



UNIVERSITÀ DELI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
LAUREA IN INGEGNERIA DELLE TELECOMUNICAZIONI

Protocolli Power Line Communications per applicazioni Smart Grid

Laureando:

Roberto FRANCESCON

Relatore:

Prof. Tomaso ERSEGHE

Sommario

In questa tesi verranno analizzati alcuni protocolli a banda larga progettati per offrire, mediante l'utilizzo di tecnologie *Power Line Communications* (PLC), servizi necessari per l'implementazione di una rete *Smart Grid*. *Smart Grid* si riferisce ad un progetto di sviluppo della rete elettrica odierna, che integri sistemi di raccolta dati, monitoraggio e controllo.

Varie tecnologie sono state proposte per fornire il supporto informativo necessario a *Smart Grid* per operare, tecnologie che dovevano soddisfare principalmente al requisito di essere economicamente vantaggiose, oltreché affidabili. Tra le varie tecnologie due si sono imposte come le maggiormente promettenti: la tecnologia *wireless* e PLC. Entrambe offrono l'infrastruttura richiesta da *Smart Grid*, ciascuna con i propri pregi e difetti. Questa tesi analizza la tecnologia PLC e in particolare il protocollo HomePlug Green PHY e la direttiva ITU-T G.hn.

Lista degli acronimi

AC	Alternate Current (corrente alternata)
AES	Advanced Encryption System
AT	Alta Tensione
ARQ	Automatic Repeat reQuest
BT	Bassa Tensione
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance
DC	Direct Current (corrente continua)
DER	Distributed Energy Resources
DR	Demand-Response
EMS	Energy Management Side
ETP	European Technology Platform
FEC	Forward Error Correction
ICT	Information and Communication Technology
LAN	Local Area Network
MPDU	MAC Protocol Data Unit
MT	Media Tensione
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PAN	Personal Area Network
PLC	Power Line Communications
PPDU	PHY Protocol Data Unit
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
ROBO	ROBust OFDM
RTU	Remote Terminal Unit
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
WAN	Wide Area Network
WT	Wavelet Transform
WPA2	Wi-Fi Protected Access 2

Pila OSI

APP	applicazione
PRE	presentazione
SES	sessione
NET	rete
TRS	trasporto
DLL	collegamento dati
- LLC	logical link control
- MAC	medium access control
PHY	fisico

Indice

Introduzione	1
1 Breve panoramica della rete elettrica e introduzione a Smart Grid	3
1.1 La rete elettrica	3
1.2 Il sistema SCADA	4
1.3 Breve introduzione a Smart Grid	6
2 Tecnologie wireless e PLC a confronto	8
2.1 Wireless per Smart Grid	8
2.2 PLC per Smart Grid	10
3 Panoramica della tecnologia PLC	12
3.1 Stato dell'arte degli standard	12
3.2 Ruolo della tecnologia PLC in Smart Grid	13
3.3 Aspetti implementativi: modellizzazione del canale e topologie di rete	15
4 Raccomandazione ITU-T G.hn e protocollo HomePlug Green PHY	18
4.1 Raccomandazione ITU-T G.hn	18
4.1.1 ITU-T G.9960	19
4.1.2 ITU-T G.9961	21
4.1.3 ITU-T G.9970	23
4.1.4 Raccomandazione ITU-T G.hnem	23
4.1.5 Applicazioni Smart Grid	24
4.2 Protocollo HomePlug Green PHY	25
4.2.1 Livello PHY	26
4.2.2 Livello MAC	31
4.2.3 Applicazioni Smart Grid	37
5 Conclusioni	38
A Modulazione OFDM	40
B Cyclic Redundancy Check	42

Introduzione

L'infrastruttura della rete di distribuzione elettrica risale, concettualmente, alla fine del 1800. In quegli anni era infatti in corso un accesissimo dibattito negli Stati Uniti, denominato *guerra delle correnti*, su quale fosse la migliore strategia di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica, che vedeva coinvolti, tra gli altri, Edison, Westinghouse e Tesla. Le due tecnologie tra cui scegliere riguardavano la trasmissione ed erano corrente continua (DC) e corrente alternata (AC). La questione si avviò ad una risoluzione quando, nel 1888, in una conferenza dell'AIEE, Nikola Tesla, sostenitore della trasmissione tramite corrente alternata, risolse il principale problema legato a quello che era uno dei più diffusi utilizzi dell'energia elettrica, l'alimentazione dei motori [1]. La rete elettrica era caratterizzata, inoltre, dalla presenza di grossi centri di generazione dell'energia che distribuivano tale energia, anche a grandi distanze, agli utilizzatori finali. La struttura della rete elettrica odierna è grossomodo quella che nacque proprio in quegli anni. Si comprende dunque come la rete elettrica sia oggi piuttosto obsoleta nelle maggior parte delle sua composizione, e comunque in tutto il suo progetto.

Di recente si sta tentando di modernizzare la rete elettrica tramite una infrastruttura di informazione dedicata alla gestione in tempo reale e capillare della distribuzione dell'energia, progettando quella che ad oggi si chiama *Smart Grid* [2].

La conversione dell'attuale rete elettrica ad una infrastruttura che sappia rilevare gli innumerevoli parametri necessari per implementare una rete ad alta efficienza non è, però, operazione affatto semplice, né tantomeno facile. Due sono i fattori da tenere maggiormente in considerazione: il primo è che la rete elettrica non può venire cambiata nelle sue componenti se si vuole una adozione su larga scala di Smart Grid: la competitività economica sarebbe infatti irrealizzabile. Il secondo fattore riguarda la realizzazione della rete di misura, monitoraggio e, in generale, rilevamento necessaria a Smart Grid per operare.

Ad oggi, qualunque progetto di realizzazione di una Smart Grid prevede, dunque, lo sfruttamento della rete elettrica già esistente. Le difficoltà sorgono, allora, dalla incompatibilità tra un progetto risalente a quasi due secoli fa e le funzioni richieste per la realizzazione di Smart Grid. Uno dei principali cambiamenti avvenuti nella distribuzione dell'energia, ad esempio, è la conversione da una rete unidirezionale ad una rete bidirezionale con l'introduzione di microgeneratori tra cui: pannelli fotovoltaici, microturbine eoliche e idriche, e accumulatori quali veicoli elettrici. Per quanto riguarda la rete di rilevamento si può affermare, senza dubbio, che due sono le tecnologie ad oggi affermatesi: wireless e Power Line Communications (PLC). Benché entrambe presentino vantaggi e svantaggi nella loro implementazione, in questa tesi verrà fatto un confronto tra le due e sarà analizzato, nello specifico, l'uso di PLC, i traguardi ad oggi raggiunti e i problemi ancora irri-

solti nella sua adozione: in particolare saranno analizzati i diversi protocolli che sono stati delineati dalle varie organizzazioni, sia di standardizzazione sia industriali.

Nella prima sezione viene fatta una panoramica su quale sia la situazione della rete elettrica odierna facendone una descrizione di base e quale sia lo stato dell'arte di Smart Grid tramite una breve introduzione ad essa. Nella seconda sezione vengono messe a confronto la tecnologia wireless e la tecnologia PLC, individuandone relativi pregi e difetti. Nella terza sezione viene analizzata più nel dettaglio la tecnologia PLC: le sfide che ha dovuto affrontare i metodi utilizzati per vincerle e le sfide tuttora aperte. Nella quarta sezione si apre l'analisi dettagliata di due tra i più importanti protocolli per PLC ad ora progettati: la direttiva ITU-T G.hn (G.9960/G.9961) e il protocollo HomePlug Green PHY, frutto, rispettivamente, di un'organizzazione di standardizzazione (ITU) e di una cooperazione industriale (HomePlug Alliance). Nella quinta sezione vengono tratte le conclusioni, con particolare riguardo alle previsioni future su Smart Grid; vengono analizzati i problemi ancora irrisolti della comunicazione su *Power Line* e le speranze e aspettative più o meno condivise.

1 Breve panoramica della rete elettrica e introduzione a Smart Grid

1.1 La rete elettrica

Nonostante le modalità di produzione dell'energia elettrica varino moltissimo da paese a paese, può essere utile guardare ad un resoconto totale. Un tale resoconto, aggiornato ad aprile 2011 e fatto in [4] mostra che al primo posto troviamo l'energia ottenuta da combustibili fossili (61%), al secondo posto abbiamo l'energia ottenuta dalla fissione nucleare (21%), al terzo posto troviamo le fonti idroelettriche (14%) e infine le fonti rinnovabili (4%). L'energia viene generata ad una tensione relativamente bassa ed è necessario, dunque, innalzarla per renderla adatta al trasporto su lunghe distanze: tramite trasformatori ci si porta ad *alta tensione* (*AT*), che raggiunge un massimo di 765 kV. Questo valore rappresenta il massimo valore di tensione su una linea di trasmissione in corrente alternata (AC) utilizzato: sebbene esistano alcuni segmenti della rete che trasportano energia in corrente continua (DC) questi non verranno, in questa sede, presi in considerazione, in quanto si vuole tracciare un quadro molto generale della rete elettrica ed il loro numero risulta comunque esiguo.

Successivamente al trasporto che avviene ad alta tensione si ha l'abbassamento della stessa tramite trasformatori che, in un primo momento, la portano a *media tensione* (*MT*). Infine, tramite centraline di distribuzione (anch'esse operanti a mezzo di trasformatori), la si porta a *bassa tensione* (*BT*) (120 V negli USA e 220 V in Europa), e viene quindi distribuita agli utilizzatori [5].

La generalità nella descrizione, il cui schema è rappresentato in Figura 1, è dettata anche dall'estrema diversificazione della rete elettrica, ancora una volta, da paese a paese: basti citare, ad esempio che, se negli Stati Uniti una centralina MT/BT serve una decina di case, in Europa una centralina MT/BT serve un centinaio di case o più.

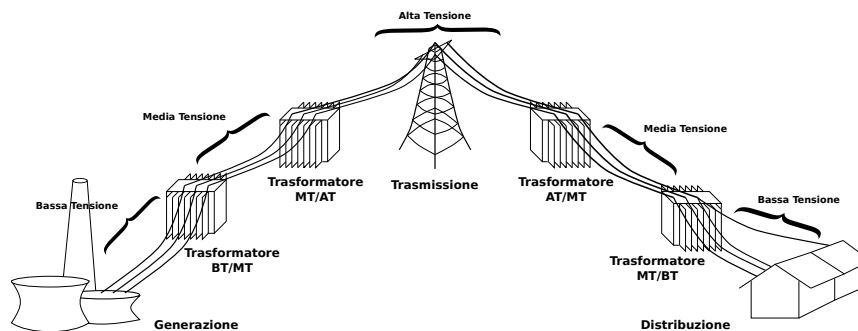


Figura 1: Modello semplificato di generazione, trasporto e distribuzione dell'energia elettrica

La rete elettrica presenta molte inefficienze, alcune delle quali sorte proprio in questi ultimi anni con l'introduzione delle cosiddette Risorse Distribuite di Energia (*Distributed Energy Resources*, DER). Un breve elenco può essere il seguente:

- elevate perdite per effetto Joule, dovute alla grande distanza che normalmente separa la centrale di produzione dagli utilizzatori,;
- incapacità di rilevare i danneggiamenti in tempo reale evitando effetti domino che possono portare a isolamento di vaste porzioni di rete,;
- inquinamento elevato alla produzione, sia che si tratti di immissione di *gas serra* sia che si tratti di scorie radioattive o altro,;

e, negli ultimi anni:

- la crescita della disponibilità energetica, per diversi fattori, non riesce più a tenere il passo della crescita della richiesta,;
- pessima integrazione e gestione dei microgeneratori elettrici, quali quelli presso l'utenza (fotovoltaico, eolico, biomasse, ecc.).

1.2 Il sistema SCADA

Esiste ad oggi un modello di monitoraggio della rete: il modello SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), usato per la gestione di grossi impianti industriali. Esso si compone di tre elementi: un'interfaccia uomo-macchina (*Human Machine Interface*, HMI) un *master server* SCADA e un insieme di: unità remote (*Remote Terminal Unit*, RTU), di apparecchiature *Programmable Logic Controller* e *Intelligent Electronic Device (IED)*. Va aggiunta inoltre la rete di telecomunicazioni che permette a SCADA lo scambio dei dati e che include: link radio, fibra ottica, cavi telefonici e protocolli quali Ethernet e IP su SONET/SDH.

Gli RTU, che ormai includono anche circuiti *Programmable Logic Controller*, sono apparati che si occupano di convertire i segnali ricevuti dai misuratori in una forma adatta alla trasmissione sul mezzo in questione. Lo *SCADA master* è un grosso centro di calcolo, responsabile dell'elaborazione e conversione dei dati ricevuti e spediti agli RTU. Esso invia poi i dati convertiti all'HMI che si occupa di presentarli in una forma facilmente e velocemente interpretabile dall'operatore. Lo schema generale del modello SCADA applicato alla gestione della rete elettrica è mostrato in Figura 2.

Durante la sua evoluzione SCADA fu implementato in tre differenti architetture: 1) *monolithic*, completamente centralizzata, 2) *distributed* con sistemi distribuiti ma ancora isolati e 3) *networked*, con sistemi distribuiti interconnessi. Esiste ancora, nella terza generazione, uno *SCADA master* ma la connessione tra questo e le RTU avviene tramite connessioni WAN

permettendo, così, anche la connessione tra RTU, tra *SCADA master*, e tra *SCADA master* e RTU di LAN diverse.

SCADA non è un sistema definitivo e presenta molti difetti tra i quali:

- nonostante la sua ultima implementazione, presenta una forte centralizzazione nei suoi *master server*, gli RTU sono in grado di compiere, infatti, solo poche operazioni elementari,
- è poco automatizzato lasciando molto del lavoro di gestione all'individuo presso l'HMI,
- trasferisce i dati in modo asincrono rendendo impossibile il controllo in tempo reale.

Anche se forse il problema più importante è il fatto che SCADA non tiene in considerazione in nessun modo la latenza dei segnali, e non prevede dunque un modo per limitarla [6].

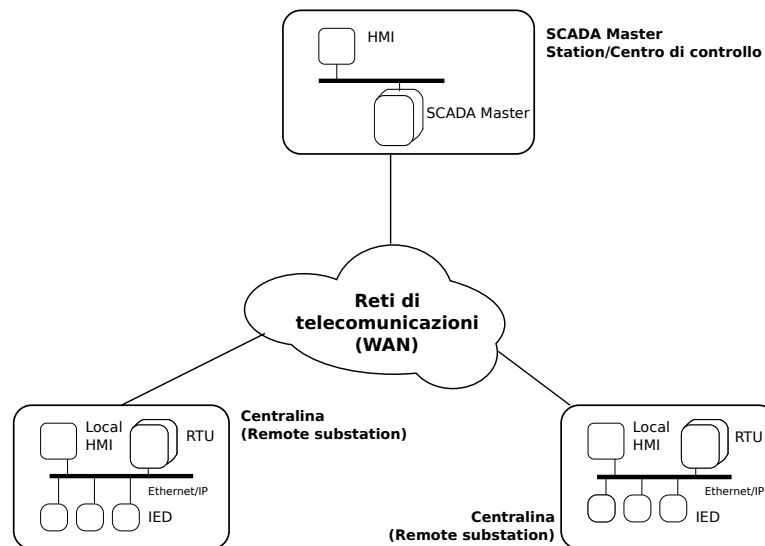


Figura 2: *Tipico modello SCADA, con architettura networked, per reti elettriche*

SCADA è inoltre affiancato da altri apparati quali unità di misura della fase (*Phasor Measurement Unit*, PMU), WAMS (*Wide Area Measurement System*) e applicazioni AMR/AMI (*Automatic Meter Reading/Advanced Metering Infrastructure*) che estendono il controllo e l'acquisizione dati ma si inseriscono, semplicemente, nel modello SCADA, formando un insieme di *patch* non sempre interfazionanti [7] [8].

1.3 Breve introduzione a Smart Grid

Smart Grid si propone come un'evoluzione della rete elettrica odierna che sia in grado di permettere flussi bidirezionali di energia, rispondere in tempo reale a danneggiamenti e degrado delle prestazioni, fornire misure con cadenza molto rapida (dell'ordine dei *ms*) e, in generale, avere visione e controllo estesi della rete, anche su scala microscopica (singola utenza). Non esiste, tuttavia, una definizione precisa, e tutt'ora molti considerano Smart Grid più una *visione* che un progetto [5]: sta di fatto che la sua inevitabilità appare sempre più concreta.

Molti sono i modelli proposti, anche a causa delle differenze nella rete tra i vari paesi: tra i più importanti si citano il modello del NIST (*National Institute of Standards and Technology*), il modello dell'IEEE e, dal lato europeo, il modello dell'EERA. In questa tesi, soprattutto per motivi tecnici, si illustra il modello dell'EERA come elaborato dallo *SmartGrids European Technology Platform* (ETP). SmartGrids ETP definisce una Smart Grid come una *rete elettrica che può integrare, intelligentemente, le azioni di tutti gli utenti connessi ad essa - generatori, utilizzatori e coloro che sono entrambi - con l'obiettivo di distribuire intelligentemente energia sostenibile, economica ed affidabile.*

SmartGrids ETP fa, poi, un elenco di quelli che sono gli obiettivi che Smart Grid dovrà raggiungere, tra i quali si citano:

- fornire un approccio centrato sull'utente che permetta a nuovi servizi di entrare nel mercato dell'energia
- mantenere la sicurezza nella fornitura, assicurare integrazione e interoperabilità
- abilitare la generazione distribuita e l'utilizzazione delle risorse rinnovabili
- garantire il miglior uso possibile della generazione centralizzata
- abilitare l'interattività dell'utente (DR, DSM)

oltre, ovviamente, ai fattori socio-economici che dovranno garantire una adozione su larga scala di Smart Grid [9].

Il forum ETP SmartGrids definisce quindi sei *priorità di implementazione* che dovrebbero favorire l'adozione di Smart Grid da parte delle industrie, permettendo di non perdere di vista gli obiettivi. Tali priorità sono:

1. Ottimizzazione delle operazioni di rete e del suo sfruttamento
2. Ottimizzazione delle infrastrutture di rete
3. Integrazione su larga scala di generatori intermittenti

4. *Information and Communication Technology (ICT)*

5. Reti attive di distribuzione

6. Nuovi mercati e utenti, efficienza energetica

Smart Grid necessita, dunque, di una infrastruttura di telecomunicazioni che sia in grado di gestire la latenza dei segnali sia nel rilevamento dati sia nel controllo. Molti sono i progetti avanzati e, mentre la comprensione del comportamento della rete è ad oggi ancora arretrata, la capacità delle tecnologie di telecomunicazione è sufficientemente elevata e si deve dunque scegliere con attenzione la tecnologia con cui implementare tale infrastruttura.

Esistono già collegamenti dati a livello di generazione ma soprattutto di trasmissione su media tensione, utilizzati per il controllo e il monitoraggio della rete: essi fanno però uso di diversi mezzi e, soprattutto, diversi protocolli e sono dunque, in larga parte, non interoperabili. Per motivi economici la rete di distribuzione su bassa tensione è, invece, quasi completamente sprovvista di tecnologie di telecomunicazione.

L'infrastruttura ICT di Smart Grid potrà usare diversi provider di telecomunicazioni su diverse tecnologie, permettendo di sfruttare i collegamenti già esistenti: i protocolli di telecomunicazioni dovranno quindi offrire modelli di dati uniformi a livello applicazione permettendo flessibilità nell'implementazione dei livelli *fisico* (PHY), *collegamento dati* (DLL) e degli altri livelli, al fine di garantire consistenza nell'elaborazione dei dati stessi, come mostrato in Figura 3.

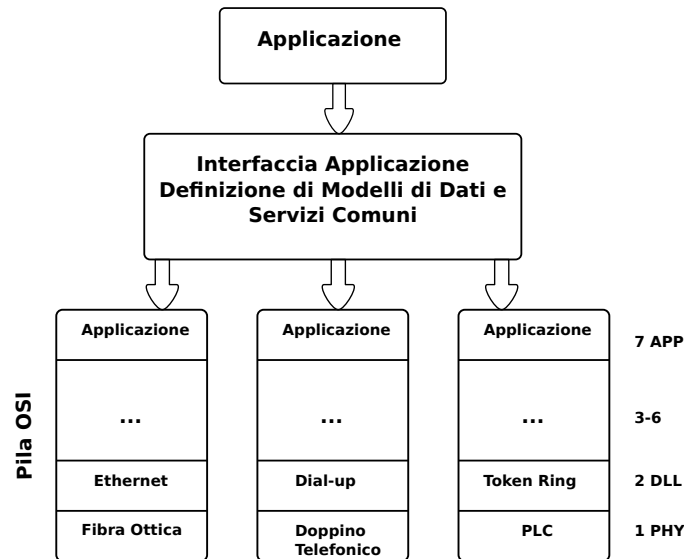


Figura 3: *Esempio di interfaccia tra il livello applicazione, in comune, e i livelli OSI sottostanti, secondo SmartGrids ETP*

2 Tecnologie wireless e PLC a confronto

Il primo requisito da prendere in considerazione per la realizzazione di un'infrastruttura di telecomunicazioni è sicuramente il costo. Per permettere una diffusione della tecnologia è indispensabile che il costo richiesto a ciascun utente sia paragonabile a quello di altri servizi di connettività già forniti (telefono, ADSL, TV). Per riuscire a raggiungere tale obiettivo, non è pensabile di costruire una nuova infrastruttura fisica: le due tecnologie che lo permettono sono wireless e Power Line Communications (PLC). Wireless ha un basso costo di implementazione in quanto non c'è l'installazione del mezzo, PLC ha un basso costo di implementazione in quanto il mezzo è già installato ed ha la massima pervasività per lo scopo per il quale la si vuole utilizzare (Smart Grid).

2.1 Wireless per Smart Grid

La tecnologia wireless ha visto un grande sviluppo in questi ultimi anni grazie ai notevoli risultati raggiunti dal gruppo 802 dell'IEEE. Per quanto riguarda le LAN, dallo standard 802.11a a 54 Mbps si è giunti oggi allo standard 802.11n che può raggiungere fino a 600 Mbps, e si hanno inoltre numerosi servizi aggiuntivi come *Advanced Encryption System (AES)* WPA2 che permette un ottimo livello di sicurezza e la capacità MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) che incrementa, di molto, la qualità del segnale radio. Anche in campo WAN sono stati fatti notevoli progressi con il rilascio di 802.16 (WiMAX) e 802.20 (MobileFi) mentre per le reti PAN (*Personal Area Network*) 802.15.4 (ZigBee) e Bluetooth completano gli ambiti coperti dagli standard wireless.

Wireless è, ad oggi, una tecnologia ormai testata e con un ampio campo di implementazione, inoltre uno dei vantaggi più evidenti è il basso costo implementativo dovuto al fatto che il mezzo non deve essere installato. In [10] viene presentata una lista delle possibili applicazioni per Smart Grid e i problemi ancora irrisolti.

Applicazioni per Smart Grid Gli standard wireless LAN (802.11) possono provvedere all'implementazione di un sistema di automazione e sicurezza delle centraline di distribuzione. Per esempio, sempre in [10], si suggerisce l'utilizzo di una wireless LAN che controlli in tempo reale un sensore Load Tap Changer (trasformatore variabile) dotato di apparato wireless; è così possibile formare reti *mesh* anche molto grandi (100 nodi), che rilevino anche altri parametri di rete, per un controllo efficiente.

Un altro uso suggerito delle tecnologie 802.11 è la comunicazione tra risorse distribuite di energia (DER): in particolare nelle zone rurali dove le distanze aumentano se ne suggerisce l'implementazione tramite dei ripeti-

tori, il cui costo risulta comunque inferiore alla posa, per esempio, di fibra ottica.

La tecnologia *Worldwide interoperability for Microwave Access* (WiMAX) può, invece, essere utilizzata per implementare una infrastruttura di AMR/AMI. WiMAX offre infatti una comunicazione wireless fino a 48 km, usando le frequenze 3.5 e 5.8 GHz raggiungendo un bitrate massimo di 70 Mbps. WiMAX può così provvedere alla realizzazione di un prezzamento in tempo reale e un rilevamento di guasti e interruzioni nell'erogazione. I problemi principali consistono nel costo, non indifferente, delle torri WiMAX e nel fatto che i segnali alle frequenze di WiMAX non possono penetrare gli ostacoli, rendendo difficile (o costosa) una tale implementazione nelle zone altamente urbanizzate.

Una delle reti wireless più note è la rete cellulare, ora alla terza generazione e, tra non molto, alla quarta generazione. La rete cellulare opera alle frequenze 824 fino a 894 MHz e 1900 MHz, offrendo un bitrate massimo di 240 Kbps. L'utilizzo della rete cellulare è di fatto, il più economico essendo la rete già realizzata, con una buona copertura, e essendo mantenuta dall'operatore telefonico. Un utilizzo suggerito è la comunicazione tra SCADA Master e SCADA RTU, facendo uso dell'accesso al mezzo con divisione tramite codice (CDMA). Un altro uso della rete cellulare è l'invio di informazioni non critiche tramite SMS, per il monitoraggio e AMR delle DER. Il maggiore inconveniente nell'utilizzo della rete cellulare è sicuramente il basso bitrate e inoltre l'elevata quota mensile.

La tecnologia cui forse si guarda con maggior interesse per applicazioni Smart Grid è ZigBee. ZigBee si basa sullo standard 802.15.4, opera alle frequenze 868, 915 e 2400 MHz. Con una copertura di massimo 100 m offre un bitrate massimo di 250 Kbps. Il suo punto di forza è sicuramente il bassissimo consumo energetico. L'utilizzo suggerito è l'implementazione delle reti *Home Area Network* (HAN). ZigBee ha un costo molto basso e un consumo molto ridotto di energia e questo lo rende adatto all'installazione su, virtualmente, ogni apparato presente in una casa, permettendo un consumo *intelligente* dell'energia elettrica. Il suo svantaggio principale è che non può in nessun modo essere usato in ambito industriale per diversi motivi.

Alcuni suggeriscono che gli enti di controllo della comunicazione via etere (FCC per gli Stati Uniti, CEPT in Europa), dovrebbero creare una banda, non licenziata, appositamente per l'utilizzo dell'infrastruttura Smart Grid; questo tuttavia non risolverebbe le difficoltà legate ai disturbi EMI, ineliminabili e alla pervasività del segnale ancora legata al posizionamento dei fari radio.

Principali difetti della tecnologia wireless I difetti principali nell'utilizzare la tecnologia wireless sono, secondo [10]: 1) i segnali nelle bande non licenziate (libere) sono maggiormente soggetti a interferenze e disturbi, 2) i

segnali trasmessi nelle bande licenziate sono meno soggetti ad interferenze ma hanno un costo molto più alto e 3) la sicurezza in ambito wireless è sicuramente minore rispetto all'utilizzo del mezzo fisico in quanto la trasmissione non è confinata ed il segnale fisico è sempre in broadcast. Inoltre, in ambito industriale, la tecnologia wireless cede proprio dove dovrebbe essere utilizzata: le alte tensioni generano infatti un disturbo tale da rendere impossibile la comunicazione nelle vicinanze di centraline di innalzamento/abbassamento, centrali, ecc.

2.2 PLC per Smart Grid

L'uso di PLC risale all'inizio del ventesimo secolo, quando, sulla linea elettrica si spedivano segnali a banda stretta (NarrowBand, NB) a singola portante, nella regione dei kHz e con bitrate di pochi kbps, per il controllo dei carichi e misure da remoto.

Negli ultimi anni l'avanzamento delle tecniche di trasmissione ha permesso di raggiungere comunicazioni a banda larga (BroadBand, BB) e soprattutto bitrate molto più alti (fino a 200 Mbps con HomePlug AV). In particolare i nuovi protocolli tra cui HomePlug e IEEE 1901, si basano sulla modulazione Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) tramite Fast Fourier Transform (FFT) e Wavelet Transform (WT).

L'uso di PLC nell'implementare l'infrastruttura di telecomunicazioni per Smart Grid ha una caratteristica unica: la linea elettrica è, non solo la sorgente da cui prelevare l'informazione, ma la portante stessa per l'informazione ad essa relativa.

Applicazioni per Smart Grid In [3] vengono proposte alcune applicazioni della tecnologia PLC, suddividendo in applicazione per la rete a MT e rete a BT. Nella rete a media tensione, come per il wireless, una delle applicazioni più importanti è il controllo e automazione delle centraline di innalzamento/abbassamento. I trasformatori della centralina infatti devono poter comunicare con apparati esterni come fusibili, commutatori e recloser in generale chiamati IED (Intelligent Electronic Device). Tali applicazioni richiedono un bitrate basso (alcune decine di kbps), facilmente ottenibile con trasmissioni PLC a singola portante a banda stretta nella regione 3-500 kHz. Un'altra applicazione per tale tipologia di PLC è il rilevamento di *island*: con la diffusione delle risorse DER è infatti aumentato il rischio della creazione di porzioni di rete isolate con conseguenze gravi (aumento incontrollato di tensione e corrente e sfasamento).

Nell'ambito della rete a BT le tecnologie proposte sono anche a banda larga e con più alto bitrate. Per implementare una struttura AMR/AMI è sicuramente più efficiente l'uso di un segnale a singola portante a banda stretta intorno a frequenze basse (pochi kHz) in quanto, AMR/AMI non richiede bitrate elevati e i segnali a frequenze basse sono in grado di penetrare i

trasformatori MT/BT evitando l'installazione di accoppiatori. Nella gestione della DR è possibile utilizzare sia tecnologie NB, nel caso il controllo dei carichi debba essere diretto oppure BB, nel caso la trasmissione sia mediata da un gateway. Nelle reti HAN è sicuramente conveniente l'uso di PLC BB che permette di collegare tutti gli apparati presenti nell'abitazione; va però effettuata la distinzione tra segnali per applicazioni Smart Grid e segnali, già diffusi presso l'utenza, per applicazioni multimediali come Internet, IPTV ecc.

In ogni caso l'utilizzo di PLC risulta avvantaggiato dal fatto che ogni dispositivo che possa necessitare di venire collegato a Smart Grid è conseguentemente connesso alla rete di telecomunicazioni.

Principali difetti di PLC È già molto diffusa l'installazione di apparati PLC nell'ambiente domestico per trasferire dati multimediali. Tuttavia la varietà di standard esistente è in genere non interoperabile, inoltre segnali BB soffrono maggiormente di interferenza, subita e generata, è quindi auspicabile una rapida convergenza dei vari protocolli PLC per HAN. La trasmissione sulla linea elettrica di trasmissione ha inoltre manifestato che l'irraggiamento prodotto, dovuto al fatto che la linea diviene sostanzialmente un'antenna, avviene principalmente nelle bande protette da licenza. Questo problema è stato in parte risolto diminuendo la potenza ed evitando particolari frequenze, restano tuttavia aspetti legati alla distanza percorribile a potenza ridotta [18].

3 Panoramica della tecnologia PLC

Di seguito è offerta una panoramica della tecnologia PLC: lo stato dell'arte nella standardizzazione, quale potrebbe essere il suo ruolo all'interno dell'ambito Smart Grid ed infine gli aspetti inerenti il livello fisico, il canale trasmissivo e problemi relativi alla topologia di una plausibile rete elettrica. Proprio la comprensione dei fenomeni di cui si deve occupare Smart Grid, è la parte più oscura: quali sono i parametri necessari per l'ottimizzazione, quali sono la topologia più la tecnica di accesso al mezzo più efficienti, ecc.

3.1 Stato dell'arte degli standard

Ad oggi si è testimoni di una proliferazione di protocolli PLC per applicazioni di rete locale. Sostanzialmente essi offrono una alternativa al già collaudato IEEE 802.11, per situazioni in cui il segnale radio non riesca a raggiungere alcuni angoli remoti in cui, invece, è presente una presa elettrica. Essi sono protocolli a banda larga (BroadBand, BB), 2-30 MHz, che offrono bitrate fino a 200 Mbps e generalmente si basano su modulazioni OFDM-FFT/WT. Un breve elenco è il seguente:

1. IEEE 1901
2. HomePlug AV, HomePlug Green PHY
3. HomePlug 1.0
4. UPA
5. Powermax

e nessuno di questi protocolli è interoperabile con gli altri.

Esistono, invece, anche diverse ratifiche nel campo delle tecnologie PLC a banda stretta. Uno dei protocolli NarrowBand (NB) più noti è sicuramente PRIME. PRIME (Powerline Related Intelligent Metering Evolution) è un protocollo operante nella banda CENELEC-A (9-95 kHz) capace di bitrate fino a 125 kbps e già in uso nella maggior parte dell'Europa come strumento AMR/AMI. Un protocollo simile è G3-PLC: basato su modulazione OFDM e operante nella banda 10-490 kHz raggiunge 33.4 kbps e supporta il protocollo di rete IPv6.

Dal lato degli organi di standardizzazione, i principali protocolli ratificati sono due: IEEE 1901.2 e la direttiva ITU-T G.hnem. IEEE 1901.2 include: 1) G3-PLC nella banda 10-500 kHz, 2) G3-PLC nella banda CENELEC-A e 3) PRIME nella banda CENELEC-A. Un dispositivo conforme a 1901.2 deve implementare uno di questi tre protocolli raggiungendo un bitrate, a livello fisico, di 500 kbps se operante nella banda 10-500 kHz. G.hnem contiene anch'esso riferimenti ai protocolli G3 e PRIME, largamente utilizzato, e

definisce una trasmissione tramite 16 QAM che può raggiungere un bitrate di 1 Mbps.

Dopo la ratifica dello standard HomePlug 1.0, nel 2005, il Working Group dell'IEEE 1901 cominciò a lavorare ad un protocollo che riunisse tutti gli sforzi fatti fino ad allora per le reti *Home Area Network* (HAN) con bitrate maggiori di 100 Mbps; il protocollo doveva inoltre comprendere la rete di accesso. Il risultato, ottenuto nel 2010, è un protocollo basato, a scelta, su OFDM-FFT o su OFDM-WT, con un meccanismo di coesistenza (ISP, Inter-System Protocol) che gli permette di condividere il mezzo con protocolli non interoperanti.

Con la solita volontà di unificare gli standard allora presenti, ITU-T cominciò a lavorare, nel 2006, alla direttiva ITU-T G.hn suddivisa in G.9960 (PHY) e G.9961 (DLL) esclusivamente per reti HAN. La peculiarità della direttiva è che l'unificazione comprendeva tutti i tipi di mezzo trasmissivo presenti in un'abitazione: doppino telefonico, coassiale, cavo Ethernet e linea elettrica: il *transceiver* che si ottiene è unico per tutti i tipi di mezzo ed i diversi parametri possono essere configurati a seconda del mezzo stesso.

Coesistenza La linea elettrica, fuori dalla struttura residenziale, è un mezzo condiviso. A differenza della tecnologia wireless, però, la banda in cui si opera è molto più stretta e non è quindi possibile utilizzare, ad esempio, FDM. Si rende necessario allora un meccanismo di coesistenza efficiente. Una delle soluzioni più efficienti consiste nell'Inter-PHY Protocol (IPP); un meccanismo nato per garantire la coesistenza dei due livelli PHY di IEEE 1901: quello basato su FFT e quello basato su WT, ed esteso poi ad altri protocolli. IPP fa uso di due diversi protocolli PHY, che si interfacciano con un unico livello MAC tramite i PHY Layer Convergence Protocol.

Sarà inoltre necessario provvedere a meccanismi di coesistenza tra le tecnologie che implementeranno Smart Grid e le attuali, e future, tecnologie BroadBand per le HAN.

3.2 Ruolo della tecnologia PLC in Smart Grid

Linee di Alta Tensione Le linee di alta tensione offrono un mezzo meno ostile ai segnali PLC in quanto la loro funzione di attenuazione è, in modulo, minore che nelle altre linee ed è tempo invariante. Le prime comunicazioni su linee AT furono realizzate nei primi anni novanta, implementando una linea telefonica sulla linea elettrica che permetteva lo scambio di telefonate tra gli operatori. Ad oggi le telecomunicazioni utilizzate raggiungono una portata di 100 km e, operando in una banda di 32 kHz sono in grado di raggiungere 320 kbps, e non sono state ancora standardizzate; uno degli standard in fase di elaborazione è IEC TC57. Alcune delle funzioni svolte da tali comunicazioni sono: il rilevamento delle rotture di isolatori, l'apertura e chiusura di circuit breaker fino al monitoraggio dell'altezza di una "pancia" di segmento

di linea dal terreno. Sono state testate anche alcune trasmissioni a banda larga su linea AT a 69 kV, raggiungendo bitrate di 10 Mbps. La trasmissione viene effettuata su sottobande id 5MHz nell'intervallo 2-30 MHz.

Linee di Media Tensione Le linee MT costituiscono una rete molto estesa; è importante, dunque, che le centraline si comunichino dati relativi allo stato della rete al fine di ottimizzare il trasporto di energia. Le linee MT, offrono, tuttavia, un'attenuazione maggiore ai segnali. Uno degli utilizzi più promettenti di PLC nelle linee MT è il monitoraggio delle linee stesse che può essere fatto in servizio, ovvero senza la necessità di isolare il segmento sotto esame: questo è permesso grazie ad un caratteristica peculiare di PLC: la linea elettrica è la sorgente di informazioni e il mezzo per trasportarle; ciò può essere fatto con trasmissioni NB a basso bitrate. Inoltre l'uso di PLC si è dimostrato molto efficiente nella gestione degli *islanding* dovuti all'integrazione delle DER.

Linee di Bassa Tensione Secondo la maggior parte degli esperti nel settore, il lato della distribuzione sarà quello sottoposto al maggior cambiamento nel passaggio a Smart Grid.

Il campo in cui avrà sicuramente i primi successi sarà, sicuramente, AMR/AMI. AMR è già implementato in molti sistemi ma in aggiunta è auspicabile un sistema bidirezionale che permetta non solo la comunicazione di dati al gestore ma anche l'invio di segnali di controllo e informativi all'utente che lo rendano informato sul suo utilizzo di energia. Si pensa in particolare al prezzamento in tempo reale e all'indicazione di carico della rete. La linea BT offre un'attenuazione ancora maggiore rispetto alla alta e media tensione, in particolare l'attenuazione cresce con la frequenza. Nell'implementazione di una struttura AMR/AMI è possibile scegliere una tecnologia NB/Ultra NB: tale scelta permette di oltrepassare i trasformatori MT/BT senza bisogno di installazioni; oppure è possibile implementarla tramite una tecnologia BB che richiede però un accoppiatore presso il trasformatore MT/BT. Una valutazione va fatta in quanto la tecnologia BB offre maggiori possibilità; negli Stati Uniti, ad esempio una centralina MT/BT alimenta una decina di utenti, mentre in Europa qualche centinaio, rendendo, nel secondo caso, attrattiva l'opzione BB. La connettività tra una parte e l'altra di una centralina MT/BT permetterebbe quindi l'installazione di un *concentratore* che raccolga i dati da un certo numero di utenti e, aggregatili, le spedisca al gestore o li usi per una gestione automatica della rete; questo garantirebbe anche un certo grado di scalabilità. Nel caso degli Stati Uniti, quindi, tale *concentratore* verrebbe a trovarsi molto vicino alla linea AT per poter raggruppare un numero sufficiente di case, mentre in Europa, sarebbe spesso situato nella rete BT. Uno dei risultati di maggior interesse per le linee BT è stato raggiunto dal progetto REMPLI [6]. Uno dei maggiori problemi è

infatti la congestione del mezzo nei momenti di emergenza: quando tutti i dispositivi tentano di connettersi alla rete e trasmettere. Il progetto REM-PLI ha sviluppato uno schema di cooperazione che evita con eleganza la congestione.

Un altro settore in cui PLC può assolvere a molte funzioni, è Demand Response (DR), ovvero la gestione della domanda e della risposta quando i carichi e, soprattutto, le sorgenti sono variabili senza previsione (generatori fotovoltaici, eolici, accumulatori momentaneamente collegati, ecc.). Ancora una volta, se la modalità di implementazione richiede un controllo diretto da parte del gestore di rete, solo la tecnologia NB fornisce distanze elevate senza eccessivi ripetitori; se, invece, la si implementa tramite *gateway*, come per esempio Home Energy Management System (HEMS), allora una tecnologia BB per reti HAN consente maggiori funzionalità. Le HAN sono ambienti multiprotocollari e multiproduttore e, nonostante molti premano per un allineamento, è in effetti poco conveniente aspettarsi un cambiamento in questa direzione. In questo senso è esemplare lo sforzo fatto da ITU-T di sviluppare un protocollo che riunisca tutti i mezzi fisici presenti in un ambiente domestico: Ethernet, cavo telefonico, coassiale e rete elettrica. Tale sforzo ha generato la coppia G.9960/G.9961; direttiva che sarà analizzata poco oltre. Ci si pone inoltre la questione se i segnali multimediali, che già vengono trasmessi in molte strutture, debbano essere separati, in qualche modo, dai segnali di Smart Grid: una separazione in banda può sembrare una scelta ottimale ma introduce il problema dell'attenuazione dei segnali bassa frequenza nelle reti domestiche [6].

3.3 Aspetti implementativi: modellizzazione del canale e topologie di rete

Modellizzazione le canale Il canale PLC è un mezzo molto rumoroso, selettivo in frequenza, tempo-variante, affetto da *multipath distortion*, rumore colorato e rumore impulsivo; la rete inoltre, varia da paese a paese e, non raramente, da struttura a struttura. Si comprende quindi che il canale PLC è difficile da modellare. Tuttavia la modellizzazione è fondamentale per il progetto dei *transceiver*, alcuni modelli sono quindi stati proposti e migliorati. Uno dei primi modelli proposti per la rete elettrica è sostanzialmente un canale *multipath*, dove il multipath è causato dalle diverse biforcazioni della rete e non adattamento delle impedenze che generano molte riflessioni [6]. Questo tuttavia rappresenta un modello deterministico e descrive una generica trasmissione su linea elettrica: risulta quindi poco utilizzabile. Sono stati fatti alcuni miglioramenti a questo modello che permettono di includere anche il caso di molti cavi aggregati che tuttavia dipendono dalla conoscenza della topologia. Alcuni modelli statistici sono stati proposti che meglio tengono conto della variabilità della rete elettrica e offrono una migliore applicabilità. Per includere la variabilità dovuta alla topologia è

	(N, m)	$\langle k \rangle$	$\langle l \rangle$	ρ	$\lambda_2(L)$	$C(G)$
IEEE-300	(300,409)	2.73	9.94	-0.2206	0.0094	0.0856
WSCC	(4941,6594)	2.67	18.70	0.0035	0.00076	0.0801
[6]396-Node	(396,420)	2.12	21.10	-0.2257	0.00030	0

Tabella 1: *Risultati di tre case-study negli USA*

stato sviluppato un generatore casuale di topologie domestiche. Nonostante i tentativi in questo senso non siano molti un risultato notevole è stato ottenuto: l'attenuazione su linee BT/MT ha distribuzione log-normale [6]. La distorsione *multipath*, dovuta alle numerose riflessioni e alle impedenze non adattate, porta a definire la risposta in frequenza del canale *Power Line* come

$$H(f) = \sum_{i=0}^{N_{paths}-1} g_i(f) e^{-\alpha(f)v_p\theta_i} e^{-j2\pi f\theta_i}$$

dove $g_i(f)$ è un numero complesso dipendente dalla frequenza che tiene conto della topologia di rete, v_p è la velocità di propagazione del segnale, θ_i il ritardo di *multipath* e N_{paths} è il numero di riflessioni non trascurabili. In [6] si mostra che questo porta ad una distribuzione log-normale.

Aspetti topologici e di rete Gli studi fatti sulla topologia della rete elettrica mostrano che essa è una rete a connettività sparsa, la cui distanza media tra i nodi è molto inferiore alle dimensioni della rete: questo porta a prestazioni migliori quando la rete di telecomunicazioni coincide con la rete di distribuzione dell'energia come nel caso di PLC. I tipi topologici sono principalmente tre: radiale, ad anello e interconnessa. La topologia radiale è maggiormente presente nelle zone rurali, dove da una sorgente si dipanano lunghi segmenti che arrivano agli *end point*. Le topologie ad anello e interconnessa sono maggiormente presenti nelle zone urbane dove esiste molta più ridondanza nei collegamenti. Gli aspetti topologici sono molto legati all'ambiente in cui si opera: sicuramente diversi modelli vanno elaborati per Stati Uniti, Europa, Giappone, ecc. In Tabella 1 vengono presentati i risultati degli studi su tre reti di trasmissione MT, tutti effettuati in territorio americano. Le definizioni dei vari parametri sono: (N, m) il numero di nodi e di archi della rete, $\langle k \rangle$ il grado nodale medio, ovvero il numero medio di archi che arrivano ad un nodo, $\langle l \rangle$ la lunghezza media in *hop* dei percorsi tra ogni coppia di nodi, ρ la correlazione di Pearson, che misura in che grado un nodo è connesso a nodi ad alta connettività, $\lambda_2(L)$ la connettività algebrica che misura quanto velocemente l'informazione viene trasmessa nella rete e $C(G)$ il coefficiente di *clustering* che misura l'aggregazione dei nodi.

I risultati mostrano che i tre *case-study* hanno grado nodale medio molto simile (2); inoltre il coefficiente di clustering indica che la rete tende ad essere sparsa, ovvero sono pochissimi (zero per la rete a 396 nodi) i nodi che sono vertici di sottografi completi. I valori di $\lambda_2(L)$ indicano inoltre che la rete a 396 nodi ha una debole connettività e risulta quindi prona ad isolamenti di porzioni rete.

4 Raccomandazione ITU-T G.hn e protocollo HomePlug Green PHY

Nella cieca proliferazione di protocolli PLC BroadBand per trasmissioni multimediali nelle residenze due si sono distinti: il primo, una Raccomandazione ITU-T, per l'idea innovativa di unificare tutte le comunicazioni su mezzo fisico e il secondo, un protocollo industriale, per la ferma volontà di voler allineare le comunicazioni PLC ad un unico protocollo, per aprire la strada all'adozione di PLC a livello industriale.

4.1 Raccomandazione ITU-T G.hn

La Raccomandazione G.hn (home networking) si compone di due parti: essa definisce l'architettura di rete HAN e la specifica di livello PHY (nella parte G.9960) e DLL (nella parte G.9961) e definisce apparati compatibili con gli altri apparati che comunicano nella HAN e rispettano le specifiche imposte dalle associazioni di radioamatori. I transceiver definiti dalla Raccomandazione sono in grado di operare su cavi telefonici, cavi coassiali e cavi elettrici. Esiste inoltre anche la specifica relativa al livello Trasporto (TRS) contenuta nella Raccomandazione ITU-T G.9970: poiché il livello TRS esula dalle funzioni richieste per Smart Grid, se ne darà solo un breve accenno.

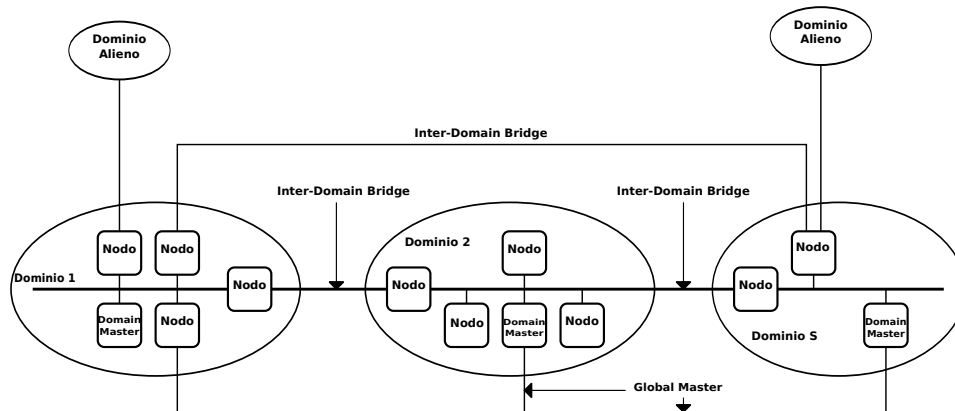


Figura 4: Schema dell'architettura di rete G.hn

Architettura di rete G.9960 definisce la seguente architettura di rete, rappresentata in Figura 4: i domini sono insiemi di nodi connessi allo stesso mezzo fisico, i bridge inter-dominio (IDB) mettono in comunicazione domini equi-protocollo e i bridge mettono in comunicazione domini con protocolli diversi. Ciascun dominio deve supportare da un minimo di 32 nodi ad un massimo di 250 nodi. Ciascun dominio include uno, e uno solo, Domain Master (DM) che è un nodo con funzionalità aggiuntive. più domini diversi

possono esistere in una HAN e su uno stesso mezzo: il Domain ID identifica ciascun dominio. Un dominio opera nelle seguenti tre modalità: Peer-to-peer Mode (PM), Centralized Mode (CM) e Unified Mode (UM). In Figura 5 sono mostrate, con un esempio, le relazioni tra domini e mezzi fisici: per un'ottimizzazione delle comunicazioni ad ogni tipo di mezzo andrebbe associato un dominio (anche se questa non è una richiesta della Raccomandazione).



Figura 5: Relazioni tra domini e tipi di mezzo

4.1.1 ITU-T G.9960

Per gestire le comunicazioni tra i diversi mezzi supportati, G.9960 introduce due interfacce: una indipendente dal mezzo, Physical Medium independent Interface (PMI) e una dipendente dal mezzo, Medium Dependent Interface (MDI). La prima divide la parte DLL dalla parte PHY del transceiver mentre la seconda interfaccia il transceiver con il mezzo fisico.

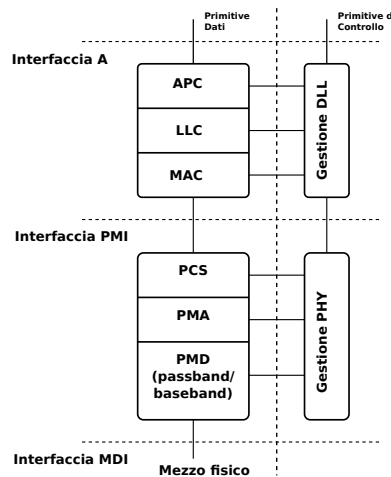


Figura 6: Schema a blocchi del transceiver G.hn

In Figura 6 è mostrato l'intera struttura del transceiver: si notano le interfacce MDI e PMI che confinano il livello PHY e l'interfaccia Applicazione (A) che è specifica per ogni applicazione. PCS, PMA e PMD dipendono dal mezzo su cui si vuole trasmettere: PMD (Physical Medium Dependent) provvede alla generazione delle forme d'onda e all'inserimento

del preambolo e può operare in modalità banda base o passabanda, PMA (Physical Medium Attachment) è un blocco di codifica FEC che prepara i frame PHY per la trasmissione, PCS (Physical Coding Sublayer) provvede alla regolazione del *data rate* tra livello MAC e PHY e all'integrazione delle MAC Protocol Data Unit (MPDU) nei frame PHY. G.9960 prevede OFDM come modulazione della portante.

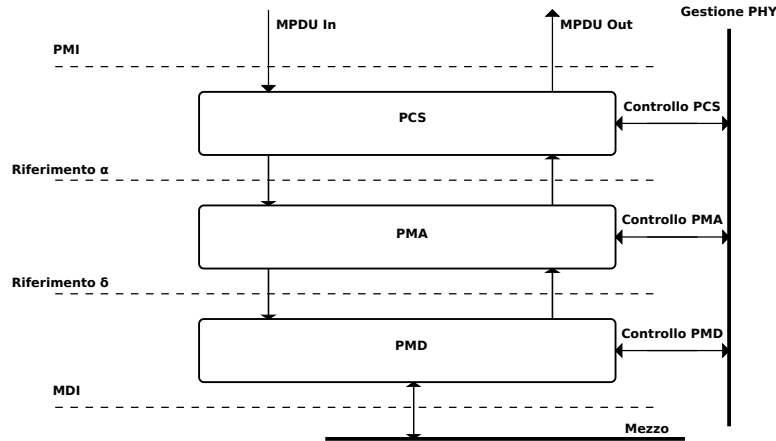


Figura 7: Schema a blocchi della parte PHY del transceiver G.hn (G.9960)

In Figura 7 è rappresentato lo schema a blocchi della parte PHY del transceiver G.hn G.9960. In aggiunta alle interfacce PMI e MDI, già definite, sono state introdotte le interfacce di riferimento α e δ .

Il modulo PCS, in trasmissione, riceve la MPDU e la trasferisce nel campo *payload* del frame PHY. Viene quindi aggiunto l'header del frame PHY a formare un TX PHY frame. In ricezione, il modulo PCS, processa il *payload* e il frame header decodificati e, dal *payload*: viene estratta la MPDU e spedita attraverso la PMI, mentre le informazioni di controllo contenute nell'header vengono spedite al blocco Gestione PHY.

Il modulo PMA, in trasmissione, riceve l'header ed il *payload* PHY attraverso l'interfaccia α : per prima cosa passano attraverso uno *scrambler* che ha il compito di dare aleatorietà alla sequenza di bit e vengono quindi codificati l'uno con parametri diversi dall'altro, dove i parametri della codifica sono passati dal blocco Gestione PHY. L'header ed il *payload* vengono quindi segmentati ed i segmenti vengono inviati al PMD, attraverso il riferimento δ , per la trasmissione. In ricezione vengono effettuate le operazioni inverse tramite un decodificatore e un *de-scrambler*, fino ad ottenere l'header ed il *payload* PHY che vengono inviati verso il riferimento α .

Il modulo PMD, in trasmissione, divide inizialmente le sequenze di bit dei segmenti di header *payload* in gruppi e ciascun gruppo viene assegnato ad una sottoportante. Il gruppo di bit viene quindi rappresentato con un numero complesso della modulazione scelta per quella sottoportante. Le

sottoportanti che restano libere vengono riempite (*empty tone filling*) con sequenze pseudo-casuali. Il modulatore OFDM, quindi, converte il flusso di simboli in un simbolo OFDM (convertitore S/P, IFFT, vedi Appendice A). Dopo l'aggiunta del preambolo il segnale viene traslato in frequenza e quindi la sua parte reale viene spedita sul mezzo. In ricezione, i simboli OFDM vengono demodulati, decodificati e inviati verso l'interfaccia δ . Il preambolo viene invece spedito al blocco Gestione PHY.

G.9960 prevede inoltre la possibilità di abbattere le sottoportanti che non rispettino le norme regionali vigenti, o che, in qualche modo, interferiscano con altre trasmissioni o semplicemente siano affette da eccessiva attenuazione.

La Raccomadazione fa poi un elenco di parametri specifici per ogni mezzo: vengono elencati i parametri per la trasmissione su doppino telefonico, su linea elettrica e su cavo coassiale.

4.1.2 ITU-T G.9961

La parte DLL del transceiver, come mostra la Figura 8, è formata da Application Protocol Convergence (APC), LLC e MAC. Mentre i secondi due sono i ben noti sottolivelli del modello OSI, il primo, che interfaccia il transceiver con i livelli superiori, è caratteristico di G.hn; si notano l'interfaccia A, che separa il transceiver dall'entità applicazione (AE) e l'interfaccia PMI che separa il DLL dal PHY: sono inoltre rappresentate le due interfacce di riferimento, $x1$ e $x2$, che separano LLC da APC e MAC.

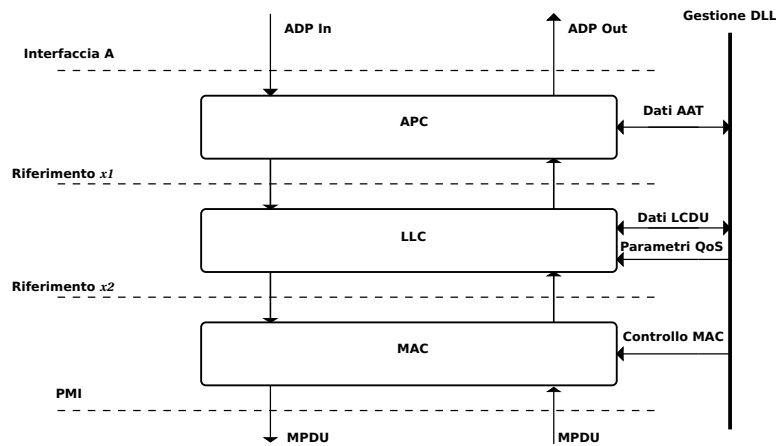


Figura 8: Schema a blocchi della parte DLL del transceiver G.hn (G.9961)

In trasmissione, le primitive del livello applicazione, Application Data Primitive (ADP), raggiungono APC attraverso l'interfaccia A, e vengono convertite in APP Protocol Data Unit (APDU). Le APDU vengono poi smistate, nei flussi, a seconda del DEVICE.ID di destinazione, dei requisiti

QoS, e della classe di servizio. I flussi vengono gestiti dal blocco Gestione DLL. Alle APDU vengono quindi assegnati dei FLOW_ID e spedite attraverso l'interfaccia di riferimento $x1$. La Address Association Table (AAT) contiene gli indirizzi MAC ricavati dalle ADP in arrivo, e vengono spediti al blocco Gestione DLL. In ricezione, le APDU che attraversano il riferimento $x1$ vengono convertite nelle ADP rispettive di ogni protocollo applicazione.

In trasmissione, per ogni APDU in ingresso al LLC, viene generata un frame LLC. I frame LLC vengono poi concatenati a formare un "flusso" di frame e tale flusso viene quindi diviso in segmenti di uguale lunghezza che, ciascuno assieme ad un header ed un campo CRC forniti dal blocco Gestione DLL, vanno a formare le LLC Protocol Data Unit (LPDU). I dati per il controllo di LLC sono trasportati in Link Control Data Unit (LCDU), esse sono universali per ogni tipo di mezzo e sono, successivamente convertite in LPDU. Le LPDU vengono quindi inviate attraverso il riferimento $x2$ al MAC che le converte in MAC Protocol Data Unit (MPDU). In ricezione, le MPDU vengono scomposte in LPDU e inviate, attraverso il riferimento $x2$, a LLC. LLC estrae dalle LPDU i frame LLC e le LCDU e le invia rispettivamente ad APC e alla Gestione DLL. Se il nodo è coinvolto in un'operazione di *relaying*, ovvero fa forward del traffico verso altri dispositivi, i frame LLC estratti vengono passati alla trasmissione che procede come descritto.

In trasmissione, il MAC assembla le MPDU a partire dalle LPDU, come descritto, e le programma per la trasmissione tramite uno dei metodi di accesso al mezzo descritti più avanti; per la programmazione delle trasmissioni possono venire predisposte una o più code. Viene inoltre usata una primitiva Carrier Sense (CRS) per indicare se il mezzo è occupato. Successivamente le MPDU vengono passate al livello PHY, attraverso l'interfaccia PMI, per la trasmissione. Se la procedura di accesso al mezzo richiede RTS/CTS, è la Gestione DLL che si occupa delle primitive di servizio, rendendo necessaria la corretta ricezione di una CTS PHY prima di passare una MPDU al PHY. In ricezione, dalla MPDU viene ricavata la LPDU che viene passata ad LLC attraverso $x2$

Metodo di accesso al mezzo G.9961 prevede la presenza di intervalli temporali denominati *cicli MAC* in tutto simili ai periodi di *beacon* previsti dal protocollo IEEE 802.11. All'interno di un ciclo MAC è presente una finestra per la trasmissione, da parte del Domain Master, della programmazione della restante finestra temporale, ovvero della posizione e durata degli intervalli di trasmissione e dei nodi che possono accedervi. G.9961 prevede due modalità di accesso al mezzo: una *contention-free*, in genere TDMA, e una condivisa, in genere CSMA/CA.

4.1.3 ITU-T G.9970

ITU-T ha inoltre rilasciato la Raccomandazione G.9970 che descrive il livello Trasporto (TRS) di una rete HAN basata su G.hn. In Figura 9 è rappresentato lo schema dell'architettura di Trasporto per G.hn. Poiché il livello TRS non è rilevante ai fini dell'implementazione di applicazioni Smart Grid, ne verrà dato solo un cenno.

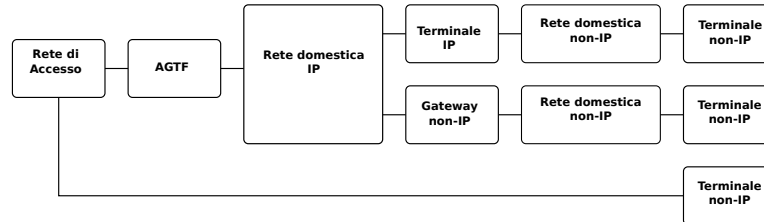


Figura 9: *Schema a blocchi del livello TRS di G.hn (G.9970)*

Il terminale IP è qualunque dispositivo che supporti direttamente IP come qualunque PC o smartphone, mentre un terminale non IP è un terminale che non supporta nativamente IP come una stampante o la maggior parte dei televisori. La rete IP domestica è una rete, in generale, che supporta il protocollo di rete IP, sia IPv4 sia IPv6. La rete domestica non-IP è composta da una o più reti private che utilizzano protocolli di rete diversi da IP. L'*Access Gateway Transport-layer Function* (AGTF) connette le rete domestica IP alla rete di accesso e deve quindi essere una funzione integrata nel gateway fisico. Si nota che alcuni terminali non-IP possono, per ragioni storiche, essere connessi direttamente alla rete di accesso, senza passare per AGTF: il caso più comune è il telefono analogico.

4.1.4 Raccomandazione ITU-T G.hnem

La Raccomandazione G.hnem è ancora in fase di elaborazione e studio e non è stata pertanto ancora rilasciata. Essa si costituisce di due parti in modo simile alla G.hn: una parte per il livello fisico, G.9955, e una parte per il livello DLL, G.9956. Essa descrive una tecnologia su linea elettrica a banda stretta e a basso bitrate.

La bozza della Raccomandazione ci dice che si tratta di una tecnologia basata su OFDM, sia per linee a corrente alternata sia a corrente continua per trasmissioni fino a 500 kHz. La Raccomandazione include linee a bassa e media tensione e prevede il passaggio attraverso trasformatori BT/MT e MT/BT. Il bitrate massimo dovrebbe raggiungere 1 Mbps.

G.hnem è stato elaborato per fornire una tecnologia di base all'implementazione di AMR/AMI, di controlli da remoto per switch, recloser e selezionatori e in generale applicazioni Smart Grid sulla rete BT/MT.

4.1.5 Applicazioni Smart Grid

Il documento [21], un Technical Paper rilasciato proprio dall'ITU-T, descrive alcuni esempi di applicazione Smart Grid in cui può operare il transceiver G.9960/G.9961. G.hn è stato progettato per operare nelle reti domestiche: può quindi fornire connettività diffusa a qualunque dispositivo alimentato dalla rete elettrica; G.hn può operare anche sulla rete BT esterna alle strutture implementando servizi AMR/AMI.

Un esempio di implementazione di una infrastruttura AMI prevede la creazione di più domini AMI, dove ciascun dominio può contenere fino a 250 nodi AMI, e più reti AMI, dove ciascuna rete può contenere fino a 16 domini e 4000 nodi AMI, amministrati da un Global Master come descritto nella Sezione 4.1. L'interfaccia Energy Service Interface (ESI) connette un dominio AMI ad una HAN, svolgendo la funzione di un gateway. Generalmente un dominio AMI, comprendendo una vasta area geografica, avrà più nodi di una normale HAN: sarà quindi inevitabile l'uso di nodi che facciano *relaying*, ovvero instradino i pacchetti da e verso il Domain Master per altri nodi. Il Domain Master si trova presso quello che è chiamato nodo Head End, ovvero un nodo che ha il compito di aggregare i dati dai vari nodi. I nodi possono essere contatori, "sottocontatori" embedded, accumulatori o veicoli elettrici. Questi dispositivi possono far parte del dominio AMI, non richiedendo così l'uso dell'ESI, oppure possono far parte della rete HAN, richiedendo l'uso dell'ESI per interfacciarsi con la rete di accesso (dominio AMI).

G.9960 supporta la gestione efficiente delle reti mesh: nel caso di caduta di un link, i pacchetti possono facilmente essere reinstradati utilizzando la funzione di *relaying* dei nodi; sono inoltre stati implementati algoritmi per evitare i loop. Questo garantisce una rete robusta e autoriparantesi.

G.9960 può anche implementare la gestione dei dispositivi nella HAN, per un loro consumo efficiente dell'energia elettrica. Si definiscono Smart Grid Home (SGH), i dispositivi che operano nella HAN, mentre si definiscono Smart Grid Access (SGA) i dispositivi che operano all'esterno della HAN. La comunicazione tra HAN e rete di accesso viene effettuata da un ESI, che opera da gateway, e può essere integrato nel contatore. Esempi di dispositivi che possono implementare G.9960 embedded sono: contatori embedded, ESI e gateway, condizionatori, termostati, lavatrici, lavastoviglie e, in futuro, carica batterie per automobili. Esempi di applicazioni Smart Grid nella HAN possono essere i seguenti:

- Raccolta dati sul consumo energetico, e presentazione dei dati a consumatori e fornitori
- Adattamento del consumo energetico alle variazioni in tempo reale dei prezzi e del carico della rete

- Supporto di programmi Demand Side Management/Demand Response (DSM/DR)
- Controllo flessibile dei dispositivi per ridurre il consumo, in stand-by ad in uso

4.2 Protocollo HomePlug Green PHY

Il protocollo HomePlug Green PHY è stato progettato per venire incontro alle richieste dell'industria per quanto concerne le applicazioni Smart Grid nell'ambito delle *Home Area Network* (HAN), e non è inteso ad operare sui collegamenti tra l'utenza e le infrastrutture di rete. HomePlug Green PHY è interfunkionante con il suo predecessore HomePlug AV e il protocollo IEEE 1901. Esso può raggiungere un *bit rate* di picco, a livello fisico, di 10 Mbps, ampiamente sufficiente per applicazioni Smart Grid. Allo stesso tempo, ha una ridotta complessità e un basso consumo energetico.

La HomePlug Alliance fa un elenco di criteri considerati essenziali per ogni tecnologia che si rivolga a Smart Grid:

1. alta affidabilità/robustezza nonostante una ridotta complessità
2. coesistenza e interoperabilità con le tecnologie esistenti e già utilizzate
3. scalabilità per supportare molti dispositivi, a basso *bitrate*, su mezzo condiviso
4. basso consumo energetico
5. economicità
6. coordinazione con le richieste del mercato

Proprio per rispettare tali criteri, è stato sviluppato il protocollo Green PHY, che è sostanzialmente un derivato semplificato del protocollo HomePlug AV (HPAV). La scelta di derivare gran parte del protocollo Green PHY dall'HomePlug AV è basata sull'ampia e fruttuosa implementazione di quest'ultimo, e sulla mole di test così ottenuta. Il protocollo Green PHY non solo è in grado di ricevere pacchetti AV ma è anche in grado di spedire pacchetti AV. Si fa notare quindi che, dovunque il protocollo Green PHY non cambi rispetto all'HPAV, verrà rappresentato proprio quest'ultimo.

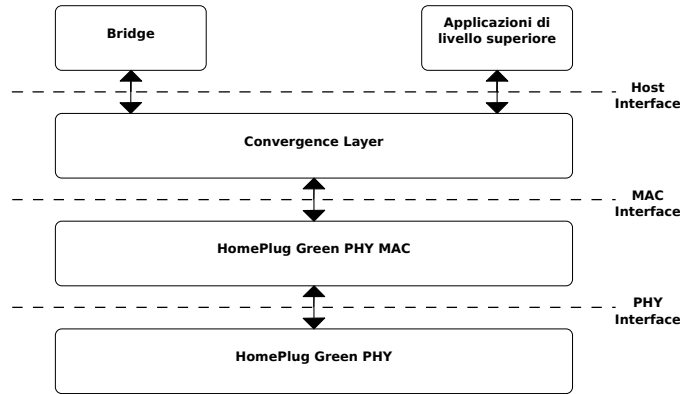


Figura 10: *Schema a blocchi del protocollo Green PHY*

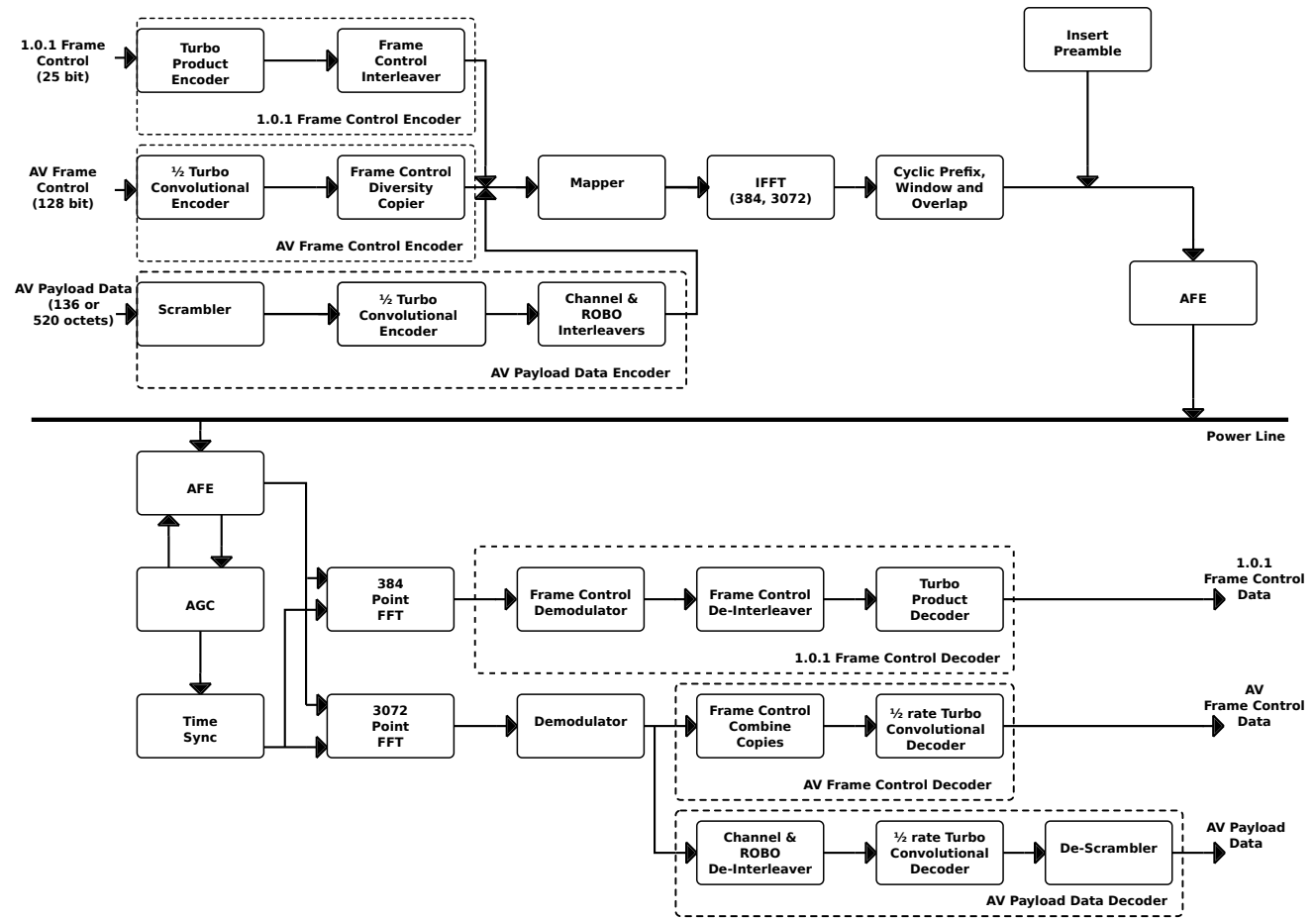
Al livello più alto di astrazione il protocollo Green PHY può essere descritto dalla Figura 10. Dal punto di vista del trasmettitore, il livello PHY (fisico) si occupa di: correzione degli errori, mappatura in simboli OFDM e generazione, nel dominio del tempo, delle forme d'onda. Il livello MAC (accesso al mezzo) si occupa, invece: di determinare la posizione per la trasmissione (sincronizzazione), di trasformare il flusso dati in unità di lunghezza fissa adatte alla trasmissione sul mezzo fisico e di garantire una trasmissione ordinata e priva di errori attraverso la ritrasmissione (ARQ). Il livello di convergenza (CL) si occupa di *routing/bridging*, ovvero dell'instradamento dei pacchetti e della classificazione del traffico secondo le connessioni. Il ricevitore compie le funzioni inverse.

4.2.1 Livello PHY

Nella Figura 11 è rappresentato il *transceiver*; si può notare che esso si compone di un blocco di codifica FEC su codice $1/2$ Turbo Convolutional e un blocco di modulazione Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM).

A sua volta il blocco di codifica FEC è formato, per il Frame Control AV, dal codificatore convoluzionale e da un Diversity Copier mentre, per il payload AV, da uno Scrambler, dal codificatore convoluzionale e dagli *inter-leaver* di canale e ROBO. Il modulatore, invece, è formato da un Mapper, un modulo IFFT per il calcolo della trasformata inversa di Fourier, un modulo per l'inserzione del Prefisso Ciclico e finestramento, uno per l'inserzione del preambolo e infine l'interfacciamento analogico o Analog Front End (AFE). Il ricevitore si compone degli elementi che svolgono le funzioni inverse.

Figura 11: Transceiver HomePlug AV per il protocollo Green PHY



Va precisato che il protocollo può operare in modalità definita *Hybrid*, nella quale è compatibile anche con il suo antenato HomePlug1.0.1, o in modalità *AV mode*, nella quale è compatibile solo con il predecessore HomePlug AV.

Il segnale nel dominio del tempo si basa su un campionamento a 75 MHz, e la modulazione usata è OFDM, la cui trasformata di Fourier è a 3072 campioni, per le cui caratteristiche si rimanda all'Appendice A. In particolare, Green PHY utilizza Robust OFDM (ROBO) con la quale si trasmettono più copie del simbolo su diverse sottoportanti per aumentarne l'affidabilità. A differenza di HomePlug AV, Green PHY utilizza per le sottoportanti OFDM solo la modalità ROBO con modulazione QPSK. Questa scelta è stata fatta in quanto riduce di molto la memoria richiesta e la complessità del modulatore/demodulatore, oltreché l'energia utilizzata.

Intervallo	Descrizione	# Campioni	Durata (μs)
T	Intervallo IFFT	3072	40.96
t_{prefix}	Intervallo Cyclic Prefix	$RI + GI$	$4.96 + GI$
T_E	Intervallo di simbolo esteso	$T + t_{prefix}$	$45.92 + GI$
RI	Intervallo di rolloff	372	4.96
T_S	Periodo di Simbolo	$3072 + GI$	$40.96 + GI$
GI_{FC}	Guard Interval del Frame Control	1374	18.32
GI	Guard Interval in generale	417, 567	5.56, 7.56
GI_{SR}	Guard Interval per Standard ROBO	417	5.56
GI_{HR}	Guard Interval per High Speed ROBO	417	5.56
GI_{MR}	Guard Interval per Mini ROBO	567	7.56

Tabella 2: *Caratteristiche del simbolo OFDM*

La Figura 12 mostra il formato di un simbolo OFDM con i nomi degli intervalli di tempo, mentre la Tabella 2 mostra i valori per gli intervalli di tempo. Il simbolo OFDM viene sostanzialmente costruito dai 3072 campioni della IFFT più i campioni di prefisso: mentre il Guard Interval (GI) ha funzione di protezione contro l'interferenza, il Roll Off Interval (RI) è l'intervallo di decadimento del segnale.

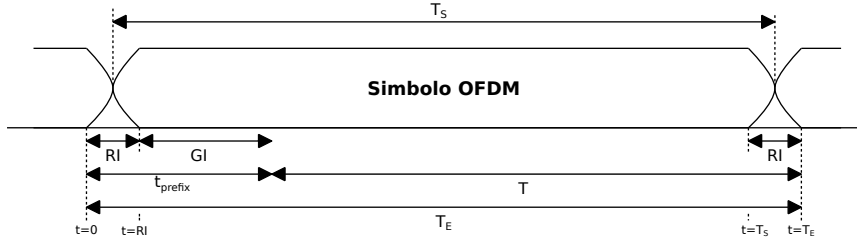


Figura 12: *Struttura di un simbolo OFDM*

Struttura della PPDU Per PHY Protocol Data Unit (PPDU) si intende la singola entità trasmessa sulla linea elettrica. La PPDU è composta da: un preambolo, un blocco di controllo (Frame Control, FC) e i dati di informazione (payload). I formati di una PPDU (mostrati in Tabella 3) sono quattro, a seconda della compatibilità con il protocollo HomePlug1.0.1 e della presenza o meno dei dati.

I blocchi FEC utilizzati sono da 520 otteti o da 136 otteti e sono indicati, rispettivamente, come PHY Block 520 (PB520) e PHY Block 136 (PB136). Il payload può deve essere creato usando uno dei tre seguenti formati:

- Un blocco FEC di 520 otteti modulato usando la Standard ROBO Modulation
- Uno, due o tre blocchi di 520 otteti FEC modulati usando la High Speed ROBO Modulation
- Un blocco FEC di 136 otteti modulato usando la Mini ROBO Modulation

Formato PPDU	Preambolo	Frame Control HP1.0.1	Frame Control HPAV	Dati
AV Mode long PPDU	HPAV	No	Sì	Sì
Hybrid long PPDU	Hybrid	Sì	Sì	Sì
AV Mode short PPDU	HPAV	No	Sì	No
Hybrid short PPDU	Hybrid	Sì	Sì	No

Tabella 3: *Formati per le PPDU*

Codifica del Frame Control Il Frame Control è costituito da 128 bit necessari al livello MAC per operazioni di controllo. Il primo elemento attraversato dai bit del frame control provenienti dal livello MAC è il Codificatore

Modalità ROBO	# Copie	Bitrate PHY (Mbps)	Blocco PHY
High Speed ROBO	2	9.8452	520
Standard ROBO	4	4.9226	520
Mini ROBO	5	3.7716	136

Tabella 4: *Modalità ROBO*

1/2 Turbo Convolutional, che produce, quindi, dai 128 bit di ingresso, 256 bit codificati. Successivamente un blocco di interleaving provvede a introdurre un elemento di casualità nella sequenza: esso dispone i bit in arrivo nelle colonne di una matrice, selezionandone poi le righe. Il Diversity Copier si occupa poi di allocare i 256 bit, modulati QPSK, nelle diverse sottoportanti attive. Il Diversity Copier, per raggiungere la massima efficienza, alloca le copie dei bit, già codificati, alla massima distanza reciproca: usando un intervallo di 128 bit, nella prima portante vengono copiati i bit 1, nel canale I, e 128, nel canale Q, nella seconda portante vengono copiati i bit 2, nel canale I e 129, nel canale Q, ecc. continuando poi con l'operazione $c \bmod 256$ dove c è la generica sottoportante. In questo modo si ottengono 7 copie di ogni bit e 8 copie per alcuni di essi.

Codifica dei dati Il primo blocco attraversato dai bit di informazione provenienti dal livello MAC è, invece, uno Scrambler. Tale blocco serve a dare ai bit una distribuzione casuale. Per fare ciò si usa uno LFSB con polinomio generatore:

$$S(x) = x^{10} + x^3 + 1$$

Successivamente i bit passano per il blocco codificatore costituito da due blocchi 2/3 Turbo Convolutional a 8 stati da cui si ottiene un codice 1/2 Turbo Convolutional. I bit in uscita dal codificatore convoluzionale entrano nell'interleaver di canale. Questo blocco dispone i bit in arrivo in una matrice a 4 colonne e ne seleziona poi le righe, una riga dai bit di informazione e una riga dai bit di ridondanza; si ottiene così un interleaving dei bit. Infine i bit passano attraverso un interleaver ROBO che provvede a disporre le copie di ciascun bit sulle sottoportanti secondo un algoritmo di interleaving. Le proprietà delle tre modalità ROBO sono riassunte in Tabella 4. È da notare che, poiché il numero di sottoportanti utilizzate deve essere multiplo delle copie fatte, alcune sottoportanti restano inutilizzate: Green PHY prevede per tali sottoportanti un metodo di riempimento con sequenze casuali.

Modulazione e generazione del segnale Il blocco modulatore inizia con la mappa tra bit e simboli QPSK. Green PHY utilizza solo modulazione

ROBO e quindi QPSK per le sottoportanti. Si chiama Maschera delle Portanti (*Tone Mask*) la tabella che indica le portanti attive e quelle che non devono essere usate; a questa si sovrappone una Maschera delle Ampiezze che indica l'ampiezza massima della portante: può essere impostata e deve essere la stessa per tutte le stazioni fisicamente connesse. Il minimo numero di portanti attive è 275 mentre il massimo è 1155, distribuite nella banda 1.8 – 28 MHz.

Le forme d'onda generate si basano, essenzialmente, sul segnale

$$w(n) = \begin{cases} w_{rise}(n) & \text{per } 0 < n \leq RI \\ 1 & \text{per } RI < n \leq T - RI \\ w_{fall}(n) & \text{per } T - RI < n \leq T \end{cases}$$

dove T è la durata della parte utile e RI il Roll Off Interval; w_{rise} e w_{fall} sono così definite:

$$w_{rise}(n) = \begin{cases} \frac{0.20}{52}n & \text{per } 0 < n \leq 51 \\ 0.20 + \frac{0.69}{267}(n - 52) & \text{per } 51 < n \leq 319 \\ 0.80 + \frac{0.20}{52}(n - 319) & \text{per } 319 < n \leq RI - 1 \end{cases}$$

$$w_{fall}(n) = 1 - w_{rise}(n)$$

4.2.2 Livello MAC

Il livello MAC, come gran parte del protocollo, è sostanzialmente uguale al livello MAC dell'HomePlug AV. Esso riceve dal livello di Convergenza le MSDU (MAC Service Data Unit) e genera di conseguenza i frame MAC.

Struttura del Frame MAC Il tipo di codifica utilizzata per i frame MAC è CRC-32 oppure CRC-24: i polinomi generatori sono rispettivamente:

$$G_{32}(x) = x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^4 + x^2 + x + 1$$

$$G_{24}(x) = x^{24} + x^{23} + x^6 + x^5 + x + 1$$

Il Frame MAC si compone di un Header, un campo per ATS (Arrival Time Stamp)/Confounder, il campo dati e un campo ICV (Integrity Check Value). Solo l'Header è un campo obbligatorio.

L'Header è lungo due otteti e contiene i campi: MFT (MAC Frame Type) e MFL (MAC Frame Length). MFT indica il tipo di dati contenuti nel frame secondo la Tabella 5. In ogni caso Green PHY non implementa l'opzione ATS.

Valore MFT	Significato
00	Il campo dati è stato <i>riempito</i> con bit di riempimento
01	Il campo dati contiene informazione senza ATS
10	Il campo dati contiene informazione con ATS
11	Il campo dati contiene bit di Controllo con Confounder

Tabella 5: *Interpretazione dei bit nel campo MFT*

Formato MPDU	Frame Control HP1.0.1	Frame Control HPAV	Dati
AV Mode long MPDU	No	Sì	Sì
Hybrid long MPDU	Sì	Sì	Sì
AV Mode short MPDU	No	Sì	No
Hybrid short MPDU	Sì	Sì	No

Tabella 6: *Formati per le MPDU*

Il campo MFL, di 14 bit, contiene la lunghezza del frame, dove il valore 0000 indica 1 otteto e così via. Il Confounder è costituito da un valore Pseudo Random di lunghezza 4 otteti. Il campo ICV contiene il valore CRC-32 ottenuto dalla codifica.

Struttura della MPDU La MAC Protocol Data Unit (MPDU) è la singola entità che il livello MAC richiede al livello PHY di trasmettere. Esso rispecchia i quattro formati possibili per la PPDU, come illustrato in Tabella 6.

Trascurando la modalità Hybrid, necessaria per la retrocompatibilità, il Frame Control AV è costituito dai seguenti campi: Delimiter Type (DT_AV), Access, Short Network Identifier (SNID), Variant Field (VF_AV) e Frame Control Check Sequence (FCCS_AV). L'interpretazione dei campi DT_AV e Access è riassunta in Tabella 7.

Il DT_AV è un campo di 3 bit che determina il tipo di Delimiter, ovvero l'insieme di Preambolo, FC HP1.0.1 (se presente) e FC HPAV, mentre il campo Access determina se la MPDU è stata trasmessa su una rete HAN o sulla rete di accesso.

Il campo Short NID (Network Identifier) contiene 4 bit necessari per distinguere le MPDU trasmesse sullo stesso cavo elettrico ma di diverse reti. Come verrà spiegato più avanti, ciascun Central Coordinator deve assicurarsi che nessuno dei Central Coordinator fisicamente collegati a lui abbia lo stesso SNID. Il campo VF_AV dipende dal Delimiter Type e contiene innumerevoli

DT_AV	000	Beacon
	001	Start of Frame
	010	Selective Acknowledgement (SACK)
	011	Request to Send/Clear to Send
	100	Sound
	101	Reverse Start of Frame
	110-111	Reserved
ACCESS	0	MPDU trasmessa su HAN
	1	MPDU trasmessa su rete di accesso

Tabella 7: *Campi del Frame Control AV*

informazioni come Source e Destination Terminal Equipment Identifier, Link Identifier, dimensione del blocco PHY, ecc.

Il payload di una MPDU (long) può essere in uno dei seguenti formati:

- Uno o più blocchi da 520 otteti
- Un blocco da 136 otteti
- Payload Beacon da 136 otteti
- Payload Sound da 136 o 520 otteti

Ciascuno di questi blocchi produce un singolo blocco fisico (PB) FEC ed è costituito da un PB Header un PB Body e un PB Check Sequence (PBCS). PB Header e PBCS sono lunghi, ciascuno, 4 otteti indipendentemente dal formato.

Alcuni dei campi più importanti del blocco da 136 otteti di payload per il beacon sono: il Network Identifier (NID) di 54 bit, il Beacon Type (BT), il Network Mode (NM) e il Beacon Management Information (BMI). I valori di BT e e NM sono riassunti in Tabella 8. Il campo BMI contiene informazioni necessarie per la gestione dei Beacon tra cui i campi Beacon Entry (BENTRY). I campi Schedule BENTRY trasportano le informazioni sulla struttura di un periodo di beacon e quindi sugli intervalli permessi per la trasmissione.

Descrizione funzionale del MAC HomePlug Green PHY utilizza un metodo di accesso al mezzo tramite intervalli di *beacon*, simile a quello già utilizzato per le reti wireless 802.11. Tale sistema è stato progettato con l'intento specifico di ridurre il consumo di energia e si basa sull'utilizzo di periodi di beacon all'inizio dei quali i dispositivi si attivano e decidono se rimanere attivi o entrare nella modalità stand-by [20].

Beacon Type	000	Central Beacon
	001	Discover Beacon
	010	Proxy Beacon
	011-111	Reserved
Network Mode	00	Uncoordinated
	01	Coordinated
	10	CSMA-only

Tabella 8: Valori di BT e NM

Per aumentarne l'efficienza e garantire la QoS, il periodo di beacon dura due volte il periodo della corrente AC, 50 oppure 60 Hz. È noto infatti che la funzione di trasferimento della linea elettrica è tempo variante, la peculiarità di tale funzione è che essa è periodica con periodo pari a due periodi AC (40 o 33.33 ms) [19]. Green PHY deve quindi essere in grado di agganciarsi alla frequenza della corrente AC: in genere questo viene fatto con un Digital Phase Locked Loop (DPLL). Nel caso specifico di Green PHY, il nodo responsabile della sincronizzazione è uno solo (Central Coordinator, definito più avanti).

La struttura di un periodo di beacon è determinata dalla presenza o meno di reti vicine. Ci sono tre modalità, chiamate:

- modalità CSMA-only
- modalità Non-Coordinata
- modalità Coordinata

Green PHY può instanziare reti solo in modalità CSMA-only (benché possa operare in reti operanti nelle altre due modalità).

Le reti individuate a livello MAC sono chiamate AV Logical Network (AVLN) e le informazioni per una singola AVLN sono contenute nelle BENTRY che possono essere di due tipi:

- Schedule BENTRY Non Persistente
- Schedule BENTRY Persistente

con la differenza che la Non Persistente è valida solo per il contemporaneo periodo di beacon mentre la Persistente contiene l'informazione su quanti periodi di beacon sono interessati dalla BENTRY. Nella configurazione CSMA il periodo di beacon è costituito da regioni CSMA e regioni Stay Out, riservate, come mostrato in Figura 13.

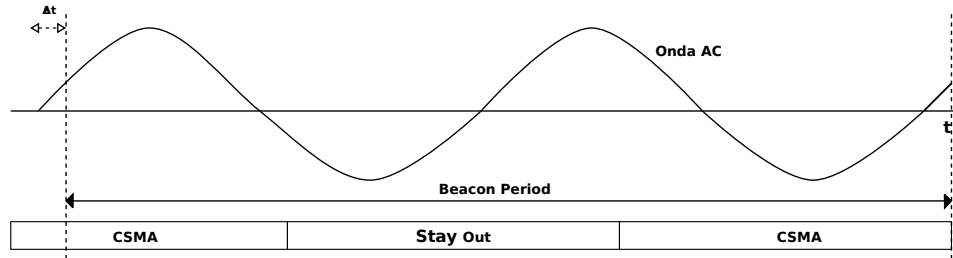


Figura 13: *Struttura di un periodo di beacon in modalità CSMA*

Nel caso di Green PHY, poiché è supportato solo il meccanismo CSMA/-CA, le Schedule BENTRY informano sulla allocazione delle regioni CSMA. Le nuove allocazioni sono comunicate dal Central Coordinator (CCo) tramite un Central Beacon, trasmesso nella regioni CSMA.

Il Control Plane ha la funzione di gestire le connessioni. HomePlug AV definisce il collegamento (*link*) come un flusso unidirezionale di dati: si chiama Collegamento Diretto se il flusso va dal *client* al *server*, mentre si chiama Collegamento inverso se avviene il contrario; definisce poi Connessione un insieme di collegamenti che può essere unidirezionale, multidirezionale, unicast o multicast/broadcast. Green PHY supporta solo la modalità di trasmissione *connectionless* nella quale non è richiesto instanziare una Connessione.

I dispositivi di una AVLN possono anche effettuare *bridging* ovvero inoltrare dei frame MAC. In particolare possono fare da *bridge* e trasmettere sfruttando un bridge. Green PHY richiede solo di saper trasmettere sfruttando un bridge.

Il Data Plane gestisce la trasmissione di dati tra stazioni di una AVLN. Green PHY permette la trasmissione di messaggi di controllo e di dati tra stazioni associate e autenticate con la stessa AVLN ma permette la trasmissioni di pochi messaggi di controllo e, in ogni caso, non di dati, tra stazioni non associate né autenticate con la stessa AVLN. Il processo di generazione delle MPDU parte dalle MSDU ricevute dal Convergence Layer (CL). Da ciascuna MSDU contenete dati (payload) viene viene generato un Frame MAC, premettendole l'Header del Frame MAC e postponendole il campo ICV. I Frame MAC vengono quindi concatenati a formare un flusso che viene chiamato *flusso dati*. Nel caso le MSDU contengano messaggi di controllo ad esse viene preposto l'header del Frame MAC, il Confounder e postposto il campo ICV generando i Frame MAC. Essi vengono poi concatenati a formare i *flussi di controllo*.

Successivamente i flussi vengono segmentati in segmenti di 512 otteti, dai quali, con l'aggiunta di header e trailer, viene generato un singolo blocco PB520. Tramite il processo di segmentazione ciascuna MPDU può contenere una parte di frame o più frame diversi a seconda della loro lunghezza. Questo garantisce il massimo sfruttamento degli intervalli di trasmissione.

Si ricorda che una MPDU è formata da un Frame Control e uno o più PB. Ciascuna MPDU quindi può trasportare più segmenti di un flusso dati oppure di un flusso di controllo come riassunto in Figura 14.

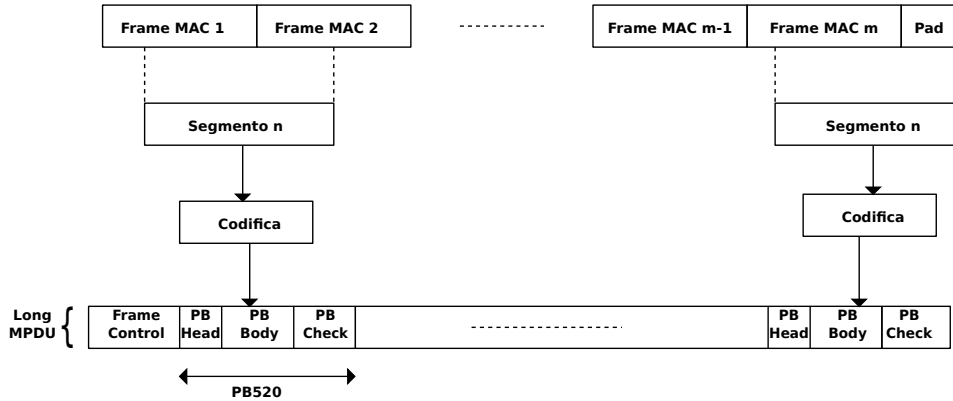


Figura 14: *Segmentazione e generazione delle MPDU*

Power Save Mode Green PHY introduce un innovativo algoritmo di accesso al mezzo che permette ai dispositivi Green PHY di avere un ridotto consumo di energia. Power Save Mode fa uso di quattro concetti:

- *Awake Window* è una finestra temporale nella quale il dispositivo è in grado di ricevere e spedire dati
- *Sleep Window* è una finestra temporale nella quale il dispositivo non è in grado di ricevere né di trasmettere dati
- *Power Save Period* è l'intervallo costituito da Awake Window e Sleep Window
- *Power Save Schedule* è l'indicazione della lunghezza temporale della Power Save Window e della Awake Window

Il Power Save Mode viene gestito all'interno di una AVLN: il Central Coordinator riceve e risponde alle richieste di entrata e uscita dal Power Save Mode da parte dei dispositivi; esso si occupa anche di comunicare alle altre stazioni le varie Power Save Schedule. La Awake Window deve iniziare con l'inizio di un periodo di beacon e i Power Save Period sono sempre multipli di 2^k periodi di beacon, questo al fine di garantire la massima sovrapposizione degli intervalli Awake Window. Impostando la lunghezza del Power Save Period è possibile, quindi, ridurre drasticamente il consumo medio di energia.

HomePlug Alliance dichiara di aver raggiunto i seguenti obiettivi con il protocollo HomePlug Green PHY:

- Un infrastruttura di rete affidabile che connetta dispositivi diversi
- Compatibilità con le tecnologie più diffuse e già in uso
- Pervasività all'interno delle strutture
- Interfacce a basso consumo e a bassa complessità tali che possano essere installate come dispositivi embedded
- Compatibilità con le applicazioni wireless per Smart Grid
- Standard robusti e validi meccanismi di certificazione da terze parti per garantire interoperabilità universale e duratura

4.2.3 Applicazioni Smart Grid

Gli ambiti applicativi possono essere estratti dai *white paper* rilasciati da HomePlug Alliance, come in [22]. Green PHY non è progettato per operare su linee elettriche al di fuori della struttura residenziale e può venire utilizzato per implementare reti HAN: il suo obiettivo principale è connettere tutti i dispositivi abitualmente presenti in un abitazione. L'introduzione della modalità Power Save Mode dovrebbe condurre verso l'integrazione embedded di dispositivi Green PHY come l'eliminazione di Adaptive Bit Loading. Green PHY prevede un meccanismo di coesistenza con HomePlug AV così da garantire che il traffico sensibile al ritardo non venga danneggiato; la frequenza minima utilizzata (2 MHz) è invece ben al di sopra della frequenza utilizzata dalle tecnologie NarrowBand (< 500 kHz), garantendo elevata coesistenza tra le due tecnologie. HomePlug Alliance, tuttavia, non propone esempi di applicazione limitandosi ad elencare gli ambiti applicativi, che, fondamentalmente, sono tutto ciò che concerne la HAN: AMR/AMI, pricing in tempo reale, gestione delle DER, ecc.

5 Conclusioni

Oltre alla scelta delle tecnologie per i livelli inferiori (PHY e DLL), un passo fondamentale sarà quello della scelta delle applicazioni (e in generale dei livelli superiori) che implementeranno Smart Grid.

Un aspetto importante ma poco discusso che concerne Smart Grid, è, ad esempio, la capacità di trasportare traffico IP. Si rammenti che IP è un protocollo di livello 3, quindi sottostante al livello Trasporto (livello 4) la cui adozione è stata tale da richiedere l'estensione del suo indirizzamento da 32 bit a 128 bit (vedi IPv6). Il ruolo di IP in Smart Grid è analizzato e, in parte, definito nell'RFC 6272 [23]. Tale RFC tenta di delineare quali sono le richieste a livello applicazione di Smart Grid, fornendo le capacità, di quella che viene chiamata *Internet Protocol Suite* (IPS), di provvedere a tali richieste. Dopo un fornito elenco di protocolli appartenenti all'IPS, che spazzano i livelli DLL, NET e TRS, RFC 6272 fa un esempio di implementazione di una struttura AMI. Lo schema è quello mostrato in Figura 15: come tutti gli altri esempi qui forniti, prevede l'esistenza di una HAN, all'interno di una residenza, connessa alla rete di accesso tramite un ESI. Il contatore viene considerato esterno e dunque facente parte della rete di accesso. La rete di accesso, o Neighborhood Area Network (NAN), è composta di più residenze/strutture residenziali. Lo schema prevede la presenza di un Aggregatore/Collettore che aggrega i dati provenienti da più nodi e li convogli nella rete di trasporto (AMI), fino alle strutture dell'operatore.

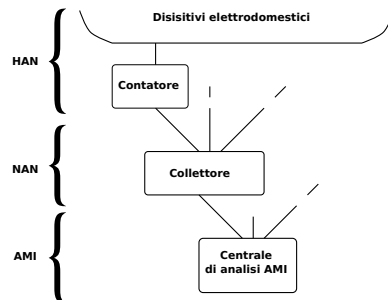


Figura 15: *Esempio di implementazione AMI tramite IPS*

Un primo esempio prevede tre diverse reti divise per dominio amministrativo: la rete di accesso può essere una rete WiMAX col suo proprio operatore che gestisce l'intera infrastruttura compreso il Collettore, e può accedere la HAN solo tramite l'ESI. In questo caso la scelta più efficiente consiste nell'inserire il Collettore, il contatore e EMS come nodi della rete di accesso (NAN). I segnali di controllo provenienti dall'operatore devono prima essere ricevuti da un EMS che conseguentemente decide le azioni da compiere nella HAN.

In un secondo esempio l'operatore ha diretto accesso ai singoli dispositivi della HAN, senza passare attraverso un EMS o ESI; in questo caso contatore e EMS agiscono come nodi della HAN. Questa seconda configurazione solleva molte più questioni relative alla sicurezza.

A livello applicazione si può sicuramente affermare che, ad oggi, la comprensione dei fenomeni rilevanti per Smart Grid all'interno della rete elettrica siano lontani dall'essere compresi. Benché la tecnologie di comunicazione siano molto varie (molti mezzi fisici, molti tipi di accesso al mezzo, ecc.) e forniscano ampie capacità di trasmissione, la difficoltà nella scelta della tecnologia più adatta sorge dall'ignoranza dell'applicazione da implementare. Power Line Communications sembra tuttavia la tecnologia più adatta in quanto presenta la peculiarità di connettere ogni dispositivo che possa diventare oggetto di applicazioni Smart Grid.

Sicuramente la scelta di progettare per prime le tecnologie di trasmissione nella HAN è stata conveniente in quanto si è cercato di ottenere il massimo bitrate possibile affrontando già il problema dell'interferenza e della coesistenza, e questi problemi sono quelli relativi alla rete di accesso, quindi quella più popolosa. Resta però da studiare tutta la parte relativa alla rete di distribuzione che rappresenta il "cuore" della rete elettrica. Qui, infatti, avvengono i fenomeni di scambio di energia, convogliamento dell'energia, sovraccarico della rete e tutti quei fenomeni che costituiscono l'input dei processi Smart Grid. Qui si dovranno scegliere con cura le tecnologie implementative per non creare solo un altro dispositivo avido di energia elettrica.

La Raccomandazione G.hn è un valido strumento e le sue clausole propongono una tecnologia, in particolare PLC, con ampie capacità di trasporto, di adattamento, di autoriparazione e di efficienza energetica. G.hn sarà quindi in grado, con buona approssimazione, di supportare le richieste provenienti da più parti inclusa Smart Grid. HomePlug Green PHY pur allontanandosi in qualche punto dalla Raccomandazione ne implementa la struttura fondamentale, e la scelta non solo di renderlo interoperabile ma addirittura di derivarlo da HomePlug AV costituisce un passo importante per la sua futura adozione di massa, e un primo passo verso il tanto agognato allineamento dei protocolli.

Sicuramente, tuttavia, Smart Grid opererà su una gran quantità di comunicazioni (protocolli e apparati) diverse, e la tecnologia migliore, non solo dipende dalla particolare circostanza ma emergerà con lo svilupparsi delle applicazioni Smart Grid, così come è accaduto per Internet e per la diffusione del Web. Bisogna evitare la tentazione di scegliere ora, in fase progettuale, quella che sembra essere la migliore tecnologia di comunicazione ma lasciare libera, piuttosto, la proliferazione di nuove tecnologie fino a quando non saranno chiare le richieste comunicative di Smart Grid.

Appendice

A Modulazione OFDM

La modulazione OFDM è una modulazione multi-portante che fa uso della divisione in frequenza per creare dei sottocanali con modulazioni, a singola portante e a bitrate relativamente basso, che permettono, nell'insieme, di raggiungere efficienze spettrali molto vicine al *bound di Shannon*. In particolare si suppone lo spettro diviso in N sottobande utilizzate con normali modulazioni a singola portante (ad es. QAM, PSK), e T_b il periodo di bit, mentre T_s il periodo di simbolo. Se la modulazione utilizzata è, ad esempio, M-QAM, il segnale OFDM sarà [15] [16]:

$$X(kT) = \sum_{n=0}^{N-1} \alpha_{I,n} \cos \omega_n kT + \alpha_{Q,n} \sin \omega_n kT$$

dove $\alpha_{I,n}$ e $\alpha_{Q,n}$ sono, rispettivamente, la parte in fase e la parte in quadratura del simbolo complesso QAM α_n , mentre ω_n sono le diverse frequenze delle sottoportanti.

Si può osservare che la precedente equazione può essere riscritta come

$$\begin{aligned} X(kT) &= \sum_{n=0}^{N-1} \alpha_{I,n} \cos \omega_n kT + \alpha_{Q,n} \sin \omega_n kT \\ &= \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} (\alpha_{I,n} + j\alpha_{Q,n})(\cos \omega_n kT - j \sin \omega_n kT) \right\} \\ &= \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} (\alpha_{I,n} + j\alpha_{Q,n})(e^{-j\omega_n kT}) \right\} \end{aligned}$$

mettendo in evidenza che il segnale OFDM altro non è che la parte reale della trasformata di Fourier inversa del segnale QAM α_n . Ed è infatti tramite algoritmi IFFT che viene implementata la modulazione. La frequenza della generica sottoportante è $\omega_n = 2\pi n/(NT)$, dove T è la durata di un simbolo della sequenza α_n . Si ha allora che, ad un determinato istante k , la sottoportante n trasporta il simbolo $\alpha_n = \alpha_{I,n} + j\alpha_{Q,n}$ e la distanza *inter-portante* è $1/(NT)$: il suo inverso, NT , è definito come la durata di un simbolo OFDM ed è N volte la durata del simbolo. C'è da notare che gli algoritmi di implementazione della FFT/IFFT operano su sequenze di campioni che, in numero, sono potenze di 2 o di 4. Se il numero di campioni a disposizione non soddisfa a tale requisito si aggiungono dei campioni di ampiezza 0 fino a raggiungere il più vicino numero che sia divisibile per 2^ν o 4^ν con $\nu \in \mathbb{N}$ [16].

Nonostante le sottoportanti OFDM siano esenti da interferenza di intersimbolo (ISI), la distorsione lineare del canale può portare le portanti a non essere più ortogonali tra di loro. Nelle moderne modulazioni OFDM si inserisce una sequenza antecedente il simbolo OFDM con lo scopo di proteggere la trasmissione da interferenza inter-portante. La sequenza, denominata *Cyclic Prefix* è costituita dalla parte finale del simbolo OFDM stesso, ripetuta, e deve avere una lunghezza maggiore della durata della risposta impulsiva del canale per essere effettiva. La scelta della parte finale del segnale va ricondotta al fatto che, per un segnale periodico

Viene talvolta usato il termine COFDM (Coded OFDM) che sta ad indicare, semplicemente, che il flusso di bit viene, prima di essere modulato, codificato con un qualche tipo di codifica FEC (generalmente Turbo Convolutional) per garantire il minor numero di ritrasmissioni possibili.

B Cyclic Redundancy Check

Gli algoritmi di Cyclic Redundancy Check (CRC) servono a produrre bit di parità (*parity bits*), utili al controllo dell'integrità dei dati trasmessi e alla loro correzione, da parte del ricevitore. Sono algoritmi molto facili da implementare e proteggono molto bene da errori cosiddetti *bursts*, ovvero indipendenti dal pattern di bit e concentrati tutti nell'intorno di un istante.

Ciò che definisce un codice CRC è il polinomio generatore. Esso è il polinomio (divisore) per cui viene divisa la stringa di bit da codificare (dividendo) in una divisione modulo 2 tra polinomi e di cui viene selezionato il resto della divisione.

La stringa così prodotta, ovvero il resto della divisione tra polinomi, viene inserita dopo i bit da proteggere, formando così la stringa codificata. Il ricevitore, una volta ottenuta la stringa di bit, calcola la divisione della stringa con il polinomio generatore che gli è noto e verifica che il resto sia 0.

Di seguito è presentato un esempio di calcolo del CRC: per una stringa di 5 bit viene calcolato un CRC di 3 bit. Si ricorda che la divisione modulo 2 equivale ad un'operazione XOR, viene quindi scritta la stringa da dividere, seguita da tanti 0 quanti sono i bit CRC e sotto di essa la stringa del polinomio generatore. Se il bit del dividendo è 0, non avviene nulla se è 1 si esegue uno XOR, fino a che il dividendo è 0. Alla fine del processo, solo i bit finali possono essere non nulli e questi sono i bit della stringa CRC. La stringa da proteggere è 1 1 0 1 0, mentre il polinomio generatore è

$$p(x) = x^3 + x^1 + 1$$

1	1	0	1	0	0	0	0	Dividendo
1	0	1	1					Divisore
0	1	1	0	0	0	0	0	Quoziente
	1	0	1	1				
0	0	1	1	1	0	0	0	
		1	0	1	1			
0	0	0	1	0	1	0	0	
			1	0	1	1		
0	0	0	0	0	0	1	0	CRC

La stringa CRC ottenuta è: 0 1 0.

Riferimenti bibliografici

- [1] N.Tesla, "A New System of Alternate Current Motors and Transformers," *American Institute of Electrical Engineers, meeting of*, May 1888.
- [2] A. Ipakchi and F. Albuyeh, "Grid of the Future," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 7, no. 2, pp 52-62, Mar./Apr. 2009.
- [3] S. Galli, A. Scaglione, Z. Wang, "Power Line Communications and the Smart Grid", in *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on*, pp 303-308, Oct. 2010.
- [4] IEA, "Monthly Electricity Statistics - April 2011", International Energy Agency, Apr. 2011
- [5] M. H. Brown, R. P. Sedano, *Electricity Transmission - A Primer*, National Council on Electric Policy, Jun. 2004.
- [6] S.Galli, A. Scaglione, Z. Wang, "For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid," in *Proceed. of the IEEE*, vol. 9 pp 998-1027, Jun. 2011.
- [7] K. Tomsovic, D.Bakken, V. Venkatasubramanian, and A. Bose, "Designing the next generation of real time control, communication, and computations for large power systems," *Proc. IEEE*, vol. 93, no. 5, May 2005.
- [8] National Communications Systems (NCS), "Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Systems," *Technical Information Bulletin 04-1*, Oct. 2004.
- [9] SmartGrids European Technology Platform, Strategic Deployment Document, Apr. 2010 *available online at* <http://www.smartgrids.eu/>
- [10] P.P. Parikh, M.G. Kanabar, T.S. Sidhu, "Opportunities and Challenges of Wireless Communication Technologies for Smart Grid Applications", *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, pp 1-7, Jul. 2010.
- [11] *Unified high-speed wire-line based home networking transceivers - System architecture and physical layer specification*, ITU-T Recommendation G.9960, Jun. 2010.
- [12] *Unified high-speed wire-line based home networking transceivers - Data link layer specification*, ITU-T Recommendation G.9961, Jun. 2010.
- [13] *HomePlug Green PHY Specification Release Version 1.0*, HomePlug Powerline Alliance, Jun. 2010.

- [14] N. Benvenuto, R. Corvaja, T. Erseghe, N. Laurenti, *Communications Systems, Fundamentals and Design Methods*, Wiley, May 2007.
- [15] Y. Wu, W. Y. Zou, “Orthogonal Frequency Division Multiplexing: A Multi-Carrier Modulation Scheme”, *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, Vol.41, pp 392-399, Aug. 1995.
- [16] K. Pietikainen, “Orthogonal Frequency Division Multiplexing”, *Internet Document*, Aalto University, Finland.
- [17] J. G. Proakis, D. G. Manolakis, *Digital Signal Processing, Principles, Algorithms and Applications*, Prentice-Hall Inc., pp 536-537, 2007.
- [18] G. Held, *Understanding Broadband over Power Line*, Auerbach Publications, 2006.
- [19] S. Galli, O. Logvinov, “Recent Development in the Standardization of Power Line Communications within the IEEE”, *IEEE Communications Magazine*, Jul. 2008.
- [20] S. L. Wu, P. C. Tseng, “An Energy Efficient MAC Protocol for the IEEE 802.11 WLANs”, *Second Annual Conference on Communication Networks and Services Research, IEEE Proceedings of*, Apr. 2004.
- [21] *Applications of ITU-T G.9960, ITU-T G.9961 transceivers for Smart Grid applications: Advanced metering infrastructure, energy management in the home and electric vehicles*, ITU-T Technical Paper, Jun. 2010.
- [22] “HomePlug Green PHY, The Standard For In-Home Smart Grid Powerline Communications”, *HomePlug Green PHY White Paper*, HomePlug Alliance, Jun.2010.
- [23] IETF, Internet Protocols for the Smart Grid, “RFC 6272”, *Available online at www.ietf.org*, Jun. 2011.