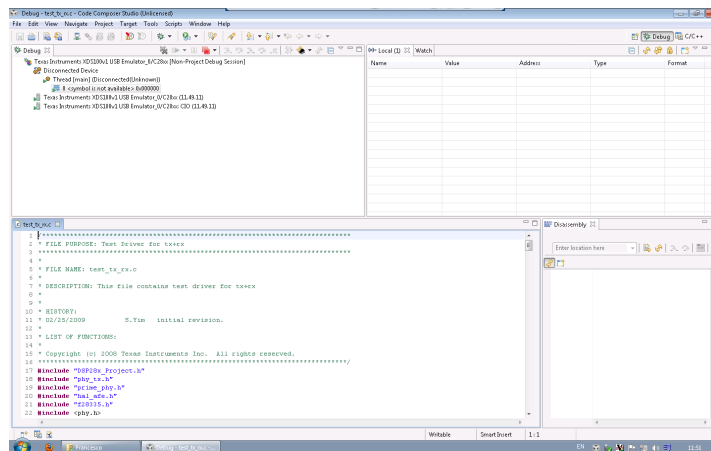
5.2 CODE COMPOSER STUDIO



(a) Messaggio di allarme dovuto al file “macros.ini” che ha sovrascritto la variabile IDE “EXT_ROOT_PRIME”



(b) Schermata principale di sviluppo dell'IDE



(c) Finestra di debug e di gestione della CPU

Figura 5.8: Procedura di importazione di un progetto CCStudio (Part 1-2)

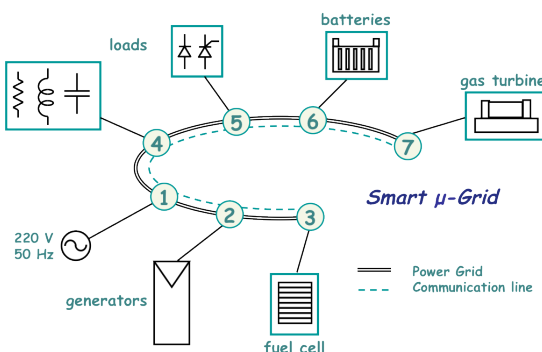


Figura 5.9: Schema della microgrid del DEI [30]

5.3 Laboratorio

Al fine di analizzare l'ambiente delle *Smart Microgrids* il DEI ha ideato una rete artificiale, il cui schema viene riportato in Figura 5.9 [30]. Tale sistema prevede l'impiego delle seguenti attrezzature e dispositivi:

- un quadro elettrico per i test Smart Grid;
- generatori e carichi programmabili;
- fonti di energia rinnovabile.

5.3.1 Il quadro elettrico per le Smart Grid

Il quadro elettrico per i test su Smart Grid, ubicato nel Laboratorio Eletttronica di potenza del DEI, è costituito da tre sezioni principali: ingresso, uscita e controllo. La sezione di ingresso si occupa di collegare i dispositivi da sottoporre ai test alle sorgenti di alimentazione, la sezione di uscita consente invece il collegamento alla rete di carichi, mentre la sezione di controllo si occupa di monitorare i livelli di tensione, corrente e temperatura al fine di garantire un corretto e sicuro funzionamento del sistema. Sono inoltre a disposizione quattro tratte di cavi in rame e due tratte di cavi in alluminio di lunghezza pari a circa 100 m ciascuna. Queste tratte hanno i terminali di ingresso e uscita connessi al quadro elettrico, se collegati opportunamente possono essere impiegati per simulare diverse topologie di Microgrids. Lo schema a blocchi del quadro viene rappresentato in Figura 5.10 [30]. Il quadro presenta sei sezioni, di cui le prime cinque servono per alimentare la rete artificiale essendo predisposte per il collegamento alle uscite delle sorgenti

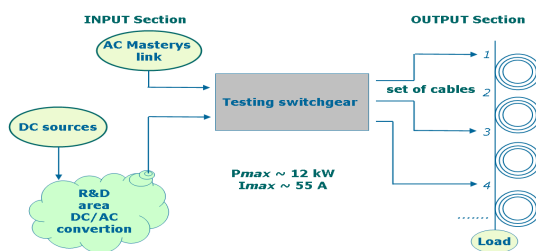


Figura 5.10: Schema a blocchi del quadro Smart Grid [30]

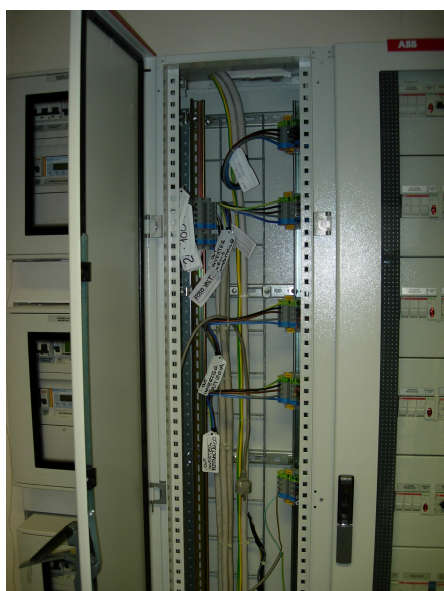
di elettricità a disposizione, mentre l'ultima viene connessa all'uscita del carico. Il relativo schema a blocchi viene illustrato in Figura 5.12. La sezione denominata SORGENTE ESTERNA è connessa all'uscita del gruppo di continuità, mentre le restanti sezioni "sorgenti" sono invece predisposte per consentire il collegamento della Microgrid alle fonti di energia rinnovabile. Tutte le sezioni sono costituite da una cascata di dispositivi di misura ed elementi di protezione tra i quali si ricordano:

- NEMO: dispositivi che rilevano i valori di tensione, corrente e potenza del segnale presente sulla linea;
- interruttori e fusibili: intervengono in caso di condizioni di funzionamento anomale e pericolose del sistema, al fine di garantire sicurezza durante i test.

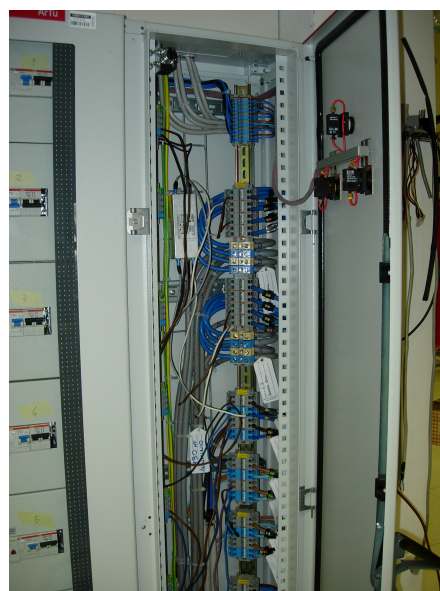
I cablaggi necessari a realizzare la configurazione di rete desiderata, vengono eseguiti nella SEZIONE DI USCITA, laddove apposite morsettiere consentono la connessione con le varie tratte di cavo. Le sezioni di ingresso e di uscita sono accessibili mediante delle ante. Per attivare il quadro abilitando le connessioni tra i vari rami della rete, dopo la chiusura delle ante si seleziona il pulsante MARCIA. Se inoltre si desidera immettere una tensione di alimentazione nella rete, si attiva il relativo interruttore presente in ciascuna delle sezioni denominate SORGENTE. Come ulteriore protezione, l'apertura delle ante comporta l'automatizzata disattivazione dei collegamenti di rete precedentemente abilitati, con una conseguente sconnessione della Microgrid anche dalla sorgente di alimentazione.

Il sistema appena descritto consente dunque di simulare in un ambiente di laboratorio uno scenario di Smart Microgrid residenziale, con la possibilità di analizzare il comportamento della rete in diverse situazioni, a seconda anche dei carichi ad essa collegati.

5. TI PLC DEVELOPMENT KIT E LABORATORIO



(a) Sezione di ingresso



(b) Sezione di uscita



Figura 5.11: Quadro elettrico



Figura 5.12: Sezioni del quadro per Smart Grid



Figura 5.13: Masterys BC [29]

5.3.2 Generatori e carichi programmabili

Tra le sorgenti di alimentazione disponibili, l'unica attualmente utilizzabile è una versione del dispositivo *Masterys BC* adattata ad un impiego per scopi di ricerca. La foto e lo schema a blocchi di tale macchina sono rappresentati rispettivamente in Figura 5.13 e in Figura 5.14.

Come si nota dalla Figura 5.14, *Masterys BC* rappresenta l'elemento di separazione tra la rete di alimentazione fornita dal distributore e la Microgrid considerata. Il dispositivo UPS effettua dapprima una conversione analogico-digitale della tensione di alimentazione proveniente dalla rete Enel, in seguito immagazzina l'energia elettrica tramite condensatori e batterie. Come ultimo step, realizza una conversione digitale-analogica ottenendo un segnale di tensione alternata da distribuire alla rete impiegata per i test. Inoltre tale apparecchio consente di

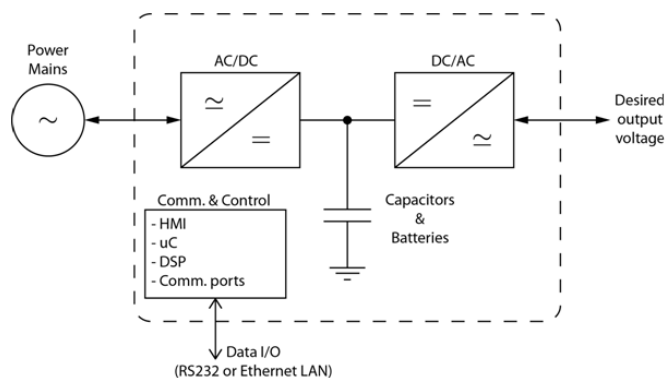


Figura 5.14: Schema a blocchi del Masterys BC [30]

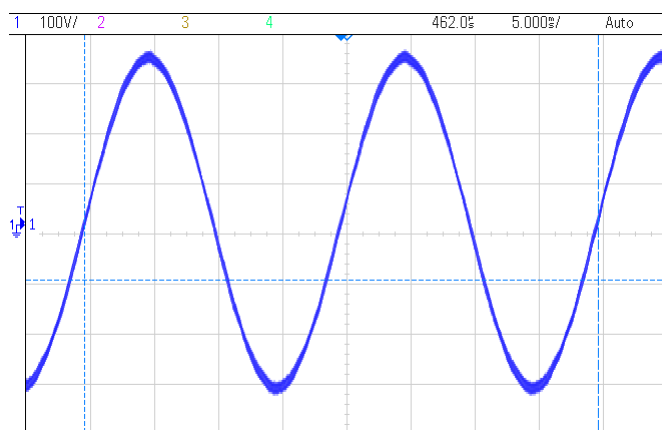


Figura 5.15: Tensione di linea fornita dal generatore UPS

modificare le caratteristiche del segnale di tensione emesso, alcune delle quali sono:

- valore di tensione efficace e di frequenza;
- aggiunta di armoniche a frequenze e tensioni efficaci arbitrarie;
- introduzione di jitter in frequenza;
- introduzione di cadute di tensione.

L'impostazione della configurazione desiderata viene effettuata mediante un apposito software installato in un computer collegato al *Masterys* via connessione remota. In assenza di disturbi, la tensione fornita alla rete dal dispositivo UPS presenta un andamento sinusoidale con ampiezza 230 Vrms e frequenza 50 Hz riportata in Figura 5.15.

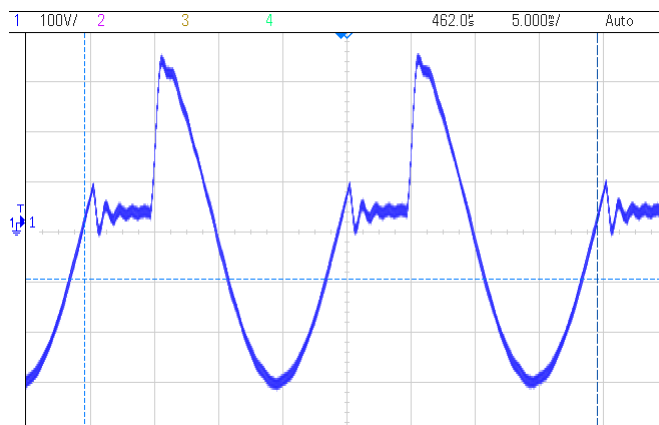


Figura 5.16: Tensione di linea in presenza di buchi

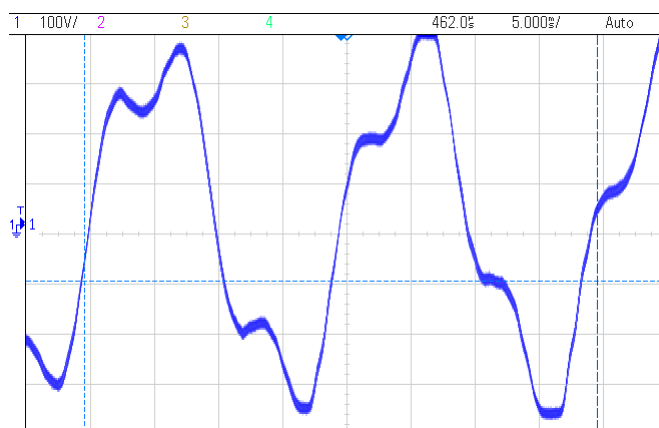


Figura 5.17: Tensione di linea in presenza di armoniche

Come accennato in precedenza è possibile modificare la forma e la frequenza dell'onda di alimentazione introducendo tre tipologie di disturbi: buchi, armoniche e jitter. I “buchi” consistono in una distorsione sulla tensione di rete con angoli nell'intervallo $10-90$. L'effetto ha una durata di circa 13 secondi e provoca una distorsione della sinusoide di alimentazione come riportato in Figura 5.16. La tipologia di disturbo denominata “armoniche” indica l'immissione nella rete di armoniche ad ampiezze di 10, 20, 50 Vrms in un range di frequenze tra i 150 Hz e i 350 Hz. L'effetto dura circa 40 secondi e le sue conseguenze sono rappresentate in Figura 5.17. Un ulteriore tipo di disturbo che si può iniettare sulla tensione di alimentazione è detto “jitter in frequenza” e consiste in una variazione della frequenza della tensione di alimentazione da 45 a 60 Hz. In Figura 5.18 ne viene illustrato l'effetto.

Il *Masteys BC* risulta dunque un dispositivo in grado di fornire una alimenta-

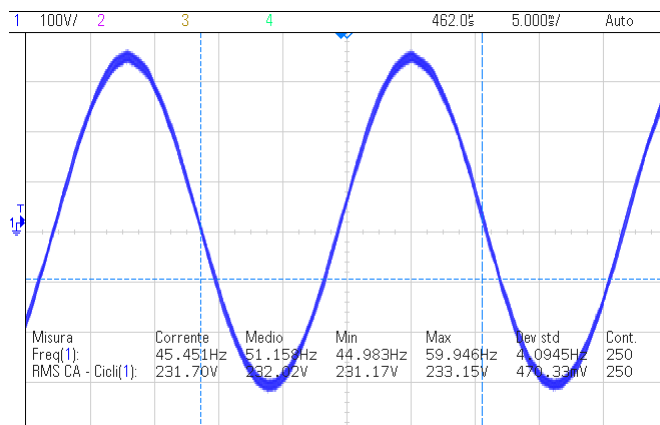


Figura 5.18: Tensione di linea in presenza di jitter

zione trifase alla Microgrid del laboratorio, inoltre è in grado di assorbire, iniettare verso i carichi e verso la rete principale una potenza attiva massima di circa 64 kW [30].

A disposizione del laboratorio vi sono dei carichi programmabili in grado di simulare condizioni di carico diverse al variare di parametri quali il *crest factor* e il *power factor*, eseguendo una compensazione in tempo reale della potenza anche in caso di tensione di alimentazione distorta.

5.3.3 Fonti di energia rinnovabile

Il DEI dispone delle seguenti fonti di energia rinnovabile [30]:

- Celle Combustibili ad alta temperatura PEM, 100V/100A/2kW DC: sorgenti che generano elettricità principalmente sfruttando la reazione tra idrogeno e agenti ossidanti.
- Pannelli Fotovoltaici: ubicati sul tetto dell'edificio DEI/A del dipartimento, sono in grado di convertire l'energia solare in corrente continua sfruttando le proprietà fotovoltaiche dei semiconduttori di cui sono costituiti.

Attualmente tali sorgenti di energia non sono ancora connesse al quadro elettrico per le Smart Grid e dunque non possono essere impiegate per alimentare la Microgrid precedentemente descritta.

5.3.4 Banco di lavoro

Il banco di lavoro predisposto nel Laboratorio Elettronica di Potenza del DEI ed utilizzato nel presente lavoro di tesi viene raffigurato in Figura 5.19. In tale figura si fa riferimento, mediante degli indicatori numerici, ai principali elementi che lo costituiscono:

- I modem *power line* impiegati nei test sulla Microgrid vengono indicati con 1 e 2.
- L'indicatore 3 si riferisce al carico programmabile utilizzato nei test di compensazione di potenza.
- L'etichetta 4 si riferisce all'oscilloscopio digitale
 - Produttore: Agilent Technologies
 - Modello: Infinii Vision DSO-X 3024 A Digital Storage Oscilloscope
 - Caratteristiche: 200 MHz, Mega Zoom

Tale strumento utilizzato per rilevare forme d'onda di tensione e corrente nel tempo, consente inoltre di ottenere lo spettro in frequenza dei segnali analizzati mediante la funzione *fft*. Disponendo di un'uscita USB abilita il salvataggio delle tracce visualizzate in diversi formati come ad esempio *.csv* e *.png*. Come dispositivo di protezione dello strumento, viene impiegato un attenuatore che permette di scegliere due valori del fattore di attenuazione: $1/20$ e $1/200$.

- Le prese a muro, alle quali si riferiscono il numero 5 e la Figura 5.20, consentono il collegamento diretto al quadro e alla rete artificiale. Prendendo come riferimento lo schema di Figura 5.12, ognuna delle sei sezioni è connessa ad una delle prese a muro. In tal modo collegandosi alla presa 1, ovvero la prima da sinistra, si connette un dispositivo direttamente all'uscita dell'UPS, mentre se lo si vuole collegare all'uscita del carico la presa da utilizzare è la 6. In corrispondenza di ciascuna presa si nota la presenza di un LED, la cui accensione segnala la presenza della tensione di alimentazione e consente dunque di individuare eventuali errori di cablaggio dopo una modifica alla topologia della Microgrid.

5. *TI PLC DEVELOPMENT KIT E LABORATORIO*

- Con l'etichetta 6 di Figura 5.19 si fa riferimento alla postazione computer, ubicata nel medesimo laboratorio, e costituita da due calcolatori, ciascuno collegato tramite USB ad uno dei modem PLC utilizzati. In ciascuno dei pc sono presenti i software CCS e Zero Configuration GUI forniti da Texas Instruments rispettivamente per la programmazione dei DSP e per i test di monitoraggio della rete.

Un ulteriore elemento utilizzato durante alcuni test è un filtro di linea che introduce un'attenuazione alle radio frequenze. Le specifiche di tale dispositivo vengono riportate in seguito:

- Produttore: Siemens
- Modello: SIFI-E NETZFILTER 2x6 A, 250 V, power line filter

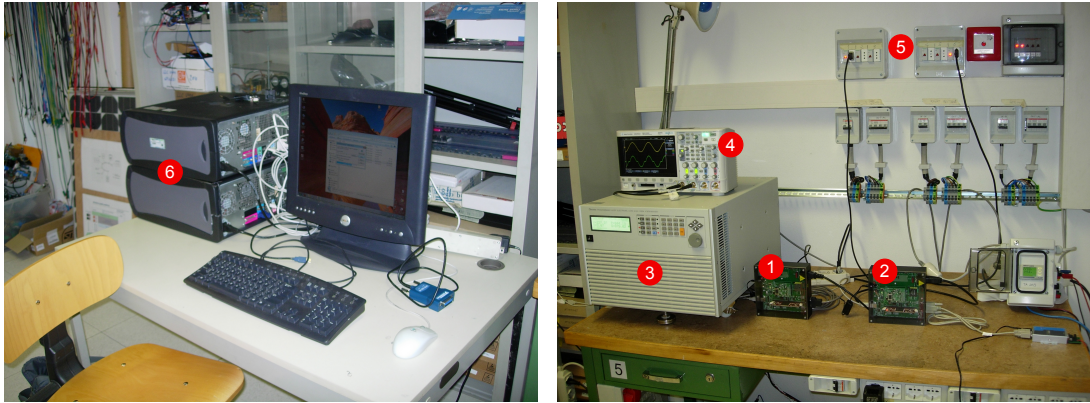


Figura 5.19: Banco

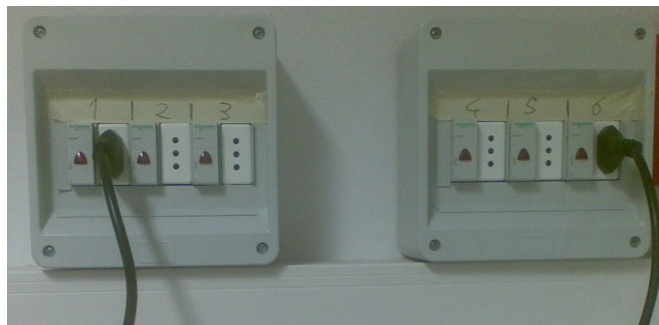


Figura 5.20: Prese a muro

Capitolo 6

Sincronizzazione

In questo capitolo verranno spiegati nel dettaglio i risultati raggiunti durante la tesi nel campo della sincronizzazione, andando a presentare passo per passo tutte le varie funzioni implementate, dal calcolo del Round Trip Time, al calcolo e correzione dell'offset di tempo, al calcolo e correzione dell'offset di frequenza. Gli algoritmi sviluppati sono riferiti ad una modalità di funzionamento Master-Slave, in cui la scheda Slave aggiorna il suo clock per stabilizzarsi con quello della scheda Master. Il progetto si conclude con la gestione dell'ingresso di un nodo Slave nella rete del nodo Master; la sincronizzazione completa dello Slave con il Master viene implementata unendo i singoli procedimenti introdotti nei primi paragrafi del capitolo, cioè andando ad aggiornare il clock dello Slave sia in tempo che in frequenza.

Il registro fondamentale utilizzato nei test è il *CpuTimer2*, che fornisce l'indicazione sul clock della scheda. Il *CpuTimer2* mantiene un contatore che all'inizio della procedura viene riempito con un valore di periodo prefissato; il contatore decrementa il suo valore di una unità ad un tempo prefissato attraverso l'utilizzo di un prescale (per esempio nelle nostre prove è stata impostata una granularità di $0.2\mu s$). In questo modo si riesce quindi ad avere in qualunque istante il riferimento sul clock della scheda, andando appunto ad interrogare il valore del registro. Un punto molto importante di cui bisogna tener conto nel settaggio dei campi del registro *CpuTimer2* è il fatto che la frequenza di lavoro per le schede viene impostata nell'inizializzazione a 120 MHz.

Quindi per inizializzare il registro di clock delle schede si richiama la funzione *ConfiguraCpuTimer*, a cui si forniscono in ingresso i valori di frequenza di lavoro,

periodo iniziale del contatore, e granularità. Conclusa tale funzione i registri di CpuTimer2 saranno settati in modo da fungere da clock di scheda con le impostazioni scelte.

6.1 Sincronizzazione temporale

6.1.1 Metodi di sincronizzazione temporale

La sincronizzazione temporale consiste nel correggere la differenza iniziale tra i clock di due dispositivi. Sono state studiate diverse soluzioni per risolvere questo problema, sia centralizzate che distribuite. Elenchiamo di seguito i metodi più efficienti:

- Algoritmo di Cristian
- Algoritmo di Berkeley
- Network Time Protocol (NTP)
- Clock Sampling Mutual Network Synchronization (CS-MNS)
- Precision Time Protocol (PTP)
- Reference broadcast synchronization

Algoritmo di Cristian

Nell'algoritmo di Cristian i soggetti interessati sono un processo P e un time server S. L'algoritmo si compone dei seguenti semplici passi:

1. P richiede il tempo ad S.
2. Dopo aver ricevuto la richiesta da P, S risponde inviando il tempo T del suo clock.
3. P, alla ricezione della risposta, aggiorna il suo tempo a $T + RTT/2$.

Naturalmente P deve essere a conoscenza del RTT per aggiornare il suo clock, che viene considerato egualmente diviso tra tempo di richiesta e tempo di risposta.

L'accuratezza raggiunta da questo algoritmo è data da $RTT/2 - min$, dove min è il tempo minimo di invio della richiesta da P a S [31].

Algoritmo di Berkeley

L'algoritmo di Berkeley è riferito ad un ambiente di calcolo distribuito. Il procedimento è riassunto nei seguenti punti:

1. Viene scelto un dispositivo Master attraverso un processo di elezione.
2. Il Master interroga i dispositivi Slave che rispondono con il loro tempo.
3. Il Master stima il RTT dei messaggi e calcola il tempo aggiornato di ogni Slave.
4. Il Master fa una media dei clock.
5. Il Master invia agli Slave l'aggiustamento temporale con cui ogni Slave deve aggiornare il suo clock [32].

Network Time Protocol (NTP)

Il Network Time Protocol (NTP) è un protocollo per sincronizzare gli orologi dei dispositivi all'interno di una rete con tempi di latenza variabili ed inaffidabili. Il NTP è un protocollo client-server appartenente al livello applicativo.

Per sincronizzare il suo clock ad un server remoto, il client NTP deve calcolarsi il Round Trip Time e l'offset che ha rispetto al server. Per calcolarsi questi due valori il client invia un pacchetto di richiesta al server remoto che a sua volta trasmette al client un pacchetto di risposta. Il Round Trip Time viene quindi calcolato come $RTT = (t_3 - t_0) - (t_2 - t_1)$, dove t_0 è il tempo di invio del pacchetto di richiesta, t_1 è il tempo di ricezione del pacchetto di richiesta, t_2 è il tempo di trasmissione del pacchetto di risposta e t_3 è il tempo di ricezione del pacchetto di risposta. L'offset è dato invece da $\delta = [(t_1 - t_0) + (t_2 - t_3)]/2$. Quindi attraverso uno scambio di pacchetti si arriva all'aggiornamento del clock da parte del client NTP [34].

Clock Sampling Mutual Network Synchronization (CS-MNS)

CS-MNS è adatto a applicazioni distribuite e mobili. La sua accuratezza è dell'ordine di qualche microsecondo ed è compatibile con IEEE 802.11 e standard simili [33].

Precision Time Protocol (PTP)

Il Precision Time Protocol (PTP) è un protocollo utilizzato per la sincronizzazione di dispositivi industriali o di strumentazione di laboratorio all'interno di una rete con tempi di latenza variabili ed inaffidabili. Rispetto al protocollo Network Time Protocol, permette di ottenere un'accuratezza di sincronizzazione maggiore (inferiore al microsecondo), utilizzando componenti hardware dedicati in reti locali (LAN). Il PTP, come il NTP, è un protocollo di livello applicativo.

Anche in questo metodo vengono calcolati al fine della sincronizzazione il RTT e l'offset, attraverso le stesse formule utilizzate dal NTP [35].

Reference broadcast synchronization

Questo algoritmo viene spesso utilizzato in reti wireless o in reti di sensori. Un iniziatore invia in broadcast un messaggio per dare l'impulso ai ricevitori di aggiornare il proprio clock [33].

L'algoritmo di sincronizzazione temporale sviluppato nella tesi è stato scelto sulla base dei metodi di Network Time Protocol e Precision Time Protocol. Infatti, partendo dall'idea di questi metodi, soprattutto riguardo al calcolo del RTT e dell'offset, abbiamo sviluppato il procedimento che viene spiegato nei successivi paragrafi.

6.1.2 Calcolo del Round Trip Time (RTT)

Il Round Trip Time (RTT) è definito come il tempo impiegato da uno scambio completo di pacchetti tra due nodi. Nel nostro progetto di sincronizzazione il RTT viene calcolato prendendo come riferimento lo schema di Figura 6.1.

Elenchiamo di seguito i passi del meccanismo di calcolo del Round Trip Time:

1. La scheda *Slave* comincia la comunicazione inviando il pacchetto *pack 0* al tempo t_0 .
2. La scheda *Master* riceve il *pack 0* al tempo t_1 .
3. Il *Master* risponde allo *Slave* attraverso l'invio del *pack 1*, comunicando i tempi t_1 di ricezione di *pack 0* e t_2 di trasmissione di *pack 1*.

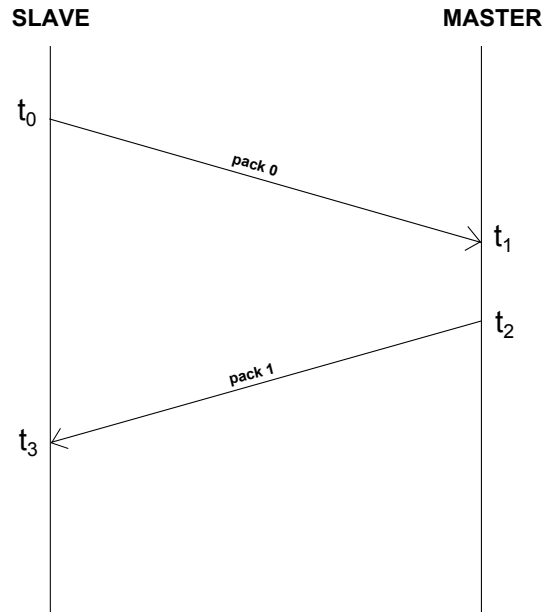


Figura 6.1: Schema di base per il calcolo del RTT

4. Lo *Slave* riceve il *pack 1* al tempo t_3 .

Alla fine di questo procedimento la scheda Slave è in possesso dei quattro tempi t_0, t_1, t_2, t_3 , e può dunque calcolarsi il RTT attraverso la seguente formula:

$$RTT = (t_0 - t_3) - (t_1 - t_2) \quad (6.1)$$

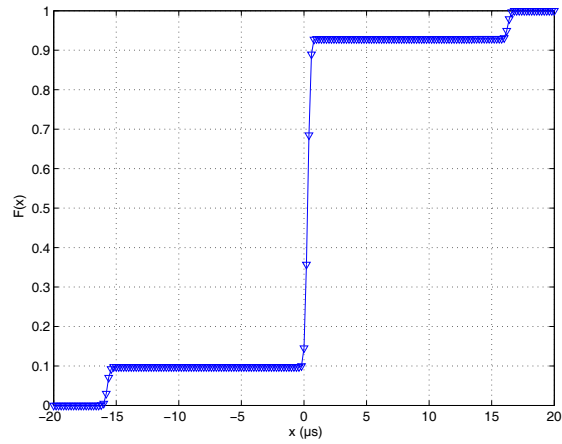
Ricordiamo che la formula dell'equazione (6.1) viene così implementata perché i clock delle schede a nostra disposizione sono costituiti da dei contatori che scandiscono il tempo in modo decrescente.

Iterando più volte il procedimento appena illustrato arriviamo ad avere a disposizione una statistica sul Round Trip Time, ottenendo i grafici della *Probability Density Function* (PDF) e della *Cumulative Distribution Function* (CDF), oltre all'andamento del RTT nel corso delle varie prove e la sua media.

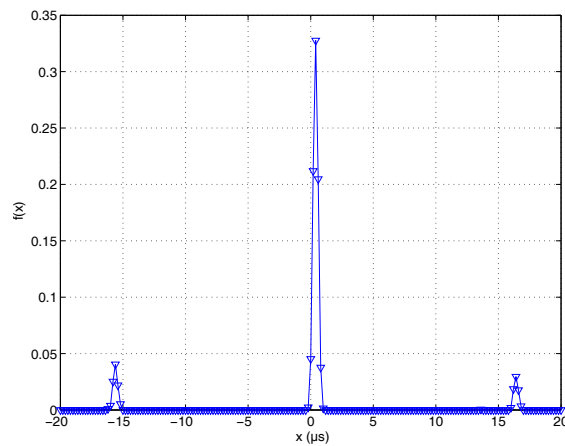
La Figura 6.2 riporta i grafici ottenuti in 2100 prove e con clock di granularità $0.2\mu s$. In particolare le Figure 6.2a e 6.2b mostrano rispettivamente la CDF e la PDF ottenute nei test, mentre la Figura 6.2c rappresenta l'andamento del RTT nel corso delle prove.

Come si può notare dalle Figure 6.2a, 6.2b e 6.2c, sono presenti delle anomalie nel funzionamento delle schede, che si manifestano con dei picchi che si discostano

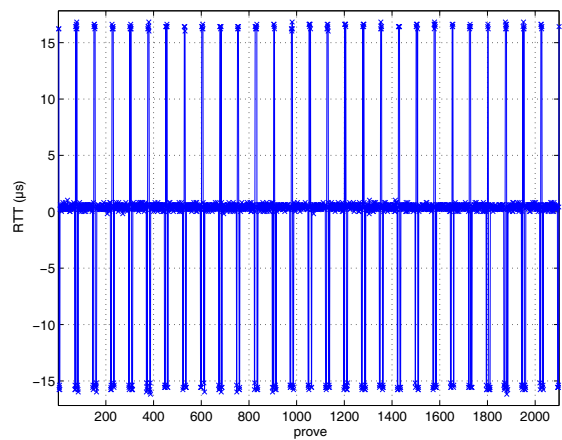
6.1 SINCRONIZZAZIONE TEMPORALE



(a) RTT: Cumulative Distribution Function, ,
media = 38.01ms



(b) RTT: Probability Density Function, ,
media = 38.01ms



(c) Andamento nelle 2100 prove del RTT, ,
media = 38.01ms

Figura 6.2: Statistica e andamento nelle prove del RTT, con 2100 prove e con granularità di clock di $0.2\mu s$

```
%Calcola la media per i valori di RTT rilevati
media = mean(RTT);
%Corregge l'anomalia di 16 microsecondi
for i=1:n_prove
    if (RTT(i)<media-10)
        RTT(i) = RTT(i)+16;
    end
    if (RTT(i)>media+10)
        RTT(i) = RTT(i)-16;
    end
end
%Calcola la nuova media e varianza per i valori corretti di RTT
media = mean(RTT);
varianza = var(RTT);
```

Figura 6.3: Algoritmo di correzione dell'anomalia di $\pm 16\mu s$ per il RTT

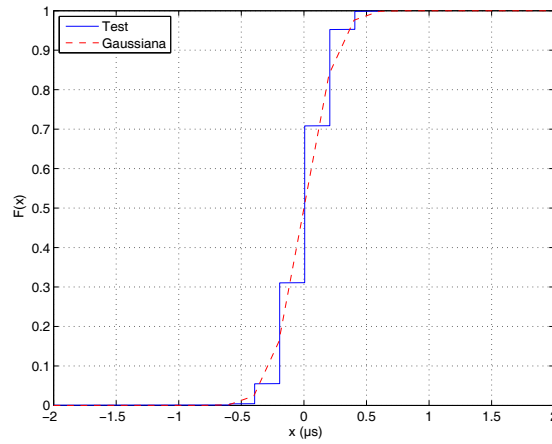
di $\pm 16\mu s$ dalla media del RTT. La correzione di tali anomalie viene effettuata nei seguenti passi:

1. Calcola la media dei valori di RTT rilevati.
2. Confronta ogni singolo valore di RTT con la media, e se supera la media di una certa soglia lo corregge. Più nel dettaglio:
 - Se $RTT(i) > media + 10\mu s \Rightarrow RTT(i) = RTT(i) - 16\mu s$
 - Se $RTT(i) < media - 10\mu s \Rightarrow RTT(i) = RTT(i) + 16\mu s$
3. Calcola la nuova media e la varianza ottenuta con i valori di RTT corretti.

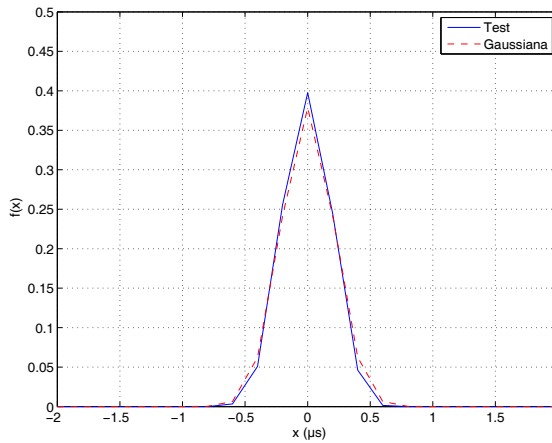
In Figura 6.3 viene riportato il codice dell'algoritmo utilizzato per correggere l'anomalia. I risultati ottenuti dopo la correzione sono rappresentati nei grafici di Figura 6.4, dove la media di $38,01ms$ è stata tolta dalle misurazioni; i grafici di CDF e PDF ottenuti dai test sono confrontati con le curve gaussiane.

6.1.3 Anomalia

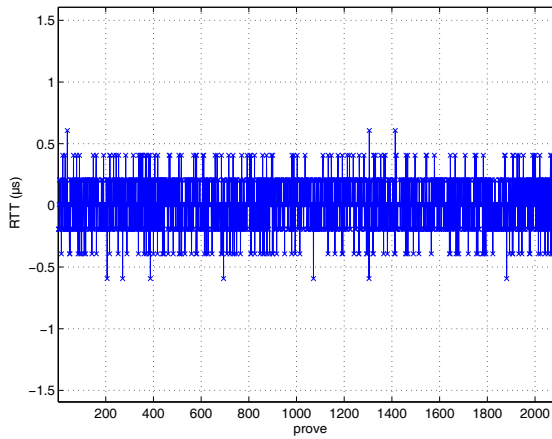
Nel capitolo precedente abbiamo notato la presenza di un'anomalia delle schede; infatti come si vede dalla PDF del RTT prima della correzione (Figura 6.2b) sono presenti dei picchi di $\pm 16\mu s$. Questo comportamento è stato analizzato con varie prove. Si è ottenuto che, anche cambiando la granularità dei contatori di clock delle schede ($0.1\mu s, 0.2\mu s, 0.5\mu s, 1\mu s$), la presenza dei picchi rimane costante a $\pm 16\mu s$. Il comportamento appena discusso si presenta quindi anche nei



(a) RTT: Cumulative Distribution Function, $media = 38.01ms$



(b) RTT: Probability Density Function, $media = 38.01ms$



(c) Andamento nelle 2100 prove del RTT, $media = 38.01ms$

Figura 6.4: Statistica e andamento nelle prove del RTT, con 2100 prove e con granularità di clock di $0.2\mu s$, dopo la correzione delle anomalie

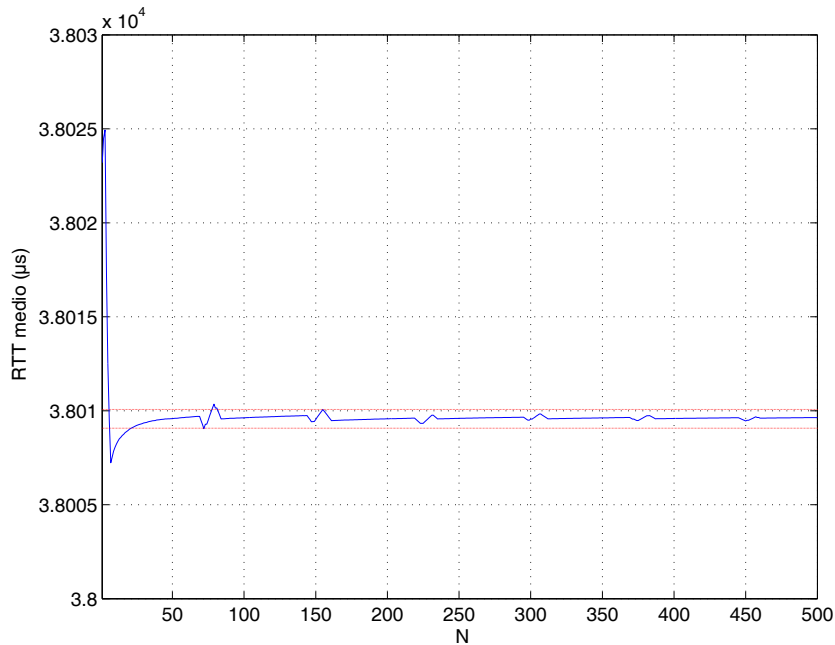


Figura 6.5: Stima del RTT rispetto a N_{RTT} , con bound di errore di $\pm 0.5\mu s$

test successivi, come per esempio nel calcolo dell'offset di tempo e dell'offset di frequenza.

Alcune cause del fenomeno anomalo possono essere riferite allo svuotamento dei buffer in trasmissione e in ricezione oppure a dei possibili interrupt che intervengono durante l'algoritmo. Una spiegazione certa all'anomalia però non è ancora stata data.

6.1.4 Calcolo e correzione dell'offset di tempo

Con offset di tempo indichiamo la differenza temporale tra i clock delle schede. Il calcolo e la correzione dell'offset di tempo vengono implementati dopo aver stimato il RTT medio (\overline{RTT}), per avere una maggiore precisione nel calcolo. La stima del RTT viene fatta iterando per N_{RTT} volte il procedimento di scambio di pacchetti e facendo una media dei singoli risultati ottenuti. Per capire il valore di N_{RTT} da scegliere per stimare il RTT riportiamo in Figura 6.5 il grafico dell'andamento della media di RTT a seconda del valore di N_{RTT} , con un bound di errore di $\pm 0.5\mu s$.

Una volta stimato il RTT si procede al calcolo e alla correzione dell'offset di tempo. L'algoritmo implementato calcola e corregge l'offset di tempo iniziale tra

le due schede, con riferimento allo schema di Figura 6.1 e al procedimento di scambio di pacchetti già spiegato nel capitolo precedente per il calcolo del RTT. Il meccanismo di calcolo viene ripetuto più volte al fine di avere dei risultati sull'andamento dell'offset, mentre il meccanismo di correzione viene implementato solo nella prima prova.

Il calcolo dell'offset temporale viene effettuato dalla scheda Slave alla ricezione del *pack 1*, e quindi con tutti i tempi t_0, t_1, t_2, t_3 noti. Riportiamo la formula del calcolo dell'offset di tempo, indicandolo con il simbolo δ , e ricordando che i clock delle schede scandiscono il tempo in modo decrescente.

$$\delta = [(t_0 - \overline{RTT}/2 - t_1) + (t_3 - \overline{RTT}/2 - t_2)]/2 \quad (6.2)$$

Una volta calcolato δ attraverso l'equazione (6.2) andiamo a correggere il clock della scheda Slave, diminuendolo quindi del valore δ :

$$CLK_{slave} = CLK_{slave} - \delta \quad (6.3)$$

dove CLK_{slave} identifica il clock dello Slave.

In Figura 6.6 viene riportato il grafico dell'andamento dell'offset temporale durante 1200 prove, dopo la correzione del δ iniziale. Gli orologi delle schede funzionano in questo test con granularità di $0.2\mu s$, e il δ calcolato è di $5.7403028s$. Si può notare come δ , dopo una corretta correzione iniziale, tende a diminuire con il passare delle prove. Questo andamento è causato dalla differenza di frequenza nei due clock, cioè dall'offset di frequenza che in questo caso non viene corretto dall'algoritmo. Un ulteriore fenomeno mostrato dalla Figura 6.6 è la presenza di picchi di $8 - 16\mu s$ dovuti all'anomalia già vista precedentemente nel calcolo del RTT ed analizzata nel paragrafo 6.1.3. Nel caso dell'offset di tempo troviamo, a differenza del RTT, degli scalini intermedi di $8\mu s$; questo è dovuto alla formula (6.2) per il calcolo di δ . Infatti l'offset di tempo è calcolato sommando due differenze tra tempi di trasmissione e ricezione e dividendo il tutto per 2. Quindi, se il picco di $16\mu s$ è presente sia in $t_0 - t_1$ che in $t_3 - t_2$, sarà di $16\mu s$ anche il picco totale, se invece il picco è presente in una sola delle differenze, allora il picco totale sarà di $8\mu s$.

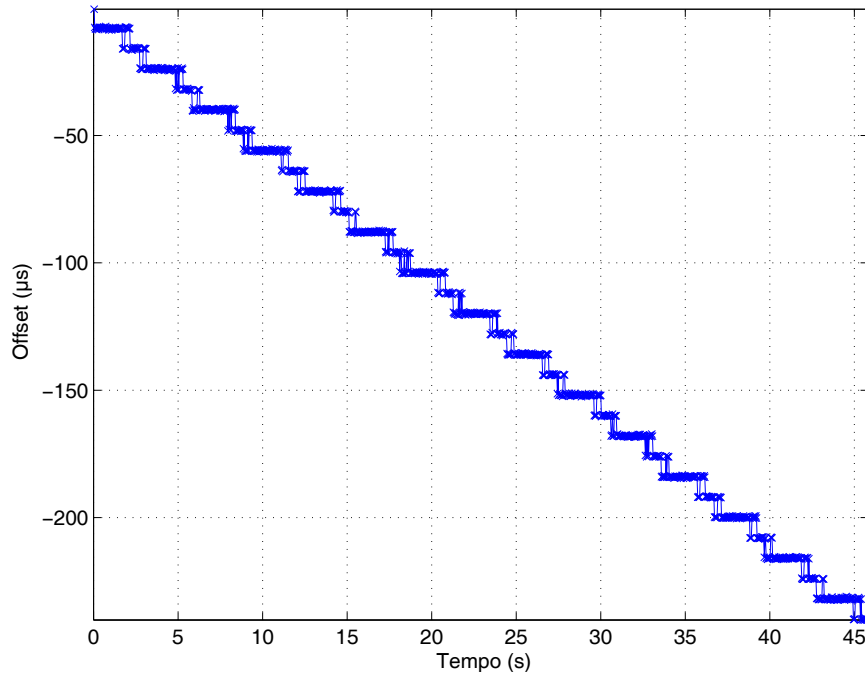


Figura 6.6: Andamento dell'offset di tempo durante 1200 prove dopo la correzione iniziale

6.2 Sincronizzazione in frequenza

6.2.1 Calcolo dell'offset di frequenza

L'offset di frequenza è definito come la differenza tra le frequenze nominali degli oscillatori dei clock delle schede. Possibili cause di questo fenomeno sono i cambiamenti di temperatura oppure dei problemi con la regolazione di tensione. Nelle schede a nostra disposizione l'oscillatore è composto da un cristallo al quarzo che lavora con frequenza nominale di 30 MHz.

Come si è visto dalla Figura 6.6 l'offset di frequenza porta a un aumento graduale della differenza nei tempi delle schede, e per questo è dunque importante riuscire a calcolarlo e a correggerlo. Il nostro algoritmo per il calcolo dell'offset di frequenza si basa sullo schema presentato in Figura 6.7.

L'idea è quella di inviare pacchetti a intervalli di tempo T regolari, e andare a calcolare il rapporto tra i tempi di inter-partenza e i tempi di inter-arrivo per campioni a distanza D . Elenchiamo i punti dell'algoritmo in modo più chiaro:

1. La scheda *Master* trasmette alla scheda *Slave* il *pack 0* per un numero

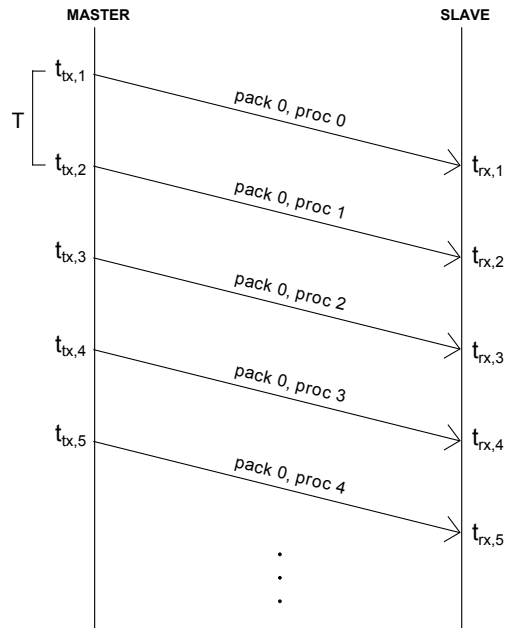


Figura 6.7: Schema di riferimento per il calcolo dell'offset di frequenza

definito di processi, a intervalli T regolari.

2. La scheda *Slave* riceve i pacchetti *pack 0* dei vari processi che portano l'informazione del tempo di invio ($t_{tx,1}, t_{tx,2}, t_{tx,3}, \dots$).
3. Lo *Slave* si calcola il rapporto tra i tempi di inter-partenza e i tempi di inter-arrivo, per un tempo di distanza D e per un numero di volte N fissato.
4. La media degli N rapporti tra i tempi di inter-partenza e inter-arrivo da come risultato l'offset di frequenza tra le due schede.

Indichiamo l'offset di frequenza con ϑ e riportiamo la formula per il calcolo:

$$\vartheta_{N,k} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{t_{tx,i} - t_{tx,i+D}}{t_{rx,i} - t_{rx,i+D}}}{N} \quad (6.4)$$

dove l'indice k indica la realizzazione.

Il valore di $\vartheta_{N,k}$ viene calcolato in parti per milione (ppm). La Figura 6.8 rappresenta il grafico delle curve ottenute in una realizzazione per diversi valori di N in funzione della distanza D ; le curve sono riferite al limite ottimo ottenuto con $N = 300$ e $D = 60s$, che risulta $\vartheta_{300,1}(60s) = -5.3099ppm$, e con un bound di

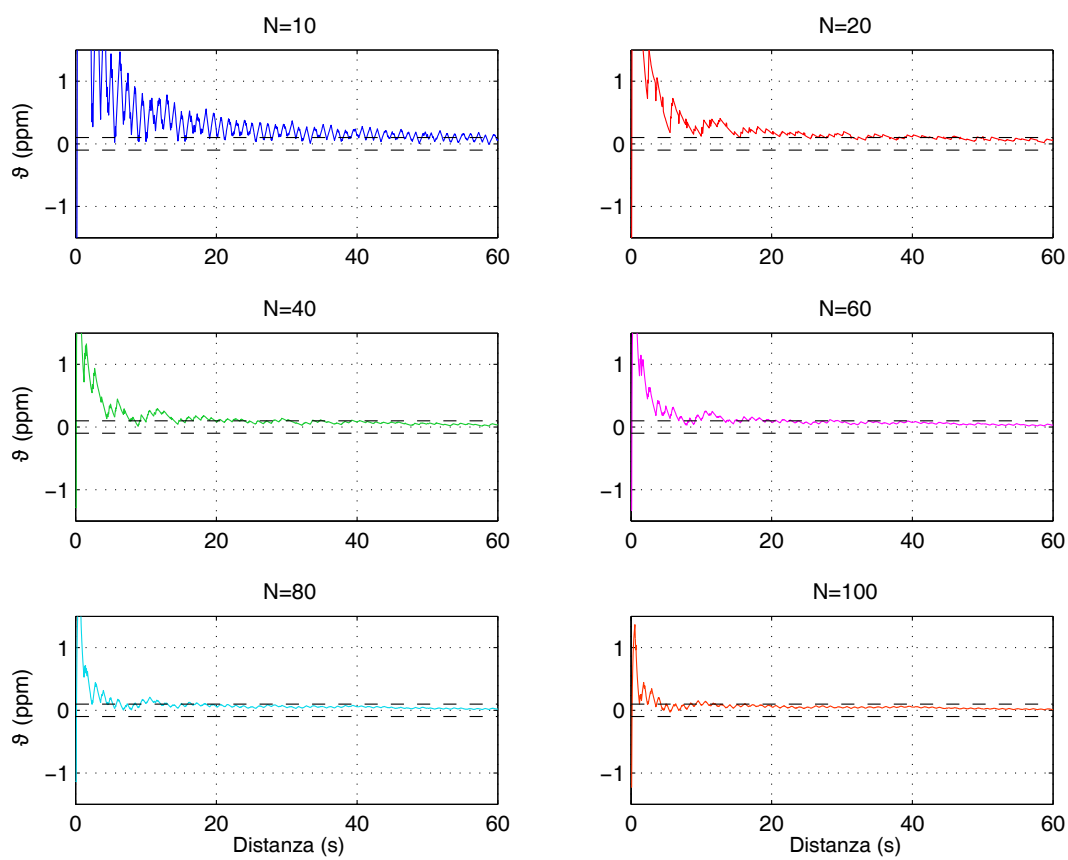


Figura 6.8: Curve di $\vartheta_{N,1}$ calcolato per $N = 10, 20, 40, 60, 80, 100$, in funzione della distanza D , con un bound di errore di $\pm 0.1 ppm$ ($\vartheta_{300,1}(60s) = -5.3099 ppm$)

errore di $\pm 0.1ppm$. Il tempo T tra la trasmissione di pacchetti di processi diversi è di $50ms$.

I grafici di Figura 6.9 mostrano invece le curve della *Root Mean Square Deviation* (RMSE) dell'offset in frequenza per i vari valori di N e in funzione di D ; la RMSE è stata ottenuta per $K = 10$ realizzazioni, utilizzando la seguente formula:

$$RMSE_N = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K \vartheta_{N,k}^2}{K}} \quad (6.5)$$

Andando a valutare per ogni valore di N la minima distanza $D_{min,N}$ per cui la rispettiva curva di $RMSE_N$ rimane sotto il bound di errore di $0.2ppm$, è possibile valutare il tempo totale impiegato dall'algoritmo di stima dell'offset di frequenza. Mettendo in grafico i tempi totali ottenuti (Figura 6.10) si può capire per quali valori di N si ottiene il tempo minimo di stima di ϑ . L'operazione per calcolare il tempo totale ($T_{tot,N}$) per uno specifico valore di N è:

$$T_{tot,N} = N \cdot T + D_{min,N} \quad (6.6)$$

Le curve di ϑ e RMSE rappresentate nei grafici presentano un andamento quasi periodico, che si può vedere dalla presenza ripetuta di picchi. Una possibile spiegazione di questo fenomeno può essere riferita al comportamento anomalo delle schede, già visto più volte in questo capitolo e spiegato nel paragrafo 6.1.3.

6.2.2 Correzione dell'offset di frequenza

Dopo aver implementato il calcolo dell'offset di frequenza, il prossimo passo è logicamente quello di cercare di correggere il clock della scheda Slave. Lo schema dell'algoritmo completo di correzione è riportato in Figura 6.11, e si può dividere in tre parti principali.

1. **Stima del RTT:** Nella prima parte dell'algoritmo si stima il RTT attraverso il procedimento spiegato nel paragrafo 6.1.4. Scambiando N_{RTT} pacchetti di andata e ritorno la scheda Slave riesce ad ottenere una buona indicazione sul Round Trip Time sfruttando l'equazione (6.1). In questa prima parte dell'algoritmo la scheda Slave si calcola anche il valore dell'offset iniziale

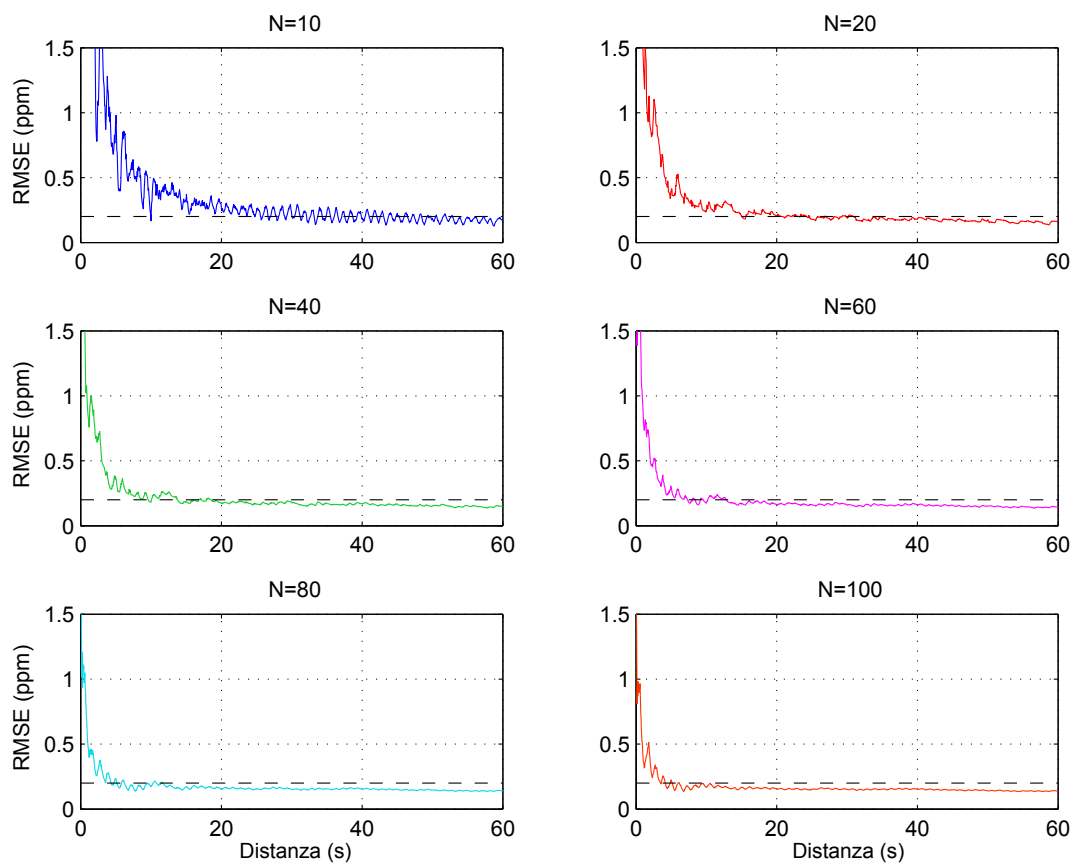


Figura 6.9: Curve di $RMSE_N$ calcolato per $N = 10, 20, 40, 60, 80, 100$, su $K = 10$ realizzazioni, in funzione della distanza D , con un bound di errore sull'RMSE di $0.2ppm$

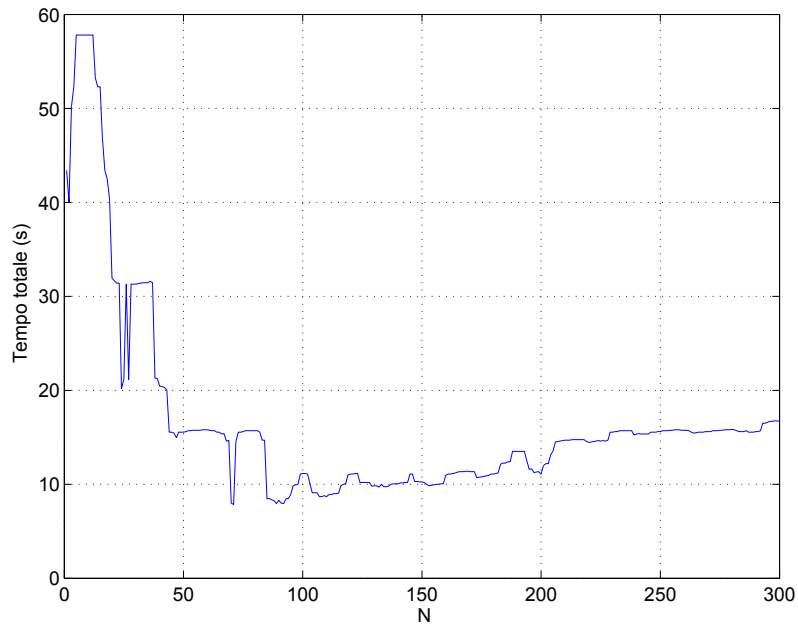


Figura 6.10: Curva dei tempi totali per l'algoritmo di stima di ϑ in funzione di N , con un bound di errore sull'RMSE di $0.2ppm$

tra le due schede δ_{in} , applicando all'ultimo scambio di pacchetti la formula (6.2).

2. **Calcolo dell'offset di frequenza:** Una volta stimato il RTT tra le due schede, il Master inizia la procedura per il calcolo dell'offset di frequenza, utilizzando il procedimento del paragrafo 6.2.1. La scheda Master invia quindi N_ϑ pacchetti di processi diversi con indicazione sul tempo di trasmissione. La scheda Slave alla fine della ricezione dei pacchetti si calcolerà dunque l'offset di frequenza ϑ in *ppm* attraverso la formula (6.4), con N e D scelti in precedenza.
3. **Correzione dell'offset di frequenza e calcolo dell'offset di tempo residuo:** L'ultima parte del procedimento implementa appunto la correzione del ϑ trovato nel punto precedente. La scheda Slave aggiorna il suo clock attraverso la formula:

$$CLK_{slave} = CLK_{slave} + [CLK_{slave} - (T_{in} + \delta_{in})] \cdot \vartheta \quad (6.7)$$

dove T_{in} è il valore iniziale del contatore di clock della scheda Slave e CLK_{slave} è il tempo corrente del clock dello Slave.

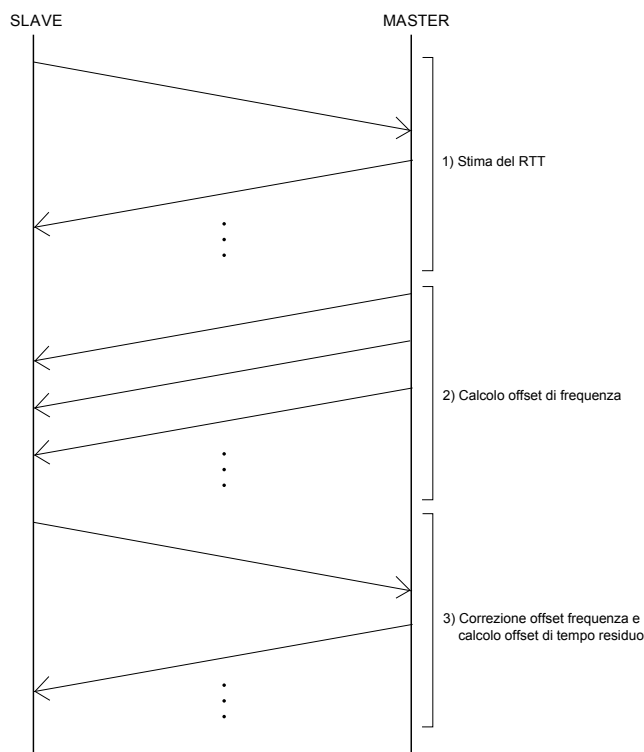


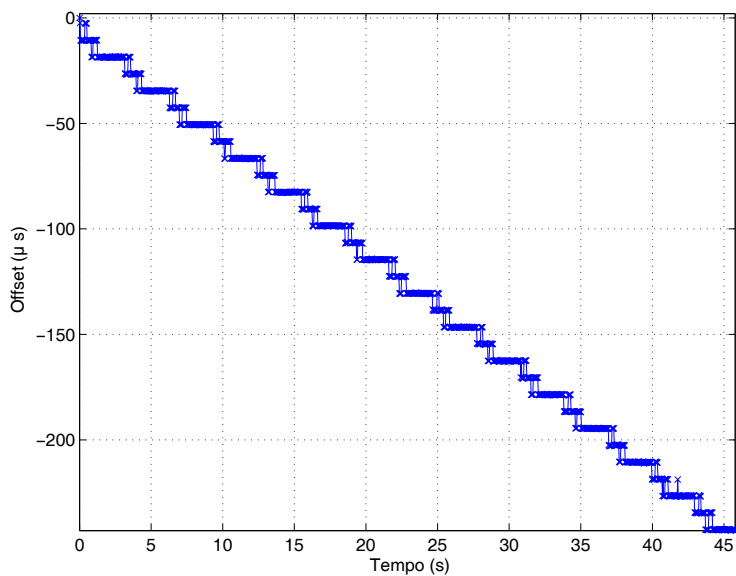
Figura 6.11: Schema dell'algoritmo di correzione dell'offset di frequenza

Il calcolo dell'offset di tempo residuo tra le schede viene quindi effettuato N_{prove} applicando la formula (6.2), con i tempi clock corretti, per analizzarne l'andamento nel tempo.

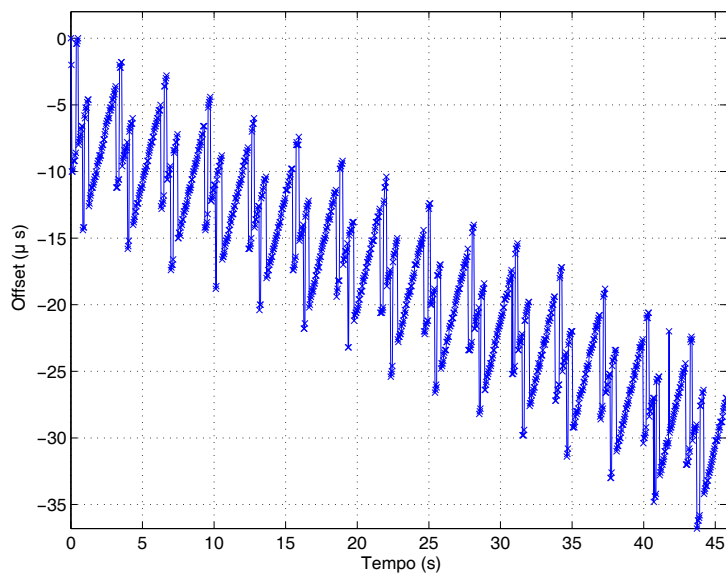
Il risultato del procedimento appena descritto è mostrato in Figura 6.12b, attraverso il grafico dell'andamento dell'offset residuo nel tempo. Il test è stato effettuato per $N_{RTT} = 180$, $N_{\vartheta} = 140$ ($N = 70$, $D = 3.5s$), $N_{prove} = 1200$ e per valori di offset iniziale e offset di frequenza calcolati $\delta_{in} = 6.0128926s$ e $\vartheta = -4.70536ppm$. In Figura 6.12a si vede invece l'andamento dell'offset residuo nel tempo ma senza aver applicato l'aggiornamento dell'orologio dello Slave.

La correzione dell'offset di frequenza porta dei risultati abbastanza significativi; infatti, confrontando l'andamento dei grafici di Figura 6.12 si nota come la variazione dell'offset di tempo residuo sia di circa soli $37\mu s$ nel caso di correzione del clock, contro i $\sim 243\mu s$ riscontrati senza aggiornamento del clock della scheda Slave.

Un'ulteriore osservazione sull'andamento dell'offset dopo la correzione riguarda i "salti" di Figura 6.12b: anche in questo caso infatti si nota da questo



(a) Andamento dell'offset residuo tra le schede rispetto all'offset iniziale senza correzione di offset di frequenza



(b) Andamento dell'offset residuo tra le schede rispetto all'offset iniziale con correzione di offset di frequenza

Figura 6.12: Confronto tra gli andamenti dell'offset residuo tra le schede

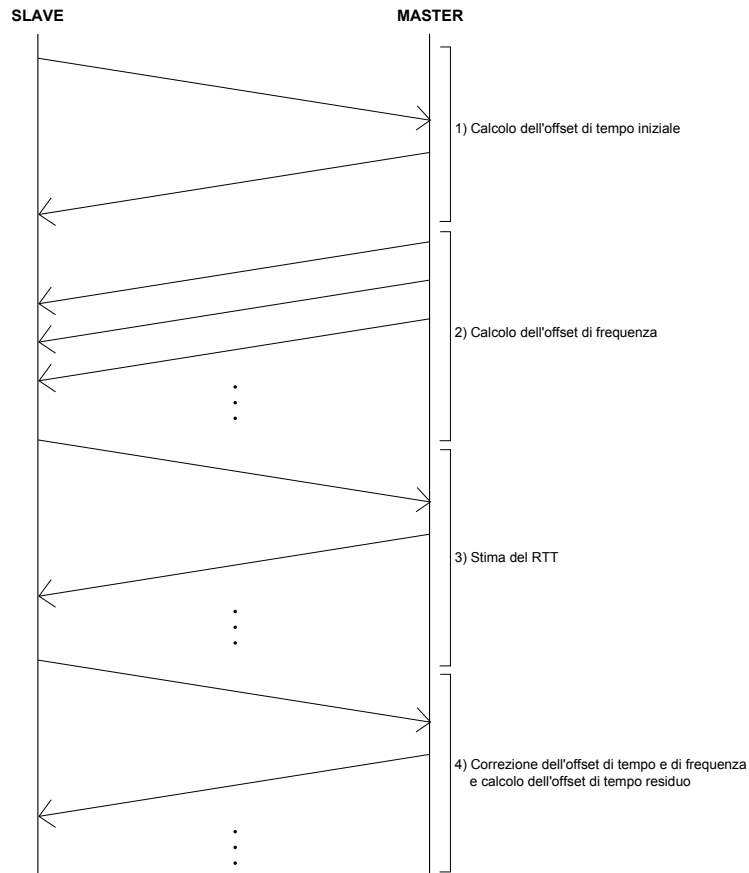


Figura 6.13: Schema dell'algoritmo di correzione completa dell'offset

comportamento la presenza dei $\pm 16\mu s$ di anomalia.

6.3 Sincronizzazione di un nodo alla rete

In questo capitolo cercheremo di unire le analisi e i risultati ottenuti nei paragrafi precedenti per arrivare alla sincronizzazione definitiva tra due schede. Andremo quindi ad implementare la completa sincronizzazione di un nuovo nodo che entra nella rete, andando a correggere sia l'offset di frequenza che l'offset di tempo, attraverso i metodi illustrati nei capitoli 6.1 e 6.2.

I passi dell'algoritmo di sincronizzazione sono spiegati nei punti seguenti e rappresentati in Figura 6.13:

1. **Calcolo dell'offset di tempo iniziale δ_{in} :** Il primo passo dell'algoritmo consiste nello scambio di un pacchetto tra il nodo Slave e il nodo Master al fine di calcolare l'offset di tempo iniziale δ_{in} ; lo Slave invia quindi il *pack*

θ e riceve il *pack 1* con l'indicazione dei tempi t_0, t_1, t_2, t_3 e si calcola δ_{in} utilizzando la formula (6.2).

2. **Calcolo dell'offset di frequenza ϑ :** Terminato il calcolo di δ_{in} , lo Slave è pronto per calcolarsi l'offset di frequenza rispetto al Master; il nodo Master invia quindi N_ϑ pacchetti a intervalli regolari T con l'informazione dei tempi di trasmissione al nodo Slave, che sarà in grado di trovare ϑ sfruttando la formula (6.4). I valori di N e D sono scelti all'inizio dell'algoritmo.
3. **Stima del RTT:** La stima del RTT avviene come già illustrato nel paragrafo 6.1.4 e nel 6.2.2. Attraverso N_{RTT} processi di scambio di pacchetti, il nodo Slave si calcola la stima del RTT (\overline{RTT}) facendo una media sui RTT trovati per ogni scambio con la formula (6.1).
4. **Correzione dell'offset di tempo e di frequenza e calcolo dell'offset di tempo residuo:** Infine, una volta calcolato l'offset di frequenza, la stima del RTT e l'offset di tempo, il nodo Slave è in grado di correggere il suo clock e di verificare l'andamento dell'offset di tempo residuo a passi temporali regolari τ . L'aggiornamento del clock avviene attraverso la seguente formula:

$$CLK_{slave} = CLK_{slave} + [CLK_{slave} - (T_{in} + \delta_{in})] \cdot \vartheta - \delta_i \quad (6.8)$$

dove δ_i è l'offset di tempo residuo all' i -esima prova, trovato facendo la regressione lineare dei punti dell'offset residuo dopo la correzione in frequenza. Infatti, come si vede dal grafico di Figura 6.12b, l'andamento dell'offset residuo dopo la correzione di ϑ procede con dei picchi, e quindi potrebbe risultare errato correggere l'offset di tempo residuo andando a prendere δ_i in modo puntuale ogni τ . L'idea è quindi quella di campionare l'andamento a passi di τ e di calcolare la retta di regressione lineare dei punti trovati; in questo modo l'indicazione sull'offset temporale δ_i da correggere ad ogni passo sarà nel tempo più precisa.

Le formula utilizzata per calcolare la regressione lineare è:

$$y_i = a + bx_i \quad (6.9)$$

dove l'aggiornamento viene implementato nel seguente modo:

$$\begin{aligned}
 \bar{x} &= \alpha \cdot \bar{x} + (1 - \alpha) \cdot x_i, \\
 \bar{y} &= \alpha \cdot \bar{y} + (1 - \alpha) \cdot y_i, \\
 S_{xy} &= \alpha \cdot S_{xy} + (1 - \alpha) \cdot (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \\
 S_{xx} &= \alpha \cdot S_{xx} + (1 - \alpha) \cdot (x_i - \bar{x})^2, \\
 b &= \frac{S_{xy}}{S_{xx}}, \\
 a &= \bar{y} - b\bar{x}
 \end{aligned} \tag{6.10}$$

Inoltre ad ogni "istante di campionamento" la scheda Slave aggiorna anche la stima del RTT, utilizzando la seguente formula:

$$\overline{RTT} = \overline{RTT} \cdot \alpha + RTT_i \cdot (1 - \alpha) \tag{6.11}$$

I risultati ottenuti dall'algoritmo appena discussi sono presentati nelle Figure 6.14, 6.15, 6.16, e 6.17 per diversi valori di α . Per ogni valore di α vengono riportati i grafici dell'andamento dell'offset residuo nei casi senza correzione di offset, con sola correzione dell'offset di frequenza, e con correzione completa, sia in frequenza che nel tempo. Per l'offset residuo senza correzione e con sola correzione di frequenza i grafici sono scalati rispetto al valore iniziale di offset tra le schede, in modo da rendere più visibili il confronto ottenuto in una scala di μs . Inoltre per i vari α vengono riportati anche i grafici dell'andamento del coefficiente a , cioè la stima dell'offset di tempo iniziale, e del coefficiente b sommato a ϑ , in modo da rappresentare l'andamento l'offset di frequenza stimato. Anche il grafico riferito ad a è scalato rispetto al valore iniziale, per lo stesso motivo spiegato sopra.

I parametri sono stati scelti nel seguente modo:

$$\begin{aligned}
 N_{\vartheta} &= 140, & T &= 50ms \\
 N &= 70, & D &= 3.5s \\
 N_{RTT} &= 180 & \tau &= 10s
 \end{aligned}$$

La Tabella riassume, per ogni valore di α , i parametri calcolati dall'algoritmo.

Come si può vedere dai grafici di Figura 6.14c, 6.15c, 6.16c, e 6.17c, un nodo Slave che entra in rete riesce a sincronizzarsi in modo abbastanza preciso al nodo Master. Infatti, l'offset residuo tra il nuovo nodo e il Master rimane entro un range

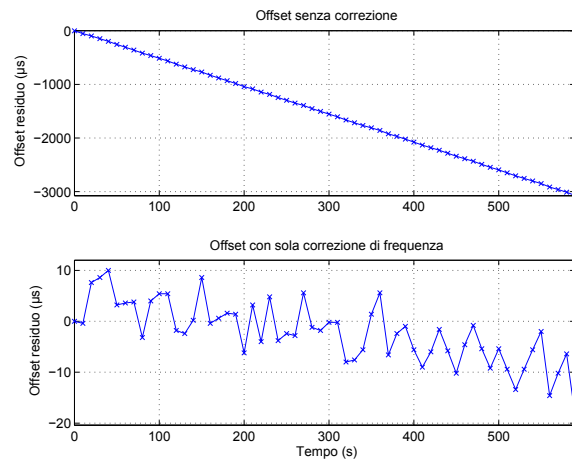
6.3 SINCRONIZZAZIONE DI UN NODO ALLA RETE

α	δ_{in} [s]	ϑ [ppm]	\overline{RTT} [ms]
0.95	7.082605	-5.177942	37.9438
0.99	6.426213	-5.213705	37.9426
0.995	6.544141	-4.787105	37.9432
0.999	7.082605	-4.901206	37.9438

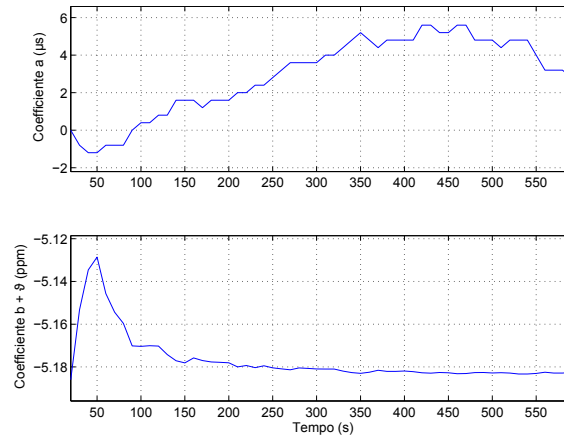
Tabella 6.1: Parametri calcolati dall'algoritmo di sincronizzazione

sull'ordine delle decine di μs , durante un tempo di osservazione di 10 minuti. In particolare il risultato ottenuto con $\alpha = 0.99$ rappresentato in Figura 6.15c evidenzia come l'offset residuo calcolato dopo la correzione completa rimanga per tutta la durata di osservazione entro un range di $\pm 10\mu s$.

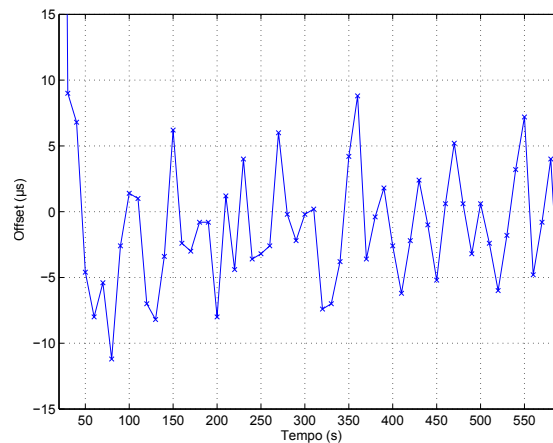
6. SINCRONIZZAZIONE



(a) Andamento dell'offset residuo tra le schede senza correzione e con sola correzione dell'offset di frequenza



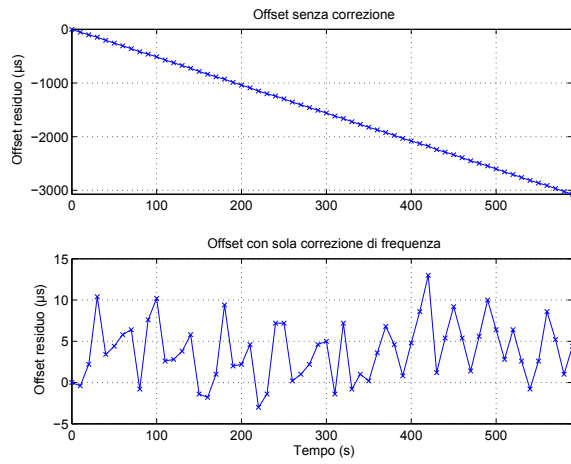
(b) Andamento dei coefficienti a e b , cioè dell'offset di tempo iniziale e dell'offset di frequenza



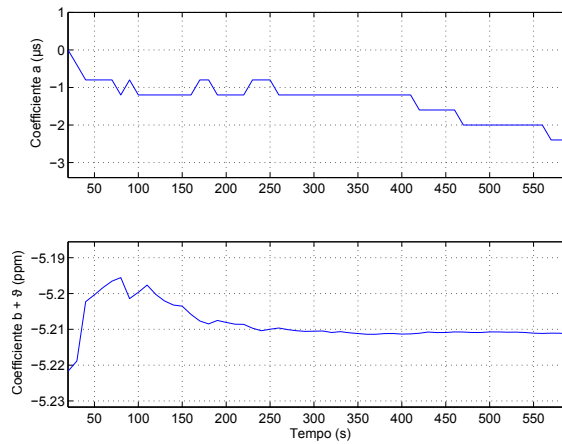
(c) Andamento dell'offset residuo tra le schede con correzione di offset completa

Figura 6.14: Risultati della sincronizzazione per $\alpha = 0.95$

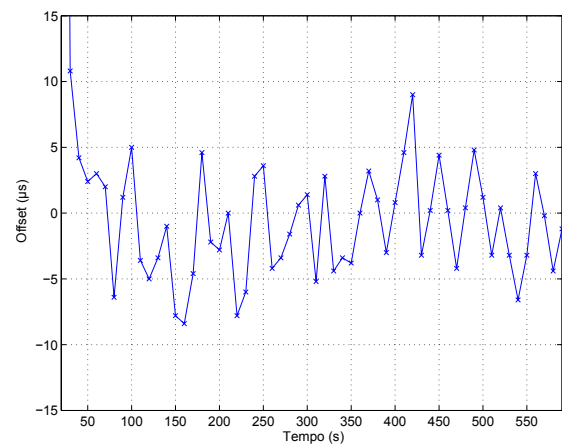
6.3 SINCRONIZZAZIONE DI UN NODO ALLA RETE



(a) Andamento dell'offset residuo tra le schede senza correzione e con sola correzione dell'offset di frequenza



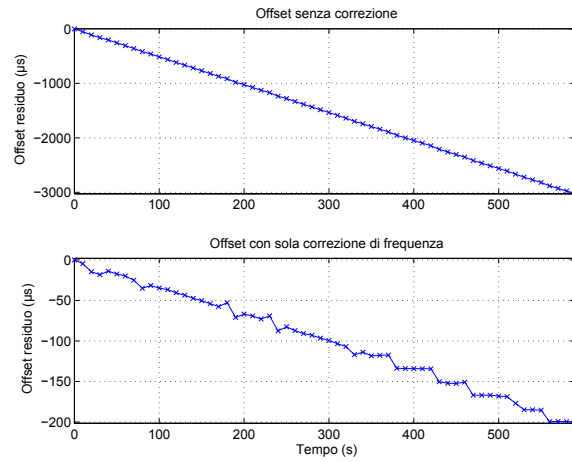
(b) Andamento dei coefficienti a e b , cioè dell'offset di tempo iniziale e dell'offset di frequenza



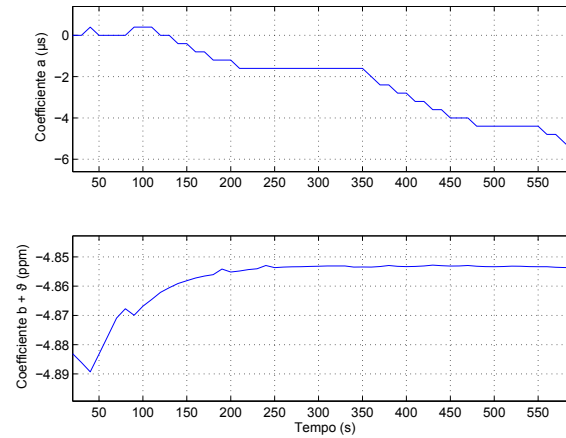
(c) Andamento dell'offset residuo tra le schede con correzione di offset completa

Figura 6.15: Risultati della sincronizzazione per $\alpha = 0.99$

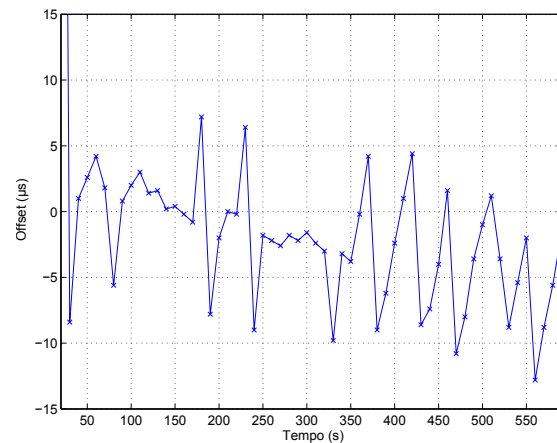
6. SINCRONIZZAZIONE



(a) Andamento dell'offset residuo tra le schede senza correzione e con sola correzione dell'offset di frequenza



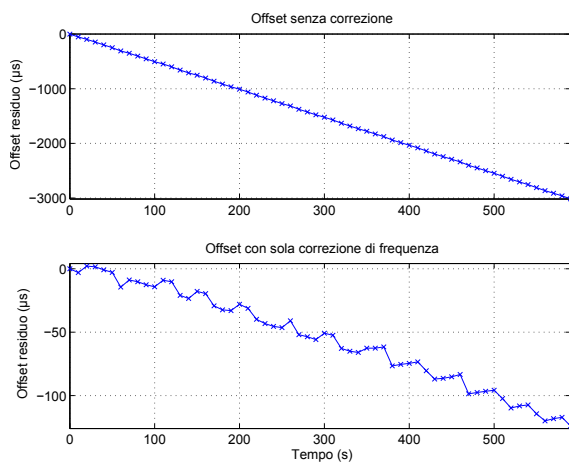
(b) Andamento dei coefficienti a e b , cioè dell'offset di tempo iniziale e dell'offset di frequenza



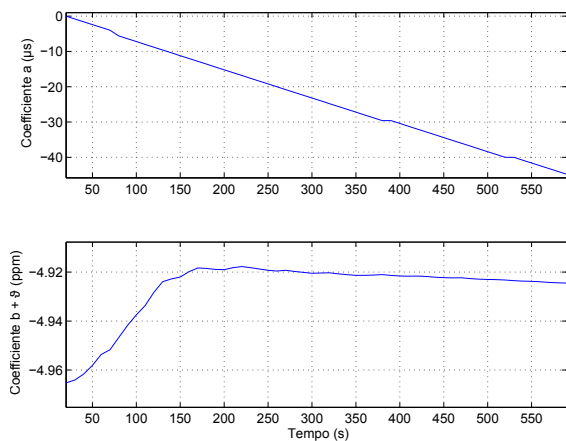
(c) Andamento dell'offset residuo tra le schede con correzione di offset completa

Figura 6.16: Risultati della sincronizzazione per $\alpha = 0.995$

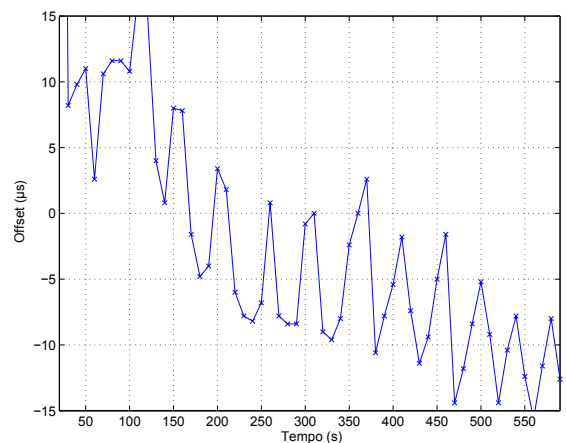
6.3 SINCRONIZZAZIONE DI UN NODO ALLA RETE



(a) Andamento dell'offset residuo tra le schede senza correzione e con sola correzione dell'offset di frequenza



(b) Andamento dei coefficienti a e b , cioè dell'offset di tempo iniziale e dell'offset di frequenza



(c) Andamento dell'offset residuo tra le schede con correzione di offset completa

Figura 6.17: Risultati della sincronizzazione per $\alpha = 0.999$

Capitolo 7

Conclusioni

I risultati ottenuti nel progetto sulla sincronizzazione sono stati presentati nel Capitolo 6. Si è analizzato il comportamento dei clock delle due schede, cercando di correggere passo per passo tutti i fattori responsabili dell'offset tra i dispositivi, attraverso algoritmi e procedimenti implementati attraverso una rete di comunicazione PLC, isolata dalla rete elettrica nazionale e a distanza nulla. Come protocollo di PLC utilizzato per sviluppare il firmware del progetto è stato scelto PRIME, il cui livello fisico viene fornito con il Development Kit di Texas Instruments.

Il primo passo per arrivare all'obiettivo finale della sincronizzazione è stato l'analisi del Round Trip Time (RTT), il tempo impiegato da uno scambio completo di pacchetti tra le schede. È stata effettuata una statistica su prove ripetute di calcolo del RTT, arrivando a presentarne in grafico la PDF, la CDF e l'andamento nel tempo. Dalla Figura 6.2 si è notata la presenza di un'anomalia, data da picchi che si discostano dalla media di $\pm 16\mu s$; questa anomalia è stata studiata nel dettaglio nel paragrafo 6.1.3, ed è stata riscontrata in tutte le analisi successive fatte sui clock delle schede. L'anomalia è stata tolta dalla statistica del RTT attraverso un algoritmo spiegato in 6.1.2; la nuova statistica sui valori corretti di RTT è stata proposta nei grafici di Figura 6.4, dove si nota la somiglianza alla curve di statistica gaussiana.

Si è proseguito poi con il calcolo e la correzione dell'offset di tempo, implementato attraverso il procedimento spiegato nel paragrafo 6.1.4. Il risultato della correzione dell'offset di tempo ha portato ad una sincronizzazione corretta tra i due dispositivi solo per un breve periodo iniziale. Infatti, come mostrato in

Figura 6.6, si vede che con il passare del tempo l'offset tra le schede ritorna a crescere. Questo comportamento è riconducibile all'offset di frequenza tra i due modem PLC, cioè alla differenza tra le frequenze nominali dei loro clock. L'offset di frequenza in effetti non è stato preso in considerazione fino a questo punto, ma il suo calcolo e la sua correzione vengono implementati nel punto successivo.

Il calcolo dell'offset di frequenza viene illustrato nel paragrafo 6.2.1 e viene utilizzato poi nel procedimento di correzione sviluppato nel paragrafo 6.2.2. I risultati della correzione dell'offset di frequenza vengono presentati attraverso la Figura 6.12, e mostrano il confronto tra l'andamento dell'offset di tempo residuo nei casi con e senza correzione. Si nota una differenza di $\sim 200\mu s$ in un tempo di analisi di 45s.

Dopo aver analizzato tutti i fattori che interessano la sincronizzazione delle schede è stato sviluppato l'algoritmo che gestisce completamente l'ingresso in rete di un nodo Slave dal punto di vista della sincronizzazione al nodo Master. Il procedimento viene illustrato nel paragrafo 6.3, e i risultati sono rappresentati nei tre grafici di Figura ???. In questi grafici è proposto un confronto sull'andamento dell'offset temporale tra il nodo Slave e il nodo Master nei tre casi di interesse: senza nessun tipo di correzione, con correzione di frequenza e con correzione completa di frequenza e tempo. La correzione completa è stata implementata attraverso l'utilizzo della regressione lineare su campioni presi dall'andamento dell'offset residuo dopo la correzione di frequenza, e ha portato ad ottenere un risultato più che soddisfacente. Infatti dall'andamento dell'offset residuo dopo la correzione completa (Figure 6.14c, 6.15c, 6.16c, e 6.17c) risulta che l'offset rimane in un range dell'ordine delle decine di μs per tutta la durata di osservazione, pari a 10 minuti. In particolare il grafico di Figura 6.15c rappresenta i risultati migliori ottenuti dall'algoritmo di sincronizzazione, con un range di errore pari a $\pm 10\mu s$.

Si può quindi concludere affermando che l'algoritmo di sincronizzazione sviluppato ha portato a risultati soddisfacenti in una rete isolata molto semplice, in cui le due schede comunicano a distanza praticamente nulla; infatti si è arrivati ad ottenere un'accuratezza sulla decina di microsecondi. I prossimi sviluppi del progetto riguarderanno l'analisi dell'algoritmo in una rete composta da più nodi, e su distanze maggiori. Un'altra possibilità di ricerca è costituita dall'inserimento nel canale di comunicazione di disturbi e rumori, in modo da rendere la rete sempre più simile ad una rete elettrica reale, e studiarne gli effetti. Un'ulterio-

7. CONCLUSIONI

re sviluppo è rappresentato dal calcolo della distanza tra i nodi di rete, sempre sfruttando come base l'algoritmo presentato da questa tesi.

Bibliografia

- [1] Hassan Farhangi, “The path of the smart grid,” *Power and Energy Magazine, IEEE, January-February 2010*, vol. 8, no. 1, pp. 19-28, Gennaio 2010.
- [2] Stefano Galli, Anna Scaglione, Zhifang Wang, “For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, Giugno 2011.
- [3] “Technology Roadmap - Smart Grids”, International Energy Agency (IEA), 2011.
- [4] Hendrik C. Ferreira, Lutz Lampe, John Newbury, “Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications Over Power Lines,” John Wiley and Sons, Agosto 2010.
- [5] Elena Ragazzi, “Lo stato dell’arte sulle smart grid: orientamenti, attori, prospettive,” CERIS-CNR, Rapporto Tecnico N. 36, Febbraio 2011.
- [6] <http://www.sublimina.it/linee-di-ricerca-smart-grid/77-smart-gridverso-le-reti-energetiche-di-nuova-generazione.html>
- [7] http://it.wikipedia.org/wiki/Distribuzione_di_energia_elettrica
- [8] Cypress Semiconductor, “What is Power Line Communications,” <http://www.eetimes.com/design/industrial-control/4218852/What-is-Power-Line-Communication-?pageNumber=0>, Agosto 2011.
- [9] Matthias Götz, Manuel Rapp, Klaus Dostert, “Power Line Channel Characteristics and Their Effect on Communication System Design,” *IEEE Communications Magazine*, Aprile 2004.

BIBLIOGRAFIA

- [10] Anindya Majumder, James Caffery, “Power Line Communications: an overview,” IEEE, Ottobre/Novembre 2004.
- [11] PRIME Project, “Technology Whitepaper - PHY, MAC and Convergence Layer,” v1.0, 21 Luglio 2008.
- [12] “Draft Specification for Powerline Intelligent Metering Evolution (PRIME),” R1.3.6, PRIME Alliance Technical Working Group.
- [13] <http://www.g3-plc.com>.
- [14] “PLC G3 Physical Layer Specification,” ERDF.
- [15] “PLC G3 MAC Layer Specification,” ERDF.
- [16] “PLC G3 Profile Specification,” ERDF.
- [17] IEEE Std 802.15.4-2006, “Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs),” 2006.
- [18] Kevin Dominik Korte, Iyad Tumar, Jürgen Schönwälder, “Evaluation of IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks Implementations,” *Local Computer Networks, 2009. LCN 2009. IEEE 34th Conference on*, pp. 881-888, 20-23 Ottobre 2009.
- [19] “HomePlug Green PHY The Standard For In-Home Smart Grid Powerline Communications,” v1.00, HomePlug Powerline Alliance, 14 Giugno 2010.
- [20] http://www.enel.it/it-IT/reti/enel_distribuzione/qualita/progetti_contatore_elettronico/contatore.aspx?it=1
- [21] Klaas De Craemer, Geert Deconinck, “Analysis of State-of-the-art Smart Metering Communication Standards,” YRS edition 2010, Leuven, Belgio, 29-30 Marzo 2010.
- [22] <http://it.wikipedia.org/wiki/LonWorks>
- [23] Michele Tasca, “Power Line Communications per Smart Grids: studio e test su rete artificiale,” Università di Padova, Aprile 2012.

- [24] Francesco Trentini, “Power Line Communications: an implementation of a real time control architecture for Smart Grid,” Università di Padova, Aprile 2012.
- [25] http://www.ti.com/ww/en/smart_grid_solutions/smart_grid_plc.htm
- [26] Texas Instruments, “TI PLC Development Kit User Guide”, v0.4, 13 Agosto 2010.
- [27] Texas Instruments, “TMS320F28335, TMS320F28334, TMS320F28332 Digital Signal Controllers (DSCs) Data Manual,” Gennaio 2012.
- [28] Frank Bormann, “Module 3: Program Development Tools in the TMS320F28335,” <http://cnx.org/content/m38161/1.1/>, Aprile 2011.
- [29] Socomec, “MASTERYS BC from 8 to 40 kVA for critical IT and industrial applications,” <http://www.socomec.si/upload/files/BC%208-40.pdf>.
- [30] Università di Padova Dipartimento di Ingegneria dell’Informazione, “Smart Grid,” <http://smartgrid.dei.unipd.it/index.php/sg-lab>, Luglio 2011.
- [31] http://en.wikipedia.org/wiki/Cristian%27s_algorithm
- [32] http://en.wikipedia.org/wiki/Berkeley_Algorithm
- [33] http://en.wikipedia.org/wiki/Clock_synchronization#cite_note-3
- [34] http://en.wikipedia.org/wiki/Network_Time_Protocol
- [35] http://it.wikipedia.org/wiki/Precision_Time_Protocol