

ENERGY-HOME.IT



Marco Raugi



Università di Pisa

*Dept. Of Energy, Systems, Territory
and Construction Engineering*

Caratterizzazione e Analisi della comunicazione PLC in banda C

Obiettivo

Caratterizzare la banda C ai fini della comunicazione PLC

- **Quadro Normativo**
- **Analisi teorica**
- **Analisi dei dati reperiti in bibliografia e misurazioni**

Quadro Normativo

Norma CEI EN 50065-1

Trasmissione di segnali su reti elettriche a bassa tensione nella gamma di frequenza da 3 a 148,5 kHz

«Cosiddetta» banda C da 125 kHz a 140 kHz

Scopo:

limitare l'interferenza reciproca tra trasmettitori PLC e con le altre apparecchiature.

Non può essere assicurata una completa immunità di tali interferenze

Quadro Normativo

Specificazione di:

- bande di frequenza assegnate alle diverse applicazioni
- i limiti di tensione ai terminali dei dispositivi
- limiti del disturbo condotto e irradiato,
- metodi di misura con cui accertare le interferenze

Non Specificazione di:

- metodi di modulazione
- metodi di codifica
- prescrizioni ambientali

Quadro Normativo

Usi consentiti:

- applicazioni analogiche e digitali all'interno di abitazioni, utenze commerciali o industriali
- controllo e monitoraggio di apparecchiature installate o collegate alla rete pubblica di distribuzione elettrica esterna alle utenze

Quadro Normativo

Le apparecchiature sono distinte in due classi

Classe 122

adatte all'uso generale

Classe 134

riservate solo all'ambito industriale e non applicabili 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 è prescritto il livello massimo di trasmissione che non deve superare 122 dB(μ V)

Quadro Normativo

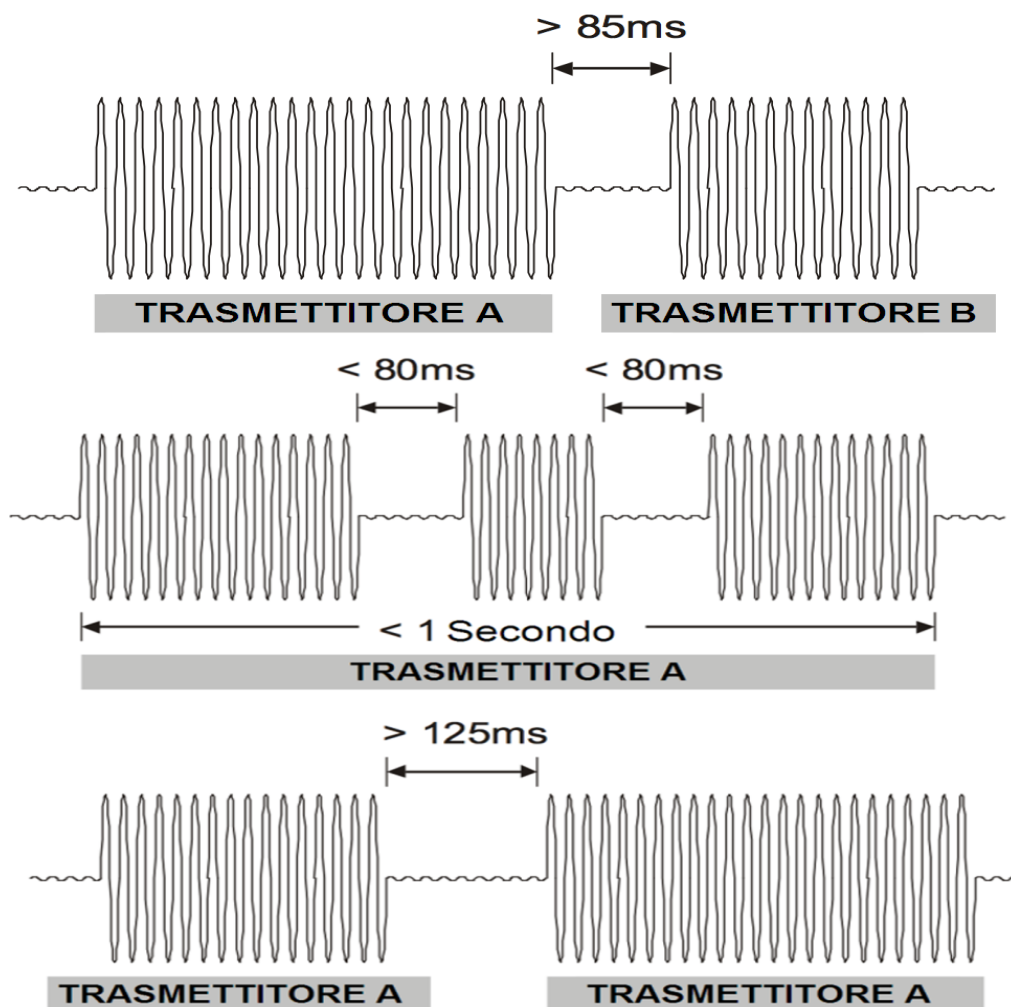
Protocollo di accesso CSMA/CA per la banda C

Sistema per consentire a diversi dispositivi di funzionare sulla stessa rete o su reti collegate elettricamente tra di loro

- Più apparecchiature possono utilizzare lo stesso canale di trasmissione solamente una alla volta.
- La presenza di un segnale in rete con intensità oltre un livello minimo di 86 dB(μ V) indica che il canale è occupato. 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.

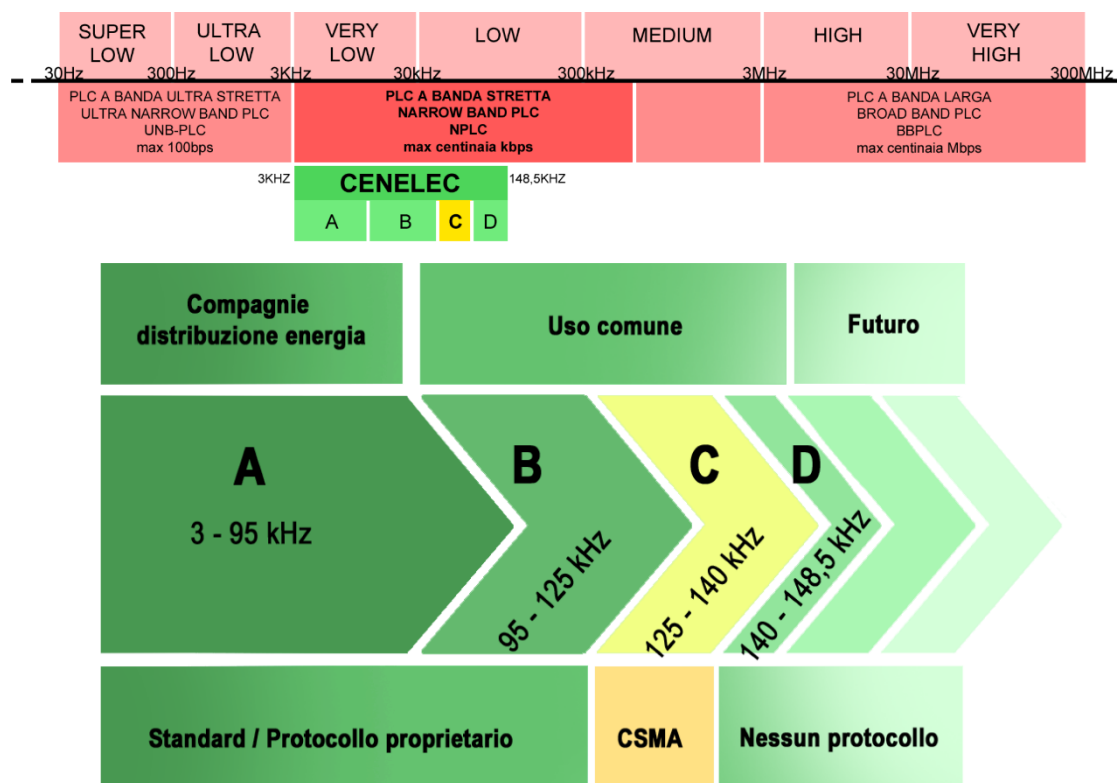
Quadro Normativo

Protocollo di accesso CSMA/CA per la banda C



Quadro Normativo

Protocollo di accesso CSMA/CA per la banda C



Quadro Normativo

Vincoli di emissione e di interferenza per altre bande

Il capitolo 7 prescrive i limiti di disturbo, condotto e irradiato, per le apparecchiature trasmettenti relativi a frequenze esterne alla loro banda di funzionamento.

Le apparecchiature in banda C devono quindi rispettare limiti di disturbo, relativi a
disturbi condotti per frequenze da 3kHz a 30 MHz,
disturbi irradiati per frequenze da 30 MHz a 1000 MHz

Quadro Normativo

Standard presenti per la trasmissione nelle bande CENELEC

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, PRIME (Powerline Related Intelligent Metering Evolution), dal 2008 G3-PLC, sviluppato da G3-PLC Alliance dal 2009 SMITP (Smart Metering Information and Telecommunication Protocols) sviluppato dalla Meters and More Association

Quadro Normativo

Standard presenti per la trasmissione nelle bande CENELEC

Successivamente le più importanti associazioni internazionali di settore (IEEE e ITU-T) hanno prodotto propri standard 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'espansione di questo mercato

Quadro Normativo

Standard che operano in banda C

ITU-T G.9902

SMITP

G3-PLC

Analisi teorica

Bitrate

La capacità teorica della banda C si esprime in funzione del rapporto tra potenza di segnale S e del rumore N e della larghezza di banda B attraverso il teorema di Shannon–Hartley

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

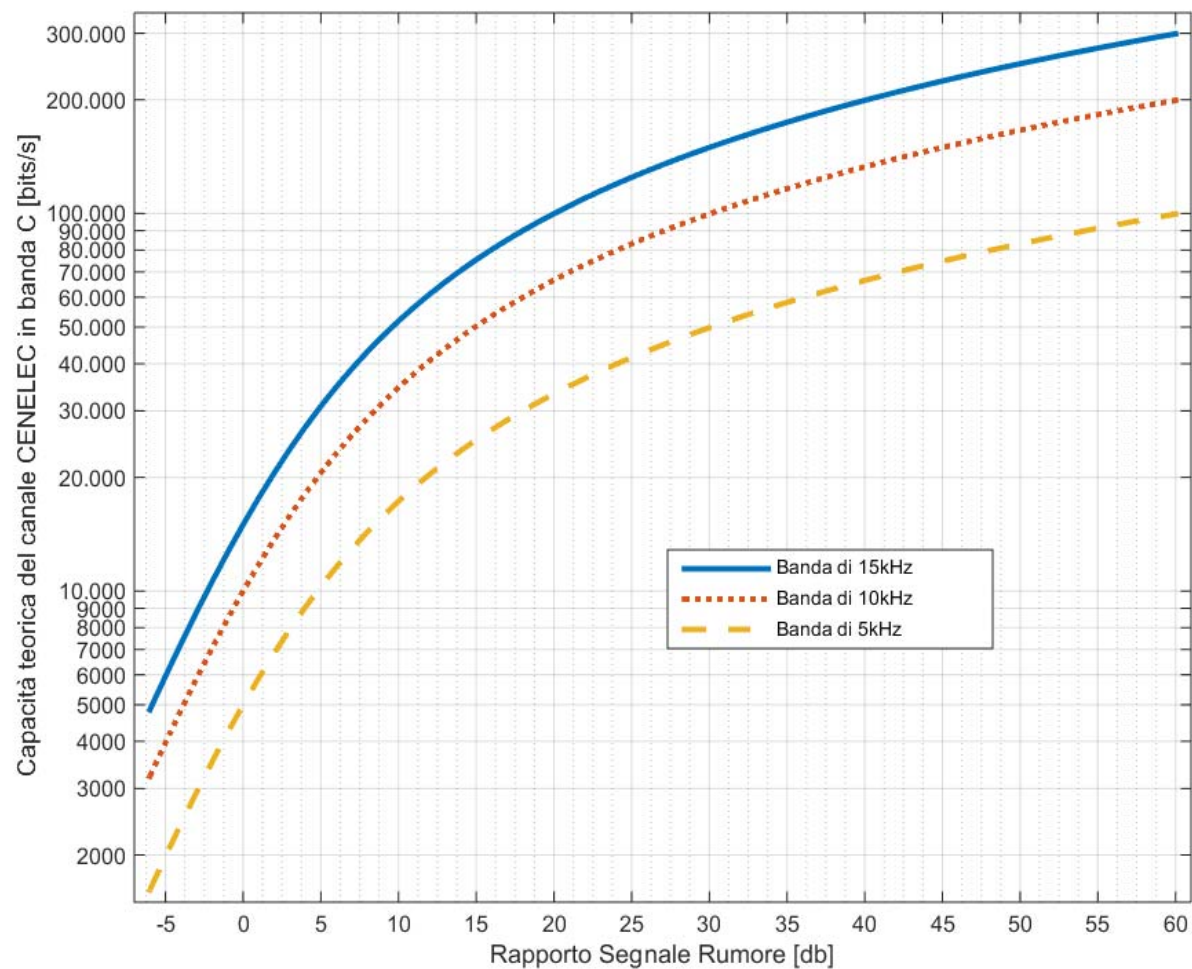
Ipotesi semplificative:

S e N potenze medie, quindi S/N costante su B

C dipende significativamente da S/N oltre che da B

Analisi teorica

Bitrate



Analisi teorica

Bitrate

Normalmente la capacità teorica della banda esprime un limite massimo non raggiungibile dai bitrate tipici della maggior parte dei modem disponibili in commercio.

Solo pochi tra i modem esistenti dichiarano esplicitamente le loro prestazioni teoriche (nominali) in banda C

Tra questi si può segnalare il ST7580 che può operare con velocità nominali variabili tra 2.40 e 28.8 Kbit/sec.

Questa variabilità è determinata dal tipo di codifica (modulazione) effettuata per trasmettere il segnale

Analisi teorica

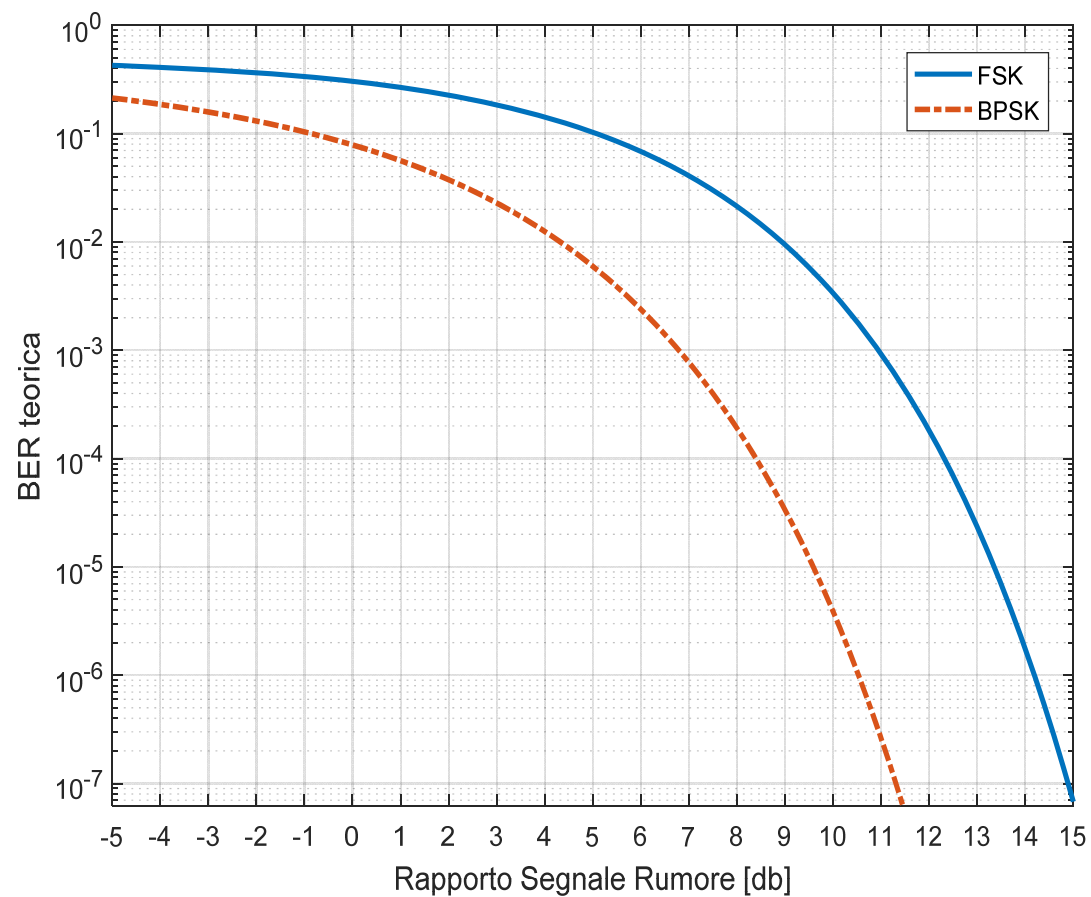
Bit Error Rate (BER)

La probabilità teorica di errore BER si esprime per una certa modulazione in funzione del rapporto tra potenza di segnale S e del rumore N

$$BER_{FSK} = \frac{1}{2} e^{-\left(\frac{S}{2N}\right)} \quad BER_{BPSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{S}{N}}\right)$$

Analisi teorica

Bit Error Rate (BER)



Analisi teorica

Bit Error Rate (BER)

La figura riporta il BER in caso di un rumore gaussiano a distribuzione costante sulla banda utilizzata.

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

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.

Dati accessibili in bibliografia

Attenuazione

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

- Dal lato bassa tensione della cabina di trasformazione Mt/bT ad un contatore identificativo di un impianto privato
- Tra due punti (tipicamente due prese elettriche) all'interno di un impianto domestico servito da un quadro primario.

Dati accessibili in bibliografia

Attenuazione

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

L'attenuazione dovuta a singolo cavo viene riportata con valori tipici di 1dB/Km e non risulta quindi fattore particolarmente significativo

Risulta invece significativa l'influenza sull'attenuazione del numero di diramazioni che dal cavo primario si collegano agli edifici. La dipendenza tra attenuazione e distanza dal trasmettitore in presenza di un certo numero di edifici per Km è quasi lineare in dB tipo:

- 30 edifici/Km attenuazioni di 30dB+5 dB/Km,
- 50 edifici/Km attenuazioni di 70dB+10db/Km,
- 80 edifici/Km attenuazioni di 110dB+15dB/Km.

Dati accessibili in bibliografia

Attenuazione

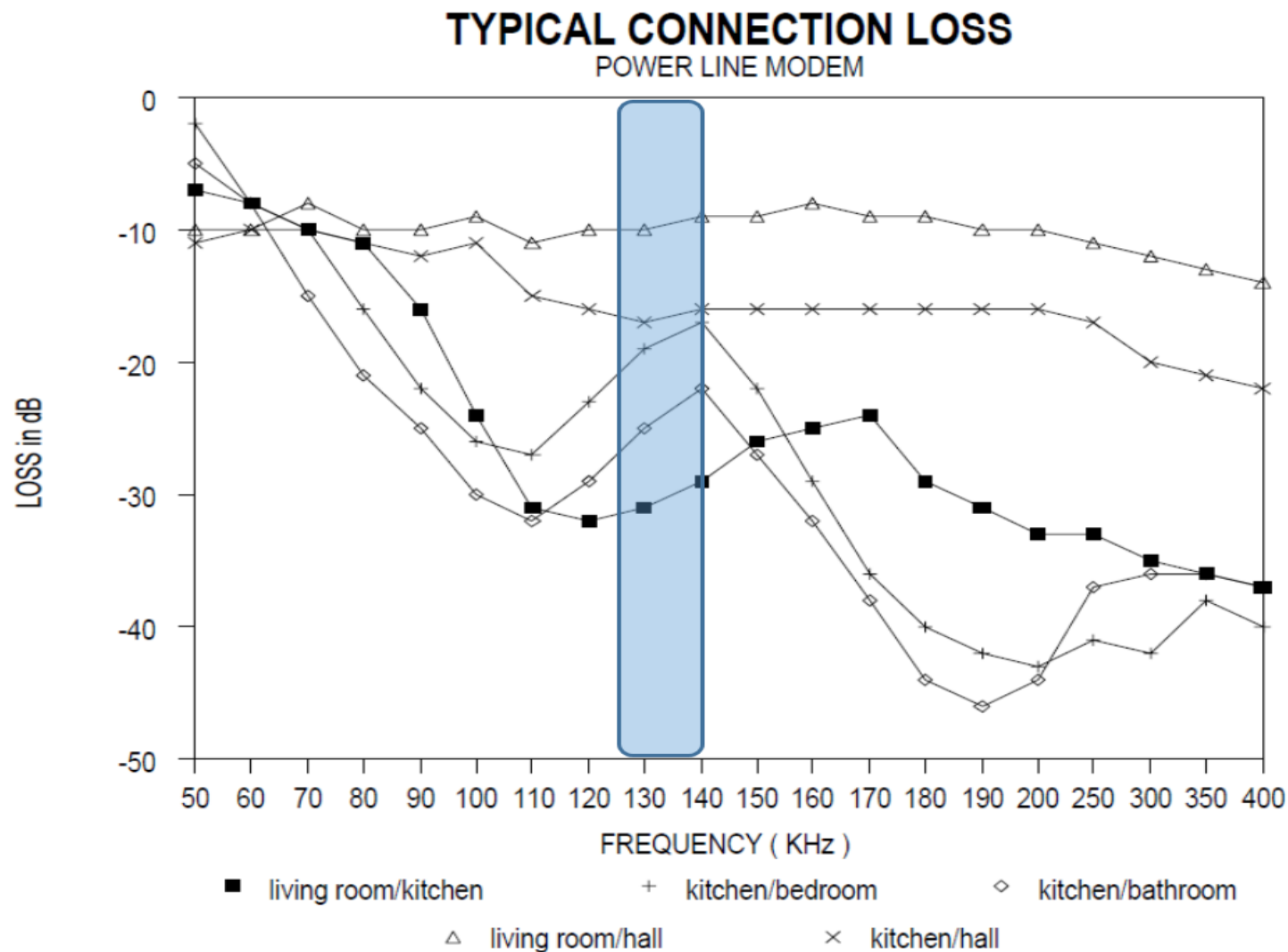
- Tra due punti (tipicamente due prese elettriche) all'interno di un impianto domestico servito da un quadro primario

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).

La distanza trasmettitore ricevitore sembra incidere marginalmente e l'attenuazione appare attribuibile principalmente alla eventuale presenza di un quadro elettrico tra trasmettitore e ricevitore

Dati accessibili in bibliografia

Attenuazione



Dati accessibili in bibliografia

Attenuazione

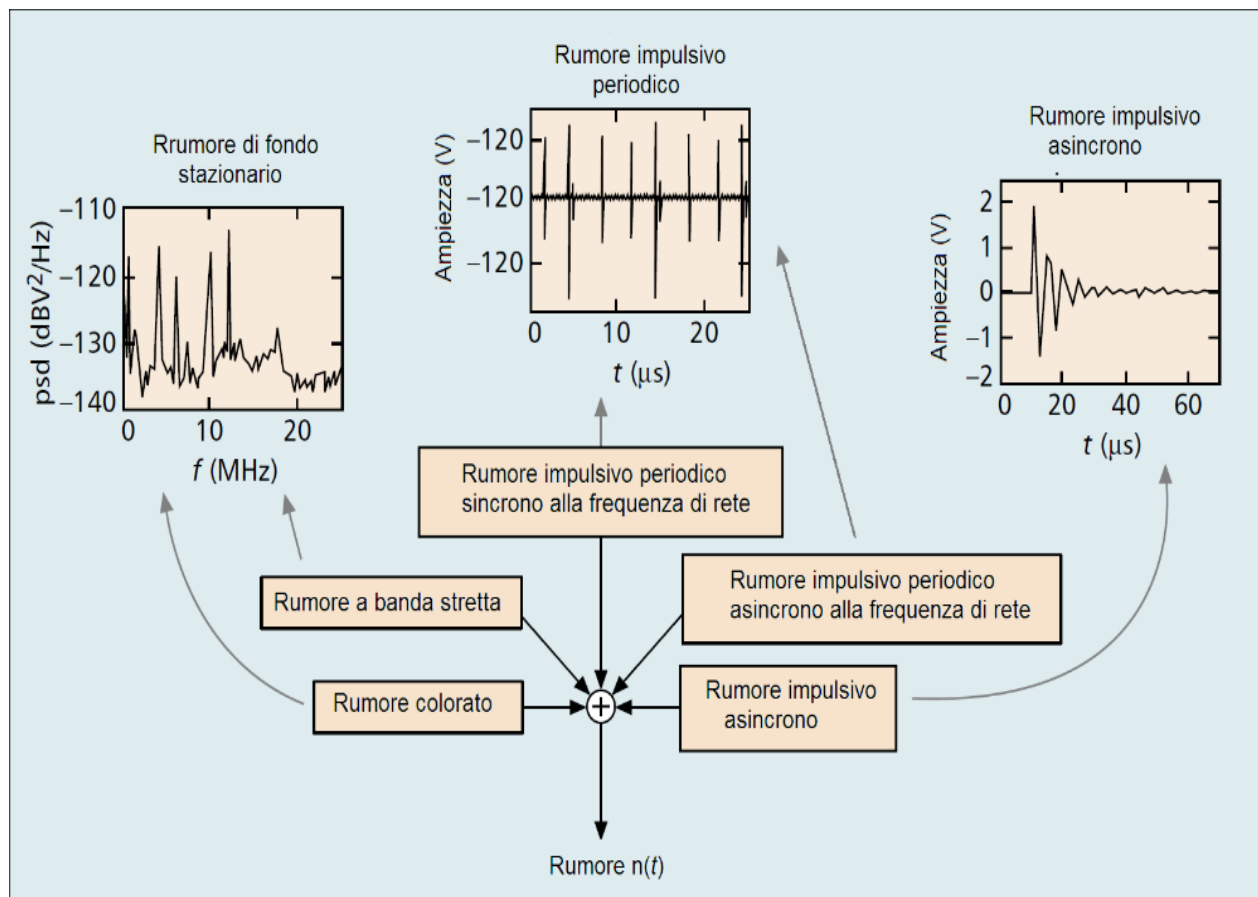
Attraverso una serie di misurazioni effettuate in diversi ambiti nazionali si può concludere che in genere l'impedenza d'accesso in reti domestiche è molto bassa (ha sempre carattere induttivo e che la sua parte reale non eccede i 3Ω).

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.

Da un punto di vista quantitativo si può confermare che si possa mediamente considerare, in Europa e per questa tipologia di collegamento domestico, l'escursione dell'attenuazione media in $20 \pm 10\text{dB}$

Dati accessibili in bibliografia

Rumore



Dati accessibili in bibliografia

Rumore

Si può ritenere che le componenti dominanti di rumore per le NB-PLC (quindi anche quelle in banda C) sono correlate a:

1. Rumore periodico asincrono alla frequenza di rete. Dovuto all'azione prolungata di alimentatori switching diffusi in vari domestici elettrodomestici odierni
2. Rumore periodico sincrono alla frequenza di rete. Dovuto a raddrizzatori all'interno di alimentatori DC, elettrodomestici e regolatori di luminosità

E' convinzione diffusa che fonti più significative di disturbi siano:

- i dispositivi di regolazione dei punti luminosi
- gli alimentatori a commutazione, presenti in numerosi dispositivi elettronici come ad esempio i PC

Dati accessibili in bibliografia

Rumore

- gli alimentatori a commutazione, presenti in numerosi dispositivi elettronici come ad esempio i PC

I convertitori elettromagnetici, con 70dBuV immessi nella banda C, sono in genere più rumorosi di quelli elettronici (50 dBuV)

Misure di rumore per gli alimentatori con convertitori AC/DC, in modalità switching con correzione attiva del fattore di potenza (active PFC), come gli alimentatori dei PC, riportano valori dell'ordine di circa 60 dBuV -70 dBuV

.

Dati accessibili in bibliografia

Rumore

- i dispositivi di regolazione dei punti luminosi

Misure del rumore generato da regolatori di lampade fluorescenti mostrano valori nella banda C intorno ai 90 dBuV. Maggiori rispetto a quelli delle lampade ad alogenuri metallici.

Si nota come questo livello di rumore sia circa 20-30 db inferiore al livello di trasmissione ammesso in banda C (122 dBuV)

Dati accessibili in bibliografia

Rumore

Misure di rumore effettuate su reti domestiche sono reperibili in reti di distribuzione di paesi con caratteristiche topologiche, di frequenza e di modalità distributive diverse tra loro come Cina, Brasile, USA, Germania, Francia, Tunisia, Svezia, Giappone e Italia.

Non è stato invece reperito in bibliografia alcun dato di rumore, in banda C, rilevato su reti di distribuzione in Italia.

Misure del livello tipico del rumore di fondo variano molto in letteratura, anche di decine di decibel, per esempio si riportano valori di circa 50 dBuV in Francia, mentre si riportano valori intorno a 20 dBuV e di 40 dBuV , entrambi in Germania

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

Dati accessibili in bibliografia

Rapporto Segnale/Rumore

Considerando di trasmettere i segnali alla massima potenza ammissibile dalla norma:

Estrapolando i dati disponibili non si può escludere che i rumori prodotti da 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, anche minore di 0 dB e quindi possano 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 sia in termini di velocità di trasmissione che di BER

Dati accessibili in bibliografia

Prestazioni

La caratterizzazione del canale PLC nelle bande CENELEC è trattata in maniera abbastanza ampia in letteratura, 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.

La G3-PLC Alliance 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.

Dati accessibili in bibliografia

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 nei 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 tempo variante, ed in questo caso le prestazioni degradano.

Dati accessibili in bibliografia

Prestazioni

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.

Il rumore misurato in banda C in ambito domestico include tutte le tipologie descritte precedentemente, ed è quindi fortemente tempo variante.

E' quindi lecito aspettarsi prestazioni della comunicazione, in termini di velocità e di corretta ricezione dei segnali, variabili nel tempo

Dati accessibili in bibliografia

Prestazioni

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.

Protocollo d'accesso

Condivisione di banda

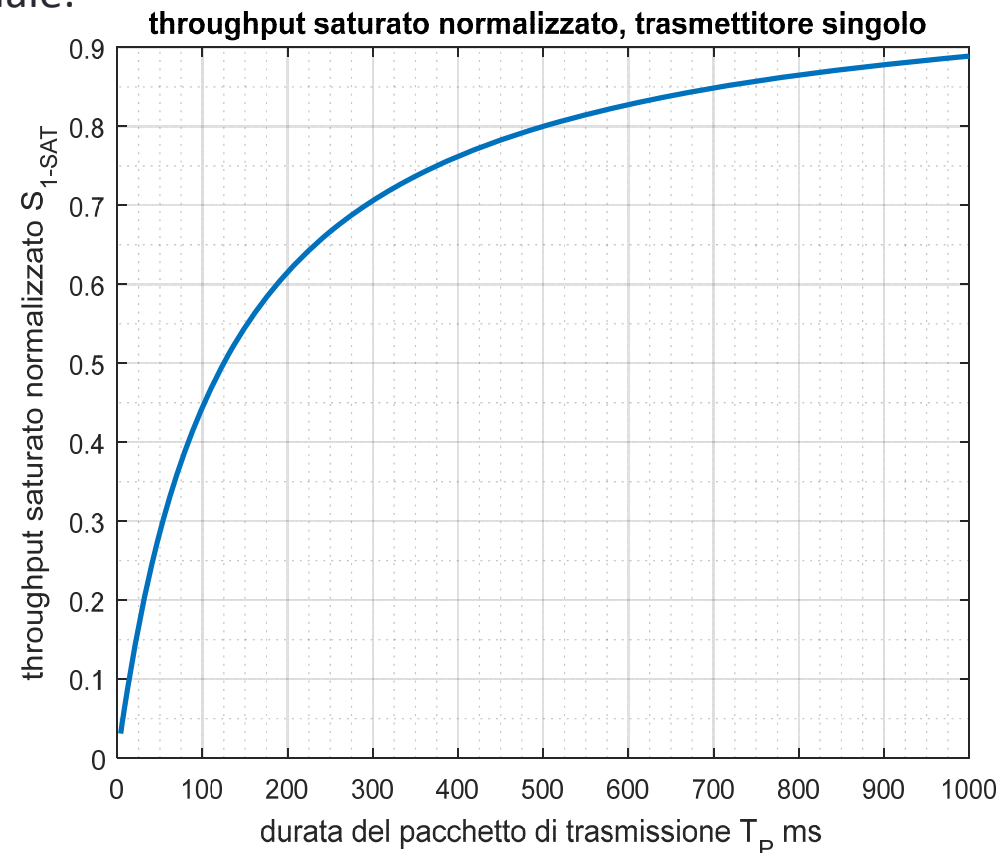
In letteratura non sono disponibili studi delle prestazioni del protocollo CSMA/CA in applicazioni in banda C. Le considerazioni che seguono sono correlate ad alcune situazioni possibili nell'applicazione del protocollo CSMA/CA al caso descritto dalla norma

Protocollo d'accesso

Throughput di singolo trasmettitore

in condizione di massima occupazione del canale, "throughput saturato". E' possibile stimare un indice di utilizzo del canale, o "throughput saturato normalizzato" ($T_i=115$ msec) come il rapporto tra tempo di effettiva trasmissione e il tempo totale di occupazione del canale:

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

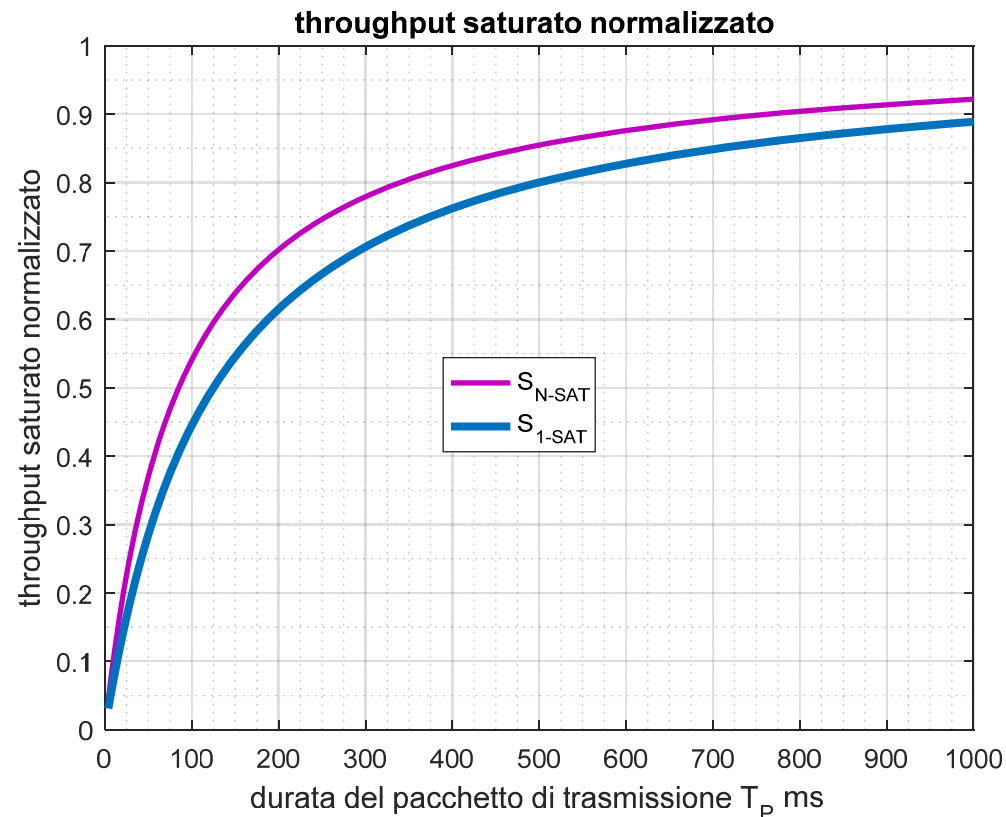


Protocollo d'accesso

Throughput di N trasmettitori

ogni trasmettitore attende un tempo casuale compreso tra 85ms e 115ms prima di trasmettere. Nel caso ideale di assenza di collisioni il throughput normalizzato saturato ($T_i=85\text{msec}$) è:

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



Protocollo d'accesso

Throughput di N trasmettitori

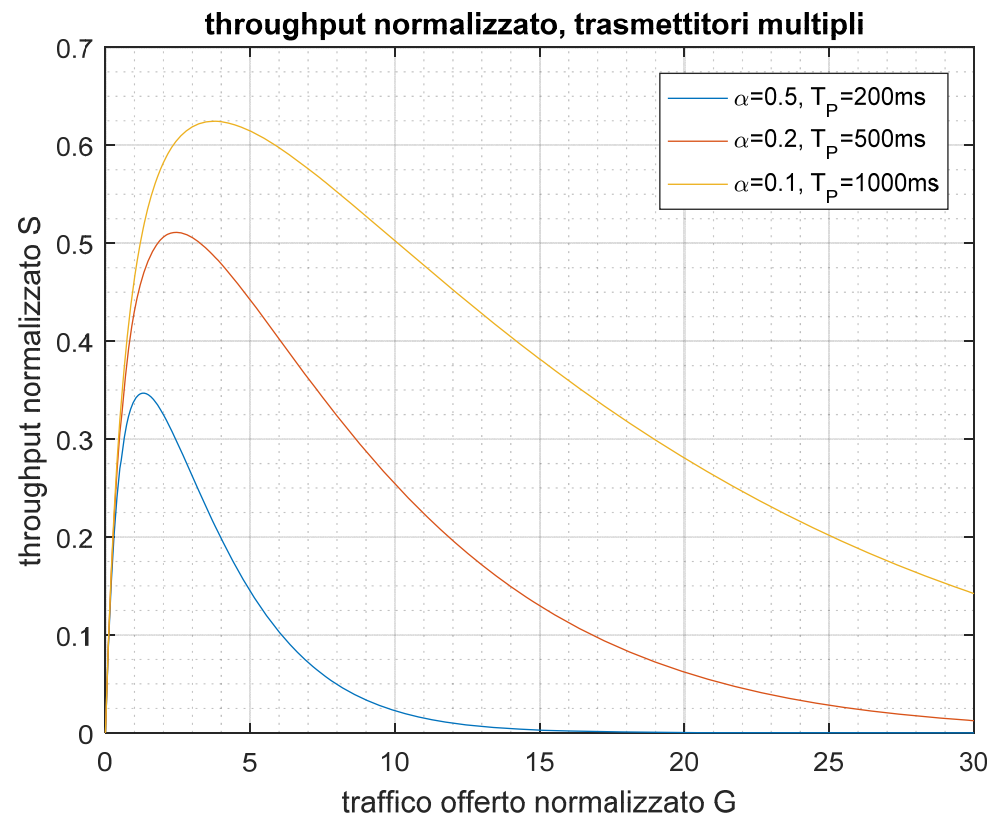
Consideriamo ora l'insieme di dati da trasmettere, detto anche "traffico offerto" normalizzato G .

In generale G potrebbe essere molto maggiore del throughput effettivo e le collisioni avere un effetto non trascurabile sul throughput.

Protocollo d'accesso

Throughput di N trasmettitori

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



Throughput normalizzato per un numero $N \gg 1$ di trasmettitori, in funzione della durata del pacchetto di trasmissione T_p e del traffico normalizzato.

Protocollo d'accesso

Throughput di N trasmettitori

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

Se $T_p=0,150\text{sec}$, $T_i=0,085\text{sec}$, $\alpha = 0,56$, $\lambda=1$

$$G_1 = T_p * \lambda = 0,150$$

$$N=50, G=0,150*50=7,5$$

$$S=0,2$$

Protocollo d'accesso

Latenza

Nella ipotesi in cui ogni trasmettitore debba trasmettere lo stesso traffico $G1$, ed il traffico totale sia maggiore di 1, il tempo di attesa medio tra due trasmissioni consecutive di uno stesso trasmettitore può essere considerato linearmente dipendente dal numero di trasmettitori N .

Nel caso equo in cui dopo una trasmissione un trasmettitore aspetti che abbiano trasmesso tutti gli altri, e che non ci siano collisioni, il tempo di attesa medio è dell'ordine di

$$N(T_s - T) - \frac{1}{\lambda}$$

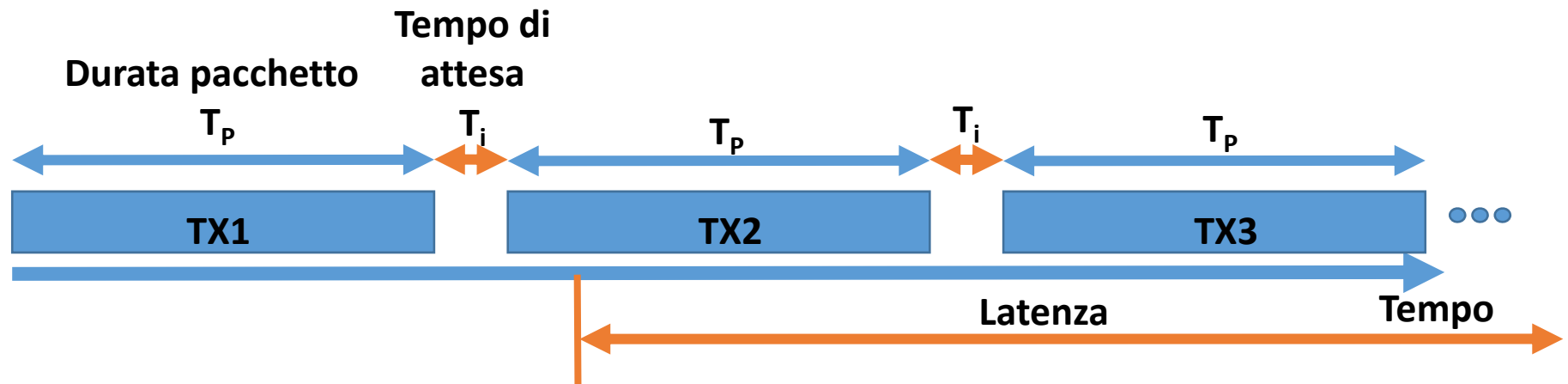
dove λ è il packet rate medio in pacchetti al secondo di un singolo trasmettitore.

Protocollo d'accesso

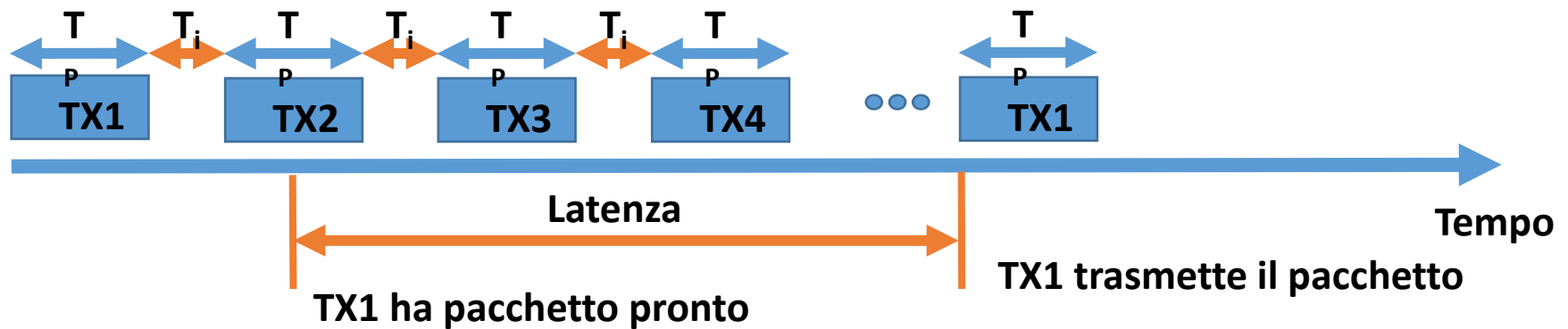
Latenza

Per dare una indicazione numerica generica, nell'ipotesi in cui $\lambda = 1$ (ovvero i trasmettitori inviano un pacchetto ogni sec), $N=50$ (numero di trasmettitori), $T_s = 150ms$ $T = 100ms$ (tempo tra due trasmissioni di trasmettitori diversi = 0,25sec), ogni trasmettitore deve aspettare circa 11,5 secondi in più rispetto al momento in cui ha un pacchetto pronto per la trasmissione

Trasmissione ad alto throughput e alta latenza



Trasmissione con bassa latenza e basso throughput



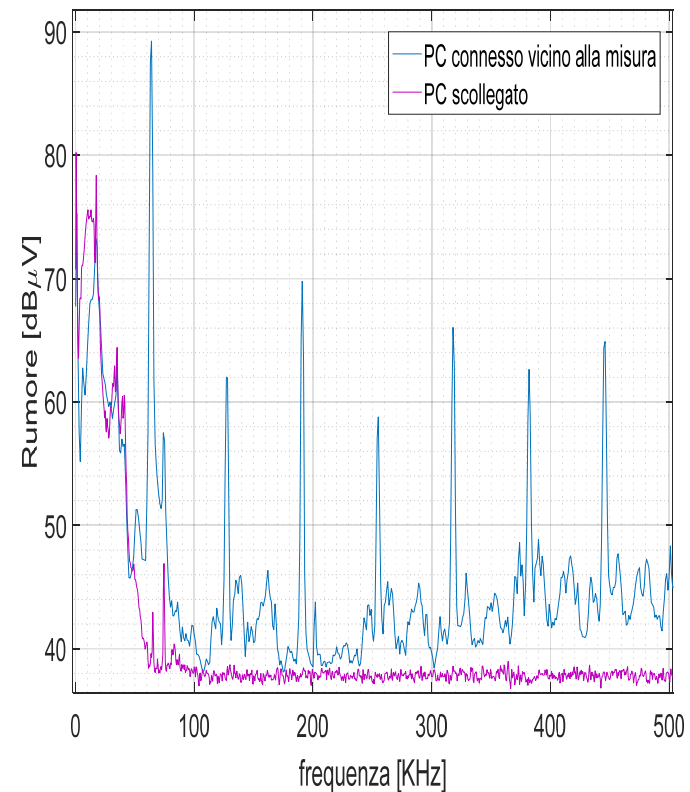
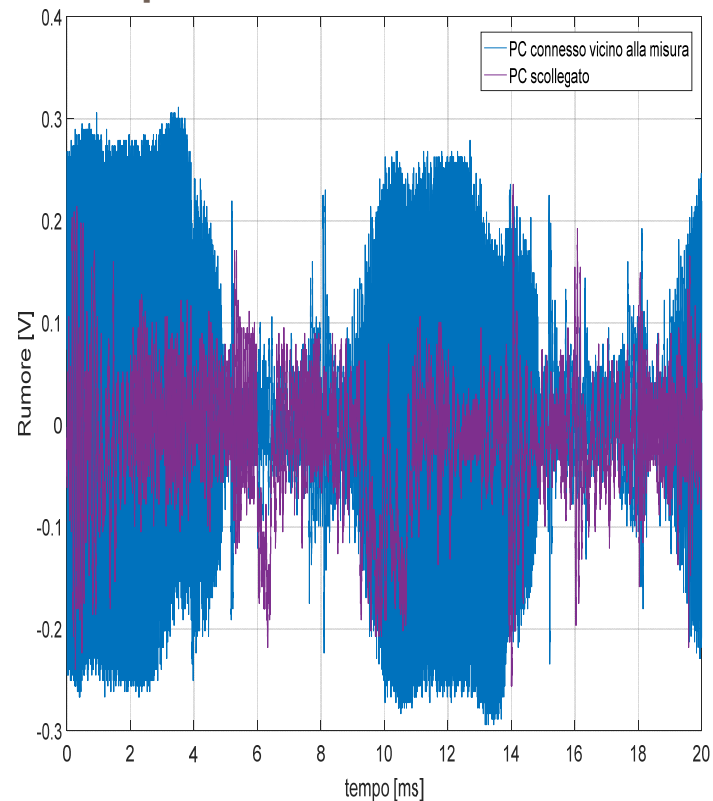
Misurazioni

Rumore presso locali DESTEC

Le misure, effettuate danno un'indicazione del rumore da cui sarebbe interessato un certo punto dell'impianto, 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.

Misurazioni

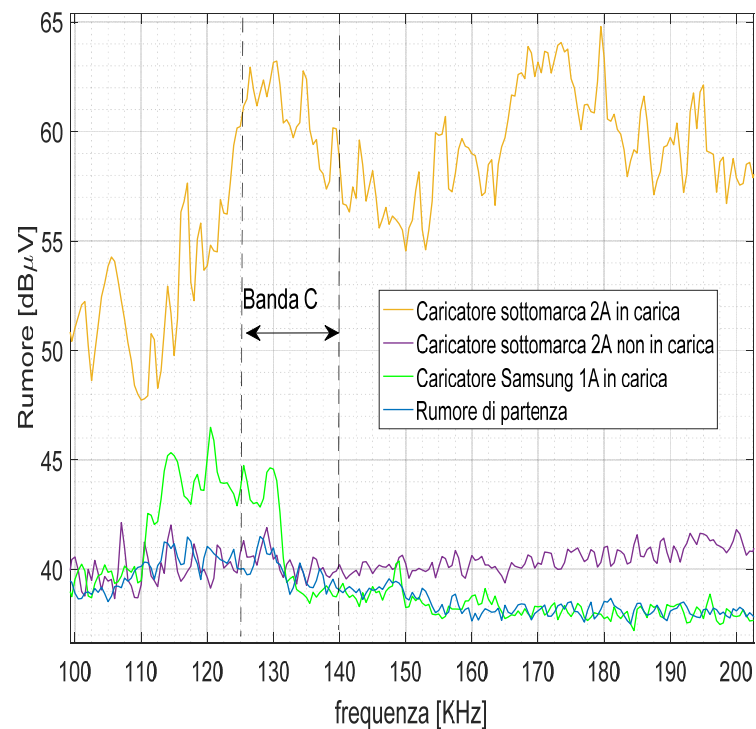
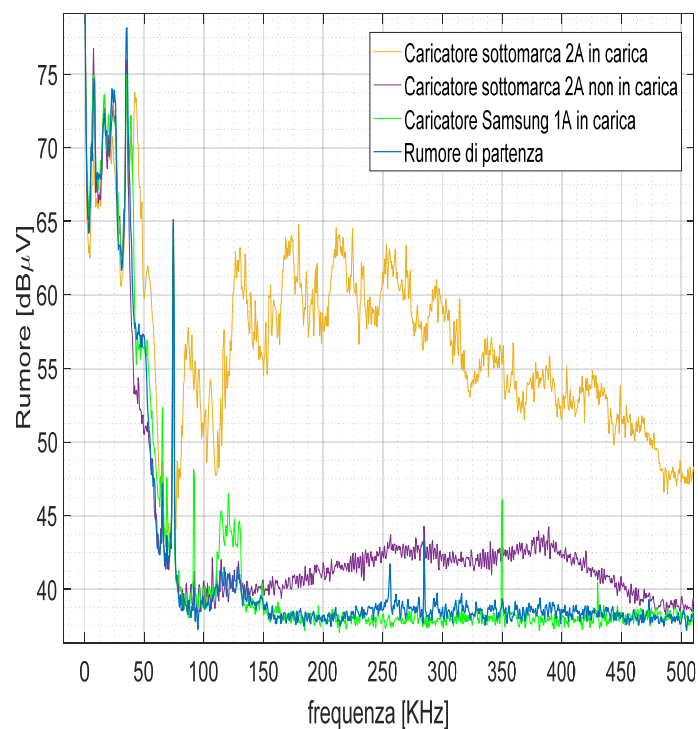
Rumore presso locali DESTEC



Rumore nel dominio del tempo e frequenza 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

Misurazioni

Rumore presso locali DESTEC



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

Conclusioni

- Le considerazioni illustrate si basano prevalentemente su considerazioni teoriche e su estrapolazione di dati reperiti in bibliografia.
- Si possono ipotizzare scenari favorevoli e casi critici per la comunicazioni in banda PLC-C
- Sarebbe quindi opportuno estendere e verificare sperimentalmente in modo statisticamente significativo i dati per una analisi affidabile delle caratteristiche e delle potenzialità di comunicazione della PLC-C