

# **MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR**

**Prof. G. A. Casula**

**Dept. of Electrical and Electronic Engineering, University of Cagliari, Cagliari, Italy**

Le telecomunicazioni costituiscono inconfutabilmente una fondamentale risorsa per lo sviluppo sociale, economico, politico, militare e tecnologico del mondo e della civiltà moderna.

Esse sono caratterizzate dal trasferimento dell'informazione mediante la propagazione di segnali in mezzi cablati, o in un canale radio.

La propagazione del segnale nell'etere è un fenomeno alquanto complesso da analizzare, poiché è necessario considerare vari fattori che lo possono contraddistinguere.

Il fulcro dell'analisi consiste nello studio dell'attenuazione quale funzione:

- della distanza fra trasmettitore e ricevitore
- degli ostacoli frapposti
- dell'ambiente di propagazione

che inevitabilmente modificano le proprietà del segnale in ricezione.

Nel caso in cui le antenne siano posizionate ad altezze notevoli e non vi sia alcun ostacolo fra trasmettitore e ricevitore si è in condizioni ideali di spazio libero, in cui l'attenuazione è dovuta unicamente alla distanza del collegamento, e incrementa al crescere della frequenza.

Decrementando l'altezza delle antenne, si considerano invece casi reali, quale la propagazione in ambiente urbano, caratterizzata da una forte dipendenza della attenuazione dall'ambiente in cui il segnale nel suo cammino varia per una moltitudine di fenomeni, tra cui:

- il multipath (distorsione del segnale che in ricezione giunge sotto forma di repliche sfasate nel tempo)
- la riflessione dalle pareti degli edifici
- la diffrazione dagli spigoli degli stessi
- lo scattering dovuto agli urti atomici fra particelle.

Dalla suddetta distinzione è facilmente intuibile come la propagazione si differenzi per le condizioni di visibilità reciproca fra trasmettitore e ricevitore.

Una situazione di linea di vista diretta (LOS, Line of Sight), che implica la ricezione del segnale secondo un cammino diretto, si contrappone alla condizione di non visibilità diretta (NLOS, None Line of Sight), che prevede il collegamento tramite percorsi compiuti dai raggi riflessi, diffratti e trasmessi dagli ostacoli.

E' necessario sottolineare come in entrambe le casistiche il segnale al ricevitore sia costituito dall'insieme dei cammini che provengono da direzioni e condizioni di visibilità differenti.

Nel primo caso la presenza di un percorso predominante fa sì che il raggio diretto apporti il contributo principale; nel secondo invece le ampiezze sono pressoché simili ed è necessario analizzare proprio l'interazione fra essi.

Si distinguono pertanto due tipologie principali di propagazione, classificate a seconda dell'ambiente e delle caratteristiche specifiche di propagazione delle onde elettromagnetiche negli ambienti in questione:

- **Propagazione outdoor:** il collegamento dei dispositivi è in ambiente aperto. E' necessario tenere in considerazione la forte aleatorietà e le variazioni a cui il segnale è soggetto propagandosi nell'etere, attenuandosi e disperdendosi nelle diverse direzioni. Inoltre l'attenuazione può essere dovuta a fenomeni atmosferici, quali pioggia, nebbia e neve;
- **Propagazione indoor:** il collegamento dei dispositivi avviene in ambiente interno. E' caratterizzata da brevi distanze, basse potenze (dell'ordine dei milliwatt) e bassi rate trasmissivi. Possono essere realizzati collegamenti punto-punto (cable replacement) oppure sistemi diffusivi per l'interconnessione tramite una rete di sensori. Il range di copertura è in ultimo limitato dalle mura esterne degli edifici.

Lo studio della propagazione in ambiente indoor è giustificato dall'importanza che essa ricopre attualmente sia dal lato provider, come motivo di studi e ricerca di soluzioni innovative, che dal lato user, il quale richiede un servizio ottimale, efficiente e rapido.

In seguito all'avvento dei moderni sistemi di comunicazione wireless, infatti, l'interesse scientifico per la propagazione elettromagnetica indoor è cresciuto significativamente, e con esso lo studio del canale di trasmissione e della sua risposta all'impulso.

La larga diffusione di Internet e dei servizi offerti, oramai indispensabili nella quotidianità, e di apparati che consentono la creazione di reti locali negli ambienti domestici, fa sì che persino l'utilizzatore privo di conoscenze tecniche e di preconetti si domandi i motivi di eventuali malfunzionamenti, o che si ingegni al fine di trovare la maniera di rendere il tutto più efficiente.

Verranno prima caratterizzati gli elementi distintivi della propagazione indoor, nell'intento di fornire una panoramica ad ampio spettro per la caratterizzazione del fenomeno.

In seguito ci focalizzeremo sullo studio dei diversi modelli di previsione presenti in letteratura, dai più semplici, denominati empirici, a quelli di elevato onere computazionale, i cosiddetti deterministici.

Infine, eseguiremo un confronto delle prestazioni dei modelli empirici (di onere computazionale contenuto) applicati a scenari reperiti in letteratura, con il fine di dimostrare, nonostante la maggiore semplicità implementativa, una certa accuratezza nella stima dell'attenuazione (Path Loss).

## CLASSIFICAZIONE DEI MODELLI DI PREVISIONE

Per poter effettuare delle stime accurate in merito alla realizzabilità dei collegamenti sono stati teorizzati i modelli di previsione, che evitano costose e lunghe campagne di misura.

Inoltre sono atti a fornire statistiche di fading, la risposta impulsiva del canale e le valutazioni dell'interferenza.

Possono essere un valido supporto indistintamente in fase di progettazione di un sistema di telecomunicazione o di verifica degli obiettivi di qualità e di copertura.

Essi si articolano in:

- Descrizione dell'ambiente di propagazione: modellazione dello scenario e dei parametri caratteristici;
- Descrizione dei meccanismi di propagazione: inerenti all'ambiente considerato, devono essere modellati in maniera opportuna;
- Definizione dei parametri del collegamento: definizione dei parametri delle antenne coinvolte nel collegamento (posizione, potenza emessa, diagramma di radiazione, etc.).

## CLASSIFICAZIONE DEI MODELLI DI PREVISIONE

A seconda dell'ambiente da caratterizzare si può effettuare una scelta fra i modelli di propagazione per un'analisi adeguata.

I modelli di previsione sono così genericamente classificati:

- Empirici: prevedono lunghe campagne di misura per stimare i parametri da utilizzare e sono caratterizzati da semplicità e velocità, ma altrettanta imprecisione. Forniscono solitamente solo valori di attenuazione e richiedono calibrazione a seconda dello scenario in questione. I più noti sono indubbiamente il modello di Okumura-Hata e di Epstein-Peterson;
- Statistici: si servono di pochi parametri e richiedono elaborazioni semplici dei dati in ingresso. Vi è poca accuratezza per via della scarsa adattabilità dei modelli agli scenari di propagazione e la necessità di calibrarne i parametri. E' possibile effettuare previsioni a banda larga e a banda stretta. Tra quelli maggiormente utilizzati si citano il modello di Walfish-Ikegami e il COST 259;
- Semi-deterministici: caratterizzati da semplicità, velocità di utilizzo e limitati tempi di calcolo, che ne denotano poca accuratezza delle previsioni. Sono solitamente atti a previsioni a banda stretta, richiedono calibrazione e utilizzo di pochi parametri topologici e di collegamento. I modelli più in uso sono Berg e Saunders-Bonar;
- Deterministici: sono i più accurati per quanto riguarda la precisione delle previsioni a banda larga e stretta, delle informazioni aggiuntive caratterizzanti la propagazione, dei diagrammi di radiazione delle antenne e non implicano la necessità di calibrazione. Per contro, sono alquanto onerosi computazionalmente per tempi di calcolo, impiego di risorse e memoria, e per la fase di pre-processing per la descrizione del particolare scenario in questione. Il più conosciuto è il Ray Tracing.



## CLASSIFICAZIONE DEI MODELLI DI PREVISIONE

E' interessante definire e enunciare le caratteristiche delle celle utilizzate nei sistemi di telefonia cellulare e studiare dunque la modellazione del canale e l'attenuazione, con riferimento in particolar modo ai modelli empirici.

La propagazione del segnale deve tener conto infatti di fenomeni quali il multipath, ma anche della trasmissione e dell'attraversamento dei vari materiali che costituiscono gli edifici.

La copertura in una rete cellulare è realizzata tramite celle radio connesse ai vari elementi che costituiscono l'intero sistema.

In base alla lunghezza del loro raggio di copertura (quindi all'estensione) si può variare il fattore di riuso in frequenza in funzione della capacità della rete (numero di utenti da servire).

In tal modo si avranno:

- **Macrocelle:** l'altezza della Stazione Radio Base è oltre i tetti degli edifici. Il raggio della cella è dell'ordine di  $1 \div 10$  Km e le potenze in trasmissione di  $8 \div 14$  W. Sono largamente utilizzate in ambiti urbani e extraurbani, ad un'altezza standard di 30 m. Il contributo alla propagazione è offerto dal solo Piano Verticale;
- **Small-cell:** la Stazione Radio Base è posta al livello dei tetti degli edifici. Il raggio della cella varia nel range di  $300 \text{ m} \div 3 \text{ Km}$  e le potenze in trasmissione sono in media di 8 W che, poiché inferiori rispetto alle macrocelle, non ammettono falle in copertura e prevedono la ridondanza delle antenne. I contributi alla propagazione sono apportati da entrambi i piani;
- **Microcelle:** l'altezza della Stazione Radio Base è al di sotto dei tetti degli edifici. Il raggio della cella è di  $100 \div 500 \text{ m}$  e le potenze in trasmissione sono dell'ordine di  $0.25 \div 1 \text{ W}$ . Le celle sono caratterizzate da forme irregolari. Il contributo alla propagazione è dato dal solo Piano Laterale.

## CLASSIFICAZIONE DEI MODELLI DI PREVISIONE

Le suddette costituiscono le varie tipologie di copertura prevalentemente utilizzate per gli scenari outdoor.

Negli ambienti indoor sono previste le seguenti:

- Picocelle
- Femtocelle

## CLASSIFICAZIONE DEI MODELLI DI PREVISIONE

### ➤ Picocelle:

Sono stazioni radio base cellulari poste al di sotto del livello dei tetti degli edifici, e coprono tipicamente un'area ridotta (con un raggio di copertura inferiore ai 100m), quale interni di edifici (uffici, centri commerciali, stazioni dei treni, aeroporti, piccole e medie imprese) o, più recentemente, di aerei.

Sono tipicamente utilizzate per estendere la copertura negli ambienti interni ove non giunge il segnale esterno per via di difficoltà realizzative o economiche (infatti entrambi utente e stazione radio base sono disposti indoor), o per incrementarne la capacità, data l'elevata utenza.

Con riferimento alle reti wireless cellulari, quali GSM, la stazione è tipicamente un'unità a basso costo e di dimensioni ridotte che interconnette le celle all'unità di controllo (BSC, Base Station Controller), che gestisce le risorse radio e l'handover, e aggrega i dati da inviare al Mobile Switching Centre (MSC) o al Gateway GPRS support node (GGSN).

Tipicamente, la connessione tra le picocelle ed il BSC è realizzata tramite cablaggio interno all'edificio.

## CLASSIFICAZIONE DEI MODELLI DI PREVISIONE

### ➤ Picocelle:

Studi recenti hanno sviluppato il concetto di un'unità di testa contenente la picocella, ma anche le funzioni del BSC e alcune del MSC, chiamata Access point base station o “enterprise femtocell”, senza la presenza dell'intera infrastruttura.

Le picocelle offrono molti dei benefici delle small-cell, incrementando il throughput dei dati degli utenti mobili e la capacità nelle reti cellulari (ad esempio con l'integrazione di picocelle con macrocelle in una rete eterogenea).

Sono largamente utilizzate in varie tecnologie quali GSM, CDMA, UMTS e LTE.

Il range di copertura è dell'ordine di  $200 \div 500$  m o inferiore.

## CLASSIFICAZIONE DEI MODELLI DI PREVISIONE

### ➤ Femtocelle:

Una femtocella è una stazione base cellulare di dimensioni ridotte e a bassa potenza, tipicamente progettata per l'utilizzo nelle abitazioni e in piccole aziende.

Essa permette ai Service Provider di estendere la copertura del servizio indoor o a bordo cella, specialmente dove l'accesso è oltremodo limitato o non disponibile.

Nonostante l'attenzione sia focalizzata sul WCDMA, è compatibile con i vari standard, dal GSM al CDMA2000, al WiMAX all'LTE.

I benefici nell'utilizzo di femtocelle sono molteplici.

Dal lato operatore, permettono l'incremento di capacità specialmente indoor e di copertura. Quest'ultima è migliorata poiché si possono riempire le falle e eliminare la perdita del segnale fra gli edifici. La capacità viene incrementata da una riduzione nel numero di telefoni che attendono di usare le celle principali della rete e dallo "scaricamento" del traffico nella rete dell'utente (via internet) dall'infrastruttura dell'operatore. L'utilizzo della rete privata dell'operatore viene sostituito da Internet.

Gli users possono godere di una copertura migliore poiché la stazione base è sita all'interno del loro edificio. Di conseguenza il telefono cellulare raggiunge le stesse o maggiori velocità dei dati utilizzando meno potenza, in maniera che la batteria abbia una durata superiore per via della ridotta distanza fra trasmettitore e ricevitore.

## CLASSIFICAZIONE DEI MODELLI DI PREVISIONE

### ➤ Femtocelle:

Quando i telefoni cellulari sono abilitati a connettersi alla femtocella, nelle aree di copertura a femtocelle commutano automaticamente dalle macrocelle (outdoor).

Se l'utente si sposta dalle femtocelle alla macro rete è garantita la continuità.

Esse richiedono hardware specifico, dunque i dispositivi pre-esistenti non possono essere aggiornati per permetterne l'utilizzo.

La dislocazione internazionale non è consentita poiché le femtocelle trasmettono a frequenze licenziate che appartengono ai diversi operatori di rete in base alla nazione a cui esse appartengono.

Il range di copertura è dell'ordine della decina di metri.

## CLASSIFICAZIONE DEI MODELLI DI PREVISIONE

Lo studio dell'ambiente di propagazione indoor è fondamentale per permettere lo sviluppo di applicazioni wireless in sistemi di comunicazione personali (PCS) e wireless LAN.

Vi è una forte dipendenza del canale da parametri geometrici (forma e suddivisione dell'ambiente, presenza di infissi e arredamento, etc.) ed elettromagnetici (costante dielettrica degli oggetti nel layout).

E' dunque indispensabile disporre di strumenti che forniscano l'analisi dell'ambiente in questione in seguito ad una precisa descrizione dello stesso.

Poiché la propagazione indoor si focalizza sull'utilizzo delle femtocelle, nel seguito viene fornita una panoramica relativa alle motivazioni, ai vantaggi e svantaggi che esse implicano, ed alla loro distribuzione ed inserimento nell'architettura dei più importanti standard di telefonia cellulare.

## LA TECNOLOGIA FEMTOCELL

Le femtocelle hanno, come detto sopra, dimensioni estremamente ridotte atte al miglioramento dell'efficienza in termini di copertura, qualità, capacità e economicità.

Il loro sviluppo è strettamente connesso all'evoluzione delle reti cellulari e di Internet ad alta velocità.

Un collegamento radio viene “potenziato” riducendo la distanza fra trasmettitore e ricevitore, e di conseguenza l'attenuazione, aumentando così il rapporto segnale-rumore (SNR) e la capacità.

Ciò è realizzabile introducendo una stazione radio base, il Femtocell Access Point (FAP); installata dall'utente finale all'interno dell'edificio, essa trasmette a bassa potenza (dell'ordine di 100 mW o meno) consentendo ai terminali utenti di “agganciarsi” alla rete dell'operatore mediante una connessione a banda larga a Internet, ad esempio una Digital Subscriber Line (DSL).

La principale differenza con la copertura macrocellulare è indubbiamente quantificabile in termini di distanza, poiché limitata ad un raggio di una decina di metri e mirata all'ottimizzazione della propagazione in ambiente prettamente indoor, al fine di garantire agli utenti un'alta qualità del servizio.



## LA TECNOLOGIA FEMTOCELL

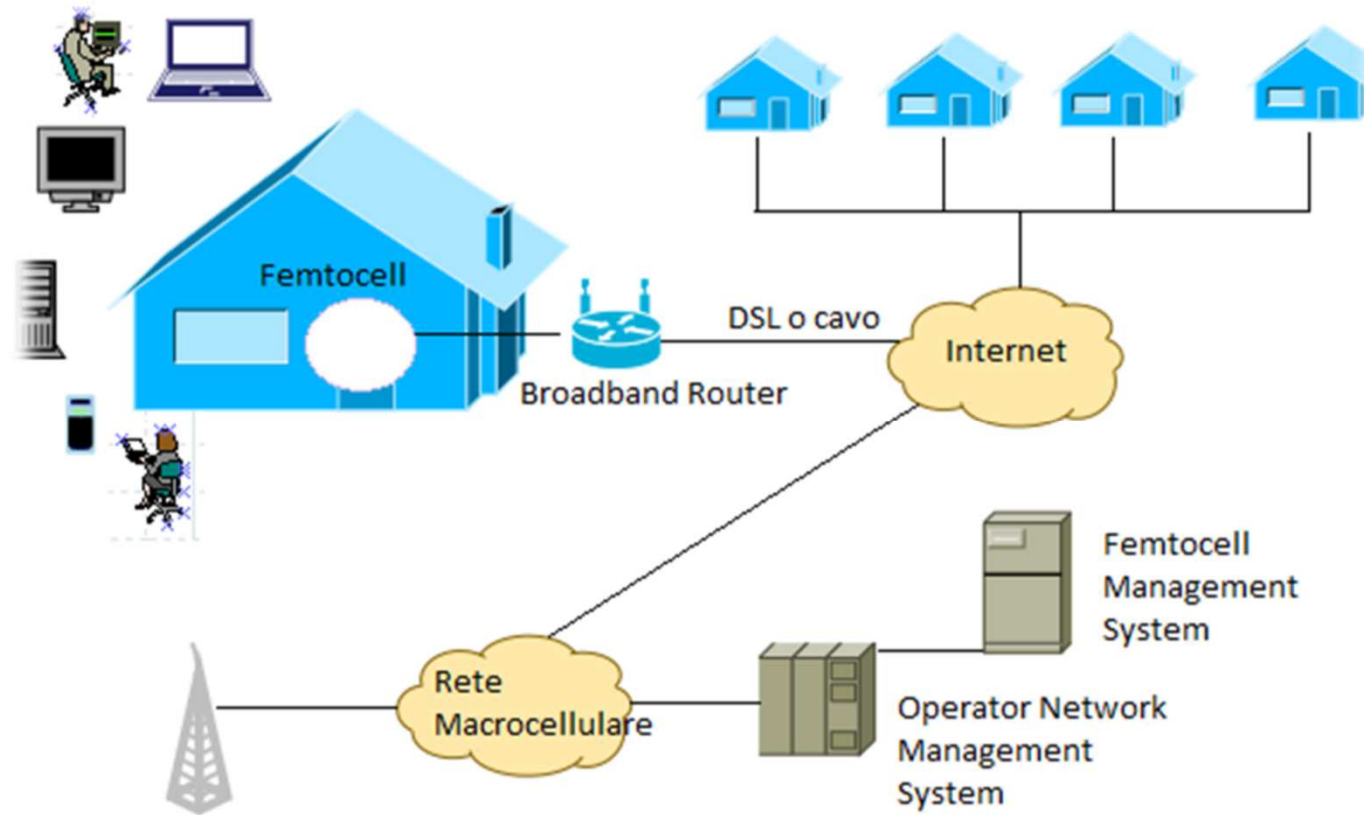


Figura 5. Schema generico di funzionamento tramite femtocelle

## LA TECNOLOGIA FEMTOCELL – GESTIONE DELLE INTERFERENZE

Con l'installazione di femtocelle, si incontrano principalmente due tipologie di interferenza:

- Interferenza macrocella-femtocella: le femtocelle possono essere causa di interferenza in uplink e in downlink per via del controllo d'accesso. Una femtocella, installata nei pressi di una finestra all'interno di una costruzione, può disturbare il canale in downlink di un dispositivo situato al di fuori, e servito da una macrocella;
- Interferenza femtocella-femtocella: il fatto di non pianificarne l'installazione, può provocare effetti di interferenza fra le varie femtocelle, nel caso in cui ad esempio una di esse venga installata presso un muro che separa due appartamenti; la femtocella con il maggior segnale può non essere in grado di servire tutti gli utenti, e il dispositivo più vicino a quella con segnale meno potente effettua i tentativi per collegarsi alla prima.

Inoltre, poiché l'installazione è realizzata direttamente dall'utente finale, gli operatori di rete non effettuano una gestione manuale della copertura delle frequenze radio; ciò denota l'assenza di una concreta pianificazione di rete.

Non essendoci dunque un controllo che miri alla diminuzione delle interferenze, è opportuno e necessario che le femtocelle siano auto-configuranti tramite dei parametri che assolvano a tale compito in maniera indipendente l'una dall'altra.

## LA TECNOLOGIA FEMTOCELL – MOVIMENTO FRA FEMTOCELLE

Una rete cellulare deve fornire il servizio ai terminali in movimento fra una cella e un'altra garantendo continuità.

Analogamente ad una copertura macrocellulare, un terminale in transito da una femtocella ad un'altra, in quanto installate nella pre-esistente rete cellulare, deve mantenere la comunicazione.

Affinché ciò avvenga, le celle devono essere in grado, come accennato sopra, di riconoscere e segnalare essenzialmente tre fenomeni:

- Handout: il passaggio di un dispositivo mobile da una femtocella a una macrocella, o un'altra tipologia di copertura.
- Handin: il transito di un terminale da un altro tipo di cella ad una femtocella.
- Handover: il movimento di un utente tra femtocelle.

A tal fine alcuni canali sono appositamente dedicati ai soli “passaggi” di copertura; dati  $N$  canali presenti nella cella,  $M$  sono destinati ad uno dei movimenti e assegnati all'utente che li sta effettuando. I restanti  $N-M$  sono condivisi fra i movimenti e le nuove chiamate; se tutti gli  $N-M$  canali sono occupati, la chiamata non potrà essere effettuata.

La gestione del problema può essere ragionevolmente affrontata in una rete dotata di pianificazione, dunque come già detto non in questo caso.

La strada percorsa infatti prevede l'implementazione di metodi di adattamento dinamico del numero di canali e dello spettro di frequenze assegnate alle femtocelle.

## LA TECNOLOGIA FEMTOCELL – CONFIGURAZIONE DELLE FEMTOCELLE

Vi sono tre differenti configurazioni delle femtocelle, atte alla protezione delle risorse e al controllo d'accesso a dati utenti (il quale può essere permesso o negato):

- Open: i servizi della femtocella sono accessibili a tutti gli utenti.
- Closed: le risorse sono riservate ai soli utenti “autorizzati”, salvo chiamate ai numeri d'emergenza.
- Hybrid: solo una parte dei servizi può essere utilizzata dagli utenti “non autorizzati”, mentre gli altri possono usufruire della maggior parte.

Il primo status mira all'incremento della capacità totale della rete e della copertura e le femtocelle non creano interferenza tra gli utenti poiché tutti possono accedere ai servizi, alleggerendo il carico macrocellulare; aumenta tuttavia il numero di handout e di segnalazioni, e ciò costituisce un problema, in quanto gli utenti che hanno pagato potrebbero paradossalmente non poter usufruire del servizio per via dell'occupazione di tutti i canali disponibili da parte di esterni.

La soluzione più ragionevole consisterebbe nell'installazione nelle case di accessi di tipo “Closed”, ma gli user sotto copertura macrocellulare situati nelle vicinanze “soffrirebbero” dell'interferenza introdotta dalla femtocella, decrementando così la qualità del segnale.

I provider infine optano per l'accesso “Hybrid”, offrendo incentivi e agevolazioni agli utenti autorizzati e fornendo il servizio comunque ai restanti dietro pagamento di una tariffa.

## MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

Come già affermato in precedenza, sono stati effettuati vari studi per la teorizzazione e la formulazione di adeguati modelli che permettessero di analizzare il più realisticamente possibile le differenti tipologie di luoghi in cui avviene la propagazione indoor.

Regola generale è che, affinché un modello sia accurato, esso debba necessariamente tener conto in maniera puntuale delle caratteristiche degli ambienti indoor, quali: tipologia di edificio e di muri esterni, numero di muri interni, qualità del materiale di fabbricazione, caratteristiche di arredo e infissi utilizzati, stanza considerata, e piano dell'immobile in cui si rileva l'attenuazione.

La propagazione indoor varia in maniera significativa a seconda del tipo di costruzioni e della posizione degli Access points ivi situati, in particolare quanto lontani sono dai muri e quanto in alto sono posti rispetto all'arredamento e agli ostacoli in generale.

Al fine di differenziare le caratteristiche di propagazione, è stata proposta (dal COST 231) una classificazione degli ambienti indoor, suddivisi in quattro categorie, riportate in Tabella:

Categoria d'ambiente	Descrizione
<b>Denso (D)</b>	Ambienti con stanze piccole, tipicamente un ufficio ove ogni impiegato ha la propria. Prevalgono le condizioni NLOS ( <i>Non-Line of Sight</i> )
<b>Aperto (O)</b>	Ambienti con stanze ampie; tipicamente un ufficio con una stanza condivisa fra i vari impiegati. Principalmente vi sono condizioni LOS o OLOS
<b>Ampio (L)</b>	Ambienti con stanze molto ampie; tipicamente una sala di una fabbrica, un centro commerciale o aeroporto. Abbiamo per la maggior parte condizioni LOS o NLOS
<b>Corridoio (C)</b>	Il trasmettitore e il ricevitore sono situati lungo lo stesso corridoio. Siamo in condizioni LOS

## MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR - MODELLI EMPIRICI A BANDA STRETTA

I «Modelli Empirici a Banda Stretta» non richiedono la conoscenza della geometria dell'ambiente.

Essi considerano soprattutto la distanza fra trasmettitore e ricevitore, e sono sostanzialmente semplici da implementare.

Godono inoltre di una relativa rapidità computazionale, poiché viene calcolato soltanto un cammino ad ogni punto ricevente.

Forniscono principalmente una prima stima, utilizzata dai Service Provider nella fase di progettazione dei sistemi wireless.

Tuttavia, essi soffrono di una limitata accuratezza sia per via degli ostacoli che non vengono tenuti in considerazione, e sia poiché non sono site-specific (non sono inseribili in uno specifico scenario); se viene dunque richiesta un'elevata precisione, è necessario optare per i modelli deterministici, che comportano però un alto onere computazionale.

I principali Modelli Empirici a Banda Stretta sono: One Slope Model, Dual Slope Model, Linear Attenuation Model, Multi-Wall Model, Average Walls Model.

Ognuno di essi verrà brevemente descritto nel seguito.

## MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR - MODELLI EMPIRICI A BANDA STRETTA

### ONE-SLOPE MODEL (ISM)

Il più semplice e rapido è il One-Slope Model (ISM) che prevede una dipendenza lineare fra il Path Loss, espresso in dB, e la distanza logaritmica:

$$L = L_0 + 10n \cdot \log(d) \text{ [dB]}$$

con  $L_0$ : Path Loss a 1 metro di distanza [dB];

$n$ : indice di decadimento di potenza;

$d$ : distanza tra trasmettitore e ricevitore [m]

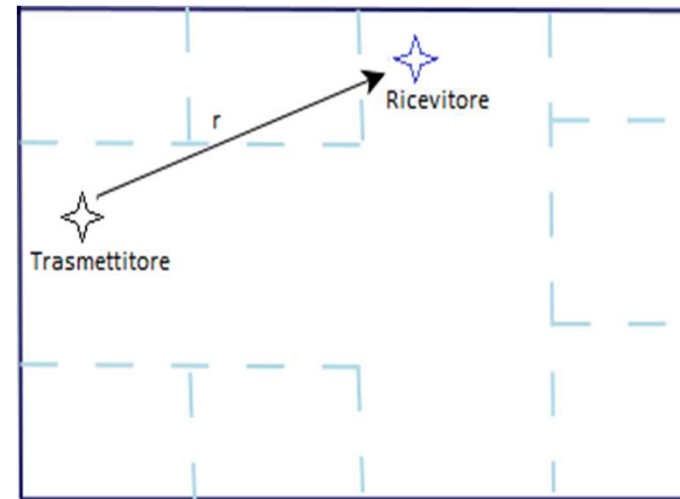


Figura 9. Rappresentazione grafica del modello ISM

E' un modello semplice da utilizzare, poiché l'unico parametro in input considerato è la distanza fra trasmettitore e ricevitore. In ogni caso, è necessario tener conto della dipendenza di tale valore dalla tipologia d'ambiente indicata dall'indice  $n$ ; grazie a esso il modello viene calibrato per ogni scenario.

Come è facilmente intuibile, i muri e altri elementi presenti nell'edificio non sono tenuti in considerazione.

Tale modello nella sua immediatezza ha mantenuto la suddetta formulazione originale fino ai nostri giorni.

## MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR - MODELLI EMPIRICI A BANDA STRETTA

### DUAL-SLOPE MODEL (DSM)

Il Modello Dual-Slope fornisce il Path Loss mediante la seguente formulazione:

$$L_{dB} = L_{0,dB} + \begin{cases} 10n_1 \log_{10} d, & 1m < d \leq d_{bp} \\ 10n_1 \log_{10} d_{bp} + 10n_2 \log_{10} \left( \frac{d}{d_{bp}} \right), & d > d_{bp} \end{cases}$$

Nella precedente, gli esponenti del Path Loss  $n_1$  e  $n_2$  sono determinati in maniera sperimentale.

In linea generale, tale modello divide le distanze in due componenti, Line-of-Sight (LOS) e Obstructed Line-of-Sight (OLOS).

La distanza di breakpoint,  $d_{bp}$ , tiene in considerazione che negli ambienti indoor la zona di Fresnel ellissoidale può essere ostruita da ostacoli o muri, anticipando la regione in linea di vista:

$$d_{bp} = \frac{4h_b h_m}{\lambda} \quad [m]$$

Con:

$h_b$ : la distanza minore fra terra o il muro e l'Access Point (AP)

$h_m$ : la distanza minore fra terra o il muro e la stazione (STA)



### PARTITIONED MODEL (PM)

Il modello “partizionato” calcola il Path Loss in maniera ancora differente, e in particolare:

$$L_{dB} = L_{0,dB} + \begin{cases} 20 \log_{10} d & 1m < d \leq 10m \\ 20 + 30 \log_{10} \left( \frac{d}{10} \right) & 10m < d \leq 20m \\ 29 + 60 \log_{10} \left( \frac{d}{20} \right) & 20m < d \leq 40m \\ 47 + 120 \log_{10} \left( \frac{d}{40} \right) & d > 40m \end{cases}$$

Come si può evincere, tale formulazione del calcolo della attenuazione presenta valori pre-determinati per quanto riguarda nello specifico gli esponenti del Path Loss e le distanze di breakpoint, in accordo con le lunghe campagne di misura effettuate.

## MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR - MODELLI EMPIRICI A BANDA STRETTA

### LINEAR ATTENUATION MODEL (LAM)

Il Modello di Attenuazione Lineare considera che il Path Loss eccedente (in dB) è linearmente dipendente dalla distanza (in m), ove  $\alpha$  è il coefficiente di attenuazione (in dB/m):

$$L = L_{FS} + \alpha d \quad [dB]$$

Con:

$L_{FS}$  : attenuazione in spazio libero fra trasmettitore e ricevitore [dB]

d: distanza fra trasmettitore e ricevitore [m]

In alcuni studi, i termini di perdita per attenuazione dai muri vengono aggiunti al modello lineare, e ciò incrementa le performance poiché i gradi di libertà sono maggiori; tuttavia tale modello non ha subito modifiche nel tempo.

## MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR - MODELLI EMPIRICI A BANDA STRETTA

### MULTI-WALL MODEL (MWM)

Il Modello COST 231 Indoor (o Multi-Wall Model (MWM)) è di gran lunga utilizzato e fornisce il Path Loss come la somma della perdita in spazio libero e di quelle introdotte da muri e pavimenti attraversati dal cammino diretto tra il trasmettitore e il ricevitore.

Offre una formula più accurata:

$$L = L_{FS} + L_C + \sum_{i=1}^I k_{wi} L_{wi} + k_f \left\{ \left[ \frac{(k_f+2)}{(k_f+1)} \right]^{-b} \right\} L_f \quad [\text{dB}]$$

Con  $L_{FS}$ : perdita in spazio libero tra trasmettitore e ricevitore [dB];  $L_C$ : perdita costante [dB]

$k_{wi}$ : numero di muri attraversati di tipo  $i$ ;  $k_f$ : numero di piani attraversati

$L_{wi}$ : perdita associata al muro di tipo  $i$  [dB];  $L_f$ : perdita indotta tra piani adiacenti [dB]

$b$ : parametro empirico;  $I$ : numero di tipi di muro

Il fattore di perdita costante è un termine ottenuto quando le perdite dovute ai muri vengono calcolate da risultati di misura ottenuti utilizzando la regressione lineare multipla. Solitamente è molto vicino allo zero.

Il terzo termine indica la perdita dei muri totale come somma dei muri fra trasmettitore e ricevitore.

Per ragioni pratiche e di non reperibilità dell'attenuazione, il numero di differenti tipologie di muri viene scelto basso, considerando differenze trascurabili.

## MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR - MODELLI EMPIRICI A BANDA STRETTA

### MULTI-WALL MODEL (MWM)

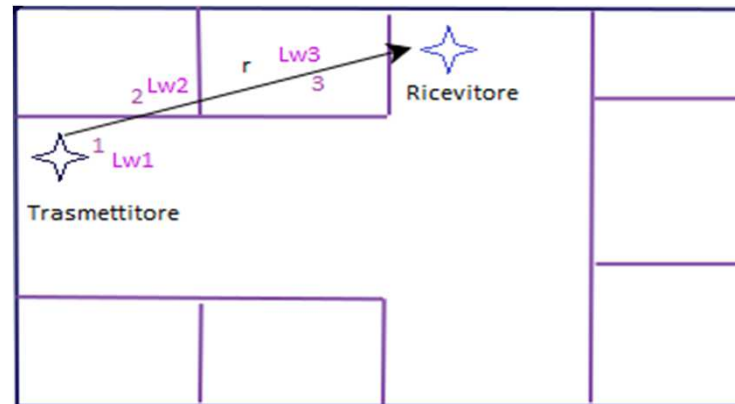


Figura 10. Rappresentazione grafica del modello MWM

E' importante notare come i fattori di perdita non siano legati alle attenuazioni fisiche del muro, ma siano dovute ai coefficienti del modello che sono stati ottimizzati grazie allo studio della curva del Path Loss.

Di conseguenza, i fattori di perdita includono implicitamente l'effetto dell'arredo così come quello dei cammini del segnale guidato attraverso i corridoi.

Nella seguente tabella viene fornita una divisione in due soli tipi diversi di muri:

TIPOLOGIA DI MURO	DESCRIZIONE
Muro sottile ( $L_{w1}$ )	I muri che non sostengono carichi, quali cartongesso, truciolare o sottili (<10 cm)
Muro spesso ( $L_{w2}$ )	I muri portanti o altri spessi (>10 cm), realizzati con calcestruzzo o mattoni

## MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR - MODELLI EMPIRICI A BANDA STRETTA

### MULTI-WALL MODEL (MWM)

La formulazione talvolta può essere espressa considerando:

$$L_{FS} + L_C = 20 \log \left( \frac{4\pi f d}{c} \right)$$

Con:

$d$ : distanza fra trasmettitore e ricevitore [m]

$f$ : frequenza del collegamento [Hz]

$c$ : velocità della luce [m/s]

e il parametro empirico:

$$b=0.46$$

L'equazione indica che la perdita totale dovuta al piano è una funzione non lineare del numero di piani attraversati.

## MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR - MODELLI EMPIRICI A BANDA STRETTA

### AVERAGE WALLS MODEL (AWM)

Questo modello si basa sul precedente, eccetto che per l'attenuazione dovuta ai muri ostruenti, inclusa in un unico parametro  $L_w$ .

Quindi, per un ambiente costituito da un solo piano, il Path Loss stimato dal modello COST 231 Multi-Wall viene modificato con:

$$L = L_0 + 20 \log_{10} d + k_w L_w \quad [dB]$$

Con  $k_w$ : numero di muri attraversati

Per determinare il parametro  $L_w$ , la perdita di ogni muro che ostruisce il cammino diretto fra trasmettitore e ricevitore, è necessario svolgere il calcolo come segue.

La perdita dovuta al primo muro è data da:

$$L_1 = L - L_0 - 20 \log_{10} d \quad [dB]$$

Con:

$L_0$ : Path Loss ottenuto ad un metro di distanza dal trasmettitore [dB]

$L$ : attenuazione totale misurata da un metro di distanza dopo il muro ostruttivo [dB]

## MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR - MODELLI EMPIRICI A BANDA STRETTA

### AVERAGE WALLS MODEL (AWM)

Per quanto riguarda il secondo muro, è necessario tenere in considerazione anche quella relativa al primo.

Quindi l'attenuazione del secondo muro può essere stimata come:

$$L_2 = L - L_0 - 20 \log_{10} d - L_1 \quad [dB]$$

Iterando il processo, la perdita dovuta al muro i-esimo è data da:

$$L_i = L - L_0 - 20 \log_{10} d - \sum_{j=1}^{i-1} L_j \quad [dB]$$

Ove la somma comprende le attenuazioni dei muri ottenute in precedenza.

Dopo aver calcolato tutti i contributi, viene calcolato il valore medio delle attenuazioni e incluso nel parametro  $L_w$

## MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR - MODELLI EMPIRICI A BANDA STRETTA

### COEFFICIENTI DEI MODELLI OTTIMIZZATI

Nella tabella nel seguito sono riportati i risultati globali calcolati come una media di quelli disponibili per ciascuna tipologia di ambiente.

I coefficienti del Multi-Wall Model sono stati ottimizzati per le misure nella categoria di luoghi “densi”. In ogni caso si possono utilizzare anche negli altri ambienti, ove il numero di muri è limitato e tale modello produce risultati prossimi a quelli di spazio libero.

I risultati forniti in tabella sono relativi a edifici con una tipologia di arredo classica:

Ambiente	One Slope Model (ISM)	Multi-wall model (MWM)	Linear model (LAM)				
	$L_0$ [dB]	n	$L_{w1}$ [dB] $L_{w2}$ [dB] $L_f$ [dB]	b	a		
Denso							
Un piano	33.3	4.0	3.4	6.9	18.3	0.46	0.62
Due piani	21.9	5.2					
Multi-piano	44.9	5.4					2.8
Aperto	42.7	1.9	3.4	6.9	18.3	0.46	0.22
Ampio	37.5	2.0	3.4	6.9	18.3	0.46	
Corridoio	39.2	1.4	3.4	6.9	18.3	0.46	



## MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR - MODELLI EMPIRICI A BANDA STRETTA

### COEFFICIENTI DEI MODELLI OTTIMIZZATI

I valori di default di  $L_{w1}$  e  $L_{w2}$  sono rispettivamente 3.4 dB e 6.9 dB.

In tabella sono riportati i risultati per i coefficienti dei modelli del Path Loss a 1800 MHz.

Le espressioni “un piano”, ”due piani”, ”multi-piano” significano che trasmettitore e ricevitore sono situati rispettivamente nello stesso piano, fra due piani adiacenti o sono distanti di più piani.

## MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR - MODELLI EMPIRICI A BANDA STRETTA

### MOTLEY-KEENAN MODEL

Un altro modello per la predizione del Path Loss è dato dalla formula di Motley-Keenan:

$$L = 20 \log\left(\frac{4\pi f d}{c}\right) + k_f \cdot 10 \log A_f + k_w \cdot 10 \log L_w \quad [dB]$$

Con:

$k_f$  : numero di piani attraversati

$A_f$  : fattore di attenuazione del piano

$k_w$  : numero di muri attraversati

$L_w$  : fattore di attenuazione del muro

Esso costituisce una rappresentazione empirica e semplificata della perdita calcolata nella propagazione, ed è meno complicato del precedente MWM; dato che modella il solo Path Loss, non include effetti quali il fading dovuto al multipath.

Inoltre tutte le tipologie di piani e muri coinvolte sono considerate le medesime, e con uguale attenuazione, rispettivamente  $f$  e  $w$ .

Infatti è un modello estremamente site-specific, talvolta impreciso poiché non considera la vicinanza di finestre, muri esterni, ecc.

E' tuttavia considerato molto utile al fine di dettare linee guida per la stima della potenza del segnale in diverse stanze e piani all'interno di un edificio.

## MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR - MODELLI EMPIRICI A BANDA STRETTA

### MOTLEY-KEENAN MODEL

$$L = 20 \log\left(\frac{4\pi f d}{c}\right) + k_f \cdot 10 \log A_f + k_w \cdot 10 \log L_w \text{ [dB]}$$

$k_f$  : numero di piani attraversati

$A_f$  : fattore di attenuazione del piano

$k_w$  : numero di muri attraversati

$L_w$  : fattore di attenuazione del muro

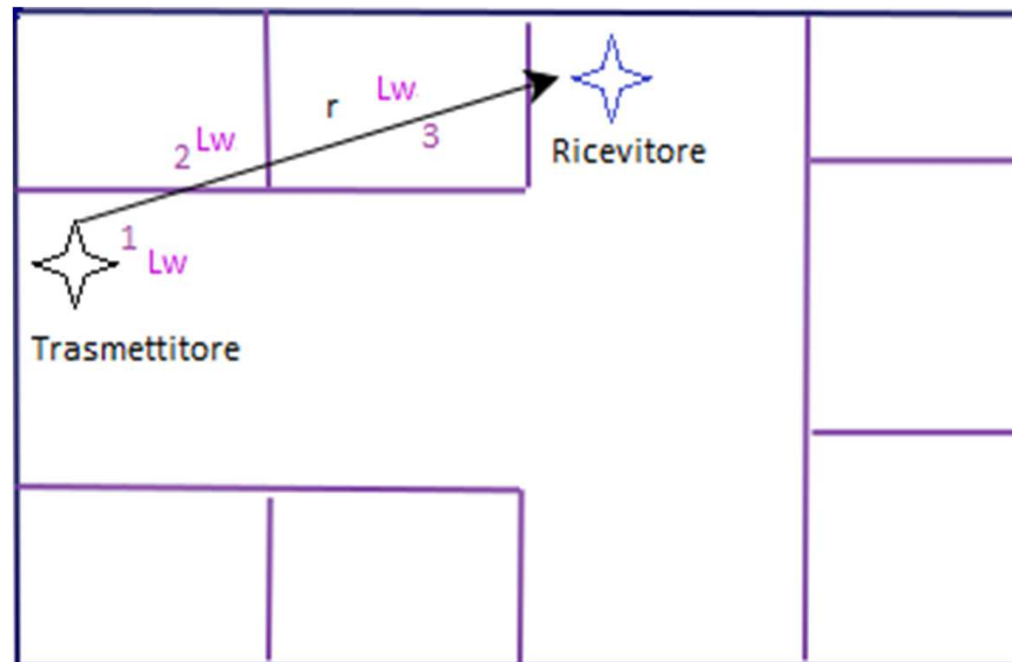


Figura 11. Rappresentazione grafica del modello Motley-Keenan

## MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR - MODELLI EMPIRICI A BANDA STRETTA

### ITU-R P1238-7

Il modello si basa su misure nel range di frequenze da 900 MHz a 100 GHz, e il Path Loss misurato in dB è calcolato tramite la seguente espressione:

$$L = 20 \log_{10} f + N \log_{10} d + L_f(n) - 28 \quad [dB]$$

Con

$f$ : frequenza [MHz]

$N$ : coefficiente del Power Loss dovuto alla distanza

$d$ : distanza ( $> 1$  m) fra la stazione base e il terminale mobile [m]

$L_f$ : fattore di penetrazione del piano [dB]

$n$ : numero di piani intercorrenti fra la stazione base indoor e il terminale mobile ( $n \geq 1$ )

E' un modello prettamente utilizzato per la previsione del Path Loss multifloor, dunque non viene considerato alcun fattore di attenuazione dovuto ai muri.

## MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR - MODELLI EMPIRICI A BANDA STRETTA

### ITU-R P1238-7

In letteratura sono presenti i coefficienti di Power Loss N e di perdita per penetrazione dei piani  $L_f$  (con n numero di piani attraversati), espressi alle varie frequenze e riportati nelle tabelle sottostanti:

Frequenza [GHz]	Residenziale	Ufficio	Commerciale
0.9		33	20
1.2-1.3		32	22
1.8-2	28	30	22
2.4	28	30	
3.5		27	
4		28	22
5.2	30 (appartamento) 28 (casa)	31	
5.8		24	
60		22	17
70		22	

Valori Power Loss N alle varie frequenze

Frequenza [GHz]	Residenziale	Ufficio	Commerciale
0.9		9 (1 piano) 19 (2 piani) 24 (3 piani)	
1.8-2	4n	15 + 4 (n-1)	6 + 3(n-1)
2.4	10 (appartamento) 5 (casa)	14	
3.5		18 (1 piano) 26 (2 piani)	
5.2	13 (appartamento) 7 (casa)	16 (1 piano)	
5.8		22 (1 piano) 28 (2 piani)	

Valori attenuazione per attraversamento dei piani  $L_f$  [dB] alle varie frequenze

## MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR - MODELLI EMPIRICI A BANDA LARGA

Questa tipologia di modelli è considerata come un mezzo di valutazione del Delay spread e del Power Delay Profile (PDP).

Uno di questi due fattori, unitamente con le caratteristiche del doppler, sono tipicamente richiesti come input per le simulazioni di sistema.

Al fine di spiegare l'andamento del Power Delay Profile, nella tabella seguente sono riportati a titolo esemplificativo i risultati generali (per esempio mediati su una categoria d'ambiente) delle misure a banda larga effettuate nel range di frequenze di 900 e 1800 MHz per sviluppare e testare i modelli di propagazione realizzate da vari operatori telefonici (Alcatel Sesa, Ericsson Radio Systems, France Telecom (CNET), ecc..).

La ricerca è stata effettuata negli edifici di un ufficio, che costituiscono l'area d'applicazione principale dei sistemi di comunicazione wireless indoor.

Ambiente	Media rms delay spread [ns]	Variabilità rms delay spread [ns]	Forma tipica del profile
<b>Denso:</b>			
Lund	22.5	5-40 <sup>1)</sup>	potenza/esponenziale
VTT	15.3	3.4 <sup>2)</sup>	esponenziale
TUW	20.0	8-31 <sup>3)</sup>	-
Media	19.3		
<b>Aperto:</b>			
Lund	35.0	5-95 <sup>1)</sup>	potenza
VTT	17.7	3.1 <sup>2)</sup>	potenza
ETH	30.5	4.1 <sup>2)</sup>	esponenziale
Media	27.7		
<b>Largo:</b>			
VTT	55.4	27.2 <sup>2)</sup>	esponenziale
ETH	79.4	4.3 <sup>2)</sup>	esponenziale
Media	67.4		

- 1) Delay spread istantaneo picco-picco;
- 2) Deviazione standard delle medie locali del delay spread;
- 3) Picco-picco delle medie locali del delay spread

## MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR - MODELLI EMPIRICI A BANDA LARGA

Questo studio dimostra che, come da previsione, il delay spread ha valori più bassi in ambienti definiti “densi” e più elevati in quelli aperti e vasti.

La dipendenza del delay spread dalle dimensioni dell’ambiente può anche essere utilizzata nelle predizioni in taluni modelli.

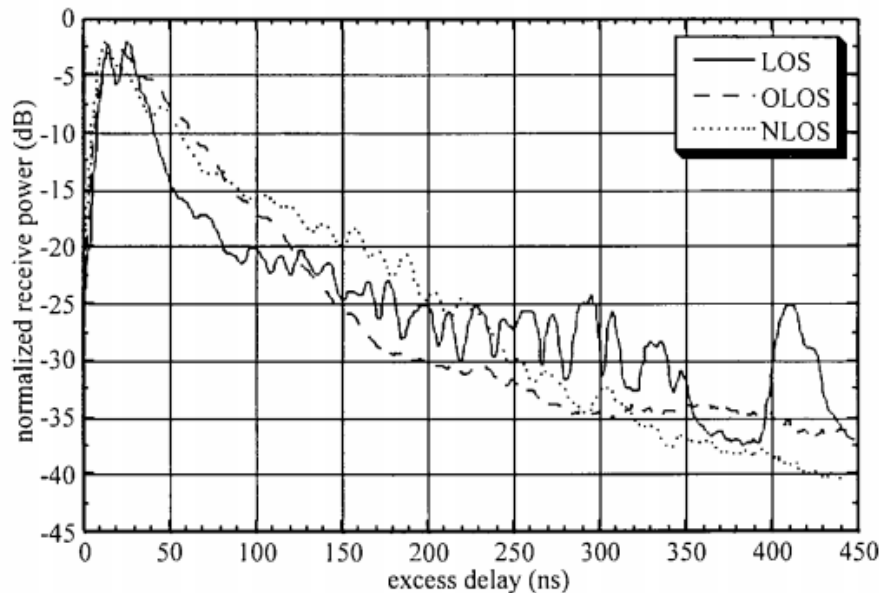


Figura 12. Power Delay Profile medi complessivi in condizioni LOS, OLOS, NLOS

Sebbene i valori istantanei e le medie locali del Power Delay Profile (PDP) possano includere molti dettagli che dipendono dall’ambiente, il PDP medio generale ha un andamento abbastanza regolare.

In ambienti “densi” il PDP ha un andamento di potenza (con decadimento logaritmico) o esponenziale (il decadimento è lineare nella scala in dB).

In ambienti aperti il PDP è meglio espresso da una funzione di potenza, per via dell’effetto predominante del cammino diretto.

I Power Delay Profile tipici mediati in condizioni LOS, NLOS e Obstructed Line of Sight (OLOS) sono mostrati nella figura.

OLOS indica una condizione ove il cammino diretto è ostruito solo da un ostacolo, ad esempio un mobile.

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

Ci si propone ora di utilizzare alcuni dei modelli di propagazione indoor empirici trattati nella sezione precedente per stimare il Path Loss che attenua il segnale nel suo percorso dal trasmettitore al ricevitore.

Sulla base di ciò viene effettuata una discussione sull'accuratezza delle previsioni, basandosi sul confronto fra i risultati forniti dalle campagne di misura reali e le predizioni dei modelli in questione.

Le misure sono realizzate su scenari reperiti in letteratura per via della difficoltà di praticarle in ambienti reali a causa di fonti di interferenza che rendono poco attendibili i dati e dei lunghi tempi di effettuazione e elaborazione degli stessi.

Si è proceduto con l'analisi dei vari ambienti, e in ognuno sono stati applicati i modelli nei limiti dei dati forniti.

L'importanza del lavoro risiede proprio nella comprensione del funzionamento degli stessi e dell'analisi del comportamento, al fine di apprezzare la qualità e l'utilizzabilità in diverse realtà pratiche.

Si procederà con la descrizione degli scenari di interesse e con l'applicazione dei modelli di previsione, evidenziando analogie e differenze e efficacia nei risultati nel confronto con le misurazioni reali.



## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 1 - Descrizione e Setup di Misura

Il primo ambiente in questione è inerente al progetto di diffusione digitale promosso da Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS) in Brasile, al fine di offrire la copertura in comunità a basso reddito site in tutto il Paese.

Il set di misure selezionato è stato realizzato al Multidisciplinary Center of New Technologies for Distance Education (CINTED).

Il layout si estende per un intero piano situato in un edificio a più piani.

Nell'ambiente sono installati due APs che presentano rispettivamente una bassa (AP1) ed elevata (AP2) presenza di pareti ostruenti.

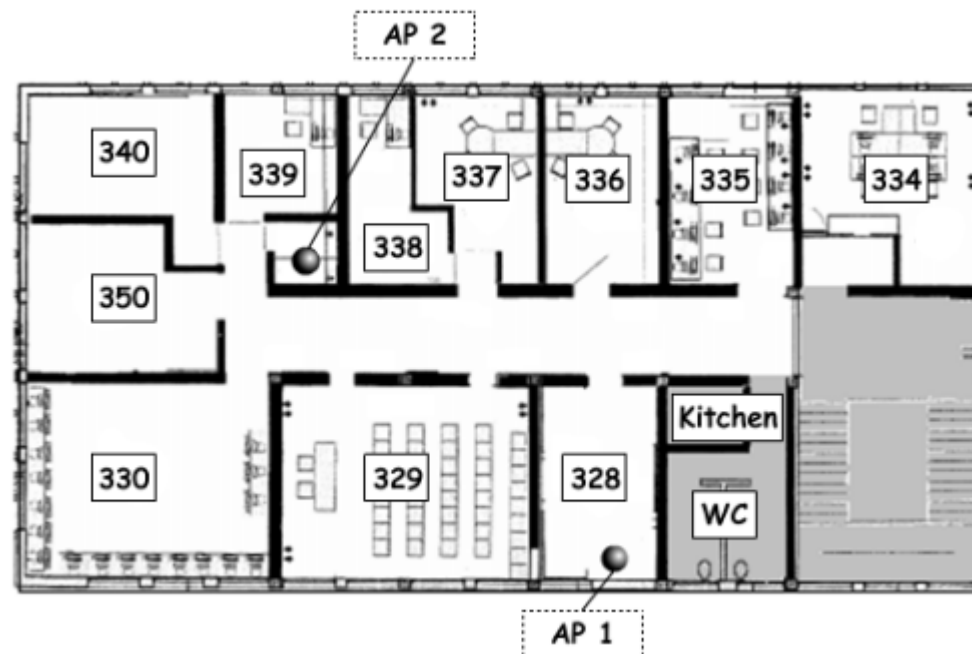


Figura 17. Area di copertura e posizionamento degli APs in CINTED

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 1 - Descrizione e Setup di Misura

Le caratteristiche tecniche utilizzate nella campagna di misura sono fornite nel seguito.

I muri sono realizzati in mattoni, con uno spessore di 15 cm.

Le aree rappresentate in grigio quali servizi igienici, cucina e scale sono le uniche che non necessitano di copertura di rete.

La dotazione tecnica prevede l'adozione di due APs Linksys 802.11b/g, ognuno dei quali possiede due antenne a dipolo.

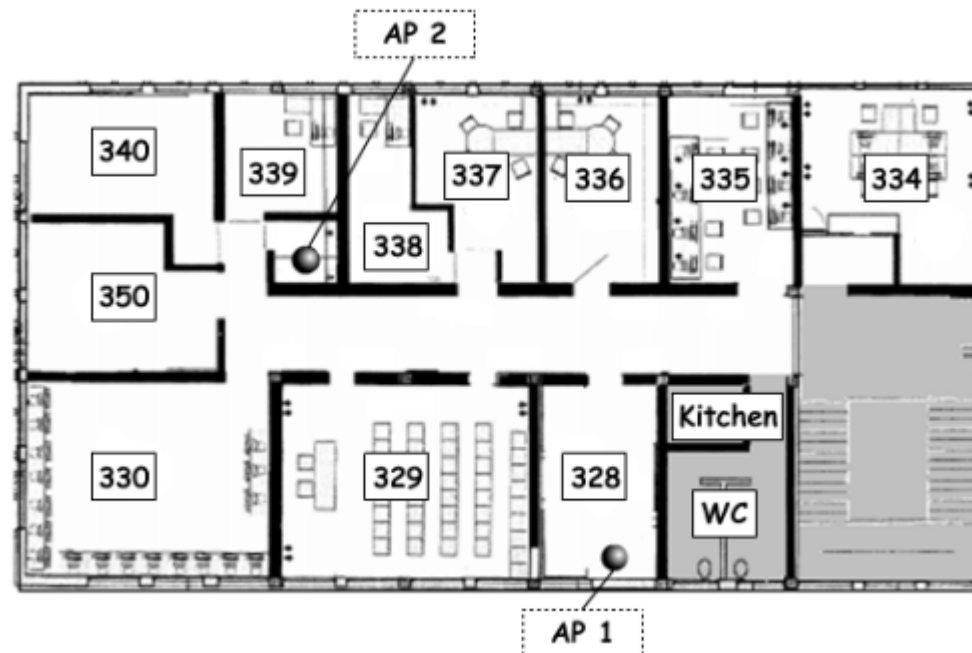


Figura 17. Area di copertura e posizionamento degli APs in CINTED

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 1 - Descrizione e Setup di Misura

Le misure pratiche sono state realizzate mediante il software di test Netsumbler, installato in un notebook con card adapter 802.11a/b/g.

L'antenna dell'AP è posizionata a 90° da terra e il pc è parallelo a terra, in direzione dell'Access Point.

Il programma misura automaticamente il livello di potenza del segnale ricevuto ogni secondo.

Al fine di stimare la potenza media ricevuta in ogni punto selezionato  $P_{RX}$  [dBm] sono utilizzati venti campioni a piccole distanze dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda  $\lambda = 0.125\text{m}$ .

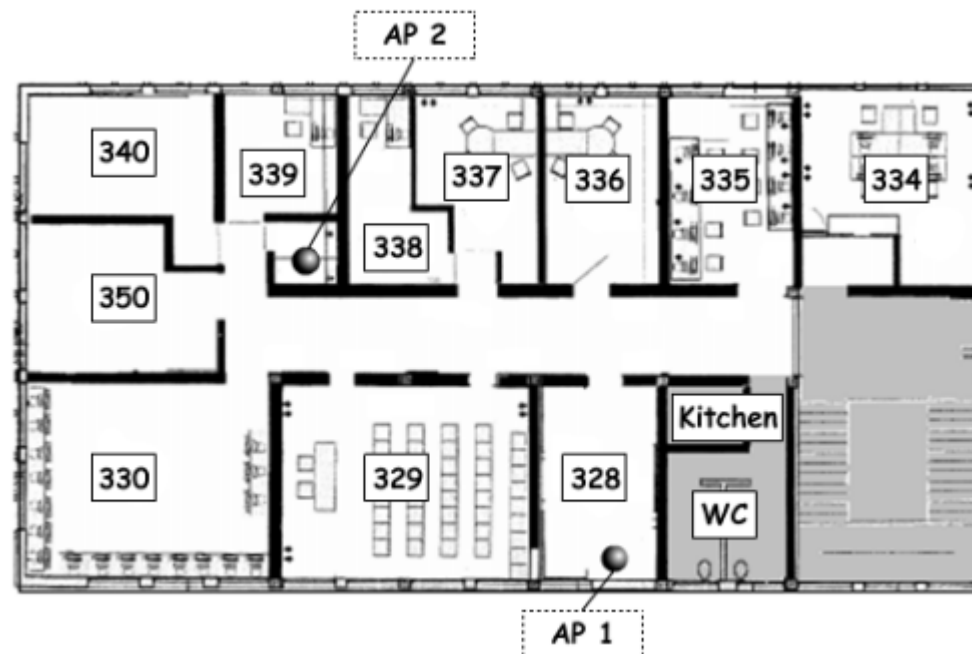


Figura 17. Area di copertura e posizionamento degli APs in CINTED

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 1 - Descrizione e Setup di Misura

Il Path Loss per ogni posizione viene calcolato come:

$$L_{dB} = EIRP_{dBm} - P_{rx,dBm}$$

Dove  **$EIRP_{dBm}$**  è la potenza irradiata isotropica effettiva dall'antenna dell'AP [dBm]

Si assume che i notebook abbiano antenne con guadagni di 0 dBi.

Per poter determinare i parametri di One Slope e Dual Slope Model, le misure sono state condotte per ognuno ad 1 metro di distanza dall'Access Point di interesse:

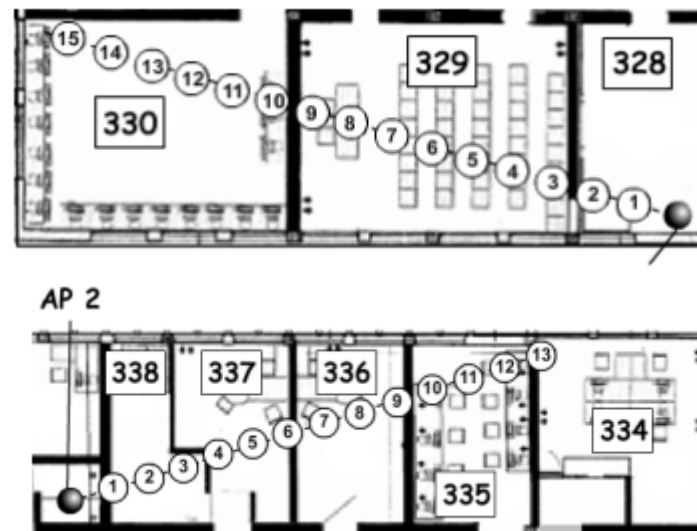


Figura 18. Posizionamento degli APs e distanze di misura per l'applicazione di One Slope e Dual Slope Model

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 1 - Descrizione e Setup di Misura

I dati misurati sono “plottati” rispetto alla distanza in scala logaritmica.

Poiché i valori sono finiti, si utilizza l'interpolazione lineare per ottenere i parametri di entrambi i modelli: la pendenza della curva indica l'esponente del Path Loss  $n$  e l'intersezione alla distanza di 1 metro dà il parametro  $L_{(0,dB)}$ .

Al fine di impostare i parametri dell'Average Walls Model è necessario semplicemente stimare il Path Loss medio per un solo punto posizionato 1 metro dopo ogni muro che ostruisce il cammino in condizioni di Line Of Sight.

Le figure seguenti mostrano le posizioni di misura per entrambi gli Access Points, notando come nel secondo caso ve ne sia una ulteriore per ogni muro (numeri 2 e 4) per una questione di miglioramento dell'accuratezza.

Per quanto riguarda invece la parametrizzazione del modello COST 231 Multi-Wall i muri in mattoni sono inclusi nella tipologia “spessi”, come già mostrato nella classificazione.



Figura 19. Posizionamento degli APs e distanze di misura per l'applicazione dell'Average Walls Model

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 1 - Confronto tra Misure Teoriche e Pratiche

Per quanto riguarda il **One-Slope Model**, utilizzando la parametrizzazione teorica si otterrebbe, per entrambi gli Access Points, un'attenuazione di circa:

$$L_{dB} = 37 + 10 \cdot 3.777 \log_{10} d \quad [\text{dB}]$$

$$L = L_0 + 10n \cdot \log(d) \quad [\text{dB}]$$

con  $L_0$ : Path Loss a 1 metro di distanza [dB];  
 $n$ : indice di decadimento di potenza;  
 $d$ : distanza tra trasmettitore e ricevitore [m]

Considerando invece le misurazioni pratiche, si ottiene:

$$L_{dB \text{ AP1}} = 34.48 + 10 \cdot 3.279 \log_{10} d \quad [\text{dB}]$$

$$L_{dB \text{ AP2}} = 48.58 + 10 \cdot 1.867 \log_{10} d \quad [\text{dB}]$$

per l'Access Point 1 e l'Access Point 2 rispettivamente, ove viene utilizzata la procedura di parametrizzazione indicata sopra.

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 1 - Confronto tra Misure Teoriche e Pratiche

Il **Dual Slope Model** deve essere configurato determinando la distanza di breakpoint per i due Access Point.

Per quanto riguarda l'AP1, la distanza minore fra pavimento, soffitto o muri è di 0.5 metri, mentre per l'AP2 risulta essere di 0.65 metri. Le misure sono state condotte a 0.5 metri di altezza.

Dunque, è necessario il calcolo analitico della distanza di breakpoint per i due Access Points; essa è pari a, utilizzando la già esposta formula:

$$d_{bp} = \frac{4h_b h_m}{\lambda} \quad [\text{m}]$$

$$d_{bp \text{ AP1}} = \frac{4 \cdot 0.5 \cdot 0.5}{0.125} = 8 \quad [\text{m}]$$

$$d_{bp \text{ AP2}} = \frac{4 \cdot 0.65 \cdot 0.5}{0.125} = 10.4 \quad [\text{m}]$$

$$L_{dB} = L_{0,dB} + \begin{cases} 10n_1 \log_{10} d, & 1\text{m} < d \leq d_{bp} \\ 10n_1 \log_{10} d_{bp} + 10n_2 \log_{10} \left( \frac{d}{d_{bp}} \right), & d > d_{bp} \end{cases}$$

$$d_{bp} = \frac{4h_b h_m}{\lambda} \quad [\text{m}]$$

$h_b$ : la distanza minore fra terra o il muro e l'Access Point (AP)  
 $h_m$ : la distanza minore fra terra o il muro e la stazione (STA)

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 1 - Confronto tra Misure Teoriche e Pratiche

Utilizzando le misurazioni pratiche (unitamente al calcolo aritmetico), l'attenuazione per i due Access-Points ricavata è data da:

$$L_{dB} = L_{0,dB} + \begin{cases} 10n_1 \log_{10} d, & 1m < d \leq d_{bp} \\ 10n_1 \log_{10} d_{bp} + 10n_2 \log_{10} \left( \frac{d}{d_{bp}} \right), & d > d_{bp} \end{cases}$$

$$L_{dB \text{ AP1}} = 37.36 + \begin{cases} 10 \cdot 2.715 \log_{10} d & 1m < d \leq 8 \\ 10 \cdot 2.715 \log_{10} 8 + 10 \cdot 4.279 \log_{10} \left( \frac{d}{8} \right) & d > 8 \end{cases}$$

$$L_{dB \text{ AP2}} = 52.71 + \begin{cases} 10 \cdot 1.138 \log_{10} d & 1m < d \leq 10.4 \\ 10 \cdot 1.138 \log_{10} 10.4 + 10 \cdot 6.567 \log_{10} \left( \frac{d}{10.4} \right) & d > 10.4 \end{cases}$$



## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 1 - Confronto tra Misure Teoriche e Pratiche

Confrontando i Path Loss calcolati mediante i due modelli si può apprezzare come il parametro  $L_0$  ottenuto con il primo risulti essere inferiore al secondo.

Inoltre è necessario sottolineare come la prima espressione del Dual-Slope consideri solo le misure per le distanze più vicine: avrà perciò un valore di esponente del Path Loss minore rispetto a quello ottenuto con la stima dell'ISM, che considera invece i risultati di misura per tutte le distanze.

Tali differenze presenti nell'esponente del Path Loss giustificano i diversi valori assunti dal parametro  $L_0$ .

Dall'analisi del grafico inerente all'AP1 è evidente come il modello Dual Slope permetta, basandosi sulle misure effettuate, una stima del Path Loss leggermente migliore di quella ricavata dal One Slope.

Per quanto riguarda l'AP2 mostra nuovamente una buona corrispondenza, specialmente per distanze successive al breakpoint.

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 1 - Confronto tra Misure Teoriche e Pratiche

Il **Partitioned Model** prevede invece un andamento accordante con i risultati ricavati dalle misure nel primo segmento di distanza, per poi divergere in maniera importante dopo il breakpoint.

Il Path Loss in spazio libero  $L_0$  è calcolato come segue:

$$L_0 = \left( \frac{4\pi \cdot 1}{0.125} \right)^2 = 40.2 \quad [\text{dB}]$$

$$L_{dB} = L_{0,dB} + \begin{cases} 20 \log_{10} d & 1m < d \leq 10m \\ 20 + 30 \log_{10} \left( \frac{d}{10} \right) & 10m < d \leq 20m \\ 29 + 60 \log_{10} \left( \frac{d}{20} \right) & 20m < d \leq 40m \\ 47 + 120 \log_{10} \left( \frac{d}{40} \right) & d > 40m \end{cases}$$

Il Path Loss totale risulta quindi:

$$L_{dB \text{ AP1,2}} = 40.2 + \begin{cases} 20 \log_{10} d & 1m < d \leq 10m \\ 20 + 30 \log_{10} \left( \frac{d}{10} \right) & 10m < d \leq 20m \\ 29 + 60 \log_{10} \left( \frac{d}{20} \right) & 20m < d \leq 40m \\ 47 + 120 \log_{10} \left( \frac{d}{40} \right) & d > 40m \end{cases}$$

Esso non si è mostrato essere una buona scelta per nessuno dei due segmenti, costituendo la peggior stima fra tutti e tre i modelli analizzati finora.

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 1 - Confronto tra Misure Teoriche e Pratiche

Al fine di quantificare la bontà delle stime offerte dai suddetti modelli, la tabella riportata in seguito rappresenta gli errori massimo e medio [dB] fra le misure pratiche e i risultati ottenuti applicando le leggi dei modelli:

Modello	Errore Massimo [dB]		Errore Medio [dB]	
	AP1	AP2	AP1	AP2
One Slope	4.64	9.22	2.29	3.91
Dual Slope	5.28	7.61	2.05	2.85
Partitioned	11.01	15.17	6.15	7.16

Errore massimo e errore medio One Slope, Dual Slope e Partitioned Model

Si confronta ai suddetti il **Linear Attenuation Model**, per cui è stata utilizzata la parametrizzazione sperimentale del ISM per quanto riguarda l'attenuazione in spazio libero  $L_{0dB}$  e il coefficiente di attenuazione  $\alpha$  reperito in letteratura, ottenendo la seguente formulazione:

$$L_{dB \text{ AP1}} = 34.48 + 0.62 \cdot d \quad [\text{dB}]$$

$$L = L_{FS} + \alpha d \quad [\text{dB}]$$

$L_{FS}$ : attenuazione in spazio libero fra trasmettitore e ricevitore [dB]  
 $d$ : distanza fra trasmettitore e ricevitore [m]

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 1 - Confronto tra Misure Teoriche e Pratiche

Si considerino ora i modelli COST 231 Multi-Wall e Average Walls Model.

La parametrizzazione del **Multi-Wall Model** prevede i muri in mattoni con uno spessore di 15 cm, considerati di tipo “spesso” e indicati dunque con  $L_{W2}$ , con una corrispondente attenuazione di 6.9 dB per ogni muro ostruente per entrambi gli Access Point.

$$L = L_{FS} + L_C + \sum_{i=1}^I k_{wi} L_{wi} + k_f \left\{ \frac{(k_f+2)}{(k_f+1)} \right\}^b L_f \quad [\text{dB}]$$

$L_{FS}$ : perdita in spazio libero tra trasmettitore e ricevitore [dB];

$L_C$ : perdita costante [dB]

$k_{wi}$ : numero di muri attraversati di tipo  $i$ ;  $k_f$ : numero di piani attraversati

$L_{wi}$ : perdita associata al muro di tipo  $i$  [dB];  $L_f$ : perdita indotta tra piani adiacenti [dB]

$b$ : parametro empirico;  $I$ : numero di tipi di muro

Per quanto riguarda l'**Average Walls Model** (basato sul precedente MWM, eccetto che per l'attenuazione dovuta ai muri ostruenti, inclusa in un unico parametro  $L_w$ ), la perdita totale apportata dal muro  $L_w$  viene determinata sperimentalmente, come mostrato nella presentazione di tale modello.

$$L = L_0 + 20 \log_{10} d + k_w L_w \quad [\text{dB}]$$

$k_w$ : numero di muri attraversati

Utilizzando dunque la formula (per un ambiente costituito da un solo piano), il Path Loss è calcolato come ( $L_0 = 40.2$  in accordo con le assunzioni effettuate):

$$L_{dB} = 40.2 + 20 \log_{10} d + k_w \cdot 6.9 \quad [\text{dB}]$$

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 1 - Confronto tra Misure Teoriche e Pratiche

Si può apprezzare un'attenuazione varia tra i muri dovuta ai differenti oggetti al contorno.

Anche se è possibile trovare valori negativi (come nel muro 2 per l'AP2) tuttavia il valore medio risulta sempre positivo. Nella seguente tabella sono mostrati i valori di perdita del muro per tale modello, in accordo con la trattazione descritta in precedenza:

MURO	AP1	AP2
1	3.90 dB	10.71 dB
2	8.62 dB	-12.60 dB
3	-	5.02 dB
4	-	6.76 dB
5	-	5.94 dB
Valore Medio	6.260 dB	3.166 dB

Determinazione della perdita del muro con l'Average Walls Model

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 1 - Confronto tra Misure Teoriche e Pratiche

Si confronta ai suddetti il **Motley-Keenan Model**, per cui è stata utilizzata la parametrizzazione analoga al modello COST 231 Multi-Wall per quanto riguarda il fattore di attenuazione del muro spesso reperito in letteratura, ottenendo la seguente formulazione:

$$L = 20 \log\left(\frac{4\pi \cdot 2.4 \cdot 10^9 d}{3 \cdot 10^8}\right) + k_f \cdot 10 \log 6.9 \text{ [dB]}$$

$$L = 20 \log\left(\frac{4\pi f d}{c}\right) + k_f \cdot 10 \log A_f + k_w \cdot 10 \log L_w \text{ [dB]}$$

$k_f$ : numero di piani attraversati  
 $A_f$ : fattore di attenuazione del piano  
 $k_w$ : numero di muri attraversati  
 $L_w$ : fattore di attenuazione del muro

Di seguito sono rappresentati i grafici che mostrano il confronto tra i vari modelli di propagazione analizzati e i risultati di misura reali, suddivisi in due raggruppamenti: One Slope, Dual Slope, Partitioned e Linear Attenuation Model, e separatamente Motley-Keenan, COST 231 Multi-Wall, Average Walls Model confrontati nuovamente con il Dual Slope, analizzati separatamente per ciascun Access Point:

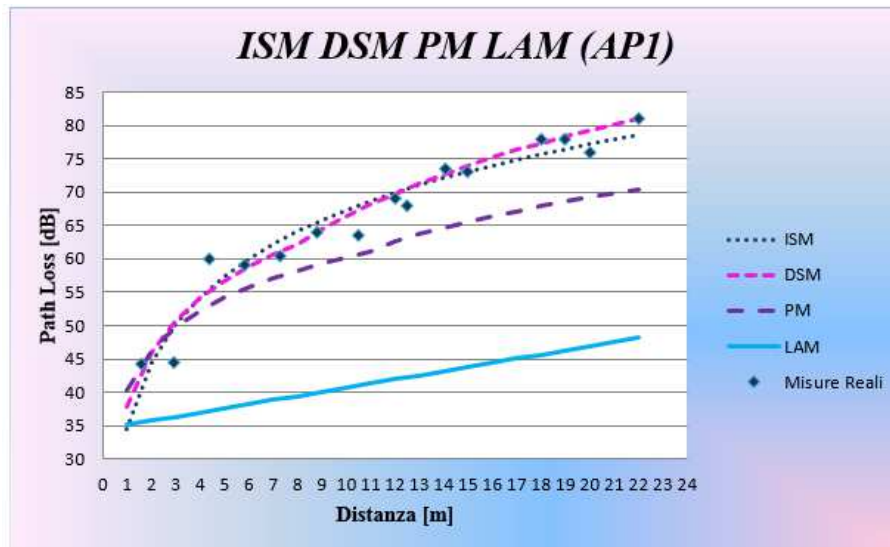


Figura 20. Confronto modelli ISM, DSM, PM e LAM e misure reali (AP1)

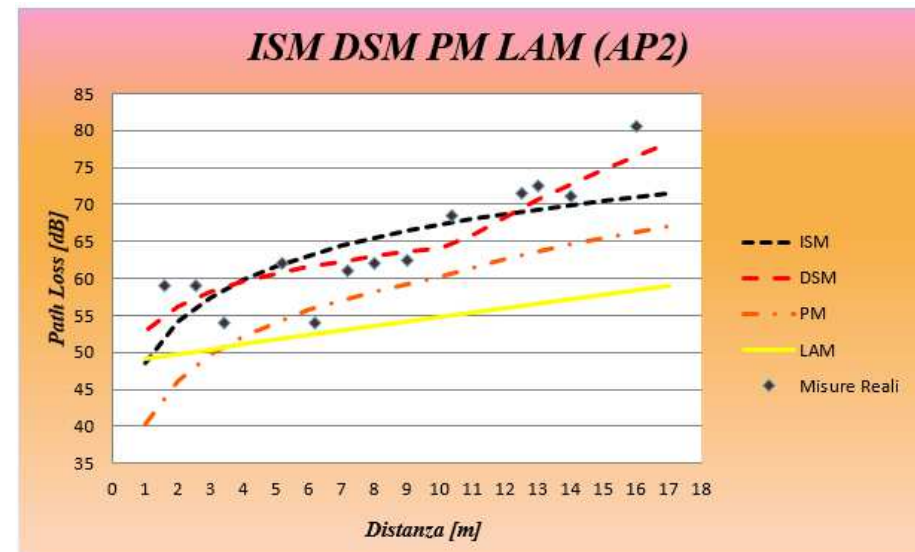


Figura 21. Confronto modelli ISM, DSM, PM e LAM e misure reali (AP2)

# MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 1 - Confronto tra Misure Teoriche e Pratiche

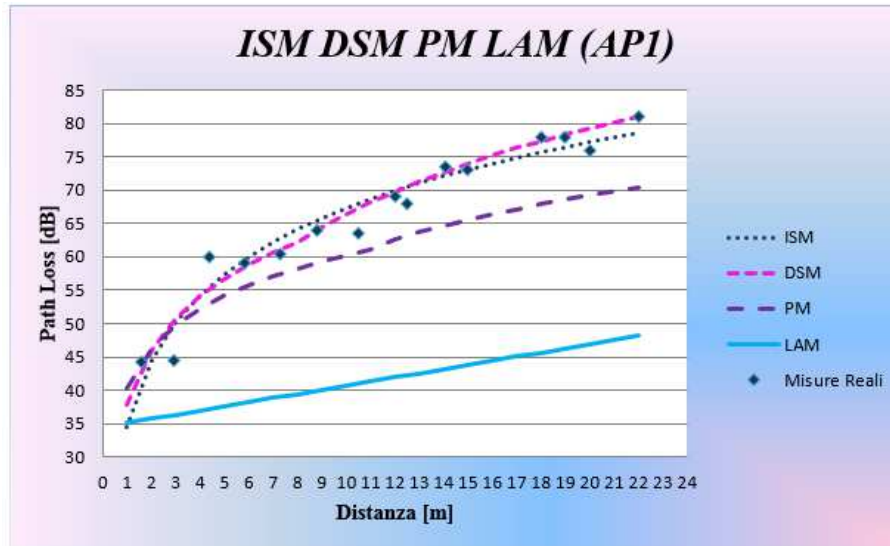


Figura 20. Confronto modelli ISM, DSM, PM e LAM e misure reali (AP1)

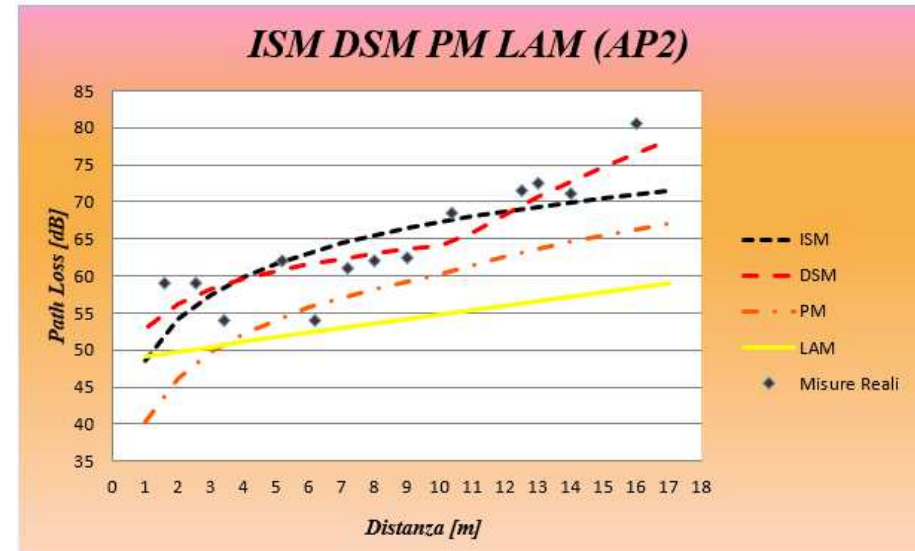


Figura 21. Confronto modelli ISM, DSM, PM e LAM e misure reali (AP2)

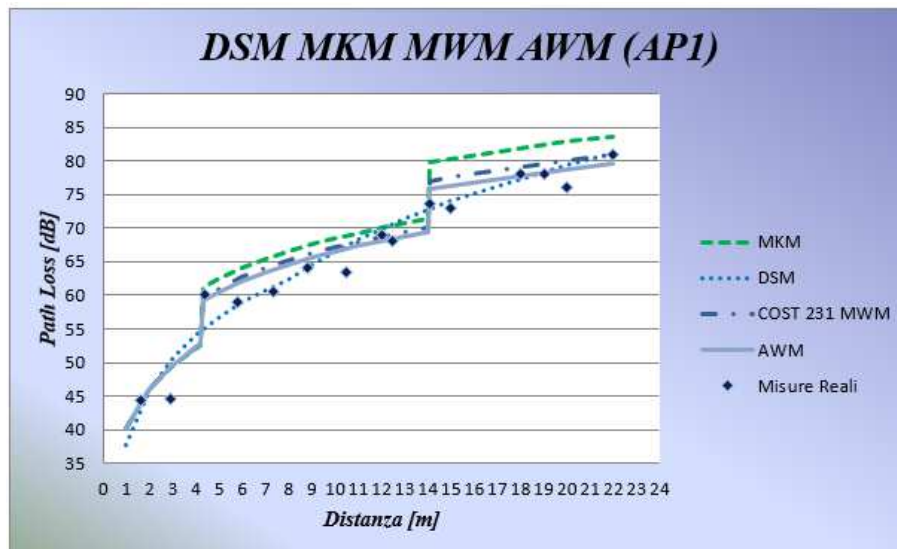


Figura 22. Confronto modelli MKM, DSM, MWM e AWM e misure reali (AP1)

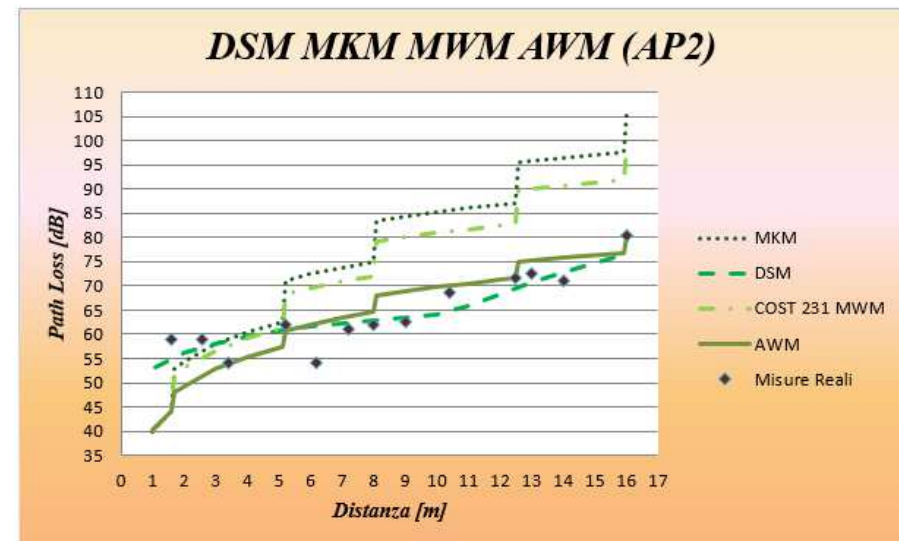


Figura 23. Confronto modelli MKM, DSM, MWM e AWM e misure reali (AP2)



## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 1 - Confronto tra Misure Teoriche e Pratiche

Il modello Motley-Keenan offre una stima molto imprecisa, dunque non tabellata.

Gli errori massimo e medio dei modelli Dual-Slope, COST 231 e Average Walls Model tra i risultati numerici e le misure reali sono mostrati nella seguente tabella:

MODELLO	ERRORE MASSIMO [dB]		ERRORE MEDIO [dB]	
	AP1	AP2	AP1	AP2
DUAL-SLOPE	5.81	<b>7.73</b>	<b>1.74</b>	<b>2.43</b>
COST 231 MWM	4.95	19.72	2.29	10.78
AVERAGE WALLS	<b>4.94</b>	14.72	1.85	3.52

Errore massimo e errore medio Dual Slope, COST 231 Multi-Wall, Average Walls Model

Come si evince dai dati, per quanto riguarda l'errore massimo per l'Access Point 1 il comportamento più simile alla realtà si verifica utilizzando l'Average Walls Model.

Tuttavia tale modello non presenta la stessa accuratezza nell'Access Point 2 nelle distanze brevi poiché il primo muro presenta un'attenuazione maggiore in confronto al valore medio ottenuto.

Sebbene il Dual Slope Model risulti in questo caso migliore non implica che abbia una maggiore efficacia rispetto all'Average Walls Model, e infatti gli errori medi ottenuti per i due modelli sono confrontabili.

Si può dedurre come tali modelli abbiano un'accuratezza simile.

L'Average Walls Model possiede però un vantaggio importante: richiede minor quantità di misure per la parametrizzazione (due misure invece che quindici per l'AP1, cinque misure al posto di tredici per l'AP2).



## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 1 - Confronto tra Misure Teoriche e Pratiche

Prendendo visione delle mappe di copertura fornite inoltre si può affermare che il modello di propagazione Dual-Slope per l'AP1 prevede una buona approssimazione con i dati misurati per brevi distanze.

Per l'AP2 poiché la parametrizzazione è stata ricavata in un ambiente con un alto numero di muri ostruttivi, la stima del modello presenta delle difficoltà per quanto riguarda gli ostacoli.

Per distanze minori il modello tendenzialmente sovrastima la perdita in relazione alle campagne di misura effettuate nel sito.

L'Average Walls Model presenta una migliore attinenza con i dati misurati invece nei punti cosiddetti critici del DSM.

Da notare che le campagne di misura mostrano livelli di campo inferiori a -80 dB nelle stanze più remote e l'Average Walls Model predice correttamente tale situazione.

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 1 - Confronto tra Misure Teoriche e Pratiche

Nessuno dei modelli predice però un'ampia attenuazione nei muri dei servizi igienici, approssimativamente stimata attorno ai 10 dB.

Questo fenomeno deve essere tenuto in conto in sede di pianificazione della rete.

Tale tipologia di muri presenta infatti una maggiore attenuazione rispetto agli altri per via dei tubi incorporati al loro interno.

Durante la campagna di misura è stato scelto un insieme di posizioni all'interno dell'edificio per calcolare l'errore intercorrente fra la stima numerica e le misure effettivamente realizzate, permettendo un buon confronto.

Infine, per effettuare un confronto fra la scalabilità dei modelli Average Walls e Dual-Slope, le predizioni fra essi sono state testate nelle venticinque posizioni ove gli utenti di tale rete potrebbero trovarsi.

In aggiunta vi è il margine di Shadowing, solitamente di circa 8 dB per le reti IEEE 802.11.

Infine, sebbene il modello Dual-Slope presenti un'accuratezza leggermente superiore in un ambiente simile utilizzando la parametrizzazione dell'Access Point 2 (come è stato mostrato poc'anzi nella tabella), è stato dimostrato come l'Average Walls Model abbia una scalabilità maggiore.

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 1 - Conclusioni

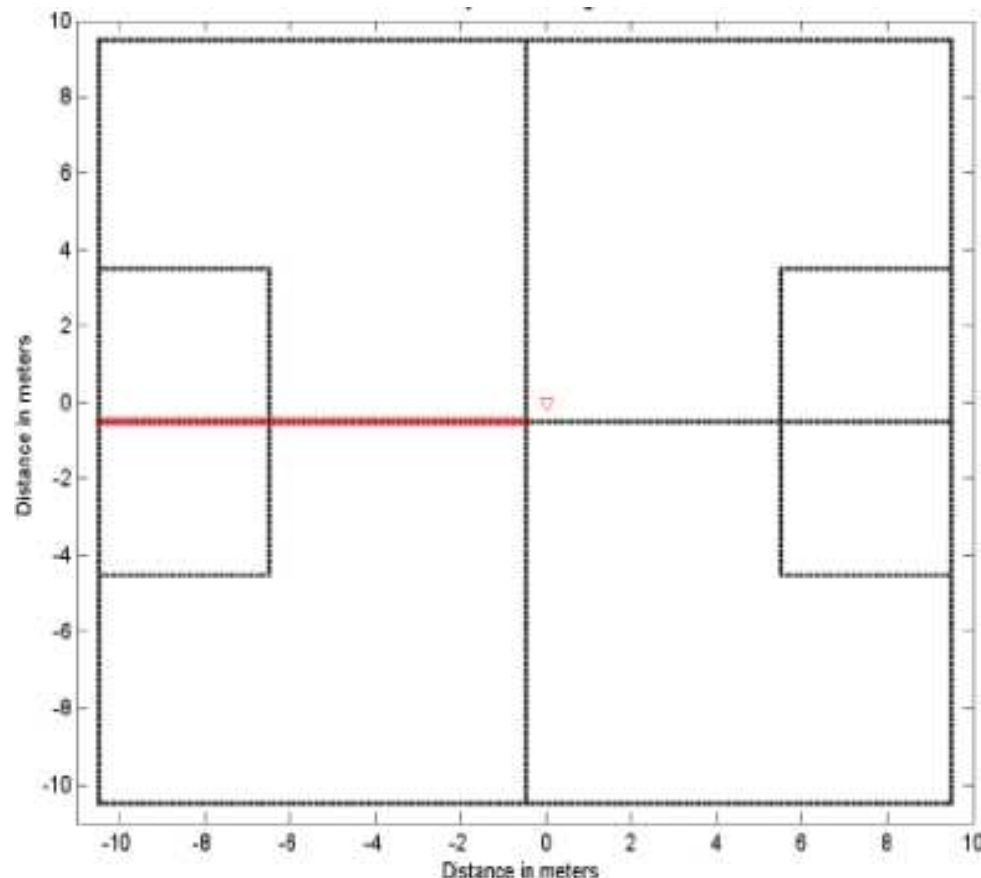
- Sono state analizzate in maniera comparativa le accuratezze di sette modelli di propagazione per ambiente indoor.
- E' stato verificato innanzitutto come i modelli Linear Attenuation Model e Motley-Keenan Model, opportunamente parametrizzati da letteratura, forniscano risultati poco accurati (non tabellati).
- Inoltre One-Slope e Dual-Slope Model presentano un miglior comportamento del Partitioned Model, i quali parametri sono pre-determinati.
- Per quanto riguarda i modelli che considerano i muri nel calcolo dell'attenuazione l'Average Walls Model presenta risultati più accurati rispetto al COST 231, risultando una procedura pratica e veloce per la stima della copertura.
- Le applicazioni negli altri laboratori UFRGS hanno confermato che il Dual Slope e l'Average Walls Model permettano le migliori predizioni.
- I risultati indicano che l'AWM, che può essere parametrizzato con poche misurazioni, può essere largamente utilizzato in tutto il sito con una buona accuratezza e per la pianificazione di WLAN anche nelle comunità a basso reddito.

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 2 - Descrizione e Setup di Misura

La presente analisi è stata condotta a livello puramente teorico per effettuare un confronto astratto tra i modelli in un ufficio.

La propagazione multipath non può essere stimata accuratamente poiché considera fattori quali arredamento, stanza, tende, etc., variabili che si diversificano a seconda della costruzione; se trascurata, si può semplificare l'analisi.



L'ufficio rappresentato di seguito ha tali caratteristiche: le linee nere indicano muri leggeri, quelle rosse e nere invece un muro pesante.

La posizione dell'antenna è identificata tramite un triangolo rovesciato e l'attenuazione viene calcolata ad un metro dall'antenna.

Il tutto è rappresentato con un sistema di coordinate assumendo l'antenna nell'origine.

Figura 24. Layout dello scenario 2 - ufficio

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 2 - Descrizione e Setup di Misura

La simulazione è stata realizzata utilizzando il Multi Wall Model, tenendo in considerazione un solo piano, ossia dove effettivamente si misura il campo:

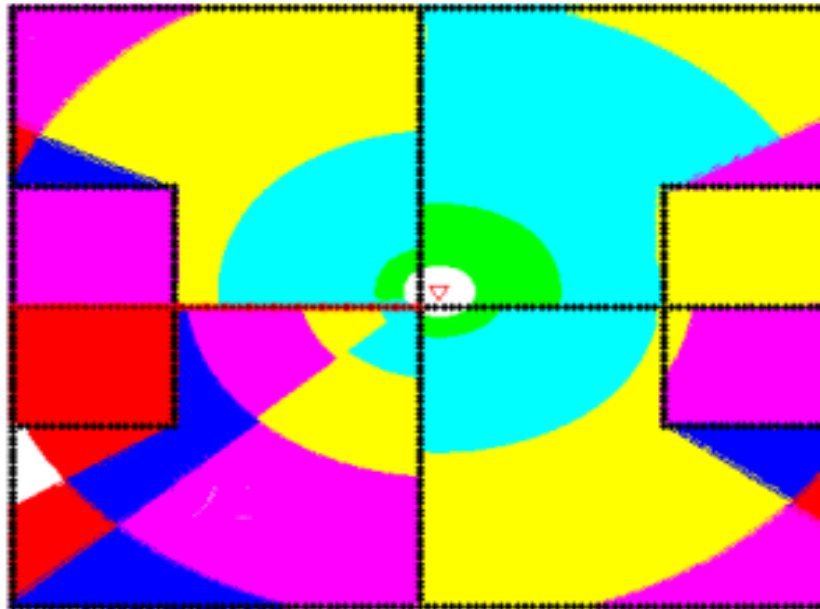


Figura 25. Risultati di simulazione con l'utilizzo del MWM

<i>PATH LOSS [dB]</i>	<i>COLORE</i>
0-37	Verde
37-47	Ciano
57-63	Giallo
63-68	Magenta
68-73	Blu
73-83	Rosso
83+	Bianco

Legenda grafico simulazione copertura

I risultati mostrano che nell'edificio in considerazione la maggior parte delle aree indoor sono affette da un Path Loss inferiore a 83 dB.

Da ciò si evince come sia sufficiente una potenza del trasmettitore pari a 10 dBm se la sensibilità del ricevitore fosse di -73dBm.

Un tipico trasmettitore femtocellulare può raggiungere una potenza di 23 dBm, riuscendo in tal modo a coprire l'intero edificio.

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 2 - Confronto tra Misure Teoriche

Si consideri nuovamente l'edificio.

Si suppone che vi siano quattro diversi utenti nelle posizioni segnate A, B, C, D (scelte in maniera casuale) e connessi alla rete tramite femtocelle:

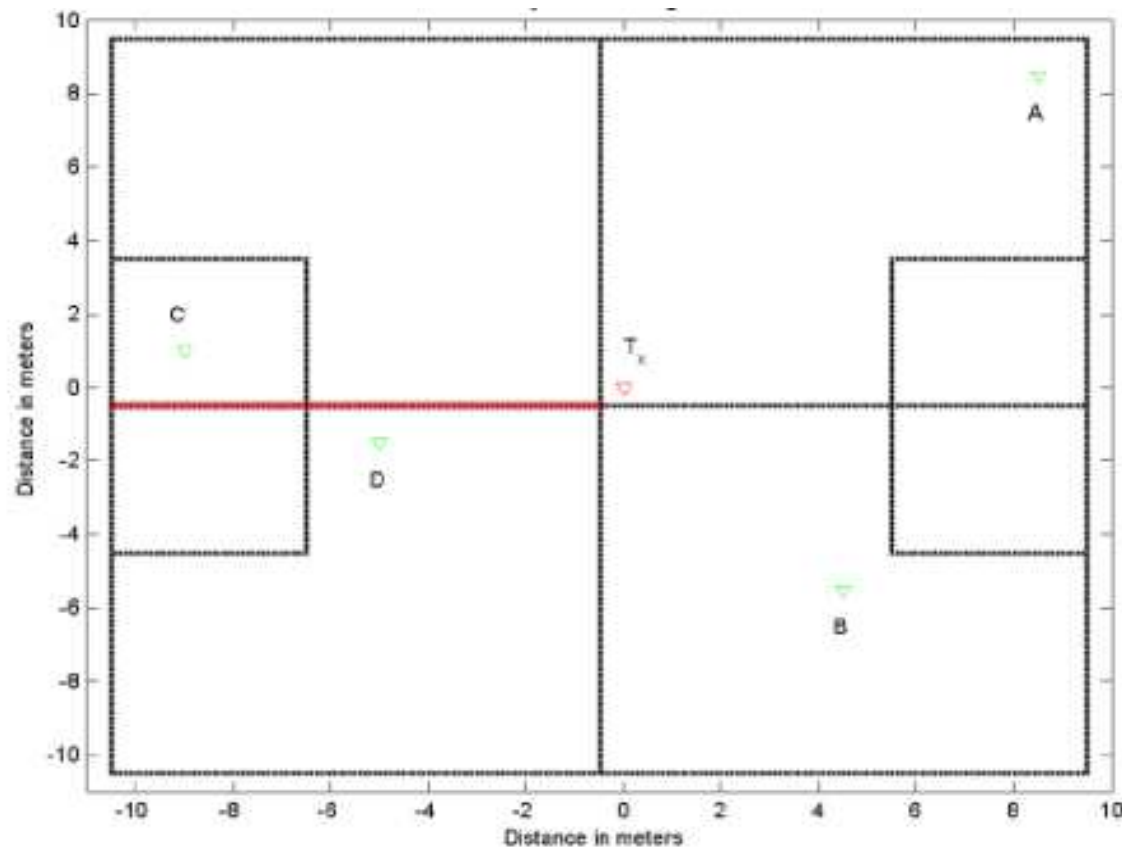


Figura 24. Layout dello scenario 2 con posizioni degli utenti - ufficio

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 2 - Confronto tra Misure Teoriche

Lo scopo è quello di determinare il Path Loss nelle posizioni selezionate.

Il calcolo dell'attenuazione si basa sulla distanza fra trasmettitore e ricevitore e sul numero di muri che ostruiscono il cammino.

Sulla base della rappresentazione grafica, sono state calcolate le varie distanze delle posizioni dall'Access Point (utilizzando semplicemente il teorema di Pitagora) e stimate le attenuazioni nei punti di interesse mediante il COST 231 Multi-Wall Model, in base alle seguenti considerazioni:

- La posizione A è in Line Of Sight del trasmettitore alla distanza di circa 12,02 m. Il Path Loss calcolato in tale posizione è di 58.6 dB.
- L'utente in B è situato dietro un muro. La distanza dal trasmettitore è di circa 7,11 m, ma l'attenuazione è di 59 dB.
- Lo user in posizione C si trova dietro due muri a 9,06 m. Il Path Loss misurato qui è di 66.14 dB.
- L'utente in posizione D è coperto da due muri, uno spesso e uno sottile. L'impatto complessivo è considerato come quello apportato da tre muri sottili. L'attenuazione a 5,22 m risulta essere di 66.35 dB.

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 2 - Confronto tra Misure Teoriche

Le precedenti osservazioni sono sintetizzate nella seguente tabella:

POSIZIONE	DISTANZA[m]	NUMERO MURI	DI PATH [dB]	LOSS
A	12,02	0 (LOS)	58,6	
B	7,11	1 Sottile	59,03	
C	9,06	1 Sottile	66,14	
D	5,22	1 Spesso + 1 Sottile	66,35	

Distribuzione posizioni con relativa distanza dall'AP, il numero di muri e il Path Loss calcolato con MWM



## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 2 - Confronto tra Misure Teoriche

Di seguito è mostrato il grafico che rappresenta il Path Loss per le quattro posizioni degli utenti, supponendo un'attenuazione conferita dal muro sottile pari a 5 dB, e una perdita in spazio libero a 1 m di circa 37 dB.

Tuttavia, come già esposto, in letteratura sono presenti degli studi sul modello COST 231 Multi-Wall per quanto riguarda l'attenuazione introdotta dai muri, a seconda della tipologia. In particolare, un muro sottile comporta un Path Loss di 3.4 dB, mentre uno spesso di ben 6.9 dB.

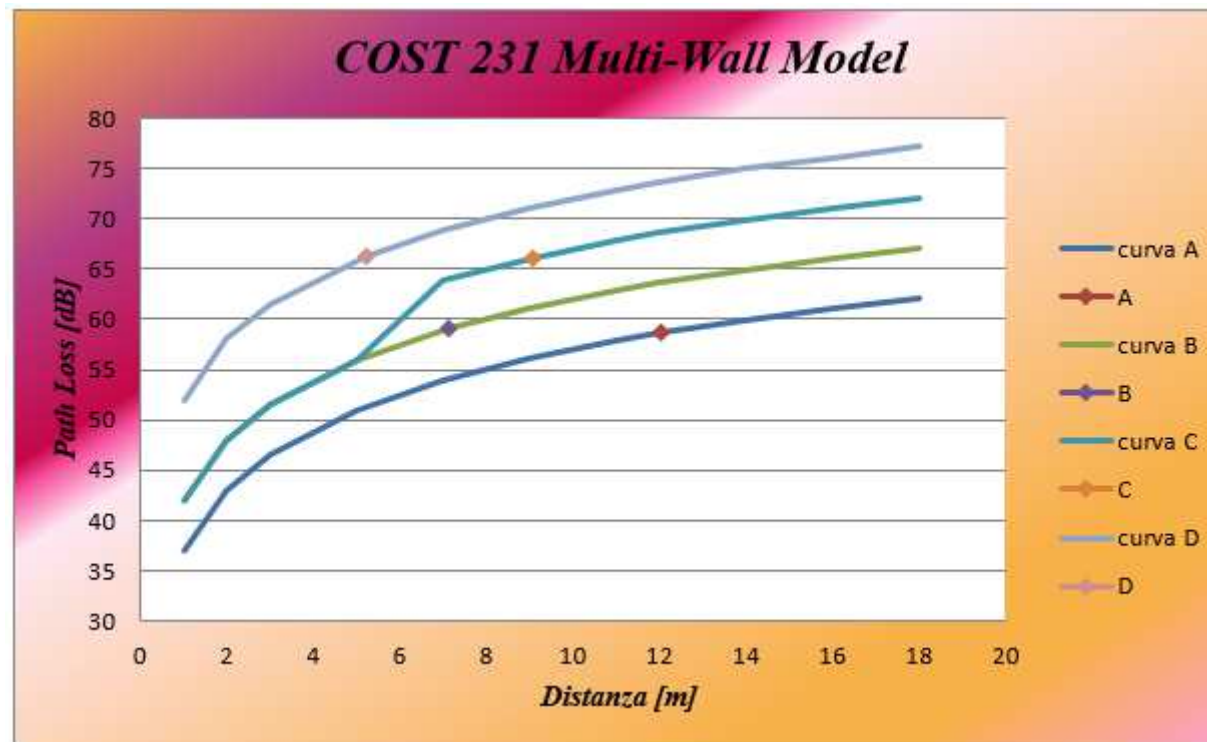


Figura 25. Grafico del Path Loss misurato nei quattro punti dove sono situati gli utenti

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 2 - Confronto tra Misure Teoriche

Si verifica di seguito il calcolo dell'attenuazione apportando tali modifiche al modello:

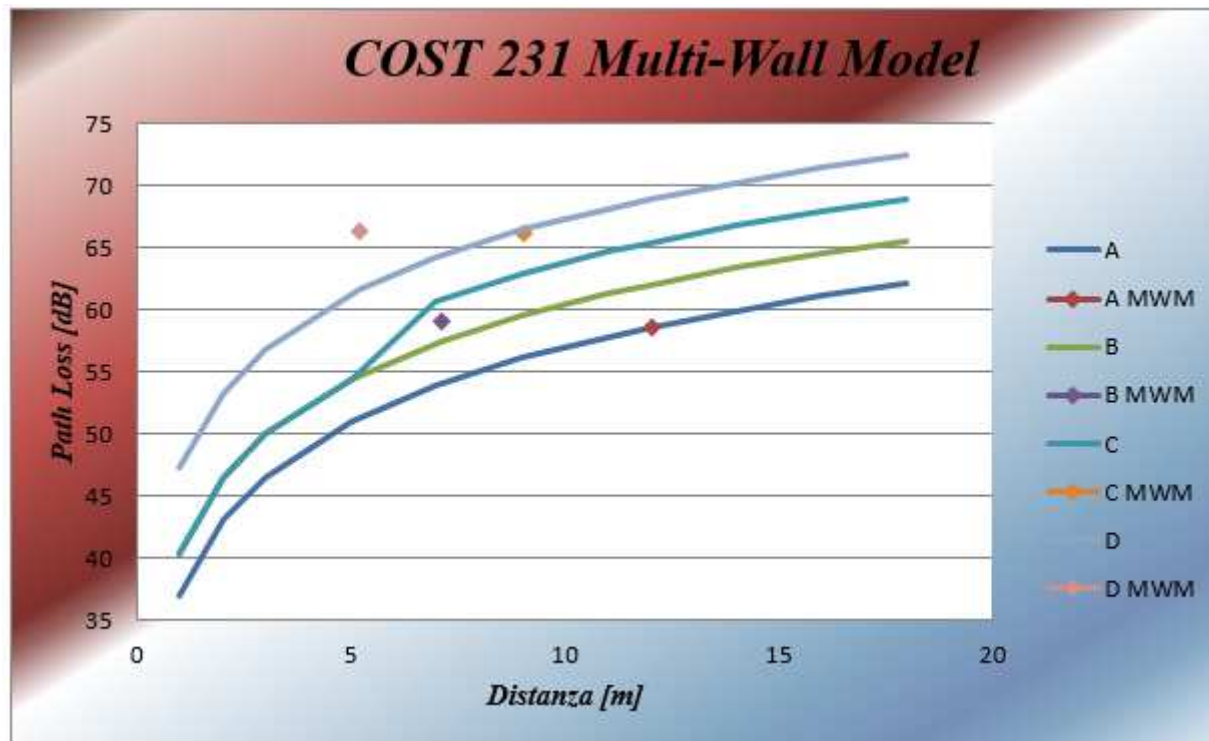
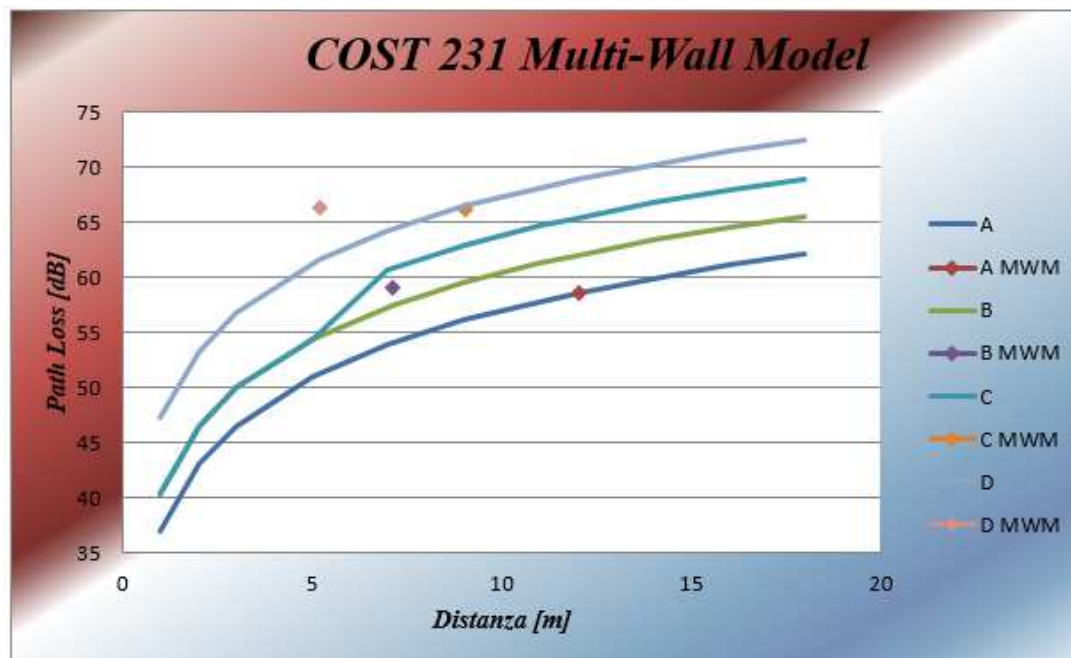


Figura 26. Grafico del Path Loss misurato nei quattro punti dove sono situati gli utenti (attenuazioni dei muri differenti)

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 2 - Confronto tra Misure Teoriche

Si verifica di seguito il calcolo dell'attenuazione apportando tali modifiche al modello:



POSIZIONE	DISTANZA[m]	NUMERO MURI	PATH LOSS [dB]
A	12,02	0 (LOS)	58,6
B	7,11	1 Sottile	57,44
C	9,06	1 Sottile	62,94
D	5,22	1 Spesso + 1 Sottile	61,65

Risultati ottenuti con la modifica del modello COST 231 Multi-Wall

Figura 26. Grafico del Path Loss misurato nei quattro punti dove sono situati gli utenti (attenuazioni dei muri differenti)

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

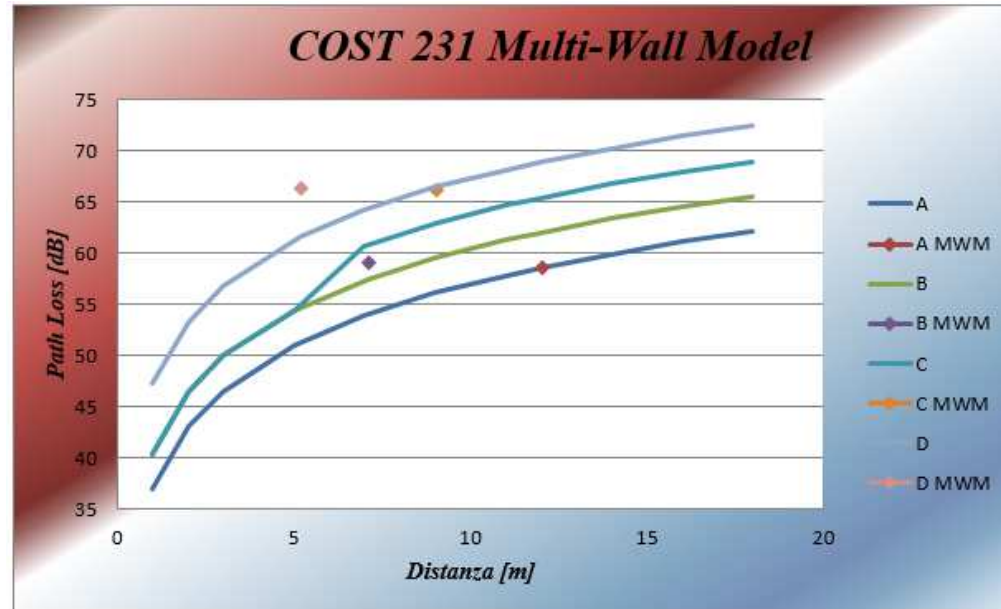
### Scenario 2 - Confronto tra Misure Teoriche

Si può evincere come il modello COST 231 Multi-Wall della prima parametrizzazione preveda un'attenuazione maggiore in confronto a quella ottenuta con i parametri ricavati in letteratura.

Si nota comunque come l'andamento sia in generale in linea con le previsioni di copertura.

Si effettua un confronto con gli altri modelli, nei limiti di realizzabilità degli stessi.

Infatti il Dual Slope Model risulta per tale caso non riproducibile per via dell'inconsistenza dei dati (non si hanno informazioni sufficienti per poter calcolare la distanza di breakpoint, quali l'altezza del trasmettitore).



POSIZIONE	DISTANZA[m]	NUMERO MURI	PATH LOSS [dB]
A	12,02	0 (LOS)	58,6
B	7,11	1 Sottile	57,44
C	9,06	1 Sottile	62,94
D	5,22	1 Spesso + 1 Sottile	61,65

Risultati ottenuti con la modifica del modello COST 231 Multi-Wall

Figura 26. Grafico del Path Loss misurato nei quattro punti dove sono situati gli utenti (attenuazioni dei muri differenti)

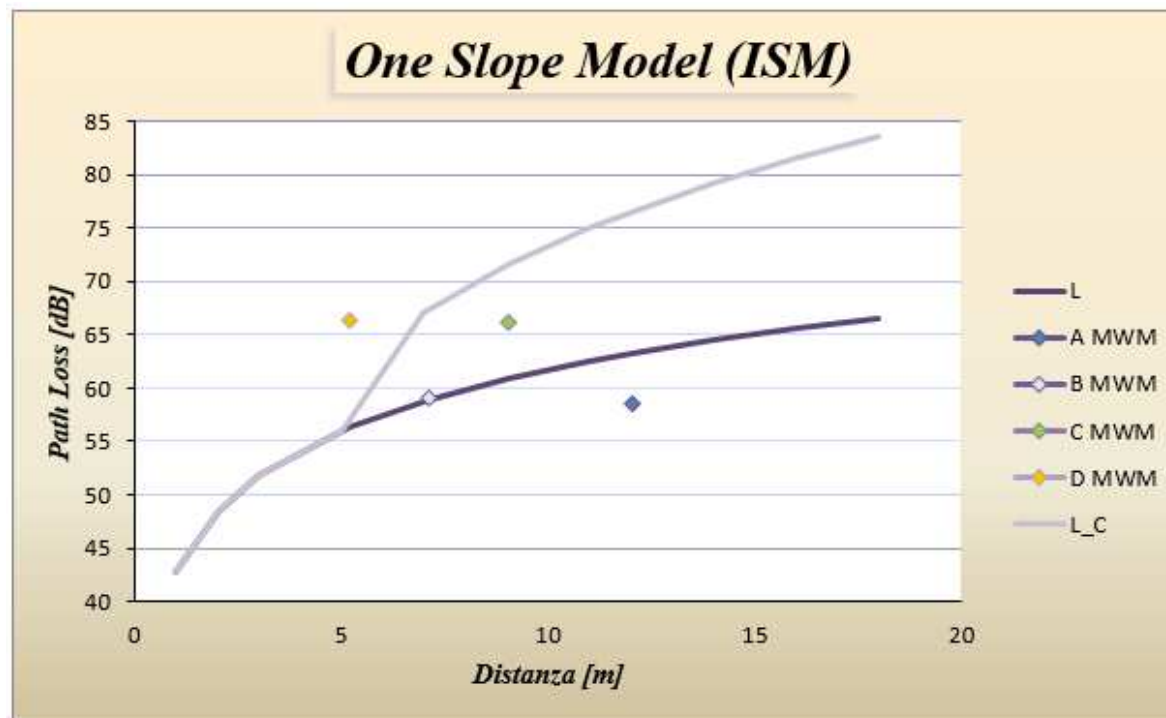
## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 2 - Confronto tra Misure Teoriche

I restanti sono in linea generale tutti applicabili basandosi però sulle considerazioni teoriche e i dati reperibili in letteratura.

In particolare, il One Slope Model prevede l'utilizzo del coefficiente di attenuazione.

Non avendo dati forniti esplicitamente dallo scenario, è necessario calcolare la previsione con l'utilizzo di un coefficiente per ambiente di tipologia "Aperto" (luoghi con stanze ampie) per quanto riguarda i punti A, B e D.



Tuttavia per la posizione C si sceglie, dopo il muro, di considerare un ambiente "Denso" (caratterizzato da stanze ridotte); da letteratura dunque si stima  $n = 1,9$  per un'attenuazione a 1 m di distanza dal trasmettitore pari a 42,7 dB per A, B e D.

Si considerano invece  $n = 4$  e  $L_0 = 33,3 \text{ dB}$ , ottenendo i risultati qui riportati.

Figura 27. Risultati ISM delle previsioni di attenuazione nei punti A, B, C e D

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 2 - Confronto tra Misure Teoriche

Dal grafico si può notare come il modello One Slope si basi puramente sulla distanza per il calcolo dell'attenuazione.

Tuttavia, nonostante il modello sia alquanto semplificato, si può notare come per il punto A l'attenuazione disti di circa 5 dB dalle misurazioni, la posizione B invece di solo 1 dB.

Quando invece la situazione si "complica" con la presenza di muri o ostacoli, il modello nonostante la modifica alla parametrizzazione dovuta a studi empirici non si mostra comunque in linea con le previsioni MWM poiché le differenze nelle posizioni C e D sono rispettivamente di circa 6 e 10 dB.

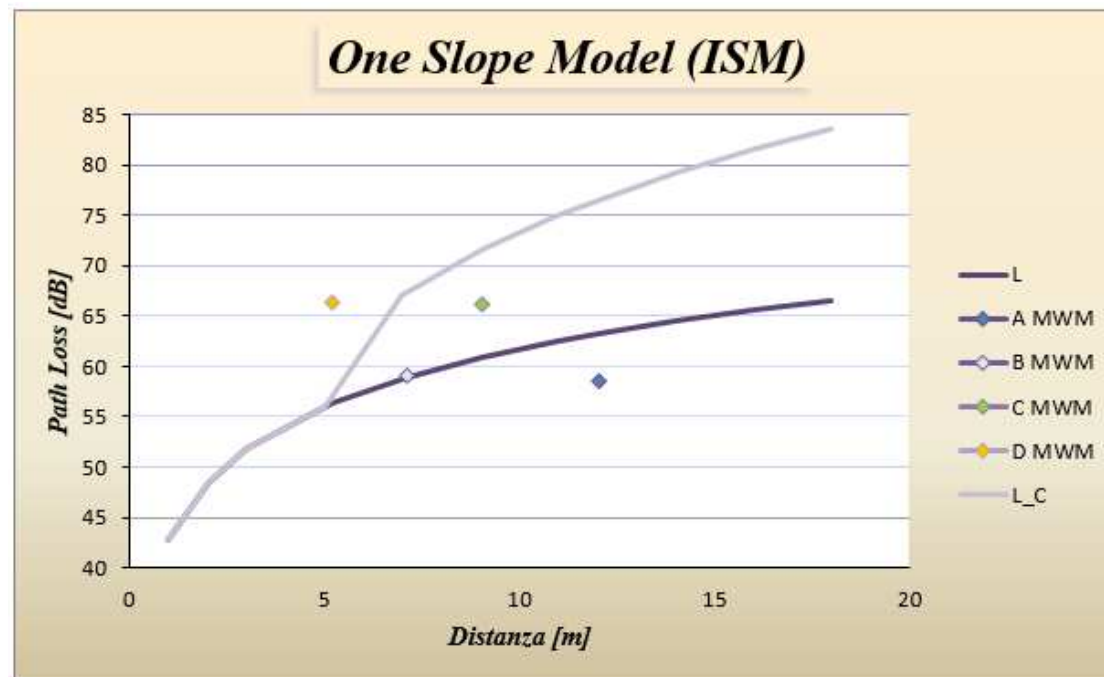


Figura 27. Risultati ISM delle previsioni di attenuazione nei punti A, B, C e D



## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 2 - Confronto tra Misure Teoriche

Il modello Linear Attenuation prevede la scelta di un parametro di attenuazione  $\alpha$ , selezionato a seconda della tipologia di ambiente.

Effettuando la distinzione delle posizioni come sopra, si sceglie  $\alpha=0,22$  per ambiente ampio nel calcolo delle posizioni A, B e D, mentre per il punto C si utilizza  $\alpha=0,62$  per luogo denso (a partire da dove è posizionato il muro della stanza più interna).

Alla luce di ciò si nota come tale modellazione non sia in accordo con le previsioni del COST 231: il Path Loss ha un andamento lineare, e in generale non tiene conto di ulteriori attenuazioni introdotte da ostacoli e muri, e risulta sottostimato:

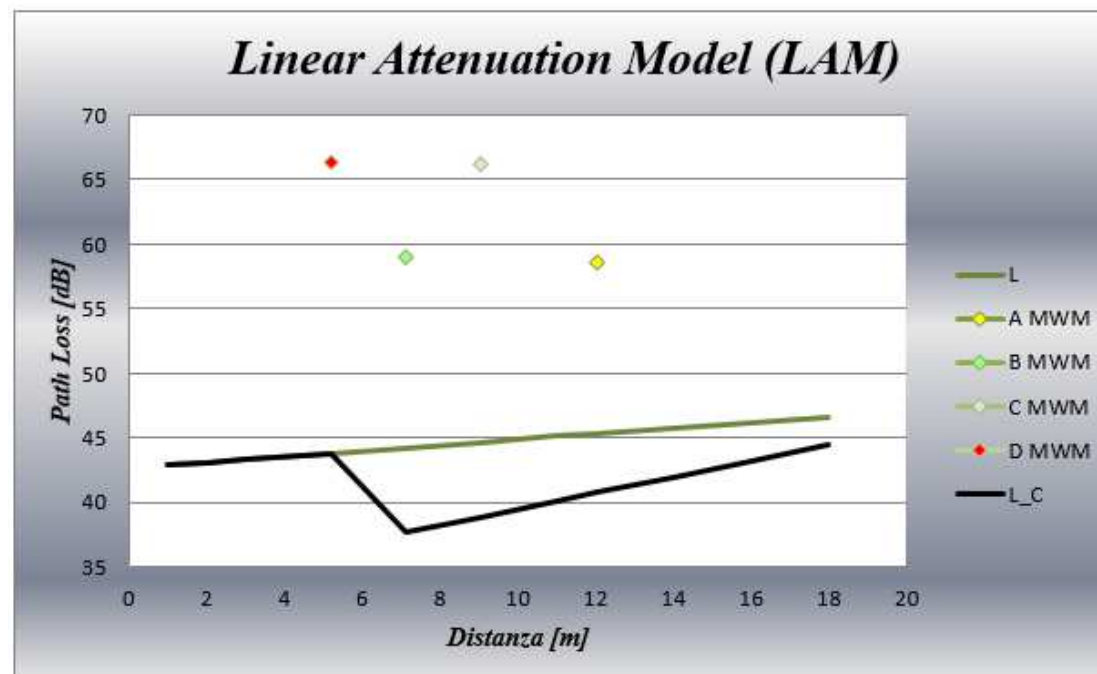


Figura 28. Risultati LAM delle previsioni di attenuazione nei punti A, B, C e D

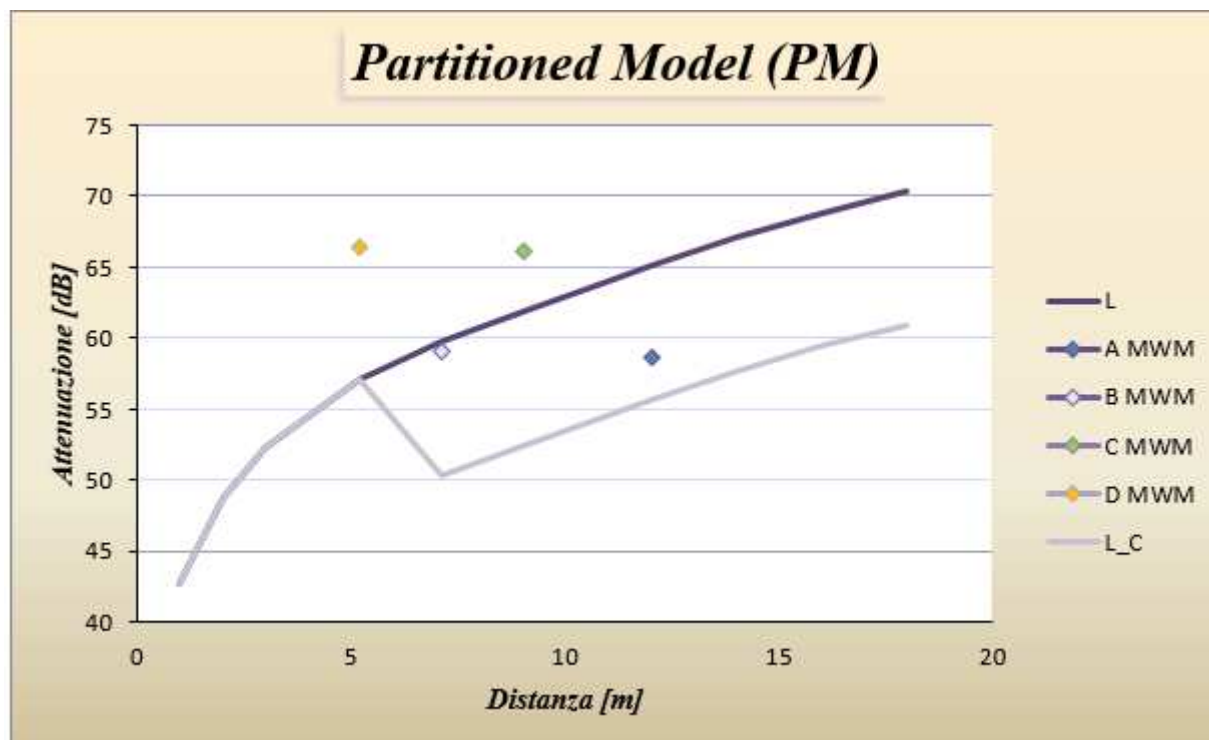
## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 2 - Confronto tra Misure Teoriche

Al fine di valutare il Path Loss tramite il Partitioned Model è necessario distinguere a seconda delle distanze; nel caso in esame si utilizzeranno due diverse funzioni da 0 a 10 m e da 10 a 20 m (non oltre perché non necessarie dato il layout).

Per le attenuazioni in spazio libero si utilizza la parametrizzazione analoga al modello precedente.

Di seguito il grafico e le rispettive attenuazioni per le varie posizioni degli utenti.



Essendo sempre un modello basato sulla sola variazione della distanza, mostra le discrepanze di questa tipologia di parametrizzazione se confrontato con il Multi-Wall.

Figura 29. Risultati PM delle previsioni di attenuazione nei punti A, B, C e D



## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

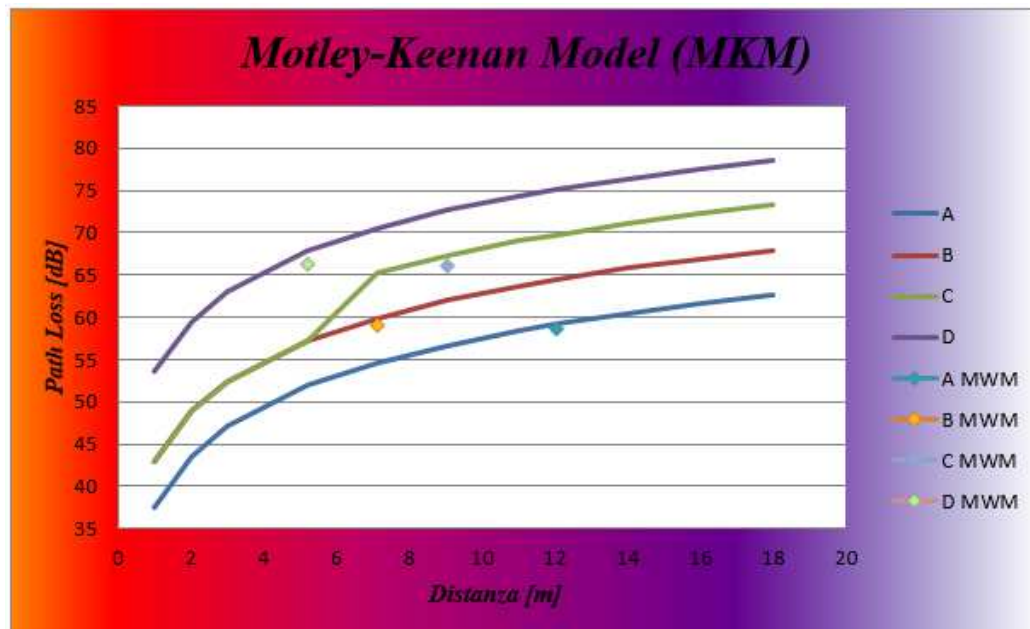
### Scenario 2 - Confronto tra Misure Teoriche

Ora si analizzano i modelli che in qualche modo mostrano maggiori analogie con quello di partenza per via della dipendenza dell'attenuazione anche da ostacoli e muri presenti nel percorso del segnale.

In primis il Motley-Keenan Model prevede il calcolo dell'attenuazione in spazio libero come in precedenza e l'attenuazione introdotta dai muri stimata per tutti essere di 3.4 dB.

Si considera perciò il muro spesso come doppio come da indicazioni.

Il punto A è in LOS; in posizione B andrà considerato un muro sottile, in C due muri sottili e in D uno sottile più uno spesso, per un totale di tre muri sottili.



Come si può vedere, il MKM fornisce risultati abbastanza in linea con il Multi-Wall Model.

Figura 30. Risultati MKM delle previsioni di attenuazione nei punti A, B, C e D

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 2 - Confronto tra Misure Teoriche

Infine si procede con l'analisi dell'Average Walls Model.

Tale modello prevede il calcolo analitico di un'attenuazione media per i muri, da moltiplicare quindi per il numero degli stessi.

Il processo viene iterato per la totalità di ostacoli presenti nel cammino fra trasmettitore e ricevitore.

Il problema non si pone nel calcolo del Path Loss nel punto A poiché si è in condizioni LOS e l'attenuazione sarà analoga a quella del modello precedente.

Per le restanti posizioni invece, è necessario effettuare l'iterazione per calcolare l'attenuazione media dei muri.

In B, il contributo dell'unico muro varrà 3,4 dB (prendendo per mancanza di informazioni l'attenuazione a un metro dal muro con fattore pari a 3,4 dB).

Nella posizione C invece si avrà l'attraversamento di due muri sottili, il cui valor medio varrà 3,98 dB.

L'utente in D infine subirà una perdita dovuta ad un muro sottile ed uno spesso, la cui attenuazione media è stimata essere di 3,08 dB.

Si nota come mediando man mano le attenuazioni dovute ai muri, gli ostacoli avranno sempre minor influenza man mano che la distanza aumenta ai fini della propagazione.

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 2 - Confronto tra Misure Teoriche

Nel grafico di seguito sono riportati i risultati della sperimentazione:

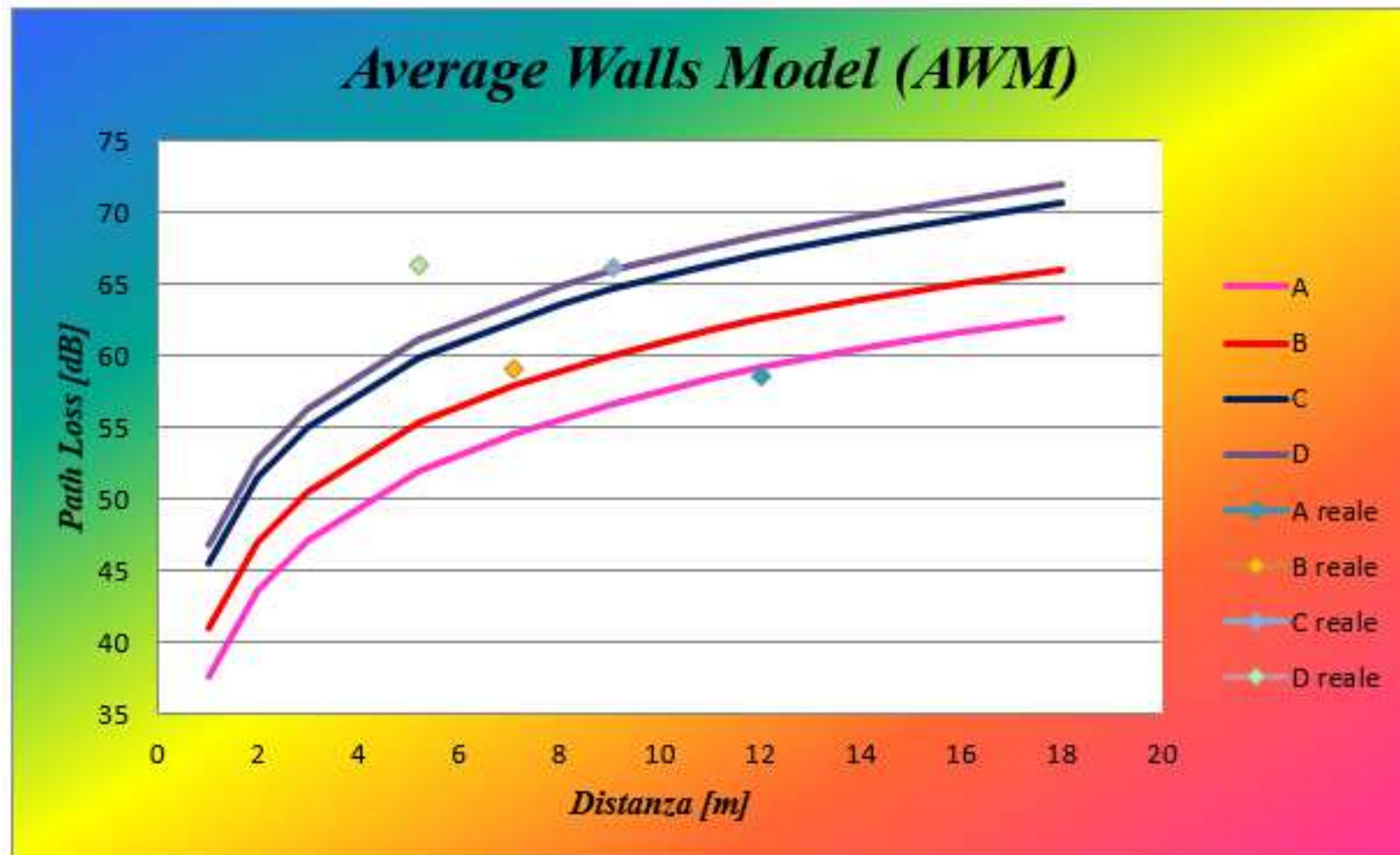


Figura 31. Risultati AWM delle previsioni di attenuazione nei punti A, B, C e D

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 2 - Conclusioni

Dalla tabella di seguito e dal modello COST 231 Multi-Wall preso come riferimento si può concludere come una prima categoria di modelli, quali ISM, LAM e PM, basandosi sulla variazione del Path Loss con la distanza (seppur variamente parametrizzati) offrano stime in genere discordanti rispetto al MWM, sebbene il Partitioned Model sia quello che si avvicina maggiormente.

Una seconda categoria di modelli, in particolare MKM e AWM, sono in genere più articolati per via del calcolo dell'attenuazione introdotta dai muri presenti nel cammino di propagazione.

Si può evidenziare infatti l'analogia dei risultati con il COST 231 Multi-Wall Model, in accordo con la pianificazione di copertura femtocellulare simulata tramite tale modello.

Seguendo la parametrizzazione utilizzata si può evidenziare come il modello Motley-Keenan per tale scenario offra le stime maggiormente in accordo.

MODELLO	A	B	C	D
<b>MWM</b>	<b>58.6</b>	<b>59.03</b>	<b>66.14</b>	<b>66.35</b>
ISM	63.22	58.89	60.89	56.34
LAM	45.34	44.26	38.92	43.85
PM	65.10	59.74	52.44	57.05
MKM	59.15	59.90	67.32	67.85
AWM	59.15	57.99	64.65	61.14

Confronto fra modelli delle previsioni di attenuazione nei punti A, B, C e D

MODELLO	A	B	C	D
<b>MWM</b>	<b>58.6</b>	<b>59.03</b>	<b>66.14</b>	<b>66.35</b>
ISM	4.62	<b>-0.14</b>	-5.25	-10.01
LAM	-13.26	-14.77	-27.22	-22.5
PM	6.5	0.71	-13.7	-9.3
MKM	<b>0.55</b>	0.87	<b>1.18</b>	<b>1.5</b>
AWM	<b>0.55</b>	-1.04	-1.49	-5.21

Differenze delle previsioni di attenuazione nei punti A, B, C e D

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 2 - Conclusioni

Dalle tabelle si evince come il modello di Motley-Keenan permetta delle previsioni analoghe al Multi-Wall Model nell'edificio di planimetria semplice preso in considerazione, con errori compresi fra 0.55 dB a 1.5 dB.

L'analisi tuttavia consente il confronto dei modelli di previsione dell'attenuazione e dimostra come seppur utilizzando tecniche rapide e poco costose, unitamente ad una campagna di misura, possa essere effettuata una pianificazione di una connessione femtocellulare e la predizione della copertura.

Tale strumento è di fondamentale importanza in quanto le femtocelle sono il presente e il futuro degli ambienti indoor; si dimostra infine come possa essere possibile effettuare previsioni con ottimizzazione di tempi e costi nell'impossibilità di utilizzare modelli deterministici, oltremodo onerosi a livello computazionale e temporale.

MODELLO	A	B	C	D
MWM	58.6	59.03	66.14	66.35
ISM	63.22	58.89	60.89	56.34
LAM	45.34	44.26	38.92	43.85
PM	65.10	59.74	52.44	57.05
MKM	59.15	59.90	67.32	67.85
AWM	59.15	57.99	64.65	61.14

Confronto fra modelli delle previsioni di attenuazione nei punti A, B, C e D

MODELLO	A	B	C	D
MWM	58.6	59.03	66.14	66.35
ISM	4.62	-0.14	-5.25	-10.01
LAM	-13.26	-14.77	-27.22	-22.5
PM	6.5	0.71	-13.7	-9.3
MKM	0.55	0.87	1.18	1.5
AWM	0.55	-1.04	-1.49	-5.21

Differenze delle previsioni di attenuazione nei punti A, B, C e D

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 3 - Descrizione e Setup di Misura

Gli scenari descritti ed esaminati in precedenza prevedono l'applicazione dei modelli di attenuazione in ambiente indoor in un piano.

Tuttavia è di fondamentale importanza l'analisi della propagazione del segnale su più piani all'interno di uno stesso edificio, poiché tipico di numerose realtà anche domestiche (ad esempio la copertura di un'abitazione che si sviluppa in altezza) e interessante per la comprensione del comportamento del segnale stesso nel caso in cui la direzione di propagazione non sia prettamente orizzontale.

Da tali considerazioni si può evincere facilmente come i modelli quali One e Dual Slope Model, Linear Attenuation o Partitioned Model implicino evidenti limiti di applicabilità: essendo stati sviluppati per la previsione basata sulla variazione della distanza orizzontale non consentono un adattamento per il caso in questione.

E' opportuno infatti analizzare lo scenario mediante modelli maggiormente accurati che tengano in considerazione un'attenuazione additiva dovuta alla propagazione del segnale stesso fra più piani.

La struttura a scale offre ovviamente la possibilità alle persone di potersi spostare da un piano all'altro in un edificio.

In quanto tale, la copertura wireless lungo le rampe delle scale è di fondamentale importanza per permettere la continuità del segnale anche in costruzioni sviluppate in altezza.

Costruite in calcestruzzo, minimizzano le penetrazioni delle frequenze radio provenienti da fonti esterne.



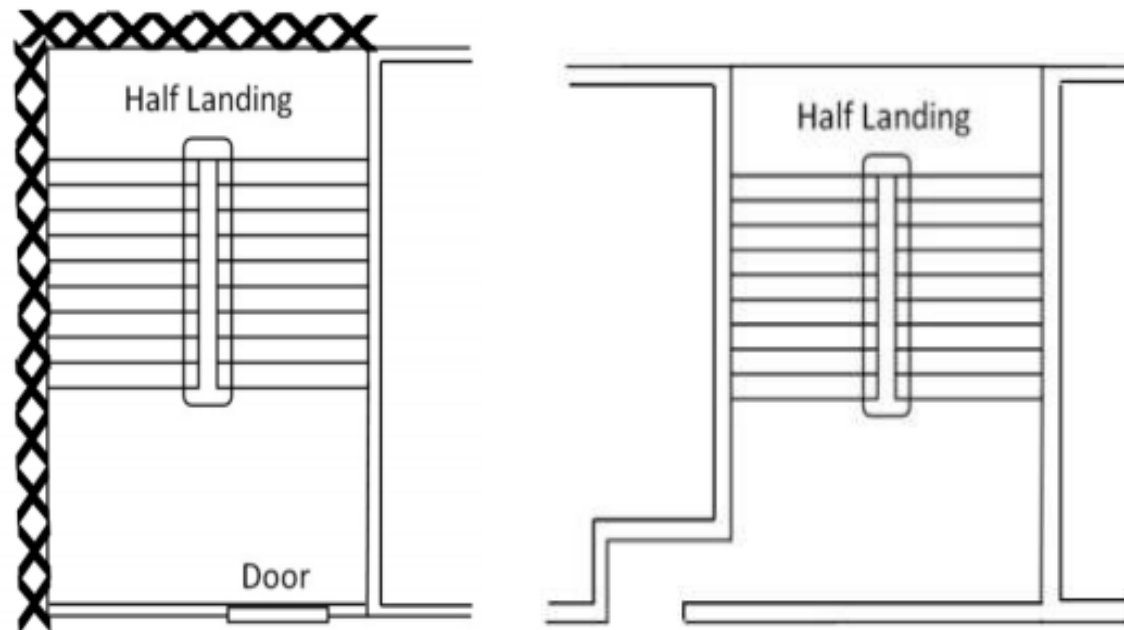
## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 3 - Descrizione e Setup di Misura

E' necessario tenere in considerazione come il segnale si attenui in maniera consistente nell'attraversamento di più piani a diversi metri di distanza; è quindi importante prevederne il comportamento.

Lo studio dell'attenuazione si effettua in maniera molto precisa con l'utilizzo di modelli deterministici, ma questi possono non essere applicabili per via della complessità computazionale.

Sono stati analizzati i modelli empirici già esposti nello scenario presente, che considera due trombe di scale alle frequenze di 900 MHz e 1800 MHz, con differenti altezze.



La prima è situata in ambiente chiuso al bordo dell'edificio, con i muri di sinistra e posteriore realizzati con griglie d'acciaio, con una porta d'entrata in ogni piano.

La seconda è situata in mezzo all'edificio, racchiusa da muri in mattoni intonacati. Vi è un passaggio per accedere alle scale senza alcuna porta.

Per il Sito1, il primo piano è situato a circa 5.5 m calcolati in linea obliqua e il secondo a 10 m.

Nel sito 2 invece essi si trovano a 4 m e 7.5 m rispettivamente.

Figura 32. Configurazione dei due siti dove sono poste le rampe di scale, rispettivamente sito 1 e sito 2

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 3 -Confronto tra Misure Teoriche e Pratiche

Al fine di comparare le prestazioni dei modelli, sono stati utilizzati COST 231 Multi-Wall, ITU-R e Motley-Keenan Model.

Il Path Loss in spazio libero alle frequenze di 900 MHz e 1800 MHz vale rispettivamente 30.55 dB e 40.1 dB nel sito 1, mentre i valori per il secondo sono 33.26 dB e 39.88 dB.

La parametrizzazione del modello COST-231 è rappresentata nella seguente tabella:

SITO	COST-231	
	b	
	900MHz	1800MHz
<b>1</b>	0.89	0.77
<b>2</b>	0.96	0.99

Parametri per la ricostruzione del modello COST 231

I fattori di attenuazione del piano sono stati acquisiti mediando le differenze fra il Path Loss misurato lungo le scale al secondo e terzo piano e il Path Loss calcolato basandosi sui parametri del modello per la predizione del PL nel primo piano.

Il modello ITU-R in letteratura propone valori di  $N$  e  $L_f$ . I primi sono rispettivamente 33 e 30 per le frequenze di 900 MHz e 1800 MHz in uffici (sito 1) e 33 e 28 negli edifici residenziali (sito 2).



## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 3 -Confronto tra Misure Teoriche e Pratiche

Per quanto riguarda i parametri  $L_f$ , i valori proposti alle frequenze di 900 MHz sono di 9 dB e 19 dB per l'attraversamento del primo e del secondo piano. Alla frequenza di 1800 MHz, i valori differiscono in maniera importante a seconda della tipologia di edificio, che sia ufficio o residenziale.

Nella costruzione residenziale il parametro  $L_f$  proposto in dB vale  $4n$ , mentre negli uffici  $L_f = 15 + 4(n - 1)$ , con  $n$  numero di piani attraversati.

Il fattore di attenuazione del muro è stato ignorato nel calcolo del Path Loss come se il segnale non attraversasse alcuna parete.

E' possibile confrontare i risultati precedenti con i modelli già utilizzati per l'analisi degli scenari.

Il modello Motley-Keenan è stato applicato con l'utilizzo dell'attenuazione in spazio libero di 31.522 dB per frequenze di 900 MHz e di 37.543 dB per la banda di 1800 MHz.

L'attenuazione dovuta ai piani è stata calcolata con i parametri reperiti in letteratura per un ammontare di 18.3 dB.

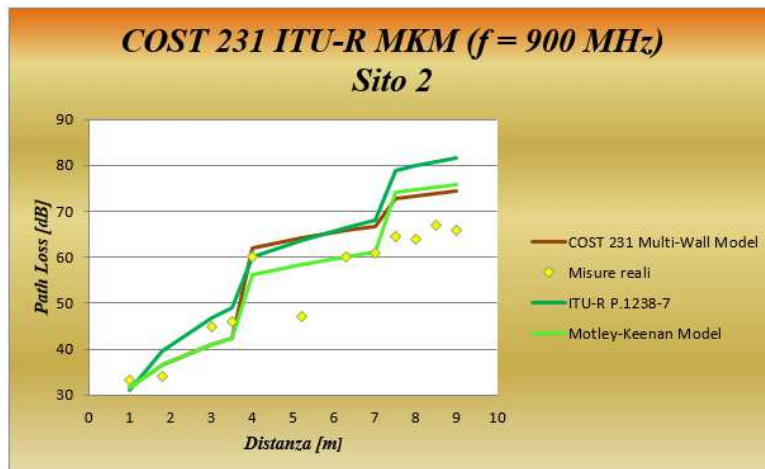
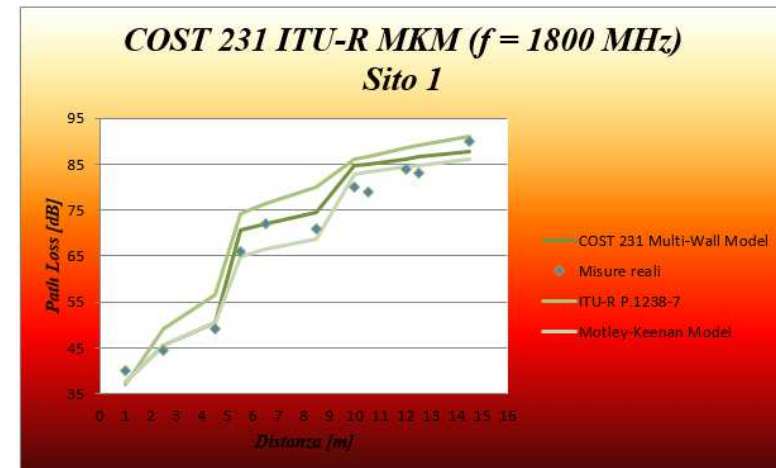
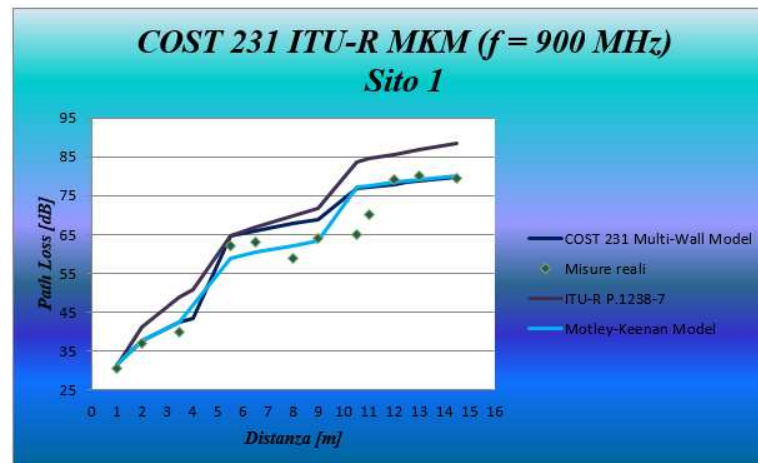
La distanza considerata non è più quella orizzontale ma prevedendo la percorrenza delle scale.

# MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 3 -Confronto tra Misure Teoriche e Pratiche

Nelle figure seguenti è rappresentato il confronto fra il Path Loss derivato dalle misure e quello ottenuto mediante il calcolo tramite formulazioni empiriche dei modelli COST-231 MWM, ITUR P.1238-7 e Motley-Keenan:



## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 3 -Confronto tra Misure Teoriche e Pratiche

E' interessante inoltre effettuare il confronto con i modelli già utilizzati nei precedenti scenari, che semplificano il calcolo dell'attenuazione considerando soltanto la variazione del medesimo con la distanza.

Al fine di parametrizzarli è stata presa in considerazione l'attenuazione in spazio libero calcolata poc' anzi al variare della frequenza (31.522 dB a 900 MHz e 37.543 dB a 1800 MHz).

Il modello One Slope prevede un indice di attenuazione  $n=5.4$  per ambienti multipiano.

Il Dual Slope Model necessita del calcolo della distanza di breakpoint. Come da ipotesi, il trasmettitore è posizionato ad un'altezza di 1.25 m, mentre il ricevitore a 1.27 m dal suolo. La distanza di breakpoint calcolata è di 19.05 m per la banda di 900 MHz e di 38.1 m a 1800 MHz. Come si può facilmente evincere nessun sito raggiunge prevede misurazioni a tali distanze, dunque il modello degenera nel One Slope.

Il Linear Attenuation Model considera un coefficiente di attenuazione  $\alpha$  stimato da letteratura pari a 2.8 per ambiente multi-floor.

Il Partitioned Model invece considera una diversa formulazione in base alla distanza. Poiché nel sito 1 le distanze oltrepassano i 10 m, è necessario il calcolo del Path Loss in maniera diversificata; ciò risulta superfluo invece nel secondo ambiente, in cui la distanza massima è 9 m.

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 3 -Confronto tra Misure Teoriche e Pratiche

Di seguito si riportano le differenze in dB dei Path Loss calcolati mediante l'utilizzo dei vari modelli e delle misure reali:

SITO1									
900MHz					1800MHz				
d	Reali	COST	ITUR	MKM	d	Reali	COST	ITUR	MKM
1	30,55	0.98	0.53	0.98	1	40.1	-2.55	-2.99	-2.55
2	37	0.55	4.02	0.55	2,5	44.5	1.01	4.54	1.01
3.5	40	2.41	9.04	2.41	4,5	49	1.61	7.70	1.61
5.5	62	2.63	2.52	-3.04	5,5	66	4.65	-6.68	-1.02
6.5	63	3.08	3.91	-2.59	6,5	72	0.11	4.49	-5.57
8	59	8.89	10.89	3.21	8,5	71	3.44	8.99	-2.24
9	64	4.91	7.57	0.76	10	80	4.59	6.11	2.80
10.5	65	11.83	18.78	12.20	10,5	79	6.01	7.74	4.22
11	70	7.24	14.45	7.60	12	84	2.17	4.48	0.38
12	79	-1.01	6.70	-0.64	12,5	83	3.53	6.01	1.73
13	80	-1.31	6.84	-0.95	14,5	90	-2.18	0.95	-3.98
14.5	79,5	0.14	8.91	0.50					

SITO2									
900MHz					1800MHz				
d	Reali	COST	ITUR	MKM	d	Reali	COST	ITUR	MKM
1	33,26	-1.73	-2.18	-1.73	1	39,88	-2.33	-2.77	-2.33
1,8	34	2.63	5.51	2.63	1,8	40	2.65	4.25	2.65
3	45	-3.93	1.83	-3.93	2,4	43,5	1.65	4.25	1.65
3,5	46	-3.59	3.04	-3.59	3	43	4.09	7.46	4.09
4	60	1.87	0.05	-3.81	3,5	60	-11.57	-7.66	-11.57
5,2	47	17.15	16.71	11.47	4,5	64,5	4.41	-5.10	-1.26
6,3	60	5.81	6.46	0.14	6,3	67	4.83	-3.51	0.84
7	61	5.73	6.97	0.05	8	75	3.83	-4.61	5.86
7,5	64,5	8.23	14.46	9.78	8,5	76	3.35	-4.87	5.38
8	64	9.29	15.89	10.84	9	80	0.15	-8.18	1.88
8,5	67	6.82	13.76	8.36	9,5	79	1.32	-6.52	3.35
9	66	8.32	15.57	9.86					

Differenze di Path Loss in valore assoluto fra le misure reali e i modelli COST 231, ITU-R e Motley-Keenan alle bande 900 MHz e 1800 MHz per il sito 1 e 2

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Scenario 3 -Confronto tra Misure Teoriche e Pratiche

Di seguito si riportano le differenze in dB dei Path Loss calcolati mediante l'utilizzo dei vari modelli e delle misure reali:

SITO1										SITO2									
900MHz					1800MHz					900MHz					1800MHz				
d	Reali	ISM	LAM	PM	d	Reali	ISM	LAM	PM	d	Reali	ISM	LAM	PM	d	Reali	ISM	LAM	PM
1	30,55	0.97	3.77	0.97	1	40.1	-2.56	0.24	-2.56	1	33,26	-1.74	-1.06	-1.74	1	39,88	-2.34	0.46	-2.34
2	37	10.78	0.12	0.54	2,5	44.5	14.53	0.04	1	1,8	34	11.31	-2.56	2.63	1,8	40	11.33	2.58	2.65
3.5	40	20.90	1.32	2.40	4,5	49	23.82	1.14	1.61	3	45	12.29	5.08	-3.94	3	43	20.31	2.94	4.09
5.5	62	9.50	-15.08	-14.22	5,5	66	11.52	-13.06	-13.65	3,5	46	14.90	4.68	-3.60	3,5	60	6.92	-12.66	-11.58
6.5	63	12.42	-13.28	-15.22	6,5	72	9.44	-16.26	-18.20	4	60	4.03	17.28	-12.49	4,5	64,5	8.32	-14.36	-13.89
8	59	21.29	-5.08	-9.42	8,5	71	16.73	-9.66	-14.87	5,2	47	23.19	0.92	-1.16	6,3	67	13.71	-11.82	-13.47
9	64	19.05	-7.28	-13.39	10	80	11.54	-14.46	-22.46	6,3	60	14.69	10.84	-12.49	7	74	9.18	-16.86	-19.56
10.5	65	21.67	-4.08	-14.39	10,5	79	13.69	-12.06	-20.82	7	61	16.16	9.88	-12.58	8	75	11.31	-15.06	-19.40
11	70	17.76	-7.68	-17.24	12	84	11.82	-12.86	-24.08	7,5	64,5	14.28	11.98	-15.48	8,5	76	11.73	-14.66	-19.87
12	79	10.80	-13.88	-25.10	12,5	83	13.78	-10.46	-22.55	8	64	16.29	10.08	-14.42	9	80	9.07	-17.26	23.37
13	80	11.67	-12.08	-25.06	14,5	90	10.26	-11.86	-27.62	8,5	67	14.71	11.68	-16.89	9,5	79			
14.5	79,5	14.74	-7.38	-23.14						9	66	17.05	9.28	-15.39					

Differenze di Path Loss in valore assoluto fra le misure reali e i modelli ISM, LAM e PM alle bande 900 MHz e 1800 MHz per il sito 1 e 2

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Conclusioni

Dallo sviluppo dei diversi modelli si possono trarre alcune interessanti conclusioni.

Innanzitutto si può ben osservare come la casistica di modelli che prevedono un fattore di attenuazione dovuto al piano, seppur calcolato in maniera differente, dia risultati migliori; i dati pratici confermano dunque le ipotesi.

Si nota come per il sito 1 i modelli COST, ITU-R e MKM offrano precisioni ben più elevate (salvo casi particolari) rispetto ai restanti, con valori che differiscono rispetto a quelli reali anche di soli pochi punti decimali. In particolare, il modello di Motley-Keenan raggiunge un'ottimizzazione più che soddisfacente, e nello scenario in questione offre i migliori risultati.

Identico discorso può essere fatto anche per il sito 2, ove si possono apprezzare imprecisioni alquanto elevate per quanto riguarda il secondo insieme di modelli, raggiungendo picchi di 23.37 dB di differenza.

Ciò evidenzia come, seppur secondo leggi diverse, i modelli più rudimentali che offrivano discrete prestazioni per quanto riguarda la previsione del Path Loss in ambienti indoor su un solo piano si rivelino inadeguati per i calcoli in edifici multipiano; questo giustifica quindi il proliferare di vari modelli che prevedano fattori correttivi al fine di considerare attenuazioni tutt'altro che trascurabili.

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Conclusioni

Allo scopo di fornire una panoramica completa è necessario introdurre un cenno teorico sull'effetto che i materiali comportano sulla propagazione del segnale.

Alcune documentazioni(ref.paper CTU Prague) riportano i valori di attenuazione relativi, a seconda della tipologia di ostacolo, classificandoli secondo la seguente tabella:

MATERIALE	ATTENUAZIONE [dB]
Lamina di metallo	5.4
Tramezzo in mattoni	3.1
Finestra in vetro	/
Muro rinforzato in calcestruzzo	3.5

Attenuazione relativa ai materiali

Focalizzando l'attenzione sugli oggetti in metallo, è importante sottolineare come la presenza influenzi in maniera significativa la propagazione del segnale.

In particolare è stato dimostrato che, se situati in corridoi, possano avere un effetto a guida d'onda molto forte e ciò si rispecchierà nel valore dell'esponente  $n$  del Path Loss utilizzato nei modelli di previsione (sarà alquanto basso).

Altri oggetti metallici quali traverse, staccionate, statue, etc., situati nel cammino diretto influenzano le misurazioni comportando margini di errore di circa  $\pm 2$  dB.



## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Conclusioni

Può essere interessante apprezzare un comportamento irregolare per quanto riguarda l'attenuazione del segnale nell'attraversare un muro vicino ai servizi igienici.

La perdita causata da essi è significativamente maggiore rispetto a quella inerente alle altre tipologie di stanze (dell'ordine dei 20 dB) e dovuta con molta probabilità ai tubi incastonativi.

E' dunque necessario utilizzare un approccio differente nel calcolo della copertura rispetto alle altre parti della costruzione.

Buona norma consiglia di evitare il posizionamento di Access Points nelle prossimità di tali ambienti per la suddetta motivazione, incorrendo nel rischio di ottenere scarsa copertura dall'altro lato della stanza.

L'utilizzo di alcuni modelli opportunamente parametrizzati e ottimizzati quali il COST 231 Multi-Wall permette di ottenere buone previsioni anche in caso di gabbie metalliche, presenza di persone (che comportano anch'esse un'attenuazione) senza degradarne in maniera significativa le prestazioni.

Per un'accurata attendibilità delle misure indoor è necessario effettuarle anche nei casi di maggior utilizzo dell'ambiente stesso (ad esempio un ufficio frequentato dal personale).

Per effettuare una pianificazione ottimale di posizionamento degli Access Points occorre considerare sia il livello minimo di campo che gli effetti dell'interferenza.



## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Conclusioni

Quando è necessario implementare la copertura in una vasta area che comprende più di un'abitazione o più piani in un edificio il progettista deve affrontare diverse limitazioni tecniche le quali richiedono uno studio più approfondito sull'installazione per essere affrontate.

In aggiunta, la difficoltà potrebbe accrescere ulteriormente se fosse richiesta la copertura totale di un'area ampia costituita da varie costruzioni.

In tal caso infatti i modelli statistici e quelli basati sul Ray Tracing non sono sempre facilmente utilizzabili.

Inoltre, i risultati dei metodi analitici e statistici potrebbero risultare non implementabili a causa della reale struttura dell'edificio e delle considerazioni estetiche.

Per poter effettuare la pianificazione della rete è necessaria la messa a punto di una strategia di lavoro per ciascuna costruzione.

Innanzitutto si effettua uno studio e un'ispezione dell'edificio mediante sopralluoghi e planimetria.

Quindi si conducono le opportune misurazioni al fine di ottenere le attenuazioni alla propagazione dovute ai muri e ai piani nel caso di propagazione multipiano.

Infine si trovano delle posizioni adeguate ove installare ciascun Access Point e si stima la copertura in funzione dei muri ostruenti in linea di vista e della distanza dall'AP.

## CONFRONTO TRA MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

### Conclusioni

L'accuratezza dei modelli empirici risiede nel considerare le attenuazioni dei muri, dei soffitti e dei piani.

Tale effetto, unitamente al multipath e alla diffrazione dovuta agli angoli è alquanto difficile da valutare.

Non tutti i muri danno luogo alla medesima attenuazione nonostante siano realizzati con gli stessi materiali.

E' comprensibile come gli edifici costruiti in diversi periodi e mediante tecniche differenti comportino varie caratteristiche di attenuazione dei muri.

Di conseguenza, lo studio della perdita dovrebbe essere effettuato in ogni edificio di un'area estesa.

E' necessario dunque classificare le misure di campo in base alle tecniche di costruzione e ai materiali impiegati, ed effettuare un controllo sulle similitudini effettive sussistenti fra i modelli e le misurazioni reali condotte negli edifici.

Buona norma in tali casi è dunque calcolare il valore medio con lo scopo di ridurre l'errore.

Alla luce di quanto affermato in precedenza l'evoluzione tecnologica ha comportato la diffusione dei dispositivi in ambienti interni che producono campi elettromagnetici: elettrodomestici, Wi-Fi, Tv e telefoni cellulari sono le fonti più comuni del cosiddetto elettrosmog.

Definito anche inquinamento elettromagnetico, è generato dalle radiazioni elettromagnetiche non ionizzanti i cui effetti sulla salute umana sono tuttora oggetto di studio e di discussione.

Il telefono cellulare, oggetto posseduto e utilizzato oramai dalla maggioranza della popolazione mondiale, emette onde elettromagnetiche per poter effettuare le proprie funzioni in stato attivo ma anche in stand-by, durante cui segnala la propria posizione alla stazione radio base di appartenenza.

Negli ultimi decenni vi sono state intensive attività di ricerca; il rapporto realizzato dagli studiosi di varie nazioni “Telefonia senza fili e tumori cerebrali: 15 motivi di inquietudine”, pubblicato da EM Radiation Research sottolinea come l'utilizzo di tali dispositivi risulti particolarmente dannoso per i bambini che, poiché dotati di una conformazione cranica ancora in sviluppo, sono più soggetti rispetto agli adulti a contrarre tumori cerebrali. Inoltre i rischi aumentano anche per tumori oculari, alle ghiandole salivari, leucemie e linfomi.

Ovviamente gli interessi in gioco sono molteplici, e agli allarmismi più o meno verificati (fomentati anche per fini politici) si contrappone il tornaconto economico delle case produttrici di tali dispositivi, le quali hanno da sempre mostrato un atteggiamento deterrente nel sottostimare i rischi

Allo stato attuale non sono emerse sufficienti prove scientifiche nel stabilire l'effettiva nocività dei campi; al tempo stesso non vi sono studi che escludono con assoluta certezza la possibilità di una relazione tra onde elettromagnetiche e tumori.

Vengono dunque proposte alcune raccomandazioni, talune suggerite e altre imposte dai decreti legge dei vari Stati, che implicano il non superamento dei limiti consentiti e che prevedono il preservamento di alcuni luoghi pubblici quali scuole e asili frequentati per tempi prolungati.

Ci si interroga sulle reali conseguenze sulla nostra salute.

Alcune persone lamentano condizioni di malessere (mal di testa, dolori muscolari e articolari) se situate nei pressi di campi elettromagnetici.

Tale fenomeno è noto con il termine di elettrosensibilità ed è stato a sua volta oggetto di studi sperimentali, i quali hanno mostrato come non siano riscontrabili differenze sostanziali fra soggetti “sani” ed “elettricamente ipersensibili”.

Il 31 maggio 2011 la IARC (International Agency For Research on Cancer), agenzia intergovernativa per la ricerca sul cancro facente parte dell'OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità) ha classificato i campi elettromagnetici a radiofrequenza come “possibili cancerogeni per l'uomo” (gruppo 2B) poiché non vi sono prove scientifiche abbastanza consistenti da accertarne il nesso eziologico.

# MODELLI DI PROPAGAZIONE INDOOR

## ELETTROSMOG

La mancanza di conoscenze scientifiche certe non deve rappresentare un alibi per rinviare le misure di prevenzione, secondo il principio di precauzione, in base al quale si possono adottare subito provvedimenti che possono mantenere l'esposizione alle onde elettromagnetiche al più basso livello di rischio ragionevolmente raggiungibile.

Alcuni accorgimenti legati a effetti sicuri sul corpo umano suggeriscono di ridurre i tempi di utilizzo dei telefoni cellulari con parti sensibili a stretto contatto con l'apparecchio (testa, cuore, orecchio), limitare le chiamate in ambienti chiusi (in auto le radiazioni riverberano fra le superfici metalliche e le vetrate) e provvedere all'acquisto di un apparato con un basso tasso di assorbimento (SAR, Specific Absorption Rate).

Inoltre, data la nostra natura fortemente elettrica (gli stimoli vengono “codificati” dal cervello tramite impulsi elettrici), l'interazione con un campo elettrico o magnetico artificiale provoca indubbiamente degli effetti, che tuttavia possono anche non costituire conseguenze biologiche apprezzabili o ancor meno danni.

A fronte di ciò è meglio porre il problema in altri termini, ovvero domandandosi quanto tempo intercorre fra l'esposizione di un soggetto a fenomeni elettromagnetici e il sopraggiungimento di una patologia.

Vi sono vari fattori da considerare: la predisposizione, il tempo di esposizione, la tipologia e l'intensità dell'”aggressione” elettromagnetica.

La prevenzione è quindi l'unica scelta plausibile per evitare di raggiungere i limiti individuali di tolleranza.

Per quanto riguarda gli ambienti prettamente indoor come le abitazioni è necessario preservare alcune stanze: la camera da letto dovrebbe preferibilmente essere totalmente priva di sorgenti elettromagnetiche (telefoni cellulari accesi, radio) affinché il corpo possa riposare e rigenerarsi durante le ore notturne; inoltre nelle ore di inattività è consigliabile spegnere o al più “schermare” il router wi-fi.

Tali accorgimenti consentono di limitare al minimo le radiazioni a cui il nostro organismo è continuamente esposto ma d'altro canto non permettono di soddisfare la nostra esigenza oramai quotidiana di essere raggiungibili sempre e ovunque.

Inoltre è importante sottolineare come l'utilizzo di femtocelle in ambienti indoor incrementi la preoccupazione sulla salute e sicurezza relativa ai problemi sull'utilizzo di onde radio.

Il Consiglio generale ha disposto un atteggiamento cautelativo (come ampiamente esposto sopra) sebbene non sia ancora stato trovato un nesso concreto fra radiazioni e la comparsa di tumori.

Inoltre, i costruttori di tecnologia femtocellulare hanno evidenziato come non siano state rilevate alcune “minacce” per la salute durante l'utilizzo in ambienti indoor.

Attualmente le trasmissioni radio sono permesse in differenti forme, ma al livello tale da consentire alla ricerca scientifica di comprovarne l'innocuità.

Le femtocelle rispettano tutti i limiti riconosciuti dall' International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) e autorizzati dal World Health Organization (WHO) (e ampiamente approvati da tutti i governi del mondo) applicati anche agli altri dispositivi wireless quali telefoni mobili, access points Wi-Fi, Bluetooth, ecc.

E' necessario quindi, ingegneristicamente parlando, trovare un giusto compromesso fra le due necessità alla luce delle considerazioni sopra effettuate e affrontando il fenomeno sotto un'ottica preventiva nell'attesa di prove concrete sui reali effetti che le onde elettromagnetiche sortiscono sul nostro equilibrio biologico.