ENERGY-HOME.IT

Energy@home

COMUNICAZIONE POWER LINE PER SERVIZI POST-CONTATORE

CARATTERIZZAZIONE E ANALISI DELLA COMUNICAZIONE POWER LINE IN BANDA C

Autori: Marco Raugi - Università di Pisa
A cura di: Associazione Energy@home

COMUNICAZIONE POWER LINE PER SERVIZI POST-CONTATORE

Caratterizzazione e analisi della PLC in banda C

Novembre 2016

Autore: Marco Raugi – Università di Pisa
A cura di: Associazione Energy@home

Questo studio è stato realizzato da Marco Raugi

UNIVERSITÀ DI PISA

in collaborazione e per conto della
Associazione Energy@home

Copyright 2016 della Associazione Energy@home
www.energy-home.it

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta, archiviata, memorizzata o trasmessa in qualsiasi forma o mezzo. L'autorizzazione alla riproduzione dovrà essere richiesta a Associazione Energy@home, Corso d'Italia 41, 00198 ROMA

È un fatto - o l'ho sognato - che, per mezzo dell'elettricità, il mondo della materia è diventato un grande nervo, vibrante migliaia di miglia in un impetuoso punto del tempo?

(Nathaniel Hawthorne 1804-1864)

La tecnologia è o immatura o obsoleta.

(Clifford Kettemborough)

cap. 0

Gli Autori Pag 7
Prefazione Pag 8

cap. 1

1.CARATTERIZZAZIONE TEORICA DELLA BANDA C
1.1 Note sulla norma CEI EN 50065-1 Pag 12
1.2 Usi permessi della banda Pag 12
Protocollo di accesso Pag 13
Condizione di banda in uso Pag 14
Uso consentito della banda Pag 16
1.3 Larghezza della banda Pag 16
1.4 Come si posiziona la banda nello spettro PLC Pag 17
1.5 Caratterizzazione delle eventuali bande di guardia fra la banda C e le bande adiacenti Pag 17
1.6 Vincoli di potenza sull'uso della banda C Pag 17
Metodo di determinazione del livello di uscita Pag 17
Dispositivi monofase Pag 17
Dispositivi trifase che trasmettono contemporaneamente tra neutro e tutte le fasi Pag 18
Dispositivi trifase che trasmettono simultaneamente tra le fasi e senza collegamento al neutro Pag 18
Dispositivi trifase che trasmettono su una sola fase Pag 19
1.7 Consumi di un modem in banda C Pag 20
1.8 Rapporto segnale - rumore Pag 20
Attenuazioni tipiche Pag 20
Rumore Pag 22
1.9 Vincoli di emissione su altre bande e di interferenza da altre bande
Disturbi condotti, gamma frequenza da 3kHz a 30 MHz. Pag 25
Gamma di frequenza da 3 kHz a 9 kHz Pag 25
Gamma di frequenza da 9 kHz a 150 kHz Pag 25
Gamma di frequenza da 0,15 MHz a 30 MHz Pag 25
Limiti dell'intensità di campo del disturbo irradiato, gamma di frequenza da 30 MHz a 1000 MHz Pag 26
1.10 Norme e standard che portano eventuali altri vincoli e requisiti sull'uso di questa banda Pag 28

INDICE

cap. 2

2.PRESTAZIONI TEORICHE POTENZIALI DELLA BANDA C

2.1 Bitrate Pag 35

2.2 Attenuazione del canale al variare della distanza e dell'impedenza della rete elettrica Pag 36

2.3 Confronto tra valori teorici e performance delle tecnologie di trasmissione Pag 39

2.4 Conclusioni Pag 42

cap. 3

3.MISURE E PRESTAZIONI

3.1 Interferenze condotte: emissioni degli apparati utente sulla banda C. Studio dell'impatto delle interferenze provenienti da dispositivi installati nelle case Pag 45

3.2 Impatto delle interferenze sul bit-rate, packet error rate, e su altre prestazioni Pag 46

3.3 Interferenze irradiate: emissioni irradiate dalla comunicazione PLC in banda C Pag 46

3.4 Prestazioni effettive delle tecnologie PLC in banda C Pag 46

cap. 4

4.CONSIDERAZIONI SULL'USO CONDIVISO DELLA BANDA

4.1 Interazione tra contatori sottesi allo stesso cavo in BT, al crescere del numero di contatori comunicanti: impatto sulla latenza, e sul bit-rate applicativo Pag 48

Throughput di un trasmettitore singolo Pag 48

Throughput di più trasmettitori Pag 50

Impatto sulla latenza Pag 53

4.2 Impatto di trasmissioni in Banda C da altre applicazioni utente Pag 53

cap. 5

5. MISURE DI RUMORE

Misure in locale laboratorio Pag54

Misure in aula dottorandi Pag 56

Misure in ufficio docenti Pag 58

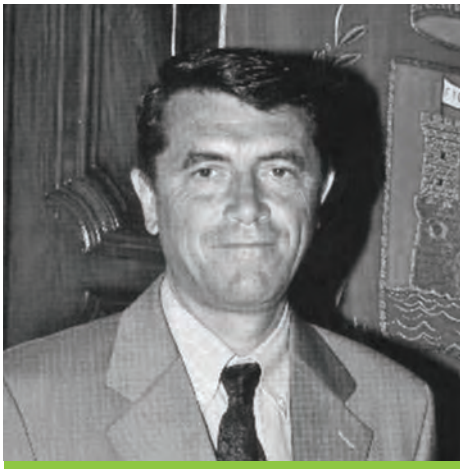
cap. 6

Bibliografia Pag 62

cap. 7

Profilo della Associazione Energy@home Pag 68

BIOGRAFIA



Marco Raugi
Autore

Marco Raugi ha ricevuto la laurea in Ingegneria Elettronica presso l'Università di Pisa nel 1985 e il Ph. D. in Ingegneria Elettrotecnica presso l'Università di Pisa nel 1990. Dal 2000 è professore ordinario di Elettrotecnica, ed è attualmente Prorettore alla ricerca Applicata e Trasferimento Tecnologico dell'Università di Pisa.
È stato presidente del Dottorato internazionale "Elettromagnetismo Applicato in ingegneria elettrica e biomedica, elettronica, sensori intelligenti, nano-tecnologie".
E' stato prima direttore del Dipartimento di Ingegneria dell'Energia e dei Sistemi e successivamente direttore del dipartimento in Ingegneria dell'energia, dei sistemi del territorio e delle costruzioni.
E' persona di riferimento per l'Ateneo di Pisa nella EERA (European Energy Research Alliance).
La sua attività di ricerca più recente è stata rivolta a problemi di intelligenza computazionale e forecasting nel campo dell'ingegneria elettrica con particolari applicazioni alle onde convogliate ed alle SmartGrids. È autore di oltre 200 pubblicazioni su riviste e conferenze internazionali.
General Chairman delle conferenze internazionali PIERS (Progress In Elettromagnetica Research Symposium) 28-31 Marzo 2004, Pisa e del IEEE ISPLC (International Symposium on Powerline Communications), 26-28 Marzo 2007 Pisa.
È stato responsabile scientifico a livello nazionale di programmi di ricerca PRIN 2003 e PRIN 2007, e coordinatore principale di progetti finanziati da Fondazioni bancarie italiane (Caripi, CariLiv), e da ENI, GERG e da alcune PMI aziende italiane.

Prefazione

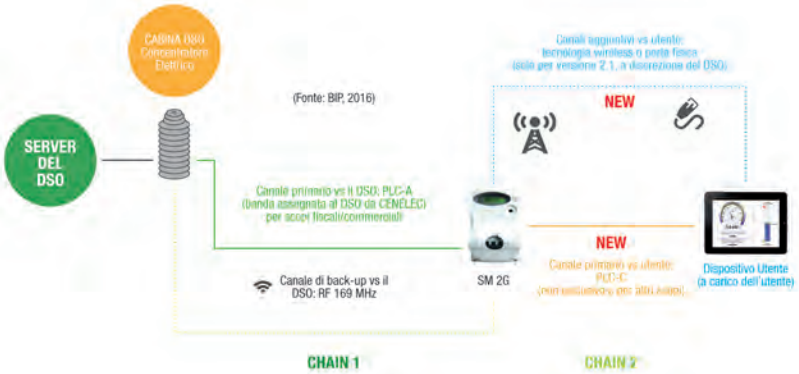
00

La recente Delibera 87/2016/R/eel pubblicata a Marzo 2016 dall'Autorità per l'energia elettrica il gas e il sistema idrico (AEEGSI) pone le basi del sistema italiano di Smart Metering di seconda generazione.
La nuova generazione di contatori elettrici in bassa tensione è caratterizzata da una riduzione dei tempi di tele-gestione e di programmazione massiva, da una maggiore frequenza di acquisizione delle grandezze misurate e, soprattutto, dalla messa a disposizione dei dati del misuratore direttamente ai dispositivi dei clienti finali, ossia ai cosiddetti In Home Device (**IHD**).
In figura è schematizzata l'architettura prevista dalla Delibera che definisce le due cosiddette chain di comunicazione del nuovo contatore:

- la chain-1 per le funzionalità di tele-gestione e fatturazione, utilizzata per la comunicazione dei dati fra contatore e i sistemi di tele-gestione dell'Operatore di Distribuzione (DSO). Già nel contatore di prima generazione italiano è stata utilizzata una combinazione di due tecnologie di comunicazione:

1) Power Line Communication (PLC) tra il contatore e la cabina secondaria, utilizzando la linea elettrica medesima nella cosiddetta banda A del Cenelec, banda di frequenza riservata dalla norma agli usi esclusivi dell'Operatore di Distribuzione (DSO); 2) comunicazione punto-punto su rete pubblica (es. GPRS) tra la cabina secondaria e i sistemi del DSO per l'acquisizione e gestione dei dati. Per il nuovo contatore, per sopperire a eventuali problemi di interferenze sulla PLC è anche prevista la possibilità di utilizzare come canale di backup la comunicazione in radio frequenza nella banda di 169 MHz, la stessa utilizzata per il gas metering al fine di massimizzare le sinergie fra i due sistemi di tele-gestione in una logica multi-servizio;

- la chain-2 per la messa a disposizione dei dati al cliente finale o a soggetti terzi appositamente autorizzati dal cliente. Ad oggi, è ipotizzato l'utilizzo dello stesso mezzo di comunicazione PLC della chain-1, sfruttando però la frequenza della cosiddetta banda C del Cenelec, banda disponibile, secondo la norma, a tutti gli IHD e a tutte le applicazioni utente.



Trattandosi di una banda di frequenza oggi utilizzata da poche applicazioni e per la quale, a conoscenza degli scriventi, c'è una limitata disponibilità di bibliografia e di dati sperimentali, in questo contesto di profonda innovazione del sistema italiano di smart metering l'Associazione Energy@home, con questa monografia, cerca di **fornire un quadro organico di riferimento rispetto alle caratteristiche e alle potenzialità di comunicazione della banda C del Cenelec** (nel seguito, PLC-C) per la chain-2 del nuovo contatore elettrico.

Così come per ogni sistema di trasmissione, anche per la PLC-C è, infatti, importante garantire il giusto bilanciamento fra il livello del segnale trasmesso, le attenuazioni lungo il mezzo fisico fino ad arrivare al ricevitore, il livello di rumore dei segnali interferenti e la possibilità del ricevitore di decodificare correttamente i messaggi e ottenere un livello finale di Packet Error Rate adeguato alle applicazioni.

00

La monografia si basa prevalentemente su considerazioni teoriche e su estrapolazione di dati reperiti in bibliografia, dati che sarebbe opportuno estendere e verificare sperimentalmente in modo statisticamente significativo.
Essa è strutturata in cinque capitoli. Il primo riguarda la caratterizzazione teorica della banda C, ne descrive gli usi consentiti, i vincoli prescritti e le attenuazioni tipiche, inquadrandola rispetto alle altre bande di frequenza Power Line del Cenelec. Il secondo capitolo analizza le prestazioni teoriche del canale a partire dai limiti del teorema di Shannon fino ai valori verosimili della velocità di comunicazione (bit-rate) riportati nei dati di targa dei modem commerciali e nella bibliografia.
Il terzo è dedicato a valutazioni sulle misure di interferenze condotte ed irradiate mentre il quarto capitolo riporta una serie di analisi e considerazioni sull'uso condiviso della banda e sull'impatto sulle performance di comunicazione (in particolare, troughput e latenza) al crescere del numero di contatori e di dispositivi comunicanti sullo stesso cavo elettrico. In ultimo, nel quinto capitolo, sono riportate alcune misure che riportano il rumore immesso in rete da alcuni dispositivi caratteristici in ambito domestico come PC e caricatori di cellulari.

La Associazione Energy@home è lieta di divulgare ed offrire questo studio auspicandosi che possa aiutare i decisori e l'industria della tecnologia e dei servizi post-contatore a porre il nuovo utilizzo tecnologico della banda C del Cenelec nelle giuste considerazioni e prospettive.

01

1.1 Note sulla norma CEI EN 50065-1

La cosiddetta banda C appartiene al campo di applicazione della norma CEI EN 50065-1 (identica a norma CENELEC EN 50065-1:2011-04), che ha titolo “Trasmissione di segnali su reti elettriche a bassa tensione nella gamma di frequenza da 3 a 148,5 kHz”. Precedenti bozze della norma, che si basano su documenti industriali e su norme europee esistenti, utilizzavano i termini di banda A, B, C, D per designare diverse bande di frequenza (per la banda C da 125 kHz a 140 kHz). Sebbene queste designazioni non siano utilizzate nella norma allo stato attuale, esse restano largamente usate per comodità.
Scopo della Norma è quello di limitare l’influenza reciproca tra apparecchiature di trasmissione PLC sulla rete elettrica e tra le stesse ed altre apparecchiature. Inoltre, la Norma ha lo scopo di limitare l’interferenza causata dalle apparecchiature di trasmissione con altre apparecchiature elettroniche sensibili. Tuttavia, non può essere assicurata una completa immunità da tali interferenze.
La norma CEI EN 50065 si applica alle apparecchiature elettriche che utilizzano segnali nella gamma di frequenza da 3 a 148,5 kHz per trasmettere informazioni su reti elettriche a bassa tensione, sia di distribuzione pubblica sia all’interno di edifici ad uso abitativo, commerciale o industriale. Essa specifica le bande di frequenza assegnate alle diverse applicazioni, i limiti di tensione ai terminali dei dispositivi nella banda di funzionamento e i limiti del disturbo condotto e irradiato, fornendo inoltre i metodi di misura con cui accertare le interferenze. La norma non specifica i metodi di modulazione, i metodi di codifica o gli aspetti funzionali (eccetto quelli per la prevenzione della mutua interferenza) ed inoltre in essa non sono incluse le prescrizioni ambientali. La norma in oggetto sostituisce completamente la norma CEI EN 50065-1:2002-07, che è rimasta applicabile fino al 21-03-2014.

1.2 Usi permessi della banda

La norma EN 50065 prescrive che le frequenze comprese in questa banda (da 125 kHz a 140 kHz) devono essere usate esclusivamente per:
a) applicazioni analogiche e digitali all’interno di abitazioni, utenze commerciali o industriali;
b) controllo e monitoraggio di apparecchiature installate o collegate alla rete pubblica di distribuzione elettrica esterna alle utenze.

Esempi tipici di b) sono il controllo dell'illuminazione stradale o la ricarica di veicoli elettrici. La Norma non conferisce alcun diritto a qualsiasi utilizzatore di comunicare in una parte di rete elettrica posseduta da altri.
Le apparecchiature destinate ad essere utilizzate in questa banda di frequenze sono designate come apparecchiature di Classe 122 o di Classe 134. Le apparecchiature di Classe 122 sono adatte all'uso generale, mentre l'utilizzo delle apparecchiature di Classe 134 deve essere riservato solo all'ambito industriale e non dovrebbe essere applicato a luoghi in cui apparecchiature sensibili possano ricevere delle interferenze.
Ai fini delle applicazioni in ambito domestico vanno quindi considerate le apparecchiature di Classe 122, per le quali il livello di uscita (livello massimo di trasmissione) misurato col metodo di cui al paragrafo 6.2.2 della norma (1.6 di questo report) non deve superare 122 dB(μV).
Si deve utilizzare la trasmissione di segnale di modo differenziale. La trasmissione di modo comune sulla rete fissa deve essere utilizzata solo per utenze commerciali o industriali nelle condizioni descritte nell'art. 9 della norma.
La trasmissione nella banda 125KHz-140KHz richiede l'utilizzo del protocollo di accesso descritto nei seguenti paragrafi.

Protocollo di accesso

Un protocollo di accesso multiplo a rivelazione di portante (CSMA/CA, Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) viene prescritto per la banda di frequenze da 125 kHz a 140 kHz per consentire a diversi dispositivi di funzionare sulla stessa rete o su reti collegate elettricamente tra di loro. Questi dispositivi possono quindi utilizzare protocolli di comunicazione anche diversi ma devono utilizzare lo stesso protocollo di accesso. I segnali trasmessi dalle apparecchiature che funzionano in questa banda devono avere una distribuzione spettrale definita e una durata massima tale che la loro portante possa essere rivelata da altri dispositivi su quella rete. La presenza di questo segnale in rete con intensità oltre un livello minimo indica che la banda di frequenze è occupata. Questo stato è denominato "banda in uso". I dispositivi in attesa di trasmissione non possono trasmettere mentre la banda è in uso e finché la banda non è stata liberata per un periodo minimo. Per fornire un accesso multiplo, i dispositivi in attesa di trasmissione devono provare ad effettuare casualmente i loro tentativi di trasmissione per un certo intervallo di tempo per ridurre la possibilità di collisioni tra due o più trasmissioni. L'ultimo dispositivo di trasmissione deve attendere la fine di quell'intervallo di tempo prima di cercare di effettuare un'altra trasmissione. La lunghezza massima di qualsiasi

trasmissione è limitata per impedire che un dispositivo occupi il canale di trasmissione per un tempo troppo lungo.

Condizione di banda in uso

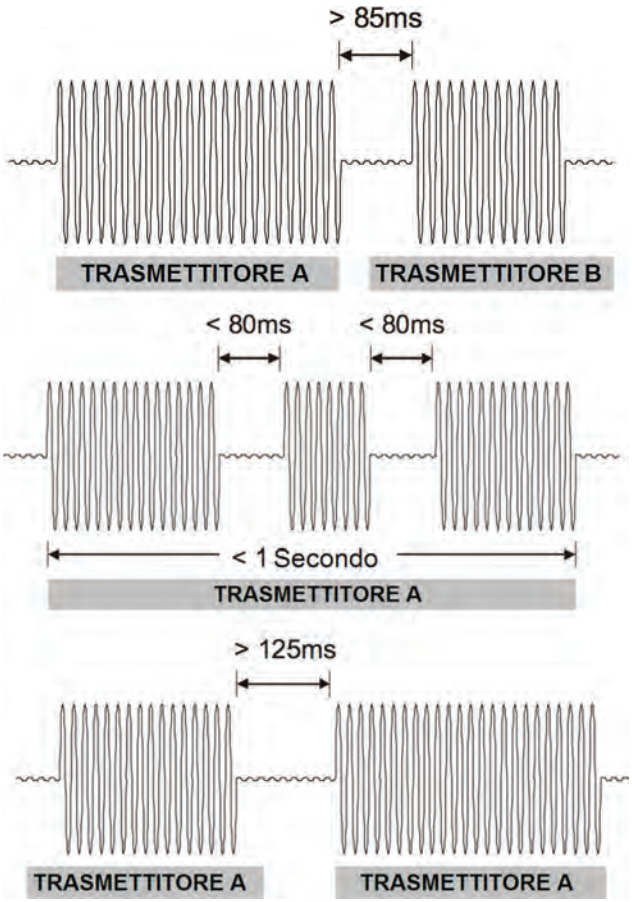
Tutti i dispositivi devono utilizzare la frequenza 132,5 kHz per indicare che una trasmissione è in corso. Per permettere la rivelazione della banda in uso, un dispositivo deve trasmettere il suo segnale con una specifica distribuzione spettrale.
Ogni dispositivo in grado di trasmettere deve essere equipaggiato con un rivelatore di segnale che indichi quando la banda è in uso. Una banda è in uso quando qualsiasi segnale di almeno 86 dB(µV) valore efficace è presente in un punto qualsiasi della gamma di frequenza da 131,5 kHz a 133,5 kHz per almeno 4 ms. Questa misura deve essere effettuata ai terminali di alimentazione del dispositivo e lungo i conduttori utilizzati dal trasmettitore. La capacità di un dispositivo di rivelare questo segnale deve essere sottoposta a specifica prova.
L'indicazione di banda in uso può essere considerata falsa se l'uscita dal rivelatore di segnale è presente senza interruzioni superiori a 80 ms per un periodo continuo di almeno 1,1 s immediatamente prima di ciascuna trasmissione. Per un trasmettitore o un gruppo di trasmettitori la misura di questo intervallo di 1,1 s deve ricominciare dopo la fine della trasmissione da parte di quel trasmettitore o gruppo di trasmettitori. Qualsiasi interruzione nell'indicazione della banda in uso superiore a 80 ms deve ripristinare la condizione di banda in uso falsa.

Uso consentito della banda

Una trasmissione è considerata come una serie di segnali in cui non vi è alcuna interruzione superiore a 80 ms di trasmissione di segnale. Un gruppo di trasmettitori corrisponde a un certo numero di dispositivi che utilizzano lo stesso protocollo e coordinano le loro azioni in modo da soddisfare queste prescrizioni, per es. una sequenza domanda-ricezione-risposta. Nessun trasmettitore o gruppo di trasmettitori deve trasmettere continuamente per un periodo superiore a 1 s. Dopo ciascuna trasmissione, un trasmettitore o gruppo di trasmettitori non deve trasmettere ancora per almeno 125 ms.
Le prescrizioni precedentemente descritte devono essere soddisfatte da ciascun trasmettitore individualmente o, a scelta del fornitore, da un gruppo di trasmettitori. Nel secondo caso, il protocollo d'accesso permette una sequenza di segnali di trasmissione, ripetizione e risposta per occupare la banda per il tempo massimo altrimenti permesso

per un solo messaggio. Ogni dispositivo in grado di trasmettere deve trasmettere solamente se il suo rivelatore di banda in uso ha indicato che la sottobanda non è stata in uso (come precedentemente definito) per un periodo continuo, scelto a caso in ciascuna occasione e distribuito uniformemente tra 85 ms e 115 ms con almeno sette valori possibili in quella gamma.
La figura 1 riporta in sintesi i limiti relativi al protocollo di accesso.

Figura 1
Protocollo di accesso per la banda C.
(Fonte: PL132, Konnex. "Power-Line-Communication using the CENELEC-C-Band." (2003))



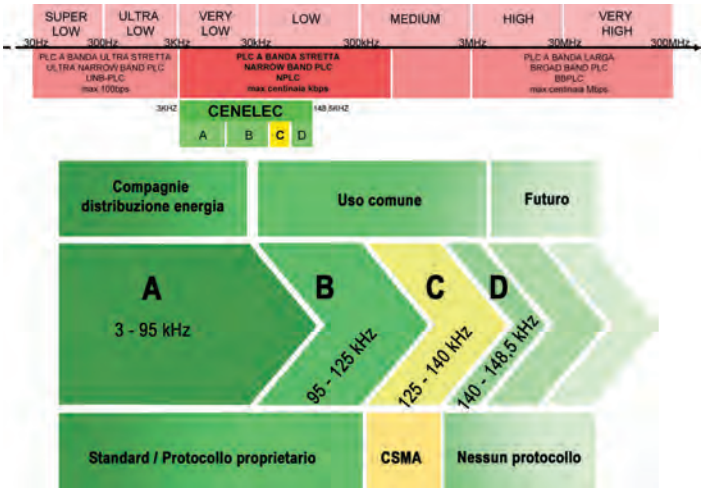
1.3 Larghezza della banda

Riferimento: Norma EN 50065
Banda da 125 kHz a 140 kHz.
La larghezza spettrale di un segnale trasmesso (B in hertz) viene definita dall'ampiezza dell'intervallo di frequenza in cui tutti i livelli sono meno di 20 dB al di sotto della massima linea spettrale.

1.4 Come si posiziona la banda nello spettro PLC

Le comunicazioni PLC possono essere suddivise in tre gruppi, le cosiddette comunicazioni a banda ultra-stretta (UltraNarrowBand, UNB) nell'intervallo 30-3000 Hz, a banda stretta (NarrowBand, NB) nell'intervallo 3-500 KHz, e quelle a banda larga (BroadBand, BB) nell'intervallo 1,8-100 MHz. La banda C appartiene quindi alle cosiddette comunicazioni NB. La figura 2 riporta le denominazioni tipicamente utilizzate delle diverse bande di frequenza su tutto lo spettro PLC, e la suddivisione della banda CENELEC.

Figura 2
Denominazioni dello spettro PLC e Suddivisione delle frequenze nella Banda CENELEC.



1.5 Caratterizzazione delle eventuali bande di guardia fra la banda C e le bande adiacenti

La larghezza spettrale del segnale trasmesso (B in hertz) viene definita dall'ampiezza dell'intervallo di frequenza in cui tutti i livelli sono meno di 20 dB al di sotto della massima linea spettrale. Nello Standard EN 50065 non sono specificate bande di guardia tra le sottobande 95-125 (ex banda B), 125- 140 (ex banda C), 140-148,5 (ex banda D).

1.6 Vincoli di potenza sull'uso della banda C

Metodo di determinazione del livello di uscita

La EN 50065 prescrive che il livello di uscita venga misurato per un periodo di 1 min utilizzando un rivelatore di picco. Tale misura può essere effettuata con un analizzatore di spettro con una banda passante uguale o superiore alla larghezza di banda spettrale B di uscita del trasmettitore. Per i dispositivi monofase, la misura deve essere effettuata sulla connessione di fase o di neutro. Per i dispositivi trifase che trasmettono solo su una singola fase, le misure devono essere effettuate su quella fase e sulla connessione di neutro. Per i dispositivi trifase che trasmettono contemporaneamente su tutte le tre fasi, le misure devono essere effettuate su tutte tre le fasi. Nessuna misura è richiesta sul conduttore di neutro.

Dispositivi monofase

Apparecchiatura di Classe 122: Il livello di uscita misurato col metodo di cui sopra non deve superare 122 dB(µV)

Apparecchiatura di Classe 134: Il livello di uscita misurato col metodo di cui sopra non deve superare 134 dB(µV).

Dispositivi trifase che trasmettono contemporaneamente tra neutro e tutte le fasi

Apparecchiatura di Classe 122: Il livello di uscita misurato in qualsiasi fase, secondo il metodo di cui sopra, non deve superare 116 dB(µV).

Apparecchiatura di Classe 134: Il livello di uscita misurato in qualsiasi fase, secondo il metodo di cui sopra, non deve superare 128 dB(µV).

Dispositivi trifase che trasmettono simultaneamente tra le fasi e senza collegamento al neutro

Apparecchiatura di Classe 122: Il livello di uscita misurato in qualsiasi fase, secondo il metodo di cui sopra, non deve superare 122 dB(µV).

Apparecchiatura di Classe 134: Il livello di uscita misurato in qualsiasi fase, secondo il metodo di cui sopra, non deve superare 134 dB(µV).

Dispositivi trifase che trasmettono su una sola fase

Quando le istruzioni del fornitore indicano che il dispositivo trifase può essere utilizzato anche come dispositivo monofase collegando tutti i terminali di fase alla stessa fase, il dispositivo deve essere provato anche come dispositivo monofase. Ciò si verifica perché la prestazione del dispositivo può variare in funzione delle condizioni di carico tra l'utilizzo trifase e monofase.

1.7 Consumi di un modem in banda C

Le caratteristiche di targa dei modem che trasmettono esclusivamente in banda C riportano consumi della componente elettronica a valle della alimentazione DC, compresi tipicamente tra 1,5W e 2,5W, con correnti assorbite, lato DC, tra 150mA e 250mA, e tensione di alimentazione di 10V. Le basse potenze in gioco permettono un design dell'alimentatore a basso costo, in molti casi costituito da una prima conversione AC/DC, tipicamente verso 10Vdc (e correnti di targa tra 200mA e 400mA), e successivo stadio di regolazione lineare della tensione a 5Vdc per l'alimentazione della componente di elettronica digitale. Il solo regolatore di tensione ha consumi massimi tipici tra 1W e 1.5W. Il consumo complessivo è quindi funzione della efficienza dell'alimentatore, che per queste potenze è comunemente basso (60% e 70%). I consumi massimi si attestano quindi sotto ai 4W. Alcuni modem sono progettati per trasmettere su tutte le bande CENELEC, ed in questo caso le potenze di targa possono anche raddoppiare rispetto a modem in sola Banda C

Le potenze suddette rappresentano potenze massime dissipabili continuamente, che si raggiungono solitamente durante la modalità di trasmissione. In modalità di ricezione e di ascolto (test della occupazione del canale) le potenze assorbite sono minori.

Il modem ST7540, che rappresenta una soluzione recente di ST, riporta un consumo di 5mA in modalità di ricezione e di 60mA in modalità di trasmissione, con tensione di alimentazione di 9V e alimentazione digitale esterna. Considerando un consumo tipico del regolatore di tensione di 1W, si ottiene una figura di consumo massimo intorno ai 2W.

La potenza media associabile ad un duty cycle di trasmissione ammissible in banda C si può stimare considerando ad esempio la trasmissione di un pacchetto di durata 100 ms ogni secondo ed un'impedenza di linea di 2 ohm, da cui il consumo medio risulta attorno a 0.4-0.5 W.

I modem fin qui menzionati utilizzano una modulazione FSK a singola portante, e tra questi il modem ST7540, è in grado di operare separatamente, ma non contemporaneamente, sulle bande CENELEC A, B e C.

Recentemente i costruttori, ad esempio ST e Maxim, hanno proposto soluzioni che utilizzano modulazioni multiportante, ottenendo migliori prestazioni a parità di consumo di potenza. Per esempio Il modem MAX2990 di Maxim riporta un valore massimo di dissipazione continua di potenza di 1905mW, mentre il modem STCOMET si hanno valori di consumo di potenza simili al modem ST7540.
Questi modem sono in grado di operare in OFDM su un range di frequenze da 9kHz a 500kHz, e quindi possono operare su tutte le bande CENELEC.

Al seguente indirizzo è possibile reperire maggiori informazioni sulle soluzioni di ST: http://www.emcu.it/PLM/PLM.html.

1.8 Rapporto segnale - rumore

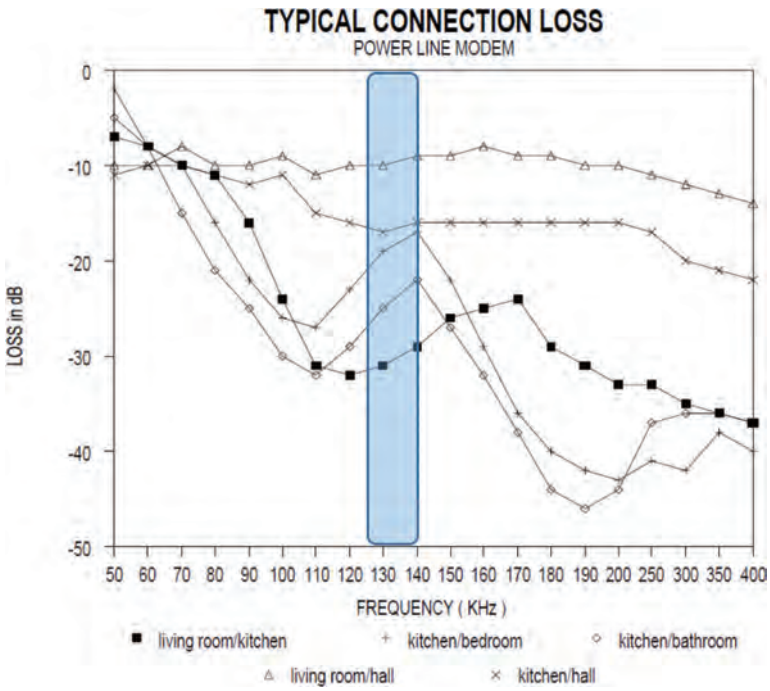
Attenuazioni tipiche

E' ben noto che la rete elettrica rappresenta un canale particolarmente ostile per la trasmissione di segnali in quanto fortemente attenuante, selettivo in frequenza e tempo-variante. Tuttavia è possibile reperire in bibliografia [1-9] una quantità di misurazioni, effettuate in ambiti anche diversi, che consente di potersi riferire ad attenuazioni "tipiche" con un supporto statistico adeguato. In particolare la risposta in frequenza nella banda C in ambiente residenziale presenta attenuazioni tipiche comprese tra -10 e -30 dB, a seconda della distanza tra trasmettitore e ricevitore e della presenza di nodi elettrici nel percorso del segnale tra trasmettitore e ricevitore.

Figura 3

Misurazioni di risposte in frequenza del canale PLC di una abitazione nella banda CENELEC, per diverse posizioni dei modem. In evidenza la banda C.

(Fonte: Huloux, Joël, and Laurent Hanus. "ST7537 power line modem application." ST Microelectronics.)



Da campagne di misura della risposta in frequenza nelle bande CENELEC in ambienti residenziali è possibile identificare due famiglie di curve per le attenuazioni, limitatamente alla banda C, una compresa tra -10dB e -15dB, ed un'altra tra -20dB e -30 dB. L'analisi della topologia di rete usata come canale PLC permette di osservare che la prima famiglia di curve, tra -10dB e -15dB corrisponde in genere a canali PLC che non attraversano il quadro principale nel percorso del segnale tra trasmettitore e ricevitore. Mentre la seconda famiglia, con attenuazioni maggiori tra -20dB e -30dB, in genere corrispondono a canali PLC che includono il quadro di servizio nel percorso diretto del segnale tra trasmettitore e ricevitore. Nel caso di comunicazione tra contatore elettrico e dispositivi riceventi in un impianto domestico, qualora il canale di trasmissione preveda un percorso che include un quadro elettrico, sulla base dei dati riportati precedentemente si può assumere che le attenuazioni tipiche risultino comprese tra -20dB e -30dB.
La figura 3 mostra alcune misurazioni del modulo della risposta in frequenza del canale PLC di una abitazione nella banda CENELEC, per diverse posizioni dei modem. Questo particolare esempio mostra caratteristiche tipiche del canale, in termini di attenuazioni massime e minime, riscontrate da molte campagne di misura reperibili in letteratura [1-9], e quindi possono essere considerate statisticamente rilevanti. Da queste campagne è possibile osservare che la variazione della attenuazione in funzione della frequenza all'interno dei 15 kHz della banda C per una singola risposta in frequenza è in genere lenta, e può in alcuni casi mostrare variazioni massime comunque minori di 10 dB. Non ha rilevanza statistica la presenza di notch (attenuazioni oltre i 40dB) all'interno della banda C.

01

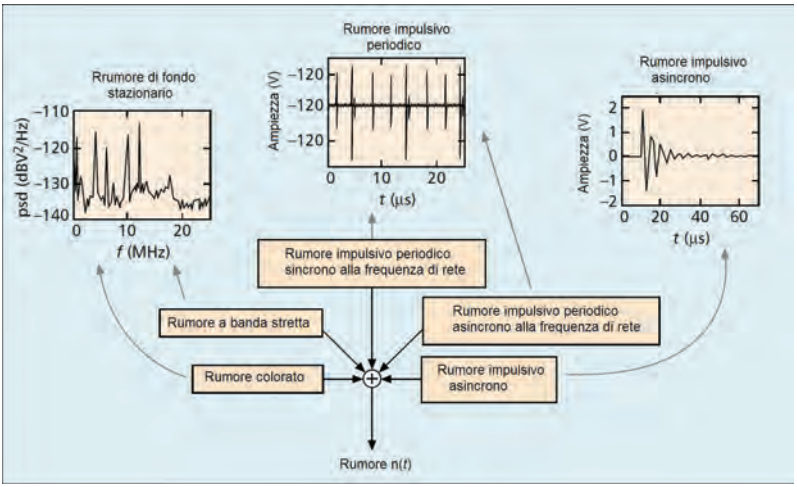
Rumore

Una classificazione dettagliata per la descrizione del rumore nell'ambito delle PLC è quella indicata in [10] in cui si identificano 5 categorie, come mostrato in figura 4:

1. Rumore di fondo colorato (Background Noise) con una densità spettrale di potenza (PSD) in media relativamente bassa e andamento variabile nel tempo.
2. Rumore a banda stretta (Narrowband Noise).
3. Rumore periodico asincrono alla frequenza di rete (Periodic Impulsive Noise Asynchronous to the mains) rispetto alla frequenza di rete: di tipo impulsivo e/o ciclostazionario, con ripetizioni tra 50 e 200 kHz.

Figura 4

Classificazione del rumore nell'ambito delle PLC. (Fonte: Gotz, Matthias, Manuel Rapp, and Klaus Dostert. "Power line channel characteristics and their effect on communication system design." IEEE Communications Magazine 42.4 (2004): 78-86)



4. Rumore periodico sincrono alla frequenza di rete (Periodic Impulsive Noise Synchronous to the mains) rispetto alla frequenza di rete: di tipo impulsivo e/o ciclostazionario con periodicità degli impulsi a frequenza di 50 o 100 Hz (in Europa).

5. Rumore impulsivo asincrono (Asyncronous Impulsive Noise).
Il Background Noise è caratterizzato da una PSD abbastanza bassa che tipicamente è più alta alle frequenze inferiori e decade come l'inverso della frequenza. È tipicamente prodotto dagli apparecchi domestici comuni come PC, dimmer, asciugacapelli etc. etc. che possono causare disturbi nella gamma di frequenza fino a 30 MHz. Il Narrowband Noise è composto normalmente da sinusoidi modulate in ampiezza, come ad esempio quelle dovute ad accoppiamenti con segnali radio trasmessi nella gamma di frequenza di 1-22 MHz. Il Periodic Impulsive Noise può essere sincrono o asincrono rispetto alla frequenza di rete ed ha un andamento ciclostazionario, ovvero mostra una ripetitività, sia nel tempo che in frequenza, che coincide (sincrono) o è legata (asincrono) al periodo o al semiperiodo della frequenza di rete. Quello sincrono è causate principalmente da raddrizzatori all'interno di alimentatori DC, elettrodomestici e regolatori di luminosità. Generalmente si osservano frequenze di ripetizione degli impulsi multiple della frequenza di rete (Ciclo-stationary Noise). Quello asincrono esibisce frequenze di ripetizione nell'intervallo 50-200 kHz ed è principalmente dovuto all'azione prolungata di alimentatori switching molto diffusi in vari domestici elettrodomestici odierni. L'Asyncronous Impulsive Noise è causata principalmente da transitori di commutazione che possono verificarsi in rete ad intervalli irregolari.

Sulla base di diverse pubblicazioni si può ritenere che le componenti dominanti di rumore per le NB-PLC sono quelle correlate ai punti 3 e 4 prima elencati [11-12]. E' convinzione diffusa [13] che i dispositivi di regolazione dei punti luminosi siano tra le fonti più significative di disturbi impulsivi. Ad esempio quando una lampada è impostata su una luminosità media la corrente di spunto è massima e impulsi di diversi decine di volt sono prodotti con frequenza doppia rispetto a quella di rete. Un'altra fonte tra le più diffuse di rumore sono gli alimentatori a commutazione, presenti in numerosi dispositivi elettronici come ad esempio i PC, in cui la frequenza fondamentale dei disturbi iniettati in rete è distribuita nell'intervallo 20kHz-1MHz con una banda tipicamente ricca di armoniche della frequenza di commutazione. Un'altra tipologia sono le interferenze prodotte da trasmissioni radiofoniche. Il cablaggio della rete di distribuzione agisce come un'antenna di captazione dei segnali radio ed interferenze dell'ordine di un volt picco-picco non sono rare. Infine una sorgente di rumore impulsivo diffusa è quella prodotta da una varietà di motori a corrente alternata. Questi tipi di motore si trovano in dispositivi come aspirapolveri, rasoi elettrici, apparecchiature per cucina ed elettrodomestici comuni e producono

impulsi a tassi di ripetizione in una ampia gamma di KHz.
Un quadro generale dell'evoluzione del rumore come di altre caratteristiche delle comunicazioni NarrowBand PLC si può reperire in [14-15] e nella loro bibliografia.

Misure di rumore prodotto da singole apparecchiature (regolatori di luminosità, motori universali, PC, etc) sono reperibili in bibliografia su bande diverse dalla Banda C (in alcuni casi anche vicine ad essa). Nei dati reperibili nelle diverse pubblicazioni la strumentazione utilizzata e i metodi di misura non sempre sono illustrati in modo esauriente per rendere confrontabili unità di misura diverse (tensioni o potenza). Misure di rumore effettuate su reti domestiche in cui agiscono casualmente diversi tipi di apparecchiature sono reperibili in relazione a reti di distribuzione di paesi con caratteristiche topologiche, di frequenza e di modalità distributive diverse tra loro come Cina [16], Brasile [17], USA [9, 18,20-22], Germania [19,23], Francia [5], Tunisia [24-25], Svezia [26], Giappone [27] e Italia [28]. Non è stato invece reperito in bibliografia alcun dato di rumore, in banda C, rilevato su reti di distribuzione in Italia.

Su queste basi non è quindi praticabile trarre conclusioni che abbiano un supporto statistico adeguato.

Le considerazioni seguenti fanno riferimento ad un segnale trasmesso con la massima potenza ammissibile dalla norma EN 50065-1 in banda C. La Norma specifica il livello tensione di trasmissione come non superiore a 122dB(μV) (dispositivi monofase, dispositivi trifase con trasmissione su una sola fase o senza collegamento al neutro), e 116dB(μV) (dispositivi trifase con trasmissione simultanea tra tutte le tre fasi e il neutro). Le caratteristiche comuni che si possono estrapolare dai dati disponibili possono indurre a presumere che i rumori prodotti dall'attivazione di gruppi di apparecchiature riescano, in casi sfavorevoli in cui il ricevitore è vicino ai dispositivi che emettono rumore ma lontano dal trasmettitore, anche a rendere il rapporto S/N in banda C, significativamente minore di 0 dB e quindi compromettere la trasmissione del segnale, almeno per i periodi di tempo corrispondenti al funzionamento di queste apparecchiature, ipotizzabili anche di qualche ora per i regolatori di luminosità o PC. Mentre è presumibile far corrispondere il rapporto segnale rumore dovuto a fenomeni stazionari di rumore a valori non inferiore ai 60 dB e quindi considerarlo molto favorevole ad una corretta trasmissione di segnali specialmente con i metodi di modulazione multi-portante oggi esistenti (i cosiddetti metodi OFDM). Misure del livello tipico del rumore di fondo variano

molto in letteratura, anche di decine di decibel, per esempio [2] riporta valori di circa 50 dB(μV) in Francia, mentre [19] riporta valori intorno a 20 dB(μV) [32] di 40 dB(μV), entrambi in Germania.

Nota: il livello di tensione del segnale PLC a valle dell'attenuazione del canale è determinabile sommando l'attenuazione del canale espressa in dB al livello di tensione di trasmissione espresso in dB(μV). Ad esempio se la trasmissione è effettuata ad un livello di 122dB(μV) su un canale con -22 dB di attenuazione, al ricevitore il segnale di comunicazione sarà ad un livello di 100dB(μV).

1.9 Vincoli di emissione su altre bande e di interferenza da altre bande

Il capitolo 7 della norma CEI EN 50065 prescrive i limiti di disturbo, condotto e irradiato, applicati a frequenze esterne alla sottobanda in cui le apparecchiature di trasmissione dei segnali funzionano. Le apparecchiature che trasmettono in banda C devono quindi rispettare i limiti di disturbo fuori banda sotto riportati, relativi a disturbi condotti per frequenze da 3kHz a 30 MHz, e a disturbi irradiati per frequenze da 30 MHz a 1000 MHz

Disturbi condotti, gamma frequenza da 3kHz a 30 MHz.

Gamma di frequenza da 3 kHz a 9 kHz

Non superiore a un valore di picco di 89 dB(μV). Se la lettura sul ricevitore di misura mostra oscillazioni vicine al limite, la lettura deve essere osservata per almeno 15 s su ciascuna frequenza di misura cui tali oscillazioni sono state osservate; le letture più elevate devono essere registrate ad eccezione di sporadiche brevi letture, di alto livello, che devono essere ignorate.

Gamma di frequenza da 9 kHz a 150 kHz

Diminuisce linearmente con il logaritmo della frequenza da 89 a 66 dB(μV) inteso come valore di quasi picco. Se la lettura sul ricevitore di misura mostra oscillazioni vicino al valore limite, la lettura deve essere osservata per almeno 15 s su ciascuna frequenza di misura in cui sono state osservate le oscillazioni; si deve registrare la lettura più alta con l'eccezione di sporadiche brevi letture di alto livello che devono essere ignorate.

Gamma di frequenza da 0,15 MHz a 30 MHz

I limiti in questa banda sono descritti nella tabella sottostante. nella gamma da 0,15 MHz a 0,50 MHz il limite diminuisce linearmente con il logaritmo della frequenza tra i valori estremi indicati in tabella

Tabella 1

Limiti sui disturbi condotti fuori banda nella gamma di frequenza da 0,15 MHz a 30 MHz (Fonte: norma CEI EN50065-1)

Gamma di frequenza MHz	Limiti dB(µV)	
	Quasi-picco	Valore medio
da 0,15 a 0,50	da 66 a 56	da 56 a 46
da 0,50 a 5	56	46
da 5 a 30	60	50

La figura 5 riassume i limiti imposti per disturbi condotti nella gamma di frequenza da 3KHz a 30MHz.

Limiti dell'intensità di campo del disturbo irradiato, gamma di frequenza da 30 MHz a 1000 MHz

Il metodo di misura deve essere quello descritto nella norma EN 55016-1-4. L'unità in prova deve soddisfare i limiti della tabella 2, che riporta limiti dell'intensità di campo del disturbo irradiato nella gamma di frequenza da 30 MHz a 1000 MHz ad una distanza di prova di 10 m. Se la lettura del ricevitore di misura mostra oscillazioni vicine al limite, la lettura deve essere osservata per almeno 15 s ad ogni frequenza di misura; si deve registrare la lettura più alta con l'eccezione di sporadiche brevi letture di alto livello che devono essere ignorate.

Figura 5

limiti di disturbo condotto da 3kHz a 30 MHz. (Fonte: norma CEI EN50065-1)

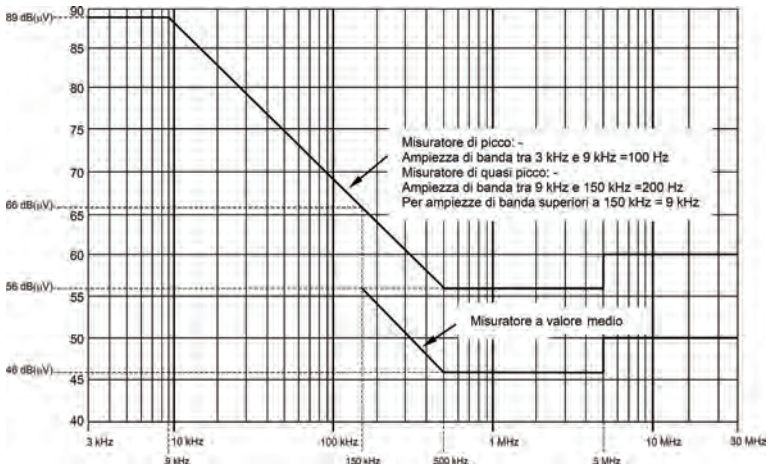


Tabella 2

Limiti dell'intensità di campo del disturbo irradiato nella gamma di frequenza da 30 MHz a 1000 MHz ad una distanza di prova di 10 m (Fonte: norma CEI EN50065-1)

Gamma di frequenza MHz	Limiti di quasi picco dB(µV)
da 30 a 230	30
da 230 a 1000	37

In alternativa alla misura dell'intensità di campo irradiato, si può misurare direttamente la potenza di disturbo utilizzando una pinza ad assorbimento. Il metodo viene descritto nell'Allegato D della norma 50065. La potenza non deve superare i valori indicati nella tabella 3. In caso di controversia, si deve fare riferimento all'intensità di campo del disturbo irradiato e quindi ai limiti riportati nella tabella 2.

Tabella 3
Limiti della potenza di disturbo (Fonte: norma CEI EN50065-1)

Gamma di frequenza MHz	Valore di quasi picco dB(pW)	Valore medio dB(pW)
da 30 a 300	45 – 55 (linearmente)	35 – 45 (linearmente)
da 300 a 1 000	55	45

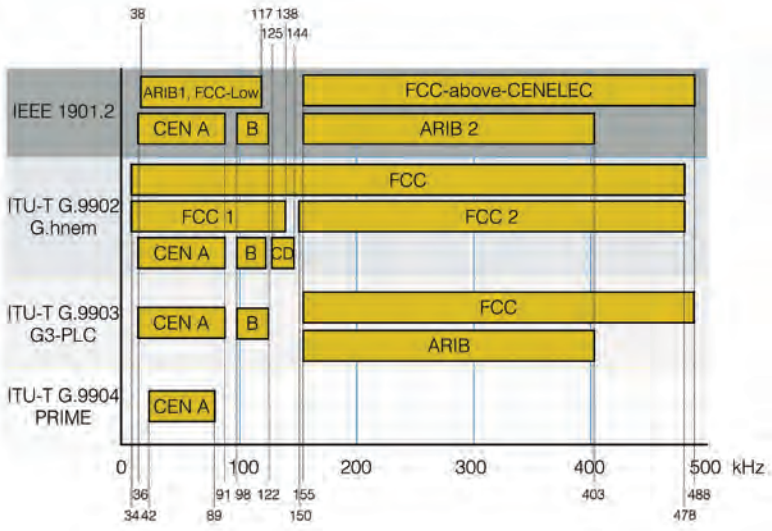
1.10 Norme e standard che portano eventuali altri vincoli e requisiti sull'uso di questa banda

Il sempre più crescente interesse nella disponibilità di servizi "intelligenti" nella rete di distribuzione ha determinato una notevole attività di standardizzazione per i dispositivi industriali operanti nell'ambito delle NB PLC, inclusa anche la banda C. Questi standard sostanzialmente precisano metodiche per la trasmissione di segnali PLC che soddisfino i requisiti previsti per fornire servizi appetibili per il mercato, tramite apparecchiature commerciali o in via di sviluppo. I primi standards per NB-PLC sono stati definiti a livello industriale, come ad esempio PRIME (Powerline Related Intelligent Metering Evolution), sviluppato da PRIME Alliance a partire dal 2008, G3-PLC, sviluppato da G3-PLC Alliance a partire dal 2009 e SMITP (Smart Metering Information and Telecommunication Protocols) sviluppato dalla Meters and More Association. Successivamente le più importanti associazioni internazionali di settore, che riuniscono enti di ricerca, professionisti ed industrie, hanno prodotto propri standards per mettere a disposizione dei costruttori una metodica di riferimento per garantire le prestazioni richieste per la diffusione dei prodotti nel mercato, soddisfare le normative vigenti e rendere interoperabili tutti i dispositivi che usano la tecnologia PLC, in modo da rimuovere i principali vincoli per l'espan-

sione di questo mercato. La IEEE ha sviluppato lo standard 1901.2 basato su G3-PLC, mentre ITU-T ha in momenti successivi pubblicato tre versioni di un suo standard G.9902-9903-9904 che in fasi successive ha inglobato PRIME, G3-PLC e la nuova tecnologia G.hnem. I due standard includono specifici protocolli di coesistenza che rendono interoperabili dispositivi che adottano i due diversi standard e rispettano le normative vigenti in ambito Europeo, Nord-Americano (FCC) e Giapponese (ARIB).

Utilizzo dello spettro a banda stretta da parte dei principali standard.

(Fonte: Cristina Cano; Alberto Pittolo; David Malone; Lutz Lampe; Andrea M. Tonello; Anand Dabak: "State-of-the-art in Power Line Communications: from the Applications to the Medium" IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016)



In figura è riportato uno schema dell'utilizzo previsto dello spettro in banda stretta fino a 500KHz. La banda FCC (Federal Communications Commission) è definita da standard nord americani e si estende fino a 500KHz. Lo standard PRIME è stato sviluppato per operare nella banda CENELEC A per operazioni di metering, ed è stato recentemente esteso per le frequenze superiori alla banda CENELEC, quindi PRIME non considera la trasmissione in banda C. Lo stesso per quanto riguarda gli standard G3-PLC e IEEE 1901.2: questi standard prevedono l'utilizzo di bande inferiori e superiori alla banda C di CENELEC.

Alcuni costruttori, tra cui ad esempio MAXIM, hanno introdotto nello standard G3-PLC specifiche supplementari per l'utilizzo delle bande C e D [33]. Lo standard G.hnem prevede l'utilizzo delle frequenze della banda C e per poter utilizzare queste frequenze in Europa rispetta la norma EN 50065-1. La tabella sottostante riassume le principali caratteristiche degli standard PRIME, G3-PLC e IEEE 1901.2. La soluzione Meters & More è una evoluzione del sistema Telegestore che utilizza una modulazione BPSK a singola portante, con bitrate massimo di 9600 bit/sec per la modulazione BPSK uncoded e di 4800 bit/sec con modulazione BPSK coded. In seguito sono riportati i parametri del livello fisico del sistema Meters & More, mentre un confronto tra Meters & More e lo standard IEEE 1901.2 è riportato in [31]

Per completezza in seguito si riportano alcuni dettagli tecnici relativi alla comunicazione in bande CENELEC ed in banda FCC per gli standard suddetti.

Confronto tra gli standard per comunicazioni PLC in banda stretta.

(Fonte: Galli, Stefano, and Thierry Lys. "Next generation narrowband (under 500 kHz) power line communications (PLC) standards." China Communications 12.3 (2015): 1-8)

	ITU-T G.9904 (PRIME)	ITU-T G.9903 (G3-PLC)	IEEE 1901.2
Bandplans supported	CENELEC A	CENELEC A, CENELEC B, ARIB, FCC	CENELEC A, CENELEC B, ARIB, FCC
Normative specifications	PHY MAC Convergence Layer (with IPv4/ IPv6/ IEC 61334-4-32)	PHY MAC (802.15.4-based) Layer 2 routing (LOADng) Adaptation layer (6loWPAN)	PHY MAC (802.15.4-based)
Supported Network Layer	IEC61334-4-32, IPv4 or IPv6	IPv6	IPv6
Data Rate at IP Layer (including FEC)	▪up to 61.4 kbps for CENELEC A	▪up to 46 kbps for CENELEC A ▪up to 234 kbps for FCC	▪up to 46 kbps for CENELEC A ▪up to 234 kbps for FCC
Modulations supported	▪DBPSK, DQPSK, D8PSK	▪DBPSK, DQPSK, D8PSK ▪BSPK, QPSK, 8PSK and 16QAM	▪DBPSK, DQPSK, D8PSK ▪BSPK, QPSK, 8PSK and 16QAM
Robustness (mechanisms in duty before link fails)	▪Convolutional Code (may be deactivated) ▪End to End or hop-by-hop Acknowledgement	▪Convolutional Code ▪Reed-Solomon Code ▪Repetition Code (x4) ▪Adaptive Modulation ▪Hop by hop Acknowledgement	▪Convolutional Code ▪Reed-Solomon Code ▪Repetition Code (x4 and x6) ▪Adaptive Modulation ▪Hop by hop Acknowledgement
Security supported	▪Access control and authentication based on pre-shared key (PSK) and AES-128	▪MAC Layer Ciphering (CCM*) ▪Access control and authentication: Extensible Authentication Protocol (EAP-PSK) ▪Key distribution protocol ▪Anti-replay protection	▪MAC Layer Ciphering (all mechanism of 802.15.4)
Certification	Provided by PRIME Alliance: Available at test labs: DNV GL, Teenalia and ITE (only for service node)	Provided by G3-PLC Alliance: Available at test labs: LAN (France) and TUV (Japan)	Not available
Certified solutions	Atmel, Hitrend, Indra, Phoenix Systems, Renesas, STMicroelectronics, Texas Instruments, Semitech Available at prime-alliance.org[5]	Renesas, Texas Instruments, STMicroelectronics, Maxim Integrated, Atmel Available at g3-plc.com[6]	

CENELEC A

PRIME CENELEC A (ITU-T G.9955/6)

- Operates over 42–89 kHz (Cenelec A)
- OFDM with:
  - 97 active carriers (1 pilot), 512-IFFT size, 488.3 Hz spacing
  - OFDM symbol duration: 2240 us
  - Guard interval: 192 us
  - Bits per carrier: 1, 2, 3
  - No windowing
- No robust mode
- Differential encoding, (across the subcarriers)
- FEC: convolutional encoding (optional)
- Interleaving per OFDM symbol
- Variable number of OFDM symbols per PHY frame, up to 63
- Max “net” PHY frame data rate:
  - 122.9 kbps (FEC off)
  - 61.4 kbps (FEC on)

G3-PLC CENELEC A (ITU-T G.9955/6)

- Operates over: 35.9–90.6 kHz (Cenelec A)
- OFDM with:
  - 36 active carriers, 256-IFFT size, 1.5625 kHz spacing
  - OFDM symbol duration: 695 us
  - Guard interval: 55 us
  - Bits per carrier: 1, 2, 3
  - Windowing: 8 samples
- Three robust modes (with repetitions)
- Classical differential encoding (over time)
- FEC: concatenated convolutional and RS (mandatory)
- Interleaving over the whole packet
- Single RS codeword per PHY frame
- Max “net” PHY frame data rate: 46 kbps

01

FCC

G3-PLC FCC (ITU-T G.9955/6)

- Operates over 159.4–478.1 kHz (FCC)
- OFDM with:
  - 72 active carriers, 256-IFFT size, 4.6875 kHz spacing
  - OFDM symbol duration: 231.7 us
  - Guard interval: 18.3 us
  - Bits per carrier: 1, 2, 3
  - Windowing: 8 samples
- Robust modes (with repetitions)
- Classical differential encoding (over time)
- FEC: concatenated convolutional and RS (mandatory)
- Interleaving over the whole packet
- Single RS codeword per PHY frame
- Max “net” PHY frame data rate: 207.6 kbps

G.hnem FCC (ITU-T G.9955/6)t

- Operates over: 34.4–478.1 kHz (FCC)
- OFDM with:
  - 145 active carriers (12 pilots), 256-IFFT size, 3.125 kH spacing
  - OFDM symbol duration: 380 us
  - Two guard intervals: 30 us, 60 us
  - Bits per carrier: 1, 2, 3, 4
  - Windowing: 16 samples
- Robust modes (with repetitions)
- Coherent demodulation solution
- FEC: concatenated convolutional and RS (mandatory)
- Two interleaving modes: over fragment, over AC cycle
- Multiple RS codewords per PHY frame
- Max “net” PHY frame data rate: 821.1 kbps

METERS & MORE

- Spectrum range (kHz) 3 – 95
- Minimum frequency carrier (kHz) 9
- Maximum frequency carrier (kHz) 250
- Maximum central frequency (kHz) 249.999
- Maximum frequency difference (kHz) 38.461
- Modulation mode BPSK in time – single carrier
- Symbol rate (baud) 9600
- Information bits per symbol 1
- Bit rate (bps) 9600
- BPSK coded – bit rate (bps) 4800
- BPSK coded PNA – bit rate (bps) 2400
- Number of bytes in Preamble NPRE From 2 up to 5

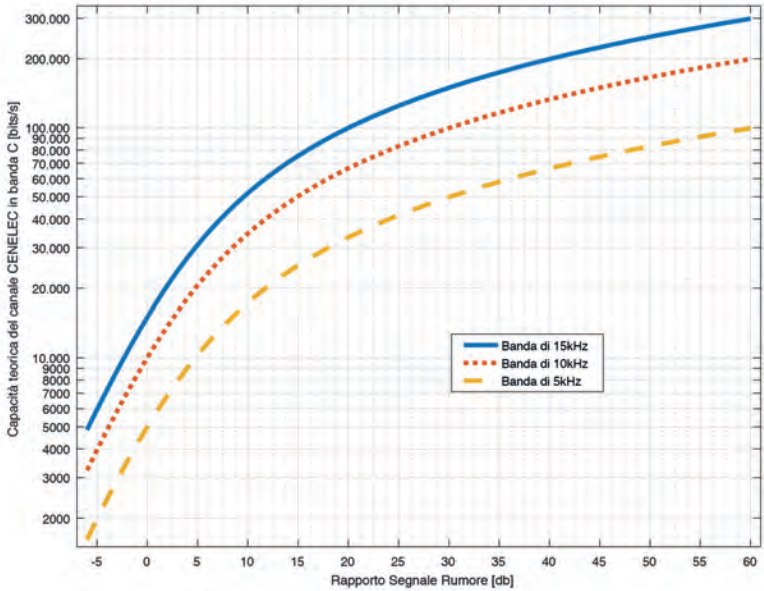
02

2. Prestazioni teoriche potenziali della banda C

La banda C ha una estensione di 15 kHz, da 125 kHz a 140 kHz. La capacità teorica della banda C in funzione del rapporto segnale rumore è mostrata in figura 6 ed è normalmente [1], [2], [12], determinata attraverso il teorema di Shannon–Hartley:

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

Figura 6
Capacità teorica del canale CENELEC in banda C, in funzione del rapporto segnale rumore



Dove S rappresenta la potenza media sulla banda del segnale in ricezione, N la potenza media sulla banda del rumore additivo in ricezione, B la banda del canale in Hz e C indica la capacità teorica del canale in bit per secondo. Per il calcolo della capacità si assume per semplicità un rumore additivo gaussiano bianco (canale AWGN) e quindi un rapporto segnale rumore costante nella banda. Il limite massimo indicato dalla capacità teorica del canale è spesso una stima sovrabbondante, raggiungibile comunque in molti casi all'80% da moderne tecniche di

modulazione multi-portante, come ad esempio la modulazione OFDM. La scelta della scala -6-60 dB per il rapporto segnale rumore è basata sulle considerazioni fatte nel paragrafo 1.8 e contempla l'intervallo SNR più probabile sulla base dei dati reperiti in bibliografia. In generale, come descritto nei paragrafi precedenti, il rumore sulle PLC è tempo-variante, in quanto dipende da eventuali disturbi che, nel caso in cui la fonte di rumore sia vicina al ricevitore, possono essere, per periodi anche di qualche ora (ad esempio in presenza di regolatori di luminosità e/o PC), anche 50dB superiori al rumore di fondo. Considerando lo scenario di attenuazione media del canale nel caso peggiore mediamente il valore di SNR si porta attorno a valori intorno a SNR=40dB, Nei periodi in cui si accendono dispositivi domestici che introducono rumore nella rete elettrica, come quelli che utilizzano i cosiddetti regolatori switching (regolatori di luminosità, aspirapolveri etc.) o i PC, il rapporto segnale rumore può diminuire e, se questi dispositivi sono particolarmente rumorosi e collocati vicino al dispositivo ricevente PLC, estrapolando i dati reperiti in bibliografia nei casi peggiori si potrebbe anche arrivare a valori SNR sotto lo 0dB (per periodi che possono essere anche di alcune ore a seconda dei dispositivi impiegati PC, regolatori di luminosità etc).

In figura 6 sono mostrate tre curve relative ad un utilizzo completo o parziale della banda, considerando tre valori di B: 15 kHz, 10 kHz, 5kHz. Osservando la curva relativa alla banda di 15kHz le capacità teoriche (relative ad un rumore gaussiano bianco) variano tra circa 5 kbit/s, per SNR di-6dB (caso peggiore) e circa 300kbit/s per SNR di 60dB (caso migliore). Nel caso di attenuazione media massima (-30dB) e valori tipici di rumore di fondo stazionario, e quindi per SNR di 40dB, la capacità teorica di un canale di 15kHz è di 200Kbit/sec, che si riducono a circa 60Kbit/sec per una banda di 5KHz.

La maggior parte dei modem attualmente in commercio per la trasmissione in banda C non sfrutta tutta la banda disponibile, infatti una soluzione molto diffusa per la trasmissione in banda C prevede l'utilizzo di una modulazione FSK, utilizzando due frequenze intorno alla frequenza centrale di 132.5 kHz, frequenza alla quale il protocollo di accesso CMSA richiede al trasmettitore di verificare preliminarmente l'occupazione del canale. L'utilizzo della modulazione FSK permette una comunicazione abbastanza robusta al rispetto ad un rumore bianco e la realizzazione di modem a basso costo. La soluzione Meters&-More utilizza la modulazione BPSK con occupazione di banda di circa 10KHz in banda C. Il modem ST7540 utilizza la trasmissione FSK e

può di volta in volta operare su più bande CENELEC (A, B e C), così come il modem NCN49597. Recentemente alcuni produttori hanno introdotto nel mercato modem che possono trasmettere anche su tutte le bande CENELEC utilizzando la modulazione OFDM (ad esempio il modem MAX2990 di Maxim o il modem STCOMET di ST)

2.1 Bitrate

La capacità teorica della banda esprime un limite massimo lontano dai bitrate tipici della maggior parte dei modem disponibili in commercio. I modem basati su trasmissione FSK hanno tipicamente una bitrate massimo di 4800 o minore. Ad esempio il modem ST7540, che utilizza una modulazione FSK, dichiara un bitrate di 4800 che viene ottenuto utilizzando una deviazione di Δf=2400Hz tra le due frequenze che rappresentano il bit 0 e il bit 1 (le due frequenze sono determinate sommando e sottraendo 2400Hz al centro banda di 132.5kHz). La banda occupata dal segnale FSK è quindi stimabile come $B_{FSK}=2\Delta f+2B_{BASE,}$ dove B_{BASE} rappresenta la banda del segnale in banda base. Si ottiene quindi che la banda occupata dalla modulazione FSK risulta B_{SFK}=9600Hz, per ottenere un bitrate massimo di 4800. Alcuni modem, tra cui anche i modem ST7540 ed ST7580, permettono di selezionare una modalità alternativa con maggiore efficienza spettrale in cui la deviazione di frequenza è Δf=1200Hz, mantenendo lo stesso bitrate di 4800 ma portando l'occupazione di banda a B_{FSK}=7200 Hz. Concentrare la potenza del segnale su una banda più stretta aumenta il rapporto segnale rumore rispetto al rumore di fondo, ma rende il sistema più sensibile ai rumori concentrati su una banda stretta ed alle stesse frequenze.
Per trasmettere in banda A Meters and More utilizza una BPSK con bitrate di 9600 bit/sec ed occupazione di banda 13 KHz. Lo standard prevede la possibilità di utilizzare la banda C con la stessa modulazione usata in banda A semplicemente traslando la frequenza di centro banda e mantenendo lo stesso bitrate.

Il modem ST7580 di ST è in grado di comunicare sia usando la modulazione FSK che le seguenti modulazioni PSK (Phase Shift Keying): BPSK, QPSK, 8-PSK. Con la modulazione 8-PSK questo modem può raggiungere un bitrate di 28.8 Kbit/s occupando una banda di circa 13 KHz, e quindi compatibile con l'utilizzo in banda C. Nella bibliografia

esaminata non sono state riscontrate evidenze sperimentali dell'utilizzo delle modulazioni PSK in banda C.
Queste considerazioni mostrano come la soluzione FSK, così come altre soluzioni a singola portante come la BPSK, consenta bitrate massimi lontani da quelli potenzialmente raggiungibili in banda C. La bassa efficienza spettrale è compensata da un basso costo di realizzazione ed un comportamento robusto della modulazione FSK di fronte a scenari rumorosi di tipo bianco. La comunicazione con modulazione BPSK risulta tipicamente più robusta, a parità di rumore, rispetto alla modulazione FSK. Il comportamento delle modulazioni FSK e BPSK in presenza di rumore è analizzato nel paragrafo 2.3.
I modem che utilizzano tecniche di modulazione multi-portante (OFDM), tipicamente più robuste rispetto al rumore, e più performanti in termini di bitrate, non dichiarano esplicitamente nei data sheet i bitrate ottenibili in banda C. Ad esempio il modem STCOMET di ST dichiara un bitrate di 500 Kbit/sec sull'intera banda 10-500 KHz. Mantenendo sui 15KHz della banda C lo stesso rapporto tra bitrate e occupazione di banda è possibile valutare il bitrate di una soluzione OFDM sulla sola banda C intorno ai 15Kbit/sec. (si nota che almeno una portante deve essere dedicata ad introdurre il tono a 132.5kHz che attesta l'occupazione del canale).

2.2 Attenuazione del canale al variare della distanza e dell'impedenza della rete elettrica

La caratterizzazione dei canali powerline in bassa tensione per le bande CENELEC viene riportata in bibliografia per due tipologie tipiche di canale

a) Dal lato bassa tensione della cabina di trasformazione Mt/bT ad un contatore identificativo di un impianto privato

b) Tra due punti (tipicamente due prese elettriche) all'interno di un impianto domestico servito da un quadro primario.

Nel caso a) l'attenuazione dovuta a singolo cavo viene riportata con valori tipici di 1dB/Km e non risulta quindi fattore particolarmente significativo per l'efficacia della trasmissione. Risulta invece significativa l'influenza sull'attenuazione del numero di diramazioni che dal cavo primario si collegano agli edifici. Valori tipici sia teorici che misurati

[29], [30] descrivono una dipendenza tra attenuazione e distanza dal trasmettitore in presenza di un certo numero di edifici per Km quasi lineare in dB di questo tipo: 30 edifici/Km producono attenuazioni di 30dB+5 dB/Km, 50 edifici/Km producono attenuazioni di 70dB+ 10dB/Km, 80 edifici/Km producono attenuazioni di 110dB+15dB/Km. Nel complesso risulta che l'attenuazione per questa tipologia di collegamento non dipenda dalla frequenza nelle bande CENELEC.
Nel caso b) la situazione è invece diversa in quanto l'attenuazione diventa dipendente dalla distanza, dalla frequenza e dalla topologia del collegamento (in particolare se esso prevede il passaggio dal quadro primario dell'impianto domestico). Estrapolando i dati reperiti in bibliografia al caso della comunicazione tra contatore e dispositivi riceventi domestici, la distanza trasmettitore ricevitore sembra incidere marginalmente e l'attenuazione appare attribuibile principalmente alla eventuale presenza di un quadro elettrico tra trasmettitore e ricevitore. Come riportato in precedenza le attenuazioni tipiche sono comprese tra -20dB e -30dB.
Un fenomeno particolare è che l'attenuazione risulta diminuire all'aumentare della frequenza all'interno delle frequenze considerate nelle bande CENELEC. Dato che le perdite nei cavi devono necessariamente aumentare all'aumentare della frequenza questo strano fenomeno deve essere adeguatamente interpretato in dipendenza dall'impedenza d'accesso del canale di trasmissione. Infatti nell'ambito delle bande CENELEC l'impedenza d'accesso del canale risulta dominata dai carichi collegati alla rete elettrica, mentre l'effetto della presenza dell'impedenza caratteristica della linea di trasmissione risulta trascurabile. Una prima conseguenza di questo fatto è che l'impedenza d'accesso risulta tempo-variante a seconda della casuale inserzione/distacco dei carichi elettrici dall'impianto. Attraverso una serie di misurazioni effettuate in diversi ambiti nazionali si può concludere che in genere l'impedenza d'accesso in reti domestiche ha sempre carattere induttivo e che la sua parte reale non eccede i 3 Ω. La conseguenza di questa situazione è che per avere massima continuità di comunicazione il trasmettitore deve prevedere la trasmissione alla massima tensione consentita dalla norma, in questo caso dalla EN 50065.

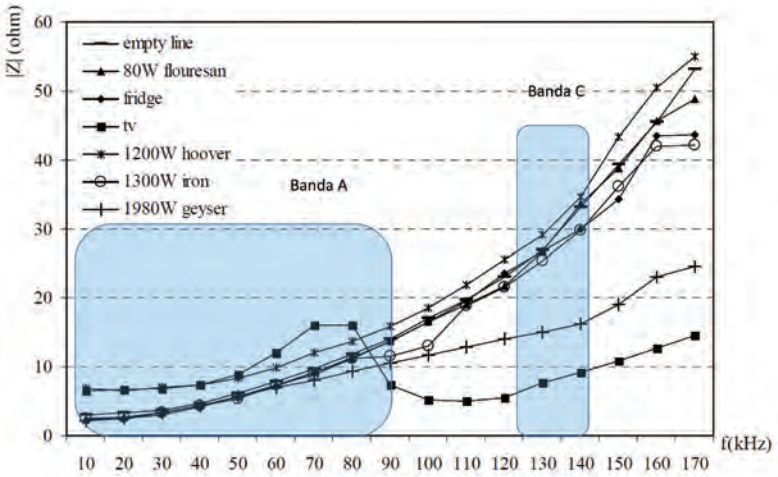


Figura 7

Impedenza della rete in presenza di differenti elettrodomestici. (Fonte: Cavdar, I. Hakki, and Engin Karadeniz. "Measurements of impedance and attenuation at CENELEC bands for power line communications systems." Sensors 8.12 (2008): 8027-8036.)

In figura 7 sono riportate alcune misure del modulo dell'impedenza della rete nella banda CENELEC in un appartamento, in presenza di differenti dispositivi ed elettrodomestici collegati in rete. Si può notare come in presenza di alcuni dispositivi, come ad esempio la televisione, il modulo dell'impedenza misurata nella banda CELENEC C sia circa 5 Ω.

Da un punto di vista quantitativo si può confermare [2], [15] quanto riportato al punto 1.8 di questo report ovvero che si possa mediamente considerare, in Europa e per questa tipologia di collegamento domestico, l'escursione dell'attenuazione media in 20±10dB.

2.3 Confronto tra valori teorici e performance delle tecnologie di trasmissione

Come visto in precedenza, uno dei metodi di trasmissione più utilizzato dai modem in banda C è la modulazione FSK non coerente.

02

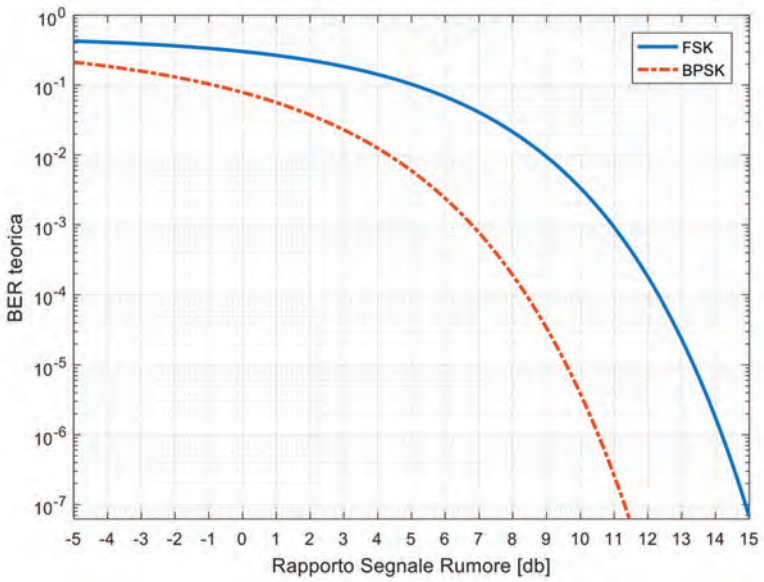
Per questa modulazione l'andamento teorico della probabilità di errore (bit error rate, BER) in funzione del rapporto segnale rumore è dato dalla seguente relazione.

$$BER_{FSK} = \frac{1}{2} e^{-\left(\frac{S}{2N}\right)}.$$

Dove S ed N sono stati definiti in precedenza, ed S/N rappresenta quindi il rapporto segnale rumore.
Per la modulazione BPSK, utilizzata dal protocollo SMITP di Meters and More, la probabilità di errore in funzione del rapporto segnale rumore è la seguente:

$$BER_{BPSK} = \frac{1}{2} erfc\left(\sqrt{\frac{S}{N}}\right)$$

Figura 8
BER teorica in funzione del rapporto segnale rumore per le modulazioni FSK e BPSK



La figura 8 mostra gli andamenti suddetto della BER per le trasmissioni FSK e BPSK. L a figura riporta il BER in caso di un rumore gaussiano e non di un rumore impulsivo che invece è spesso presente in un ambiente domestico. Nel caso di un rumore impulsivo il BER può peggiorare, come descritto in seguito al paragrafo 3.2. Questa figura affianca l'analisi della capacità teorica riportata in precedenza, indicando la diminuzione della BER all'aumentare del rapporto segnale rumore per la FSK non coerente. Le moderne tecniche di correzione degli errori permettono un completo recupero del dato per BER minori di 1e-3, a fronte della introduzione di codici di ridondanza nel dato trasmesso, che diminuiscono parzialmente la bitrate effettiva. Si osserva un comportamento ottimale della trasmissione FSK per valori di SNR maggiori di 11dB, mentre con modulazione BPSK si ha un comportamento ottimale per valori di SNR maggiori di 7 dB.
La modulazione BSPK ottiene un prefissato valore di BER con valori di SNR inferiori di circa 4-5dB rispetto alla modulazione FSK. Si nota come l'analisi fin qui effettuata si sia focalizzata solo sui limiti estremi dei valori di SNR tra -10dB e +60dB, in quanto non sono state reperite statistiche consolidate sui valori di SNR in banda C.
Il valore di SNR=+60dB considera -10dB di attenuazione sul segnale trasmesso alla potenza massima consentita dalla norma e considera la presenza del rumore di fondo tipico del canale, come riportato dalle campagne di misura reperite. Per ottenere valori di SNR minori di 11dB è necessario che il rumore aggiuntivo introdotto da apparecchiature elettroniche sia circa 40dB superiore al rumore di fondo, condizione che può verificarsi nel caso di apparecchiature molto rumorose collegate nella vicinanza del dispositivo ricevente [19,32].
In generale le modulazioni a singola portante (come FSK e BPSK) sono più sensibili al rumore in banda stretta rispetto alle modulazioni multiportante, le quali risultano più robuste al rumore in banda stretta in quanto distribuiscono i dati trasmessi su più portanti aumentando la ridondanza. Infatti un forte rumore a banda stretta concentrato sulla frequenza di trasmissione di un modem che utilizza una tecnica a singola portante può compromettere la comunicazione.
Queste considerazioni sono molto importanti per le applicazioni a banda larga (decine di megahertz) o per la banda FCC (fino a 500KHz), mentre per quanto riguarda la banda C che occupa solo 15KHz i vantaggi della modulazione multiportante restano anche se sono meno significativi del caso a banda larga[35].

Il comportamento dichiarato dei modem in banda C che utilizzano la FSK (o la BPSK) non si discosta fortemente dall'andamento teorico. Ad esempio il datashet del modem ST7537 riporta un dato misura sperimentale della bit error rate con SNR di 15 dB, ottenendo una BER di $4 \cdot 10^{-7}$.

2.4 Conclusioni

- La capacità massima teorica dell'intera banda C (15KHz), secondo il teorema di Shannon, è dell'ordine dei 300 Kbit/sec in condizioni ottimali, corrispondenti ad un rapporto segnale rumore di 60dB, ottenuto considerando la massima potenza di trasmissione (122 dB(μV)), 10dB di attenuazione del canale e presenza del solo rumore di fondo (circa 50dB(μV)).

- Lo standard SMITP (Meter and &More) utilizza una BPSK con bitrate di 9600 bit/sec ed occupazione di banda 13 KHz per trasmettere in banda A. Lo standard prevede la possibilità di utilizzare la banda C con la stessa modulazione usata in banda A semplicemente traslando la frequenza di centro banda e mantenendo lo stesso bitrate.

- L'impedenza tipica in una rete elettrica residenziale è bassa e richiede che il modem del trasmettitore utilizzi la massima potenza ammessa dalla norma. I modem commerciali sono predisposti per trasmettere alla massima potenza permessa.

- La presenza di rumore dovuto alle apparecchiature domestiche riduce il rapporto segnale-rumore. Per ottenere valori di BER adeguati alla comunicazione, ossia minori di 10^-3, utilizzando la modulazione FSK sono necessari valori di SNR di almeno 11 dB. Per questo valore di SNR la capacità teorica del canale su 5KHz è di circa 20 Kbit/sec.

3.1 Interferenze condotte: emissioni degli apparati utente sulla banda C. Studio dell'impatto delle interferenze provenienti da dispositivi installati nelle case

Nel paragrafo 1.8 è stato osservato come una delle sorgenti maggiormente rumorose per le PLC siano i regolatori di luminosità, esempi di misure di rumore si trovano per lampade ad incandescenza [20], lampade fluorescenti [32], lampade ad alogenuri metallici [19], lampade a vapori di sodio [41], lampade LED [42], lampade fluorescenti compatte [43] e lampade al plasma. Si può notare come questo fenomeno potrebbe essere in futuro meno significativo a causa della recente evoluzione e diffusione di lampade a basso consumo energetico, in sostituzione delle lampade ad incandescenza maggiormente diffuse negli anni 80 e 90 [20]. In [20] sono analizzate misure di rumore immesso in rete da una varietà di apparecchiature, motori elettrici e convertitori, e si conclude come i regolatori di luminosità per lampade ad incandescenza siano tra i più rumorosi. Le lampade di nuova generazione richiedono correnti di targa minori ai convertitori, ed anche l'elettronica dei convertitori stessi è cambiata, quindi ulteriori e più recenti misurazioni di rumore per questi componenti potrebbero modificare l'impatto sul rumore dei regolatori di luminosità.

Gli studi più recenti riportati in [19,32,41-44] sono mirati a valutare l'impatto delle armoniche introdotte sulle bande CENELEC (3KHz-150KHz) e sullo spettro broadBand (150KHz-30MHz) dai convertitori delle moderne lampade a fluorescenza [32] e lampade ad alogenuri metallici [19]. Le conclusioni di questi studi riportano come i convertitori per le lampade ad alogenuri metallici [19] non generino rumori distruttivi per la comunicazione in banda CENELEC, valutando la potenza immessa decine di decibel minore della potenza massima ammissibile per la comunicazione PLC. I convertitori elettromagnetici, con 70dB(μV) immessi nella banda C, sono in genere più rumorosi di quelli elettronici che invece inseriscono una interferenza misurata in circa 50 dB(μV) nella banda C. Il valore di 50 dB(μV) è in altri lavori confrontabile con il rumore di fondo [2] del canale residenziale in banda C. Misure del rumore generato da regolatori di lampade fluorescenti [32] mostrano valori nella banda C intorno ai 90 dB(μV), maggiori rispetto alle lampade ad alogenuri metallici. Si nota come questo livello di ru-

more sia circa 20-30 dB inferiore al livello di trasmissione ammesso in banda C (122 dB(μV)), ma sia confrontabile con il livello di 86 dB(μV) richiesto dal rilevatore di segnale per determinare lo stato di banda in uso, come specificato dal protocollo di accesso, vedi paragrafo 1.2.

Per quanto riguarda il rumore introdotto dai convertitori AC/DC, in letteratura si riscontra come gli alimentatori che iniettano maggior rumore siano quelli che funzionano in modalità switching con correzione attiva del fattore di potenza (active PFC), come gli alimentatori dei PC [11,12,50,51,52]. Dalle misure riportate in letteratura si evince come il rumore immesso in rete da un alimentatore per PC in banda C sia dell'ordine di circa 60 dB(μV) -70 dB(μV).

Si può osservare che in Europa sta crescendo la sensibilità dell'industria elettronica di potenza verso il rumore generato dagli apparati, soprattutto gli inverter, nelle bande CENELEC. Questo è dovuto al potenziale effetto negativo, sulle applicazioni di metering e più in generale nei sistemi operanti in banda A, di una presenza massiccia di impianti fotovoltaici. L'industria delle utilities e quella dell'elettronica di potenza stanno cercando di concordare, in Europa, nuovi standard sui limiti di immissione di rumore in rete nelle bande CENELEC da parte dei convertitori di potenza [45-50].

3.2 Impatto delle interferenze sul bit-rate, packet error rate, e su altre prestazioni

L'effetto di interferenze, e quindi del rumore immesso in rete dalle apparecchiature, sulla comunicazione PLC determina una diminuzione del rapporto segnale rumore.
Dal rapporto segnale rumore dipende poi la capacità del canale e la bit error rate ottenibile con una certa modulazione, le quali sono state discusse nel paragrafi precedenti.
Sono disponibili risultati teorici, sulla BER e sulla capacità del canale, in presenza di rumore additivo Gaussiano bianco, e quindi di fenomeni stazionari. Il rumore nella comunicazione PLC è tuttavia anche di natura impulsiva, ed in questo caso le prestazioni degradano. In letteratura non sono disponibili studi sull'impatto del rumore impulsivo, periodico o non periodico, sulle comunicazioni in banda C, mentre è più caratterizzata la comunicazione in banda A [37-38].

In generale si può riscontrare che la codifica di canale (channel coding) mitighi l'effetto del rumore impulsivo periodico nella comunicazione PLC [21,36].
Il rumore misurato in banda C in ambito domestico include tutte le tipologie descritte nel paragrafo 1.8, ed è quindi fortemente tempo variante [12]. E' quindi lecito aspettarsi prestazioni della comunicazione, in termini di velocità e di corretta ricezione dei segnali, variabili nel tempo.

Si osserva inoltre come armoniche di rumore, di qualunque origine, alla frequenza di 132.5KHz e con livelli superiori a 86dBµV possano causare la determinazione di una condizione di "banda in uso" da parte del rilevatore di segnale del trasmettitore PLC in banda C, anche quando la banda in realtà non è in uso.

3.3 Interferenze irradiate: emissioni irradiate dalla comunicazione PLC in banda C

Per quanto riguarda le emissioni irradiate dalle apparecchiature che trasmettono in banda C, queste sono normate dalla norma EN 50065-1, come descritto in 1.9. Sotto la frequenza di 30MHz le emissioni irradiate dalla powerline sono considerate in genere trascurabili [12]. Per quanto riguarda emissioni radio provenienti da fonti esterne e captate dalla powerline, si riscontrano accoppiamenti significativi solo nell'ambito dei MHz, mentre nelle frequenze della banda C questo fenomeno risulta trascurabile [12].

3.4 Prestazioni effettive delle tecnologie PLC in banda C

La caratterizzazione del canale PLC nelle bande CENELEC è trattata in maniera abbastanza ampia in letteratura (vedi 1.8), ciononostante è disponibile un numero molto limitato, e statisticamente solo parzialmente consolidato, di campagne di misura delle prestazioni di sistemi PLC in banda C per applicazioni residenziali, in particolare non sono disponibili risultati sperimentali per la comunicazione tra contatore e dispositivi domestici riceventi utilizzando la banda CENELEC C. Infat-

ti la comunità scientifica e industriale ha rivolto il proprio interesse a caratterizzare le prestazioni in banda A [37-39], sostanzialmente per applicazioni di metering. La banda C è stata inizialmente utilizzata per applicazioni di home automation, normalmente a basso costo e basso bitrate. Tuttavia nel mercato non si riscontra una grande diffusione di applicazioni e dispositivi in banda C, mentre in alcuni paesi europei si è verificata una massiva diffusione delle applicazioni PLC in banda larga (per multimedia e home networking). Si riscontra tra l'altro come la recente attività di standardizzazione delle frequenze fino a 500KHz, e di conseguenza l'attuale diffusione di modem operanti sullo spettro esteso della NB-PLC, con soluzioni del tipo G3-PLC o equivalenti, abbia spostato l'attenzione della comunità scientifica verso queste frequenze, dedicate ad applicazioni Smart Grid, che includono in parte le applicazioni a cui è stata dedicata la banda CENELEC C.

La G3-PLC Alliance [34] mostra un risultato sperimentale del bitrate ottenuto in un caso realistico da un modem funzionante, con modulazione FSK, in banda C, come ad esempio il modem ST7540, ed un modem operante con il nuovo standard OFDM nelle frequenze 150KHz-500KHz, come il modem Maxim 2990. Il modem FSK in banda C ottiene una bitrate di circa 2Kbit/sec e bit error rate dell'ordine di 1e-4, in un canale con SNR di 12 dB. Il modem operante in OFDM riporta un bitrate di 32Kbit/sec e BER di 1e-4 su un canale con soli 3dB di SNR, ottenendo quindi un risultato migliore a fronte dell'utilizzo di una banda maggiore rispetto al modem FSK in banda C.

In [35] viene confrontato una sistema basato su PLC in banda CENELEC C con soluzioni alternative Wireless basate su ZigBee, per realizzare un Home Energy Management System all'interno di appartamenti. Il sistema in banda C utilizza il modem G3-PLC 2990 di Maxim, nella sua implementazione in sola banda C [33]. La prova sperimentale riporta un bitrate medio di 1Kbit/sec, ed un packet error rate di 0 a fronte della trasmissione di 1000 pacchetti con 32 byte di payload.

Dalle informazioni disponibili in letteratura non è possibile trarre conclusioni statisticamente significative sulle prestazioni medie effettive delle tecnologie PLC in banda C per applicazioni residenziali. **I bitrate riscontrati in applicazioni particolari [34-35] e quelli auto dichiarati dai costruttori di modem sono minori di quello massimo di 4800 bit/sec (in ogni caso non raggiungibile a causa dei vincoli imposti dal protocollo di accesso, vedi capitolo 4) e si attestano su valori compresi tra 1Kbit/sec e 2Kbit/sec.**

04

4.1 Interazione tra contatori sottesi allo stesso cavo in BT, al crescere del numero di contatori comunicanti: impatto sulla latenza, e sul bit-rate applicativo

L'uso condiviso della banda C è regolato dal protocollo di accesso CSMA/CA descritto in 1.2, ed imposto dalla norma EN 50065-1. In letteratura non sono disponibili studi delle prestazioni del protocollo CSMA/CA in applicazioni in banda C. Le considerazioni che seguono sono correlate ad alcune situazioni possibili nell'applicazione del protocollo CSMA/CA al caso descritto dalla norma.

In particolare la norma impone che la durata massima di una singola trasmissione (pacchetto) sia T_p=1s, e che dopo aver effettuato la trasmissione il trasmettitore debba aspettare almeno 125ms prima di iniziarne una nuova. In presenza di più trasmettitori, un trasmettitore può iniziare una trasmissione dopo un intervallo di inattività compreso tra 85ms e 115ms dalla fine di una trasmissione di un altro trasmettitore. Quindi tra due trasmissioni consecutive è previsto un periodo di inattività del canale di durata minima di T_i=85ms, che influisce sul throughput del canale.

Throughput di un trasmettitore singolo

Consideriamo inizialmente il caso di un singolo trasmettitore sulla rete, il quale trasmette pacchetti di durata T_p, e dopo aver trasmesso un pacchetto rispetta, per norma, un tempo di inattività di T_I=125ms. Supponiamo anche che il trasmettitore sia, dopo ogni 125ms di inattività, già in attesa e pronto a trasmettere un nuovo pacchetto di durata T_p, ci poniamo cioè in condizione di massima occupazione del canale, convenzionalmente corrispondente ad un "throughput saturato".
E' possibile stimare un indice di utilizzo del canale, o "throughput saturato normalizzato" di un trasmettitore singolo $S_{1\text{-}SAT}$, come il rapporto tra tempo di effettiva trasmissione e il tempo totale di occupazione del canale:

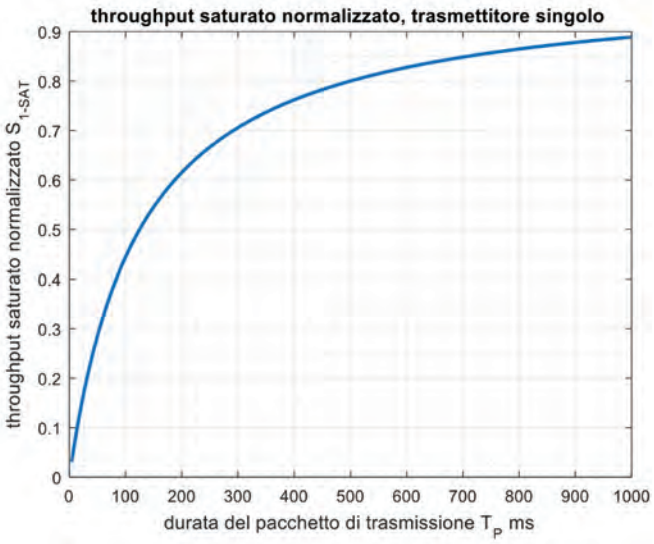
$$S_{1\text{-}SAT} = \frac{T_p}{T_p + T_I}$$

In figura 9 è riportato l'andamento di $S_{1\text{-}SAT}$ per valori di T_p compresi tra 4ms e 1000ms (limiti imposti dalla norma), e per T_I=125ms costante. Si nota come il "throughput saturato normalizzato" per un trasmettitore singolo sia massimo per T_p =1s e si attesti su un valore di 0.889. Il "throughput saturato effettivo", in bit/sec, è quindi determinabile come il prodotto tra il "throughput saturato" e il "bitrate applicativo" del pacchetto di trasmissione. Nel caso di T_p =1s, se il modem trasmette a 4800 bit/sec, a seguito dei vincoli posti dal protocollo CSMA la trasmissione effettiva ha un bitrate di 4800·0,889=4266 bit/sec.

Dalla figura 9 si osserva che per durate del pacchetto di trasmissione minori di 1s il throughput diminuisce.
L'analisi su riportata ipotizza una condizione di saturazione del throughput: in base alla particolare applicazione un singolo trasmettitore potrebbe richiedere una trasmissione con cadenza maggiore di T_p+T_I, ad esempio trasmettendo un pacchetto di 1s ogni minuto. In questo caso il canale risulterebbe molto sotto utilizzato, ma garantirebbe la completa disponibilità del canale alle trasmissioni da effettuare.

Figura 9

Throughput saturato normalizzato per trasmettitore singolo, in funzione della durata del pacchetto di trasmissione T_P.



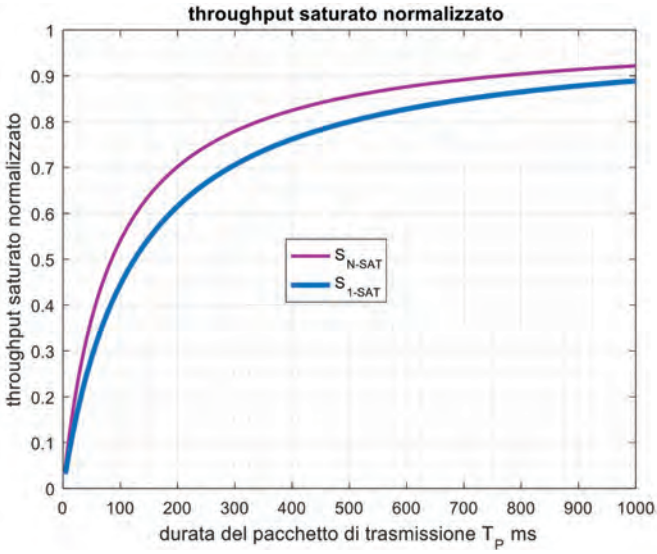
Throughput di più trasmettitori

Nel caso in cui i trasmettitori siano più di uno, durante una trasmissione in corso tutti i trasmettitori ascoltano il canale in attesa che si liberi, e dal momento che non è più in uso ogni trasmettitore attende un tempo casuale compreso tra 85ms e 115ms prima di trasmettere. La simultaneità di accesso al canale di trasmettitori diversi è possibile e, se si verifica, i trasmettitori che hanno trovato il canale occupato aspettano 125ms prima di tentarla nuovamente. Nel caso ottimistico di assenza di collisioni il throughput normalizzato saturato di N trasmettitori $S_{N\text{-}SAT}$ può essere calcolato, ponendo T_I=85ms, come in precedenza:

$$S_{N\text{-}SAT} = \frac{T_p}{T_p + T_I}$$

Figura 10

Throughput saturato normalizzato per trasmettitore singolo ed N trasmettitori in condizioni ideali, in funzione della durata del pacchetto di trasmissione T_P.



Si ipotizza quindi che solo un trasmettitore abbia scelto 85ms come tempo di attesa e che abbia un pacchetto da trasmettere dopo la fine di una trasmissione precedente, ovvero ci poniamo in condizione di sa-

turazione del throughput. La figura 10 mostra l'andamento di $S_{N\text{-}SAT}$ in funzione della durata del pacchetto, in confronto con $S_{1\text{-}SAT}$ calcolato in precedenza. Il minore tempo di inattività di 85ms porta chiaramente ad un throughput normalizzato maggiore rispetto al caso di un trasmettitore isolato: per T_p=1s si ha $S_{N\text{-}SAT}$=0,922, ed un throughput effettivo di 4800·0,922=4424 bit/sec.

Questo valore è ottenuto in condizioni ideali, considerando l'assenza di collisioni ed un insieme di dati da trasmettere, detto anche "traffico offerto" *G*, coincidente con il throughput effettivo del canale. In generale il "traffico offerto" potrebbe essere molto maggiore del throughput effettivo e le collisioni avere un effetto non trascurabile sul throughput. Si effettua ora una analisi più approfondita che considera queste condizioni non ideali.

Il "traffico offerto" normalizzato è definito come

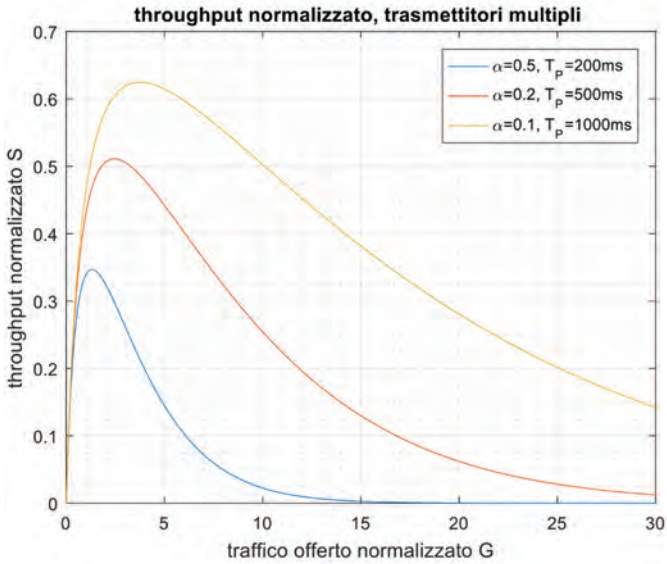
$$G = T_p \cdot \lambda$$

Dove λ è il packet rate medio in pacchetti al secondo. Il "traffico offerto" rappresenta la domanda di utilizzo globale del canale da parte di tutti gli utenti. Quindi se ad esempio la durata di ogni pacchetto è T_p=1s e la media di pacchetti offerti al secondo è λ =10, il "traffico offerto" normalizzato ha valore 10 e mediamente la dimensione del dato da trasmettere è 10 volte maggiore della disponibilità del canale occupato continuativamente. Viceversa il canale può essere sotto-utilizzato se il "traffico offerto" normalizzato è minore di 1. Al crescere del "traffico offerto" aumenta la probabilità di collisione, e quindi si ha in genere un effetto negativo sul throughput. Considerando una distribuzione del tempo di arrivo dei pacchetti di tipo Poisson, è possibile derivare una espressione teorica del throughput normalizzato S in funzione del "traffico offerto" normalizzato *G* e del rapporto $\alpha = \frac{T_I}{T_p}$ tra tempo di inattività e durata del pacchetto [40]:

$$S = \frac{\alpha G e^{-\alpha G}}{1 + \alpha - e^{-\alpha G}}$$

Figura 11

Throughput normalizzato per un numero N>>1 di trasmettitori, in funzione della durata del pacchetto di trasmissione T_P e del traffico normalizzato.



Considerando un valore del tempo di inattività di T_I=100ms, mediano rispetto al range 85ms-115ms, la figura 11 mostra l'andamento di *S* in funzione del traffico normalizzato per tre valori di α e quindi della durata del pacchetto.

La figura 11 può fornire informazioni solo approssimative in relazione al numero di trasmettitori *N*, nel momento in cui sia possibile mettere in relazione *N* con il traffico *G*, in quanto il risultato mostrato in figura assume *N>>1* per ogni valore di *G* .
Ad esempio, ipotizzando che ogni trasmettitore abbia un valore noto di traffico $G_1 << G$, il traffico totale è dato da $G=NG_1$.

Impatto sulla latenza

L'analisi del throughput fornisce una indicazione dell'effettivo utilizzo del canale come rapporto tra il tempo effettivamente utilizzato per la trasmissione utile e tempo globalmente impiegato a trasmettere. Quindi in generale il throughput può essere alto anche in presenza di molti trasmettitori. Il throughput però non tiene conto del tempo di attesa medio di ogni trasmettitore.

In generale se il traffico da trasmettere è minore di 1 i tempi di latenza sono minimi in quanto il canale è sotto utilizzato.

Nella ipotesi in cui ogni trasmettitore debba trasmettere lo stesso traffico G_1, ed il traffico totale $G=NG_1$ sia maggiore di 1, il tempo di attesa medio può essere considerato linearmente dipendente dal numero di trasmettitori N. Nel caso equo in cui dopo una trasmissione un generatore aspetti che abbiano trasmesso tutti gli altri trasmettitori, e che non ci siano collisioni, il tempo di attesa medio è dell'ordine di $N(T_p+T_l)-\frac{1}{\lambda}$, dove λ è il packet rate medio in pacchetti al secondo di un singolo trasmettitore. Nei casi in cui il tempo di attesa medio diventa minore di zero si può desumere che mediamente non c'è latenza.
Per dare una indicazione numerica generica, nell'ipotesi in cui $\lambda=1/60$ (ovvero i trasmettitori inviano un pacchetto ogni 60 sec), N=100 (numero di trasmettitori), T_p+T_l=1085ms (tempo tra due trasmissioni di trasmettitori diversi), ogni trasmettitore deve aspettare circa 48,5 secondi in più rispetto al momento in cui ha un pacchetto pronto per la trasmissione.

Considerando invece pacchetti di durata T=150ms, ed un packet rate medio $\lambda=1$ (i trasmettitori inviano un pacchetto al secondo), il numero massimo di trasmettitori affinché mediamente non ci sia latenza è N=4.

4.2 - Impatto di trasmissioni in Banda C da altre applicazioni utente

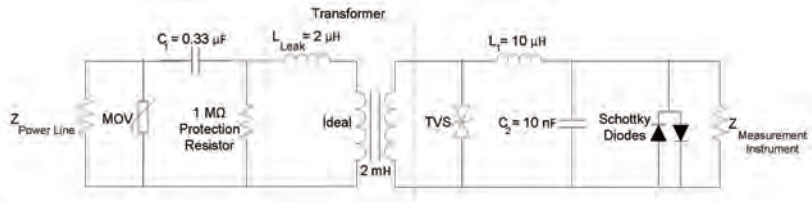
Le considerazioni fatte nel paragrafo 4.1 considerano il caso in cui molti trasmettitori condividano la banda C, indipendentemente dalla applicazione. In generale tutte le applicazioni che utilizzino la banda C devono utilizzare il protocollo di accesso le cui performance sono descritte nel paragrafo 4.1

5. Misure di rumore

In questo capitolo sono presentati ed analizzati dati sperimentali ottenuti con una campagna di misura del rumore presente nella rete di distribuzione in bassa tensione in diversi locali dell'edificio del dipartimento DESTEC dell'Università di Pisa. Le misure, effettuate con lo stesso metodo descritto in [24], danno un'indicazione del rumore da cui sarebbe interessato un certo punto dell'impianto (tra fase e neutro), a cui potrebbe essere collegato un dispositivo ricevente in banda C, se alcuni dispositivi di uso comune fossero inseriti in rete in posizioni più o meno vicine al punto di misura.

Le misure sono state acquisite utilizzando la scheda NI PXI-. 5124 di National Instruments che raggiunge una velocità di campionamento massima di 200MS/s con risoluzione di 12 bit. L'accoppiamento della scheda di acquisizione con la rete è stato effettuato con un accoppiatore capacitivo, a banda piatta nelle frequenze CENELEC, riportato schematicamente in figura 12.

Figura 12
Circuito di accoppiamento dello strumento di misura col canale.
(Fonte: Gassara, Héla, et al. "Coupling interface circuit design for experimental characterization of the narrowband power line communication channel." Electromagnetic Compatibility (EMC), 2012 IEEE International Symposium on. IEEE, 2012)

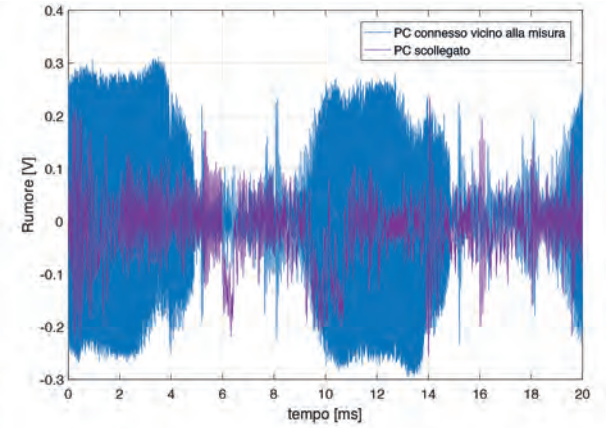


Misure in locale laboratorio

In figura 13 sono mostrati gli andamenti nel tempo, per un intervallo di 20ms, del rumore misurato in un laboratorio DESTEC al primo piano dell'edificio, sia in presenza di un PC fisso acceso e collegato ad una presa adiacente al punto di accoppiamento dello strumento di misura (curva blu), sia in assenza di dispositivi collegati nella stanza, a luci accese (curva viola). Si osserva come il PC introduca un rumore sincrono con la frequenza di rete, con valori di picco che raggiungono i 300mV.

Figura 13

Rumore nel dominio del tempo misurato in laboratorio. La curva blu è ottenuta in presenza di un PC collegato ad una presa adiacente a quella della misura, la curva viola è ottenuta scollegando tutti i dispositivi nella stanza tranne il dispositivo di misura.



In figura 14 si mostra una stima dello spettro di ampiezza del rumore in figura 13, in un intervallo di frequenze esteso da 0Hz a 500KHz, mentre in figura 15 si rappresentano gli stessi spettri di ampiezza per frequenze comprese tra 100KHz e 200KHz, e quindi mettendo in evidenza le componenti di rumore in banda C.

Figura 14

Spettro di segnali mostrati in figura 13, nella banda passante del filtro di accoppiamento

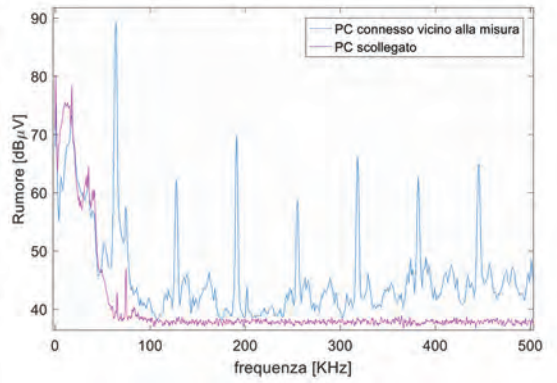
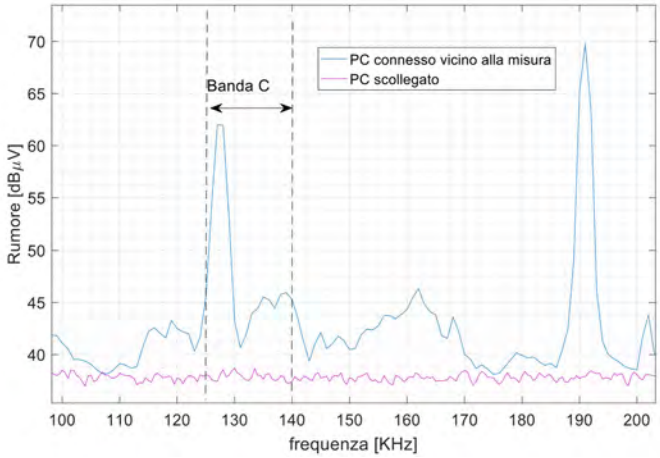


Figura 15
Spettro di figura 14, zoom sulla banda C

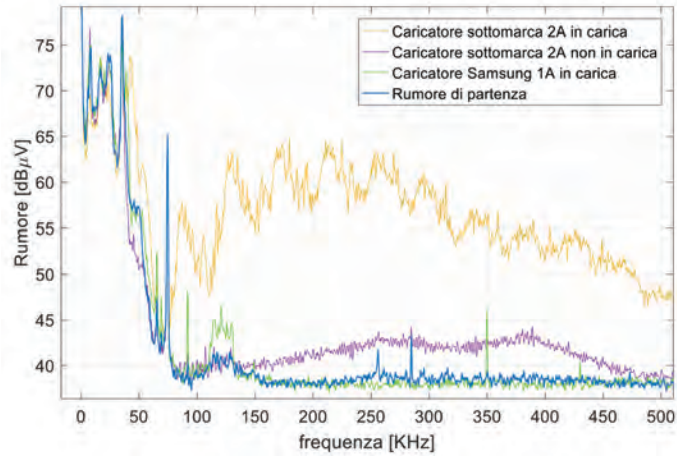


Dalla figura 14 è possibile evidenziare come il rumore misurato con PC scollegato (curva viola) sia praticamente assimilabile ad un rumore di fondo per frequenze superiori a 100KHz, con un valore che si attesta intorno ai 38dB(μV). Questo rumore è praticamente costante su tutte le frequenze della banda C.

Dalla figura 17 si nota come il rumore in presenza del PC collegato (curva blu) presenti un picco di circa 63 dB(μV) all'interno della banda C, alla frequenza di circa 128kHz. Inoltre il rumore è maggiore su tutte le frequenze rispetto al caso con PC spento.

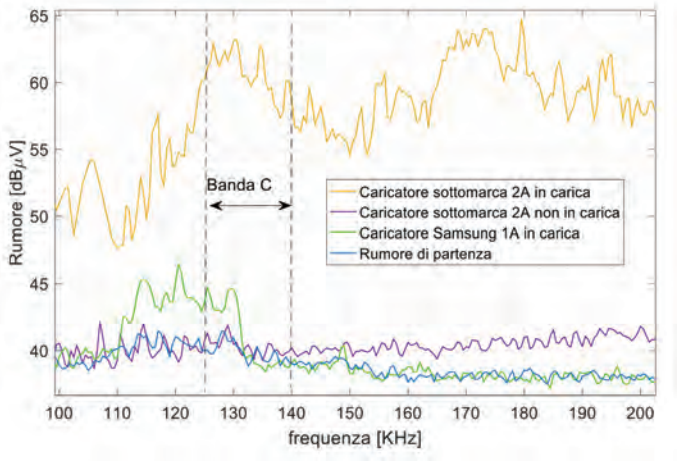
Misure in aula dottorandi.
Una seconda campagna di misure è stata effettuata in un'aula al terzo piano dell'edificio, in cui nel momento della misura erano collegati costantemente un PC fisso e 4 PC portatili.

Figura 16
Spettro del rumore misurato in aula dottorandi, con caricatori per cellulare collegati vicino alla presa di misura.



In figura 16 si mostra la stima dello spettro del rumore misurato ad una presa in 4 condizioni diverse. La curva blu indicata con “rumore di partenza” è relativa ad una misura effettuata senza collegare dispositivi nelle vicinanze del punto di misura. Durante questa misura i dispositivi suddetti (un PC e 4 portatili) sono comunque collegati a prese distanti pochi metri dal punto di misura nella stessa stanza. Le altre curve mostrate in figura 16 mostrano il rumore misurato collegando sulla stessa presa multipla a cui è collegato lo strumento di misura un caricatore per cellulare. In particolare è stato caratterizzato un caricatore per cellulare di “sottomarca” ed uno di marca Samsung. Il caricatore di sottomarca immette in rete un rumore particolarmente intenso su un ampio spettro di frequenze.

Figura 17
Spettro di figura 16, zoom sulla banda C



In figura 17 si mostra un ingrandimento della figura 16 in modo da evidenziare i livelli di rumore in banda C.

Misure in ufficio docenti.
Un'ultima campagna di misure è stata effettuata in un ufficio per docenti, in cui sono collegati alla rete, tramite UPS, due PC fissi, una stampante e due schermi da 27 pollici.
In figura 18 e 19 si mostrano gli spettri stimati dei rumori misurati, su tre punti diversi: una presa a muro, una preso sul gruppo UPS, lato batteria, e una presa sul gruppo UPS, lato surge protection.
Si nota come in banda C le tre misure siano del tutto equivalenti, mentre per frequenze tra 250KHz e 300KHz si ha un rumore più intenso di circa 4 dB(μV) nella misura sulla presa collegata al UPS lato batteria.

Figura 18
Misure in ufficio per docenti

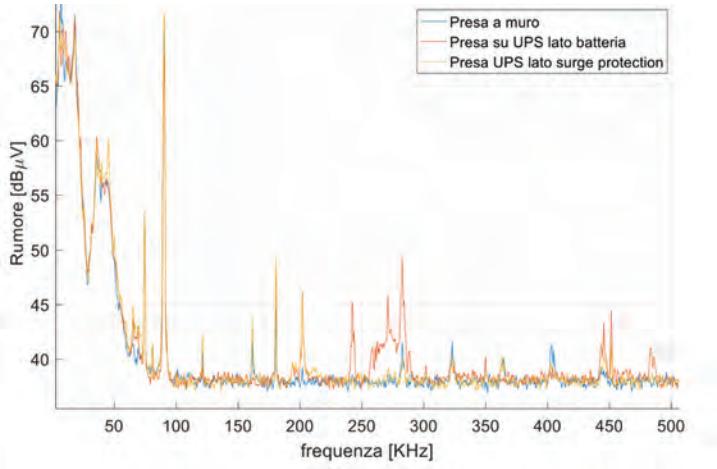
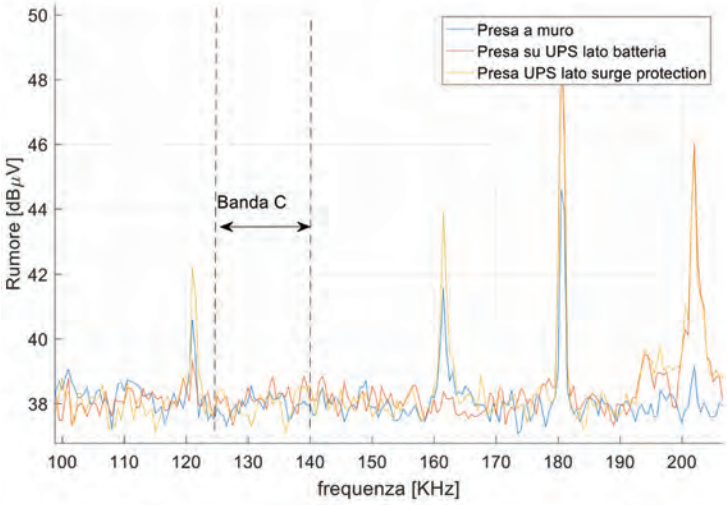


Figura 19
Zoom della figura 18 per evidenziare la banda C.



05

In conclusione la campagna di misure ha evidenziato che alcuni dispositivi possono immettere componenti di rumore molto significative in banda C. Nei casi considerati il possibile rapporto Segnale Rumore ad un ricevitore adiacente ai dispositivi non dovrebbe penalizzare la comunicazione, tuttavia non si può escludere che altri dispositivi, in particolare se vicini a eventuali ricevitori, possano immettere in rete livelli di rumore tali da ostacolare o anche impedire la trasmissione in questa banda, specie se effettuata con codifiche non ottimizzate per lavorare con bassi rapporti Segnale Rumore.

06

Bibliografia

1. Tonello, Andrea M., and Alberto Pittolo. *Considerations on narrowband and broadBand power line communication for smart grids.* 2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). IEEE, 2015.

2. Gassara, Hamdi, Fatma Rouissi, and Adel Ghazel. *Statistical characterization of the indoor low-voltage narrowband power line communication channel.* Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on 56.1 (2014): 123-131.

3. Cavdar, I. Hakki, and Engin Karadeniz. *Measurements of impedance and attenuation at CENELEC bands for power line communications systems.* Sensors 8.12 (2008): 8027-8036.

4. Sugiura, Yoshie, Takaya Yamazato, and Masaaki Katayama. *Measurement of narrowband channel characteristics in single-phase three-wire indoor power-line channels.* Power Line Communications and Its Applications, 2008. ISPLC 2008. IEEE International Symposium on. IEEE, 2008.

5. Anouar Achouri, Jean - Charles Le Bunetel , Yves Raingeard and Richard Nizigiyimana *Indoor Narrowband Power Lines Channel Characterization* Journal of Control Science and Engineering 2 (2014)

6. Bausch, Jörg, et al. *Characteristics of indoor power line channels in the frequency range 50-500 kHz.* Power Line Communications and its Applications, 2006 IEEE International Symposium on. IEEE, 2006.

7. Arzberger, Michael, et al. *Fundamental properties of the low voltage power distribution grid.* Proceedings of the 1997 International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, Essen, Germany. 1997.

8. Cortés, José Antonio, et al. *Analysis of narrowband power line communication channels for advanced metering infrastructure.* EURASIP Journal on Advances in Signal Processing 2015.1 (2015): 1-13.

9. Marcel Nassar; Jing Lin; Yousof Mortazavi; Anand Dabak; Il Han Kim; Brian L. Evans *Local Utility Power Line Communications in the 3–500 kHz Band: Channel Impairments, Noise, and Standards* IEEE Signal Processing Magazine Year: 2012, Volume: 29, Issue: 5

10. Zimmermann, Manfred, and Klaus Dostert. *Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communications.* Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on 44.1 (2002): 249-258.

11. Nieman, Karl F., et al. *Cyclic spectral analysis of power line noise in the 3–200 kHz band.* Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2013 17th IEEE International Symposium on. IEEE, 2013.

12. Lampe, Lutz, Andrea M. Tonello, and Theo G. Swart, eds. *Power Line Communications: Principles, Standards and Applications from Multimedia to Smart Grid.* John Wiley & Sons, 2016.

13. Sutterlin, Phil, and Walter Downey. *A Power Line Communication Tutorial-Challenges and Technologies.* International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 1998

14. H. C. Ferreira; H. M. Grove; O. Hooijen; A. J. Han Vinck: *"Power line communications: an overview* AFRICON, 1996., IEEE AFRICON 4th Year: 1996, Volume: 2

15. Cristina Cano; Alberto Pittolo; David Malone; Lutz Lampe; Andrea M. Tonello; Anand Dabak: *State-of-the-art in Power Line Communications: from the Applications to the Medium* IEEE Journal on Selected Areas in Communications Year: 2016, Volume: PP, Issue: 99

16. Z Gu, H Liu, D Liu, KL Man, H Liang, Z: *Modeling the Noise in NarrowBand Power Line Communication* - International Journal of Control and Automation 2016

17. Samuel C. Pereira; Alexandre S. Caporali; Ivan R. S. Casella: *Power line communication technology in industrial networks* International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 2015

18. J. B. O'Neal: *The Residential Power Circuit as a Communication Medium" IEEE Transactions on Consumer Electronics Year: 1986, Volume: CE-32, Issue: 3*

19. Am. Emleh; A. S. de Beer; H. C. Ferreira; A. J. Han Vinck "Noise generated by modern lamps and the influence on the smart-grid communication network 2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)

20. Roger M. Vines; H. Joel Trissell; Louis J. Gale; J. Ben O'neal: *Noise on Residential Power Distribution Circuits* IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility Year: 1984, Volume: EMC-26, Issue: 4

21. D. Cooper; T. Jeans *Narrowband, low data rate communications on the low-voltage mains in the CENELEC frequencies. Part I. Noise and attenuation* IEEE Transactions on Power Delivery Year: 2002, Volume: 17, Issue: 3

22. *Channel and Noise Measurements*, IEEE Standard P1901.2, Apr. 2011

23. H Dalichau, W Täger *Description of the technology and comparison of the performance of two different approaches for a powerline modem in the Cenelec-band* International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 2000

24. Héla Gassara; Fatma Rouissi; Adel Ghazel: *Narrowband stationary noise characterization and modelling for power line communication* 13th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), 2013

25. Héla Gassara; Fatma Rouissi; Adel Ghazel *A Novel Stochastic Model for the Impulsive Noise in the Narrowband Indoor PLC Environment* 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings

26. W. Hagmann *"A spread spectrum communication system for load management and distribution automation"* IEEE Transactions on Power Delivery Year: 1989, Vol. 4, Issue: 1

27. Tanaka, Masaoki. *High frequency noise power spectrum, impedance and transmission loss of power line in Japan on intrabuilding power line communications.* Consumer Electronics, IEEE Transactions on 34.2 (1988): 321-326.

28. Lasciandare, Alessandro, et al. *Experimental field trials of a utility AMR power line communication system analyzing channel effects and error correction methods.* Power Line Communications and Its Applications, 2007. ISPLC'07. IEEE International Symposium on. IEEE, 2007.

29. Hooijen, Olaf G. *On the relation between network-topology and power line signal attenuation."* International Symposium on Power Line Communications. 1998.

30. Michael Arzbergerl, Klaus Dostert, Torsten Waldeck, Manfred Zimmermann *"Fundamental Properties of the Low Voltage Power Distribution Grid"* International Symposium on Power Line Communications. 1998.

31. Barzola, J., and L. Rubini. *The telegestore system evolved according OSI model and its performance compared with the new IEEE 1901.2 standard.* Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXIV), 2014 IEEE. IEEE, 2014.

32. A. Emleh, A. S. de Beer, H. C. Ferreira and A. J. H. Vinck, *The influence of fluorescent lamps with electronic ballast on the low voltage PLC network,* Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2014 IEEE 8th International, Langkawi, 2014, pp. 276-280.

33. MAXIM, *Supplement to PLC G3 Physical Layer Specification for Operation in CENELEC B/C/BC/D/BCD/BD Frequency Bands* (2010)

34. G3-PLC Alliance *G3-PLC Powerline Communication Standard for Today's Smart Grid*, 2012

35. D'Alessandro, Salvatore, et al. *Home energy management systems: Design guidelines for the communication infrastructure.* Energy Conference (ENERGYCON), 2014 IEEE International. IEEE, 2014.

36. Vinck, AJ Han, and J. Häring. *Coding and modulation for power-line* communications. Proc. Int. Symp. Power Line Communication. 2000.

37. Familua, Ayokunle Damilola, et al. *Error pattern/behavior of noise in in-house CENELEC A-Band PLC channel*. Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2012 16th IEEE International Symposium on. IEEE, 2012.

38. Korki, Mehdi, et al. *Impulsive noise reduction of a narrowband power line communication using optimal nonlinearity technique.* Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference (ATNAC), 2011. IEEE, 2011.

39. Kim, Il Han, Badri Varadarajan, and Anand Dabak. *Performance analysis and enhancements of narrowband OFDM powerline communication systems.* Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on. IEEE, 2010.

40. Rom, Raphael, and Moshe Sidi. *Multiple access protocols: performance and analysis.* Springer Science & Business Media, 2012.

41. Emleh, A., et al. *The influence of high pressure sodium lamps on the power line communications channel.* Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 2015 International Symposium on. IEEE, 2015.

42. de Beer, A. S., et al. *Effects of LED lamps on the power-line communications channel.* Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2013 17th IEEE International Symposium on. IEEE, 2013.

43. Emleh, A., et al. *The impact of the CFL lamps on the power-line communications channel.* Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 2013 17th IEEE International Symposium On. IEEE, 2013.

44. Emleh, Ashraf, et al. *Effects of plasma lamps on the power-line communications channel.* ELMAR, 2013 55th International Symposium. IEEE, 2013.

45. Rönnberg, Sarah K., et al. *Supraharmonics from power electronics converters.* 2015 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE). IEEE, 2015.

46. Moreno-Munoz, Antonio, et al. *Supraharmonics (2 to 150 kHz) and multi-level converters.* 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG). IEEE, 2015.

47. Bollen, Math, et al. *Standards for supraharmonics (2 to 150 kHz).* IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine 3.1 (2014): 114-119.

48. Wasterlain, S., et al. *EMC studies on grid integration of Distributed Energy Resources. A 10 kW, IEC-61850 compliant inverter design and preliminary test results.* 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). IEEE, 2016.

49. Meyer, Jan, et al. *Future work on harmonics-some expert opinions Part II-supraharmonics, standards and measurements.* 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). IEEE, 2014.

50. Meyer, Jan, et al. *Future work on harmonics-some expert opinions Part II-supraharmonics, standards and measurements.* 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). IEEE, 2014.

51. Meyer, Jan, Stephan Haehle, and Peter Schegner. *Impact of higher frequency emission above 2kHz on electronic mass-market equipment.* Electricity Distribution (CIRED 2013), 22nd International Conference and Exhibition on. IET, 2013.

52. Klatt, Matthias, Jan Meyer, and Peter Schegner. *Comparison of measurement methods for the frequency range of 2 kHz to 150 kHz.* 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). IEEE, 2014.

Energy@home

Energy@home è un'associazione senza fini di lucro che si propone di creare un contesto di collaborazione pre-competitiva per studiare, progettare e sperimentare ***nuovi servizi a valore aggiunto per la Smart Home*** con l'obiettivo di creare nuove opportunità di mercato tramite un "ecosistema aperto" in ambito residenziale che faccia leva sull'efficienza energetica e sulla sinergia cross-settoriale.

L'Associazione è stata fondata nel Luglio 2012 da 4 grandi imprese italiane (Electrolux, Enel Distribuzione, Indesit Company e Telecom Italia) con uno statuto aperto a nuovi associati e – alla data attuale - conta 23 associati che coprono competenze del sistema elettrico (e-Distribuzione, Edison Energia, Power Reply e Clevergy), dell'industria degli elettrodomestici (Indesit Company e Whirlpool), delle telecomunicazioni (Telecom Italia, Vodafone e Deutsche Telekom), del settore assicurativo (Assurant Solutions e EuropAssistance), della micro-elettronica (NXP, Renesas ed ST Microelectronics), della tecnologia degli inverter e dei sistemi di storage (ABB), della domotica (Gewiss), oltre che istituti di ricerca (Istituto Superiore Mario Boella), piccole medie imprese italiane (i-EM, MAC, Gemino e Urmet), e start-up nel settore IoT (Iooota e Reloc).

Founding Members

e-distribuzione · INDESIT company · TIM

Ordinary Members

EDISON · vodafone · Whirlpool EMEA

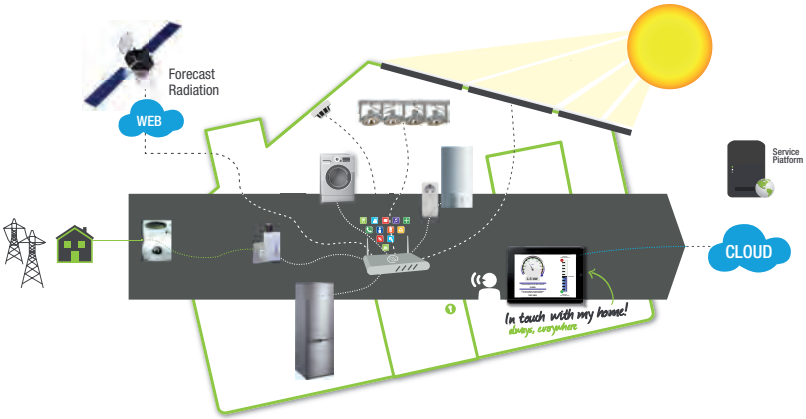
Aggregate Members

ABB · ASSURANT Solutions · clevergy · europ assistance · Gemino · GEWISS · i-EM · IOOTA · ISMB · MAC · NXP · RENESAS · Reply · RELOC · ST · URMET GROUP

Energy@home studia e promuove un ***approccio olistico*** alla Smart Home che vede la possibilità di sfruttare sinergie fra settori industriali diversi dove la comunicazione Internet of Things (IoT) tra i dispositivi in casa è l'abilitatore di ***un-ecosistema aperto*** per fornire ai consumatori nuovi servizi e nuove funzionalità necessarie al monitoraggio e al controllo della propria smart home nonché dei propri consumi elettrici.

L'efficienza energetica - intesa come l'insieme di tutte quelle tecniche, strumenti e servizi che permettono di ridurre i consumi energetici senza impatti sul comfort degli utenti - è un pilastro fondamentale della Smart City, nonché la priorità indicata nella Strategia Energetica Nazionale e una delle misure segnalate per raggiungere crescita economica ed occupazionale. La trasformazione del sistema energetico in Italia ed in Europa, necessaria per garantire la de-carbonizzazione e la sicurezza energetica, richiede che la rete diventi più intelligente – la parola chiave è "Smart Grid".

In tale contesto, Energy@home si focalizza sul consumatore finale (inteso come smart prosumer: consumatore e produttore di energia elettrica), puntando a contribuire nel breve termine allo sviluppo di un mercato di ***servizi a valore aggiunto post-contatore***. Servizi che consentano l'utilizzo efficiente dell'energia tramite un sistema che, comunicando direttamente con il contatore elettrico, possa rendere disponibili i dati del contatore medesimo agli elettrodomestici, all'utente finale e ai service provider da questi autorizzati.



Nel medio termine, inoltre, Energy@home punta a stimolare la creazione di un nuovo mercato per i servizi di ***flessibilità*** (la cosiddetta demand response), servizi grazie ai quali il consumatore potrà rendere disponibile una quota di energia o di potenza flessibile a fronte di segnali di prezzo e di specifica remunerazione per la variazione del carico. In altre parole, il consumatore avrà l'opportunità di modificare i propri consumi di energia elettrica, riducendoli o incrementandoli in modo sia automatico sia manuale, in base all'andamento del prezzo (orario o istantaneo) dell'energia e dell'eventuale propria produzione da fonte rinnovabile.

Per raggiungere un simile risultato, è imprescindibile da un lato dotare gli apparecchi elettrici di un'intelligenza superiore e della capacità di comunicare con gli altri elementi dell'ambiente domestico, dall'altro fornire al consumatore nuovi strumenti che consentano di utilizzare al meglio (in modo più conveniente e ecologicamente sostenibile) i propri elettrodomestici e che possano stimolare il raggiungimento di comportamenti virtuosi o, almeno, limitare quei comportamenti errati che portano a sprechi ed inefficienze.

Si ritiene che tali servizi richiederanno anche una nuova ***regolazione*** del mercato dell'energia che possa coinvolgere attori in grado di gestire la nuova flessibilità della domanda, assicurando ad essa una remunerazione equa e la disponibilità di dati di misura, opportunamente certificati e utilizzabili in modo efficace. In tal senso Energy@home si è organizzato con un gruppo di lavoro dedicato allo studio delle consultazioni pubbliche della Autorità per l'Energia in modo da poter elaborare risposte rivolte a evidenziare il valore dei dati come abilitatore di nuovi servizi mediando opportunamente fra i requisiti dei diversi stakeholder del sistema.

Per creare un ecosistema tecnologico ricco e aperto, l'Associazione Energy@home ha adottato e promosso un approccio di ***"open innovation"***, accreditandosi come luogo privilegiato di incontro di idee ancora prima che di soluzioni. Più volte, questo patrimonio di idee è stato offerto all'esterno, attraverso le attività di standardizzazione internazionale, la partecipazione alle consultazioni pubbliche dell'Autorità per l'energia, l'organizzazione di seminari.

L'Associazione Energy@home si propone quindi di studiare, "promuovere, sviluppare e diffondere" soluzioni tecniche "per l'efficienza energetica nell'ambito domestico, per un più vantaggioso ed economico utilizzo degli elettrodomestici tramite nuove tecnologie di comunicazione" (art. 2 dello Statuto). L'obiettivo è di utilizzare le nuove tecnologie informatiche ed elettroniche per rendere l'ambiente domestico un eco-sistema di dispositivi che comunicano fra di loro: il contatore elettrico, gli elettrodomestici, l'impianto elettrico, la rete di telecomunicazioni a banda larga, impianti privati di energia da fonti rinnovabili e di accumulo temporaneo, dispositivi di sicurezza e di home automation. La comunicazione, infatti, permette a tali dispositivi di integrarsi in modo intelligente, riducendo gli sprechi, aumentando il grado di affidabilità e sicurezza del sistema energetico domestico e fornendo ai consumatori maggiori informazioni e potere di scelta. È quindi necessario un approccio multisettoriale e multidisciplinare, per progettare dispositivi intelligenti e capaci di comunicare fra di loro per ottimizzare il proprio funzionamento in modo coordinato.
L'attività associativa si sviluppa attraverso gruppi di lavoro, progetti interni di specifica, progettazione e sperimentazione, workshop periodici, partecipazione a fiere e convegni, nonché studi curati dalla Associazione e commissionati a esperti esterni. L'approccio generale tende ad evitare lo sviluppo di nuovi standard preferendo invece l'analisi degli standard esistenti per identificarne i più adeguati e, laddove necessario, tramite una gap analysis, per estenderli a coprire i requisiti dei servizi e casi d'uso di Energy@home.
Lo studio oggetto di questa monografia e stato realizzato nell'ambito delle attivita del GdL "Servizi basati sul meter2G" con la compartecipazione di delegati di 13 aziende.

Maggiori informazioni sul sito istituzionale

www.energy-home.it

07

FRA I PRINCIPALI RISULTATI OTTENUTI IN QUESTI PRIMI 4 ANNI DI ATTIVITÀ SI RICORDANO I SEGUENTI:

- **Casi d'uso:** documento di specifica integrato nel report IEC 62746-2 di IEC-TC57 che riporta tutti i casi d'uso europei e sottomesso al Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI) per indirizzare la definizione di un protocollo standard per la comunicazione tra misuratore di energia elettrica di nuova generazione e dispositivi del cliente finale

- **Modello dei dati:** documento di specifica di un modello dati per la Smart Home indipendente dal protocollo di trasporto. Il modello estende gli standard IEC Common Information Model e IEEE P2030.5 ed è disponibile sul sito web della Associazione in formati UML, WADL e XSD. Il modello è stato integrato con la ontologia europea SAREF e con lo Smart Home Device Template di HGi.

- **Protocollo:** i casi d'uso e il modello dei dati sono stati istanziati nella specifica ZigBee Home Automation 1.2, uno standard internazionale sviluppato in collaborazione fra Energy@home e ZigBee Alliance. E' in corso di preparazione anche una specifica instanziata sul protocollo WiFi.

- **Consultazioni:** Energy@home ha risposto alle consultazioni pubbliche della Autorità per l'Energia Elettrica, il Gas e il Sistema Idrico concernenti le tecnologie e le modalità di messa a disposizione dei dati di consumo elettrico ai clienti finali. Nelle consultazioni la Associazione ha cercato di rappresentare gli interessi delle aziende associate e di evidenziare il valore dei dati come abilitatore di nuovi servizi

- **JEMMA:** un progetto Open Source che implementa le specifiche Energy@home e semplifica lo sviluppo di applicazioni basate sulla comunicazione fra dispositivi IoT

- **Progetti pilota:** le aziende della Associazione Energy@home hanno utilizzato le specifiche tecniche in diversi progetti pilota europei che hanno coinvolto oltre 600 consumatori. Il progetto pilota italiano ha evidenziato la semplicità d'uso delle tecnologie e dei dispositivi connessi di Energy@home e la efficacia nel produrre significative riduzioni di consumo elettrico (circa 9%)

- **Smart Home Hackathon:** a Novembre 2014 Energy@home ha organizzato una Hackathon che ha visto la partecipazione di 115 concorrenti e la realizzazione di idee e prototipi di servizio basati su JEMMA

Energy@home

COMUNICAZIONE POWER LINE PER SERVIZI POST-CONTATORE

Caratterizzazione e analisi della PLC in banda C

Autore: Marco Raugi – Università di Pisa
A cura di: Associazione Energy@home

www.energy-home.it

Associazione Energy@home

Energy@home è un'associazione senza fini di lucro che si propone di creare un contesto di collaborazione pre-competitiva per studiare, progettare e sperimentare nuovi servizi a valore aggiunto per la Smart Home con l'obiettivo di creare nuove opportunità di mercato tramite un "ecosistema aperto" in ambito residenziale che faccia leva sull'efficienza energetica. Energy@home studia e promuove un approccio olistico alla Smart Home che vede la possibilità di sfruttare sinergie fra prodotti e dispositivi diversi dove la comunicazione Internet of Things tra i dispositivi in casa è l'abilitatore di un-ecosistema aperto per fornire ai consumatori nuovi servizi e nuove funzionalità necessarie al monitoraggio e al controllo della propria smart home nonché dei propri consumi elettrici. Per creare un ecosistema tecnologico ricco e aperto, l'Associazione Energy@home ha adottato e promosso un approccio di "open innovation", accreditandosi come luogo privilegiato di incontro di idee ancora prima che di soluzioni. Più volte questo patrimonio di idee è stato offerto all'esterno, attraverso le attività di standardizzazione internazionale, la partecipazione alle consultazioni pubbliche dell'Autorità per l'energia, l'organizzazione di seminari.

Founding Members

e-distribuzione · INDESIT company · TIM

Ordinary Members

EDISON · vodafone · Whirlpool EMEA

Aggregate Members

ABB · ASSURANT Solutions · clevergy Gruppo innowatio · europ assistance you live we care

Gemino · GEWISS · i-EM · ICOTA

ISMB Istituto Superiore Mario Boella · MAC srl · NXP · RENESAS

Reply · RELOC DESIGN & INTEGRATION · ST life.augmented · T... · URME T|GROUP

TECHNICAL CONTACT:
secretariat@energy-home.it

LINKED-IN NEWSGROUP:
http://goo.gl/63hAPq

For more information visit our web site
www.energy-home.it