



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELLE COMUNICAZIONI

Tesi di Laurea Magistrale

**IBRIDIZZAZIONE DI SISTEMI
DI LOCALIZZAZIONE INDOOR
MEDIANTE L'USO CONGIUNTO
DI INFRASTRUTTURE WiFi
E RETI MOBILI FEMTO-CELLULARI**

RELATORE

Ch.ma Prof.ssa
Maria Gabriella Di Benedetto

CANDIDATO

Alessandro Moschella
Matr. 1375639

CORRELATORE

Ing. Alessandro Tosti
Telecom Italia S.p.A.

Anno Accademico 2014/2015

Alla mia famiglia, alla Vita.

RINGRAZIAMENTI

Desidero innanzitutto ringraziare la Prof.ssa Di Benedetto, per avermi dato la possibilità di portare avanti questo progetto importante e impegnativo, e quindi di aver creduto nelle mie capacità. La sua empatia è stata la prima cosa che mi ha colpito fin da subito, il suo approccio alle persone e il suo evidente ottimismo. La solarità è una delle caratteristiche che più di ogni altra permea chi ci sta accanto. La ringrazio per la sua professionalità e costante presenza, per i suoi consigli e per le spinte a migliorarmi e a far crescere il lavoro.

La ringrazio inoltre per aver fatto sì che la mia tesi fosse strutturata in modo da poter interessare il mondo del lavoro fin da subito, e quindi per avermi messo in contatto con l'Ing. Alessandro Tosti, di Telecom Italia.

Ringrazio dunque l'Ing. Tosti che ha sempre avuto un occhio attento e critico sul mio lavoro, dandomi gli input giusti per svilupparla e migliorarla di volta in volta. Grazie ancora perchè mi ha dato la possibilità di capire quali possano essere le strade migliori da percorrere per una crescita aziendale.

A questo punto non posso che ringraziare il dottorando Giuseppe Caso, uno dei miei punti riferimenti in questo percorso. Devo ringraziarlo perchè è sempre stato pronto a chiarirmi le idee, a darmi suggerimenti, e a discutere i risultati. Discutere come si fa con un collega, con un compagno di corsi, e avere un serio scambio di opinioni. Lo ringrazio ancora perchè anche durante il suo soggiorno estero non ha cessato di darmi i suoi consigli, tramite mail, tramite skype, insomma con ogni mezzo.

Ringrazio il Prof. De Nardis, per i suoi impeccabili interventi che puntualmente hanno risolto i miei problemi, e alla sua capacità di saper unire rigore ingegneristico a distensivi momenti ricreativi.

Arriviamo poi alla cara Anna Paola, compagna di svago e di risate. Devo ringraziarla perchè in quegli inevitabili momenti down, c'era sempre lei che, involontariamente o meno, riusciva ad alleggerirmi e a ridarmi il sorriso.

Devo adesso necessariamente ringraziare la mia famiglia: i miei genitori e le mie so-

relle. Per noi questo traguardo non è solo una soddisfazione accademica, è piuttosto una vittoria. Vittoria per aver vinto una sfida che fino a qualche anno fa sembrava potesse avere la meglio: il trasferimento a Roma, il cambio di vita, insomma tutto. Grazie infinitamente per i loro sorrisi, i loro sguardi colmi di forza, i loro respiri sempre attorno a me, sempre con me. Grazie di avermi spronato, di avermi capito, di avermi amato.

Infine grazie, con il cuore, a tutti gli amici che hanno reso piacevole, divertente e più che mai vivo il mio percorso di studi. Grazie a Marcello che in ogni momento mi ha sempre supportato, in ogni evoluzione, in ogni cambiamento. Grazie ad Antonio, per la sua amicizia lunga una vita, e per la vita, grazie per la sua limpidezza d'animo e per le risate che mi ha sempre regalato. Grazie ad Elisa, la mia cara Elisa, per la sua presenza oltre ogni presenza e per la sua vulcanica energia, che è riuscita a sradicare assunti e debolezze di una vita. E grazie a Veronica, che con la sua arte ha stravolto le mie certezze, e ne ha sapute creare di nuove, aprendomi a mondi altrimenti nascosti, e tutto ciò soltanto guardando il cielo con un foglio di carta e una penna fra le mani.

Roma, 22 luglio 2015

Alessandro

ABSTRACT

Nel presente lavoro di Tesi si propone lo sviluppo di un'architettura per la localizzazione di dispositivi mobili all'interno di una struttura indoor eterogenea, caratterizzata da un rete WiFi e una rete mobile, in grado di adattarsi ai diversi contesti applicativi per assicurare una localizzazione fine del mobile stesso.

Il lavoro è stato svolto in collaborazione con Telecom Italia S.p.A, e sviluppato nel laboratorio ACTS del Dipartimento di Ingegneria dell'informazione, Elettronica e Telecomunicazioni (DIET) dell'Università La Sapienza.

Dopo una breve introduzione al problema e spiegazione del contesto applicativo, nel Capitolo 1, nel Capitolo 2 vengono presentate diverse tecniche di localizzazione WiFi presenti nello stato dell'arte. Nel capitolo 3 sono introdotte le femto-celle e spiegati gli approcci alla localizzazione basati su reti mobili indoor, mentre nel capitolo 4 è illustrata la proposta di convergenza fra la rete femtocellulare e l'infrastruttura WiFi pre-esistente. Nel capitolo 5 sono mostrati i risultati del lavoro svolto e nel Capitolo 6 sono invece presenti le conclusioni e i possibili sviluppi futuri.

INDICE

Abstract	iv
1 Introduzione	1
1.1 Reti Cellulari Eterogenee (HCNs)	2
1.1.1 Caratteristiche generali delle HCNs	4
1.1.2 Principali Nodi di una HCN	6
2 WiFi Fingerprinting	7
2.1 Sistemi WiFi RSS-based	8
2.2 WKNN	9
2.3 EWKNN	10
3 Low Power Node	12
3.1 Introduzione alle femtocelle	13
3.2 Localizzazione Indoor sfruttando reti femto-cellulari	16
4 Ibridizzazione	19
4.1 Possibili scenari per la localizzazione indoor	19
4.2 Ambiente di lavoro	21
4.3 Testbed del Positioning WiFi	21
4.4 Dislocazione delle femtocelle in ambiente indoor	23
4.4.1 Modelli di propagazione indoor	23
4.4.2 Algoritmo per la dislocazione delle femto-celle	27
4.5 Convergenza del positioning WiFi con l'infrastruttura femto-cellulare	29
4.5.1 Filtraggi su base distanza	30
4.5.2 Filtraggi su base potenza	33

5	Risultati delle simulazioni	35
5.1	Descrizione dell'ambiente di studio	35
5.1.1	Chiave Unica	36
5.2	Dislocazione della rete femto-cellulare nel DIET	38
5.3	Convergenza rete femto-cellulare e Positioning WiFi	43
5.4	Scenari di studio	48
5.4.1	Scenario 2D/2D	49
5.4.2	Scenario 2D/3D	53
5.4.3	Scenario 3D/3D	57
5.4.4	WKNN e Confronti fra scenari	60
6	Conclusioni e sviluppi futuri	64
	Bibliografia	66

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

Smart car, smart metering, smart city, oggetti Wearable interconnessi, e innanzi a tutti gli smartphone, sono tutte entità di una stessa famiglia, quella dell'Internet of Things (IoT).

Gli oggetti interconnessi sfruttano, ad oggi, maggiormente la connettività cellulare, ma anche le reti WiFi, Bluetooth, così come le Wireless M-Bus e le reti Mesh stanno via via prendendo piede. Questo ha permesso una crescita esponenziale del mercato ad esso dedicato, implicando quindi l'aumento delle divisioni aziendali del settore così come i finanziamenti ricevuti dalle startup.

Si sono aperti quindi scenari come lo Smart Home & Building, che portano in rete i sistemi di controllo degli impianti di climatizzazione e di antintrusione, le Smart City che introducono applicazioni per la connessione in rete del sistema di trasporto pubblico e per il tracciamento degli automezzi, oppure la gestione da remoto delle aree adibite a parcheggi, e la creazione dell'illuminazione intelligente.

L'interfaccia con la rete che gli utenti comunque continuano a preferire, è ad oggi ricoperta dalle App per smartphone/tablet, vista la facile reperibilità e fruizione, unito al costo modico o spesso gratuito. Attraverso queste infatti, si può arrivare a controllare gli altri oggetti intelligenti per esempio presenti in casa o in ufficio, il che risulta essere un'ottima peculiarità sia per il mercato, poichè ciò contribuisce ad avvicinare l'IoT alla grande massa, e sia per l'utilizzatore finale, che può via via avere il controllo di molte attività tutt'oggi ancora poco automatizzate.

Parallelamente quindi il mercato che ha subito una prepotente ascesa è quello dei Mobile Content.

In particolare rivestono sempre più un ruolo preponderante quei servizi che danno la percezione all'utente finale, di essere dinamici e seguire il pro-

prio ritmo di vita, perchè differenziati in base alla geolocalizzazione del dispositivo mobile stesso. Obiettivo di questi è in realtà fornire all'utente in movimento informazioni specifiche in relazione alla sua posizione, in modo totalmente trasparente all'utente, e tenendo conto delle esigenze richieste dall'utente stesso.

Servizi di questo tipo sono definiti Mobile Location Based (LBS), ed integrano funzionalità di localizzazione proprie della rete cellulare e volendo satellitare, a enormi quantitativi di informazioni statiche e dinamiche, provenienti da molteplici fonti.

Se fino a qualche anno fa queste offerte erano limitate agli ambienti outdoor, appunto utilizzando la combinazione di rete cellulare e segnale satellitare GPS, oggi è possibile estendere il discorso della tracciabilità anche ad ambienti indoor, grazie sicuramente alle infrastrutture di rete WiFi, ormai dislocate praticamente ovunque, ma anche grazie all'estensione più o meno recente, delle reti mobili in ambienti chiusi.

Attraverso le cosiddette Small Cell infatti, è possibile potenziare la rete mobile esistente, aggiungendo al contempo capacità nelle aree a maggiore densità di utenza, scaricando così il traffico della rete macro e garantendo all'utente una migliore esperienza.

E' possibile quindi evitare di creare ad hoc sistemi di localizzazione a se stanti, sfruttando appunto queste infrastrutture esistenti (WiFi e UMTS/LTE). In questo modo all'utente finale si rende possibile la fruizione di servizi quali, ad esempio, la localizzazione in centri commerciali, ospedali, aeroporti, per poter facilmente raggiungere posizioni altrimenti complesse da rintracciare.

1.1 Reti Cellulari Eterogenee (HCNs)

L'aumento delle attività automatizzate introdotte dal mercato, e delle applicazioni mobili oramai distribuite globalmente, per l'accesso a piattaforme social media, per la fruizione di documenti su locazioni cloud-based, e per la fruizione di contenuti video, hanno necessariamente contribuito ad incrementare la domanda di risorsa mobile. Questo se da un lato ha aperto nuove prospettive per il futuro, che si prevede possa portare ad una esperienza mobile a trecentosessanta gradi, dall'altro obbliga gli operatori di rete a potenziare le proprie infrastrutture così da offrire maggiore copertura mobile possibile, e massima capacità di rete.

Dal recente report, [13], stilato dalla Ericsson, si vede infatti che la richiesta di traffico dati da parte della popolazione mondiale è in continuo aumento, e continuerà ad esserlo con ritmo esponenziale.

In figura 1.1 infatti è evidente questa crescita, nel decennio 2010-2020, figura nella quale sono considerate tutte le tecnologie reperibili in commercio dall'utenza per accedere alla rete .

Data Traffic – Mobile PC/Router/Tablet

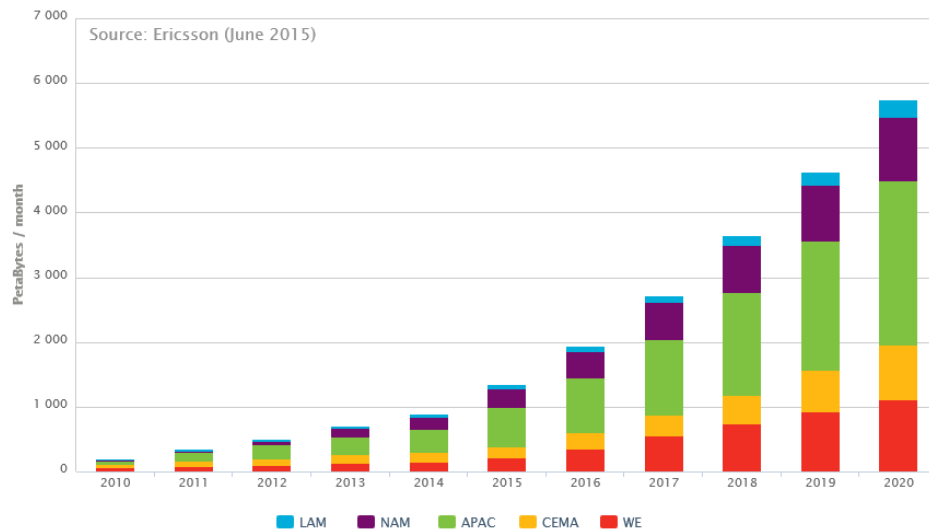


Fig. 1.1: Andamento della richiesta di traffico dati totale, dal 2010 al 2020 (stimata), diviso per stati: LAM:Latin America, NAM:North America, APAC:Asia Pacific, CEMA:Central Europe Middle East Africa, WE:Western Europe
Source: Ericsson (Giugno 2015), tramite [4]

In figura 1.2 è invece visualizzato l'andamento, sempre nel decennio 2010-2020, dell'utilizzo del traffico dati in reti mobili a livello mondiale, differenziato per smartphone e PC/Tablet/router. Si vede come i PC continuano quindi a dominare la scena dell'utilizzo del traffico nelle reti mobili, però in parallelo è evidente come gli smartphone avranno un incremento esponenziale nell'uso della banda stessa.

Da questo potente incremento della richiesta di traffico, unita alla necessità di ottenere sempre più velocemente informazioni per adeguarsi ai ritmi metropolitani, si capisce perchè ci si è arrivati a chiedere se gli attuali standard di capacità di rete e di copertura fossero sufficienti ad andare incontro alla domanda.

Posto che ad oggi le reti utilizzate sono principalmente di tipo UTRA e E-UTRA, è possibile migliorare le condizioni delle stesse dislocando le celle in modo più massiccio, ma non solo, è necessario anche che queste siano di dimensioni diverse perchè con le sole "macrocell base stations" il potenziamento non sarebbe possibile.

Infatti in molte aree urbane, gran parte del traffico è richiesto da location indoor, ragion per cui sono necessarie soluzioni efficaci per gestirle.

Una di queste è l'introduzione, all'interno della rete pubblica, dei cosiddetti Low-Power Nodes (LPNs). La conseguenza di ciò è l'ovvia migrazione verso la Rete Cellulare Etereogenea (Heterogeneous Cellular Networks -

Data Traffic – Split Per Device

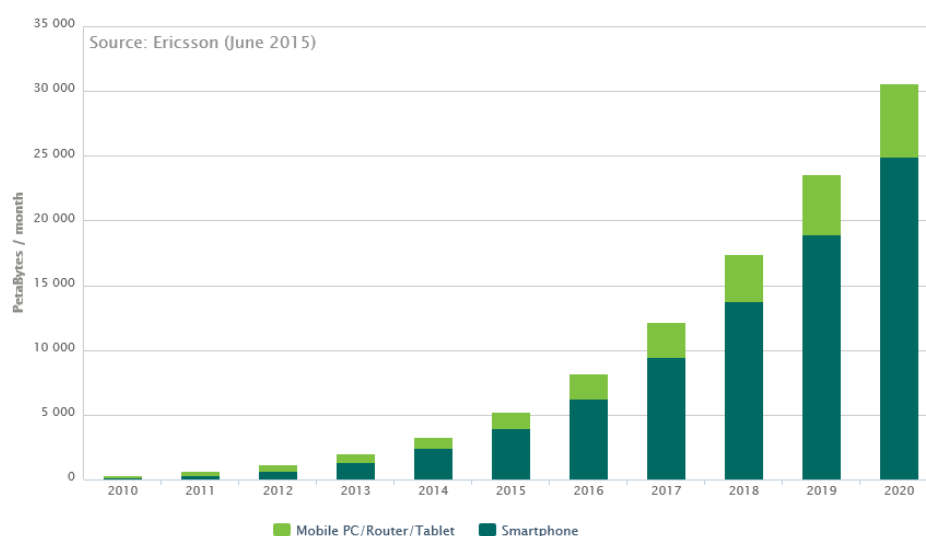


Fig. 1.2: Andamento della richiesta di traffico dati mondiale, dal 2010 al 2020 (stimata), differenziato per Smartphone e per PC mobile/Router/Tablet
Source: Ericsson (Giugno 2015), tramite [4]

HCN), che permetterebbe non solo di coprire aree indoor spesso non raggiunte dal segnale delle macrocelle, ma anche di estendere la copertura globale della rete degli operatori telefonici.

1.1.1 Caratteristiche generali delle HCNs

Con l'introduzione dei Low-Power Nodes in siti indoor, come accennato, non solo si permette di aumentare il livello di copertura della rete di un operatore telefonico, ma si rende disponibile all'utente un servizio continuativo e non più limitato ad aree "outdoor".

Gli LPNs giocano un ruolo molto importante quindi nel risolvere il problema della necessità di incrementare la capacità di rete e contemporaneamente aumentare la copertura stessa. Location quali alberghi, centri commerciali, aeroporti, ospedali e uffici sono spesso raggiunti da segnali deboli o talvolta assenti, dal momento che la copertura macro-cellulare non sempre attraversa gli edifici, e le smallcell riescono proprio a sopperire a tali problemi.

I miglioramenti però si hanno anche in ambienti outdoor ad elevata densità di traffico, laddove quindi è possibile installare gli urban hotspot per migliorare i servizi mobili evitando sovraccarichi. Va da se che quindi attraverso l'impiego degli LPNs la distanza che hanno i dispositivi d'utente (User Equipments - UEs) dalla generica cella (small cell) è di gran lunga

inferiore, in generale, rispetto a quella che hanno dalla macro cell, implicando quindi la possibilità di utilizzare una bassa potenza di trasmissione.

Alcuni dei punti critici da considerare nello sviluppo di una rete eterogenea, come mostrato in [9], sono i seguenti:

Mobilità In una HCN la potenza degli LPNs è molto inferiore rispetto a quella delle MBS, ciò implica una veloce degradazione del segnale percepito dall'utente in funzione della distanza UE-LPN. Conseguenza di questo è un frequente handover per quegli utenti in movimento in una rete di LPN, e quindi per evitare "handover failures" è importante gestire la mobilità degli utenti in maniera efficace.

Interferenza Intercella L'inserimento delle smallcells all'interno delle reti mobili di macrocelle, fa sì che aumenti l'interferenza intercella, specie quando LPNs e MBs usano le stesse portanti. Quindi per attenuare questo effetto è necessario lavorare sull'assegnazione ottimale dello spettro, e laddove la dislocazione dei LPNs avviene in situazioni indoor, è opportuno pianificare la distribuzione delle stesse in modo da interferire il meno possibile con la rete macro esterna.

Efficienza energetica Dal momento che le reti HC avvicinano l'infrastruttura agli utenti, la potenza di trasmissione delle celle stesse è nettamente inferiore rispetto alle macrocelle, ciò implica già di per se un uso efficiente della risorsa energetica. Quando però il dispiegamento di LPNs è massiccio, si rende necessario l'utilizzo di opportuni protocolli e di meccanismi per il risparmio energetico, come per esempio la possibilità di alimentare i LPNs attraverso pannelli solari.

Coordinazione intersito Una HCN essendo formata da svariate tipologie di nodi è inevitabilmente soggetta a problemi di sbilanciamento fra gli stessi, sia a causa dei differenti livelli di potenza erogati che per via delle sovrapposizioni parziali o totali delle coperture dei LPNs da parte delle macrocelle. Si rende quindi necessaria un'operazione di coordinazione fra i vari nodi, così da migliorare le performance della rete, che si può esplicare nell'operazione di "coding domain", "joint processing" fra celle multiple, e "cooperative relaying".

Backhaul Le caratteristiche del traffico di una rete di backhaul sono determinate dalla combinazione di servizi end-user, e dai protocolli di Radio Access Network. Questa rete quindi necessita di amministrazione e manutenzione per fornire e monitorare le connessioni che essa deve fornire, ed ogni sua corruzione deve essere riparata tempestivamente. L'accesso alla rete di backhaul può avvenire attraverso le microonde, la fibra ottica e altre tecnologie di trasmissione; la scelta avviene principalmente sulla base della distanza da coprire e dai costi. [11]

Con l'utilizzo degli LPNs si sono aperti quindi nuovi scenari di sfida, quali lo studio dell'interconnessione e interlavoro che è possibile sviluppare fra reti WiFi e rete mobile, argomenti proprio di questo lavoro di tesi.

1.1.2 Principali Nodi di una HCN

Una rete eterogenea permette l'introduzione di differenti tipologie di nodi, per poter far fronte alle varie tipologie di traffico presenti in un territorio complesso, come quello metropolitano.

La differenziazione dei nodi avviene principalmente in base al raggio di copertura, e quindi dalla potenza emessa, dalle dimensioni fisiche e dalla modalità di interfacciamento al backhaul [9] :

- *Micro base station*: Una delle principali applicazioni delle microcell è quella di copertura *hotspot* per ambienti outdoor. Esse infatti sono Base Station simili alle Macrocell, ma hanno un'erogazione di potenza inferiore (5W tipici, contro i 40W tipici per le Macrocell) così da coprire un raggio minore; come tali hanno la stessa interfaccia con la rete di backhaul. L'antenna di cui sono provvisti può essere sia omnidirezionale che non, in relazione alla modalità di installazione della stessa;
- *Pico base station*: sono BS dalle caratteristiche simili alle Micro BS, ma con emissione inferiore di potenza. Questa può raggiungere, in situazioni outdoor, al massimo i 2W di entità per servire le Picocell o anche inferiori, viceversa in ambienti chiusi si può scendere anche ai 100mW.
Come per le Micro, anche il loro ruolo si esplica maggiormente nella funzione di hotspot, e l'antenna di cui sono provviste può essere omnidirezionale o meno.
- *Femtocell access point*: sono Base Station a bassa potenza che possono essere installate direttamente dal consumatore, e proprio per questo hanno una rete di backhaul che viene incontro allo stesso, permettendogli di connetterle direttamente alla rete a banda larga dell'utente stesso.
Le femtocelle quindi permettono da un lato di migliorare la copertura in aree chiuse, e dall'altra di scaricare la rete Macrocellulare esterna del carico di traffico dati. L'antenna di cui sono provviste è omnidirezionale e la potenza di trasmissione va da circa 10mW a 200mW.

CAPITOLO 2

WIFI FINGERPRINTING

Per l'individuazione e il riconoscimento di un dispositivo mobile all'interno di ambienti chiusi, non è possibile sfruttare le informazioni fornite dal GPS dal momento che non può essere soddisfatta la condizione di Line Of Sight (LOS) fra dispositivo mobile e satelliti, per cui per sopperire a questa mancanza, si stanno studiando con ottimi risultati sistemi di localizzazione indoor che sfruttano le reti WiFi, dal momento che queste sono oramai largamente diffuse a livello internazionale sia negli ambienti chiusi che non, visto anche il prezzo estremamente accessibile per la messa in opera.

Esempi di tali studi in letteratura si trovano ad esempio in [10], [7], [15], e ciascuno utilizza differenti approcci al problema, che vanno dai cosiddetti sistemi TOA-based a quelli RSS-based.

Il primo si basa sulla misura del tempo di propagazione del segnale tra Access Point WiFi e device mobile, per cui oltre all'inconveniente dato dalla necessità di un clock di sincronizzazione fra i vari nodi della rete, è caratterizzato da prestazioni fortemente influenzate dalla presenza di multipath, inevitabilmente presente nelle location indoor.

Il secondo invece si basa principalmente sull'acquisizione e sull'archiviazione di valori di potenza (RSS) percepiti da ciascuno degli APs WiFi, in determinati punti dell'ambiente indoor e dal device mobile, per poi combinarli opportunamente e stimare la posizione dello stesso. Questo approccio, a differenza del primo, non richiede l'utilizzo di clock di sincronizzazione, e fra le altre non richiede la conoscenza delle posizioni degli APs, per cui risulta essere quello più usato e più robusto nei sistemi di localizzazione WLAN.

Di seguito verrà approfondito questo metodo di localizzazione, poichè

è quello che è stato implementato nel dipartimento DIET della Facoltà di Ingegneria.

2.1 Sistemi WiFi RSS-based

Un sistema di localizzazione indoor WiFi basato sul Received Signal Strength, si può esplicitare nel cosiddetto Fingerprinting approach, che è composto da due fasi fondamentali:

- fase offline;
- fase online;

La *fase offline* consiste nell'effettuare una ideale discretizzazione dell'ambiente indoor coperto dalla rete WiFi, e considerare di conseguenza un'insieme di punti di interesse denominati Reference Points (RPs), con i quali costruire un database di RSS.

Ogni RP i -esimo conterrà informazioni riguardo alla sua posizione spaziale, relativamente alla piantina dell'edificio, unitamente ad un vettore $M_i = [\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{iN}]$ composto dai valori medi degli RSS rilevati da ciascuno degli N Access Points WiFi dislocati.

Quindi per esempio il generico valore μ_{i1} rappresenta la media delle rilevazioni di RSS provenienti dall'AP1.

Un punto importante della fase offline è la distanza fissata fra i RPs, poiché questa si ripercuote sull'accuratezza della stima della posizione del dispositivo mobile, infatti all'aumentare della stessa, l'accuratezza della localizzazione diminuisce. Di contro un numero elevato di RPs, implicherebbe un grosso lavoro in fase offline [12]. E' da trovare quindi il trade-off fra distanza che devono avere i RPs dislocati nell'ambiente indoor e livello di accuratezza del positioning.

La *fase online* invece inizia quando il dispositivo mobile da localizzare, detto TestPoint (TP), accede all'ambiente indoor. Esso rileverà gli APs dislocati con determinati RSS, e verrà quindi selezionato, in generale, quel RP a minor distanza in termini di RSSs.

In realtà la scelta di questo/i RP a minima distanza, con cui stimare la posizione del TP, è fatta attraverso una serie di possibili algoritmi.

Il *Nearest Neighbor in Signal Space (NSS)* calcola la distanza tra i valori di RSS rilevati dal device e tutti i vettori M_i presenti nel database, e seleziona quindi il relativo RP dal quale ha distanza minima. La posizione di quest'ultimo sarà quindi quella più vicina al TP.

Ma per migliorare l'accuratezza del positioning, è necessario considerare un sottoinsieme di RPs con cui stimare la posizione del Test Point, dal

momento che difficilmente la posizione di un TP coinciderà con quella di un RP, ecco che quindi è introdotto l'algoritmo *Nearest Neighbor in Signal Space - Average (NNSS-AVG)*, che seleziona i "K" RPs più vicini al TP, in termini di RSSs rilevati. La posizione di quest'ultimo sarà quindi stimata attraverso una media delle coordinate di questi RPs selezionati.

La definizione del concetto di distanza è il punto chiave di questi algoritmi deterministici per la stima della posizione dei dispositivi mobili. La metrica utilizzata infatti serve a definire "simili" o "non simili" le misure online di RSS e i fingerprinting RPs, e di conseguenza incide fortemente sulla stima della posizione del dispositivo mobile [8]. Come sarà infatti di seguito mostrato, con i valori di distanza sono effettuate anche le pesature dei k RPs selezionati, si capisce perciò quanto questa scelta incida sulle prestazioni di localizzazione.

2.2 WKNN

L'evoluzione dell'algoritmo (*NNSS-AVG*) è il *WKNN* in quanto dopo aver selezionato i "K" RPs più vicini al TP effettua una opportuna pesatura delle coordinate dei Reference Points per stimare la posizione del Test Point.

L'algoritmo in particolare dopo aver creato un vettore A contenente i valori A_j di RSS rilevati da ciascuno degli APs dislocati nel punto in cui si trova il mobile, va a confrontarlo con ciascuno dei vettori M_i contenente gli RSS rilevati dal RP i -imo.

Questo confronto è effettuato a valle della scelta di una metrica d , che permette di calcolare la "distanza" fra i vettori delle potenze ricevute A e M_i : $d_i = d(A, M_i)$.

Si ottiene così un numero di distanze d_i pari al numero degli RP presenti, e di queste si selezionano solo le k più piccole. I corrispondenti RPs saranno utilizzati per la stima della posizione \hat{p} del TP, [8]:

$$\hat{p} = \frac{\sum_{n=1}^k w(d_n) p_n}{\sum_{n=1}^k w(d_n)}, \quad (2.1)$$

Da formula 2.1 vediamo la presenza delle distanze d_i utilizzate per pesare le coordinate dei relativi RP_i . In particolare $w(\cdot)$ è una opportuna funzione applicata al set delle distanze selezionate, mentre $p_n = (x_n, y_n, z_n)$ e $\hat{p} = (\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ rappresentano, rispettivamente le posizioni dei RP i -imi selezionati, e la stima della posizione del Test Point considerato [8].

Per quanto riguarda la metrica utilizzata per la definizione delle distanze d_i , una possibile opzione è data dalla *distanza di Minkowski*, in generale, di ordine p , che è definita come segue [8] :

$$d_n = \mathcal{D}_n^p = \left(\sum_{l=1}^L |s_l - s_{l,n}|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad p \geq 1. \quad (2.2)$$

dove in particolare abbiamo che:

- $p=1$ definisce la *distanza Manhattan*
- $p=2$ definisce la *distanza Euclidea*

di conseguenza, la funzione $w(\cdot)$ su citata, è data dal reciproco della distanza, e la formula per la stima della posizione del TP diventa:

$$\hat{p} = \frac{\sum_{n=1}^k (\mathcal{D}_n^p)^{-1} p_n}{\sum_{n=1}^k (\mathcal{D}_n^p)^{-1}}. \quad (2.3)$$

in questo modo il RP che si trova a minima distanza dal TP, inciderà maggiormente rispetto agli altri, nella stima della posizione dello stesso.

2.3 EWKNN

Ulteriore generalizzazione dell'algorithmo (*NNSS-AVG*), nonchè del *WKNN*, è data dall'algorithmo *EWKNN*, che a differenza dei precedenti seleziona il numero K dei RPs più vicini al TP in maniera dinamica, [12]. Questo fattore è importante perchè permette di non prendere in considerazione RPs distanti dal TP stesso, ovvero quei RPs che hanno valori di RSS non equivalenti, o comunque non vicini a quelli del Test Point considerato.

L'algorithmo *EWKNN*, [12], segue i seguenti passi:

1. Sono raccolti i valori di RSS rilevati dal dispositivo mobile relativamente agli APs WiFi dislocati e vengono confrontati con quelli degli RPs presenti in archivio. Per ognuno di essi viene quindi calcolata la distanza d_i di tipo Manhattan, form.2.2;
2. Ottenuto il vettore delle distanze d_i lo si ordina in senso crescente, in modo che in prima posizione ci sia il valore di distanza relativo al RP più vicino al TP. Si rinominano le distanze da D_1 a D_L , dove L è il numero di RPs presenti, e si setta una soglia RT per effettuare il primo filtraggio di RPs;
3. I RPs che hanno D_i maggiore della soglia RT sono rigettati. Viene formato così un insieme di G RPs;

4. A partire dalle G distanze presenti, si effettuano le differenze $S_g = D_1 - D_g$ (per $g = 2, \dots, G$), e si calcola la differenza media $E(S)$:

$$E(S) = \frac{S_2 + S_3 + \dots + S_G}{G - 1} \quad (2.4)$$

I RPs che hanno differenza S_g inferiore o uguale alla differenza media, superano il filtraggio e verranno usati nella stima della posizione del TP.

5. La stima della posizione del Test Point sarà data, come per il WKNN, dalla media delle coordinate dei RPs salvi, formula 2.3.

Nei successivi capitoli saranno utilizzati proprio l'algoritmo di positioning *WKNN* ed *EWKNN*, adattandoli all'ambiente di studio preso in esame, per valutare le prestazioni ottenibili con e senza l'ausilio della rete femto-cellulare.

CAPITOLO 3

LOW POWER NODE

La crescita dei dispositivi mobili connessi in rete, unitamente alla proliferazione dell'offerta di contenuti e servizi multimediali, ha fatto sì che il consumo di traffico dati sia aumentato largamente negli ultimi anni, inficiando, com'è ovvio, sulla capacità dei sistemi di comunicazione. che di conseguenza è diventata una risorsa di importanza fondamentale. Infatti a causa della congestione della rete, sia con i dati che con le sessioni voce, la *user's experience* viene inevitabilmente degradata, e i costi per l'acquisto di spettro supplementare risultano spesso essere proibitivi essendo questa una risorsa limitata.

Uno dei modi più efficaci per migliorare la capacità all'interno di una rete mobile, come già detto, è quello di ridurre la dimensione del raggio della cella, posizionando quindi queste a distanza inferiore le une alle altre, ottenendo così una rete densa di piccole celle. Questi Low-power Nodes, propri delle reti eterogenee, come accennato nel capitolo 1, formano la famiglia di celle le cui peculiarità sono riassunte in tabella 3.1 :

Tipo di cella	Raggio di cella tipico (Metri)	Potenza: Range & (Valore tipico) (Watt)
Macro	>1 K	20 ~ 160 (40)
Micro	250 ~ 1 K	2 ~20 (5)
Pico	100 ~ 300	250 m ~ 2
Femto	10 ~ 50	10 m ~ 200 m

Tabella 3.1: Elenco dei diversi tipi di Small Cell e relativi valori di raggio e potenza erogata.

Va da se che la loro distribuzione sul territorio deve essere effettuata in maniera opportuna così da venire incontro alla domanda di traffico specifica di una determinata location. In figura 3.1 :

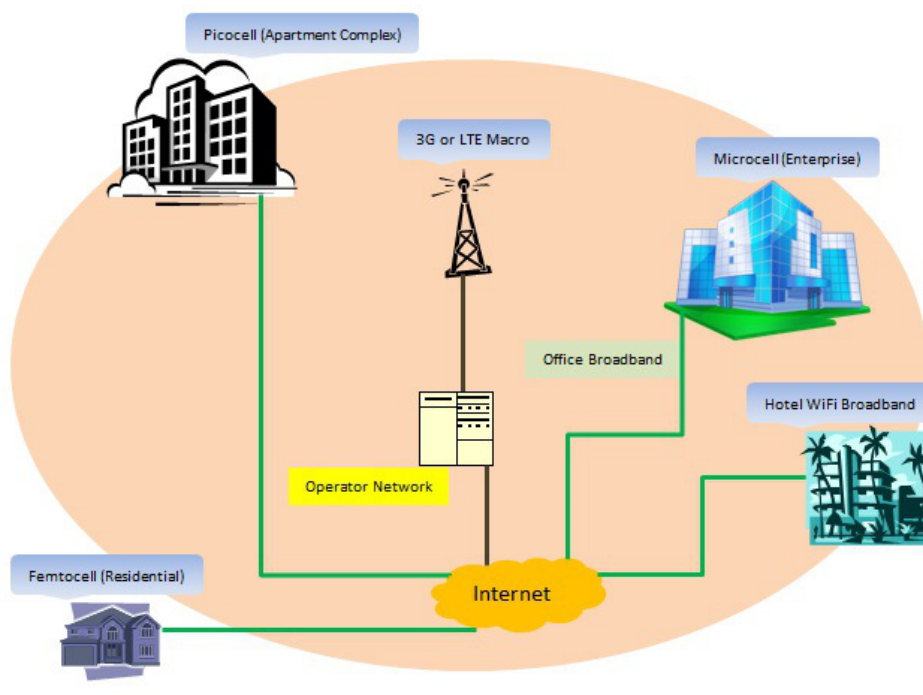


Fig. 3.1: Possibile distribuzione delle small cells, in base alla domanda di traffico. Source: wireless telecom

3.1 Introduzione alle femtocelle

Le femtocelle sono Access Point a bassa potenza, che forniscono servizi wireless voce e broadband ai clienti localizzati all'interno degli edifici. Gli attributi chiave delle femtocelle sono ¹ :

- tecnologia mobile matura: le femtocelle utilizzano i protocolli standard wireless *over-the-air* per comunicare con dispositivi mobili standard. Fra questi sono inclusi: GSM, UMTS, LTE, Mobile WiMAX, CDMA e altri protocolli attuali e futuri standardizzati da 3GPP, 3GPP2 e IEEE;
- operano nello spettro licenziato: in questo modo le femtocelle consentono agli operatori di garantire qualità del servizio ai clienti, libero da interferenze e con un uso più efficiente dello spettro;

¹Fonte: femtoforum.org

- generatori di copertura e capacità: la vera differenza dai semplici ripetitori (o booster), è che le femtocelle migliorano la copertura all'interno degli edifici e al contempo la capacità della rete, servendo un numero maggiore di utenti con servizi ad alto data rate;
- gestiti dagli operatori referenti: le femtocelle operano solo con parametri settati dagli operatori che li gestiscono. Assicurano bassa interferenza, grazie al settaggio opportuno di potenza e frequenza. Inoltre il gestore può creare o negare servizi in singole femtocelle e a specifici utenti.

Una delle principali aziende produttrici di small cell è la *Alcatel-Lucent* con la sua gamma di antenne differenziate in base alle prestazioni, figura 3.2:



Fig. 3.2: Tipologie di small-cell proposte da Alcatel-Lucent. Fonte: alcatel-lucent.com

E' posta quindi particolare attenzione a fornire una vasta scelta in funzione dei bisogni del cliente, per cui sono presenti varie tipologie di celle da ambienti indoor con estensione limitata e con una popolazione moderata, in cui sono sufficienti livelli di potenza medio bassi; al contempo ci sono celle sviluppate per garantire adeguata copertura in ambienti indoor con elevata presenza di utenti, quali centri commerciali, aeroporti, così come ambienti outdoor in cui vi è per esempio la necessità di potenziare la capacità, quali piazze e stadi per citarne alcuni. In figura 3.3 sono mostrati i modelli che Alcatel propone per le diverse esigenze.

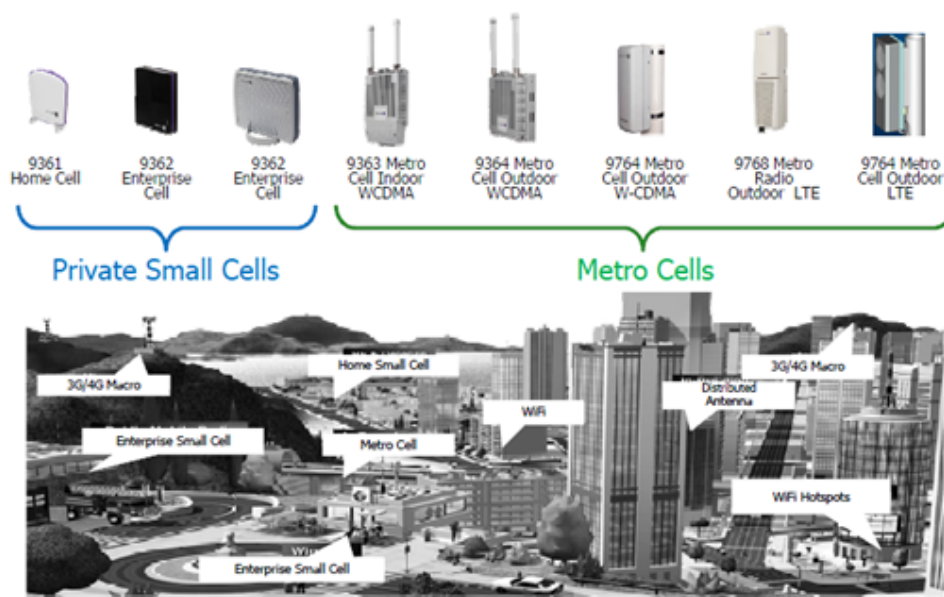


Fig. 3.3: Modelli di small-cell proposte da Alcatel-Lucent. Fonte: alcatel-lucent.com

Abbiamo per esempio le femtocelle adatte a luoghi chiusi dalle dimensioni casalinghe, le *home cell*, [1], che riescono a gestire contemporaneamente 4 utenti, erogando una potenza di $20mW$. Le frequenze coperte sono quelle relative all'UMTS, $2100MHz$, ed è offerto un full rate HSPA. Sono inoltre implementate le funzionalità di installazione *plug and play*, senza necessità di effettuare una *radio planning*, e come accennato in precedenza, il backauling è fatto via ethernet.

Antenne del tipo *Enterprise* invece, [2], sono state sviluppate per ambienti di tipo ufficio, al fine di estendere la copertura W-CDMA e HSPA in luoghi mediamente affollati.

Questo tipo di celle, a differenza della versione home, permette di coprire aree sia di ampio che di piccolo raggio, grazie alla funzionalità di *small-cell-net capability* che abilita gruppi di smallcell. Anche in questo caso sono assicurate configurazioni *zero touch*.

Ulteriori peculiarità di questo tipo di small cell è l'alta scalabilità nell'interconnessione alla core network UMTS, secondo lo standard 3GPP, e una capacità di auto-organizzazione e auto-ottimizzazione quali: *sniffing* di celle vicine 2G e 3G e controllo di potenza per l'ottimizzazione della copertura.

Per questo tipo di small cell, la *operating band* è $2100MHz$, mentre le *listening bands* sono $2100MHz$, 900 , $1800MHz$; permettono di gestire 8 dispositivi contemporaneamente in chiamate voce e sessioni dati. La potenza massima erogata è di $100mW$ e la sensibilità di $-113dBm$.

3.2 Localizzazione Indoor sfruttando reti femto-cellulari

La dislocazione di femto-celle all'interno di ambienti chiusi apre scenari sempre più vasti, e possibilità di sviluppare servizi che ruotino sempre più attorno all'utente.

E' possibile ad esempio estendere a queste reti, le tecniche di localizzazione usate con l'infrastruttura mobile macrocellulare, ad esempio effettuando la triangolazione, o la trilaterazione, ovviamente adattando i parametri alle specifiche di lavoro delle reti di Low Power Node.

La trilaterazione ad esempio, si basa sullo studio delle differenze dei tempi di arrivo dei segnali provenienti da un insieme di femtocelle al dispositivo mobile [18]. Ovviamente in questo caso è necessaria la sincronizzazione con le base station, ai fini della stima della posizione, e la conoscenza della locazione esatta delle femtocelle base station.

Un'altra possibile tecnica di positioning adottabile in reti femtocellulari può essere ad esempio analoga a quella mostrata nel cap.2, ovvero può basarsi sul *fingerprinting*.

E' dunque necessario creare, sperimentalmente o per via simulativa, un database di *fingerprinting* ovvero di potenze percepite da ognuna delle femtocelle dislocate nello scenario indoor, in un insieme più o meno fitto di Reference Point. Di conseguenza, come già mostrato in precedenza nel caso WiFi, in questo database viene cercato il matching con il set di RSS percepito dal mobile.

Un altro metodo di positioning [18], standardizzato per i sistemi UMTS, è il *Observed Time Difference Of Arrival (OTDOA)* [6]. Questo effettua la stima della posizione del mobile in base alla differenza fra gli arrivi dei pilots al dispositivo stesso, provenienti da almeno una coppia di base station; viene quindi effettuata la stima della posizione intersecando l'iperbole ottenuta per almeno due coppie di antenne [18].

Dualmente si può citare il *Uplink Time Difference Of Arrival (UTDOA)*, [6], che considera i tempi impiegati dal segnale a viaggiare dal mobile a ciascuno dei punti di ricezione detti Location Measurement Units (LMUs). Quindi attraverso la differenza degli arrivi nei vari LMUs si riesce a stimare la posizione del mobile stesso.

Secondo l'articolo [18] si possono ottenere prestazioni superiori del positioning sulla base della potenza del segnale in Downlink ricevuto da un gruppo di femtocelle.

In un ambiente indoor infatti a differenza della rete macrocellulare esterna, basarsi sui tempi di arrivo dei segnali è poco affidabile, dal momento che questo scenario è caratterizzato da muri, porte e quindi fenomeni di rifles-

sioni e rifrazioni molto maggiori rispetto agli scenari outdoor.

E' da sottolineare inoltre che la gestione dell'interferenza è critica in fase di dislocazione delle femtocelle stesse, infatti queste necessitano di trasmettere i loro pilots e beacon con potenza sufficientemente elevata per soddisfare le esigenze di copertura, ma deve essere anche tale da non creare interferenza con la rete cellulare esterna [18].

Ecco che quindi è possibile fare in modo che la rete femtocellulare non operi nello stesso canale frequenziale della rete macrocellulare, ma che utilizzi un canale separato (dedicato).

In questo articolo [18], è stato quindi calcolato il campo erogato da ognuna delle femtocelle dislocate, utilizzando il software *WinProp*, ed è stato così costruito un database di pathloss percepiti in ogni punto dell'ambiente indoor considerato.

Fatto ciò, le potenze dei segnali ricevuti dal mobile, relativamente alle femtocelle dislocate e ad esso visibili, sono inviate alla femtocella a cui è agganciato, grazie alla presenza di un supposto protocollo di comunione creato ad-hoc. Di conseguenza una volta stimata la localizzazione del dispositivo viene inviata ad esso tramite la stessa femtocella.

Nei sistemi UMTS, la femtocella servente richiede al mobile di inviare il cosiddetto Measurement Report Message (MRM) che contiene il E_{cp}/I_o e le informazioni E_{cp} , e saranno proprio questi ad essere confrontati con i dati presenti nel database di fingerprint creato in una fase offline precedente.

La stima della posizione sarà tanto più accurata quanto maggiori sono i piloti che il mobile rileva. Un pilota è rilevato quando il rapporto SINR (o equivalentemente il E_{cp}/I_o) supera una certa soglia [18]. Per cui in un punto molto vicino ad un AP, solo il pilota di quella cella supererà la soglia e mano mano che ci si allontana cominciano ad essere rilevati i piloti di altre femtocelle.

Per migliorare quest'ultima difficoltà si potrebbe quindi provare a far trasmettere le femtocelle i propri piloti su canali differenti (frequenze diverse) in tempi diversi, in modo che non interferiscano l'un l'altro; più precisamente ogni femtocella trasmette il proprio beacon pilot, prima su una frequenza e poi su un'altra, etc, per poi ricominciare con un ordine scelto in modo che gli APs non trasmettano mai contemporaneamente il loro beacon pilot sullo stesso canale. Ciò richiede una gestione centralizzata delle femtocelle, che tenga conto anche delle macrocelle. Inoltre per migliorare le cose, i beacon pilots di celle diverse trasmessi su frequenze diverse, dovrebbero essere raggruppati, e trasmessi contemporaneamente dagli APs, per ridurre l'indeterminazione dovuta al possibile spostamento del mobile nell'edificio tra una trasmissione di un beacon pilot (o un gruppo) e un altro (o un altro gruppo). Queste tecniche sono dette di *ortogonalizzazione dei segnali*.

Come alternativa al suddetto metodo è possibile implementarne uno omologo basato sulla potenza dei segnali in *uplink*.

La localizzazione del mobile può essere quindi fatta attraverso misure di potenza del pilota in *uplink*, ricevuto da un gruppo di femtocelle [18].

E' da notare però che la potenza trasmessa del mobile non è consociata a priori essendo dinamica, per cui la simulazione del pathloss nell'ambiente indoor non può essere effettuata.

Si può ovviare a questo problema considerando che la differenza delle potenze misurate in due differenti femtocelle, rappresenta la differenza di pathloss dalla posizione del mobile da queste femtocelle.

Da questo presupposto, il metodo di localizzazione sviluppato, [18], prevede l'utilizzo di un sistema centralizzato, in cui il *positioning server* comunica alle femtocelle adiacenti a quella cui è agganciato il mobile, di effettuare le misurazioni relative al pilot inviato dal mobile stesso. Di conseguenza queste femtocelle che "vedono il mobile", inviano al *positioning server* le misure ECP/Nt^2 e Nt^3 . A questo punto il sever calcola le differenze di pathloss rispetto a un certo numero di coppie di femtocelle e localizza il mobile, cercando un matching di queste differenze con i valori presenti nel database.

E' da sottolineare comunque che questo metodo di localizzazione, così come l'omologo in *downlink*, può fallire nel caso in cui il mobile si trovi molto vicino a alla femtocella cui è agganciato.

² Rapporto fra la potenza del pilota inviato dal mobile e la somma di tutti gli altri segnali presenti nel canale.

³ Valore potenza dei segnali interferenti nel canale.

CAPITOLO 4

IBRIDIZZAZIONE

In questo lavoro ci si propone di sviluppare un'architettura che permetta la localizzazione di un device mobile all'interno di luoghi chiusi, in cui sia presente una struttura eterogenea, caratterizzata in generale, da una rete WiFi e una rete mobile, e che sia in grado di adattarsi a diversi contesti applicativi, per assicurare una localizzazione fine dell'utente.

La possibilità di effettuare questo tipo di ricerca è data dalla larga diffusione di dispositivi smartphone, i quali sono provvisti di svariate schede che permettono ad esso di interfacciarsi con le diverse tipologie di reti, siano esse mobili, WiFi, Bluetooth etc.

Di seguito saranno descritti brevemente diversi possibili scenari in cui potrebbe essere richiesto lo sviluppo di un sistema di localizzazione, per poi focalizzarci sull'ambiente di studio considerato in questo lavoro.

4.1 Possibili scenari per la localizzazione indoor

La creazione di una infrastruttura completa per la localizzazione d'utente, all'interno di un edificio, implica il discernimento del problema stesso in diverse categorie, o meglio scenari, così da valutare i trade-off e le ottimizzazioni da considerare per ciascuno di essi.

L'infrastruttura di rete necessaria ai fini del positioning può essere di tre tipi:

1. rete Wireless di tipo IEEE 802.11;
2. rete mobile UMTS/LTE;
3. rete WiFi + rete mobile.

Il caso 1. fa riferimento alle necessità di un cliente che richiede un sistema di localizzazione basato solo su rete WiFi, ad esempio per limitare i costi per l'infrastruttura complessiva e al contempo fornire una copertura Wireless a coloro che entrano nell'edificio coperto. In questo caso quindi la dislocazione degli Access Point (AP) WiFi, nel caso in cui non già presente, deve essere ottimizzata sia in ottica di positioning che in ottica di copertura complessiva dell'edificio stesso. Per fare ciò è possibile dislocare gli APs seguendo l'algoritmo presentato nel lavoro di tesi riportato in [16], e successivamente utilizzare uno degli algoritmi di positioning ottimizzati per le reti WiFi ([12], [8]).

Per quanto riguarda invece il caso 2. siamo di fronte ad un cliente che richiede un sistema di localizzazione basato solo su rete mobile, in quanto potrebbe per esempio necessitare di una copertura cellulare indoor anche a scopi di telecomunicazioni, nel caso in cui il proprio edificio schermi il campo irradiato dalla rete di macrocelle, o nel caso in cui necessiti di capacità supplementare. In questo caso quindi sarebbe necessario fornire copertura ottimale sia per in termini di comunicazione mobile, che in termini di localizzazione utente. Si dovrà perciò creare la topologia dell'infrastruttura della rete mobile indoor, e per far ciò si dovrà creare un algoritmo per la dislocazione delle femtocelle, che è uno degli aspetti coperti da questo lavoro. Successivamente sarà possibile applicare uno degli approcci alla localizzazione, spiegati nel capitolo 3.

Il caso 3., che peraltro è quello considerato e sviluppato in questo lavoro, è il più generale fra i tre, poichè si vuole una infrastruttura di rete data dal mix delle precedenti architetture. La rete WiFi sarà sicuramente quella da considerare come "rete di base", cioè nel caso in cui essa debba essere allocata ex-novo è bene che copra l'edificio in maniera ottimale (ovvero in modo che in ogni punto dell'edificio si rilevi una potenza non inferiore a una determinata soglia utile), per via della componentistica a basso costo e disponibile su vasta scala.

Per quanto concerne invece la creazione della rete mobile femto-cellulare, sarà a discrezione del cliente decidere se questa debba essere allocata in modo da fornire solo copertura in termini di positioning o anche in termini di comunicazione mobile. Sicuramente però, a prescindere da questa scelta, la rete dovrà fornire un valido supporto agli algoritmi di positioning WiFi, così da migliorare l'errore di stima della posizione dei device.

Per questa casistica infatti si ritiene opportuno utilizzare come base per la localizzazione, gli algoritmi ottimizzati per le reti WiFi, dato che in letteratura ve ne sono svariate tipologie anche notevolmente robuste, per poi affiancare a queste le informazioni ottenibili dalla rete mobile.

4.2 Ambiente di lavoro

L'ambiente indoor nel quale sono state effettuate le simulazioni comprende i primi due piani dell'edificio B della facoltà di Ingegneria, che compongono parte del dipartimento di ingegneria dell'informazione Elettronica e Telecomunicazioni (DIET).

Ciascun piano ha una dimensione di circa $55 \times 10 m^2$ e le relative piantine sono state discretizzate con pixel di dimensioni pari circa a $0.46 m^2$.

Per importare queste piantine nei nostri database e portele sfruttare nei successivi algoritmi, si è utilizzata una specifica funzione Matlab, che restituisce una matrice ($M \times N \times 3$) nella quale ad ogni pixel sono associati tre valori rappresentanti la terna dei colori primari Red-Green-Blue (RGB) [16]. A partire da questa matrice, le cui celle rappresentano porzioni dello spazio delle piantine, viene costruita una seconda matrice bidimensionale ($M \times N$), in cui ad ogni pixel (cella), viene assegnato:

- 0 se è relativo ad una superficie calpestabile della piantina;
- 1 se è relativo ad una porzione di muro;
- 2 se è relativo ad una porzione di porta;
- 3 se è relativo ad una porzione di finestra.

Così facendo, in ciascuna delle piantine dei due piani considerati si è riuscito a classificare il tipo di pixel, in modo da poter effettuare le successive simulazioni quali, prima fra tutte, la propagazione del campo elettromagnetico indoor.

In figura 4.1 e 4.2 sono mostrate, rispettivamente, le piantine relative al piano 2 e 1 del dipartimento DIET, in cui la colorazione di ciascun pixel indica il tipo di spazio ricoperto nel piano dell'edificio, in particolare:

- bianco se è relativo ad una superficie calpestabile;
- verde se è relativo ad una porzione di muro;
- rosso è relativo ad una porzione di porta;
- blu se è relativo ad una porzione di finestra.

4.3 Testbed del Positioning WiFi

Nei due piani del DIET, su introdotti, è presente una infrastruttura WiFi pre-allocata di 133 APs WiFi, con la quale sono state già studiate e testate svariate tecniche di localizzazione quali WKNN(par.: 2.2) e EWKNN (par.:

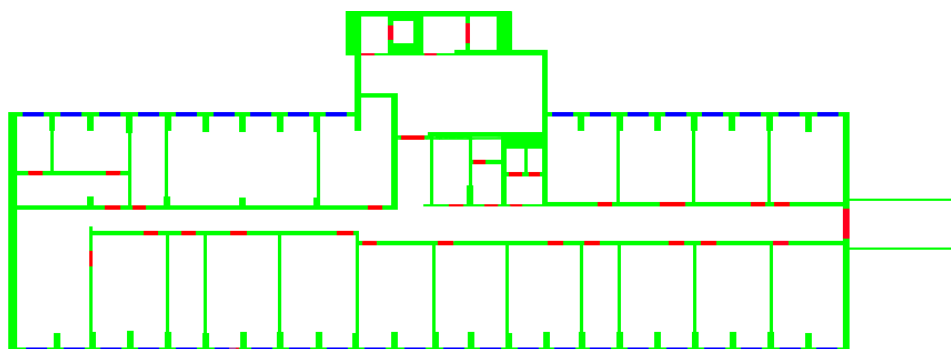


Fig. 4.1: Piantina del piano 2 del dipartimento DIET della Facoltà di Ingegneria della Sapienza Università di Roma.

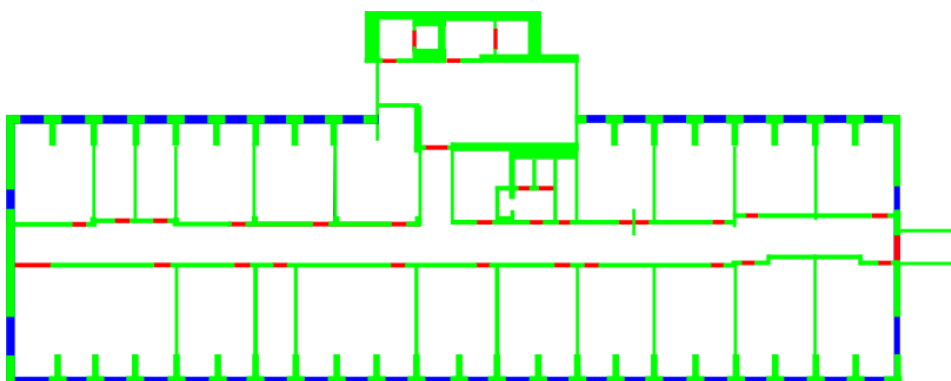


Fig. 4.2: Piantina del piano 1 del dipartimento DIET della Facoltà di Ingegneria della Sapienza Università di Roma.

2.3), descritte in [8].

I testbed implementati, e che sono stati sfruttati in questo lavoro, constano di $N_1 = 65$ e $N_2 = 69$ Reference Point, presi rispettivamente al primo e al secondo piano, per un totale di $N = 134$ RPs ([8]). In ciascuno di essi, sono stati presi $q = 5$ campioni, ovvero 5 valori di RSS ricevuti da tutti gli Access Point (APs) WiFi presenti. Per ogni AP, i 5 valori di RSS rilevati sono mediati e memorizzati.

Si è ottenuto così un database contenente i fingerprint di ogni RPs, che consistono in una lista di RSS medi misurati da ogni APs percepito, [8].

La valutazione delle performance degli algoritmi *WKNN* e *EWKNN*, è stata fatta sulla base di $P = 70$ Test Point, uniformemente distribuiti all'interno dell'area considerata, eccetto per alcuni intenzionalmente posizionati negli stessi punti dei RPs, per testare gli algoritmi in diverse situazioni.

In ogni Test Point sono stati presi i valori di RSS percepiti, e seguendo le regole di stima riportate in par.: 2.2 e par.: 2.3 è stata stimata la posizione dello stesso $\hat{p}_i = (\hat{p}_{x,i}, \hat{p}_{y,i}, \hat{p}_{z,i})$ nelle tre dimensioni, per poi compararla

con la posizione esatta, ovviamente nota $p_i = (p_{x,i}, p_{y,i}, p_{z,i})$. Si è quindi calcolato l'errore in 3D di localizzazione, misurato in metri e definito come segue:

$$\epsilon_i = \sqrt{(p_{x,i} - \hat{p}_{x,i})^2 + (p_{y,i} - \hat{p}_{y,i})^2 + (p_{z,i} - \hat{p}_{z,i})^2} \quad (4.1)$$

Assumendo quindi che ogni ϵ_i sia un campione di variabile aleatoria ϵ , è stata considerata la sua funzione di distribuzione cumulativa (CDF) di ϵ e il suo valore medio:

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sum_{i=1}^P \epsilon_i}{P} \quad (4.2)$$

Di seguito sarà mostrata l'idea con cui le informazioni provenienti dalla rete femtocellulare indoor possono essere sfruttate per migliorare le prestazioni di questi algoritmi di positioning WiFi.

4.4 Dislocazione delle femtocelle in ambiente indoor

La creazione della rete femto-cellulare in ambiente indoor punta ad una disposizione ottimale delle stesse, in ottica localizzazione, ovvero deve essere tale da agevolare lo sviluppo di servizi di positioning.

L'algoritmo proposto determina la posizione di ciascuna femtocella, sulla base di diversi fattori variabili, quali la potenza da essa erogata, la piantina dell'edificio e la particolare modalità di propagazione del campo elettromagnetico all'interno di esso.

Obiettivo dell'algoritmo è quindi quello di trovare la disposizione ottima delle antenne, che è data da quella particolare configurazione topologica che rispetta determinati vincoli, quali il numero di smallcell che è necessario sentire in ciascun punto dell'edificio, il numero di antenne desiderate complessivamente, e che sia tale da limitare dispersioni di potenza all'esterno dell'edificio.

4.4.1 Modelli di propagazione indoor

Lo studio della propagazione del campo elettromagnetico all'interno di scenari indoor deve tener conto di svariati fattori che lo caratterizzano, quali:

1. struttura dell'edificio
2. materiali di costruzione
3. spessore delle mura
4. presenza di porte aperte o chiuse

oltre a dover considerare i fenomeni di riflessione, rifrazione e scattering fortemente presenti in questi ambienti (fenomeni di *multipath fading*). Modellare nel modo migliore un canale di questo tipo implica di tenere in considerazione quanti più fattori di disturbo, in modo da seguire più o meno fedelmente le aleatorietà introdotte dall'ambiente considerato. I criteri per modellare la propagazione indoor sono sostanzialmente di due tipi:

statistici: i quali effettuano la stima su ambienti generici, e caratterizzano il segnale ricevuto con un'ampia gamma di misure e interpolazioni, attraverso dei modelli matematici. Se da un lato questi modelli hanno un basso onere computazionale, dall'altro sono sensibili alla geometria dell'ambiente considerato, [16].

deterministici che sono basati sulla teoria della propagazione delle onde, studiata in ciascun specifico sito considerato. Sono necessari quindi molti dettagli relativi all'ambiente indoor in esame, così da imporre le giuste condizioni al contorno per risolvere le equazioni di Maxwell, necessarie per il calcolo esatto della propagazione delle onde e.m. nell'edificio. Per far ciò è necessario utilizzare metodi numerici come ad esempio il ray tracing.

Modelli di canale statistici

I modelli statistici per la stima della propagazione in ambienti indoor sono basati sulla raccolta di misurazioni fatte su tipologie di edifici differenti. Appartengono a questa categoria il modello *one-slope*, la sua generalizzazione *two-slope*, e la loro evoluzione: *multi-wall*, come descritto in [14]. Il *one-slope* model assume esserci una dipendenza lineare fra il path loss (dB) e il logaritmo della distanza d tra trasmettitore e ricevitore:

$$L_{OS}(d) = l_0 + 10\gamma \log(d) \quad (4.3)$$

dove l_0 è il path loss ad un metro di distanza e γ è l'indice di decadimento della potenza. Questo modello, evidentemente molto semplice, non considera adeguatamente le caratteristiche di propagazione dell'ambiente in questione.

Una variante di questo metodo è quindi il *two-slope* model, in cui il parametro γ varia quando la distanza d supera una certa soglia.

Attraverso il modello *multi-wall* (MW), anche detto multi wall classic, è possibile invece fare uno studio più completo, perchè aggiunge a $L_{OS}(d)$ un termine di attenuazione dovuto alla presenza di muri, piani e porte penetrate dal percorso diretto del segnale che si propaga dal trasmettitore al ricevitore. E' inoltre fatta distinzione fra porte normali e porte antincendio,

considerando anche se queste sono aperte o chiuse. Il modello è il seguente:

$$L(d) = L_{OS}(d) + M_w, (dB) \quad (4.4)$$

dove M_w rappresenta la componente multi-wall, ed è così definita:

$$M_w = L_c + \sum_{i=1}^l k_{wi} l_i + \sum_{n=1}^{N_d} X_n l_d + \sum_{n=1}^{N_{fd}} \lambda_n l_{fd}, (dB) \quad (4.5)$$

in cui:

L_c è una costante;

k_{wi} rappresenta il numero di muri penetrati di tipo i ;

l_i è l'attenuazione introdotta dai muri di tipo i ;

X_n, λ_n sono variabili binarie che indicano, rispettivamente, se le porte normali o le porte antincendio sono chiuse (1) o aperte (0);

N_d, N_{fd} è il numero di porte normali e antincendio presenti.

Vi è inoltre una generalizzazione del modello MW, il cosiddetto *Multi wall linear (MWL)* in cui il path loss è descritto come segue:

$$L(d) = \alpha d + l_0 + M_w, (dB) \quad (4.6)$$

in cui attraverso α si assume una dipendenza lineare tra attenuazione e distanza, unitamente ad l_0 e M_w che restano invariati.

Dagli studi effettuati in [14] è stato innanzitutto rilevato che le costanti dei modelli variano in base a due categorie di ambienti indoor: uffici e classi, fig.:4.3 e 4.4.

E' stato osservato inoltre che la presenza delle porte antincendio è poco influente nella propagazione, se queste sono sistemate ai margini degli ambienti indoor, viceversa sono fonte di forte attenuazione se disposte all'interno.

E' ancora da notare che il modello MWC e il MWL non hanno grandi differenze in termini di prestazioni, cosa che invece è stata riscontrata in confronto con il one-slope model.

In tabella 4.1 è mostrato appunto il confronto fra le prestazioni dei vari modelli, in termini di deviazione standard dell'errore rispetto ai dati sperimentali.

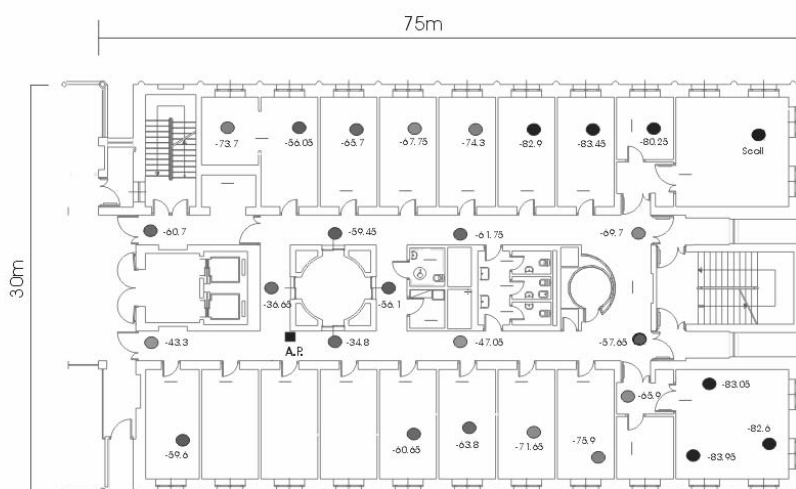


Fig. 4.3: Esempio di ambiente di tipo ufficio

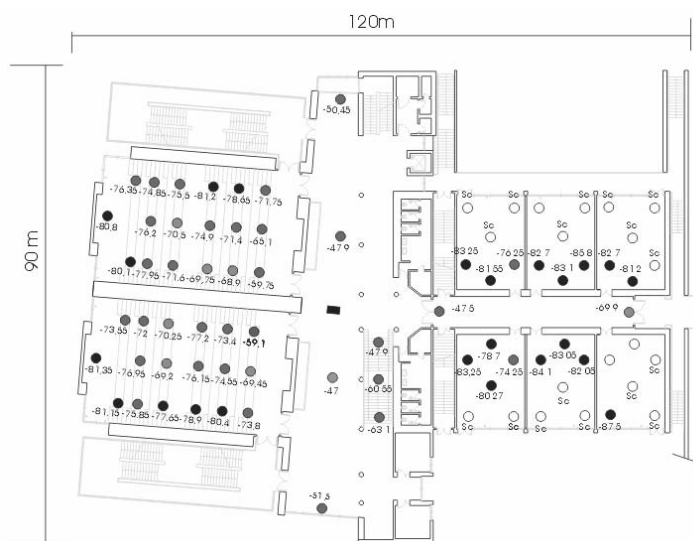


Fig. 4.4: Esempio di ambiente di tipo classe

A valle di questi confronti, si è deciso di considerare per le nostre simulazioni per la dislocazione delle femtocelle, il modello MW classic, perchè risulta essere il giusto trade off tra accuratezza di analisi e livello di onere computazionale. E' da sottolineare che, anche se questo modello è stato visto essere particolarmente adatto alla propagazione di segnali di tipo WiFi IEEE 802.11b, [14], può essere tranquillamente esteso alla banda di frequenza 2100MHz, propria dei sistemi UMTS, poichè il comportamento elettro-

Modello di canale	ambiente ufficio	ambiente classe
OS	7.4	5.1
MWC	4.3	3.4
MWL	4.4	3.3

Tabella 4.1: Deviazioni standard dei diversi modelli di canale.

magnetico subisce variazioni poco rilevanti, [17]. Le costanti del modello di canale saranno poi ovviamente adattate al segnale erogato dalle femtocelle stesse che, come da datasheet Alcatel, copre la banda di 2100MHz.

4.4.2 Algoritmo per la dislocazione delle femto-celle

Sulla base del modello di canale *Multi wall Classic* si è sviluppato un algoritmo per il posizionamento delle femtocelle all'interno del piano 1 e 2 del DIET, come precedentemente accennato, che prende spunto dalla modalità operativa seguita per la dislocazione degli APs WiFi del lavoro di tesi riportato in [16].

L'algoritmo proposto viene applicato ad un singolo piano per volta, ed effettua una selezione consecutiva delle posizioni delle femtocelle, partendo dalla prima, la cui posizione può essere random o scelta dall'utente. Le successive femtocelle vengono posizionate poi in quei punti che permettono di far rispettare i vincoli di copertura nel maggior numero di pixel, e l'inserimento di nuove antenne termina quando si è raggiunta la copertura desiderata in una determinata percentuale di pixel della piantina.

A valle della creazione delle matrici ($M \times N$) ottenute dalle piantine dell'ambiente indoor da considerare, par.:4.2, si può dire che ciascun piano dell'edificio considerato venga discretizzato in tante sotto aree, ognuna delle quali corrisponde, in Matlab, ad una precisa cella delle matrici ($M \times N$), caratterizzata da un indice di colonna e un indice di riga.

Il primo step dell'algoritmo prevede la creazione di un archivio contenente tutte le possibili posizioni che potrebbero avere le femtocelle all'interno dell'ambiente. E' da sottolineare che a differenza dell'algoritmo riportato in [16], per le successive analisi sono stati considerati ambienti privi di controsoffittatura, per cui le antenne possono essere disposte solo lungo le pareti dell'ambiente indoor. I passi di questo primo step sono:

- settare la distanza minima, in metri, che devono avere le small cell;
- calcolo delle possibili posizioni che possono assumere le small cell.

La distanza minima che devono avere le femtocelle è da settare in base alle esigenze, in linea di massima comunque è bene impostarla in modo da permettere, nei successivi step, di posizionare un numero minimo di femtocelle, ottenendo la copertura desiderata.

A valle di questo primo step saranno quindi selezionate le celle delle relative matrici dell'edificio, in cui è possibile sistemare le femtocelle, e ciascuna di essa sarà etichettata con un diverso ID.

Lo step 2 dell'algoritmo prevede l'archiviazione di tutte quelle misure necessarie al calcolo del pathloss da ogni possibile posizione in cui possono essere sistemate le small cell, a tutte le sotto aree della piantina.

I passi seguiti in questo step sono:

- calcolo della distanza tra ogni possibile cella in cui può essere sistemata un'antenna, e tutte le sotto aree della piantina;
- calcolo del numero di mura attraversate dal raggio di propagazione del segnale erogato dall'ipotetica smallcell sistemata in ognuna delle possibili posizioni su calcolate, fino a raggiungere tutte le sotto aree della piantina;
- calcolo del numero di porte attraversate dal raggio di propagazione erogato dall'ipotetica smallcell sistemata in ognuna delle possibili posizioni su calcolate, fino a raggiungere tutte le sotto aree della piantina;

Questo step ha utilizzato la versione discretizzata dell'ambiente indoor, per cui per effettuare i calcoli su descritti, sono state tracciate delle rette congiungenti tra ogni possibile posizione in cui si può sistemare una smallcell, e ciascuna cella della matrice $M \times N$.

Il terzo step dell'algoritmo cerca la distribuzione ottimale delle femtocelle nell'ambiente indoor.

Verrà quindi calcolata la potenza che ogni sotto area (pixel) riceve da ciascuna femtocella da posizionare, e questo sarà effettuato sfruttando il modello di canale Multi Wall Classic, precedentemente introdotto (par.:4.4.1), a valle di opportuni settaggi. La potenza ricevuta in ciascun punto dell'ambiente sarà data da:

$$P_r(d) = TSCP - L(d), [dB] \quad (4.7)$$

Questo terzo step potrà essere avviato dopo aver settato alcuni parametri quali:

- potenza del pilot emesso dalla small cell (TSCP);
- numero minimo di small cell (N_{smc}) che si vuole rilevare in ciascun pixel dell'ambiente;

- frazione di copertura desiderata, ovvero la percentuale di pixel in cui devono essere rilevate al minimo (N_{smc}) small cell;
- massimo numero di small cell da sistemare nell'ambiente;
- sensibilità di rilevamento dell'RSCP, ovvero il valore minimo che deve avere la potenza del pilota emesso da una small cell, affinché sia rilevata la small cell stessa;
- sensibilità di aggancio, ovvero il valore minimo che deve avere la potenza ricevuta del pilota, per un effettivo aggancio alla small cell.

A valle di questi settaggi, la prima antenna può essere scelta randomicamente dall'algoritmo oppure settata dall'utente, una volta ottenuti gli ID delle possibili posizioni disponibili.

La scelta della posizione in cui sistemare la successiva antenna segue invece le seguenti regole:

- Se la small cell da fissare è la $(N_{smc} - 1) - ima$, o inferiore, verrà scelta la posizione che permette di massimizzare la somma delle potenze massime percepite in ognuno dei pixel dell'ambiente (tenendo conto anche delle small cella già posizionate).
- se la small cell da sistemare è la $N_{smc} - ima$, o superiore, la sua posizione sarà scelta in modo che il maggior numero di pixel percepisca N_{smc} small cell.

L'output dell'algoritmo sarà quindi l'insieme delle posizioni delle small cell scelte, necessarie a rispettare i vincoli di copertura imposti in fase di settaggio, la matrice delle potenze ricevute (in ogni pixel da ciascuna small cell) e la matrice contenente il numero di small cell percepite in ciascun pixel.

4.5 Convergenza del positioning WiFi con l'infrastruttura femto-cellulare

La realizzazione di una rete ibrida per la localizzazione, formata da un'infrastruttura WiFi, e da una rete mobile femto-cellulare, deve necessariamente prevedere una fusione delle informazioni reperibili attraverso ciascuna delle due tecnologie.

Come accenato in precedenza, in uno scenario di questo tipo è bene che la rete WiFi sia considerata la "rete base per la localizzazione", in quanto gli algoritmi di positioning attualmente sviluppati, sono ottimizzati per questo tipo di reti. Parallelamente a questa, è possibile sfruttare la rete femto-cellulare per dare un valido supporto agli algoritmi di positioning WiFi

stessi.

In particolare, della rete femto-cellulare è importante considerare la femto-cella alla quale si aggancia il terminale mobile. Nel nostro lavoro si è considerata come "cella di aggancio" quell'antenna da cui il dispositivo mobile riceve una potenza superiore rispetto a tutte le altre. Ci si è quindi distaccati dalle regole di "aggancio" degli standard di comunicazioni, si è infatti considerato che ai fini di una localizzazione lasca, non è necessario considerare le soglie di aggancio degli standard, perchè quello che interessa è conoscere la macro-area dell'ambiente indoor all'interno della quale è posizionato lo smartphone.

A questo punto, ricordiamo che il positioning WiFi, par.:2.1, sulla base di una griglia di RP dislocati nell'ambiente indoor, ne seleziona solo un sotto-insieme (vedi par.:2.2 o 2.3), e con questi viene stimata la posizione del Test Point considerato, form.: 2.3.

Quindi grazie alla presenza della rete femtocellulare è possibile "supportare" il positioning WiFi, effettuando, a monte, opportuni *clustering* dei RPs WiFi, in funzione del Test Point considerato.

In questo modo gli algoritmi di positionig WiFi opereranno su sotto-insiemi di RPs con cardinalità ovviamente inferiore.

Con questa modalità di lavoro sarà possibile ottenere:

- una *localizzazione approssimativa* attraverso le femto-celle;
- una *localizzazione fine* attraverso gli algoritmi WiFi sullo spazio dei RPs ridotto.

Un esempio di convergenza delle informazioni provenienti dalla rete WiFi con quelle della rete femto-cellulare, ai fini di un miglioramento delle prestazioni in termini di stima della posizione, accuratezza e complessità, è mostrata in figura fig.4.5:

Sono stati sviluppati quindi 7 differenti clusterizzatori di RPs:

- 3 filtraggi su base distanza, detti D_i -Filtering, i quali sfruttano la posizione dei Reference Points e le posizioni delle femtocelle;
- 4 filtraggi su base potenza, detti P_i -Filtering, i quali sfruttano i valori di RSS rilevati nei Reference Point WiFi e nel Test Point relativamente alle femtocelle dislocate.

4.5.1 Filtraggi su base distanza

I filtraggi su base distanza, necessitano di conoscere la topologia della rete cellulare, quindi le posizioni delle femtocelle sono fondamentali per la

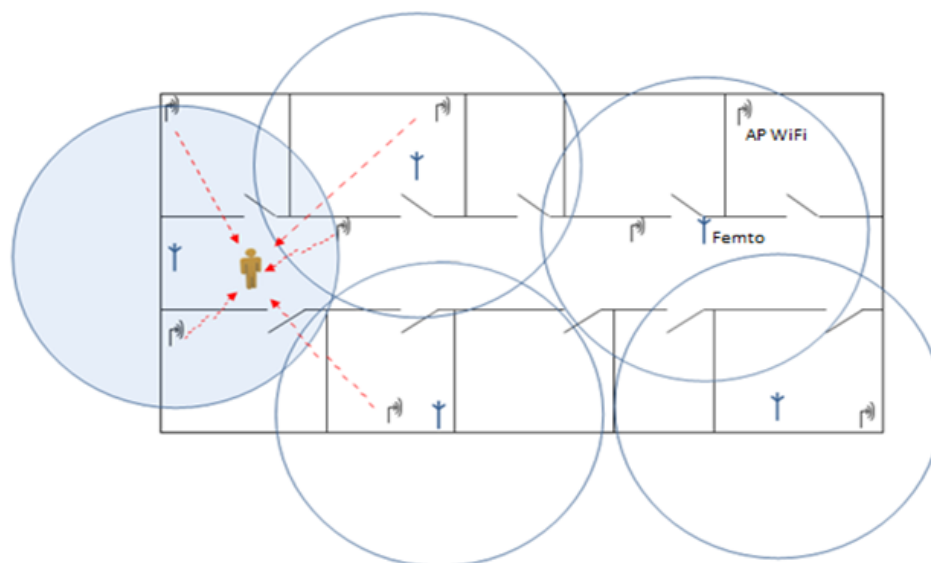


Fig. 4.5: Esempio di sistema ibrido per la localizzazione ottenuto dalla fusione dell'architettura WiFi con la rete mobile indoor.

selezione dei RPs in funzione del Test Point considerato.

D1-Filtering

Questo tipo di pre-filtraggio effettua una scrematura dei Reference Points in base alla femtocella a cui si aggancia lo smartphone (TP). E' quindi un filtraggio bruto, che non considera anche la presenza delle altre femtocelle. La modalità operativa è composta dalle seguenti fasi:

1. vengono memorizzate le distanze di ciascun RP wifi da ognuna delle femtocelle dislocate nell'ambiente di lavoro;
2. si considera il Test Point, e si verifica a quale femto-cella lo smartphone si aggancerebbe se si trovasse in quella posizione;
3. il sottoinsieme di Reference Point selezionati, utili ai fini del positioning wi-fi, sono solo quelli più vicini alla femtocella di aggancio stessa.

D2-Filtering

Questo tipo di filtraggio, rispetto al precedente, cerca di studiare meglio la posizione del TP, andando a incrociare diverse misure. Gli step seguiti sono:

1. calcolo della distanze di ogni ReferencePoint da ciascuna delle femtocelle dislocate.
2. per ogni RP si ordinano le distanze in senso crescente, in modo che in prima posizione si abbia la femtocella più vicina e in ultima posizione quella più lontana;
3. dato il TestPoint, si ordinano in senso decrescente gli RSSI delle femtocelle percepite, in modo che in prima posizione ci sia la femtocella di aggancio;
4. superano il filtraggio solo quei Reference Point per cui l'ordine di vicinanza alle femtocelle risulti uguale all'ordine di aggancio del Test-Point considerato.

D3-Filtering

Questo pre-filtraggio, tiene conto del fatto che in un dato TP, una femtocella verrà percepita sicuramente meglio rispetto alle altre, e le restanti invece avranno potenze via via decrescenti in funzione della distanza stessa, e della topologia dell'ambiente indoor. Scopo di ciò è "seguire" meglio la posizione del TP, rispetto al D1-Filtering.

Gli step seguiti sono:

1. vengono ordinati in senso decrescente gli RSS delle femtocelle percepite nel Test Point considerato, e saranno denominate come: $[RSS_1, RSS_2, \dots, RSS_K]$, dove K è il numero di femtocelle dislocate;
2. se il TP sarà molto vicino alla femtocella, quindi il suo RSS percepito sarà molto maggiore di quello delle altre antenne, oppure il TP è un po più distante dalla posizione della femtocella, ma continua a percepire le altre femto significativamente meno forti, i RPs considerati sono solo quelli più vicini spazialmente alla femtocella di aggancio. Formalmente il check da verificare è il seguente:

$$RSS_1 \geq sogliaRSSI$$

oppure

$$(RSS_1 < sogliaRSSI) \& (RSS_1 - RSS_2 \geq sogliaDifferenza)$$

3. se il TestPoint non si trova sufficientemente vicino alla femtocella di aggancio, tale da poter considerare solo i RP ad essa limitrofi, ma si trova nel mezzo fra le due femtocelle che sente con maggiore potenza (RSS_1 e RSS_2), allora i RPs selezionati saranno quelli posti proprio nel mezzo fra queste due antenne.

Formalmente dovrà essere verificata questa condizione per il TP:

$$RSS_1 < sogliaRSSI \& (RSS_1 - RSS_2 < sogliaDifferenza)$$

Di conseguenza sarà calcolata la distanza euclidea D_{1-2} fra le due femtocelle percepite meglio, così da considerare solo i RPs che hanno distanza d_1 e d_2 , dalle rispettive antenne, tali da rispettare la seguente condizione:

$$d_1 \leq D_{1-2} \ \& \ d_2 \leq D_{1-2}$$

In questo filtraggio le soglie, *sogliaRSSI* e *sogliaDifferenza*, è necessario settarle sulla base di studi empirici del caso analizzato, come sarà mostrato in seguito.

4.5.2 Filtraggi su base potenza

I filtri su base potenza, contrariamente a quelli su base distanza, non necessitano di conoscere le posizioni delle small cell, ma solo dei valori di potenza ricevuti dalle stesse nei RPs.

P1-Filtering

Questo filtraggio è l'analogo in potenza del D1-Filtering. Gli step sono:

1. verifica della cella a cui si aggancia il device mobile;
2. verifica della cella a cui si aggancia ciascuno dei RP;
3. selezione dei RPs che si agganciano alla medesima femto-cella del TP.

P2-Filtering

Questo filtraggio seleziona i RPs che percepiscono una potenza da ciascuna delle femtocelle dislocate, quanto più simili a quelle percepite dal Test Point:

1. si considerano i livelli di potenza rilevati da ogni femto-cella nel TP;
2. si considerano i livelli di potenza rilevati da ogni femto-cella in ognuno dei RP;
3. si calcola la distanza Manhatta d_i dal RP_i al TP;
4. si calcola la distanza media d_m RP-TP;
5. sono selezionati solo i RPs che hanno distanza inferiore a quella media: $d_i < d_m$

P3-Filtering

Questo tipo di pre-filtraggio prende in considerazione le differenze di RSS percepite da ciascuna femtocella, in modo da riuscire a selezionare quei RPs che hanno la stessa percezione del TP, rispetto al complesso delle femtocelle dislocate.

Gli step seguiti sono i seguenti:

1. si considerano i valori di RSS percepiti da ciascuna delle femtocelle nel TP;
2. si calcolano le differenze $Diff_{j-k}$ fra gli RSS di questo insieme relativo al TP;
3. si calcolano le differenze omologhe $diff_{j-k}^i$ fra gli RSS rilevati nel RP i -imo;
4. si itera l'ultimo passo per tutti i RPs;
5. sono selezionati solo i RPs le cui differenze $diff_{j-k}^i$ risultano comprese in un range, settabile, attorno alle analoghe differenze $Diff_{j-k}$ relative al TP. I margini inferiore e superiore in dB, di tali range, sono proporzionali al valore assoluto di ciascuna differenza $Diff_{j-k}$.

P4-Filtering

Questo prefiltraggio, concettualmente semplice, dato un TP seleziona i RPs tenendo in considerazione tutte le femtocelle dislocate. Gli step sono i seguente:

1. si verifica l'ordine di aggancio alle femto-celle del TP, ovvero gli RSS percepiti dal device sono ordinati in senso decrescente;
2. si verifica l'ordine di aggancio alle femto-celle di ogni RPs, ovvero gli RSS percepiti nei RP sono ordinati in senso decrescente;
3. si selezionano solo i RPs che hanno il medesimo ordine di aggancio del TP.

E' da sottolineare che per ciascuno di questi pre-filtraggi è stato impostato che nel caso in cui non dovesse essere selezionato alcun RP fra tutti quelli possibili, sarà restituito come output tutto l'insieme di RPs; quindi un prefiltraggio che restituisce un'uscita di questo tipo, è equivalente a non averlo applicato.

Di seguito saranno mostrati i risultati ottenibili con questi filtraggi, sia in termini di errore medio di stima che in termini di onere computazionale, rapportando tutto agli andamenti ottenibili senza prefiltraggi, quindi utilizzando solo gli algoritmi di positioning WiFi.

CAPITOLO 5

RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

5.1 Descrizione dell'ambiente di studio

L'algoritmo di localizzazione sviluppato, è stato testato all'interno del piano 1 e piano 2 del DIET, come precedentemente accennato, in cui risulta già essere presente una robusta rete di APs WiFi. In questo ambiente si è supposto di dislocare una rete cellulare di femto-celle in modo da ricondurreci una situazione di rete eterogenea e poterne studiare il comportamento (caso 3., paragrafo 4.1).

In questa situazione si introduce innanzitutto quello che è l'elemento principale dell'architettura proposta: il "Network Supervisor", che gestisce l'intera rete eterogenea e comunica separatamente con:

- device mobile d'utente;
- rete WiFi;
- rete mobile indoor.

Il Network Supervisor può essere visto come il nucleo portante del sistema di indoor positioning dal momento che per ipotesi è in collegamento diretto con le due reti wireless, le quali forniscono tutte le informazioni necessarie all'algoritmo di positioning per stimare la posizione del dispositivo stesso.

Ipotizzando l'esistenza di un protocollo di comunicazione creato ad hoc, quando il device mobile accede all'edificio, invia (automaticamente o su

richiesta) la sua *chiave unica* al supervisor.
Attraverso di essa il supervisor stesso può:

- identificare il nuovo device all'interno dell'area coperta;
- riconoscere le schede attive con cui il mobile si interfacerà alla rete eterogenea stessa.

A questo punto, il device comunicherà al supervisor i livelli di potenza che rileva sia dalla rete mobile che da quella WiFi, e sarà quindi compito del supervisor stesso decidere come meglio localizzare il dispositivo, ovvero usando entrambe le reti o solo una delle due.

Una volta che il supervisor sarà venuto a conoscenza della posizione in cui si trova il device, potrà inviare, utilizzando una delle due reti, la localizzazione su mappa all'utente stesso, tramite per esempio un'Applicazione per smartphone da creare ad hoc.

5.1.1 Chiave Unica

La chiave unica è stata introdotta in modo da associare un identificativo unico a ciascun device che accede alla rete eterogenea, così da renderlo riconoscibile e riservare ad esso il trattamento più adatto.

Si è deciso quindi di costruire la chiave in modo da permettere al supervisor di sapere immediatamente quali sono le schede attive sul device, e quindi a quali reti si può connettere. Per far ciò sono stati sfruttati i codici, standardizzati a livello internazionale, che identificano un dispositivo nelle proprie reti di appartenenza, ovvero:

- *ICC-ID* che è il codice seriale univoco associato ad una SIM card;
- *MAC-address* : è il codice di 48 bit con cui si riconosce un dispositivo connesso in rete, e con cui ne si controlla l'accesso a livello fisico;
- *BD-address*: è il codice identificativo di un dispositivo bluetooth.

In particolare abbiamo che:

Il codice *ICC-ID*, univoco a livello internazionale, è composto da 19 cifre inclusa una cifra di controllo generata con l'algoritmo di Luhn, esso ha una precisa formattazione:

- le prime due, *89*, identificano un sistema con scopi di telecomunicazione;
- la terza e la quarta cifra corrispondono al prefisso internazionale assegnato a Paese in cui opera il gestore, *39* per l'Italia;
- la quinta e la sesta cifra, rappresentano il codice identificativo del gestore telefonico del proprio Paese;

- le restanti cifre identificano il singolo chip.

L'indirizzo MAC, anch'esso univoco a livello internazionale, viene espresso in forma esadecimale attraverso dodici cifre: MM:MM:MM:SS:SS:SS, di cui:

- i primi tre byte, detti *Organizationally Unique Identifier (OUI)*, che permettono di identificare il produttore del dispositivo di rete;
- gli ultimi tre byte invece, detti *Network Interface Controller (NIC)*, indicano il numero seriale assegnato al dispositivo dal produttore, nel rispetto del criterio di unicità.

Infine il *BD-address*, così come il MAC-address, è formato da 48 bit così distribuiti:

- tre byte, *Lower Address Part*, che è la porzione di indirizzo assegnata dal produttore al dispositivo;
- tre byte, *Organizationally Unique Identifier (OUI)*, che identificano il costruttore, e a loro volta sono suddivisi in :

UAP : la Upper Address Part, costituita da 8 bit, relativi al costruttore, assegnati direttamente dall'IEEE;

NAP : la Non-significant Address Part, formata dai restanti 16 bit del campo OUI.

Con questi identificativi, per esempio, vengono determinate le sequenze di Frequency Hopping, così come il campo CHANNEL ACCESS CODE dei pacchetti tramessi nelle piconet, per identificare i mittenti dei messaggi.

Per fare in modo che il supervisor possa subito individuare le reti a cui ha attualmente accesso il device mobile, la chiave unica sarà composta da una opportuna combinazione degli identificativi su citati.

In particolare, come mostrato in figura 5.1, la struttura che si propone per la stessa prevede un HEADER fisso di 3 bit e un CORPO composto da tre sottocampi (MOBILE, WI-FI, BLUETOOTH), di dimensioni variabili:



Fig. 5.1: Struttura della Chiave Unica proposta, per dispositivi di una rete eterogenea.

Le combinazioni possibili della chiave sono quindi quelle riportate in Fig.5.2:

E' da notare che nella progettazione della chiave unica, si è considerata anche la rete Bluetooth per generalità, in modo da poter gestire anche

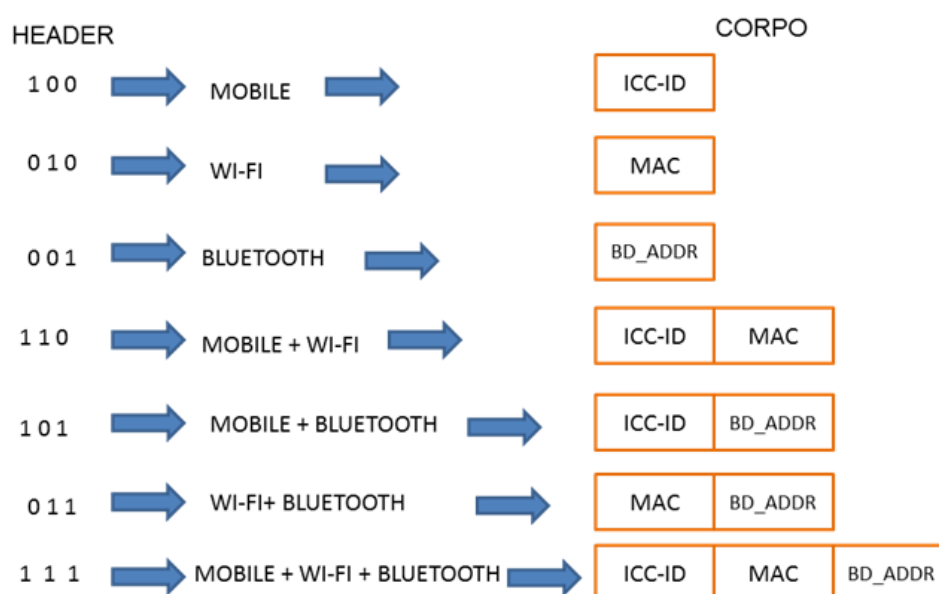


Fig. 5.2: Possibili combinazioni ottenibili con l'utilizzo della chiave unica.

l'eventuale futuro inserimento della stessa all'interno degli algoritmi di localizzazione. Questo aspetto però non è stato considerato in questo lavoro, perchè si è preferito approfondire lo studio sulle tecnologie e sulle reti già largamente dislocate a livello globale

5.2 Dislocazione della rete femto-cellulare nel DIET

La simulazione della rete femto-cellulare nel DIET, come accennato nel paragrafo 4.4.2, è stata fatta attraverso un algoritmo, creato ad hoc, per la dislocazione delle femtocelle che considera come modello di canale il *Multi Wall Classic*.

I valori assegnati ai parametri del modello sono riportati in tabella 5.1, e differenziati innanzitutto in base al piano considerato e poi in base al piano "trasmittente" e quello "ricevente". Infatti oltre al calcolo della potenza erogata dalle femtocelle all'interno del piano in cui sono posizionate, sono stati considerati ovviamente anche i campi e.m. che da un piano vengono rifratti in quello adiacente. Il motivo di ciò è presto detto, infatti per fare un'analisi dettagliata ai fini della dislocazione e poi del positioning è necessario il calcolo del campo e.m. complessivo rilevato in ciascun punto dei due piani, da tutte le femtocelle posizionate.

Piano considerato	Parametri del modello	Significato
Piano 2	$L_c = 60.85(dB)$ $L_2 = 2.83(dB)$ $L_d = 3.96(dB)$ $10\gamma = 24(dB)$	Fattore costante Attenuazione dovuta a muri medi (20, 40]m Attenuazione dovuta alle porte antiincendio Esponente di propagazione
Piano 1	$L_c = 63.41(dB)$ $L_2 = 2.71(dB)$ $L_d = 2.51(dB)$ $10\gamma = 21.25(dB)$	Fattore costante Attenuazione dovuta a muri medi (20, 40]m Attenuazione dovuta alle porte antiincendio Esponente di propagazione
Dal piano 2 al piano 1	$L_c = 49.05(dB)$ $L_2 = 0.75(dB)$ $L_d = 0.17(dB)$ $10\gamma = 26.09(dB)$ $floor1 = 25.41(dB)$ $floor2 = 0.46(dB)$	Fattore costante Attenuazione dovuta a muri medi (20, 40]m Attenuazione dovuta alle porte antiincendio Esponente di propagazione Parametri di piano Parametri di piano
Dal piano 1 al piano 2	$L_c = 49.05(dB)$ $L_2 = 0.75(dB)$ $L_d = 0.17(dB)$ $10\gamma = 26.09(dB)$ $floor1 = 23.2(dB)$ $floor2 = 0.46(dB)$	Fattore costante Attenuazione dovuta a muri medi (20, 40]m Attenuazione dovuta alle porte antiincendio Esponente di propagazione Parametri di piano Parametri di piano

Tabella 5.1: Parametri settati nel modello Multi wall

Sfruttando questo modello è stato possibile visualizzare innanzitutto l'andamento del campo erogato da una singola femtocella all'interno dell'edificio considerato, in particolare in fig.:5.3 è mostrata la radiazione di una generica femtocella posizionata nel piano 2 del DIET, con una potenza $TSCP = 1.76$ dBm.

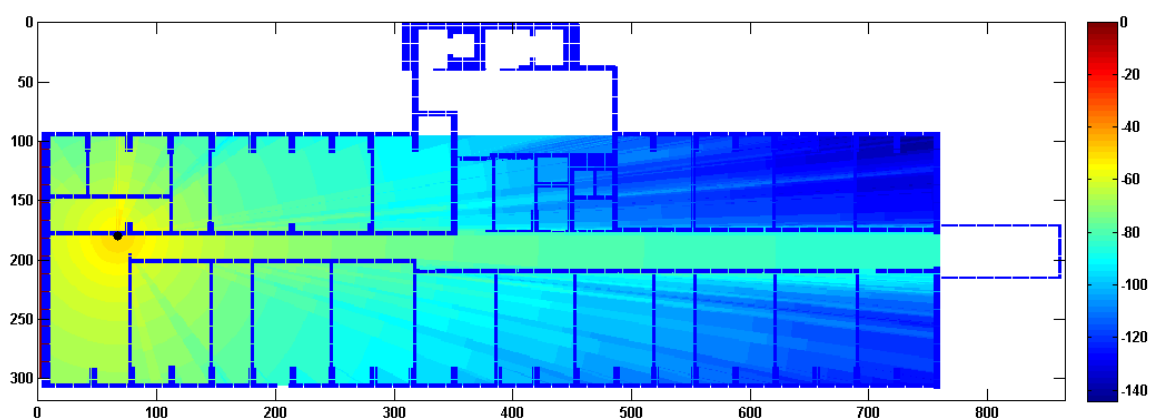


Fig. 5.3: Esempio di potenza irradiata da una generica femtocella (cerchio nero), con $TSCP=1.76$ dBm, nel piano 2 del DIET

La potenza erogata dall'antenna relativamente ai pilot, è stata scelta in un range di possibili valori, sulla base dei datasheet delle femtocelle Alcatel ([2], [3], [1]). Un $TSCP = 1.76\text{dBm}$ corrisponde infatti a una potenza del flusso dati di 15mW , che a valle di test empirici, si è ritenuto essere un buon compromesso tra il numero di antenne da utilizzare, copertura ottenibile, e spreco di energia.

A questo punto riprendendo l'algoritmo di dislocazione, par.:4.4.2, il *primo step*, che stila una lista di coordinate dei possibili punti in cui possono essere sistemate le femtocelle, si è settata una distanza minima tra le stesse, di 1metro . Il motivo ciò si basa sullo studio condotto nel lavoro di tesi [16], nel quale è sottolineato che "riducendo la distanza tra le possibili posizioni degli AP, ovvero generando una rete più fitta e capillare, il numero di AP necessari per raggiungere la copertura completa tende a ridursi". Nello *step 2*, come già descritto in precedenza, sono calcolate le distanze tra ogni possibile posizione delle femtocelle, a ciascun pixel dell'ambiente considerato; quindi nel caso in esame data una certa possibile posizione dell'antenna, si è calcolata la sua distanza da ogni sottoarea (pixel) del piano ad esso omologo e del suo piano adiacente. Equivalentemente sono calcolati il numero di porte e il numero di mura che il segnale emesso da una certa femtocella deve attraversare per raggiungere ciascun pixel dell'ambiente. Il *terzo step* dell'algoritmo prevede la scelta delle posizioni in cui sistemare le femtocelle, come accennato in precedenza, sul singolo piano.

In tabella 5.2 si riportano i valori dei parametri utilizzati nelle simulazioni. Alcuni si basano sullo standard UMTS [5], mentre altri sono frutto di scelte progettuali che meglio si adattavano al caso in esame.

Notare, da tab.5.2, che il parametro *SogliaVicinanza* è stato introdotto perchè un dispositivo che percepisce una potenza maggiore o uguale a questa soglia da una certa femtocella, si troverebbe in un raggio di $20\text{-}30\text{cm}$ dall'antenna stessa, e con questa informazione è possibile aiutare maggiormente gli algoritmi di positioning, o addirittura evitarli, nel caso si ammetta un margine di errore di questa entità.

E' inoltre da sottolineare che si è imposta una frazione del 95% di pixel in cui devono essere rispettate le regole di copertura desiderate, perchè così facendo si permette all'algoritmo di inserire meno femtocelle. Si è infatti visto che la pretesa di ottenere il 100% della copertura per piano, implicava l'introduzione di un numero di antenne inutilmente elevato (5-6 per piano), ed ottenere quindi un surplus di copertura rispetto agli obiettivi richiesti.

A questo punto è stato avviato l'algoritmo per la dislocazione delle femtocelle nel piano 2 del DIET, fig.:4.1. Per quanto riguarda le scelte operative in questo caso, si deciso che la copertura ottimale si ha quando il 95% dei pixel del piano, percepisce un numero di femtocelle pari almeno a $N_{smc} = 3$.

Parametri	Valori
TSCP = 1.76 dBm	Potenza del pilot emesso dalla femtocella
Nsmc = 3/2	Numero minimo di femtocelle da rilevare in ogni sottoarea (pixel) dell'ambiente considerato
Fc = 0.95	Frazione di pixel in cui devono essere rispettate le regole di copertura desiderate
MaxF = 10	Massimo numero di femtocelle da sistemare nel singolo piano
RilevamentoRSCP = -130 dBm	Sensibilità di rilevamento della femtocella
SogliaVicinanza = -55 dBm	Valore massimo di potenza rilevato oltre cui non è necessario triangolarizzare
RSCPsens = -113 dBm	Sensibilità di aggancio alla femtocella
hDevice = 1.5 m	Altezza alla quale sono stati calcolati i valori di campo percepiti dalle femtocelle
hAP = 2.5 m	Altezza alla quale sono posizionate le femtocelle

Tabella 5.2: Valori assegnati ai parametri di simulazione per la dislocazione della rete femtocellulare.

In questo modo vi è la possibilità di effettuare la triangolarizzazione per localizzare il mobile.

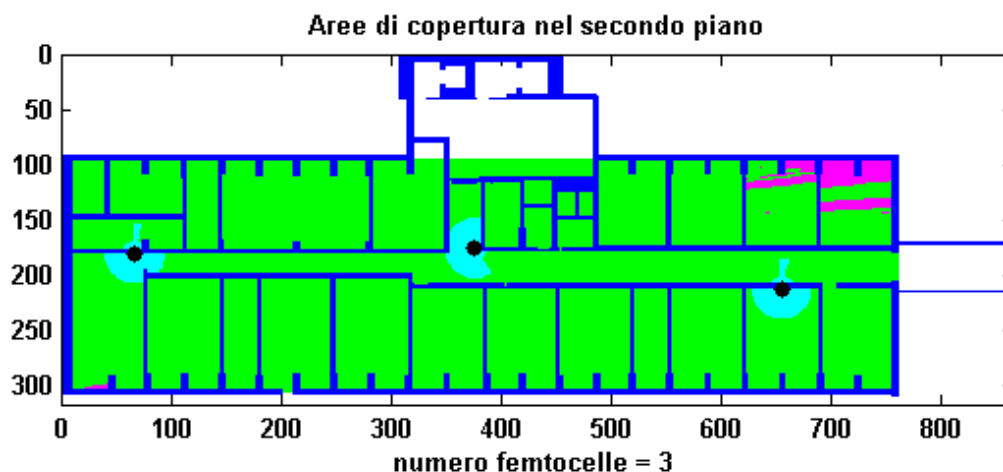


Fig. 5.4: Dislocazione rete femto-cellulare al piano 2 del DIET, con TSCP=1.76 dBm

In fig.5.4 sono quindi visibili le femtocelle, contraddistinte da un punti-

no nero, mentre ogni sotto-area (pixel) del piano assume un colore diverso in funzione del livello di copertura. In generale possiamo avere le seguenti colorazioni:

- gialla: nel punto considerato sono percepite più di 3 femtocelle, ed è possibile agganciarsi ad almeno una di esse;
- verde: nel punto considerato sono percepite 3 femtocelle, di cui almeno una agganciabile;
- viola: nel pixel considerato si percepiscono 2 femtocelle, di cui almeno una agganciabile;
- rossa: nel punto considerato si percepisce 1 cella agganciabile;
- bianca: nel punto considerato si percepisce una o più celle, non agganciabile/i, ovvero sotto la soglia della sensibilità di aggancio;
- celeste: nel pixel considerato si percepisce, da almeno una femtocella, una potenza maggiore o uguale a $-55dBm$.

Dalla figura 5.4, vediamo quindi una perfetta copertura di almeno 3 femtocelle in quasi tutto il piano 2, ad eccezione di piccole zone viola, il 5%, in cui ne sono percepibili solo 2.

Sono stati quindi calcolati i campi trasversi, ovvero quelli che dal piano 2 vengono percepiti al piano 1. In funzione di ciò si è settato $N_{smc} = 2$ per la dislocazione delle femtocelle al piano 1. In questo modo infatti ci assicuriamo che il 95% dei pixel del primo piano percepisca almeno 2 femtocelle posizionate nel piano stesso, e complessivamente il numero di antenne percepite (in ogni sottoarea del primo piano) sarà sicuramente maggiore di due, grazie alla precedente dislocazione.

In questo caso è settata la posizione della prima femtocella, così da evitare che venga sistemata proprio in corrispondenza di una delle femtocelle del piano 2, risultando quindi poco utile per la fusione delle informazioni ai fini del positioning.

In fig.5.5 è mostrato il risultato della dislocazione delle femtocelle al piano 1 del DIET.

Come è evidente dalla figura 5.5, le femtocelle così posizionate permettono di essere percepite contemporaneamente nel 100% dei pixel del piano 2. Risulta quindi anche superato il limite inferiore imposto del 95%.

Sulla base di queste dislocazioni ottenute sui due piani del DIET, è stata effettuata la fusione delle informazioni provenienti dal Testbed WiFi e dalla rete mobile in questione, e di seguito saranno illustrati i risultati ottenuti.

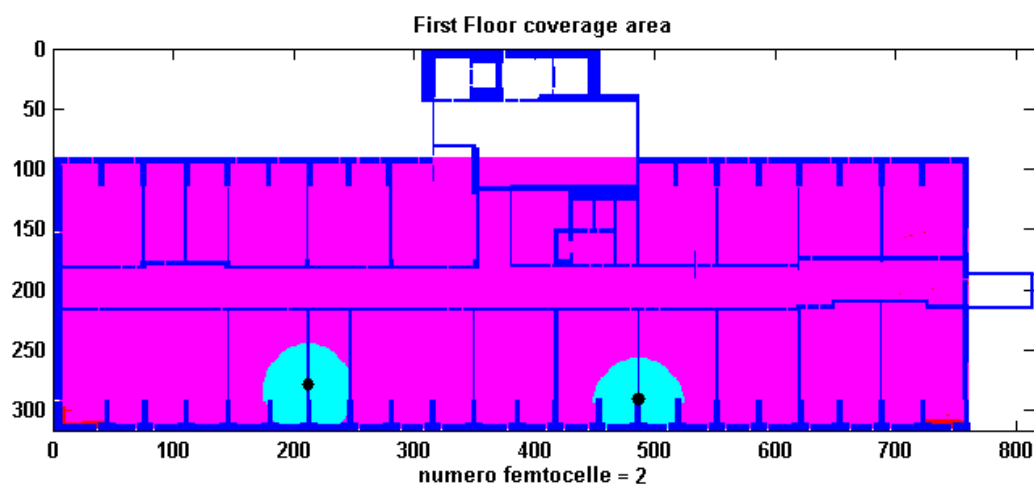


Fig. 5.5: Dislocazione rete femto-cellulare al piano 1 del DIET, con TSCP=1.76 dBm

5.3 Convergenza rete femto-cellulare e Positioning WiFi

Si vuole adesso sfruttare la rete femto-cellulare per migliorare le prestazioni del sistema di localizzazione WiFi in termini di stima della posizione, accuratezza e complessità.

Come spiegato nel par.4.5, gli algoritmi di positioning WiFi che si sfruttano, operano su una griglia di Reference Points (RPs) dislocati nei due piani considerati, e in base alla posizione del mobile ne viene selezionato solo un sottoinsieme grazie al quale sarà poi effettuata la stima.

Attraverso l'utilizzo di ciascuno dei 7 filtri creati ci si aspetta quindi che la pre-selezione dei RPs WiFi possa migliorare le prestazioni di localizzazione, e abbassare l'onere computazionale.

Di seguito saranno mostrati degli esempi relativi al lavoro che svolgono i vari filtri relativamente alla scelta dei RPs in funzione della posizione del mobile. Le posizioni assunte da quest'ultimo sono in totale 70, tante quante sono nel Testbed WiFi.

A titolo di esempio saranno mostrati, di seguito, i RPs selezionati al secondo piano del DIET dai vari filtri, per un fissato TP.

Innanzitutto in Fig.5.6 è mostrata la disposizione delle femtocelle del secondo piano unitamente ai RPs WiFi presenti nel piano stesso.

Quindi vediamo quali sono i RPs selezionati da ciascuno dei 7 pre-filtri, considerando uno stesso TestPoint, ovvero la stessa posizione del

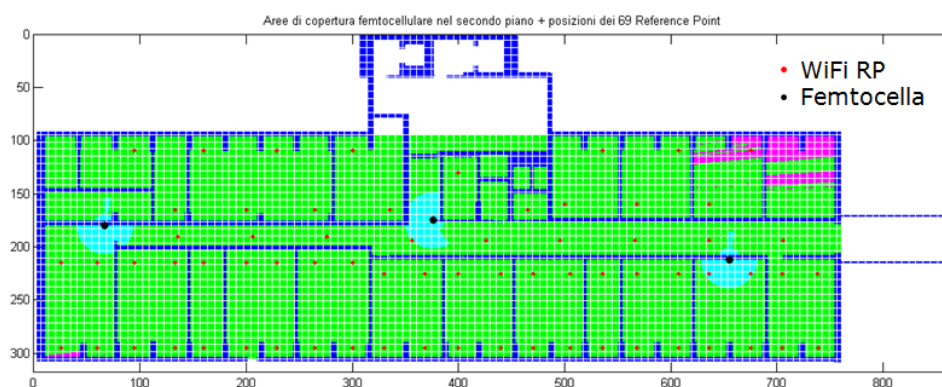


Fig. 5.6: Sovrapposizione delle reti femtocellulare e dei Reference Point WiFi - Piano 2 DIET

dispositivo mobile. Fig.: 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13.

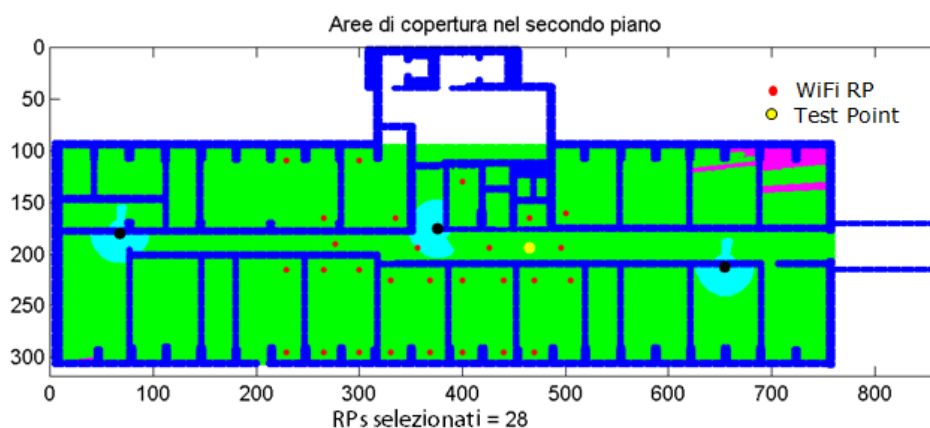


Fig. 5.7: Reference Points WiFi pre-selezionati con il D1-Filtering

Dai grafici riportati, si verifica che effettivamente il sottoinsieme di RPs selezionati, data una stessa posizione dello smartphone, varia in funzione del tipo di operazione svolta dal filtraggio.

Notiamo per esempio che il filtraggio D1, fig.5.7, seleziona un insieme di RP che non centra propriamente bene la posizione dello smartphone, questo è dovuto al fatto che i RPs scelti sono quelli a minima distanza dalla femtocella di aggancio (che in questo caso è quella centrale).

D'altra parte però se vengono selezionati solo i RPs che percepiscono meglio la stessa femtocella cui si aggancia il mobile, caso del filtraggio P1, fig.5.10 non è detto che le cose vadano meglio. Infatti vediamo che, in questo caso specifico, il numero di RPs selezionati da D1 è uguale a quello di P1, ovvero 28, ma il sottoinsieme non è perfettamente uguale. Si vede in-

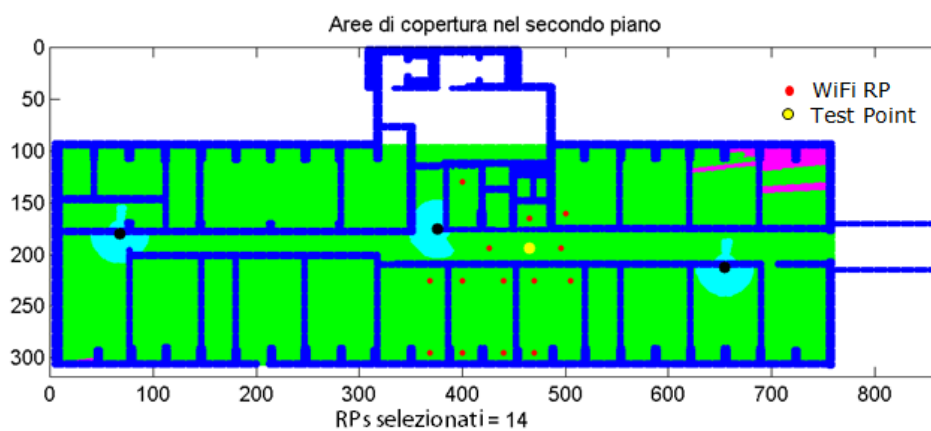


Fig. 5.8: Reference Points WiFi pre-selezionati con il D2-Filtering

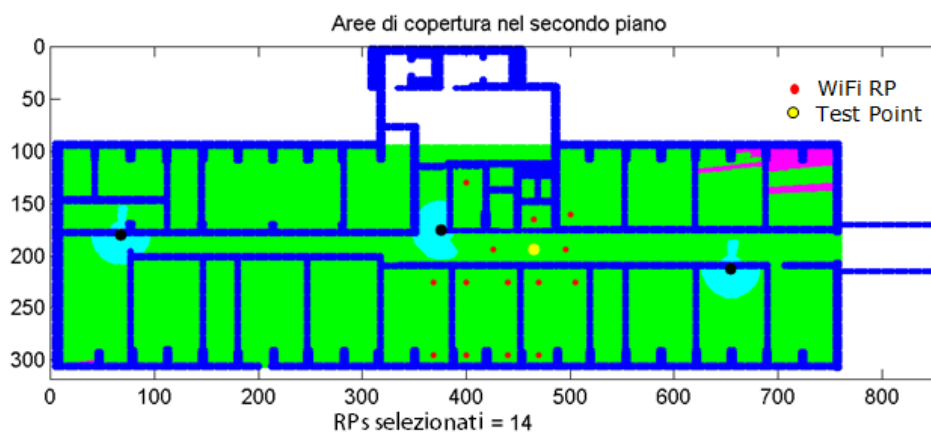


Fig. 5.9: Reference Points WiFi pre-selezionati con il D3-Filtering

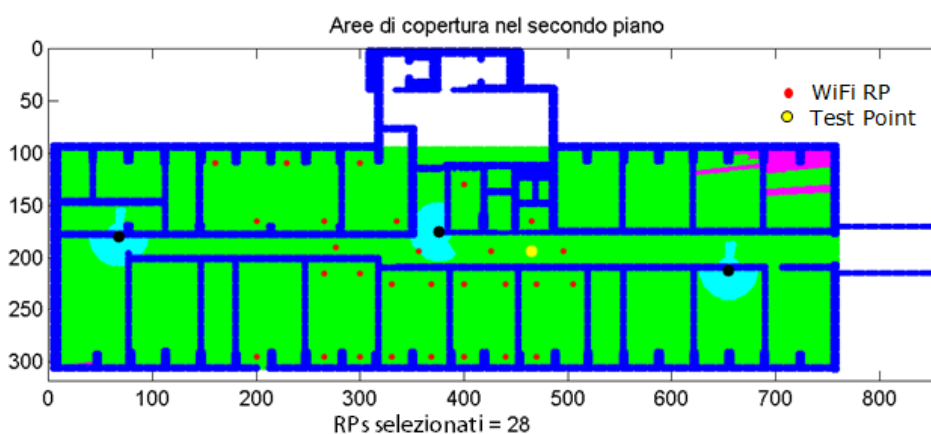


Fig. 5.10: Reference Points WiFi pre-selezionati con il P1-Filtering

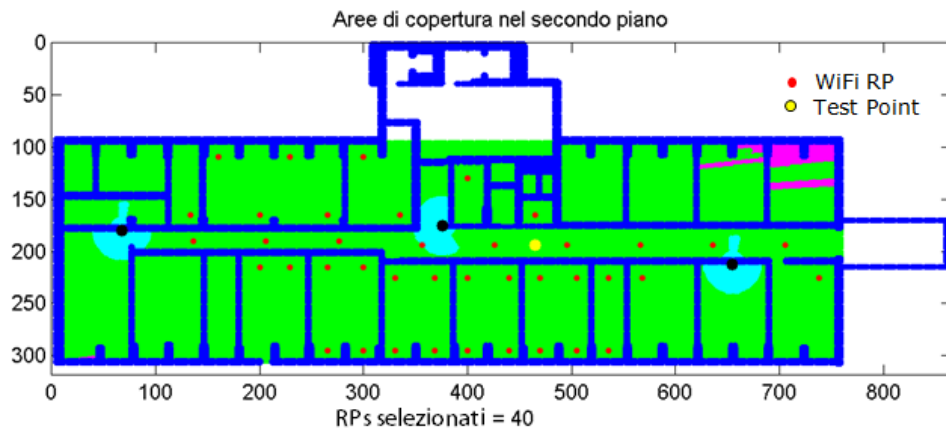


Fig. 5.11: Reference Points WiFi pre-selezionati con il P2-Filtering

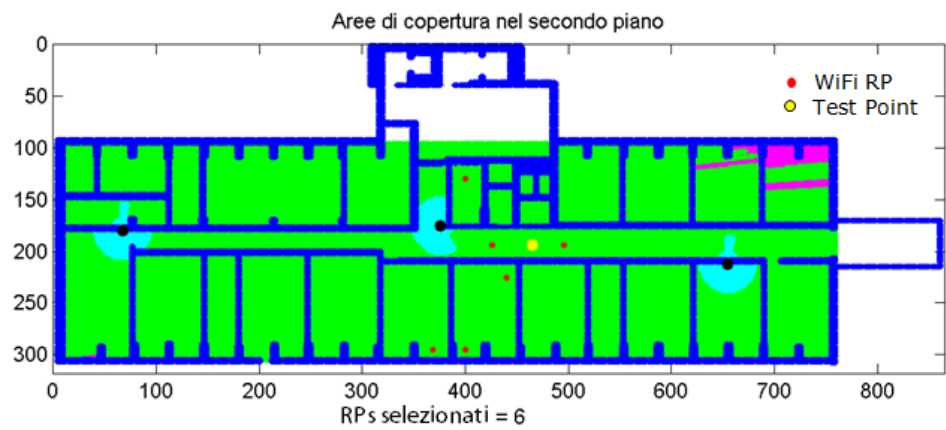


Fig. 5.12: Reference Points WiFi pre-selezionati con il P3-Filtering

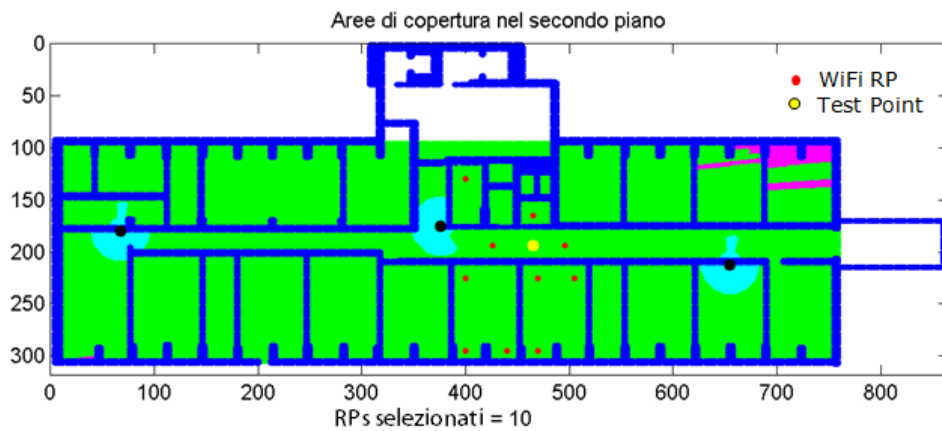


Fig. 5.13: Reference Points WiFi pre-selezionati con il P4-Filtering

fatti che, nel caso P1, sono selezionati anche RPs più vicini in distanza alla femtocella di sinistra, i quali chiaramente non sono adatti per stimare la posizione del TestPoint. Succede questo perchè in ambienti indoor la presenza delle mura e delle porte, influisce notevolmente sulla distribuzione del campo e.m. e quindi in questo caso i RPs più vicini in distanza alla femtocella di sinistra percepiscono comunque meglio l'antenna centrale, perchè il suo segnale attraversa meno porte/mura rispetto all'altra.

Vediamo invece come le cose migliorino, effettuando un filtraggio più elaborato, P4 fig.5.13, in cui si tiene conto dell'ordine di aggancio del mobile (cioè l'ordine decrescente con cui vengono percepite le antenne nel TP). Selezionando solo i RPs che condividono il medesimo ordine di percezione delle femtocelle, vediamo che l'insieme sarà composto da 10 unità, distribuite attorno alla posizione del TP stesso.

Aggiungendo una piccola variante a questo filtraggio, si è ottenuto il P3 fig.5.12. Vediamo che se oltre all'ordine di aggancio, si considera anche il livello di potenza con cui viene percepita ciascuna delle femtocelle, e si decide di selezionare solo i RPs che percepiscono ciascuna femtocella con potenze simili a quelle del TestPoint, il numero di RPs filtrati scende a 6.

E' da sottolineare comunque che l'approccio su base distanze, può comunque dare buoni filtri, a patto di tenere in considerazione non solo la femtocella di aggancio del TP, ma anche le altre. Questo è ben visibile dai filtri D2 e D3, rispettivamente fig.5.8 e fig.5.9, che selezionano sottinsiemi di 14 RPs (peraltro uguali, in questo caso specifico) centrati sul punto del TP.

Con il filtraggio P2 invece, fig.5.11, vediamo che il sotto insieme di RPs scelto è notevolmente grande. La grossa cardinalità è evidentemente dovuta al calcolo della distanza media TP-RP, soglia con la quale si effettua la scrematura di RPs, e che quindi non permette un buon filtraggio, molto

probabilmente per il modesto numero di RPs su cui questa è stata calcolata.

5.4 Scenari di studio

Per testare e confrontare le reali potenzialità del sistema ibrido, abbiamo considerato tre scenari differenti, così da capire come sia meglio operare in funzione delle informazioni note al sistema.

Può capitare per esempio che si conosca il piano in cui si trova il dispositivo mobile, per cui è utile capire in questo caso se sia opportuno sfruttare le informazioni provenienti dall'intera rete di femtocelle oppure solo una porzione della stessa.

Gli scenari proposti sono:

1. Scenario 2D/2D
2. Scenario 2D/3D
3. Scenario 3D/3D

In particolare valuteremo le prestazioni di ciascun filtraggio in ogni scenario, applicando l'algoritmo di positioning WiFi *EWKNN*. In questo modo potremo sia valutare quale fra i filtri risulta più performante in funzione dello scenario, e anche verificare se qualcuno di essi possa essere più o meno stabile al variare dello scenario considerato.

Passeremo poi ad analizzare le potenzialità dei pre-filtri, utilizzando l'algoritmo di positioning WiFi *WKNN*, cercando di valutare se qualcuno dei filtri sia trasversalmente performante.

E' da sottolineare che i seguenti risultati (errori di stima e onere computazionale) sono in funzione del numero di RPs utilizzati per fare la stima del TP, in particolare sull'asse delle ascisse ci sarà indicata la variabile "c". Questa variabile viene utilizzata dall'algoritmo *EWKNN* per determinare la soglia con la quale scartare, nel primo step, i RPs. In particolare il range di oscillazione di "c" è $[0.1, \dots, 2]$ e questa rappresenta il fattore di proporzionalità della distanza media fra il generico RP e il TP considerato. Ricordiamo infatti, che il primo filtraggio dell'algoritmo *EWKNN* prevede il calcolo delle distanze Manhattan D_i tra ogni RP (dell'insieme di partenza considerato) e il TP, il successivo calcolo della distanza media D_{mean} , e quindi la selezione di quei RP_i tali che $D_i < c \cdot D_{mean}$.

Si capisce quindi che all'aumentare del valore di c aumenta il numero di RPs selezionati, e per $c = 1$ la soglia risulta uguale alla distanza media.

5.4.1 Scenario 2D/2D

In questo scenario si suppone di conoscere il piano in cui si trova il dispositivo mobile, ma non di conoscere la sua posizione 2D.

Ci si chiede quindi quali possano essere le prestazioni del sistema considerando:

- solo i RPs WiFi del piano omologo;
- solo la porzione di rete femto-cellulare del piano omologo al TP stesso.

Sarà quindi applicato l'algoritmo WiFi EWKNN per la stima della posizione di ciascun TP, sullo spazio dei RPs selezionati da ciascuno dei sette pre-filtraggi.

Di seguito è dunque mostrato il confronto delle prestazioni fra la localizzazione fornita dall'algoritmo EWKNN con e senza ausilio dei pre-filtraggi femtocellulari, al variare del numero di RPs selezionati.

Errore medio di stima e Onere computazionale - Filtraggi in Distanza

Consideriamo innanzitutto i 3 pre-filtraggi su base distanza P1, P2, P3, e confrontiamo l'andamento dell'errore medio di stima della posizione del mobile che si ha utilizzando il positioning WiFi da solo e con l'ausilio dei vari filtraggi. Da fig.5.14 è evidenziata:

- la *curva blu* che rappresenta l'andamento dell'errore medio di stima al variare della variabile "c", utilizzando solo l'algoritmo di positioning WiFi EWKNN;
- la *curva rossa tratteggiata* che rappresenta l'omologo andamento di errore che si ha però applicando l'algoritmo EWKNN a valle del prefiltraggio P1;
- la *curva viola con rombi* che rappresenta l'omologo andamento di errore che si ha però applicando l'algoritmo EWKNN a valle del prefiltraggio P2;
- la *curva verde con cerchi* che rappresenta l'omologo andamento di errore che si ha però applicando l'algoritmo EWKNN a valle del prefiltraggio P3;

Vediamo subito da 5.14 che l'uso dei tre pre-filtraggi in distanza permettono di avere sicuramente un miglioramento dell'errore di stima, e questo in particolare aumenta al crescere di c . Per valori di c superiori all'unità si vede infatti che la differenza di errore di stima senza e con pre-filtraggi si

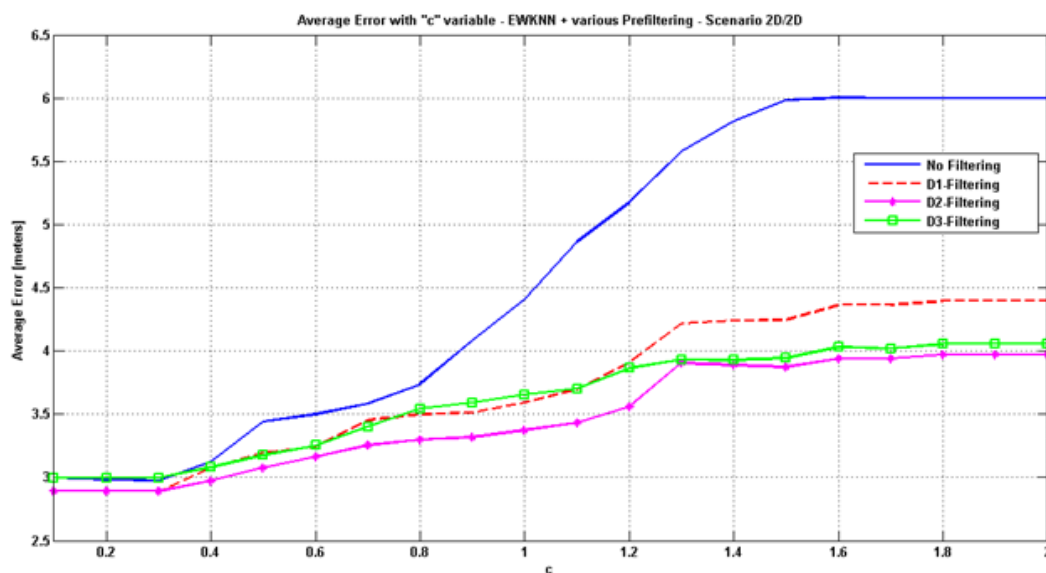


Fig. 5.14: Confronto fra gli errori medi di stima, in metri, al variare della variabile "c", commessi dall' algoritmo EWKNN con e senza pre-filtraggi in distanza. Scenario 2D/2D.

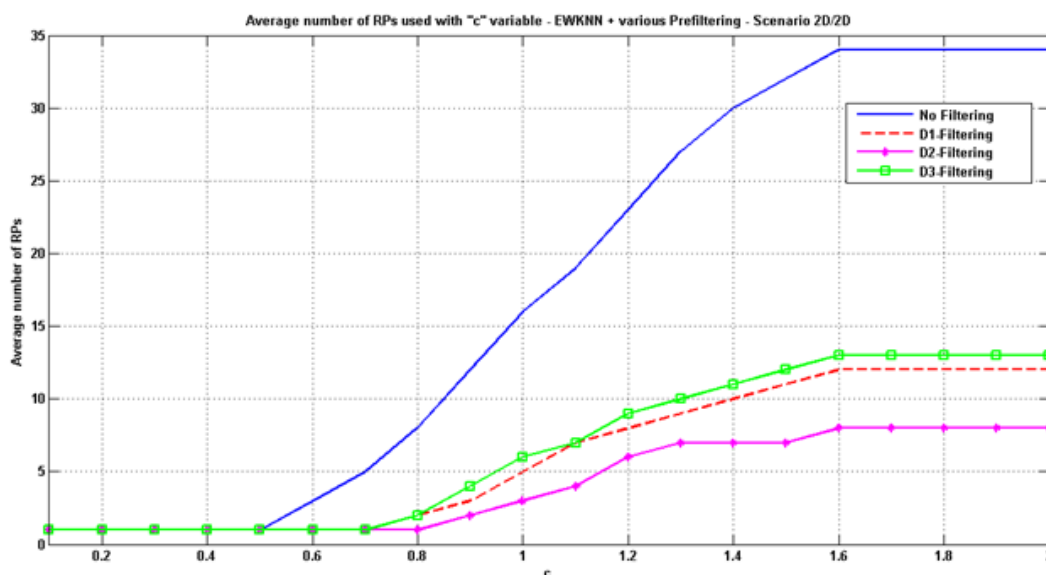


Fig. 5.15: Confronto fra gli oneri computazionali al variare della variabile "c", dell' algoritmo EWKNN con e senza pre-filtraggi in distanza. Scenario 2D/2D.

stabilizza attorno a $1.5/2m$. Viceversa per valori di c inferiori o uguali a 1, gli andamenti sono molto prossimi; i pre-filtraggi comunque permettono sempre migliori prestazioni.

In parallelo però è da osservare che l'onere computazionale, fig.5.15, inteso come *numero medio di RPs utilizzati per ottenere i relativi valori di stima*, è sempre nettamente inferiore utilizzando i pre-filtraggi. C'è infatti una differenza che è quasi sempre doppia o tripla.

Inoltre possiamo sottolineare che, in questo scenario 2D/2D, fra i filtraggi in distanza, quello che complessivamente permette di avere prestazioni migliori in termini di errore medio e di onere computazionale è il D2 (linea viola). Attraverso di esso infatti le curve si mantengono costantemente sotto le altre.

Con questo risultato, è confermata l'ipotesi iniziale per cui per pre-selezionare il giusto sottoinsieme di RPs, e quindi avere una migliore stima della posizione del TP, è bene utilizzare filtraggi che considerino tutte le femtocelle (relative ad un certo piano in questo caso), così da avere il quadro completo della "visione" del Test Point.

Errore medio di stima e Onere computazionale - Filtraggi in Potenza

Consideriamo adesso i 4 pre-filtraggi su base potenza P1, P2, P3, P4, e confrontiamo le prestazioni che si ottengono con il loro ausilio rispetto al positioning WiFi da solo. Da fig.5.16 è evidenziata:

- la *curva blu* che rappresenta l'andamento dell'errore medio di stima al variare della variabile "c", utilizzando semplicemente l'algoritmo di positioning WiFi EWKNN;
- la *curva azzurra con cerchio* che rappresenta l'omologo andamento di errore che si ha però applicando l'algoritmo EWKNN a valle del pre-filtraggio P1;
- la *curva nera con rombi* che rappresenta l'omologo andamento di errore che si ha però applicando l'algoritmo EWKNN a valle del pre-filtraggio P2;
- la *curva gialla* che rappresenta l'omologo andamento di errore che si ha però applicando l'algoritmo EWKNN a valle del pre-filtraggio P3;
- la *curva blu con quadrato vuoto* che rappresenta l'omologo andamento di errore che si ha però applicando l'algoritmo EWKNN a valle del pre-filtraggio P4;

Osservando le figure 5.16 e 5.17 ci si accorge subito che le prestazioni sono migliori se vengono utilizzati i pre-filtraggi, rispetto al caso del solo

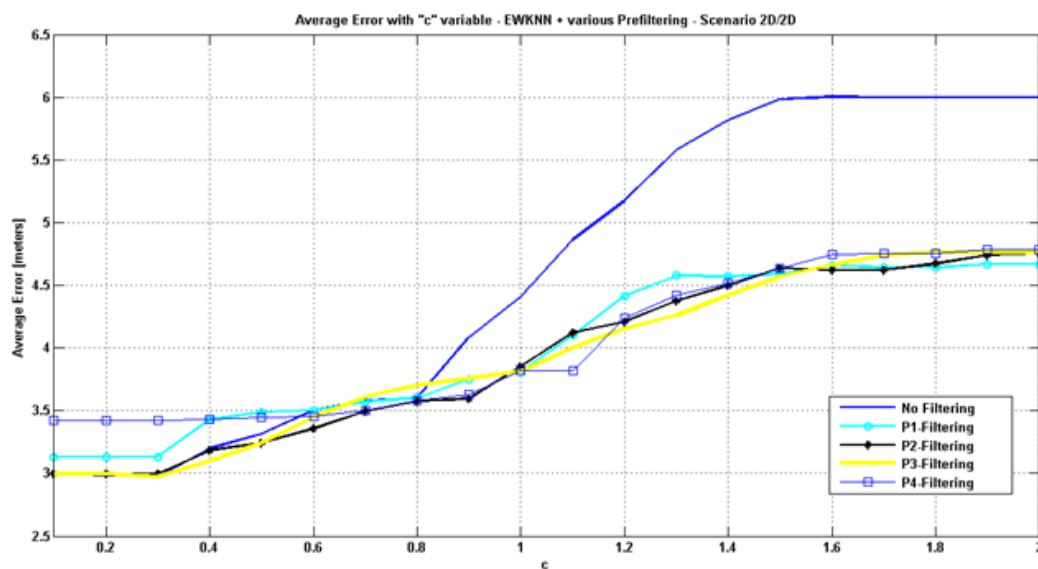


Fig. 5.16: Confronto fra gli errori medi di stima, in metri, al variare della variabile "c", commessi dall'algoritmo EWKNN con e senza pre-filtraggi in potenza. Scenario 2D/2D.

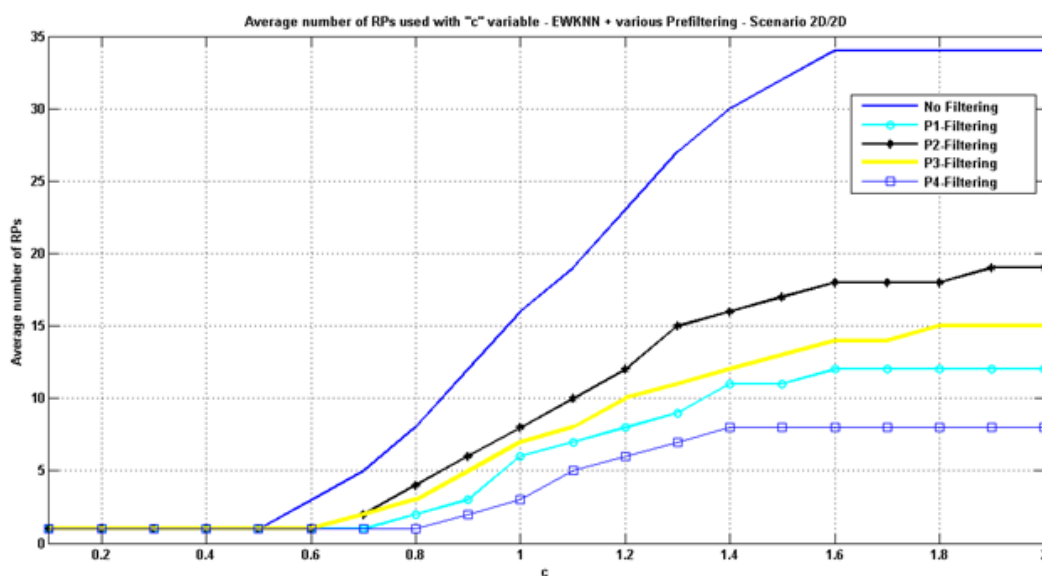


Fig. 5.17: Confronto fra gli oneri computazionali al variare della variabile "c", dell'algoritmo EWKNN con e senza pre-filtraggi in potenza. Scenario 2D/2D.

algoritmo EWKNN. Di contro è da notare che rispetto al caso dei filtraggi in distanza, fig. 5.14 e 5.15, le prestazioni sono lievemente inferiori.

Ciò è spiegabile considerando che in questo scenario si lavora solo sul piano omologo a quello del TP, quindi è considerata solo la porzione di rete mobile e solo i RPs WiFi di un piano. Quindi selezionare i RPs su base potenza è meno produttivo dal momento che, come spiegato in precedenza, la distribuzione del campo in ambienti indoor è abbastanza irregolare, e non vale più la regola per cui "maggiore è la distanza trasmettitore-ricevitore, maggiore è il decadimento in potenza del segnale", proprio a causa della presenza di muri e porte. Se per esempio consideriamo un pixel che si trova più vicino alla femto-cella 1 rispetto alla femto-cella 2, è possibile che in questo pixel si percepisca meglio la femto-cella 2 che la femto-cella 1, perchè per esempio ci sono più muri/porte che separano il pixel dall'antenna 1 rispetto a quelli che lo separano dalla 2.

Si capisce quindi che nello scenario 2D/2D conviene utilizzare filtraggi in distanza per ottenere migliori prestazioni in termini di errore di stima e onere computazionale, in particolare quello più performante risulta essere il P2-Filering.

5.4.2 Scenario 2D/3D

Assumiamo adesso di conoscere ancora il piano in cui si trova il dispositivo mobile, ma di non conoscere la sua posizione 2D. Ci chiediamo quali sono in questo caso le prestazioni del sistema di localizzazione eterogeneo, considerando:

- i RPs relativi al piano in cui si trova il dispositivo mobile;
- la rete femto-cellulare completa.

In questa situazione i pre-filtraggi che considerano tutte le femtocelle possibili, per effettuare i clustering, dovrebbero selezionare sotto-insiemi di RPs WiFi di cardinalità inferiore rispetto a quelli che si ottengono nello scenario 2D/2D, perchè, intuitivamente, devono essere rispettate maggiori condizioni.

Anche in questo caso quindi, è stato applicato l'algoritmo di positioning EWKNN, con e senza pre-filtraggi.

Errore medio di stima e Onere computazionale - Filtraggi in Distanza

Consideriamo nuovamente i 3 pre-filtraggi su base distanza D1, D2 e D3, confrontando l'andamento dell'errore medio di stima utilizzando il positioning WiFi con e senza l'ausilio di essi.

Nelle figure 5.18 e 5.19 sono mostrate le prestazioni in termini di errore medio e di onere computazionale.

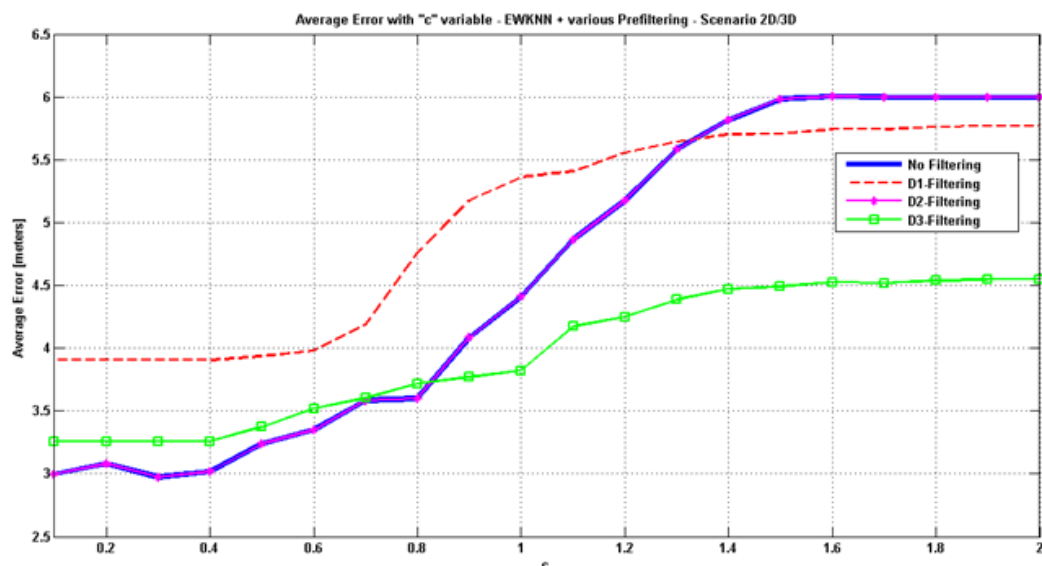


Fig. 5.18: Confronto fra gli errori medi di stima, in metri, al variare della variabile "c", commessi dall'algorithm EWKNN con e senza pre-filtraggi in distanza. Scenario 2D/3D.

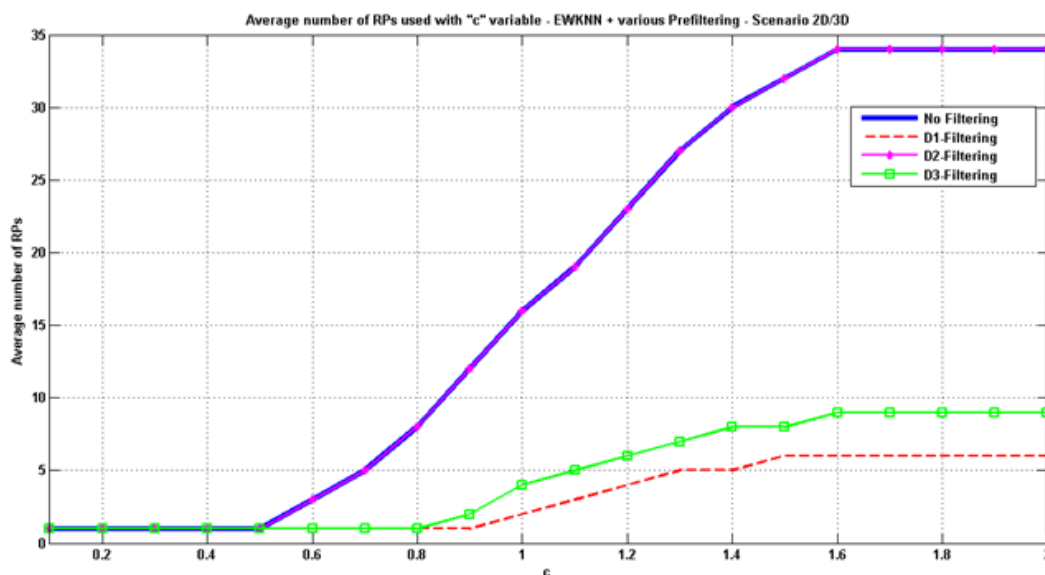


Fig. 5.19: Confronto fra gli oneri computazionali al variare della variabile "c", dell'algorithm EWKNN con e senza pre-filtraggi in distanza. Scenario 2D/3D.

Da figura 5.18 risulta subito evidente come le prestazioni peggiorino ri-

spetto al caso 2D/2D, fig.5.14. Questo è dovuto al fatto che adesso stiamo effettuando pre-filtraggi utilizzando l'intera rete femto-cellulare sull'insieme di RPs del piano omologo al mobile, per cui l'approccio su base distanza viene sicuramente meno. Infatti considerando per esempio il D1-Filtering, che seleziona i RPs più vicini alla femtocella di aggancio, può capitare che vengano selezionati quei RPs che si trovano nel piano adiacente all'antenna di aggancio, ma proprio in corrispondenza di essa. Ecco spiegato quindi il perchè delle prestazioni estremamente peggiorate di questo pre-filtraggio. Per quanto riguarda invece il D2-Filtering, che nel caso 2D/2D risulta essere il migliore, in questo caso la sua applicazione è completamente inutile, poichè le prestazioni sono perfettamente uguali, sia in termini di errore che in termini di onere computazionale, a quelle del solo EWKNN. Questo, come sottolineato in partenza, è dovuto al fatto che qualora non risulti possibile selezionare almeno un RPs per TP, la funzione prefiltraggio restituisce l'insieme completo di RPs.

Notiamo invece che le prestazioni di localizzazione con il filtraggio D3, sono rimaste simili a quelle del caso 2D/2D, anche se lievemente peggiorate.

Errore medio di stima e Onere computazionale - Filtraggi in Potenza

Consideriamo adesso i filtraggi su base potenza P1, P2, P3 e P4 in questo scenario 2D/3D, figure 5.20 e 5.21.

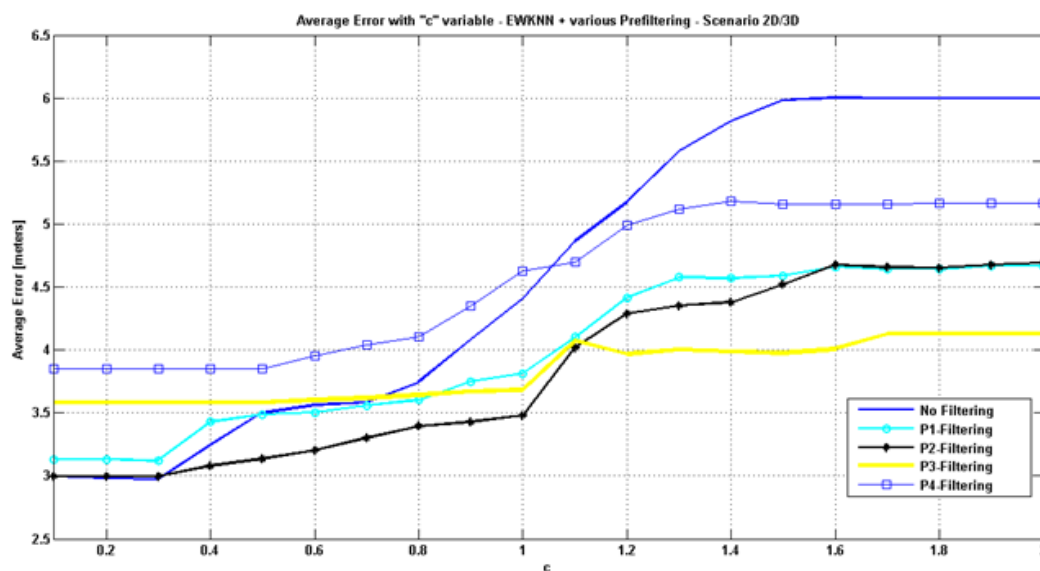


Fig. 5.20: Confronto fra gli errori medi di stima, in metri, al variare della variabile "c", commessi dall' algoritmo EWKNN con e senza pre-filtraggi in potenza. Scenario 2D/3D.

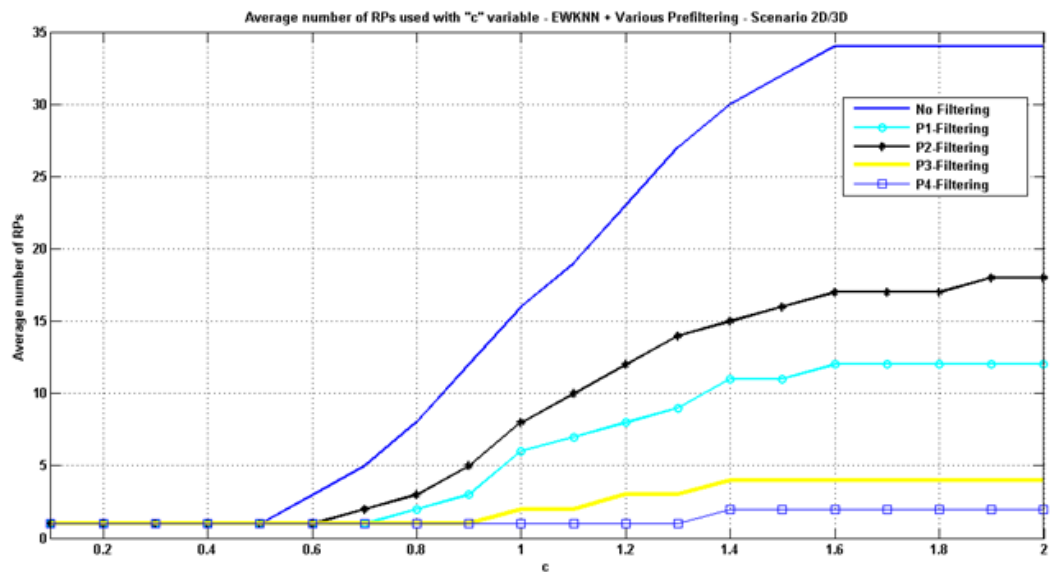


Fig. 5.21: Confronto fra gli oneri computazionali al variare della variabile "c", dell'algorithm EWKNN con e senza pre-filtraggi in potenza. Scenario 2D/3D.

Vediamo dalle figure 5.20 e 5.21 che complessivamente questi filtri in potenza danno prestazioni migliori rispetto a quelli in distanza. Inoltre rispetto al caso 2D/3D, fig.5.16, vediamo che per alcuni pre-filtraggi le prestazioni in termini di errore sono sostanzialmente simili per valori di c maggiori o uguali all'unità.

In particolare osserviamo che il P1-Filtering fornisce prestazioni uguali nei due scenari, sia in termini di errore medio sia in termini di onere computazionale, e questo è ovvio dal momento che prende in considerazione solo la femtocella di aggancio per effettuare il filtraggio degli RPs. Anche il P2-Filtering risulta dare prestazioni simili al caso 2D/3D.

Il P3-Filtering, che clusterizza i RPs sulla base del complesso di femto-celle presenti, ha un andamento leggermente peggiore al caso 2D/3D per valori di c inferiori a 1, per poi riprendersi per $c \geq 1$. Parallelamente, per $c \geq 1$, non solo migliora l'errore medio, rispetto al caso 2D/2D, ma si ha anche una ottimizzazione in termini di onere computazionale.

Infine per quanto riguarda il P4-Filtering, c'è sicuramente un peggioramento, rispetto al caso 2D/2D, sia in termini di errore medio che di onere computazionale.

In questo scenario quindi i prefiltraggi su base potenza complessivamente migliori sono il D1 e il D3, anche se in termini di onere computazionale non sono eccellenti.

Si può quindi concludere che se è noto il piano in cui si trova il dispositivo, conviene senz'altro utilizzare solo la parte di rete mobile e il sottoinsieme

me di RPs WiFi del relativo piano, e sfruttare uno dei pre-filtraggi su base distanza, come ad esempio il D3.

5.4.3 Scenario 3D/3D

Passiamo adesso all'ultimo scenario, quello in cui si suppone di non conoscere nè la posizione 2D del dispositivo mobile, nè il piano in cui si trova. In questo caso la localizzazione è effettuata considerando i RPs di entrambi i piani e la rete mobile completa.

E' mostrato di seguito il confronto delle prestazioni fra la localizzazione fornita dall'algoritmo EWKNN con e senza ausilio dei prefiltraggi femtocellulari.

Errore medio di stima e Onere computazionale - Filtraggi in Distanza

Cominciamo con il considerare solo i filtraggi su base distanza, e a valutarne le prestazioni.

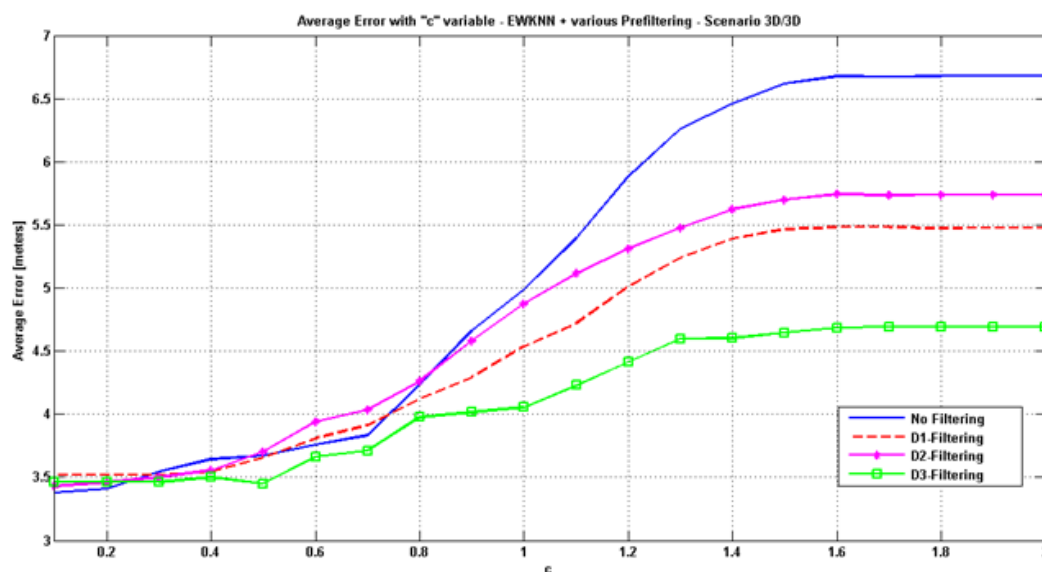


Fig. 5.22: Confronto fra gli errori medi di stima, in metri, al variare della variabile "c", commessi dall'algoritmo EWKNN con e senza pre-filtraggi in distanza. Scenario 3D/3D.

Dalle figure 5.22 e 5.23, vediamo immediatamente che le prestazioni migliori in termini di errore medio sono ottenibili con il D3-Filtering, che considera sostanzialmente la prima e la seconda femtocella di aggancio, tralasciando le altre. Questo permette di ottenere un errore medio che va da circa 3.5 metri, per valori di c inferiori all'unità, fino ad un massimo di

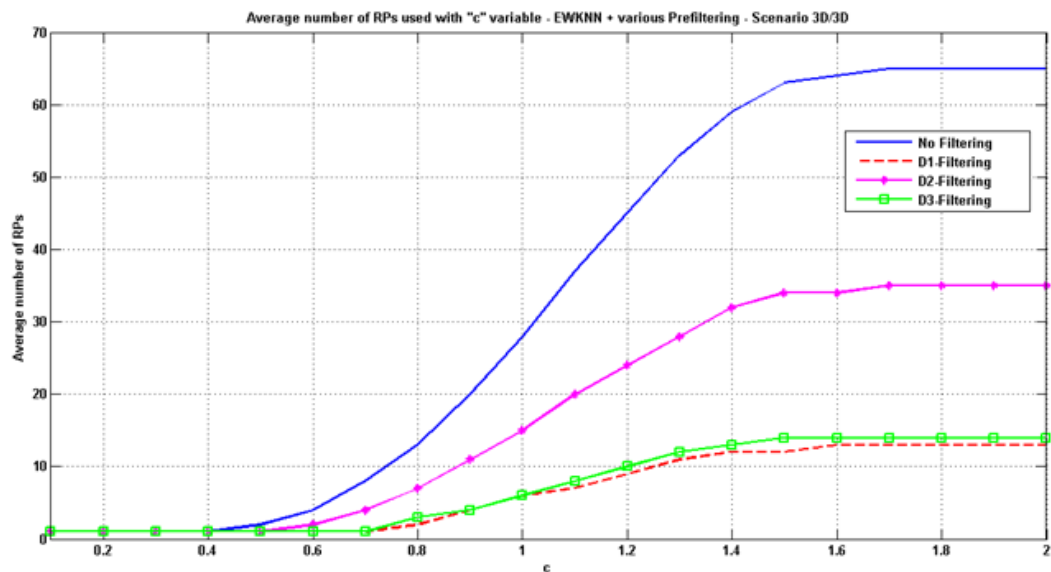


Fig. 5.23: Confronto fra gli oneri computazionali al variare della variabile "c", dell'algoritmo EWKNN con e senza pre-filtraggi in distanza Scenario 3D/3D.

circa 4.7 metri per valori di c superiori o uguali a 1, rispetto ad un errore massimo di circa 6.7 metri con l'algoritmo EWKNN puro. Parallelamente vediamo che l'onere computazionale con esso ottenibile risulta essere ancora inferiore rispetto a quello che si ha con il solo EWKNN, fino ad arrivare ad rapporto di 1 a 6.

Possiamo concludere che fra i filtraggi in distanza questo è quello che risulta essere più stabile al variare dello scenario.

Prestazioni buone si hanno anche con i filtraggi D1 e D2, nell'ordine. Si può quindi dire che in una situazione 3D/3D, volendo utilizzare filtraggi in distanza, conviene basarsi solo su una o al massimo le prime due femtocelle più forti (cioè quelle percepite meglio nel TP), per selezionare i RPs; quindi è bene utilizzare o il D3-Filtering, o il D1-Filtering. Viceversa, considerare tutte le femtocelle, e quindi cercare i RPs che abbiano determinate distanze da esse, come fa il D2-Filtering, è meno consigliato in quanto le prestazioni risultano essere non ottime. Il motivo di ciò è quello spiegato in precedenza, ovvero che in una situazione 3D è possibile che un RP sia definito più vicino ad una femtocella del piano adiacente, anziché ad una del proprio piano, alterando così le prestazioni del sistema di localizzazione.

Errore medio di stima e Onere computazionale - Filtraggi in Potenza

Prendiamo adesso in considerazione i filtraggi che agiscono su base potenza, e valutiamone le prestazioni in termini di errore medio e in termini di onere computazionale, fig.5.24 e 5.25.

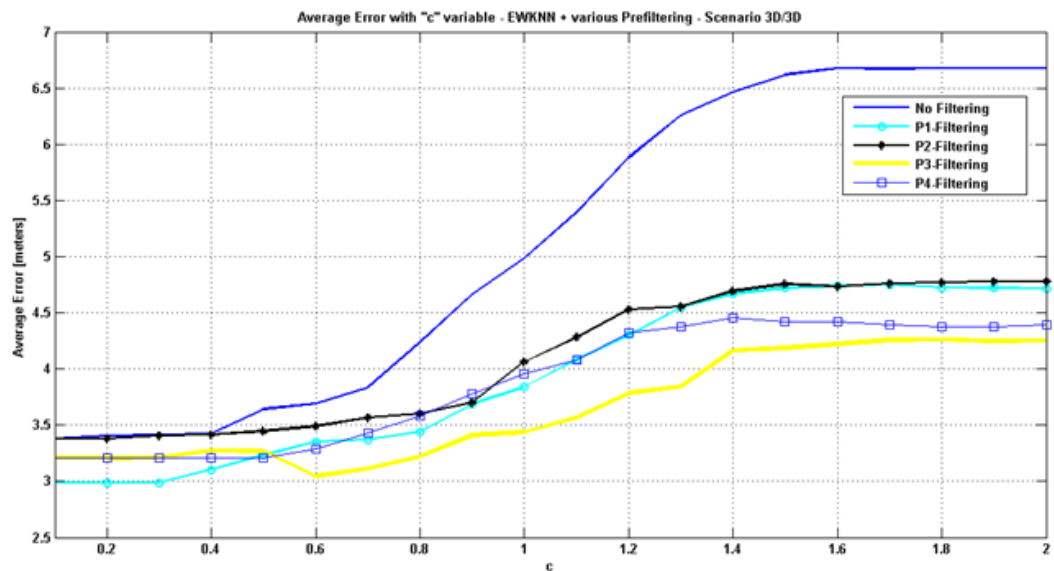


Fig. 5.24: Confronto fra gli errori medi di stima, in metri, al variare della variabile "c", commessi dall'algoritmo EWKNN con e senza pre-filtraggi in potenza. Scenario 3D/3D.

Dalle fig.5.24 e 5.25, vediamo innanzitutto che le prestazioni sono complessivamente migliori rispetto a quelle in distanza, anche se di poco, confermando quindi l'idea iniziale secondo cui in situazioni 3D conviene far riferimento a filtraggi basati solo sulle informazioni di potenza. Vediamo inoltre che i filtraggi che danno prestazioni migliori, in questo caso, sono il P3 e il P4, sia in termini di errore medio che di onere computazionale.

I filtraggi P1 e P2 invece hanno prestazioni leggermente peggiori.

Concludiamo quindi che i filtraggi migliori in una situazione 3D utilizzando l'algoritmo EWKNN sono il P3 e P4, che lavorano considerando il complesso delle femto-celle dislocate e senza effettuare filtraggi basati su superamenti di soglie "medie", come ad esempio fa il P2, e tantomeno usando una sola femtocella come riferimento, come fa il P1.

In particolare la P3 permette di ottenere prestazioni lievemente migliori in termini di errori medi, rispetto al P4, ma al contempo ha un onere computazionale di poco superiore allo stesso.

5.4.4 WKNN e Confronti fra scenari

In ultima istanza abbiamo valutato le prestazioni ottenibili con i sette pre-filtraggi applicati all'algoritmo di positioning WiFi WKNN. Come spiegato in precedenza questo algoritmo seleziona i K RPs più vicini alla posizione del dispositivo mobile calcolando per ognuno di essi la distanza dal TP.

Nel nostro caso si è scelto di valutare le prestazioni dell'algoritmo WKNN, utilizzando come metrica la distanza *manhattan* e la distanza *euclidea*, separatamente, in modo da capire se questa scelta possa incidere sulle prestazioni del sistema. Si è inoltre settato $K = 1$, per cui l'algoritmo deve selezionare il RPs più vicino al TP, e pesare le sue coordinate per ottenere la posizione del TP stesso.

Facendo riferimento ai tre scenari su introdotti, si è quindi applicato l'algoritmo WKNN con $K=1$, in ciascuno di essi, integrandolo con ognuno dei sette prefiltraggi su base femto-cella proposti.

Di seguito è quindi riportato il valore dell'errore medio di stima che si ha per ogni tipologia di prefiltraggio e per ogni scenario, utilizzando la distanza *manhattan*, fig.5.26.

Invece in figura 5.27 è riportato l'andamento degli errori medi di stima, per ogni pre-filtraggio e per ogni scenario, utilizzando la distanza *euclidea*.

Infine in figura 5.28 vediamo l'andamento dell'onere computazionale al variare del filtraggio e per ogni tipo di scenario.

In fig.5.28 è da sottolineare che sono riportate le cardinalità degli insiemi di RPs su cui l'algoritmo WKNN effettua le operazioni per la stima della posizione.

Da figura 5.26 si vede che nello scenario 2D/2D i filtri in distanza offrono prestazioni leggermente migliori rispetto a quelli in potenza. In particolare il D1 e D2 sarebbero da preferire, perchè a differenza del D3 non necessitano di impostare soglie legate strettamente all'ambiente considerato, ma si mantengono generiche.

Per quanto riguarda invece gli scenari 2D/3D e 3D/3D, resta confermato che i filtri da preferire sono quelli in potenza, in particolare per quanto riguarda la distanza *manhattan* il P1 risulta essere il migliore in termini di errore medio di stima. Prestazioni simili in termini di errore medio si hanno considerando la distanza *euclidea*, 5.27.

Considerando adesso anche figura 5.28 si può valutare quale filtraggio può andar meglio sia sotto l'aspetto di errore medio che sotto quello di onere computazionale. Infatti vediamo che nello scenario 2D/2D la scelta finale potrebbe ricadere sul prefiltraggio D2, mentre per quanto riguarda i

filtraggi in potenza (da preferire negli scenari 2D/3D-3D/3D) il P4 permette di avere l'onere computazionale più basso.

Dalle figure precedenti si può assumere inoltre che quando si è nello scenario 2D/2D si ottengono prestazioni leggermente migliori, (20 – 30cm), utilizzando come metrica nell'algoritmo WKNN, la distanza euclidea. Viceversa negli scenari 2D/3D e 3D/3D si ottengono risultati leggermente migliori utilizzando la distanza manhattan.

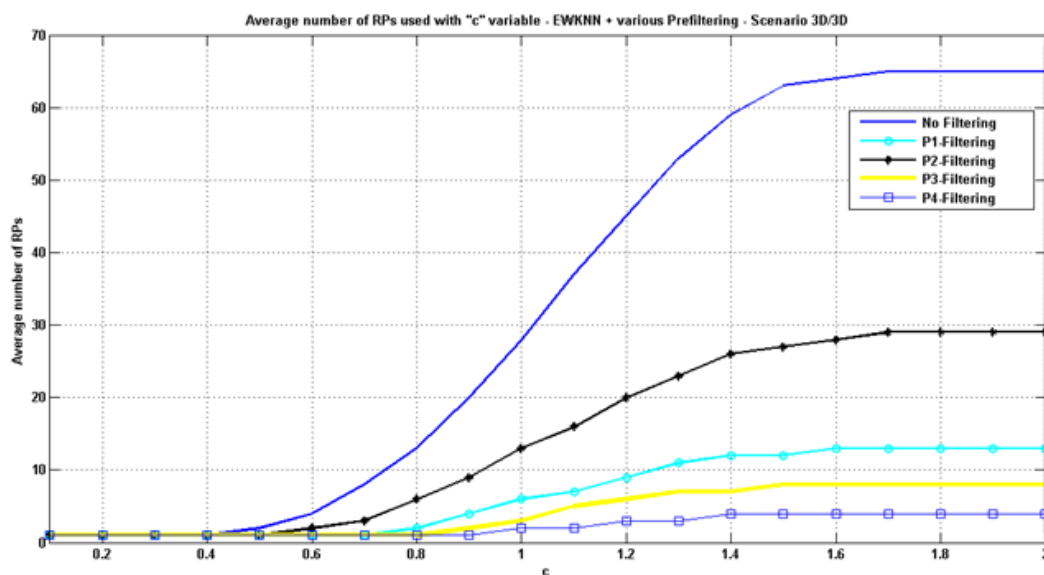


Fig. 5.25: Confronto fra gli oneri computazionali al variare della variabile "c", dell'algorithm EWKNN con e senza pre-filtraggi in potenza. Scenario 3D/3D.

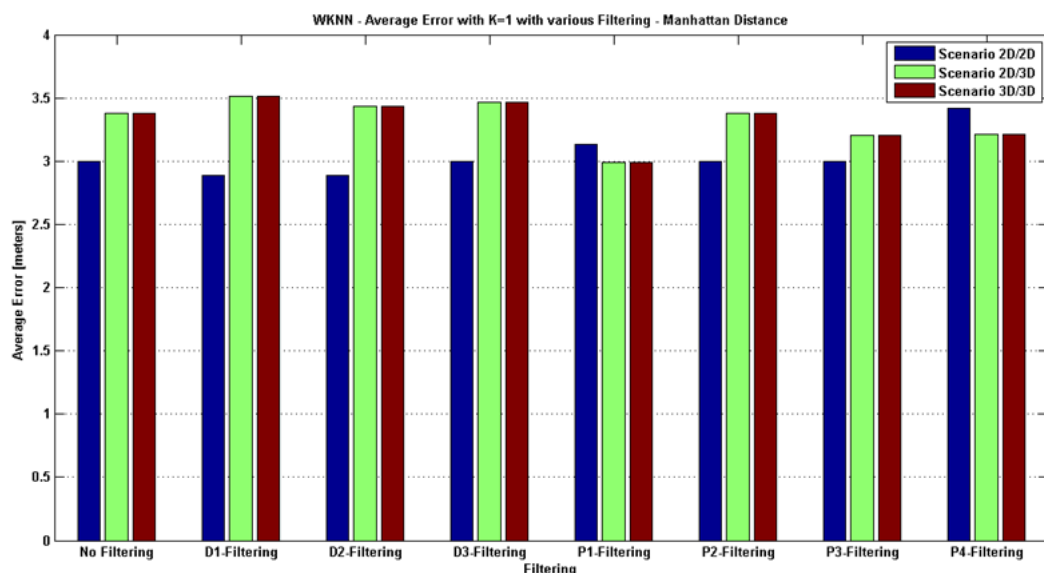


Fig. 5.26: Confronto fra gli errori medi di stima commessi dall'algorithm WKNN con e senza pre-filtraggi, in ognuno dei tre scenari, utilizzando la distanza manhattan.

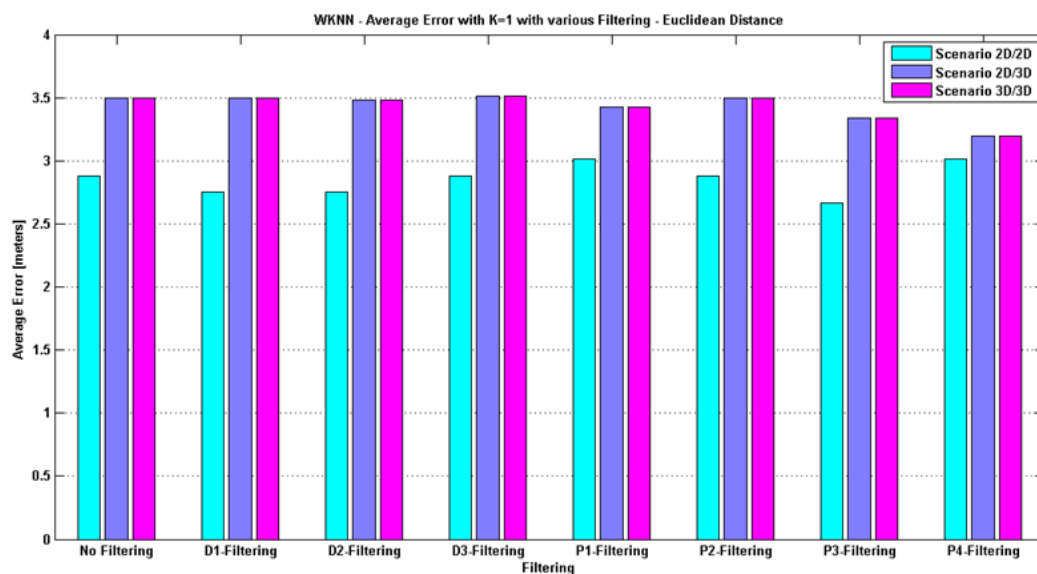


Fig. 5.27: Confronto fra gli errori medi di stima commessi dall’algoritmo WKNN con e senza pre-filtraggi, in ognuno dei tre scenari, utilizzando la distanza euclidea.

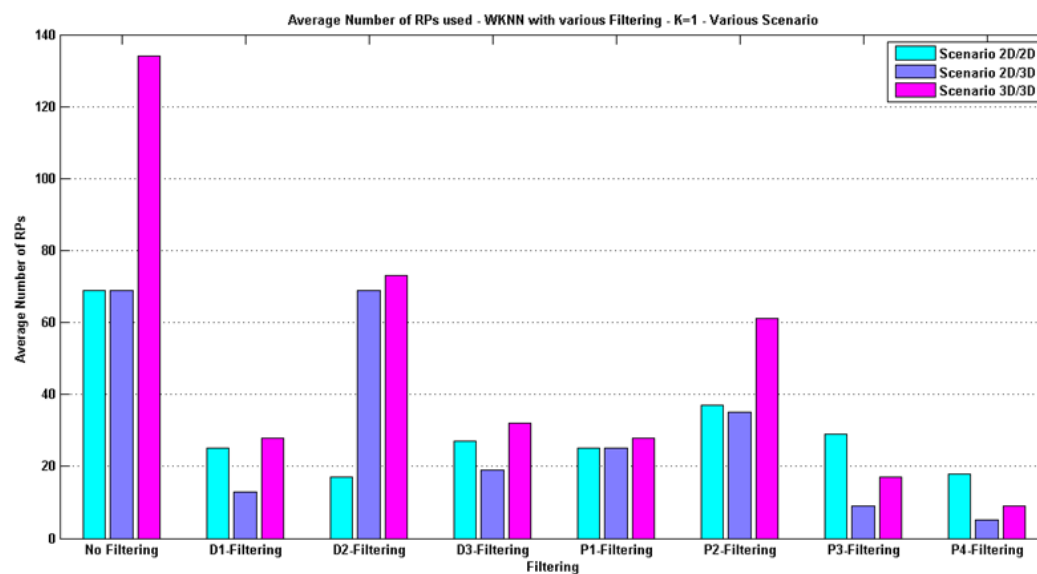


Fig. 5.28: Confronto fra gli oneri computazionali ottenibili con l’algoritmo WKNN con e senza pre-filtraggi, in ognuno dei tre scenari



CAPITOLO 6



CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il lavoro sviluppato ha permesso di avere un quadro generale del problema della localizzazione in un ambiente indoor utilizzando una rete eterogenea.

Si è visto che effettivamente una rete femto-cellulare può essere un valido supporto agli algoritmi di localizzazione WiFi, facendo da un lato diminuire notevolmente l'onere computazionale per il positioning, e dall'altro migliorare l'errore medio di stima.

Il lavoro comunque può essere approfondito in modo innanzitutto da creare un pre-filtraggio ottimo o subottimo, e magari confrontare i risultati simulati con una vera rete di femto-celle installata negli ambienti del DIET qui presi in esame.

Sarebbe poi opportuno approfondire gli studi utilizzando anche altri modelli di canale, oltre al multiwall, così da capire quale possa essere più realistico nel caso delle reti femtocellulari.

Si potrebbero valutare inoltre le prestazioni del sistema al variare del numero di femtocelle dislocate e della loro potenza erogata.

Infine c'è sottolineare che l'algoritmo per la dislocazione delle femtocelle può essere sicuramente utilizzato per installare le antenne anche in un ambiente indoor privo di rete WiFi pre-installata. Infatti l'algoritmo creato prevede già la possibilità di impostare i parametri di simulazione in modo tale da coprire l'area indoor in modo più o meno fitto, scegliendo il livello della potenza erogata, le soglie di sensibilità etc. In uno scenario di questo tipo sarebbe quindi possibile la creazione di un'algoritmo di positioning basato solo su rete femtocellulare, in modo da confrontarne le prestazioni con i risultati già ottenuti e proporre nuovi sviluppi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Alcatel-Lucent 9361 Home Cell V2.*
- [2] *Alcatel-Lucent 9362 Enterprise Cell.*
- [3] *Alcatel-Lucent 9364 Metro Cell Outdoor V2.*
- [4] Ericsson mobility report.
- [5] *“Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the (UMTS)-(UMTS 30.03 version 3.2.0)”, date =1998-04,.*
- [6] 3GPP TS 25.305. *“User Equipment (UE) Positioning in Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)”. 3GPP.*
- [7] S. Saha , K. Chaudhuri, D. Sanghi , P. Bhagwat. *“Location determination of a mobile device using ieee 802.11b access point signals. “. Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003. 2003 IEEE, 3:1987–1992.*
- [8] Giuseppe Caso , Luca De Nardis , Maria-Gabriella di Benedetto. *“Frequentist Inference for WiFi Fingerprinting 3D Indoor Positioning “. Conference: IEEE International Conference on Communications (ICC’15) - Workshop on Advances in Network Localization and Navigation (ANLN’15), At London (UK).*
- [9] X. Chu, D. Lopez-Perez, Y. Yang, F. Gunnarsson. *“Heterogeneous Cellular Networks: Theory, Simulation and Deployment “.*
- [10] M. Ciurana , F. Barcelo-Arroyo , F. Izquierdo. *“A ranging method with ieee 802.11 data frames for indoor localization “. Wireless Communications and Networking Conference, 2007.WCNC 2007. IEEE, pages 2092 – 2096.*

- [11] P. Briggs, R. Chundury, J. Olsson. "Carrier ethernet for mobile backhaul". *IEEE Communication Magazine*, 48:94–100.
- [12] Beomju Shin, Jung Ho Lee, Hyung Seok Kim. "Enhanced weighted K-nearest neighbor algorithm for indoor Wi-Fi positioning systems". *Computing Technology and Information Management (ICCM), 2012 8th International Conference on*, pages 574 – 577.
- [13] Stephen Carson, Istvan Godor, Péter Kersch, Anders Kälvemark, Gösta Lemne, Per Lindberg. "Ericsson Mobility Report on the pulse of the networked society".
- [14] Andrea Borelli, Cristiano Monti, Marco Vari, Franco Mazzenga. "Channel Models for IEEE 802.11b Indoor System Design". *Communications, 2004 IEEE International Conference on*, 6:3701–3705.
- [15] P. Bahl, V.N. Padmanabhan. "RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system.". *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, 2:775 – 784.
- [16] V. Piccolo. "Dislocazione ottima dei sensori per localizzazione indoor".
- [17] Hasnain Kashif, Usman Rafique, Ateeq Ur Rehman, Ayaz Umer. "Estimation of Pathloss in Femtocells for Indoor Environments". *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, 11.
- [18] Varun Khaitan, Peerapol Tinnakornsrisuphap, Mehmet Yavuz. "Indoor Positioning Using Femtocells". *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2011 IEEE*, pages 1–5.