

POLITECNICO DI MILANO

---

V Facoltà di Ingegneria  
Corso di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni



# Algoritmi per la pianificazione incrementale di LTE nelle reti di accesso radiomobile

Relatore:

Prof. Antonio Capone

Correlatore:

Ing. Ilario Filippini

Tesi di Laurea di:

Antonio Filippo Giangrande

Matr. 755876

Federico Alliod

Matr. 755873

Anno Accademico 2012/2013

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1 La Tecnologia LTE</b>	<b>7</b>
1.1 Standard e tecnologie abilitanti . . . . .	7
1.2 Architettura di rete LTE . . . . .	10
1.2.1 Architettura EPS, SAE e LTE . . . . .	10
1.2.2 Elementi della rete EPS . . . . .	11
1.2.3 Interfacce della rete EPS . . . . .	14
1.2.4 Procedure di handover nella rete EPS . . . . .	15
1.2.5 CSFB e VoLTE . . . . .	16
1.3 Interfaccia radio LTE . . . . .	19
1.3.1 Trasmissione OFDM . . . . .	19
1.3.2 Accesso multiplo DL e UL . . . . .	20
1.3.3 Tecniche di trasmissione MIMO . . . . .	22
1.3.4 Allocazione delle risorse radio . . . . .	24
1.4 Prestazioni Attese . . . . .	27
<b>2 Reti radiomobili multitecnologia</b>	<b>29</b>
2.1 Scenario radiomobile attuale . . . . .	29
2.1.1 Evoluzione della rete radiomobile sul territorio nazionale	29
2.1.2 Upgrade incrementale della rete . . . . .	33
2.2 Impatto ambientale ed elettromagnetico degli impianti . . . . .	36

2.2.1	Deturpazione del paesaggio . . . . .	37
2.2.2	Stima e valutazione dell'inquinamento elettromagnetico	38
2.2.3	Progettazione congiunta . . . . .	44
<b>3</b>	<b>Pianificazione della copertura radiomobile</b>	<b>47</b>
3.1	Modelli per la propagazione radiomobile . . . . .	49
3.1.1	Principali modelli di propagazione . . . . .	52
3.1.2	Modello Okumura-Hata . . . . .	54
3.2	Modelli e metodi per la pianificazione della copertura radio- mobile . . . . .	55
3.2.1	Modelli di ottimizzazione . . . . .	55
3.2.2	Metodi euristici . . . . .	58
3.2.3	Modelli e metodi per la pianificazione della rete d'ac- cesso LTE . . . . .	59
<b>4</b>	<b>Modello di pianificazione</b>	<b>63</b>
4.1	Caratterizzazione dello scenario . . . . .	64
4.1.1	Caratterizzazione della rete esistente . . . . .	64
4.1.2	Caratterizzazione delle configurazioni implementabili	65
4.1.3	Caratterizzazione dell'interfaccia radio . . . . .	66
4.2	Sviluppo del modello . . . . .	70
4.2.1	Definizione dei parametri . . . . .	70
4.2.2	Variabili del problema . . . . .	74
4.2.3	Funzione obiettivo . . . . .	75
4.3	Vincoli del problema . . . . .	75
4.3.1	Vincoli di assegnamento . . . . .	76
4.3.2	Vincoli sui costi e configurazioni . . . . .	76
4.3.3	Vincolo sul SINR . . . . .	80
4.3.4	Vincolo di fairness . . . . .	81
4.4	Problemi numerici e limiti computazionali del modello . . . .	82

4.4.1	Mal condizionamento della matrice dei coefficienti . . .	82
4.4.2	Precauzioni contro gli errori numerici . . . . .	83
4.4.3	Limiti computazionali . . . . .	84
<b>5</b>	<b>Metodi euristici</b>	<b>85</b>
5.1	Metodo euristico semplificato . . . . .	86
5.1.1	Algoritmo di Copertura . . . . .	87
5.1.2	Algoritmo di Fairness . . . . .	97
5.1.3	Algoritmo di MIMO . . . . .	100
5.1.4	Randomizzazione della soluzione . . . . .	101
5.2	Metodo euristico completo . . . . .	101
5.2.1	Nuova caratterizzazione dell'interfaccia radio . . . . .	101
5.2.2	Stima dei punti sensibili . . . . .	102
<b>6</b>	<b>Analisi dei risultati</b>	<b>105</b>
6.1	Generatore di istanze pseudocasuali . . . . .	106
6.1.1	Generazione dell'area di copertura . . . . .	106
6.1.2	Generazione delle configurazioni 2G/3G . . . . .	109
6.1.3	Generazione limiti di inquinamento elettromagnetico	110
6.2	Prove su modello e metodo euristico semplificato . . . . .	112
6.2.1	Valutazione della funzione obiettivo in funzione del budget - Modello ed euristica semplificata . . . . .	115
6.2.2	Valutazione della funzione obiettivo in funzione del numero di siti candidati - Modello ed euristica sempli- ficata . . . . .	117
6.2.3	Valutazione della funzione obiettivo in funzione del numero di punti di test - Modello ed euristica sempli- ficata . . . . .	119

6.2.4	Valutazione della funzione obiettivo in funzione dei livelli di inquinamento elettromagnetico - Modello ed euristica semplificata . . . . .	121
6.2.5	Analisi completa di una singola istanza . . . . .	122
6.3	Prove su metodo euristico completo . . . . .	130
6.3.1	Valutazione della funzione obiettivo in funzione del budget - Metodo euristico completo . . . . .	130
6.3.2	Valutazione della funzione obiettivo in funzione del numero di siti candidati - Metodo euristico completo	132
6.3.3	Valutazione della funzione obiettivo in funzione del numero dei punti di test - Metodo euristico completo	133
6.3.4	Valutazione della funzione obiettivo in funzione dei livelli di inquinamento elettromagnetico - Metodo euristico completo . . . . .	134
6.3.5	Analisi completa di una singola istanza - Metodo euristico completo . . . . .	136
6.3.6	Evoluzione della funzione obiettivo nelle tre fasi dell'algoritmo euristico completo . . . . .	139
	<b>Conclusioni</b>	<b>145</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>148</b>
	<b>A Modello AMPL</b>	<b>153</b>

# Elenco delle tabelle

1.1	Indici di modulazione LTE . . . . .	26
1.2	Prestazioni attese dalla rete LTE . . . . .	27
4.1	Indici di modulazione LTE . . . . .	67
4.2	Valori di throughput . . . . .	69
4.3	Riassunto delle grandezze del modello . . . . .	71
4.4	Esempi di configurazioni per i sistemi GSM900 e UMTS . . . . .	72
5.1	Tabella throughput LTE in funzione di SINR e RB . . . . .	102
6.1	Livelli di potenza disponibili . . . . .	109
6.2	Numeri di portanti disponibili . . . . .	110
6.3	Livelli di potenza e portanti accettabili . . . . .	110
6.4	Caratteristiche generali dello scenario - Modello ed euristica semplificata - parte 1 . . . . .	112
6.5	Caratteristiche generali dello scenario - Modello ed euristica semplificata - parte2 . . . . .	112
6.6	Possibili valori di throughput, espressi in kbit/s . . . . .	114
6.7	Caratteristiche principali (Budget) - Modello ed euristica semplificata . . . . .	115
6.8	Caratteristiche principali (Siti Candidati) - Modello ed euristica semplificata . . . . .	117

6.9	Caratteristiche principali (Test point) - Modello ed euristica semplificata . . . . .	119
6.10	Caratteristiche principali (Inquinamento elettromagnetico) - Modello ed euristica semplificata . . . . .	121
6.11	Caratteristiche principali (Singola istanza) - Modello ed euristica semplificata . . . . .	122
6.12	Configurazioni siti candidati . . . . .	123
6.13	Risultati (Singola istanza) - Modello ed euristica semplificata - parte 1 . . . . .	125
6.14	Risultati (Singola istanza) - Modello ed euristica semplificata - parte 2 . . . . .	125
6.15	Caratteristiche generali dello scenario - Euristico completa - parte 1 . . . . .	130
6.16	Caratteristiche generali dello scenario - Euristica completa - parte 2 . . . . .	130
6.17	Caratteristiche principali (Budget) - Euristica completa . . .	131
6.18	Caratteristiche principali (Siti Candidati) - Euristica completa	132
6.19	Caratteristiche principali (Test point) - Euristica completa .	134
6.20	Caratteristiche principali (Inquinamento elettromagnetico) - Euristica completa . . . . .	135
6.21	Caratteristiche principali (Singola istanza) - Euristica completa	136
6.22	Risultati (Singola istanza) - Euristica completa - parte 1 . .	137
6.23	Risultati (Singola istanza) - Euristica completa - parte 2 . .	138
6.24	Caratteristiche principali - Analisi a 3 passi . . . . .	139
6.25	Risultati della 1° fase (Copertura) - Analisi a 3 passi . . . .	140
6.26	Risultati della 2° fase (Fairness) - Analisi a 3 passi . . . . .	141
6.27	Risultati della 3° fase (MIMO) - Analisi a 3 passi . . . . .	142

# Elenco delle figure

1	Crescita del traffico radiomobile [1] . . . . .	1
1.1	Architettura flat . . . . .	10
1.2	Architettura di rete EPS . . . . .	11
1.3	Categorie dei terminali LTE [2] . . . . .	12
1.4	Interfacce X2 e S1[3] . . . . .	14
1.5	Handover LTE [4] . . . . .	16
1.6	Sovrapposizione di TA List e LAC. . . . .	17
1.7	Esempio di chiamata CSFB in LTE . . . . .	18
1.8	Esempio di chiamata VoLTE in LTE . . . . .	19
1.9	Modulazione OFDM[5] . . . . .	20
1.10	Accesso OFDMA[6] . . . . .	21
1.11	Localized OFDMA[7] . . . . .	22
1.12	Interleaved OFDMA[8] . . . . .	22
1.13	Spatial Multiplexing . . . . .	23
1.14	Space Frequency Coding . . . . .	24
1.15	Resource Grid LTE [9] . . . . .	25
1.16	Scheduler LTE . . . . .	27
2.1	Telefono TACS e Logo di Italia '90 . . . . .	30
2.2	Loghi sistemi 2G e 3G . . . . .	31
2.3	SRB modulare . . . . .	33
2.4	Antenne crosspolari . . . . .	35



2.5	Schema mixed mode . . . . .	36
2.6	Impianto a traliccio trisetoriale . . . . .	37
2.7	Sistemi di camuffamento delle SRB . . . . .	38
2.8	Limiti emissioni EM italiani ed europei . . . . .	39
2.9	Mappa catastale degli impianti e punti sensibili dell'area urbana di Milano (ARPA Lombardia)[17] . . . . .	41
2.10	Volume di rispetto . . . . .	43
2.11	Andamento del traffico 2G e 3G negli ultimi anni . . . . .	45
3.1	Propagazione sul piano laterale . . . . .	50
3.2	Propagazione Over Roof Top . . . . .	51
3.3	Punto di prevalenza . . . . .	52
3.4	Diagramma di flusso di un generico metodo euristico per la pianificazione radio . . . . .	59
5.1	Tempi di elaborazione di modello ed euristica su 10 istanze . . . . .	86
5.2	Macro diagramma di flusso del metodo euristico . . . . .	87
5.3	Macro diagramma di flusso dell'algoritmo di Copertura . . . . .	88
5.4	Esplosione del blocco "Verifica configurazioni attivabili" . . . . .	91
5.5	Esplosione del blocco "Routine per il calcolo ottimizzato delle associazioni" . . . . .	94
5.6	Diagramma di flusso della routine di scheduler . . . . .	96
5.7	Macro diagramma di flusso dell'algoritmo di Fairness . . . . .	99
6.1	Diagramma di flusso della generazione dell'area di copertura . . . . .	107
6.2	Mappa rappresentante cs e test point . . . . .	108
6.3	Diagramma di flusso della generazione dei limiti di inquinamento elettromagnetico . . . . .	111
6.4	Andamento della funzione obiettivo (Budget) - Modello ed euristica semplificata . . . . .	116

6.5	Andamento della funzione obiettivo (Siti candidati) - Modello ed euristica semplificata . . . . .	118
6.6	Andamento della funzione obiettivo (Test point) - Modello ed euristica semplificata . . . . .	120
6.7	Andamento della funzione obiettivo (Inquinamento elettromagnetico) - Modello ed euristica semplificata . . . . .	122
6.8	Mappa dello scenario (Singola istanza) - Modello ed euristica semplificata . . . . .	124
6.9	Andamento della funzione obiettivo (Singola istanza) - Modello ed euristica semplificata . . . . .	126
6.10	Andamento dei siti installati (Singola istanza) - Modello ed euristica semplificata . . . . .	126
6.11	Andamento della spesa sostenuta (Singola istanza) - Modello ed euristica semplificata . . . . .	127
6.12	Andamento dei siti candidati con decrementi di portanti (Singola istanza) - Modello ed euristica semplificata . . . . .	127
6.13	Andamento dei siti candidati con decrementi di potenza (Singola istanza) - Modello ed euristica semplificata . . . . .	128
6.14	Soluzione calcolata con budget illimitato (Singola istanza) . . . . .	129
6.15	Andamento della funzione obiettivo (Budget) - Euristica completa . . . . .	131
6.16	Andamento della funzione obiettivo (Siti Candidati) - Euristica completa . . . . .	133
6.17	Andamento della funzione obiettivo (Test point) - Euristica completa . . . . .	134
6.18	Andamento della funzione obiettivo (Inquinamento elettromagnetico) - Euristica completa . . . . .	135
6.19	Mappa scenario (Singola istanza) - Euristica completa . . . . .	137
6.20	Andamento della funzione obiettivo (Singola istanza) - Euristica completa . . . . .	138

6.21	Andamento dei livelli di inquinamento elettromagnetico (Singola istanza) - Euristiche complete . . . . .	139
6.22	Mappa scenario - Analisi a 3 passi . . . . .	140
6.23	Soluzione 1° fase - Analisi a 3 passi . . . . .	141
6.24	Soluzione 2° fase - Analisi a 3 passi . . . . .	142
6.25	Soluzione 3° fase - Analisi a 3 passi . . . . .	143
6.26	Andamento della funzione obiettivo - Analisi a 3 passi . . . . .	144

# Introduzione

Il numero degli abbonati ai servizi radiomobili è aumentato esponenzialmente negli ultimi anni (figura 1); in molti paesi la quantità di sottoscrizioni ha ormai nettamente superato il numero degli abitanti. Tale crescita del traffico radiomobile è solo in piccola parte imputabile ad una ulteriore diffusione del servizio voce, infatti è la crescita del traffico dati a trainare la domanda di capacità; di fatto nel 2011 il volume di traffico dati nelle reti radiomobili sorpassa quello di traffico voce. L'aumento del volume di traffico dati sulle reti radiomobili è dovuto alla rapida evoluzione dei servizi basati su contenuti multimediali come streaming audio e video ad alta risoluzione ma anche gaming online, che ora vengono resi fruibili anche in mobilità.



Figura 1: Crescita del traffico radiomobile [1]

Il traffico non è semplicemente aumentato, ma si è ribilanciato tra le tratte uplink e downlink; questo è dipeso dalla metamorfosi dell'ecosistema radiomobile che ora è device-centrico dove i produttori di hardware e gli "Over-The-Top" propongono una user-experience basata sulla condivisione di contenuti (ad esempio le social application). L'utente quindi non è più solo fruitore dei contenuti distribuiti dai vari provider, ma diventa a sua volta produttore di contenuti richiedendo conseguentemente una banda maggiormente simmetrica.

È compito degli operatori dunque, far fronte alla richiesta di maggiore capacità mantenendo comunque contenuti i costi di installazione e gestione, in particolare per i mercati in crisi. L'insieme di questi fattori ha spinto l'evoluzione del sistema di comunicazione wireless 3GPP - LTE (3rd Generation Partnership Project - Long Term Evolution) ad essere progettato per soddisfare tali richieste. Il principale obiettivo dello standard LTE (Release 8) è quello di fornire un accesso radio con elevati data rate e bassi tempi di latenza. Dall'introduzione sul mercato dell'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) nel 2001 sono state proposte diverse tecnologie, come ad esempio Mobile WiMax (Worldwide interoperability for Microwave Access), che però ha avuto un impiego limitato in Europa. Solo alcuni operatori in America e Asia hanno deciso di adottare in maniera consistente questa tecnologia. Lo standard LTE invece rappresenta una soluzione convincente per gli operatori che attualmente offrono i loro servizi mediante tecnologia GSM (Global System for Mobile Communications) e UMTS/HSPA (High Speed Packet Access), perchè permette di riutilizzare consistenti porzioni dell'infrastruttura di rete già esistente. Il vantaggio strategico di LTE risiede appunto nella possibilità di poter essere implementata seguendo una logica di upgrade incrementale della rete (lavorando parzialmente su bande già utilizzate è possibile riutilizzare antenne, cavi etc.), dando così agli operatori la possibilità di fornire servizi ad elevato data rate in tempi rapidi e investimenti relativamente contenuti.

Nell'ambito delle reti radiomobili l'introduzione di una nuova tecnologia, non sostituisce completamente quelle esistenti ma le affianca per un lungo periodo di tempo, in quanto occorre garantire il servizio ad una certa percentuale dei terminali in circolazione (decisa in accordo tra gli operatori e il garante delle comunicazioni di un paese); basti pensare che il sistema TACS (Total Acces Communication System) è stato cessato in Italia solo il 31 dicembre 2005 e che ad oggi la maggior parte del traffico voce viene trasportato ancora sulla rete 2G. La necessità sopracitata di sovrapporre i diversi layer pone però un problema di carattere ambientale. I sistemi radiomobili sono basati sulla propagazione di onde elettromagnetiche, e generano quindi inquinamento elettromagnetico; nasce dunque l'esigenza di valutare quanto l'implementazione del sistema LTE impatti sui livelli di tale inquinamento e quanto il rispetto dei vincoli imposti dalla legge ne possa limitare l'espansione. Inoltre, la condivisione di risorse radio tra LTE e le reti legacy può portare alla necessità di dover penalizzare i sistemi 2G e 3G, cercando però di mantenere dei livelli di performance accettabili.

L'obiettivo di questo lavoro è il progetto di algoritmi di pianificazione per reti radiomobili LTE tenendo in considerazione l'esistenza delle reti legacy 2G e 3G, dei relativi vantaggi e limiti derivanti da queste e valutando l'impatto ambientale delle nuove installazioni. Gli algoritmi di pianificazione proposti in questa tesi mirano a pianificare la rete di accesso LTE in un'ottica di massimizzazione delle prestazioni ottenibili avendo a disposizione un budget prestabilito, riutilizzando le infrastrutture di rete preesistenti e rispettando i vincoli sull'inquinamento elettromagnetico. Questo tipo di approccio permette di ottenere delle valutazioni più realistiche rispetto alla pianificazione su scenari ideali, inoltre, a differenza del classico approccio di pianificazione a costo minimo, rende possibile la valutazione di diversi piani di sviluppo per un operatore radiomobile, mettendo in relazione il budget con le massime prestazioni raggiungibili valutate in termini di user experience. Questo lavoro si propone di mettere le basi per introdurre in letteratura due

aspetti chiave della pianificazione radiomobile, quali il riuso delle infrastrutture esistenti e l'analisi dell'impatto ambientale, con quest'ultimo destinato a diventare di fondamentale importanza nei prossimi anni. Gli approcci proposti consentono, in base alla distribuzione degli utenti nell'area geografica considerata, alla topologia e alle configurazioni delle reti legacy, al budget e ai livelli di inquinamento elettromagnetico, di stabilire su quali BS (Base Station) attivare il sistema LTE e con quale configurazione in termini di banda, potenza e tecnica di trasmissione, al fine di fornire a ciascun utente il miglior profilo di traffico possibile, ottimizzando la gestione dell'allocazione di risorse radio, e tenendo conto dei vincoli di SINR (Signal Interference Noise Ratio). Il punto di partenza è rappresentato da un modello di programmazione matematica intera in cui vengono formalizzati tutti i vincoli del problema. L'elevata complessità computazionale del modello proposto non rende possibile la valutazione di istanze di elevate dimensioni, il passo successivo dunque è quello di introdurre un algoritmo di tipo euristico, in grado di fornire una soluzione sub-ottima al problema presentato, con un costo computazionale inferiore. L'algoritmo euristico introdotto viene poi validato attraverso un set di analisi effettuate sulle medesime istanze sulle quali è risolto il modello e confrontandone i risultati. La complessità del modello impone l'approssimazione di alcuni aspetti del problema; in particolare vengono effettuate delle semplificazioni sulla modalità di allocazione delle risorse radio in LTE e sulla valutazione dell'impatto elettromagnetico. La necessità di effettuare tali approssimazioni viene meno considerando solamente l'approccio euristico, viene quindi infine elaborata una versione modificata dell'euristica nella quale viene rappresentata più fedelmente l'interfaccia radio LTE e l'inquinamento elettromagnetico viene valutato attraverso l'introduzione dei punti sensibili, intesi come punti geolocalizzati nelle vicinanze della stazione radio base nelle quali viene stimato il livello di impatto elettromagnetico. Questo ultimo algoritmo permette di analizzare scenari di cardinalità decisamente maggiore rispetto a quelli del modello.

## Piano della tesi

La tesi è suddivisa nei seguenti capitoli:

- Capitolo 1: Viene descritta la tecnologia LTE, presentandone l'architettura di rete, le tecnologie abilitanti e l'interfaccia radio. Viene posta particolare attenzione sul livello fisico evidenziando le principali novità rispetto alle tecnologie precedenti;
- Capitolo 2: Dopo una breve introduzione sull'evoluzione delle reti radiomobili sul territorio nazionale, viene introdotto il concetto di upgrade incrementale delle reti, valutando le procedure di riutilizzo di hardware e infrastrutture. Viene poi affrontato il tema dell'impatto ambientale e dell'inquinamento elettromagnetico prodotto dagli impianti di radio-comunicazione, presentando le normative vigenti e le relative metodologie di analisi e controllo;
- Capitolo 3: Dopo una descrizione dei modelli di propagazione e pianificazione radio, viene effettuata un'analisi della letteratura relativa alla pianificazione della rete di accesso radio LTE;
- Capitolo 4: Comprende la caratterizzazione dello scenario analizzato e la presentazione del modello di programmazione lineare intera;
- Capitolo 5: Vengono presentate schematicamente le due versioni dell'algoritmo euristico;
- Capitolo 6: Vengono illustrati e commentati i risultati delle analisi effettuate con gli approcci presentati nei precedenti capitoli.

Infine un capitolo conclusivo presenta le considerazioni finali sul lavoro svolto e ne indica i possibili sviluppi futuri.





# Capitolo 1

## La Tecnologia LTE

### 1.1 Standard e tecnologie abilitanti

Il lavoro del 3rd Generation Partnership Project (3GPP) per la definizione dello standard Long Term Evolution (LTE) ha inizio nel 2004 in Canada durante un WorkShop, anche se l'inizio del processo di standardizzazione è stato ufficializzato soltanto due anni più tardi. I fattori determinanti per la nascita di LTE sono identificabili nella necessità di abilitare servizi che possano essere fruiti in maniera ubiqua dall'utente, quindi le prestazioni delle reti radiomobili devono essere paragonabili a quelle delle reti cablate; inoltre con la diffusione delle applicazioni di tipo "social" è necessaria una banda maggiormente simmetrica in quanto l'utente, oltre che client, diventa anche provider di contenuti (è sufficiente pensare alla quantità di dati trasmessi per l'uplink di un video su youtube). Alle necessità prestazionali vanno affiancate anche le esigenze di ridimensionamento dei costi di sviluppo e gestione della rete, nonché della riduzione della frammentazione generatasi con le precedenti tecnologie. Nel Dicembre 2008 viene pubblicata la specifica per la Release 8 che identifica i seguenti requisiti per LTE:

- Data rate di picco

- 100 Mbit/s Down Link (DL) e 50 Mbit/s Up Link (UL) in 20 MHz di banda.
- Efficienza spettrale [bits/sec/Hz]
  - DL: target di 3÷4 volte superiore a Rel-6 High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) in condizioni di rete carica;
  - UL: target di 2÷3 volte superiore a Rel-6 High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) in condizioni di rete carica.
- Mobilità
  - Ottimizzata per basse velocità (0÷15 km/h);
  - Supportata con elevate prestazioni per alta velocità (15÷120 km/h);
  - Supportata anche per velocità superiori (120÷350/500 km/h a seconda della banda di frequenza).
- Copertura
  - Precedenti requisiti garantiti per celle fino a 5 km, degradazioni in throughput ed efficienza spettrale possibili per celle fino a 30 km. Celle fino 100 km non dovrebbero essere precluse (a 800 MHz).
- Capacità;
  - Almeno 200 utenti per cella supportati in active state (allocazioni di banda fino a 5 MHz) e almeno 400 utenti per allocazioni di banda superiori.
- Latenza
  - User plane: < 5 ms (singolo utente con singolo stream dati e per pacchetti IP piccoli);

- Control plane: tempo di transizione < 100 ms (camped state → active state).
- Scalabilità dello spettro
  - Supporto di differenti allocazioni di spettro (1.4÷20 MHz);
  - Supporto modalità di multiplexing Frequency Division Duplexing (FDD) e Time Division Duplexing (TDD).
- Architettura
  - Commutazione di pacchetto, ma garantendo classi di traffico voce, real time ed elevata Quality of Service (QoS) end-to-end.
- Interlavoro
  - Garantito con sistemi 3GPP esistenti, ma anche con sistemi non-3GPP.

Nello standard vengono anche indicate le tecnologie abilitanti per LTE:

- Accesso multiplo Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) per il DL e Single-Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) per l'UP;
- Supporto di trasmissioni secondo le tecniche di tipo Multiple Input Multiple Output (MIMO);
- Supporto di modulazione Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), 16 Quadrature Amplitude Modulation (16 QAM) e 64 QAM;
- Scheduling multi-portante adattativo al canale.

## 1.2 Architettura di rete LTE

### 1.2.1 Architettura EPS, SAE e LTE

La Release 8 è spesso chiamata Evolved Packet System (EPS); l'architettura di rete, totalmente riprogettata e semplificata rispetto alle precedenti release, diventa completamente IP. Si delinea quindi una rete “piatta” come schematizzato in figura 1.1, con un modello di servizio di tipo “Always on”, ovvero ogni terminale attestato su rete EPS sarà connesso ad almeno una connessione di tipo Packet Data Network (PDN) e quindi avrà sempre almeno un indirizzo IP assegnato. EPS nello standard 3GPP si compone di:

- Service Architecture Evolution (SAE);
- Long Term Evolution (LTE).

SAE ed LTE sono denominati rispettivamente come:

- Evolved Packet Core (EPC);
- Evolved Universal Terrestrial Radio Access network (eUTRAN).

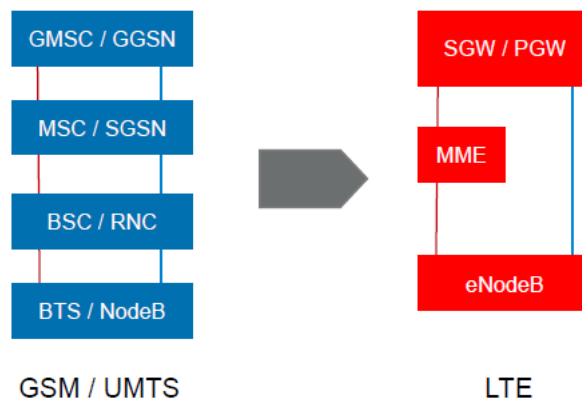


Figura 1.1: Architettura flat

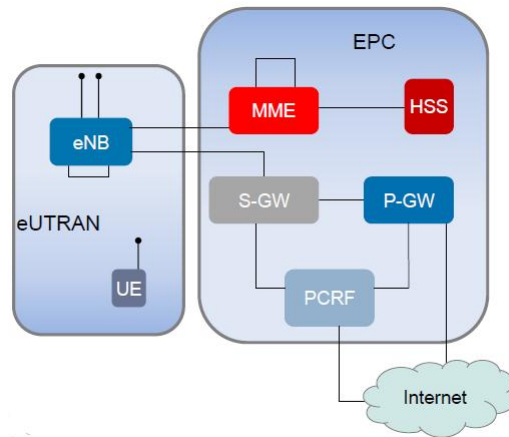


Figura 1.2: Architettura di rete EPS

## 1.2.2 Elementi della rete EPS

In figura 1.2 sono illustrati i principali componenti della rete EPS.

### UE (User Equipment)

È il terminale utente che generalmente contiene la SIM Card può essere uno smartphone, un tablet, un dongle, un pc, etc... L'UE gestisce le seguenti attività verso la rete principale:

- Gestione della mobilità;
- Chiamata di controllo;
- Gestione della sessione;
- Gestione delle identità.

Gli UE sono suddivisi in cinque categorie, come mostrato in figura 1.3, che si diversificano per le diverse prestazioni massime raggiungibili come throughput uplink e downlink (dipende dalle modalità di tx/rx supportate).

	UE category				
	1	2	3	4	5
Maximum downlink data rate (Mbps)	10	50	100	150	300
Maximum uplink data rate (Mbps)	5	25	50	50	75
Number of receive antennas required	2	2	2	2	4
Number of downlink MIMO streams supported	1	2	2	2	4
Support for 64QAM modulation in downlink	✓	✓	✓	✓	✓
Support for 64QAM modulation in uplink	✗	✗	✗	✗	✓
Relative memory requirement for physical layer processing (normalized to category 1 level)	1	4.9	4.9	7.3	14.6

Figura 1.3: Categorie dei terminali LTE [2]

## eNodeB

È la stazione base dell'eUTRAN, in termini funzionali è la combinazione del NodeB e del Radio Network Controller (RNC) nella tecnologia HSPA. Gestisce autonomamente l'allocazione delle risorse radio e le procedure di handover verso gli eNodeB adiacenti.

## MME (Mobility Management Entity)

È il nodo di controllo principale della Core Network ed è responsabile dell'autenticazione dello UE; inoltre svolge le funzioni di:

- Autenticazione e sicurezza;
- Mobility management intra-LTE;
- User profile management e service connectivity;
- Gestione della mobilità negli stati di idle e active;
- Gestione dei bearers EPS;

- Procedure di Attach e di Session Management.

### **P-GW (PDN-GW: Packet Data Network Gateway)**

Gestisce gli indirizzi IP per gli UE e interconnette i sistemi a pacchetto non 3GPP, inoltre si occupa di:

- Allocazione degli indirizzi IP dello UE;
- Service Data Flow (SDF) Control;
- DL rate enforcement (policing/shaping);
- Per-user packet filtering;
- Marking dei pacchetti a livello trasporto in UL/DL;
- Intercettazione legale.

### **S-GW (Serving-Gateway)**

Effettua il routing e l'instradamento dei pacchetti utente agendo anche come nodo di ancoraggio per le procedure di handover tra LTE e altri sistemi 3GPP, si occupa inoltre del buffering dei pacchetti uplink in idle mode.

### **PCRF (Policy and Charging Rules Function)**

È il nodo responsabile del controllo delle QoS; gestisce l'assegnazione dei flussi dati alle diverse classi rispettando gli Service Level Agreement (SLA) e si occupa delle operazioni di charging.



## HSS - Home Subscriber Server

Le sue funzionalità sono essenzialmente quelle dell'HLR (Home Location Register) nelle reti UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network). Si tratta di un database contenente tutte le informazioni utili per gestire un utente mobile.

In particolare contiene la corrispondenza tra le identità temporanee assegnate all'UE e l'identità dell'utente stesso, il profilo di QoS sottoscritto, le reti PDN a cui si può connettere e l'identità dell'MME presso cui è registrato. L'HSS include anche l'Authentication Center (AuC) che si occupa di generare le chiavi per la cifratura dei dati e per la mutua autenticazione dell'utente e della rete.

### 1.2.3 Interfacce della rete EPS

Gli eNodeB sono connessi tra di loro attraverso un'interfaccia chiamata X2; lo stesso eNodeB può essere connesso a più MME/S-GW attraverso un'interfaccia denominata S1.

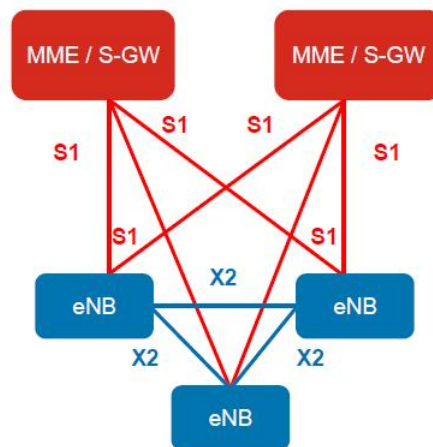


Figura 1.4: Interfacce X2 e S1[3]

Come mostrato in figura 1.4, l'interfaccia S1 connette l'eNodeB alla rete EPC attraverso una connessione all-IP che comprende control plane e user plane.

L'interfaccia X2 interconnette gli eNodeB in adiacenza tra loro realizzando un'architettura mesh; tale interfaccia riveste un ruolo fondamentale durante le procedure di handover in quanto indirizza il traffico DL verso l'UE sul nuovo eNodeB fino a quando il nuovo collegamento non viene stabilito.

### 1.2.4 Procedure di handover nella rete EPS

In LTE-EPS esistono due diversi tipi di Handover:

**Intra-Poll Handover** Quando un terminale si sposta tra due eNodeB (serving e target) all'interno della stessa Tracking Area<sup>1</sup>, ovvero gestiti dallo stesso MME, l'handover avviene direttamente tra i due eNodeB attraverso l'interfaccia X2;

**S1-Handover** Si verifica quando un terminale cambia Tracking Area, in questo caso vengono coinvolti nel processo gli MME e gli SGW di competenza attraverso l'interfaccia S1.

In figura 1.5 viene schematizzata la differenza tra le due differenti modalità di handover in LTE; è chiaro come la possibilità di effettuare handover in modalità mesh all'interno di una Tracking Area attraverso l'interfaccia X2 diminuisca sensibilmente il tempo di latenza.

---

<sup>1</sup>Cluster di celle gestito da un MME all'interno del quale viene identificato il terminale LTE nella rete in idle mode.

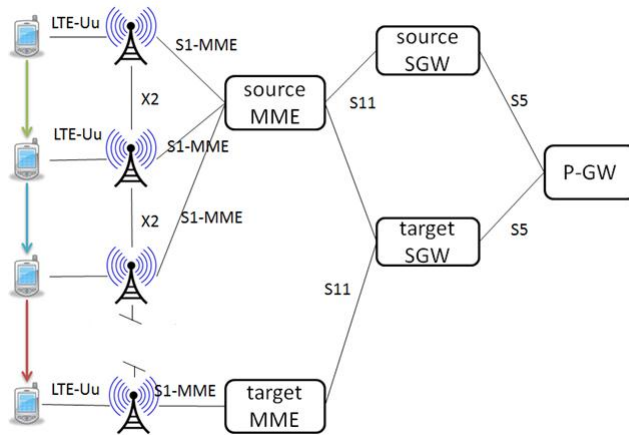


Figura 1.5: Handover LTE [4]

### 1.2.5 CSFB e VoLTE

LTE è una rete full-IP, pertanto non è previsto alcun servizio a circuito per le chiamate voce. Per mantenere la possibilità di effettuare chiamate voce gli operatori possono decidere se implementare un servizio voce a pacchetto oppure implementare procedure di Handover forzato sulle reti 2G-3G in caso di chiamata voce.

Circuit Switch Fall-Back (CSFB) è la tecnologia che, per il servizio voce, abilita la rete a “forzare lo spostamento” dei clienti dalla rete LTE verso la tradizionale rete a commutazione di circuito 2G/3G, questa tecnologia è immediatamente implementabile in rete ma impone dei vincoli di pianificazione delle coperture, infatti oltre ovviamente a dover garantire la copertura degli altri layer nella zona coperta dalla cella LTE, per il corretto funzionamento della procedura è necessario che ci sia una sovrapposizione delle Tracking Area List (TA List) di LTE e/o le Location Area<sup>2</sup> Code (LAC) per i sistemi

<sup>2</sup>Cluster di celle gestito da un BSC (Base Station Controller) all'interno del quale viene identificato il terminale GSM nella rete in idle mode.

2G (o Routing Area<sup>3</sup> per i sistemi 3G), come mostrato in figura 1.6

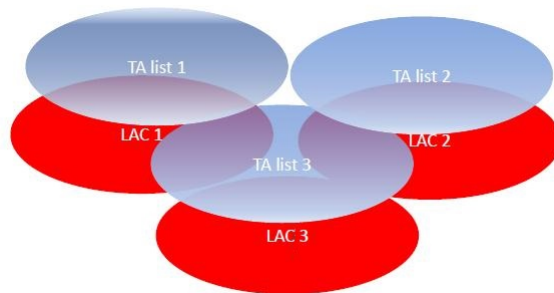


Figura 1.6: Sovrapposizione di TA List e LAC.

In figura 1.7 è illustrata una chiamata CSFB; nello schema viene messa in evidenza la necessità replicare diversi processi e informazioni, come ad esempio la duplice registrazione dell'UE nel VLR e nell'MME. La quantità di entità coinvolte può portare il chiamante ad attendere diversi secondi prima di sentire il tono di chiamata.

---

<sup>3</sup>Cluster di celle gestito da un RNC (Radio Network Controller) all'interno del quale viene identificato il terminale UMTS nella rete in idle mode.

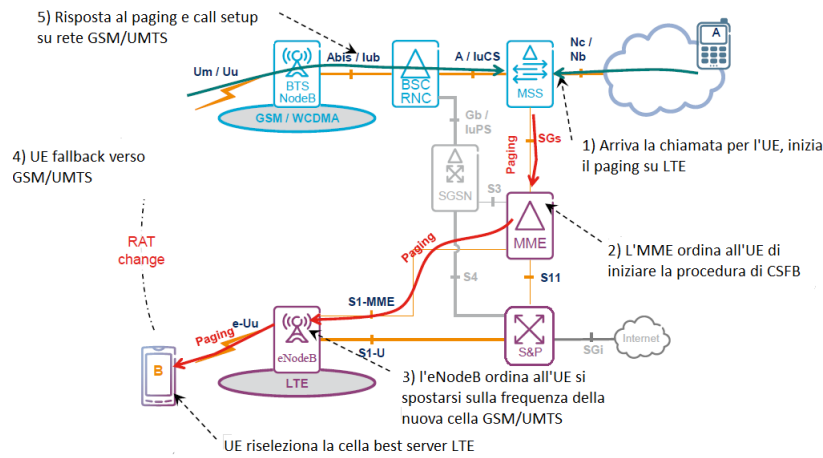


Figura 1.7: Esempio di chiamata CSFB in LTE

VoLTE (Voice over LTE) è la tecnologia che abilita il servizio voce su IMS (IP Multimedia Subsystem) senza alcuno spostamento del terminale verso la tradizionale rete a commutazione di circuito 2G/3G e senza interruzione della sessione dati. L'implementazione richiede nuove piattaforme con funzione di gateway, complesse e onerose da realizzare in tempi rapidi; questa è la ragione per cui ad oggi sono pochissimi gli operatori che sono in grado commercializzare tale servizio. In figura 1.8 è illustrata una chiamata VoLTE; in questo caso il collegamento è totalmente IP, ed è gestito dalla piattaforma IMS.

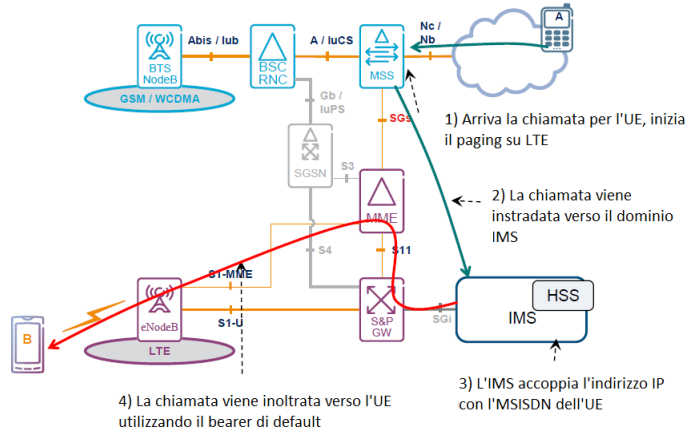


Figura 1.8: Esempio di chiamata VoLTE in LTE

## 1.3 Interfaccia radio LTE

### 1.3.1 Trasmissione OFDM

Le tecniche di accesso utilizzate dal sistema LTE in DL e in UL si basano sull'utilizzo della tecnica di trasmissione OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Nella modulazione OFDM la banda disponibile viene suddivisa in tante sottobande, trasmettendo i dati su flussi paralleli; i dati trasmessi su ciascuna sottobanda vengono poi modulati in base alla qualità del segnale ricevuto.

Le sottobande in cui viene suddivisa l'intera banda sono ortogonali l'una all'altra (figura 1.9); ciò determina, idealmente, un'assenza di interferenza da canale adiacente (ICI). L'ortogonalità tra le sottoportanti è ottenuta facendo coincidere il valore di picco di ogni sottoportante con gli zeri delle altre.

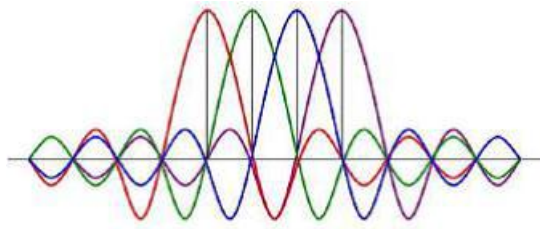


Figura 1.9: Modulazione OFDM[5]

La tecnica OFDM può essere vista come una tecnica FDM ma con maggiore efficienza spettrale; è infatti ammessa una parziale sovrapposizione degli spettri associati alle singole sottoportanti, questo permette di ripartire in maniera più efficiente le risorse tempo-frequenza fra gli utenti.

### 1.3.2 Accesso multiplo DL e UL

In LTE l'accesso multiplo al canale radio viene effettuato in DL e UL rispettivamente con le tecniche OFDMA e SC-FDMA.

OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) è l'applicazione della tecnica OFDM, che consente l'accesso multiplo di più utenti attraverso la trasmissione parallela dei dati sulle diverse sottoportanti. Consiste nell'assegnare a ciascun utente un sottoinsieme delle sottoportanti in cui viene suddivisa la banda disponibile per un determinato insieme di simboli OFDM da trasmettere. In figura 1.10 è riportato un esempio di allocazione di risorse OFDMA con tre utenti.

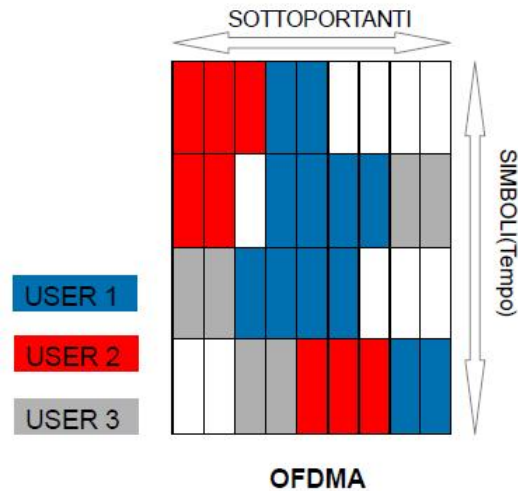


Figura 1.10: Accesso OFDMA[6]

In UL al posto di OFDMA si utilizza la tecnica di accesso multipla SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access).

Come avviene per l'OFDMA, vengono impiegate una serie di sottoportanti ortogonali ma in questo caso vengono trasmesse sequenzialmente e non in parallelo. Questo tipo di soluzione consente di ridurre considerevolmente le fluttuazioni del segnale di involuppo trasmesso, caratteristica che consente di evitare l'impiego, a livello di terminale d'utente, di amplificatori di potenza con elevata linearità e bassa efficienza. Per ogni intervallo di trasmissione lo scheduler della base station assegna un unico blocco di risorse tempo-frequenza ad uno UE per trasmettere dati (rimane garantita l'ortogonalità intra-cella).

Esistono due modalità di trasmissione SC-FDMA:

**Localized SC-FDMA** , in cui le sottoportanti assegnate sono adiacenti (in figura 1.11), è come se venisse assegnata una singola porzione di banda più ampia



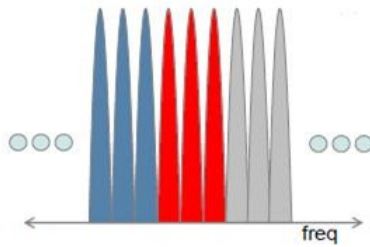


Figura 1.11: Localized OFDMA[7]

**Interleaved SC-FDMA** , in cui le sottoportanti vengono assegnate equispaziate sull'intera banda (in figura 1.12); questa tecnica risulta maggiormente immune rispetto agli errori di trasmissione, in quanto l'informazione viene distribuita sull'intera banda disponibile.

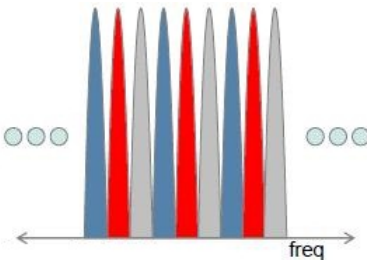


Figura 1.12: Interleaved OFDMA[8]

### 1.3.3 Tecniche di trasmissione MIMO

Uno dei principali abilitatori tecnologici per LTE è il MIMO (Multiple Input Multiple Output).

Le tecniche di antenna MIMO consentono a LTE di raggiungere i bit rate più elevati; tali tecniche risultano più facilmente realizzabili con trasmissioni di tipo OFDM piuttosto che con tecniche W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) in quanto la trasmissione OFDM è più robusta nei confronti

degli effetti del fading multipath. Il MIMO può essere utilizzato in varie modalità:

- Spatial Multiplexing (SM) aumenta il throughput di picco;
- Space Frequency Coding (SFC) aumenta la copertura.

### Spatial Multiplexing

Nella tecnica SM flussi di dati indipendenti e mutuamente ortogonali sono inviati su differenti antenne trasmettenti (l'ortogonalità è ottenuta moltiplicando i flussi attraverso una matrice di precoding lineare). Sostanzialmente la tecnica SM permette di ottenere data rate elevati riutilizzando le stesse risorse radio su dimensioni spaziali multiple, creando cioè canali paralleli separati spazialmente (in figura 1.13). Al ricevitore sono richieste antenne multiple per demodulare i flussi dati sulla base delle relative caratteristiche spaziali: il numero di antenne in ricezione è uguale al numero di flussi di dati che è possibile separare.

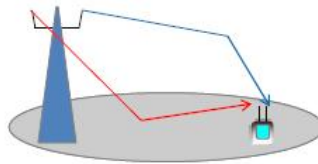


Figura 1.13: Spatial Multiplexing

Le prestazioni dello SM peggiorano sensibilmente se la matrice di canale è mal condizionata<sup>4</sup>: un modo per far fronte al problema è quello di

---

<sup>4</sup>In analisi numerica, una matrice mal condizionata è una matrice quadrata  $\mathcal{A}$  in cui piccole perturbazioni negli elementi  $a_{ij}$ , o piccole variazioni del vettore  $b$ , producono grandi variazioni nelle soluzioni  $x$  del sistema lineare  $A x = b$ .

Un tale sistema è detto mal condizionato. In tal caso i metodi numerici per quanto accurati producono errori più grandi del dovuto.

pre-moltiplicare i flussi di dati da trasmettere per una matrice di precoding, basata sulle informazioni di canale. La tecnica del precoding in trasmissione si basa sulla scelta della miglior matrice di precoding tra un set finito di matrici, denominato codebook, noto sia al trasmettitore che al ricevitore. Il ricevitore sceglie il precoder ottimo dal codebook sulla base delle informazioni di canale stimate (il criterio di selezione è lasciato all'implementazione dell'UE) e il terminale LTE invia un feedback alla stazione radio base una misura delle caratteristiche spaziali del canale:

- Rank Indicator (RI)
- Precoding Matrix Indicator (PMI)

### Space Frequency Coding

La tecnica SFC, con antenne multiple in trasmissione e ricezione, crea percorsi di segnale con fading indipendenti: si realizza diversità in trasmissione fornendo guadagno di diversità per combattere gli effetti indesiderati del multipath (in figura 1.14).

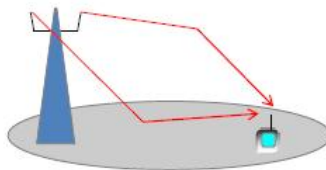


Figura 1.14: Space Frequency Coding

### 1.3.4 Allocazione delle risorse radio

In LTE si utilizzano trame da 10 ms composte da 10 sub-frame da 1 ms, ogni sub-frame è suddiviso in due time slot; quest'ultimo si compone a sua volta di

7 simboli OFDM. L'insieme di 1 time slot e di 12 sottoportanti (15 kHz l'una, in totale 180 kHz) consecutive in frequenza assume il nome di PRB (Physical Resource Block), ed è la minima unità frequenziale. La componente  $i$ -esima nel PRB, formata dalla coppia sottoportante/simbolo OFDM, prende il nome di RE (Resource Element) e porta il contenuto informativo di un simbolo QPSK, 16QAM o 64QAM, ossia 2, 4 o 6 bit. Il Time Trasmission Interval (TTI), pari a 1ms, è l'unità minima su cui si basano le operazioni di scheduling e di reporting. La dimensione di una PRB è la stessa per tutte le larghezze di banda.

La matrice delle risorse tempo-frequenza è detta Resource Grid (in figura 1.15).

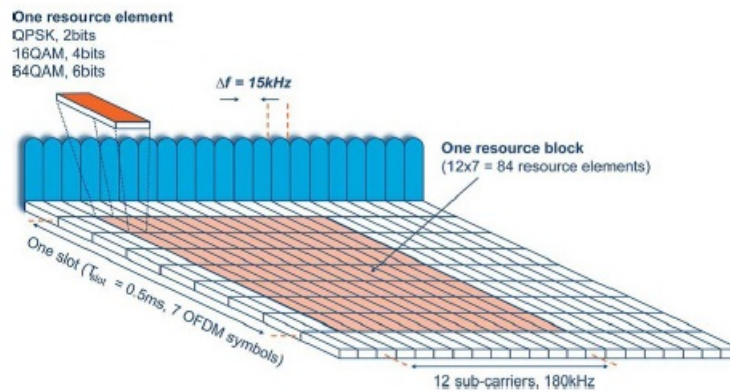


Figura 1.15: Resource Grid LTE [9]

Il terminale LTE invia in feedback alla stazione radio base una misura della qualità del canale: Channel Quality Indicator (CQI). In base al CQI ricevuto la stazione assegna in downlink il formato di modulazione e codifica adatto (MCS, modulation & coding scheme). Il rate trasmissivo dipenderà dalla modulazione adottata quindi dal CQI percepito e dal numero di PRB assegnati all'UE (tabella 4.1).

Tabella 1.1: Indici di modulazione LTE

Indice di modulazione	Modulazione e codice	Efficienza [Kbit/sec/RB]	$SINR_{min}$ [dB]
1	BPSK - 1/2	90	0,14
2	BPSK - 2/3	121	1,15
3	QPSK - 1/2	180	3,14
4	QPSK - 2/3	239	4,15
5	QPSK - 3/4	170	6,55
6	16-QAM - 1/2	360	9,01
7	16-QAM - 2/3	481	10,22
8	16-QAM - 3/4	540	14,01
9	64-QAM - 2/3	720	15,33

La politica di scheduling di LTE non è standardizzata ma è vendor-dependant; questo rende possibile diverse implementazioni con differenti obiettivi come ad esempio:

- Massimizzare il SINR (C/I);
- Fairness nel tempo;
- Massimizzare il throughput totale;
- Proportional fair.

In figura 1.16 sono rappresentati gli effetti di due differenti politiche di scheduling.

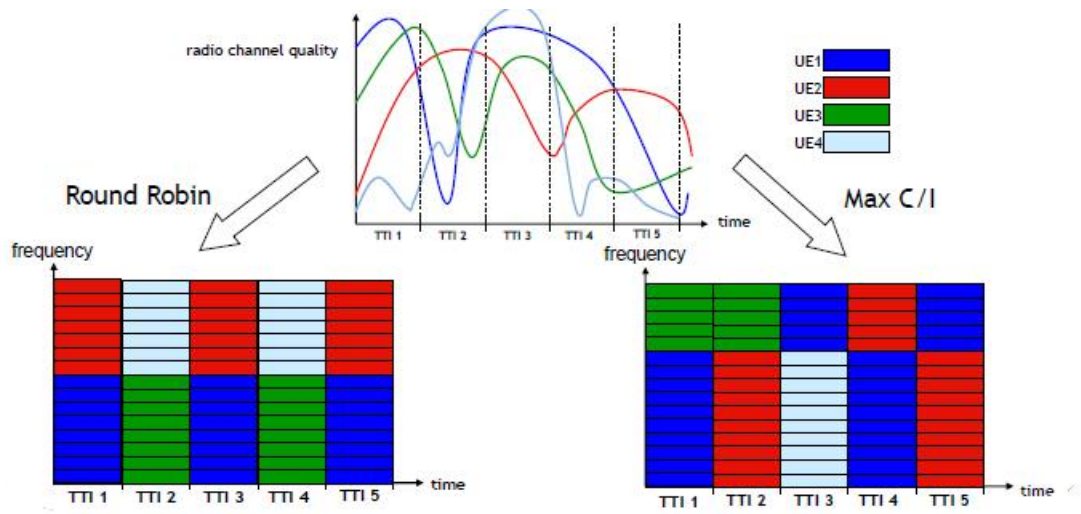


Figura 1.16: Scheduler LTE

## 1.4 Prestazioni Attese

Basandosi sui valori di efficienza spettrale in tabella 4.1 e sulle tecniche sopra descritte è possibile calcolare le seguenti prestazioni teoriche massime per LTE:

Tabella 1.2: Prestazioni attesa dalla rete LTE

Categoria Terminale		1	2	3	4	5
Rate [Mbps]	DL	10	50	100	150	300
	UL	5	25	50	50	75
Banda [MHz]		1.4	3	5	10	20
Modulazione	DL	QPSK, 16QAM, 64QAM				
	UL	QPSK, 16QAM		QPSK, 16QAM, 64QAM		
MIMO 2x1		Prerequisito				
MIMO 2x2		NO	Supportato			
MIMO 4x4		NO		Supportato		

Osservando la tabella 1.2 risulta evidente l'importanza della larghezza di banda allocata per lo sviluppo della tecnologia e l'impatto delle tecnologie MIMO sia nella tratta uplink che downlink. In particolare per interpretare i bit rate in tabella è opportuno fare alcune considerazioni:

- Il MIMO indicato in tabella è da intendersi in modalità SM;
- I valori target sono ottenuti ipotizzando che lo scheduler assegni tutti i PRB ad un unico UE collegato ad un eNodeB;
- Le prestazioni massime ottenibili dipendono dalla categoria dell'UE;
- Modulazioni di alto livello sono possibili solo in condizioni di bassa interferenza, questo è un aspetto particolarmente critico per LTE.

Diventa quindi importante la condivisione delle risorse d'accesso radio e la qualità del canale vista dagli utenti.

# Capitolo 2

## Reti radiomobili multitecnologia

### 2.1 Scenario radiomobile attuale

#### 2.1.1 Evoluzione della rete radiomobile sul territorio nazionale

La rete radiomobile italiana si è sviluppata nel corso degli anni seguendo e in molti casi anticipando le evoluzioni tecnologiche delle comunicazioni mobili. Il primo sistema radiomobile di massa è stato il TACS (Total Access Communication System, in figura 2.1a un telefono che utilizzava questa tecnologia), lanciato in Italia nel 1990 dall'allora SIP in occasione dei mondiali di calcio ospitati nel nostro paese (figura 2.1b).



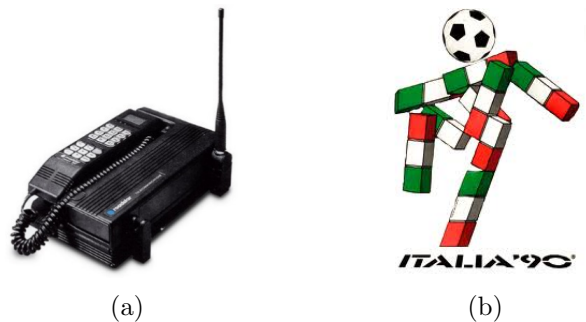


Figura 2.1: Telefono TACS e Logo di Italia '90

Con il GSM (Global System for Mobile Communication, logo in figura 2.2a), primo sistema numerico a standard europeo, noto come seconda generazione (2G), le comunicazioni radiomobili entrano nella loro piena maturità. Le specifiche di base del GSM furono definite nel 1987; il 7 settembre di quell'anno venne inoltre ratificato a Copenaghen un accordo multilaterale tra 13 paesi europei per la diffusione del sistema.

Nel 1989 l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) assunse il controllo del progetto, e ne pubblicò le specifiche complete in un volume di 6.000 pagine. In Italia, in seguito ad un provvedimento dell'8 ottobre 1992 dell'Ispettorato Generale delle Telecomunicazioni, viene autorizzata la SIP all'avvio commerciale del servizio GSM, in via provvisoria e limitatamente ad un'utenza amica. L'anno seguente, in seguito a rimostranze di altre società (e dell'Unione europea stessa), per non aver aperto alla concorrenza i servizi di telefonia radiomobile (sistemi TACS e GSM), verrà emesso un provvedimento che ne dichiarerà l'illegittimità di una gestione esclusiva del servizio, aprendo ad altri gestori.

Il servizio GSM viene commercializzato nel 1995 con la disponibilità del solo servizio voce; ad esso si aggiunge, un anno dopo, il servizio di messaggistica testuale SMS (Short Message Service). La banda a 900 MHz, utilizzata ini-

zialmente, viene ben presto saturata dalla crescita dell'utenza e del traffico, così, nel 1998, inizia l'estensione a 1800 MHz che incrementa la capacità di rete in maniera trasparente all'utente (funzionalità "dual band"). Nel 2001 viene lanciato il servizio a pacchetto GPRS (General Packet Radio Service) che incrementa la velocità di trasmissione dei dati dai 9,6 kbit/s del circuito a circa 60 kbit/s.



(a) GSM



(b) UMTS

Figura 2.2: Loghi sistemi 2G e 3G

L'evoluzione della rete e dei servizi continua con il sistema di terza generazione (3G) UMTS (Universal Mobile Telecommunications System, logo in figura 2.2b), lanciato dagli operatori nelle principali città italiane a partire dal 2003, con velocità di trasmissione di picco di 384 kbit/s. La tecnologia UMTS è stata poi aggiornata nel 2006 con la tecnologia HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) caratterizzata, nella sua prima fase, da velocità di trasmissione di picco in downlink (DL) fino a 3,6 Mbit/s.

L'HSDPA è stato in seguito ulteriormente aggiornato portando la velocità di trasmissione dati in downlink prima a 7,2 Mbit/s nel corso del 2007, e successivamente a 14,4 Mbit/s tra la fine del 2008 e l'inizio 2009. Parallelamente è stata introdotta la modalità HSUPA (High Speed Uplink Packed Access) per la tratta di trasmissione in uplink (UL) che permette velocità fino 5,7 Mbit/s.

Nuove funzionalità previste dallo Standard, note con il nome di HSPA+, permettono connessioni fino a 21 Mbps con modulazioni ad alta cardinalità

e fino a 28 Mbps con tecnica di trasmissione MIMO 2x2<sup>1</sup> (Multiple Input Multiple Output). Ulteriori sviluppi di HSDPA prevedono l'utilizzo congiunto di più portanti (frequenze radio) con l'effetto di moltiplicazione delle prestazioni. È del 2011 il lancio del servizio 42 Mbit/s ("Dual Carrier") ottenuto sfruttando contemporaneamente due portanti.

Il 29 settembre 2011 si è conclusa l'asta italiana per acquisire le frequenze LTE nelle bande a 800, 1800, 2000 e 2600 Mhz; Telecom Italia, Vodafone, Wind e H3G si sono aggiudicati le diverse frequenze per un incasso complessivo di 3.945.295.100 €. Queste, in particolare, le assegnazioni (in blocchi da 5MHz):

- Frequenza 800 MHz: si aggiudicano 2 blocchi a testa Vodafone, Telecom e Wind;
- Frequenza 1800 MHz: si aggiudicano 1 blocco a testa Vodafone, Telecom e H3G;
- Frequenza 2000 MHz: non assegnata;
- Frequenza 2600 MHz: si aggiudicano 4 blocchi H3G, 4 Wind, 3 Telecom e 3 Vodafone.

Risulta facilmente intuibile quindi come il deployment della rete, effettuato in questi anni dagli operatori radiomobili abbia seguito una logica prevalentemente incrementale e di riuso di risorse, infrastrutture e spazio elettromagnetico; per tanto la pianificazione del sistema LTE deve tener conto, non solo degli aspetti prestazionali della nuova tecnologia, ma anche dell'impatto sulle infrastrutture esistenti, dell'interlavoro con gli altri sistemi (che è fondamentale per LTE, dato che inizialmente non è previsto alcun servizio voce), e dell'impatto ambientale ed elettromagnetico degli impianti.

---

<sup>1</sup>È da intendersi come due antenne in ricezione e due antenne in trasmissione.

### 2.1.2 Upgrade incrementale della rete

Quando un operatore radiomobile pianifica il deployment di una nuova release 3GPP verosimilmente non ha ancora raggiunto tutti gli obiettivi di copertura delle release precedenti; ad esempio un operatore che oggi si appresta a lanciare commercialmente LTE, molto probabilmente non ha ancora concluso i piani di sviluppo di HSPA, anzi, per la maggior parte degli operatori non è stato ancora concluso il piano di sviluppo della rete 2G.

Per le ragioni sopra citate è chiaro come i principali vendor di HW e SW per le reti radiomobili propongano soluzioni tecnologiche in grado di supportare più release 3GPP simultaneamente; ad esempio una stazione radiobase può essere realizzata con un unico “cabinet” in grado di ospitare diversi moduli (in figura 2.3), ognuno dei quali monta una diversa release software ed è in grado di supportare una specifica tecnologia; un ragionamento simile ma più complesso può essere effettuato sugli apparati della core network ma questi aspetti esulano dagli obiettivi di questa tesi.



Figura 2.3: SRB modulare

Di maggiore interesse sono gli aspetti che riguardano i sistemi radianti, infatti è importante considerare che per le fasi iniziali del deployment di

LTE non sempre è necessario prevedere l'acquisto e l'installazione di nuove antenne; vanno fatte le seguenti considerazioni:

- Le antenne utilizzate per il sistema GSM a 1800 MHz (DCS) sono generalmente utilizzabili per LTE 1800 MHz;
- Sono disponibili antenne “a banda estesa” ovvero con uno spettro di lavoro più ampio (ad esempio 700 MHz-900 MHz, 1800 MHz-2100 MHz);
- Sono disponibili antenne “multi-band”, ovvero sistemi radianti composti da diversi array di dipoli ognuno dedicato ad una diversa banda di lavoro; queste antenne, pur portando qualche svantaggio dal punto di vista delle caratteristiche radioelettriche (minor guadagno, lobi più irregolari), offrono chiari vantaggi dal punto di vista logistico ed economico;
- Le tecnologie di trasmissione MIMO possono essere realizzate attraverso l'utilizzo di antenne crosspolari (in figura 2.4), in queste antenne il sistema radiante è realizzato attraverso un array di dipoli incrociati a  $\pm 45^\circ$  rispetto all'asse dell'antenna; questa tecnologia permette di trasmettere due segnali in quadratura, sulle due differenti polarizzazioni dell'array, ottenendo così la diversità in trasmissione e ricezione.

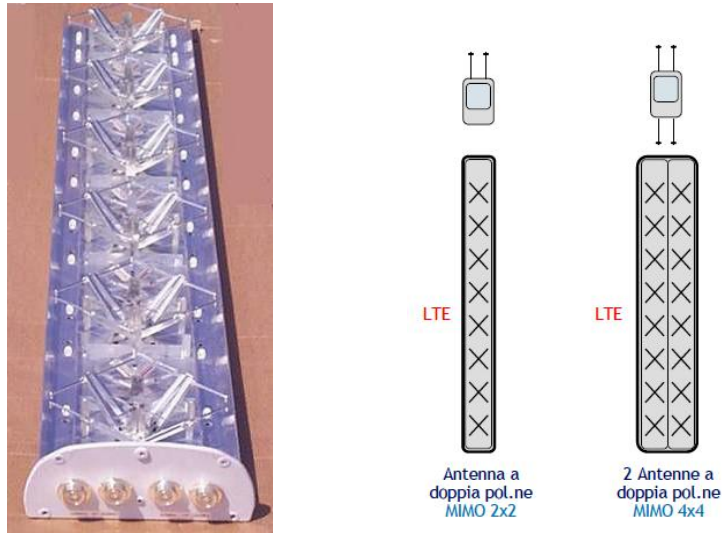


Figura 2.4: Antenne crosspolari

Un altro aspetto chiave è la possibilità di configurare su una singola antenna (su un singolo array) e su un singolo modulo di interfaccia radio (modulatore, coder e preamplificatore) due diversi standard operanti però sulla medesima banda come LTE1800 e GSM1800 oppure GSM900 e UMTS900. In questo modo si aumenta l'efficienza nell'utilizzo delle interfacce radio, si riduce il numero di antenne necessarie e si può trasferire il traffico tra i due standard tramite parametrizzazione; questo tipo di configurazione, illustrata in figura 2.5, è denominata "Mixed Mode". Configurare due standard in Mixed Mode comporta dunque la condivisione di tutta la parte di accesso radio dell'impianto costituita dall'antenna, dalla calata cavi, dal modulo trasmissivo e da eventuali altri componenti come amplificatori e sistemi per il telecontrollo del tiltaggio del radiante, ma anche la condivisione dello spettro e della massima potenza configurabile, imponendo dunque ulteriori vincoli progettuali su banda e potenza.

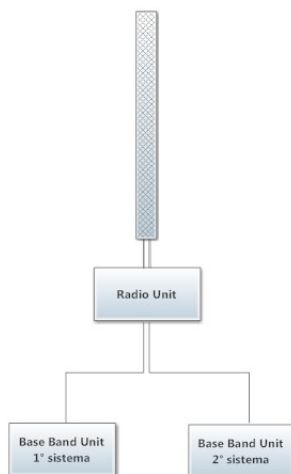


Figura 2.5: Schema mixed mode

Un ultimo aspetto di rilievo nasce dalla considerazione che, nello sviluppo di una nuova rete, è certamente più economico e di rapida implementazione sfruttare quanto più possibile le infrastrutture edili (tralicci, locali tecnici, pali, etc...) già nelle disponibilità di un operatore, anche se questo limita il numero di siti candidati e complica gli aspetti di impatto elettromagnetico come spiegato nel prossimo paragrafo.

## 2.2 Impatto ambientale ed elettromagnetico degli impianti

La realizzazione o la modifica di una stazione radiobase pone sempre la necessità di effettuare delle analisi sull'impatto ambientale ed elettromagnetico dei nuovi impianti; occorre quindi la necessità di conoscere i regolamenti comunitari e locali e disporre di strumenti per la valutazione e la certificazione degli impianti.

### 2.2.1 Deturpazione del paesaggio

L'installazione di una nuova stazione radiobase comporta la realizzazione delle relative strutture di supporto e sostegno dei sistemi radianti, che generalmente debbono trovarsi ad un'altezza dal suolo superiore ai 25 metri (in condizioni standard) per poter avere una copertura radioelettrica efficace; si tratta quindi di realizzare tralicci o paline di acciaio (figura 2.6), che difficilmente si integrano all'interno di un paesaggio naturale o nel centro storico di una città.



Figura 2.6: Impianto a traliccio trisetoriale

Generalmente i comuni o gli enti locali emettono regolamentazioni che impediscono la realizzazione di impianti per le telecomunicazioni all'interno di predefinite aree che vengono quindi definite "soggette a vincolo paesaggistico"; qualora si manifestasse comunque la necessità di portare la copertura radiomobile su una certa porzione di territorio sotto vincolo, sono possibili soluzioni di camuffamento degli impianti, come ad esempio quelle mostrate in figura 2.7, che rappresentano comunque un costo accessorio per l'operatore.





Figura 2.7: Sistemi di camuffamento delle SRB

Al fine di diminuire l’impatto sul paesaggio e per ridurre i costi di installazione e gestione dell’impianto talvolta più operatori possono condividere la stessa struttura di supporto e/o i locali tecnici, operazione nota come site sharing, va detto però che questo approccio generalmente peggiora le condizioni di impatto elettromagnetico in quanto concentra la distribuzione delle emissioni.

### **2.2.2 Stima e valutazione dell’inquinamento elettromagnetico**

Le installazioni di impianti ad alta frequenza (100 kHz - 300 GHz), sono regolate da normativa specifica che comprende le leggi nazionali: “Legge Quadro” n. 36 del 22 febbraio 2001[10]; il D. Lgs n. 259 del 1 agosto 2003 “Codice delle comunicazioni elettroniche” [11] e successive modifiche ed integrazioni; I limiti di esposizione, i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici a frequenze comprese tra 100 KHz e 300 GHz,

sono fissati dal D.P.C.M. dell'8 luglio 2003 G.U. 28 agosto 2003 serie g. n. 199[12]; a queste vanno aggiunte le leggi regionali. A livello comunitario si fa riferimento invece alla raccomandazione (1999/519/CE) del Consiglio del 12 luglio 1999 relativa alla limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz, G.U.UE serie L 199/59 del 30 luglio 1999[13]. Nel nostro Paese il limite di esposizione previsto dal D.P.C.M. 199/2003 per i campi ad alta frequenza è compreso fra 20 V/m e 60 V/m a seconda della frequenza stessa mentre il valore di attenzione e l'obiettivo di qualità sono invece di soli 6 V/m. Nel caso specifico delle onde elettromagnetiche non ionizzanti, emesse appunto da antenne di stazioni radio base, il valore di attenzione è pari a 6 V/m. In figura 2.8 sono riassunti i limiti di esposizione citati.

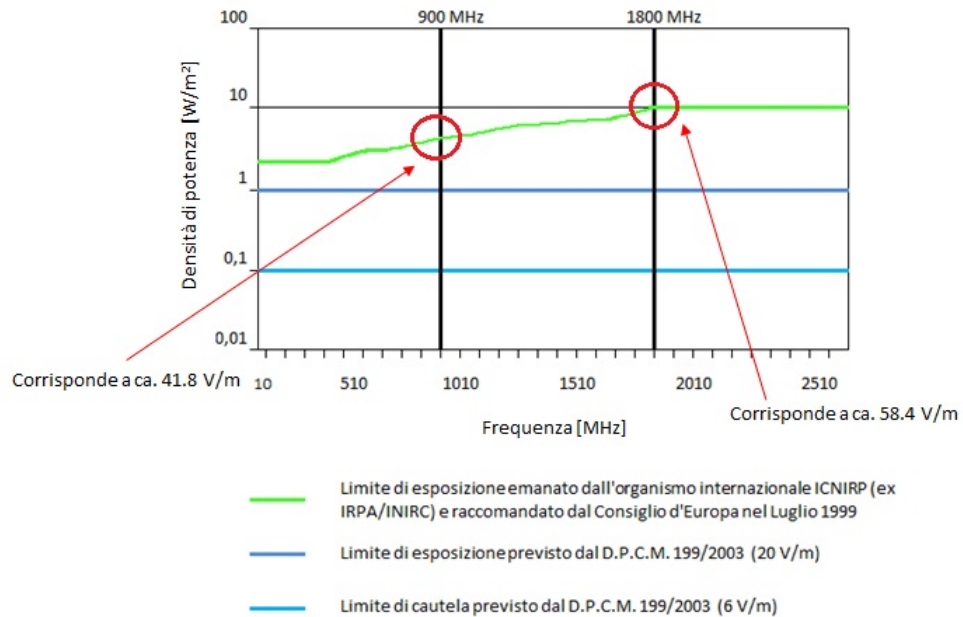


Figura 2.8: Limiti emissioni EM italiani ed europei

Infine è previsto che stazioni radiobase localizzate nelle vicinanze (100

m in Lombardia secondo Art. 4 comma 8 L.R. 11/2001[14]) di asili, edifici scolastici nonché strutture di accoglienza socioassistenziali, ospedali, carceri, oratori, parco giochi, orfanotrofi e strutture similari e relative pertinenze che ospitano soggetti minorenni abbiano una potenza complessiva alla base del sistema radiante inferiore a 300 W. Ad ulteriore garanzia dei cittadini, l’Agenzia Regionale Protezione Ambiente (ARPA) coordina campagne di misura di elettrosmog a campione in diverse località italiane o su richiesta delle autorità locali o della popolazione. L’ARPA è anche responsabile della autorizzazione riguardo l’installazione e la modifica degli impianti Radio-TV-Cellulari in coerenza con gli attuali standard di campo elettromagnetico previsto.

Si pone quindi, in fase di progettazione, il problema di valutare a priori l’impatto di inquinamento elettromagnetico che avrà l’impianto una volta attivato; a tal fine il progettista individua un insieme di punti di misura detti “punti sensibili” che la normativa definisce come “punti appartenenti a zone poste in un raggio di 200 m dall’impianto normalmente abitate e/o alle quali la popolazione può accedervi liberamente” (rimangono escluse le zone accessibili solo da personale tecnico), questi punti sono particolarmente indicativi poiché rappresentano sia i luoghi maggiormente interessati dai lobi di radiazione dell’antenna, sia luoghi di particolare interesse sociale. In tali punti dovrà essere rispettato il valore limite di 6 V/m e si presume che nel resto dello spazio i valori di campo siano inferiori. Nei punti sensibili dunque viene effettuata una misura del fondo elettromagnetico attraverso uno strumento certificato (Norma CEI 2011-7[15]), posto per un certo intervallo di tempo (dipende dalla normativa regionale) ad altezza uomo (1,5 m). Al valore così ottenuto viene sommato il contributo teorico calcolato massimo (Norma CEI 2011-10[16]) dovuto all’esercizio del nuovo impianto; se il valore ottenuto risulta superiore a 6 V/m occorre rivedere la progettazione. Di fatto è possibile agire sui livelli di V/m dei punti sensibili variando tilt, orientamenti delle antenne e potenze in gioco, generalmente a scapito delle

performance. In figura 2.9 viene riportata la mappa catastale degli impianti e dei punti sensibili della città di Milano.

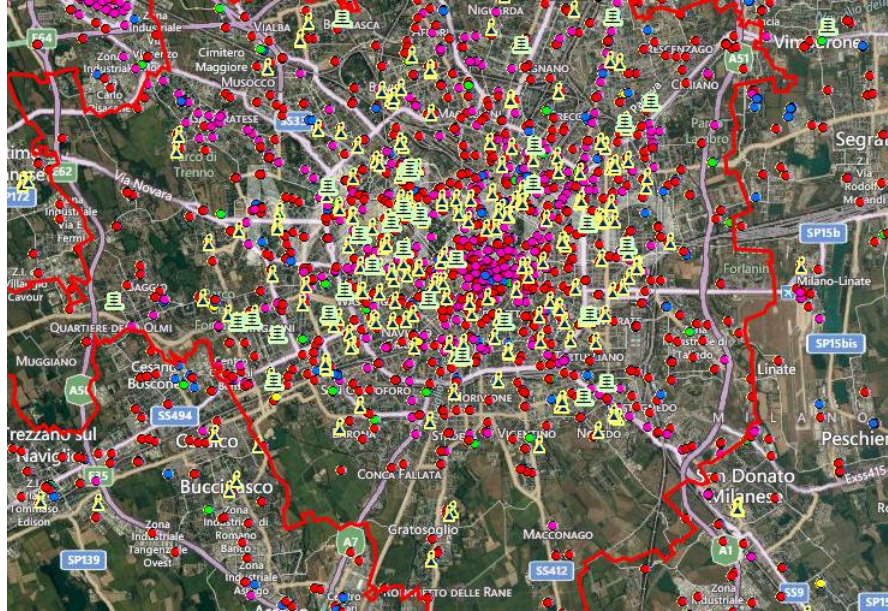


Figura 2.9: Mappa catastale degli impianti e punti sensibili dell'area urbana di Milano (ARPA Lombardia)[17]

In generale la valutazione teorica del campo elettrico irradiato da una sorgente elettromagnetica è un problema complesso che è risolvibile in modo esatto solamente ricorrendo a tecniche numeriche. In sostanza, la distribuzione di campo elettromagnetico irradiato da una sorgente è formalmente descrivibile attraverso un'espressione integrale, soluzione delle equazioni di Maxwell, in generale risolvibile numericamente. È possibile in certe condizioni utilizzare un metodo di calcolo semplificato del campo elettromagnetico in un punto generico dello spazio. Qualora ci si trovi in condizioni di spazio libero e di campo lontano, gli unici parametri da considerare per la determinazione dei livelli di campo elettromagnetico irradiati da un'antenna sono la potenza totale trasmessa  $P$ , le caratteristiche dell'antenna  $G$  ovvero il guadagno nella direzione che congiunge il punto in analisi con l'antenna e

la distanza del punto di osservazione dall'antenna  $r$ . In queste condizioni, l'intensità del campo elettrico vale:

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot G}}{r} \quad (2.1)$$

Dovendo effettuare valutazioni puntuali di campo elettromagnetico in prossimità di edifici nelle vicinanze di una Stazione Radio Base (SRB), le condizioni di spazio libero non sono generalmente verificate. Tuttavia, se l'obiettivo è quello di effettuare valutazioni di campo mediate su altezze dell'ordine del metro e considerate le frequenze di lavoro per le SRB per sistemi radio mobili cellulari ( $f > 870$  MHz), i valori di campo calcolati in condizione di spazio libero sono cautelativi e nella maggior parte delle situazioni significativi ai fini della procedura di conformità ai limiti di esposizione vigenti. Dopo aver eseguito il calcolo del campo elettrico proveniente da tutte le sorgenti (ad esempio  $M$ ) a cui è esposto un determinato punto, è possibile valutare il campo elettrico complessivo:

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^M E_i^2} \quad (2.2)$$

Nei casi particolari, quali valutazione puntuale del campo elettromagnetico presso superfici riflettenti, valutazione del campo all'interno di edifici e mappatura dei livelli di esposizione medi nelle vicinanze di una SRB, risulta necessario effettuare valutazioni di campo con tecniche più complesse che considerino i contributi di riflessione, rifrazione e diffrazione. Un altro metodo efficace per stabilire la conformità di un impianto è la visualizzazione del volume di rispetto, definito come il volume, determinato con metodi numerici, all'interno del quale il campo elettromagnetico potrebbe risultare superiore ai limiti di esposizione. Il volume di rispetto definisce la regione di spazio intorno all'antenna all'esterno della quale il campo elettromagnetico risulta certamente inferiore al valore prescritto dal limite della normativa

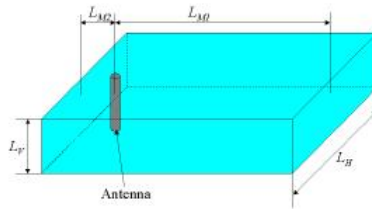


Figura 2.10: Volume di rispetto

vigente. Se il volume di rispetto, determinato per il valore limite di riferimento, non tocca abitazioni o luoghi in cui la popolazione potrebbe essere esposta significativamente dai campi EM prodotti, l'impianto è conforme ai limiti di esposizione. Formalmente, il volume di rispetto è definito da una iso-superficie a campo costante ottenibile con i valori limite di densità di potenza o di campo elettrico o di campo magnetico. Tale approccio definisce univocamente il volume di rispetto dell'antenna, tuttavia allo scopo di semplificarne la rappresentazione grafica tridimensionale è possibile utilizzare superfici geometricamente più semplici che massimizzano il volume di rispetto dell'antenna. Tali geometrie vengono solitamente rappresentate da prismi a sezione rettangolare (figura 2.10) o ellittica; nel caso di antenne omnidirezionali la sezione diventa quadrata o circolare.

Le valutazioni così ottenute vengono riportate in un documento denominato "Analisi di impatto elettromagnetico" che deve essere consegnato alla relativa ARPA regionale che generalmente dispone di un catasto dei punti sensibili dove archivia, una volta verificati, i risultati contenuti nella relazione; l'ARPA è tenuta a esprimere un parere, vincolante, sulle stime presentate. Qualora i valori dichiarati dagli operatori non vengano confermati durante una campagna di misure da parte dell'ARPA, questa possono sanzionare l'operatore e chiedere l'adeguamento degli impianti.

### 2.2.3 Progettazione congiunta

Per le ragioni indicate nei paragrafi precedenti e per agevolare l'implementazione del CSFB risulta chiaro che per il deployment iniziale della rete LTE gli operatori cerchino di utilizzare le infrastrutture che ospitano già gli impianti delle reti 2G e/o 3G; questo comporta una riprogettazione complessiva del sito: bisognerà infatti ripensare all'utilizzo e alla disposizione delle antenne, alla eventuale redistribuzione della potenza tra i sistemi nel caso ci siano limiti dovuti alle emissioni EM e alla eventuale migrazione dei sistemi 2G-3G verso i nuovi apparati HW. Talvolta, soprattutto nei centri urbani per garantire i requisiti prestazionali di LTE, potrebbe essere necessario ridimensionare a ribasso, in potenza o in numero di portanti (frequenza), i sistemi 2G o 3G, per liberare risorse per LTE, cercando comunque di non intaccarne i target prestazionali; a tal proposito risulta opportuno fare alcune considerazioni:

- Parte del traffico sulla rete 2G è migrato negli ultimi anni sulla rete 3G grazie alla diffusione dei terminali di nuova generazione come mostrato nel grafico in figura 2.11;
- La concorrenza tra operatori ha portato negli anni a sovradimensionare in potenza la progettazione delle reti 2G e 3G al fine di prenotare lo spazio elettromagnetico per lo sviluppo futuro della rete (appunto LTE);
- I terminali di nuova generazione hanno ricevitori più efficienti e permettono quindi di mantenere buone prestazioni anche ricevendo segnali di potenze inferiori.

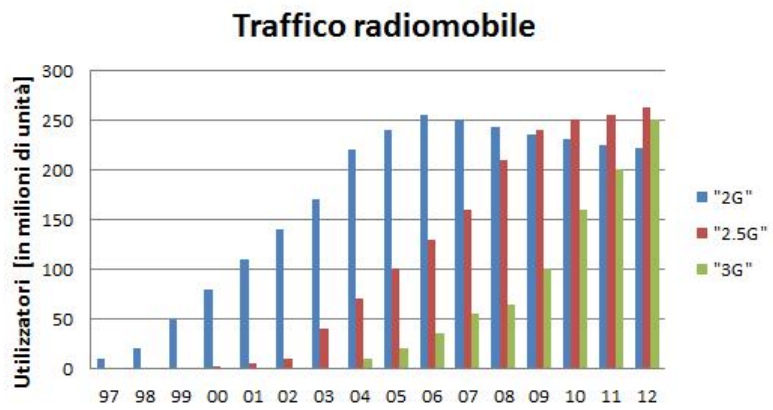


Figura 2.11: Andamento del traffico 2G e 3G negli ultimi anni





## Capitolo 3

# Pianificazione della copertura radiomobile

Quando un operatore intende realizzare una nuova rete radiomobile o estendere la copertura (o la capacità) di una rete già esistente, occorre realizzare un progetto della rete di accesso radio e delle infrastrutture di backhaul da utilizzare. La pianificazione di una rete radiomobile è un processo estremamente complesso che richiede la valutazione di aspetti di propagazione radio, trasmissione e considerazioni legate alla tipologia delle reti di comunicazione a commutazione di circuito e pacchetto coinvolte, previsioni sull'entità del traffico offerto e sulla sua distribuzione all'interno dell'area di servizio. La pianificazione radiomobile viene generalmente effettuata attraverso la realizzazione di modelli matematici che approssimano il funzionamento della rete e delle caratteristiche del sistema, inclusa la propagazione sul canale radio. Per progettare un dimensionamento coerente il modello deve prendere in considerazione:

- L'area geografica da coprire, della quale occorre conoscere l'altimetria, la distribuzione della densità dell'edificato e della vegetazione;
- Il traffico offerto stimato in ciascuna regione, ottenibile attraverso la

conoscenza della densità di popolazione, dei luoghi di maggior interesse e delle previsioni effettuate dal marketing;

- Localizzazione e possibili configurazioni dei siti candidati all'installazione delle Base Station (BS);
- Bande di frequenza utilizzata;
- Caratteristiche dei terminali utente;
- Altre eventuali variabili ambientali.

Al fine di ottenere vantaggi in termini computazionali l'area geografica può essere discretizzata in una griglia di pixel, ognuno dei quali caratterizzato da una quota rispetto al livello del mare e da una densità (e quota) di edificato, naturalmente più piccolo sarà il lato del pixel e più accurata sarà l'analisi. Un operatore radiomobile può stimare il traffico offerto basandosi sul traffico smaltito dalle reti già esistenti, dove presenti, dalle relative statistiche correlate (accessibilità, cadute, etc. . . ) e dalle previsioni del marketing. Le previsioni di traffico ottenute possono essere modellizzate attraverso la collocazione sullo scenario di punti di traffico (test point) che devono essere serviti dalle BS. Per simulare correttamente il livello fisico non è sufficiente l'applicazione di un modello di propagazione ma occorre anche simulare l'interfaccia radio della tecnologia da pianificare per poter calcolare le prestazioni teoriche ottenibili. Le variabili del problema da determinare sono in genere la selezione dei siti candidati e le loro rispettive configurazioni (potenze, frequenze, etc. . . ). La localizzazione e il dimensionamento di ciascuna BS determinano una suddivisione del territorio in celle, ciascuna con una propria estensione geografica ed una propria forma. Si ipotizza che per ciascun "pixel" del territorio esista un'antenna per la quale il segnale venga captato con la massima intensità (antenna best server), ed è quindi possibile suddividere la regione in celle assegnando a ciascuna BS tutti i

punti del territorio per i quali essa risulta essere best server. Conoscendo, l'interferenza minima (il solo rumore di fondo), la potenza massima di una BS, l'allocazione di banda minima e una soglia minima di rapporto segnale rumore/interferenza (SINR), è possibile determinare il raggio di copertura di una BS:

$$\frac{P \cdot G(R_c)}{N_0 \cdot B_w} = SINR_{min} \quad (3.1)$$

Dove  $P$  è la potenza massima di una BS, espressa in W,  $G(R_c)$  è il guadagno di canale visto a bordo cella;  $R_c$  è il raggio di copertura (che si vuole determinare),  $N_0$  è la densità di rumore, espressa in W/Hz,  $B_w$  è l'allocazione di banda minima, espressa in Hz e  $SINR_{min}$  è il rapporto segnale rumore/interferenza minimo che si vuole garantire. Per calcolare il guadagno di canale visto a bordo cella è possibile utilizzare un modello un modello di propagazione come descritto nel prossimo paragrafo.

### 3.1 Modelli per la propagazione radiomobile

Lo studio della propagazione radiomobile, sempre rigorosamente tridimensionale, può essere semplificato e reso bidimensionale studiando separatamente:

**Propagazione sul piano laterale (PL):** piano inclinato ortogonale al piano verticale contenente le due antenne del collegamento;

**Propagazione sul piano verticale (PV):** piano ortogonale al terreno contenente le due antenne del collegamento.

Sulla base della distinzione precedente sono stati sviluppati modelli per il piano verticale e modelli per il piano laterale che possono essere opportunamente combinati.

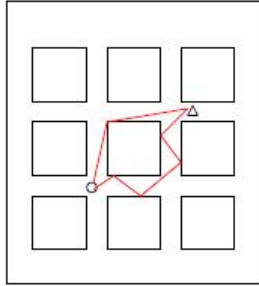


Figura 3.1: Propagazione sul piano laterale

La propagazione sul piano laterale è caratterizzata da numerosi cammini multipli fra le antenne. I meccanismi propagativi principali relativi alla propagazione sul piano laterale sono:

**Riflessioni** sulle pareti degli edifici;

**Diffrazioni** sugli spigoli degli edifici;

**Diffusioni** da vegetazione o pareti rugose e/o non omogenee.

All'aumentare della distanza fra le antenne, i cammini si fanno sempre più complessi (in figura 3.1), aumentando così il numero di iterazioni necessarie a garantire il collegamento. L'attenuazione sul piano laterale aumenta quindi molto rapidamente con la distanza.

Nella propagazione lungo il piano verticale generalmente sono pochi i cammini significativi, spesso soltanto uno. Il meccanismo propagativo principale è la diffrazione sui tetti degli edifici (propagazione Over Roof Top, in figura 3.2). Il numero di ostacoli significativi aumenta abbastanza lentamente con la distanza, quindi l'attenuazione lungo il piano verticale aumenta con la distanza in maniera meno netta rispetto alla propagazione lungo il piano orizzontale.

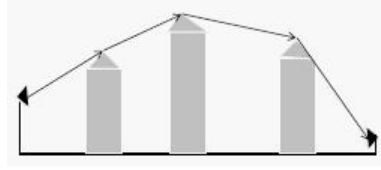


Figura 3.2: Propagazione Over Roof Top

La potenza viene sempre ricevuta da entrambi i “piani di propagazione”. Per valori limitati della distanza di tratta (tipicamente fino a qualche centinaio di m) il piano laterale porta il contributo di potenza più significativo, mentre per valori elevati è il piano verticale a svolgere un ruolo predominante. Si ha quindi che:

$$A_{dB}^{tot} = -10 \cdot \log(10^{-10/A_{dB}^V} + 10^{-10/A_{dB}^L}) \quad (3.2)$$

Dove:

- $A_{dB}^V$  è l’attenuazione sul piano verticale;
- $A_{dB}^L$  è l’attenuazione sul piano laterale;
- $A_{dB}^{tot}$  è l’attenuazione complessiva.

Si definisce allora punto o distanza di prevalenza il valore di distanza per il quale l’attenuazione sul piano laterale coincide con l’attenuazione sul piano verticale, un esempio è mostrato in figura 3.3.

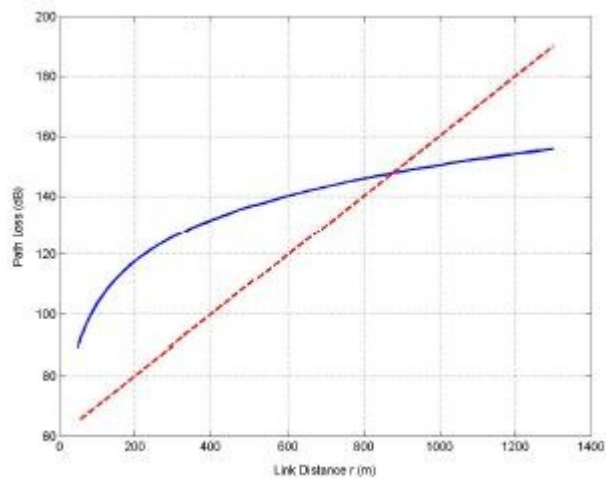


Figura 3.3: Punto di prevalenza

Il valore della distanza del punto di prevalenza dal trasmettitore dipende sensibilmente dall'altezza della BS. In particolare, al crescere dell'altezza della BS diventa dominante il contributo di propagazione nel piano verticale. Il ruolo dei due piani di propagazione dipende fortemente dal tipo di copertura:

- MACROCELLE, altezza della BS al di sopra dei tetti dei palazzi, si considera solo il piano verticale;
- SMALLCELL, altezza della BS alla stessa altezza dei tetti dei palazzi, vengono considerati sia il piano laterale che quello verticale;
- MICROCELLE, altezza della BS al di sotto dei tetti dei palazzi, si considera il solo piano laterale.

### 3.1.1 Principali modelli di propagazione

I modelli di propagazione possono essere suddivisi in:

**Modelli statistici** : possono fornire previsioni a banda larga e a banda stretta utilizzando pochi parametri derivati da insiemi di dati misurati e richiedono semplici elaborazioni dei dati in input, le previsioni possono comunque non essere sufficientemente accurate a causa della mancanza di informazioni relative ai comportamenti propagativi in scenari diversi. L'estensione dei parametri statistici nel passare da uno scenario all'altro influisce pesantemente sulla qualità delle previsioni e può essere necessario calibrarli. Esempi di modelli statistici sono il modello di Walfish-Ikegami e il modello COST 259;

**Modelli semi-deterministici** : sono modelli semplici e veloci da utilizzare e richiedono un limitato impiego di risorse in termini di tempo di calcolo in quanto utilizzano pochi parametri topologici e di collegamento. Tali modelli presentano una limitata accuratezza delle previsioni e non forniscono generalmente previsioni a banda larga. Esempi di modelli semi-deterministici sono il modello di Berg e il modello di Saunders-Bonar;

**Modelli deterministici** : forniscono previsioni accurate sia a banda stretta che a banda larga e permettono di tener conto di informazioni addizionali che influenzano la propagazione (es. diagrammi di radiazione delle antenne). Questi modelli generalmente comportano un oneroso impiego di risorse sia in termini di tempi di calcolo che di memoria occupata e richiedono spesso una fase di pre-processing per la descrizione dell'ambiente urbano di interesse. Un esempi di modello deterministico è il metodo di "Ray Tracing";

**Modelli empirici** : utilizzano pochi parametri derivati da estese campagne di misura, sono semplici e veloci da utilizzare, tuttavia richiedono calibrazione (tramite misure) in funzione dello scenario propagativo che si sta considerando. Le previsioni possono non essere sufficientemente



accurate in quanto forniscono tipicamente solo stime di attenuazione. Esempi di modelli empirici sono il modello Okumura-Hata e il modello di Epstein-Peterson.

Per la realizzazione del modello di pianificazione e degli algoritmi presentati in questa tesi si è scelto di utilizzare il modello Okumura-Hata, in quanto rende possibile calcolare tutte le stime di attenuazione in fase di pre-processing, fornendo come ingressi solamente le potenze, i guadagni e le distanze in gioco.

### 3.1.2 Modello Okumura-Hata

Il più noto modello empirico per l'attenuazione da distanza è quello di Okumura-Hata (1980) e fornisce stime dell'attenuazione in diversi scenari di riferimento come grandi città, città medio piccole e aree rurali. La sua applicabilità si ha per bande comprese tra i 150 e 1500 MHz. Nel calcolo si tiene conto tra l'altro della diffrazione delle onde elettromagnetiche prodotta da ostacoli dovuti all'orografia del terreno e dalla particolare tipologia dello stesso. La formula contiene i valori dell'altezza dell'antenna della stazione fissa e del terminale mobile; inoltre ci sono valori che considerano l'attenuazione del segnale causata dalla posizione del terminale mobile, come ad esempio quando esso si trova all'interno di edifici o di automobili. Il modello è considerato tra i più accurati, ma essendo un metodo empirico, si basa unicamente sulle misurazioni effettuate.

Il modello Okumura- Hata per le aree urbane è formulato come:

$$L_U = 69,55 + 26,16 \log f - 13,82 \log h_B - C_H + (44,9 - 6,55 \log h_B) \log d \quad (3.3)$$

Per le piccole/medie città:

$$C_H = 0,8 + (1,1 \log f - 0,7)h_M - 1,56 \log f, \quad (3.4)$$

mentre per le grandi città

$$C_H = \begin{cases} 8,29(\log(1,54h_M))^2 - 1,1 & \text{se } 150 \leq f \leq 200 \\ 3,2(\log(11,75h_M))^2 - 4,97 & \text{se } 200 < f \leq 1500 \end{cases} \quad (3.5)$$

Dove,

$L_U$ , attenuazione del segnale nelle aree urbane espresso in dB;

$f$ , frequenza di trasmissione in MHz;

$h_B$ , altezza in metri dell'antenna della stazione base;

$h_M$ , altezza in metri dell'antenna della base mobile;

$C_H$ , fattore di correzione dell'altezza dell'antenna;

$d$ , distanza in chilometri fra base e stazione mobile.

## 3.2 Modelli e metodi per la pianificazione della copertura radiomobile

### 3.2.1 Modelli di ottimizzazione

Nei modelli di ottimizzazione per la pianificazione radiomobile si assume di avere un insieme di siti candidati  $J$ , la distribuzione del traffico nell'area e le caratteristiche di propagazione dell'area considerata. La distribuzione del traffico viene generalmente modellata come un insieme  $I$  di punti di test dove si assume venga concentrata la richiesta di traffico. Si assume

nota l'attenuazione del canale radio  $a_{ij}$  (o il guadagno  $g_{ij} = 1/a_{ij}$ ) tra ogni sito candidato  $j \in J$  e ogni punto di test  $i \in I$ , tale attenuazione può essere ad esempio ottenuta con il modello Okumura-Hata precedentemente descritto. Il significato dell'insieme  $J$  dei siti candidati può anche essere esteso a comprendere le diverse possibili configurazioni di una BS, in questo caso si introduce un elemento nell'insieme per ogni possibile configurazione della BS nel sito, ovviamente la differenza tra le diverse configurazioni del sito sarà nella propagazione verso i punti di test oppure nella capacità della BS; occorrerà dunque inserire nel modello dei vincoli che impediscano al tool di ottimizzazione di installare più configurazioni dello stesso sito. Le variabili di decisione del problema sono:

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{se una BS è installata nel cs } j \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (3.6)$$

cui è associato un costo di installazione  $c_j$ , una semplice formulazione del problema assume che  $i \in I$  è coperto da  $j \in J$  se l'attenuazione è inferiore ad una certa soglia. La copertura di un test point rispetto a un cs è considerata mediante il parametro:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se il test point } i \text{ è coperto dal cs } j \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (3.7)$$

A questo punto il problema di pianificare la rete a costo minimo può essere così formulato:

$$\min \sum_{j \in J} c_j y_j \quad (3.8)$$

$$\sum_{j \in J} a_{ij} y_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (3.9)$$

Dove il vincolo assicura che ogni test pont venga associato ad una cs.

Questo problema è noto come problema di *set covering*.

È possibile facilmente modificare il modello per considerare anche le configurazioni delle stazioni radio base modificando le variabili del problema, ad esempio la variabile di installazione di un cs può essere formulata come:

$$y_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{se una BS con configurazione } k \ (k \in K) \text{ è installata nel cs } j \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (3.10)$$

Dove  $K$  è l'insieme delle possibili configurazioni. Anche il parametro di costo dovrà dipendere dalle possibili configurazioni:  $c_{jk}$  = costo d'installazione cs  $j$  in configurazione  $k$ .

Il problema di *set covering* generalizzato diventa:

$$\min \sum_{j \in J} \sum_{k \in K_j} c_{jk} y_{jk} \quad (3.11)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K_j} a_{ijk} y_{jk} \geq 1 \forall i \in I \quad (3.12)$$

$$\sum_{k \in K_j} y_{jk} \leq 1 \forall i \in J \quad (3.13)$$

$$y_{jk} \in \{0,1\} \text{ con } \forall j \in S, k \in K_j \quad (3.14)$$

Con questa formulazione la stazione che effettivamente serve il test point  $i$  non è definita dal modello, occorre quindi definire nuove variabili di assegnamento:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se il test point } i \text{ è assegnato al cs } j \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (3.15)$$

Il problema di *set covering* generalizzato con assegnamento viene infine così formulato:

$$\min \sum_{j \in J} \sum_{k \in K_j} c_{jk} y_{jk} \quad (3.16)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \forall i \in I \quad (3.17)$$

$$\sum_{k \in K_j} y_{jk} \geq 1 \forall j \in J \quad (3.18)$$

$$x_{ij} \geq \sum_{k \in K_j} a_{ijk} y_{jk} \quad \forall i \in J, \forall j \in J \quad (3.19)$$

$$y_{jk} \in \{0,1\} \text{ con } \forall j \in S, k \in K_j \quad (3.20)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \text{ con } \forall j \in S, k \in K_j \quad (3.21)$$

Usando le variabili  $x$  possiamo aggiungere al problema i vincoli di capacità delle stazioni base:

$$\sum_{i \in I} d_i x_{ij} \leq \sum_{k \in K_j} \nu_{jk} y_{jk} \quad \forall j \in S \quad (3.22)$$

Dove  $d_i$  è il traffico generato dal test point  $i$  e  $\nu_{jk}$  è la capacità della stazione base in cs  $j$  con configurazione  $k$ . L'assegnamento dei test point ai cs non è però determinabile in fase di progetto in quanto dipende dei meccanismi di selezione della cella, differenti nella varie release e implementati di solito nei terminali; per tanto dovranno essere implementati dei vincoli che simulino la specifica interfaccia radio del sistema considerato.

### 3.2.2 Metodi euristici

Il problema di set covering è un problema difficile, ossia è un algoritmo che impiega un tempo che cresce esponenzialmente con le dimensioni del problema per trovare la soluzione ottima. Si può far ricorso ad algoritmi euristici che forniscono spesso una buona soluzione sub-ottima come ad esempio gli

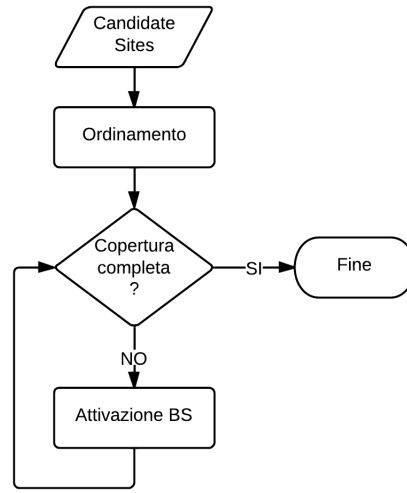


Figura 3.4: Diagramma di flusso di un generico metodo euristico per la pianificazione radio

algoritmi di tipo greedy. Il problema di set covering può essere risolto con un algoritmo, che, dopo aver ordinato i cs secondo un certo criterio, prosegue sequenzialmente aggiungendo una BS fino ad ottenere la copertura completa schematizzata in figura 3.4.

### 3.2.3 Modelli e metodi per la pianificazione della rete d'accesso LTE

In letteratura si trovano diversi articoli che approcciano il radio-planning applicato alle reti radiomobili LTE. I lavori si occupano sia degli aspetti economici, attraverso la formulazione di modelli di pianificazione a costo minimo, che di valutazioni prettamente tecnologiche come ad esempio l'impatto delle tecniche MIMO e della modulazione OFDM.

Nell'articolo [18] viene analizzato il trade-off, tra costi ed efficienza, nell'ambito della progettazione della rete di accesso LTE. Gli autori propongono un

modello economico in termini di profitti, calcolati come differenza tra ricavi attesi e costi sostenuti. Vengono considerati sia i costi dell'investimento iniziale (Capex) quali l'acquisto delle licenze e la creazione delle infrastrutture, che i costi operativi (Opex) dovuti alla manutenzione della infrastruttura implementata. L'algoritmo di ottimizzazione analizza differenti configurazioni HW per differenti parametri, ad esempio BS installate da un set di candidati disponibili, uso di antenne, tilt o azimuth e le scelte del risolutore determineranno la dimensione dello spazio delle soluzioni. L'algoritmo si arresta quando la funzione incontra le aspettative del service provider (in termini prestazionali).

Salo, Nur-alam e Chang in [19] descrivono un approccio pratico al radio planning LTE. Vengono considerati scenari limitati dall'interferenza e scenari limitati dalla copertura. Nei primi il link budget viene confrontato con quello del 3GPP Release 8 HSPA+ con sistema 2x2 MIMO. Si mostra che, a pari larghezza di banda di 5 MHz, entrambi i sistemi hanno raggio di cella simile ma, per un dato target bit rate, esiste una larghezza di banda ottimale per il sistema LTE che massimizza il raggio di cella sia per l'uplink che per il downlink. Per gli scenari limitati dall'interferenza si illustrano le relazioni tra carico medio della rete, throughput a bordo cella e raggio di cella. Si discute anche sulle configurazioni e sui benefici dell'utilizzo delle tecniche MIMO. Infine, si descrivono la gestione delle risorse radio e i principali parametri per la pianificazione radio LTE.

Un metodo di calcolo per il link-budget LTE è proposto nell'articolo [20], gli autori propongono una metodologia finalizzata all'ottimizzazione del throughput uplink a bordo cella. In particolare nella valutazione del SINR vengono effettuate delle considerazioni sull'impatto del carico di rete sull'interferenza inter-cella, ottenendo dei coefficienti di correzione sulle formule teoriche. Infine, con le formule ottenute, calcolano il raggio di cella ideale per LTE che, in uno scenario ridotto (cluster di 6 celle) risulta pari a 125 m. Zuozhou Li e Shudong Li in [21] propongono un algoritmo in due step per

la localizzazione delle BS e l'allocazione della potenza. Nel primo passo utilizzano un metodo iterativo dove ad ogni iterazione viene valutata l'installazione di una BS (ordinate per raggio di copertura), e contestualmente viene valutata la porzione di popolazione coperta con un certo rate; l'algoritmo si conclude quando il viene coperta tutta la popolazione. La seconda fase dell'algoritmo proposto utilizza un modello di teoria dei giochi per l'allocazione della potenza; il modello è basato sul principio che una volta considerato un punto di traffico, l'aumento della potenza della RBS alla quale è associato porterà un premio in SINR per lui e una penalità per gli altri test-point. Il modello quindi cerca di massimizzare il SINR visto da tutti i test-point, trovando così la soluzione di equilibrio. Le simulazioni, mostrano un miglioramento delle performance ad ogni iterazione, fino alla convergenza finale. Valutazioni sull'impatto delle tecnologie MIMO vengono effettuate nell'articolo [22]. L'articolo propone una metodologia deterministica per la stima delle performance della tecnologia LTE in ambiente urbano, outdoor e indoor, valutandone l'influenza delle tecniche multi-antenna. Il modello di propagazione proposto è il ray-tracing effettuato su una ricostruzione 3D del territorio da coprire; la stima del path-loss lungo il raggio ottenuto è effettuata attraverso la "uniform theory of diffraction" (UTD) con coefficienti di Fresnel per le riflessioni. L'effetto delle tecniche MIMO viene calcolato in post-elaborazione. Le stime così ottenute sono state poi confrontate con una campagna di misure in campo, trovando valori in accordo con le simulazioni. Jun Gu, Yufeng Ruan, Xi Chen e Chaowei Wang nell'articolo [23] propongono un metodo per la pianificazione delle capacità delle SRB LTE basato sui processi di traffico e interferenza. L'algoritmo presentato si basa su un sistema iterato di simulazioni nella quali si ricerca l'allocazione di risorse che massimizza la capacità per uno specifico scenario dinamico di traffico. Un approccio di pianificazione della rete d'accesso LTE orientato all'efficienza energetica è presentato nell'articolo [24]. Nell'articolo è proposto un algoritmo di selezione delle location di installazione delle BS in funzione



di determinati parametri di efficienza energetica, vengono poi forniti dei pattern di accensione-spegnimento delle BS in funzione delle condizioni di traffico. Infine nella tesi [25] vengono proposti due modelli di pianificazione di accesso radio LTE con l'obiettivo di valutare l'effetto del riuso parziale di frequenza.

Questa tesi si propone di introdurre due nuovi concetti nell'ambito del wireless network planning per LTE; in particolare le novità in oggetto riguardano l'approccio della pianificazione all'upgrade incrementale della rete e l'analisi dell'impatto ambientale delle BS.

# Capitolo 4

## Modello di pianificazione

Sulla base dei precedenti capitoli, viene proposto un modello di programmazione lineare intera che descrive il problema del radio planning per sistemi radiomobili LTE, seguendo la logica dello sviluppo incrementale. Il modello infatti prende in considerazione un set di siti candidati, su ognuno dei quali è presente una o più configurazioni delle altre reti 3GPP, ovvero GSM900, DCS1800 e UMTS2100 (viene trascurata la tecnologia UMTS900 in quanto poco utilizzata in scenari urbani). Il modello presentato, oltre a considerare tutti gli aspetti classici del radio planning (copertura, configurazioni e costi), prende in considerazione anche le problematiche infrastrutturali, dovute appunto alla presenza delle altre reti, nonché quelle ambientali; particolare attenzione viene posta sull'impatto elettromagnetico degli impianti. Infine il modello non seguirà un approccio di pianificazione a costo minimo, ma verranno analizzati scenari vincolati in termini di costi, con l'obiettivo di massimizzare la user experience in termini di fairness sul throughput. Infine è prevista la possibilità di effettuare decrementi di potenza e portanti sulle reti 2G e 3G per accomodare la tecnologia LTE.

## 4.1 Caratterizzazione dello scenario

### 4.1.1 Caratterizzazione della rete esistente

Il primo passo necessario è la definizione, in termini di grandezze discrete, di uno scenario che possa rappresentare la rete radiomobile di una piccola media città (che sarà poi lo scenario da ottimizzare). A tal fine occorre caratterizzare ogni sito candidato indicando l'eventuale presenza di un sistema 3GPP e la sua configurazione. Ogni sito candidato (cs) verrà quindi rappresentato da tre parametri binari:  $M_G$ ,  $M_D$  e  $M_U$  che indicano rispettivamente la presenza nel cs dei sistemi GSM, DCS e UMTS. Per caratterizzare più dettagliatamente la configurazione dei cs occorre ora cercare una rappresentazione della potenza installata e della banda occupata dai sistemi eventualmente presenti nel sito. La banda occupata può essere quantificata dal numero di portanti configurate, mentre per la potenza è indicativa l'intensità presente al collettore d'antenna, in quanto comprensiva delle perdite di linea. I cs sono anche caratterizzati dal costo che comporterebbe l'attivazione di LTE sul sito. Il costo non può essere indipendente dalle configurazioni 3GPP già attive sul sito. Infatti ragionando sotto l'ipotesi dell'upgrade incrementale della rete deve essere valutata la possibilità di attivare in mixed mode il sistema LTE1800, che ridurrebbe i costi del sistema radiante, in quanto condividerebbe sia l'antenna fisica che l'apparato con il sistema DCS1800. Viene anche lasciata la possibilità, nettamente più costosa, di attivare un cs senza nulla attivo, al quale dunque vengono attribuiti tutti i costi di realizzazione dell'infrastruttura. Complessivamente sono stati distinti diversi possibili scenari (dal più al meno costoso):

- cs nuovo: comprende costi di infrastruttura, antenne, apparati e licenze;
- cs con attivi i sistemi GSM900 e UMTS: comprende i costi delle antenne, delle licenze, dei nuovi apparati e dell'upgrade dei due sistemi

attivi;

- cs con tutti i sistemi attivi: comprende i costi delle licenze, dei nuovi apparati e dell'upgrade dei tre sistemi attivi;
- cs con attivi i sistemi GSM900 o UMTS: comprende i costi delle antenne, delle licenze, dei nuovi apparati e dell'upgrade del sistema già attivo;
- cs con attivi i sistemi DCS1800 e GSM900 oppure DCS1800 e UMTS: comprende i costi delle licenze, dei nuovi apparati e dell'upgrade dei due sistemi attivi;
- cs con attivo solo il sistema DCS1800: comprende i costi delle licenze e dei nuovi apparati.

Per stimare il throughput percepito dagli utenti vengono introdotti nello scenario dei punti di traffico, chiamati test point, che devono essere serviti dai cs.

#### **4.1.2 Caratterizzazione delle configurazioni implementabili**

Il secondo passaggio fondamentale è la determinazione delle possibili configurazioni con cui può essere attivato LTE. Per semplicità viene considerata solo la banda a 1800 MHz, senza riuso parziale delle frequenze, e celle omnidirezionali (con il radiante al centro). Sotto le ipotesi appena descritte l'attivazione del sistema LTE in un determinato cs è caratterizzata da:

- Larghezza di banda: sono considerate quattro possibilità, 5,10,15 e 20 MHz (considereremo per semplicità come portante un blocco da 5 MHz);

- Potenza: viene considerata una potenza di 15 W per ogni blocco da 5 MHz al collettore d'antenna;
- Tecnica MIMO: sono considerate le modalità 2x2 e 4x4 che corrispondono rispettivamente all'installazione fisica di una o due antenne (si ipotizza di utilizzare il MIMO in modalità spatial multiplexing).

### 4.1.3 Caratterizzazione dell'interfaccia radio

L'aspetto certamente più critico da caratterizzare è l'interfaccia radio, infatti occorre scegliere un modello di propagazione coerente con lo scenario ipotizzato e trovare un buon livello di approssimazione del livello fisico di LTE per la valutazione delle performance del sistema. Per quanto riguarda il modello di propagazione è stato utilizzato, il modello Okumura-Hata per ambienti urbani, calcolando in fase di pre-processing tutte le attenuazioni di canale per ogni coppia cs - test point. Per la caratterizzazione del livello fisico di LTE sono state fatte le seguenti considerazioni:

- Il bit rate assegnato ad un utente dipende dalla quantità di Resource Block (RB) assegnati dallo scheduler e dal indice di modulazione assegnato allo User Equipment (UE) come si vede in tabella 4.1;
- Si ipotizza che lo scheduler LTE distribuisca le risorse in modo fair rispetto al throughput, assegnando un numero maggiore di RB agli UE con CQI(Channel Quality Index), e quindi indice di modulazione, inferiore;
- L'indice di modulazione assegnato da un UE è mappato su un insieme di livelli discreti di SINR (Signal Interference Noise Ratio);
- L'interferenza intercella in LTE dipende dal livello di carico della rete;
- Il raddoppio del throughput ottenuto passando dalla modalità MIMO 2x2 (configurazione standard nel modello) alla modalità MIMO 4x4 è

simulato raddoppiando il numero di RB assegnabili dalla BS.

Tabella 4.1: Indici di modulazione LTE

Indice di modulazione	Modulazione e codice	Efficienza [Kbit/sec/RB]	$SINR_{min}$ [dB]
1	BPSK - 1/2	90	0,14
2	BPSK - 2/3	121	1,15
3	QPSK - 1/2	180	3,14
4	QPSK - 2/3	239	4,15
5	QPSK - 3/4	170	6,55
6	16-QAM - 1/2	360	9,01
7	16-QAM - 2/3	481	10,22
8	16-QAM - 3/4	540	14,01
9	64-QAM - 2/3	720	15,33

L'espressione del SINR si ottiene come segue:

$$SINR = \frac{P_{t_j} G_{c_j}}{N_0 + \sum_{i=1; i \neq j}^M pr(RB) P_{t_i} G_{c_i}} \quad (4.1)$$

Dove:

$P_{t_j}$  è la potenza trasmessa dalla BS associata all'UE

$G_{c_j}$  è il guadagno di canale tra la BS e l'UE

$N_0$  è il rumore termico ambientale

$P_{t_i}$  è la Potenza trasmessa da una BS interferente

$G_{c_i}$  è il guadagno di canale tra una BS interferente e l'UE

Il parametro  $pr(RB)$  indica la probabilità che la BS trasmittente e quella interferente stiano schedulando lo stesso RB nello stesso TTI (Time Transmission Interval), questa probabilità è data dal prodotto delle rispettive

probabilità di trasmettere quello specifico RB. Per una BS la probabilità di trasmettere uno specifico RB dipende dal carico della BS stessa ( $\eta$ ), infatti se in un certo TTI la BS è completamente carica, la probabilità che abbia assegnato uno specifico RB è pari a 1, se è carica al 50% tale probabilità è pari a 0,5 e così via. Per tanto se si lavora sotto l'ipotesi che tutte le BS siano cariche al 70% ( $\eta = 0.7$ ), condizione tipicamente verificabile nella realtà degli operatori di rete cellulare,  $pr(RB)$  può essere stimata come  $\eta^2 = 0.7^2 = 0.49$ . La formula diventa quindi:

$$SINR = \frac{P_{t_j} G_{c_j}}{N_0 + \sum_{i=1; i \neq j}^M \eta^2 P_{t_i} G_{c_i}} \quad (4.2)$$

Una volta determinato il valore di SINR occorre mapparlo sui possibili indici di modulazione previsti dallo standard e incrociarlo con le possibili assegnazioni di RB dello scheduler per ottenere i throughput in downlink. Nella tabella 4.2 sono indicati i valori di throughput attesi in kbit/s in funzione del numero di RB assegnati e del SINR in dB percepito dall'UE. Per ragioni di complessità computazionale non è possibile passare al modello l'intera matrice dei possibili rate, pertanto è necessario individuare un sottoinsieme della matrice che rappresenti una approssimazione ragionevole. Tale approssimazione consiste nel considerare un massimo di 25 RB assegnabili ad un UE in un TTI e di mappare l'indice di modulazione solamente su tre livelli di SINR (raffigurate in grassetto in tabella 4.2).

Tabella 4.2: Valori di throughput

RBs/SINR	0,14	<b>1,15</b>	3,14	4,15	6,55	9,01	<b>10,22</b>	14,01	<b>15,33</b>
1	180	<b>242</b>	360	478	540	720	<b>962</b>	1080	<b>1440</b>
2	360	<b>484</b>	720	956	1080	1440	<b>1924</b>	2160	<b>2880</b>
3	540	<b>726</b>	1080	1434	1620	2160	<b>2886</b>	3240	<b>4320</b>
4	720	<b>968</b>	1440	1912	2160	2880	<b>3848</b>	4320	<b>5760</b>
5	900	<b>1210</b>	1800	2390	2700	3600	<b>4810</b>	5400	<b>7200</b>
6	1080	<b>1452</b>	2160	2868	3240	4320	<b>5772</b>	6480	<b>8640</b>
7	1260	<b>1694</b>	2520	3346	3780	5040	<b>6734</b>	7560	<b>10080</b>
8	1440	<b>1936</b>	2880	3824	4320	5760	<b>7696</b>	8640	<b>11520</b>
9	1620	<b>2178</b>	3240	4302	4860	6480	<b>8658</b>	9720	<b>12960</b>
10	1800	<b>2420</b>	3600	4780	5400	7200	<b>9620</b>	10800	<b>14400</b>
11	1980	<b>2662</b>	3960	5258	5940	7920	<b>10582</b>	11880	<b>15840</b>
12	2160	<b>2904</b>	4320	5736	6480	8640	<b>11544</b>	12960	<b>17280</b>
13	2340	<b>3146</b>	4680	6214	7020	9360	<b>12506</b>	14040	<b>18720</b>
14	2520	<b>3388</b>	5040	6692	7560	10080	<b>13468</b>	15120	<b>20160</b>
15	2700	<b>3630</b>	5400	7170	8100	10800	<b>14430</b>	16200	<b>21600</b>
16	2880	<b>3872</b>	5760	7648	8640	11520	<b>15392</b>	17280	<b>23040</b>
17	3060	<b>4114</b>	6120	8126	9180	12240	<b>16354</b>	18360	<b>24480</b>
18	3240	<b>4356</b>	6480	8604	9720	12960	<b>17316</b>	19440	<b>25920</b>
19	3420	<b>4598</b>	6840	9082	10260	13680	<b>18278</b>	20520	<b>27360</b>
20	3600	<b>4840</b>	7200	9560	10800	14400	<b>19240</b>	21600	<b>28800</b>
21	3780	<b>5082</b>	7560	10038	11340	15120	<b>20202</b>	22680	<b>30240</b>
22	3960	<b>5324</b>	7920	10516	11880	15840	<b>21164</b>	23760	<b>31680</b>
23	4140	<b>5566</b>	8280	10994	12420	16560	<b>22126</b>	24840	<b>33120</b>
24	4320	<b>5808</b>	8640	11472	12960	17280	<b>23088</b>	25920	<b>34560</b>
25	4500	<b>6050</b>	9000	11950	13500	18000	<b>24050</b>	27000	<b>36000</b>



## 4.2 Sviluppo del modello

Sulla base della caratterizzazione effettuata nei paragrafi precedenti viene ora definito un modello di programmazione lineare per la pianificazione della rete di accesso LTE. Il modello proposto opera in ottica best-effort; l'obiettivo è quindi quello di ricavare l'andamento delle massime prestazioni ottenibili, in termini di throughput downlink, in funzione di budget, numero di cs, numero di utenti e livello di inquinamento elettromagnetico. Il significato dei parametri, delle variabili nonché degli insiemi trattati nel modello viene riassunto nelle tabelle 4.3.

### 4.2.1 Definizione dei parametri

Si considera un'area geografica di lato  $L$  nella quale si trovano distribuiti un insieme di test-point  $TP = \{1, 2, \dots, T\}$  e di siti candidati  $CS = \{1, 2, \dots, S\}$ . Ogni cs è caratterizzato da un costo di attivazione  $C(j)|j \in CS$ , e da tre parametri binari  $M_G(j), M_D(j), M_U(j)|j \in CS$  che indicano rispettivamente la presenza dei sistemi GSM, DCS e UMTS sul cs. Infine ogni sistema attivo su un cs è a sua volta caratterizzato, per i 3 sistemi considerati, da tre matrici binarie a 3 dimensioni  $D_G(j, p, b), D_D(j, p, b)$  e  $D_U(j, p, b)|j \in CS, p \in P, b \in B$ .  $PTI(b)|b \in B$  è un vettore che contiene le diverse larghezze di banda (in numero di blocchi da 5 MHz) assegnabili ad LTE, mentre  $POT(p)|p \in P$  indica i possibili livelli di potenza per i sistemi 3GPP.  $P = \{1, 2, \dots, V\}$  e  $B = \{1, 2, \dots, W\}$  sono gli insiemi che indicano rispettivamente i possibili livelli di potenza e numero di portanti (per i sistemi GSM e DCS il numero di portanti rappresentato è da intendersi doppio rispetto a quanto indicato). Ad ogni cs quindi, viene associata la matrice  $D_G, D_D$  e  $D_U$ , dove gli elementi  $D_{X_{pb}}$  sono tutti uguali a 0 tranne uno. L'elemento non nullo della matrice indica la configurazione sul cs che avrà quindi  $b$  portanti e livello di potenza  $p$  (su ogni portante). La potenza totale configurata in un cs è quindi data dalla somma delle potenze attive sui

Tabella 4.3: Riassunto delle grandezze del modello

Insiemi	
$CS = \{1, 2, \dots S\}$	Insieme dei siti candidati
$TP = \{1, 2, \dots T\}$	Insieme dei test point
$B = \{1, 2, \dots W\}$	Insieme delle allocazioni di banda LTE
$P = \{1, 2, \dots V\}$	Insieme dei livelli di potenza
$A = \{1, 2\}$	Insieme delle configurazioni MIMO
$R = \{1, 2, \dots N\}$	Insieme delle configurazioni SINR - RB
Parametri	
$C(j) j \in CS$	Costo sito
$C_M(a) a \in A$	Costo attivazione MIMO 4x4 (seconda antenna)
$M_G(j) j \in CS$ $M_D(j) j \in CS$ $M_U(j) j \in CS$	Presenza sistemi GSM, DCS, UMTS su un cs
$D_G(j, p, b) j \in CS, p \in P, b \in B$ $D_D(j, p, b) j \in CS, p \in P, b \in B$ $D_U(j, p, b) j \in CS, p \in P, b \in B$	Configurazioni sistemi GSM,DCS e UMTS sui cs
$P_{DCS}(j) j \in CS$	Potenza DCS sul cs
$B_{DCS}(j) j \in CS$	Portanti DCS sul cs
$AT(j, i) j \in CS, i \in TP$	Matrice attenuazione lineari
$M(a) a \in A$	Configurazione MIMO
$PTI(b) b \in B$	Vettore portanti
$POT(p) p \in P$	Vettore potenze
$COP(j, i) j \in CS, i \in TP$	Matrice di copertura
$R_B(n) n \in R$	Vettore dei resource block
$SINR(n) n \in R$	Vettore dei livelli di SINR
$T(n) n \in R$	Matrice dei throughput assegnabili
$P_{ARPA}(j) j \in CS$	Potenza massima attivabile sul cs
$BUDGET$	Budget
$B_{MAX}$	Numero massimo di portanti a 1800MHz attivabile sul cs
$P_{LTE}$	Potenza di attivazione LTE su ogni blocco da 5 MHz
$RB_p$	Numero massimo RB assegnabili per ogni 5 MHz di banda
$G_{ANT}$	Guadagno complessivo delle antenne in TX e RX
$N_0$	Rumore ambientale
Variabili	
$c_{f_{j,b,a}}$	Configurazione CS
$x_{j,i,n}$	Assegnamento
$\xi$	Funzione obiettivo (fairness)
$pt_{GSM}$ $pt_{UMTS}$	Potenza decrementata dai sistemi GSM e UMTS
$bt_{DCS}$	Portanti decrementate dal sistema DCS1800

singoli sistemi, a loro volta date dal prodotto della potenza corrispondente al livello  $p$  moltiplicato per il numero di portanti  $b$ .

	$D_G$				$D_D$				$D_U$				
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0
3	0	0	1	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0
4	0	0	0	0	4	0	0	0	0	4	0	0	0
5	0	0	0	0	5	0	0	0	0	5	0	0	0
6	0	0	0	0	6	0	0	0	0	6	0	0	0
7	0	0	0	0	7	0	0	0	0	7	0	0	0
8	0	0	0	0	8	0	0	0	0	8	0	0	1

Tabella 4.4: Esempi di configurazioni per i sistemi GSM900 e UMTS

Nell'esempio in tabella 4.4 sul cs sono attivi i sistemi GSM e UMTS. Il sistema GSM è configurato con 3 portanti e livello di potenza 3 (pari a  $7W$ ), mentre l'UMTS è attivo con 3 portanti e livello di potenza 8 (pari a  $12W$ ); il cs con ambo le tecnologie ha quindi attiva, ai collettori d'antenna, complessivamente una potenza di  $3 \cdot 7 + 3 \cdot 12 = 57 W$ . Il parametro  $M(a)|a \in A$  indica quale configurazione di trasmissione MIMO viene scelta dall'insieme  $A = \{1, 2\}$  dove le due configurazioni possibili indicano le modalità 2x2 e 4x4 (spatial multiplexing);  $C_M(a)| a \in A$  indica il costo delle due modalità di installazione (nullo per la modalità standard 2x). I parametri  $P_{DCS}(j)$  e  $B_{DCS}(j)|j \in CS$ , ridondanti, indicano rispettivamente la potenza e il numero di portanti per il sistema DCS su ogni cs e vengono introdotti solo per semplificare una parte della trattazione (in quanto non è stato possibile scrivere alcuni vincoli lineari utilizzando il parametro  $D_D$  precedentemente definito).  $AT(i, j)|i \in TP, j \in CS$  indica l'attenuazione lineare, per ogni coppia cs - test point, ottenuta in pre-processing con il mo-

dello Okumura-Hata; il parametro  $COP(i, j) | i \in TP, j \in CS$  è invece una matrice binaria che indica se il test point  $i$  rientra nel raggio di copertura del cs  $j$ . L'insieme  $R = \{1, 2, \dots, N\}$  indica l'insieme delle possibili combinazioni SINR-RB con cui un test point può associarsi ad un cs; ogni elemento dell'insieme corrisponde univocamente ad una coppia di valori che indicano il numero di RB assegnati all'UE dallo scheduler,  $R_B(n) | n \in R$ , e il SINR minimo,  $SINR(n) | n \in R$ , (che corrisponde ad un certo indice di modulazione). Il parametro  $T(n) | n \in R$  effettua un mapping dei valori di throughput corrispondenti alla combinazione di RB e SINR presenti nell'insieme  $R$ . Il parametro  $P_{ARPA}(j) | j \in CS$  indica la potenza massima attivabile su ogni cs a causa dei livelli di inquinamento elettromagnetico (che si suppone siano maggiormente vincolanti rispetto ai limiti hardware).

Altri parametri necessari alla caratterizzazione sono:

- *BUDGET* indica il limite massimo di spesa sostenibile;
- $B_{MAX}$  indica, presumendo l'attivazione in mixed mode, il numero massimo di portanti configurabili sulla banda a 1800 Mhz, una portante<sup>1</sup> LTE viene equiparata ad una coppia di portanti DCS, tale considerazione deriva dal limite hard imposto dalla maggior parte dagli apparati in commercio in grado di supportare tale modalità di trasmissione;
- $P_{LTE}$  indica la potenza in [W], al collettore di antenna con la quale si ipotizza di attivare una portante LTE;
- $RB_p$  indica il numero massimo di RB assegnabili per ogni 5 MHz di banda;
- $G_{ANT}$  indica il guadagno complessivo delle antenne in trasmissione e ricezione;

---

<sup>1</sup>Il termine portante è utilizzato in modo improprio in questo contesto; per semplicità di trattazione si indicherà con portante LTE un blocco da 5 MHz.

- $N_0$  indica il rumore termico ambientale.

## 4.2.2 Variabili del problema

Per determinare se il sistema LTE viene attivato con una certa configurazione su un cs vengono definite le seguenti variabili binarie:

$$c_{j,b,a}^f = \begin{cases} 1 & \text{se sul cs } j \text{ il sistema LTE è attivato con } b \text{ portanti e MIMO } a \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\forall j \in CS, \forall b \in B, \forall a \in A$$

L'associazione di un certo test point ad un cs è valutata mediante le variabili:

$$x_{j,i,n} = \begin{cases} 1 & \text{se al test point } i \text{ è associato il cs } j \text{ con combinazione SINR-RB } n \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\forall j \in CS, \forall i \in TP, \forall n \in R$$

Tali variabili impongono, contestualmente all'associazione, anche la selezione del profilo di throughput, quindi del CQI percepito e del numero di RB assegnati dal cs  $j$  al test point  $i$ .

L'andamento delle prestazioni della rete LTE viene valutato attraverso la variabile continua, a valori discreti:

$$\xi \geq 0 \quad (4.5)$$

che, attraverso i vincoli, viene fissata al minimo valore di throughput per

utente dell'intera rete. Le variabili continue

$$pt_{GSM_j} \geq 0 \quad pt_{UMTS_j} \geq 0 \quad \forall j \in CS \quad (4.6)$$

indicano rispettivamente la quantità di potenza in [W] decrementata rispettivamente nei sistemi GSM e UMTS del cs  $j$  a causa dell'installazione del sistema LTE. Infine, il numero di portanti DCS1800 decrementato per ospitare LTE in mixed mode è misurato dalle variabili binarie:

$$bt_{DCS_{j,b}} = \begin{cases} 1 & \text{sul cs } j \text{ il sistema DCS è stato decrementato di } b \text{ portanti} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (4.7)$$

### 4.2.3 Funzione obiettivo

L'obiettivo fondamentale del modello è quello di dimensionare la rete di accesso LTE massimizzando la user experience in termini di fairness sul throughput. A tal fine si massimizza il rate minimo percepito in rete:

$$\text{maximize } \xi; \quad (4.8)$$

## 4.3 Vincoli del problema

Nei prossimi paragrafi vengono illustrati i vincoli del problema.

### 4.3.1 Vincoli di assegnamento

**Assegnamento** Ogni test point  $i$  deve essere assegnato ad un unico cs  $j$  con un'unica combinazione SINR-RB  $n$ :

$$\sum_{j \in CS} \sum_{n \in R} x_{j,i,n} = 1 \quad (4.9)$$

$$\forall i \in TP$$

**Coerenza** Una associazione tra il test point  $i$  e il cs  $j$  è valida solo se il test point in questione è nel raggio di copertura del cs di riferimento e su quest'ultimo sia stato attivato il sistema LTE:

$$\sum_{n \in R} x_{j,i,n} \leq \sum_{b \in BAN} \sum_{a \in ANT} cf_{j,b,a} COP_{j,i} \quad (4.10)$$

$$\forall j \in CS, \forall i \in TP$$

**Capacità** La somma dei RB assegnati a tutti i test point associati al cs  $j$  non deve superare la capacità massima di quest'ultimo:

$$\sum_{i \in TP} \sum_{n \in R} RB_n x_{j,i,n} \leq \sum_{b \in BAN} \sum_{a \in ANT} \eta RB_p PTI_b M_a cf_{j,b,a} \quad (4.11)$$

$$\forall j \in CS$$

Il fattore  $\eta$  serve a limitare il carico della rete ad una frazione di quello massimo, come avviene tipicamente avviene nella pratica della pianificazione delle reti radiomobili.

### 4.3.2 Vincoli sui costi e configurazioni

**Budget** I costi sostenuti non possono superare il budget stanziato:

$$\sum_{j \in S} \sum_{b \in BAN} \sum_{a \in ANT} (C_j + C_{M_a}) cf_{j,b,a} \leq BUDGET \quad (4.12)$$

**Configurazione** Ogni cs può essere installato solamente con un'unica configurazione (larghezza di banda e tecnologia MIMO):

$$\sum_{b \in BAN} \sum_{a \in ANT} cf_{j,b,a} \leq 1 \quad (4.13)$$

$$\forall j \in CS$$

**Potenza** La potenza totale attiva sul cs  $j$ , al netto dei decrementi, deve essere al più pari alla potenza massima in grado di rispettare i limiti di inquinamento elettromagnetico:

$$pot_{GSM} + pot_{DCS} + pot_{UMTS} + pot_{LTE} - pt_{GSM_j} - pt_j^{umts} - pt_{DCS} \leq P_{ARPA_j} \quad (4.14)$$

$$\forall j \in S$$

Dove i termini hanno il seguente significato:

- Potenza totale attiva GSM a 900MHz

$$pot_{GSM} = \sum_{p \in P} \sum_{b \in BAN} 2 D_{G_{j,p,b}} POT_p PTI_b \quad (4.15)$$

- Potenza totale attiva UMTS a 2100MHz

$$pot_{UMTS} = \sum_{p \in P} \sum_{b \in BAN} D_{U_{j,p,b}} POT_p PTI_b \quad (4.16)$$

- Potenza totale attiva DCS a 1800MHz

$$pot_{DCS} = B_{DCS_j} P_{DCS_j} \quad (4.17)$$



- Potenza totale attiva LTE

$$pot_{LTE} = \sum_{p \in P} \sum_{b \in BAN} cf_{j,b,a} P_{LTE} PTI_b M_a \quad (4.18)$$

- Potenza tolta al sistema DCS per effetto dell'eventuale decremento di portanti

$$pot_{toltaDCS} = \sum_{p \in P} 2 bt_{DCS_j,b} PTI_b P_{DCS_j} \quad (4.19)$$

Pertanto il vincolo dapprima somma tutti i contributi di potenza attiva sul cs  $j$ , attraverso i parametri  $D_G$ ,  $D_U$  e  $P_{DCS}/B_{DCS}$ , poi somma l'eventuale potenza installata con il sistema LTE e infine sottrae gli eventuali decrementi. La potenza del sistema LTE viene calcolata moltiplicando il valore standard  $P_{LTE}$  per il numero di blocchi da 5 MHz configurati e viene eventualmente raddoppiata in caso di installazione della modalità MIMO 4x4. Nei decrementi viene valutato anche l'impatto dell'eventuale decremento di portanti nel sistema DCS. Per garantire che non venga decrementata potenza da sistemi non esistenti su un cs si utilizzano i vincoli:

$$pt_{UMTS_j} \leq BIGM MU_j \quad \forall j \in CS \quad (4.20)$$

$$pt_{GSM_j} \leq BIGM \cdot MG_j \quad \forall j \in CS \quad (4.21)$$

Dove big-M è un parametro costante sempre maggiore del valore delle variabili  $pt_{GSM}$  e  $pt_{UMTS}$ . Inoltre viene imposto che la potenza decrementata dai sistemi GSM e UMTS sia inferiore ad una percentuale  $\lambda$  di quella installata attraverso i vincoli:

$$pt_{UMTS_j} \leq \sum_{b \in B} \sum_{a \in A} cf_{j,b,a} M_{G_j} \sum_{p \in P} \sum_{b \in B} \lambda D_{G_{j,p,b}} POT_p PTI_b \quad (4.22)$$

$$pt_{GSM_j} \leq \sum_{b \in B} \sum_{a \in A} cf_{j,b,a} M_{U_j} \sum_{p \in P} \sum_{b \in B} \lambda D_{U_{j,p,b}} POT_p PTI_b \quad (4.23)$$

$$\forall j \in S$$

I vincoli in formula 4.22 e 4.23 servono a limitare la potenza decrementata sui sistemi GSM e UMTS a favore di LTE. Sono entrambi composti da due fattori; il primo termine, binario, serve a legare l'eventuale decremento della potenza di un sistema su un cs all'esistenza del sistema stesso e all'attivazione di LTE, mentre il secondo fa sì che tale decremento sia inferiore ad una certa frazione della potenza totale.

### Portanti in mixed mode

Viene imposto un limite sulle portanti configurabili tra i sistemi LTE e DCS1800 in modalità mixed mode, ovvero la differenza tra le portanti già attive e le portanti eventualmente decrementate sul sistema DCS1800 più le portanti LTE eventualmente attivate:

$$B_{DCS_j} + \sum_{b \in B} \sum_{a \in A} cf_{j,b,a} PTI_b - \sum_{b \in B} bt_{DCS_{j,b}} PTI_b \leq B_{MAX} \quad (4.24)$$

$$\forall j \in CS$$

Ancora una volta il termine portanti è usato in modo improprio, in quanto viene effettuata un'equivalenza tra un blocco da 5 Mhz LTE e un gruppo di portanti per il DCS 1800. Il limite non è introdotto dall'occupazione di banda ma piuttosto dai limiti hardware dell'apparato. Naturalmente

non deve essere possibile decrementare portanti sul sistema DCS1800 più di quante ne vengano assegnate ad LTE, a tale scopo viene utilizzato il vincolo in formula:

$$\sum_{b \in B} bt_{DCS_j, b} PTI_b \leq \sum_{b \in B} \sum_{a \in A} cf_{j, b, a} PTI_b \quad (4.25)$$

$$\forall j \in CS$$

Il termine a sinistra della disuguaglianza indica il numero di portanti decrementato sul sistema DCS1800 sul cs  $j$  mentre il termine a destra indica le portanti effettivamente assegnate ad LTE. Inoltre viene garantito un numero minimo di  $\gamma$  portanti DCS1800 anche dopo l'eventuale decremento:

$$B_{DCS_j} - \sum_{b \in B} bt_{DCS_j} PTI_b \geq \gamma M_{D_j} \quad (4.26)$$

$$\forall j \in CS$$

Il vincolo, in formula 4.26, inoltre garantisce che non sia possibile decrementare portanti DCS1800 laddove non esista tale sistema.

### 4.3.3 Vincolo sul SINR

Al fine di effettuare correttamente la stima dei rate disponibili ai test point, occorre vincolare il profilo di traffico  $n$  al SINR percepito e quindi all'indice di modulazione. Il vincolo viene così formulato:

$$\frac{pot_{CS_j}}{N_0 + \eta^2 pot_{CS_i}} \leq SINR_n \quad (4.27)$$

$$\forall j \in CS, \forall i \in TP, \forall n \in R$$

Dove:

$$pot_{CS_j} = \sum_{b \in B} \sum_{a \in A} P_{LTE} cf_{j, b, a} PTI_b M_a G_{ANT} AT_{j, i} \quad (4.28)$$

$$pot_{CS_i} = \sum_{b \in B} \sum_{a \in A} \sum_{q \in CS, q \neq j} P_{LTE} c f_{q,b,a} PTI_b M_a G_{ANT} AT_{q,i} \quad (4.29)$$

$pot_{CS_j}$  misura la potenza ricevuta dal cs servente, mentre  $pot_{CS_i}$  misura la potenza totale ricevuta dai siti candidati interferenti.

L'espressione così scritta non è lineare, viene quindi linearizzata attraverso la tecnica del big-M:

$$pot_{CS_j} \geq (SINR_n \cdot (N_0 + RB_p pot_{CS_i}) - BIGM (1 - x_{j,i,n})) \quad (4.30)$$

$$\forall j \in CS, \forall i \in TP, \forall n \in R$$

La complessità di questo vincolo rappresenta il principale fattore limitante alle dimensioni delle istanze accettabili per il modello.

#### 4.3.4 Vincolo di fairness

Al fine di raggiungere l'obiettivo indicato, la variabile massimizzata nella funzione obiettivo viene posta a minorazione di tutti i throughput associati ai test point. Ciò, in associazione alla funzione obiettivo, permette di massimizzare il throughput minimo dell'istanza considerata:

$$\xi \leq \sum_{j \in CS} \sum_{n \in R} x_{j,i,n} T_n \quad (4.31)$$

$$\forall i \in TPL$$

Questo vincolo è valido sotto l'ipotesi che lo scheduler LTE distribuisca i RB in modo fair rispetto al throughput, infatti, tra i test point associati ad uno stesso cs, quelli con SINR (e quindi CQI) più basso tenderanno a ricevere un numero maggiore di RB.

## 4.4 Problemi numerici e limiti computazionali del modello

Il modello di programmazione lineare presentato, è stato formalizzato mediante il linguaggio di modellazione AMPL[26], il solver CPLEX[27] è stato scelto come risolutore. Il risolutore, lavora sulla matrice dei coefficienti dei vincoli, che porta in formato standard attraverso due operazioni:

- **Normalizzazione**, la rappresentazione in virgola mobile viene resa omogenea dedicando un numero fisso di cifre per la mantissa di tutti i coefficienti;
- **Canonizzazione**, la matrice viene portata in forma canonica portando tutti i termini delle disequaglianze a sinistra dei segni.

La combinazione delle due operazioni può portare ad avere errori numerici nei risultati del modello, occorre quindi effettuare a priori un'analisi numerica del problema prima di poter ritenere affidabili i risultati.

### 4.4.1 Mal condizionamento della matrice dei coefficienti

In analisi numerica la precisione di un calcolatore è valutata attraverso il suo  $\epsilon$  macchina, questa grandezza non è il numero più piccolo che la macchina è in grado di rappresentare, bensì è il più piccolo numero che sommato algebricamente a 1, fornisce un risultato diverso da 1. La cancellazione numerica è la conseguenza più grave della rappresentazione con precisione finita dei numeri reali all'interno di un calcolatore. Tale fenomeno consiste nella perdita di cifre significative, dovuta ad una operazione di sottrazione tra due numeri "quasi uguali". Il termine "quasi uguali", indica che i due operandi hanno le prime  $t$  cifre uguali con  $t \in \mathbb{N}, t > 0$ . Le cause di tale inconveniente non sono

da attribuire all'operazione di sottrazione effettuata dalla macchina, ma dipendono dagli errori già presenti nei due operandi e da quelli introdotti dal processo di troncamento effettuato dal calcolatore per poter memorizzare i numeri in memoria. L'operazione di sottrazione si limita ad amplificare gli errori già presenti nei due operandi. Un'altra possibile causa di cancellazione numerica è intrinseca nel passo di normalizzazione effettuato dal risolutore; infatti quando viene fissato il numero di cifre da utilizzare per la mantissa, è possibile, se nella matrice dei coefficienti ci sono valori distanti di svariati ordini di grandezza, che ci siano diversi errori di troncamento, con il rischio non nullo che vengano arrotondati a 0 alcuni coefficienti. In un problema numerico, gli errori presenti in ingresso, inevitabili in quanto i calcolatori hanno precisione finita, possono essere più o meno amplificati nei risultati. Un problema in cui gli errori presenti nei dati vengono amplificati è detto mal condizionato. Nel caso di sistemi lineari, è possibile valutare a priori il mal condizionamento del problema, attraverso la matrice dei coefficienti. Per ogni matrice  $\mathcal{A}$  è possibile calcolare  $\mathcal{K}(A)$ , l'indice di condizionamento della matrice, nel seguente modo:

$$\mathcal{K}(\mathcal{A}) = \|\mathcal{A}\| \cdot \|\mathcal{A}\|^{-\infty} \quad (4.32)$$

Se  $\mathcal{K}(A) \sim 1$  la matrice è ben condizionata. Viceversa, se  $\mathcal{K}(A) \gg 1$ , la matrice è mal condizionata. Un primo set di risultati incoerenti nelle analisi effettuate, hanno portato alla valutazione del numero di condizionamento della matrice dei coefficienti di alcune istanze del problema, che è infatti risultato  $\gg 1$ .

#### 4.4.2 Precauzioni contro gli errori numerici

In genere i problemi di cancellazione numerica possono essere aggirati riformulando il problema. Ad esempio è possibile riscrivere un'espressione in modo che non compaiano somme algebriche con termini discordi. Nel mo-

dello però, l'espressione che porta alla cancellazione numerica è il vincolo di SINR e l'unico modo di risolvere il problema, lavorando soltanto sull'espressione, sarebbe quello di scriverlo in forma di rapporto; questo non è possibile in quanto verrebbe meno la linearità della disequazione, requisito fondamentale in un modello di programmazione lineare. Analizzando i termini presenti nel vincolo di SINR è emerso che la cancellazione numerica avveniva a causa della enorme dispersione dei valori numerici presenti nella matrice delle attenuazioni, calcolate con il modello Okumura-Hata. La soluzione utilizzata è stata quella di determinare il raggio di copertura in modo che la differenza massima tra le attenuazioni di due test point coperti dallo stesso cs non superasse i 5 ordini di grandezza. Inoltre nella valutazione del SINR si è scelto di ignorare i contributi delle BS che non includevano il test point valutato nel loro raggio di copertura. Un'ultima operazione effettuata per tamponare la possibile presenza di errori di cancellazione è stata quella di determinare un big-M *ad hoc* per ogni istanza, in modo da controllare gli effetti della normalizzazione della matrice dei coefficienti.

### 4.4.3 Limiti computazionali

Il modello presentato nei precedenti paragrafi è computazionalmente complesso. Infatti, nonostante le approssimazioni effettuate nella caratterizzazione, entro un tempo di 4/8 ore risulta impossibile risolvere istanze con più di 10 cs e 20 test point. Si è dunque scelto di procedere mediante un approccio euristico al problema, presentato nel prossimo capitolo.

# Capitolo 5

## Metodi euristici

A causa dell'elevata complessità computazionale, il modello descritto nel precedente capitolo impiega un tempo di elaborazione eccessivo e un'elevata richiesta di allocazione della memoria per trovare una soluzione ottima, se non nel caso di piccole istanze. Si fa, dunque, ricorso a un algoritmo di tipo euristico che fornisce una soluzione sub-ottima riducendo però l'utilizzo di risorse hardware e i tempi di risoluzione come si evince dai grafici in figura 5.1. L'algoritmo è articolato in tre fasi: copertura, ottimizzazione e valutazione delle tecniche MIMO. Ogni fase è realizzata attraverso un algoritmo greedy, al termine del quale viene fatta una valutazione della soluzione parziale. Il metodo viene proposto in due versioni, la prima applicata alla caratterizzazione dello scenario già presentata per il modello, il secondo invece, opera su uno scenario più realistico, dove vengono utilizzate tutte le possibili combinazioni SINR-RB e la valutazione dell'impatto elettromagnetico viene effettuata simulando il concetto di punti sensibili introdotto nel capitolo 2.



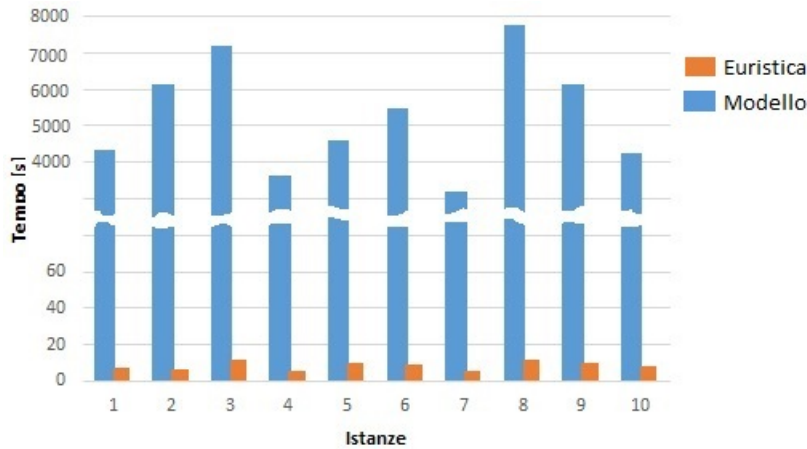


Figura 5.1: Tempi di elaborazione di modello ed euristica su 10 istanze

## 5.1 Metodo euristico semplificato

L'algoritmo proposto viene sviluppato in tre fasi distinte, rispettivamente Copertura, Fairness e Mimo. Ogni fase inizia con un ordinamento dei cs, segue la valutazione dei vincoli e si conclude con l'esecuzione di una routine dedicata alla ottimizzazione delle associazioni e alla assegnazione dei RB (Resource Block). Al termine di ogni fase viene effettuata una valutazione dei risultati ottenuti ed una eventuale ottimizzazione in post-processing (ad esempio vengono disattivati i cs ai quali non vi è associato alcun test point). L'algoritmo di Copertura cerca di raggiungere la copertura di tutti i test point, individuando i cs più strategici; l'algoritmo di Fairness realizza la fairness sul throughput andando ad analizzare i cs rimasti inattivi più lontani da quelli selezionati nella fase precedente. L'ultima fase invece, è volta alla valutazione dell'installazione delle seconde antenne per realizzare il MIMO in modalità 4x4, andando questa volta ad analizzare soltanto i cs già attivi; l'attivazione del MIMO in modalità 4x4, che sottointende l'installazione di una seconda antenna fisica e il raddoppio della potenza LTE

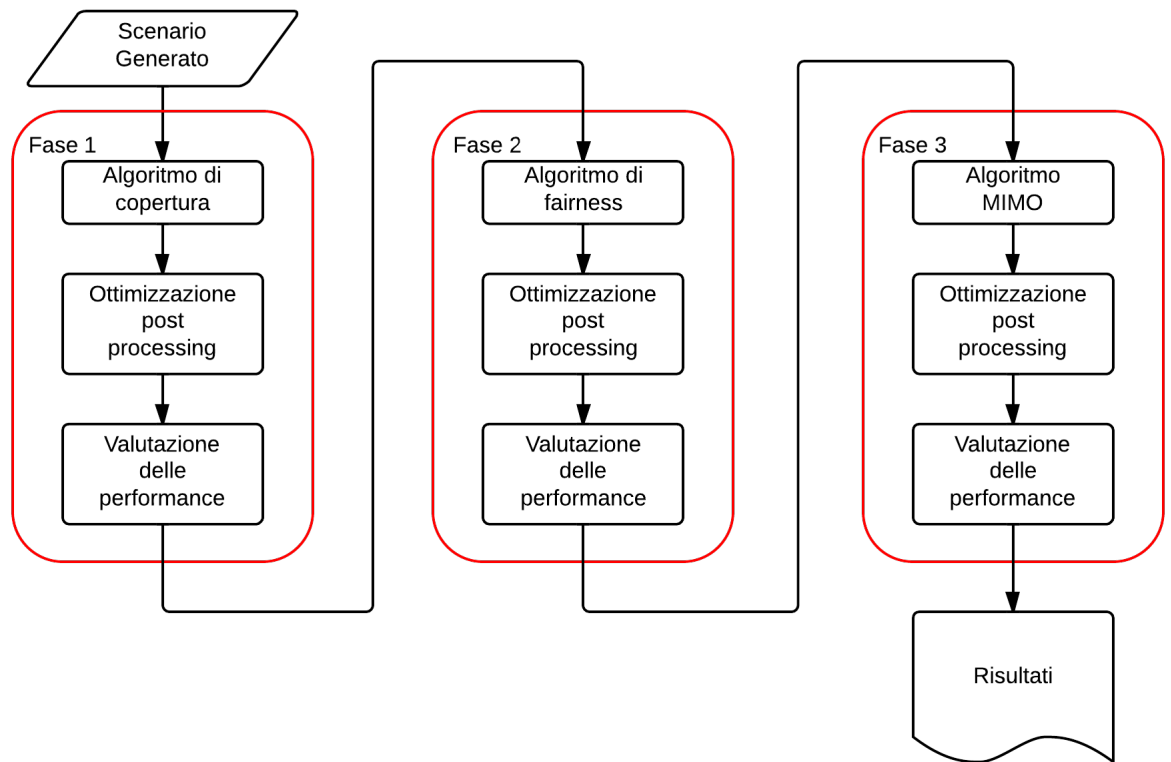


Figura 5.2: Macro diagramma di flusso del metodo euristico

attiva, viene confermata solo in caso di miglioramento della funzione obiettivo. Nel diagramma di flusso in figura 5.2 vengono evidenziate le principali fasi dell'euristica.

### 5.1.1 Algoritmo di Copertura

La prima fase dell'algoritmo è ideata per cercare di raggiungere la copertura di tutti i test point attivando il numero minimo di siti candidati. L'obiettivo quindi diventa quello di individuare i cs più strategici sotto il profilo della copertura. A tal fine i siti candidati vengono analizzati all'interno di un ciclo,

che ne scandisce le diverse configurazioni di larghezza di banda, attivando di volta in volta la migliore tra le ammissibili; la condizione d'uscita dal ciclo è il raggiungimento della copertura di tutti i test point o l'esaurimento dei candidati analizzabili. In figura 5.3 viene rappresentato il diagramma di flusso dell'algoritmo di Copertura. È importante sottolineare che al termine di questo algoritmo potrebbero essere stati analizzati tutti i siti candidati senza aver raggiunto la copertura di tutti i test point, ad esempio potrebbe esaurirsi il budget prematuramente.

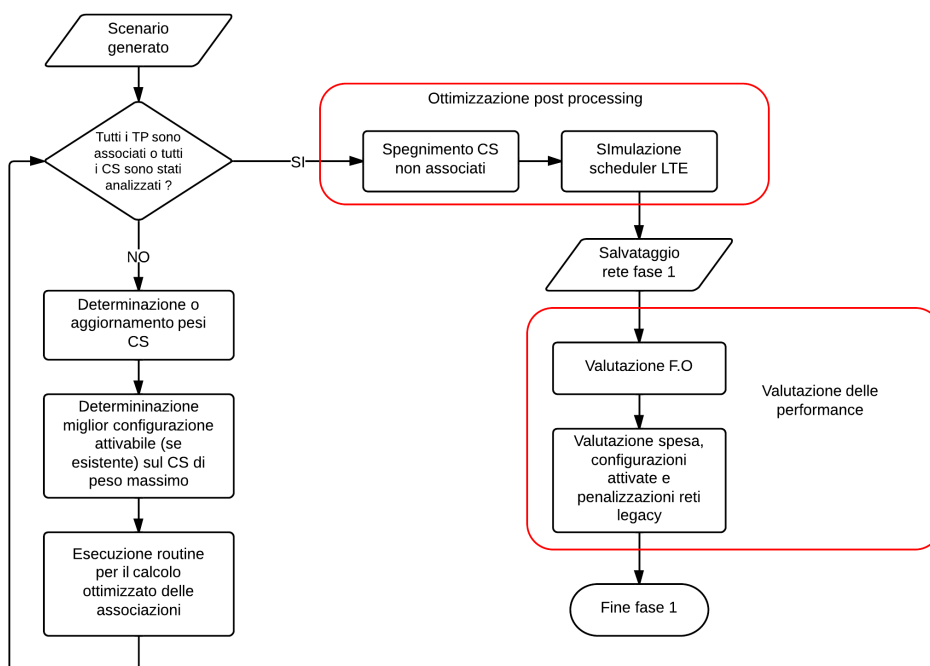


Figura 5.3: Macro diagramma di flusso dell'algoritmo di Copertura

### *Determinazione/aggiornamento dei pesi*

In fase di pre-processing vengono calcolate le massime capacità, in termini di resource block assegnabili, da ogni cs. Le massime capacità dipendono dalla massima larghezza di banda assegnabile al cs che a sua volta dipende

dal vincolo più stringente tra quelli di potenza e portanti. Viene calcolata quindi la massima larghezza di banda attivabile per entrambi i vincoli (non vengono considerate le possibili penalizzazioni sugli altri sistemi) e poi si considera il più stringente. A questo punto è possibile calcolare la massima quantità di RB assegnabili da ogni cs,  $Cmax_j$ , mediante il seguente procedimento.

Per ogni  $j \in CS$  (con CS insieme dei siti candidati) si può calcolare la potenza massima attivabile per LTE,  $P_{max_j}$ , come differenza tra la massima potenza attivabile sul sito,  $P_{ARPA_j}$  e la potenza già attiva sul sito candidato,  $p_{tot_j}$ .

$$P_{max_j} = P_{ARPA_j} - p_{tot_j}; \quad (5.1)$$

Non considerando in questa fase la possibilità di attivare il MIMO in modalità 4x4 e ricordando che si ipotizza di attivare LTE con una quota di potenza fissa,  $P_{LTE}$ , su ogni blocco da 5MHz di banda, è possibile calcolare all'attivazione di quante portanti corrisponda  $P_{max_j}$ . Il numero massimo di portanti,  $B_j^{eq}$ , viene così calcolato:

$$B_j^{eq} = \left\lfloor \frac{P_{max_j}}{P_{LTE}} \right\rfloor; \quad (5.2)$$

Occorre calcolare il limite in banda dovuto all'eventuale presenza del cosito DCS1800 (il che implica l'attivazione in mixed mode) che, non considerando in questa fase le eventuali penalizzazioni sulle reti legacy, sarà pari alla differenza tra il numero massimo di portanti  $\beta$  imposto dall'hardware del sito candidato e le portanti attive sul cosito DCS1800:

$$\Delta_j^B = \begin{cases} \beta \cdot B_{DCS_j} & \text{se esiste cosito DCS1800} \\ \beta & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (5.3)$$

A questo punto l'effettivo limite in banda,  $B_{max_j}$ , è dato dal più stringente dei due calcolati precedentemente:

$$B_{max_j} = \min(B_j^{eq}, \Delta_j^B) \quad (5.4)$$

Infine la massima capacità, in termini di RB e in assenza di penalizzazioni e MIMO 4x, è calcolabile come:

$$C_{max_j} = B_{max_j} \cdot RB_p \quad (5.5)$$

dove  $RB_p$  è il numero di resource block che un cs può assegnare per ogni blocco da 5 MHz di banda configurato.

Ad ogni iterazione, viene ricalcolato il peso di ogni cs, dapprima calcolando il costo unitario per test point coperto, come:

$$cu_j = \frac{C_j}{UC_j} \quad (5.6)$$

Dove  $UC_j$ , aggiornato ad ogni iterazione, è il numero di test point coperti dal cs  $j$  che non sono stati ancora associati ad alcun sito candidato. A questo punto il peso viene determinato come:

$$Peso_j = \begin{cases} \frac{C_{max_j}}{cu_j} & \text{se il cs non è stato ancora analizzato} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (5.7)$$

I siti candidati vengono poi ordinati in funzione del peso così calcolato, pertanto il cs col peso maggiore è quello con il miglior rapporto capacità su costo per utente servito.

### ***Verifica configurazioni attivabili***

Una volta determinato il cs di peso massimo alla iterazione  $n$ , il passo successivo è quello di determinare quale sia la massima larghezza di banda (sempre considerando blocchi da 5 Mhz) con la quale il sito candidato possa

essere attivato senza violare i vincoli direttamente dipendenti dal cs quali, potenza massima, numero massimo di portanti a 1800 MHz e rispetto del budget assegnato.

In figura 5.4 viene rappresentato il diagramma di flusso della verifica delle configurazioni attivabili.

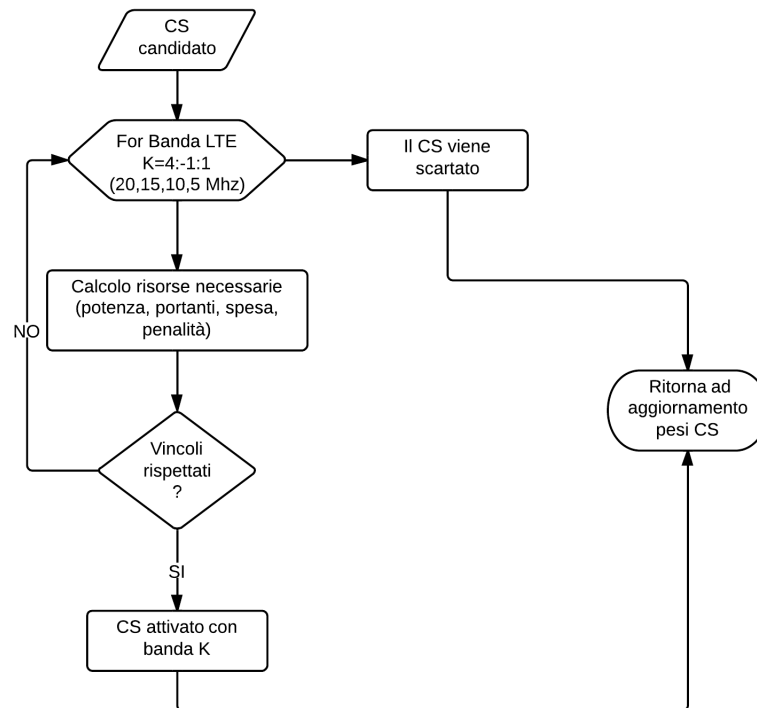


Figura 5.4: Esplosione del blocco “Verifica configurazioni attivabili”

Le configurazioni di banda vengono analizzate in ordine decrescente in termini di performance; l’idea è infatti, in questa fase, quella di attivare il cs analizzato con la maggior larghezza di banda possibile. Naturalmente le configurazioni con maggior larghezza di banda, sono anche quelle con la maggior probabilità di violare i vincoli su potenza e portanti. Agendo in questo modo, una volta trovata una configurazione ammissibile non è

più necessario analizzare le restanti, che avrebbero sicuramente prestazioni inferiori. La verifica dei vincoli di potenza e portanti viene effettuata tenendo in considerazione le eventuali penalizzazioni possibili sugli altri sistemi. Come nel modello, viene lasciata la possibilità di decrementare di una certa percentuale  $\lambda$  le potenze dei sistemi GSM e UMTS e di decurtare alcune portanti al sistema DCS1800, sempre lasciandone attive almeno un certo numero  $\gamma$ . Secondo le considerazioni appena fatte, il vincolo sulla potenza viene valutato attraverso la formula:

$$P_{LTE} PTI_k < P_{max_j} + \lambda (P_{UMTS_j} + P_{GSM_j}) \quad (5.8)$$

Dove

- $PTI_k$  è la larghezza di banda, espressa in numero di blocchi da 5 MHz, relativa alla iterazione considerata;
- $P_{UMTS_j}$  e  $P_{GSM_j}$  sono rispettivamente le potenze attive sul cs  $j$  dei sistemi UMTS e GSM900.

Pe il vincolo sulle portanti a 1800 MHz vale:

$$PTI_k + M_{D_j} < PTI_{MAX} \quad (5.9)$$

Dove:

- $M_{D_j}$  è il parametro binario, già usato nel modello, che indica l'esistenza del sistema DCS1800 su un dato sito candidato;
- $PTI_{MAX}$  è il numero massimo di portanti a 1800 MHz attivabili su un cs.

Con le formule 5.8 e 5.9 si garantisce il rispetto dei vincoli di banda e potenza al netto delle penalizzazioni sui sistemi 2G e 3G, senza però effettuare una stima di tali penalizzazioni; occorrerà pertanto una valutazione di tali

penalizzazioni in post-processing. Per il vincolo sul budget vale la seguente formula:

$$Spesa + C_j > BUDGET \quad (5.10)$$

Dove  $Spesa$  è la quota parte di budget già sostenuta per l'attivazione dei cs all'iterazione corrente e  $C_j$  è il costo di attivazione del cs  $j$ , indipendentemente dalla configurazione di banda selezionata. Qualora il ciclo dovesse concludere avendo analizzato tutte le configurazioni di banda possibili del cs senza trovarne alcuna ammissibile, allora quest'ultimo viene scartato e l'algoritmo torna alla fase di aggiornamento dei pesi.

### ***Routine per il calcolo ottimizzato delle associazioni***

Ogni volta che viene attivato un nuovo cs, vengono ricalcolate tutte le associazioni dei test point in modo da poter valutare il livello di copertura al passo  $n$ . Il criterio seguito è quello di associare ogni test point al cs attivo dal quale percepisce il SINR migliore.

In figura 5.5 il diagramma di flusso della routine per il calcolo delle associazioni. Per ogni test point vengono valutati tutti i siti candidati attivi con un raggio di copertura sufficiente a raggiungere il test point considerato, e l'associazione viene effettuata solo con il cs dal quale il test point percepisce il SINR maggiore. Se il test point era già stato associato precedentemente ad un altro cs, quell'assegnazione viene cancellata, essendo ormai cambiata la topologia della rete. Una volta determinata la matrice delle associazioni al passo  $n$ , l'algoritmo torna alla fase di aggiornamento dei pesi.



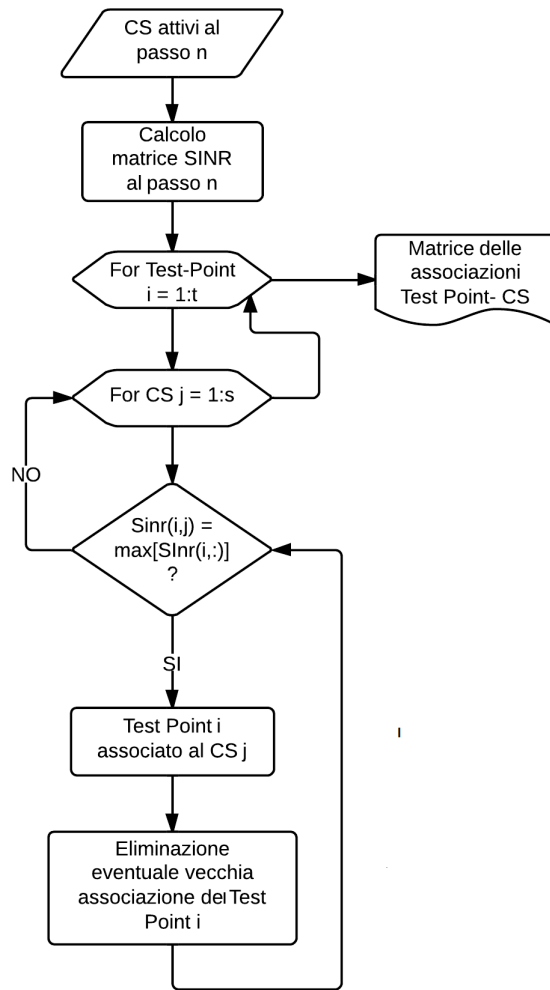


Figura 5.5: Esplosione del blocco “Routine per il calcolo ottimizzato delle associazioni”

### *Ottimizzazione post-processing*

Al fine di poter effettuare una valutazione dei risultati ottenuti è necessario svolgere alcune operazioni di ottimizzazione in post-processing. In primo luogo vengono individuati i cs attivi ai quali non è stato associato alcun test point; questi vengono disattivati, e il costo sostenuto per attivarli viene

decurtato dalla spesa corrente. Per valutare la funzione obiettivo occorre stimare tutti i throughput in rete; a tal fine si vuole simulare il comportamento dello scheduler LTE. Nota la matrice dei SINR, il numero di test point assegnati ad ogni cs, e la capacità in termini di RB di questi ultimi, è possibile simulare il comportamento dello scheduler. Come nel modello, l'ipotesi è che lo scheduler LTE assegni i RB in modo da bilanciare il throughput degli utenti serviti. Inizialmente viene assegnato un RB ad ogni test point (che abbia un'associazione) e vengono calcolati i rate normalizzati ad un RB (il che è possibile conoscendo il SINR e quindi l'efficienza spettrale). Successivamente viene calcolato il numero di RB assegnabili da ogni cs attivo, al netto di quelli già assegnati per dare un RB a tutti i test point e della limitazione ad una certa percentuale  $\eta$  del carico massimo. Per ogni cs attivo viene eseguito un ciclo che ad ogni iterazione assegna un RB al test point con il throughput più basso tra quelli associati finché il cs analizzato non esaurisce i RB assegnabili. Al termine di ogni iterazione è possibile calcolare tutti i throughput moltiplicando il numero di RB ottenuti da ogni test point per il rate normalizzato calcolato in precedenza. In figura 5.6 viene riportato il diagramma di flusso della routine di scheduler.

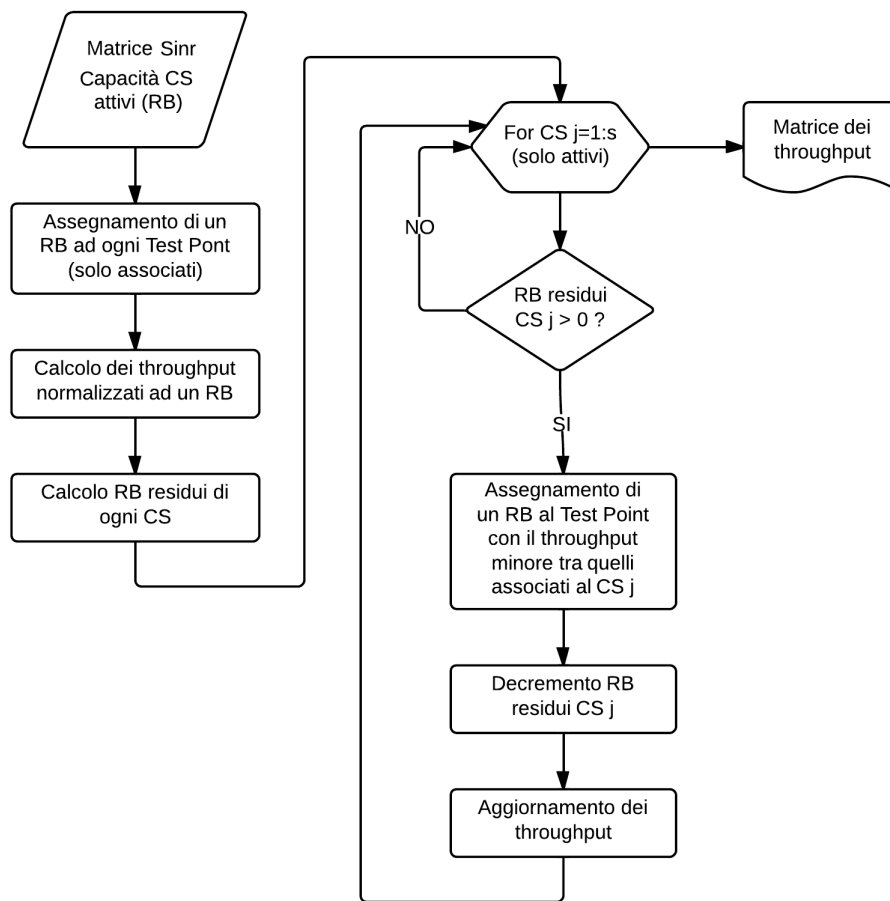


Figura 5.6: Diagramma di flusso della routine di scheduler

### *Valutazione delle performance*

A questo punto il valore della funzione obiettivo viene calcolato estraendo il minimo dei throughput di tutti i test point. Il numero di cs attivi, le relative potenze e la banda configurata, la spesa e la distribuzione dei rate sono già noti dallo stato delle variabili del problema. Occorre invece una valutazione *ad hoc* per le penalizzazioni dei sistemi 2G e 3G.

Per valutare i decrementi di potenza nel GSM e nell'UMTS si utilizza la formula:

$$Pot_{decrementata_j} = -(P_{max_j} - Pot_{LTE_j}) \quad (5.11)$$

Dove:

$$Pot_{LTE_j} = B_{LTE_j} P_{LTE} \quad (5.12)$$

rappresenta la potenza LTE attivata sul cs  $j$ , con  $B_{LTE_j}$  che rappresenta il numero di blocchi da 5 MHz del cs  $j$ .

Mentre per le portanti decrementate sul sistema DCS1800 vale la seguente:

$$port_j = -PTI_{MAX} - (B_{DCS_j} + B_{LTE_j}) \quad (5.13)$$

Dove:

- $B_{DCS_j}$  rappresenta il numero di portanti attive sul sistema DCS1800 sul cs  $j$ .

### 5.1.2 Algoritmo di Fairness

Al termine del primo algoritmo alcuni test point potrebbero non essere stati associati ad alcun cs a causa del fatto che potrebbe essere prematuramente finito il budget oppure nessuno tra i siti candidati, che coprono il test point, soddisfa le condizioni minime di SINR richieste dall'interfaccia radio LTE. Nella fase di ottimizzazione post processing eventuali cs attivati, con nessun test point associato, sono stati spenti recuperando la spesa sostenuta e modificando le condizioni di interferenza sui test point. L'obiettivo di questa fase è quello di analizzare i cs rimasti inattivi al fine di coprire i test point rimasti eventualmente scoperti e aumentare il valore della funzione obiettivo. La struttura dell'algoritmo è la medesima descritta nel paragrafo precedente

ma differisce per il criterio di ordinamento dei cs e per la modalità di decisione sulla larghezza di banda con cui attivare la BS; infatti in questa seconda fase, oltre alla verifica dei vincoli prima di attivare la BS, viene valutata la funzione obiettivo al fine di attivare solamente i cs addizionali (e quindi le configurazioni) che migliorano la funzione obiettivo. In figura 5.7 viene mostrato il diagramma di flusso della fase dell'algoritmo di Fainess.

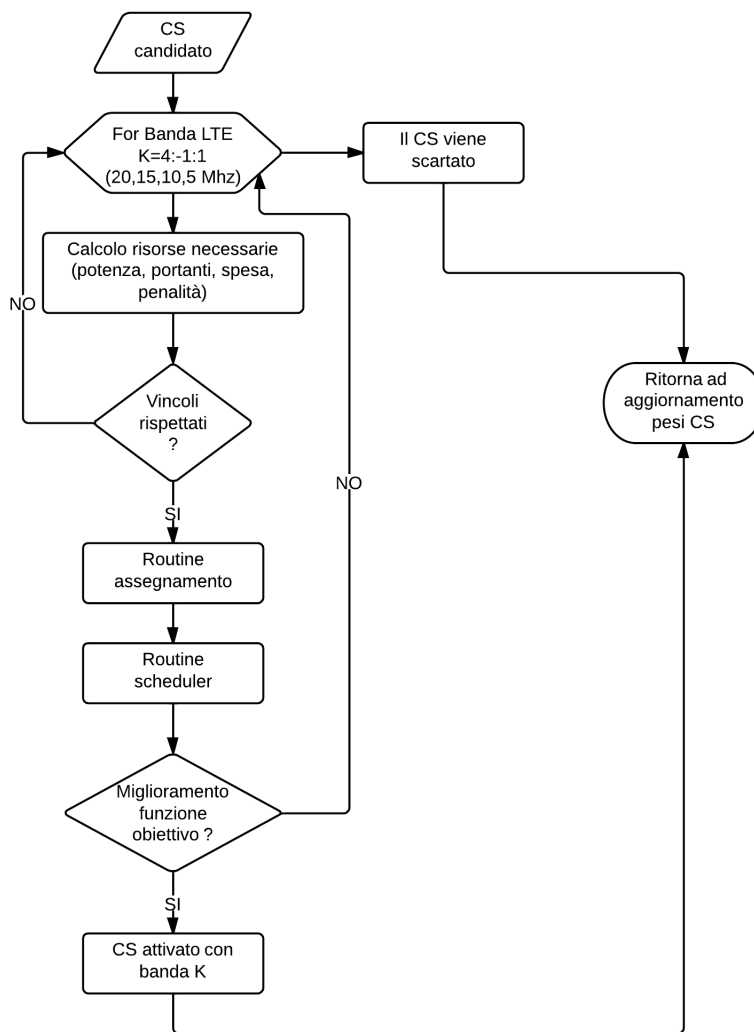


Figura 5.7: Macro diagramma di flusso dell'algorithmo di Fairness

### Determinazione/aggiornamento dei pesi

Si vogliono premiare i cs non ancora attivi che hanno più probabilità di raggiungere test point eventualmente ancora scoperti. A tal fine si calcolano tutte le distanze tra i cs non attivi e quelli già attivi. Il peso dei cs viene

posto pari alla distanza media del sito candidato stesso verso quelli già attivi; in questo modo il cs di peso maggiore è anche quello localizzato nella zona più sparsa dal punto di vista della copertura.

### **Verifica configurazioni attivabili**

Le routine di assegnamento e di scheduler sono eseguite ad ogni iterazione del ciclo che analizza le configurazioni del sito candidato. In questo modo è possibile ottenere una valutazione della funzione obiettivo per ogni possibile configurazione di tutti i cs, attivando solo quelli che portano un miglioramento della funzione obiettivo.

### **5.1.3 Algoritmo di MIMO**

In quest'ultima fase si vuole migliorare la funzione obiettivo attivando la configurazione MIMO 4x4 sui cs già attivi attraverso l'installazione di una seconda antenna fisica. La struttura è la medesima della fase precedente con l'unica eccezione del criterio con il quale vengono ordinati i siti candidati e il fatto che non è più necessario valutare il vincolo sulle portanti a 1800 MHz. Le routine di assegnamento e di scheduler sono eseguite anche in questo caso ad ogni iterazione; infatti l'attivazione della tecnologia MIMO 4x4, raddoppiando la potenza attiva, ha un forte impatto a livello interferenziale che deve essere valutato puntualmente.

### **Determinazione / aggiornamento dei pesi**

Aumentare il valore della funzione obiettivo significa aumentare il più piccolo rate presente in rete. Per ogni cs viene calcolato il rate medio dei test point associati ad esso; date le precedenti ipotesi sullo scheduler è ragionevole aspettarsi che i test point con i rate più bassi siano associati al cs che ha il

rate medio più basso. Il peso viene quindi posto pari al reciproco del rate medio relativo al cs considerato.

#### **5.1.4 Randomizzazione della soluzione**

Data la natura euristica degli algoritmi presentati, è possibile che non sempre l'ordine in cui vengono analizzati i cs porti alla soluzione migliore possibile. Pertanto in tutte le routine di determinazione/aggiornamento pesi viene applicata una randomizzazione per la selezione iterativa dei cs, dove la probabilità di essere scelto è proporzionale al peso associato al cs stesso. L'algoritmo viene dunque eseguito 10 volte per ogni istanza prendendo in considerazione l'output con il miglior valore della funzione obiettivo.

## **5.2 Metodo euristico completo**

Il metodo presentato nei paragrafi precedenti è stato realizzato applicando la stessa caratterizzazione del modello, di fatto però l'approccio euristico non presenta vincoli computazionali molto stringenti, e i problemi numerici possono essere risolti semplicemente agendo sull'ordine delle operazioni aritmetiche. Si presenta quindi l'occasione di migliorare il livello di approssimazione dello scenario, potendo così effettuare analisi con maggior precisione e su scenari più ampi.

### **5.2.1 Nuova caratterizzazione dell'interfaccia radio**

Nel modello e nell'euristica precedente, era proprio la valutazione del SINR a dover subire l'approssimazione maggiore, dalla quale, per altro la funzione obiettivo ha una dipendenza diretta. Non avendo più limiti stringenti dal punto di vista computazionale è ora ragionevole simulare l'interfaccia radio LTE in maniera più fedele, mappando la matrice dei throughput in downlink su una quantità maggiore di livelli di SINR (tabella 5.1), e lasciando allo



Tabella 5.1: Tabella throughput LTE in funzione di SINR e RB

RBs/SINR	1,033	1,303	2,06	2,61	4,519	7,962	10,52	25,177	34,119
1	180	242	360	478	...	...	...	...	...
2	360	484	720	956	...	...	...	...	...
3	540	726	1080	1434	...	...	...	...	...
4	720	968	1440	1912	...	...	...	...	...
5	900	1210	1800	2390	...	...	...	...	...
6	1080	1452	2160	2868	...	...	...	...	...
7	1260	1694	2520	3346	...	...	...	...	...
8	1440	1936	2880	3824	...	...	...	...	...
9	1620	2178	3240	4302	...	...	...	...	...
10	1800	2420	3600	4780	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
90	...	...	...	...	...	64800	86580	97200	129600
91	...	...	...	...	...	65520	87542	98280	131040
92	...	...	...	...	...	66240	88504	99360	132480
93	...	...	...	...	...	66960	89466	100440	133920
94	...	...	...	...	...	67680	90428	101520	135360
95	...	...	...	...	...	68400	91390	102600	136800
96	...	...	...	...	...	69120	92352	103680	138240
97	...	...	...	...	...	69840	93314	104760	139680
98	...	...	...	...	...	70560	94276	105840	141120
99	...	...	...	...	...	71280	95238	106920	142560
100	...	...	...	...	...	72000	96200	108000	144000

scheduler la possibilità di assegnare fino a 100 RB per utente (terminale di categoria 5).

### 5.2.2 Stima dei punti sensibili

Fino ad ora l'analisi dell'impatto elettromagnetico degli impianti è stata simulata seguendo l'ipotesi che, nell'insieme dei punti sensibili associati ad un cs, ce ne fosse uno più prossimo alla soglia massima accettabile e questo si potesse tradurre in una potenza massima totale applicabile come limite su-

periore ad un impianto. Questo approccio è ragionevole se si vuole solamente pianificare la progettazione entro i limiti consentiti dalle normative, ma non permette una valutazione qualitativa sull'andamento dei livelli di inquinamento EM. La nuova caratterizzazione dello scenario dunque, prevede che in fase di generazione dell'area di copertura, venga generato, nell'intorno di ogni cs, un set di punti sensibili. Per ognuno di questi punti sensibili viene generato un valore pseudo-casuale di fondo EM espresso in V/m. Questa modifica allo scenario porta ad uno sdoppiamento del vincolo sulla potenza massima attivabile su un sito candidato, che ora deve prevedere un controllo sulla potenza attivabile, limitata dalla tecnologia della stazione Radiobase ed uno sull'andamento dei livelli EM sui punti sensibili associati al cs considerato. Se almeno uno dei punti sensibili associati supera il valore limite di 6 V/m il vincolo non è rispettato e la configurazione viene scartata. La stima di ciascun punto sensibile viene effettuata sommando quadraticamente la potenza ricevuta, calcolata con la formula 5.14, dove  $\theta$  è un opportuno coefficiente di correzione introdotto per approssimare l'effetto dell'angolo di incidenza rispetto alla direzione di massima radiazione dell'antenna, al fondo EM calcolato in precedenza. Dopo ogni fase dell'algoritmo viene salvato lo stato dei punti sensibili, in modo da poter analizzare l'andamento dell'inquinamento EM in funzione dell'espansione della rete.

$$E = \frac{1}{\theta} \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot G}}{r} \quad (5.14)$$



# Capitolo 6

## Analisi dei risultati

Il modello presentato nel capitolo 4 è stato implementato utilizzando il linguaggio AMPL. AMPL consente di descrivere modelli matematici di programmazione lineare discreta, espressi in linguaggio di alto livello, automatizzando l'interfacciamento con qualsiasi solutore. Il solutore utilizzato è CPLEX, uno dei più diffusi software commerciali per risolvere problemi di ottimizzazione lineare, intera e mista. Le prove sono state effettuate su macchine dotate di processore Intel<sup>®</sup> Pentium Duo operante a 3 GHz e 3.5 GB di RAM, con sistema operativo Linux. Le euristiche presentate nel capitolo 5 sono state implementate con MATLAB[28], ed eseguite sulle medesima macchina utilizzata per il modello. Una prima serie di prove è stata effettuata utilizzando le medesime istanze per il modello e per il metodo euristico semplificato al fine di poter stimare la qualità di quest'ultimo. Un secondo set di prove è stato effettuato solamente sull'algoritmo euristico completo al fine di poter utilizzare istanze di cardinalità superiore; ciò si è reso necessario a causa della complessità del problema affrontato, infatti ogni istanza del modello può richiedere un tempo di elaborazione di diverse ore e saturare le risorse del calcolatore senza raggiungere la soluzione ottimale. Entrambi i set di prove sono costituiti da quattro sotto categorie volte alla valutazione dell'andamento del throughput minimo in rete, obiettivo del modello, in

funzione rispettivamente di budget, numero di siti candidati, numero di test point e livello di inquinamento EM.

## 6.1 Generatore di istanze pseudocasuali

Una volta definita la caratterizzazione dello scenario, occorre realizzare un set di istanze casuali di tale scenario sulle quali testare il modello. A tale scopo è stato realizzato uno script MATLAB, oggetto dei prossimi paragrafi.

### 6.1.1 Generazione dell'area di copertura

L'obiettivo è quello di poter generare casualmente la disposizione di un set di siti candidati (cs) e di un set di test point distribuiti all'interno di un'area di copertura. L'algoritmo di generazione dei test point e dei cs è schematizzato in figura 6.1. Le coordinate dei cs e dei test point vengono generate attraverso la funzione *randn* di MATLAB che genera numeri pseudo-casuali con d.d.p. gaussiana, accettando come parametri il centro della gaussiana e la deviazione standard. I cs vengono generati con una deviazione standard inferiore a quella dei test point in modo da risultare più centrati rispetto ai test point nell'area di copertura.

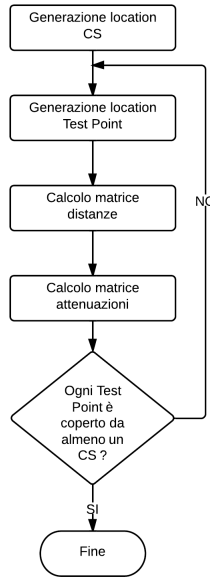


Figura 6.1: Diagramma di flusso della generazione dell'area di copertura

Al fine di non generare scenari che non ammettano soluzione, la generazione delle coordinate dei test point viene effettuata all'interno di un ciclo dove ogni volta viene verificato che ogni test point sia localizzato all'interno dell'area di copertura di almeno un certo numero di cs (più alto è il numero e più flessibile sarà lo scenario); nel caso la condizione non sia verificata vengono rigenerati soltanto i test point che non rispettano tale condizione. La determinazione del raggio di copertura dei cs è effettuata considerando la distanza massima  $d_{max}$  per la quale il SINR valutato sullo User Equipment (UE), in condizioni di interferenza nulla (cioè in presenza del solo rumore termico ambientale  $N_0$ ) e minima potenza trasmessa  $P_{tx_{min}}$ , corrisponde al minimo previsto per l'interfaccia radio LTE ( $SINR_{min}$ ). Nel nostro caso:

$$\frac{P_{rx_{min}}}{N_0 B_W} = SINR_{min} \quad (6.1)$$

dove

$$P_{rx_{min}} = P_{tx_{min}} G \alpha(d_{max}) \quad (6.2)$$

$$\frac{P_{tx_{min}} G \alpha(d_{max})}{N_0 B_W} = SINR_{min} \quad (6.3)$$

Dove:

- $P_{tx_{min}}$  è la minima potenza in ricezione su un UE;
- $G$  è il guadagno di canale;
- $\alpha$  è l'attenuazione calcolata con il modello Okumara-Hata;
- $B_W$  è l'occupazione minima di banda del segnale.

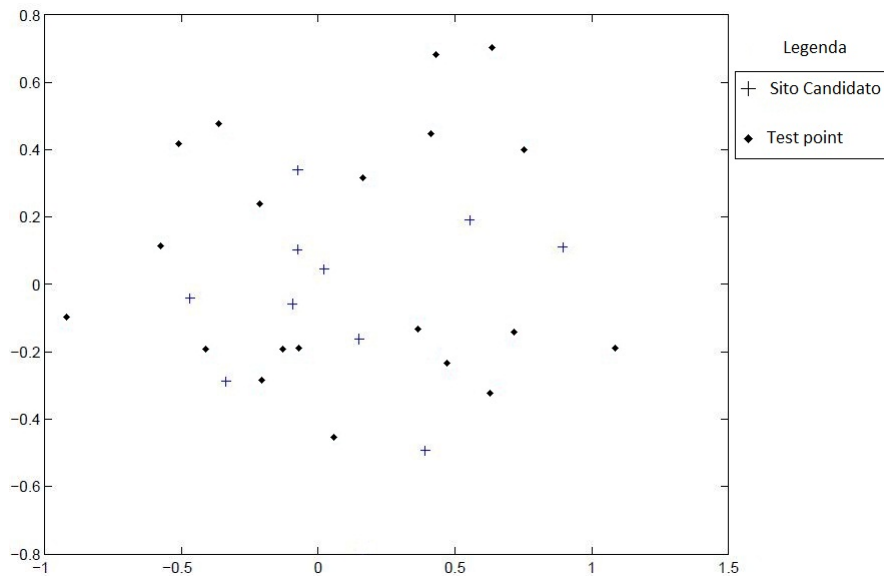


Figura 6.2: Mappa rappresentante cs e test point

Le considerazioni sui problemi numerici effettuate nella sezione 4.4 hanno pertanto in realtà ad una valutazione numerica del raggio di copertura,

che è stato determinato in modo che la differenza dell'attenuazione lineare (calcolata con il modello Okumura - Hata) tra due test point coperti dallo stesso cs, non superasse i 5 ordini di grandezza. In figura 6.2 viene riportato un esempio di scenario generato.

### 6.1.2 Generazione delle configurazioni 2G/3G

L'insieme dei cs deve essere ora caratterizzato come indicato nel paragrafo 4.1.1. La generazione dei parametri non può essere completamente casuale, in quanto è necessario garantire, e possibilmente controllare il livello di sviluppo della rete. Sostanzialmente si è voluto poter imporre, per ogni sistema, la percentuale minima di presenza in rete; la soluzione è ottenuta generando i vettori binari,  $M_G$ ,  $M_D$  e  $M_U$ , che indicano la presenza rispettivamente dei sistemi GSM900, DCS1800 e UMTS su un generico cs, all'interno di cicli condizionati al raggiungimento della percentuale voluta. Anche le configurazioni dei singoli sistemi su ogni cs non possono essere totalmente casuali; infatti generalmente il sistema UMTS è attivo con più potenza rispetto ai sistemi GSM. Per tutti i sistemi, sia il numero di portanti che il livello di potenza configurato vengono selezionati casualmente all'interno di un insieme discreto di possibili valori, in particolare per ogni sistema è accettato solo un sottoinsieme dei livelli disponibili.

Potenze								
Livello	1	2	3	4	5	6	7	8
Potenza in W	5	6	7	8	9	10	11	12

Tabella 6.1: Livelli di potenza disponibili



Portanti			
Livello	1	2	3
Numero di portanti	1	2	3

Tabella 6.2: Numeri di portanti disponibili

Nelle tabelle 6.1 e 6.2 sono rispettivamente indicati i livelli di potenza e il numero di portanti utilizzati per la caratterizzazione. In tabella 6.3 vengono invece evidenziati i valori di potenza e portanti accettabili per i diversi sistemi. I valori indicati per le potenze sono da intendersi come [W] su una portante al connettore d'antenna, mentre le portanti indicate in tabella hanno valore doppio nei sistemi GSM900 e DCS1800 rispetto al sistema UMTS. Ad esempio il livello 2 sul GSM900 indica che il sistema è configurato con 4 portanti mentre sull'UMTS indica che il sistema è configurato con 2 portanti.

Tabella 6.3: Livelli di potenza e portanti accettabili

Sistema	Livelli di potenza accettabili	Numero di portanti accettabili
GSM 900	1 2 3 4	1 2 3
DCS 1800	1 2 3 4	1 2 3
UMTS	4 5 6 7 8	3

### 6.1.3 Generazione limiti di inquinamento elettromagnetico

Come visto nel capitolo 2, per ogni cs è presente un insieme di punti geolocalizzati particolarmente esposti alle radiazioni emesse dall'impianto, detti punti sensibili. Ottimizzare uno scenario che preveda la valutazione dei livelli di campo per un insieme di punti associato ad ogni cs appesantirebbe troppo il modello, occorre quindi cercare un compromesso. L'ipotesi fatta

è quella che, tra tutti i punti sensibili relativi ad un certo sito candidato, ce ne sia uno in particolare che raggiunga più rapidamente la soglia di 6 V/m, questo può essere tradotto in un vincolo hard sulla massima potenza attivabile su ogni cs. Il problema è quindi quello di generare, più o meno casualmente, un valore massimo di potenza attivabile su ogni cs. La generazione del parametro non può avvenire in maniera indipendente dalla configurazione precedentemente generata sul cs, infatti è fondamentale non generare istanze dove l'attivazione del sistema LTE non sia possibile nemmeno con la configurazione minima. Nel diagramma di flusso in figura 6.3 è schematizzata la generazione dei limiti di potenza dovuti all'inquinamento elettromagnetico.

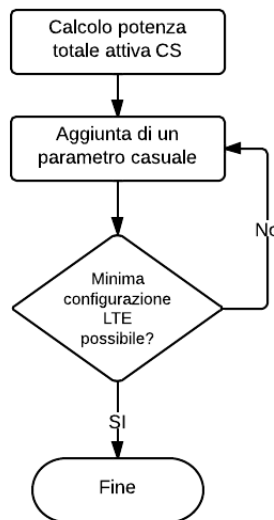


Figura 6.3: Diagramma di flusso della generazione dei limiti di inquinamento elettromagnetico

La generazione delle potenze massime  $P_{ARPA}$  viene quindi effettuata calcolando prima la potenza attiva totale in ogni cs, alla quale poi viene sommato un numero casuale; se la potenza massima risultante non permet-

te l'attivazione in configurazione minima di LTE, il numero casuale viene rigenerato.

## 6.2 Prove su modello e metodo euristico semplificato

In questo paragrafo vengono presentati i risultati delle prove effettuate utilizzando lo stesso set di istanze su modello ed algoritmo euristico semplificato. Per ogni tipologia di analisi sono state considerate dieci istanze per le quali vengono presentati, dapprima i risultati complessivi, mediati sulle dieci istanze e infine viene presentata in dettaglio una istanza a titolo di esempio. Queste analisi, oltre a fornire delle indicazioni sull'andamento delle grandezze del problema, fungono da banco di prova per la qualità dell'algoritmo euristico. Nelle tabelle 6.4 e 6.5 vengono riassunte le caratteristiche comuni a tutte le istanze analizzate.

Tabella 6.4: Caratteristiche generali dello scenario - Modello ed euristica semplificata - parte 1

Scenario		Distribuzione	
Area di copertura [ $km^2$ ]	Raggio di copertura di un CS [ $km$ ]	Siti Candidati	Test Point
15	0,9	$\sigma^2 = 130m; m_x = 0$	$\sigma^2 = 400m; m_x = 0$

Tabella 6.5: Caratteristiche generali dello scenario - Modello ed euristica semplificata - parte2

Presenza Siti			Rumore termico [bit/s/Hz]	Fattore di carico della rete
GSM 900	GSM 1800	UMTS 2100	$N_0$	$\eta$
70%	50%	70%	$10^{-23}$	0,7

Per ogni set di istanze viene effettuato un confronto tra i risultati del modello e quelli dell'approccio euristico. Al fine di interpretare correttamente

l'entità dell'approssimazione introdotta dall'euristica è opportuno ricordare che la funzione obiettivo, può assumere solamente i valori discreti indicati in tabella 6.6. Ad esempio, nel caso in cui vi sia un cs in grado di servire un test point con 25 resource block, quest'ultimo potrà percepire un rate rispettivamente di 6050 Kb/s o 24050 Kb/s a seconda che sia associato con il primo o il secondo indice di modulazione.

Tabella 6.6: Possibili valori di throughput, espressi in kbit/s

<b>RBs/SINR</b>	1,303	10,52	34,119
1	242	962	1440
2	484	1924	2880
3	726	2886	4320
4	968	3848	5760
5	1210	4810	7200
6	1452	5772	8640
7	1694	6734	10080
8	1936	7696	11520
9	2178	8658	12960
10	2420	9620	14400
11	2662	10582	15840
12	2904	11544	17280
13	3146	12506	18720
14	3388	13468	20160
15	3630	14430	21600
16	3872	15392	23040
17	4114	16354	24480
18	4356	17316	25920
19	4598	18278	27360
20	4840	19240	28800
21	5082	20202	30240
22	5324	21164	31680
23	5566	22126	33120
24	5808	23088	34560
25	6050	24050	36000

### 6.2.1 Valutazione della funzione obiettivo in funzione del budget - Modello ed euristica semplificata

La prima analisi valuta l'andamento della funzione obiettivo, ossia il throughput minimo presente in rete, in funzione del budget. Le caratteristiche principali delle 10 istanze analizzate sono riassunte in tabella 6.7

Tabella 6.7: Caratteristiche principali (Budget) - Modello ed euristica semplificata

Siti Candiati	Test Point	Budget			Inquinamento elettromagnetico
20	40	Illimitato	~ 66%	~ 50%	Standard

In figura 6.4 sono indicati i valori medi assunti dalla funzione obiettivo stimata in tre punti di budget, corrispondenti inizialmente ad un valore illimitato e successivamente pari a circa il 66% e al 50% di quanto speso dal modello nel primo caso. I valori indicano un discostamento medio tra l'euristica e il modello pari a circa l'11.36%, avvicinandosi notevolmente nelle istanze con budget illimitato; infatti in queste istanze l'euristica è libera di assegnare un numero maggiore di risorse, inoltre il valore massimo 6050 kbit/s raggiunto nelle analisi effettuate corrisponde al massimo raggiungibile con il valore minimo di SINR, pertanto è sufficiente che esista un test point al quale non è possibile assegnare un indice di modulazione superiore al minimo per limitare il livello di fairness a 6050 kbit/s.

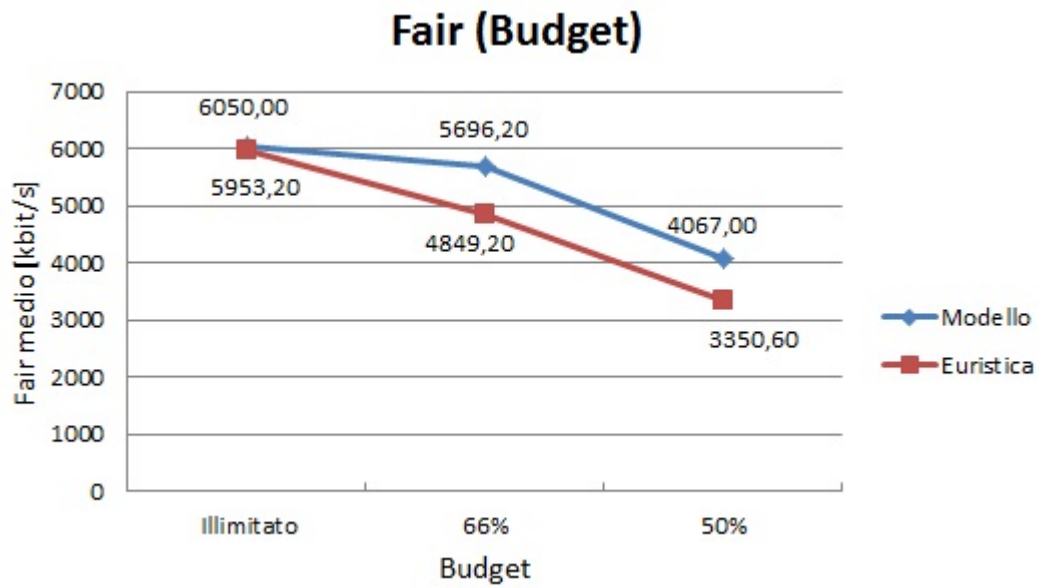


Figura 6.4: Andamento della funzione obiettivo (Budget) - Modello ed euristica semplificata

## 6.2.2 Valutazione della funzione obiettivo in funzione del numero di siti candidati - Modello ed euristica semplificata

La seconda analisi valuta l'andamento della funzione obiettivo in funzione del numero di siti candidati all'interno dell'area di interesse. Gli scenari mantengono le medesime caratteristiche delle analisi precedenti ad eccezione del numero dei siti candidati, che ora varia nelle tre prove dell'istanza, e del budget, ora mantenuto illimitato. Per ogni istanza è stata effettuata una prima prova con 8 siti candidati, una seconda nella quale vengono aggiunti ulteriori 4 cs, e infine una terza prova dove ne vengono aggiunti ulteriori 3 (per un totale di 15). Le caratteristiche principali delle 10 istanze analizzate sono riassunte in tabella 6.8.

Tabella 6.8: Caratteristiche principali (Siti Candidati) - Modello ed euristica semplificata

Siti Candidati			Punti di Test	Budget	Inquinamento elettromagnetico
8	12	15	20	Illimitato	Standard

In figura 6.5 sono indicati i valori medi assunti dalla funzione obiettivo stimata in funzione del numero di siti candidati. I valori indicano un discostamento medio tra l'euristica e il modello pari a circa l'8.31%; anche in questo caso il valore massimo della funzione obiettivo risulta essere limitato dai livelli di SINR. Sia nel modello che nell'euristica si nota un aumento lineare del throughput minimo al crescere del numero di siti candidati. Nel contesto analizzato l'aumento del numero di siti candidati assume un significato particolare; infatti secondo l'ipotesi che i siti candidati siano le stazioni radio base delle reti legacy, analizzare un'istanza un numero maggiore di cs significa ipotizzare una rete di partenza maggiormente sviluppata.



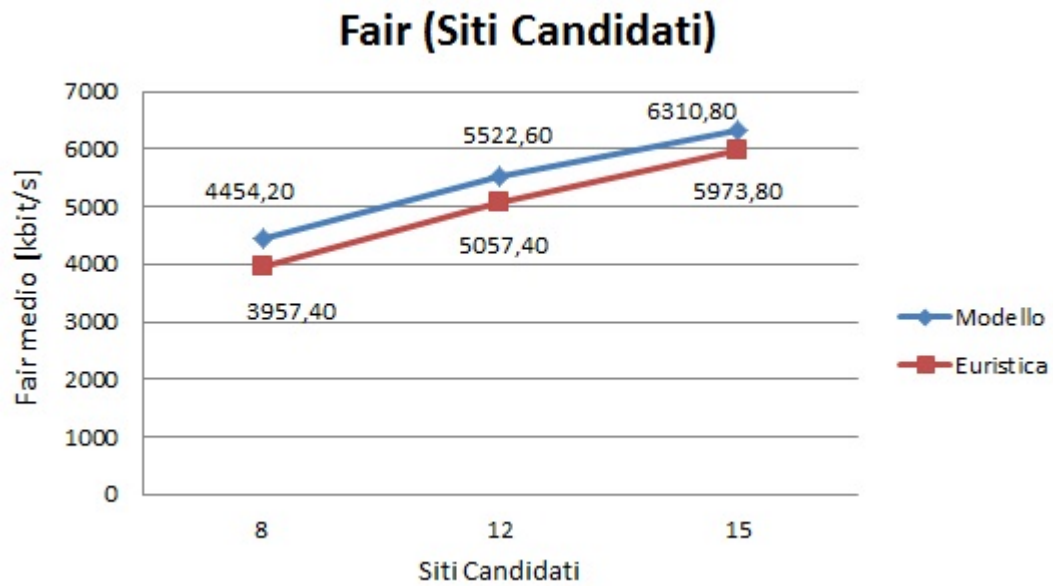


Figura 6.5: Andamento della funzione obiettivo (Siti candidati) - Modello ed euristica semplificata

### 6.2.3 Valutazione della funzione obiettivo in funzione del numero di punti di test - Modello ed euristica semplificata

Nella terza analisi viene valutato l'andamento della funzione obiettivo al variare del numero di utenti, ovvero viene fatto variare il numero di test point all'interno dell'area di copertura. Gli scenari analizzati mantengono le medesime caratteristiche delle istanze precedenti ad eccezione del numero di test point, che ora varia nelle tre prove dell'istanza, e del budget, mantenuto illimitato. Per ogni istanza è stata effettuata una prima prova con 20 test point, una seconda con 35 e infine una terza con 50. Le caratteristiche principali delle 10 istanze analizzate sono riassunte in tabella 6.9.

Tabella 6.9: Caratteristiche principali (Test point) - Modello ed euristica semplificata

Siti candidati	Test point			Budget	Inquinamento elettromagnetico
10	20	35	50	Illimitato	Standard

In figura 6.6 sono indicati i valori medi assunti dalla funzione obiettivo stimata in funzione del numero dei punti di test. Sia nel modello che nell'euristica sia nota una drastica diminuzione del throughput all'aumentare del numero di utenti. I valori indicano un discostamento medio tra l'euristica e il modello pari a circa il 15.56%; tale discostamento è giustificabile dal fatto che l'approssimazione introdotta dalla routine di assegnazione dei resource block, presente nell'euristica, viene amplificato all'aumentare del numero di test point.

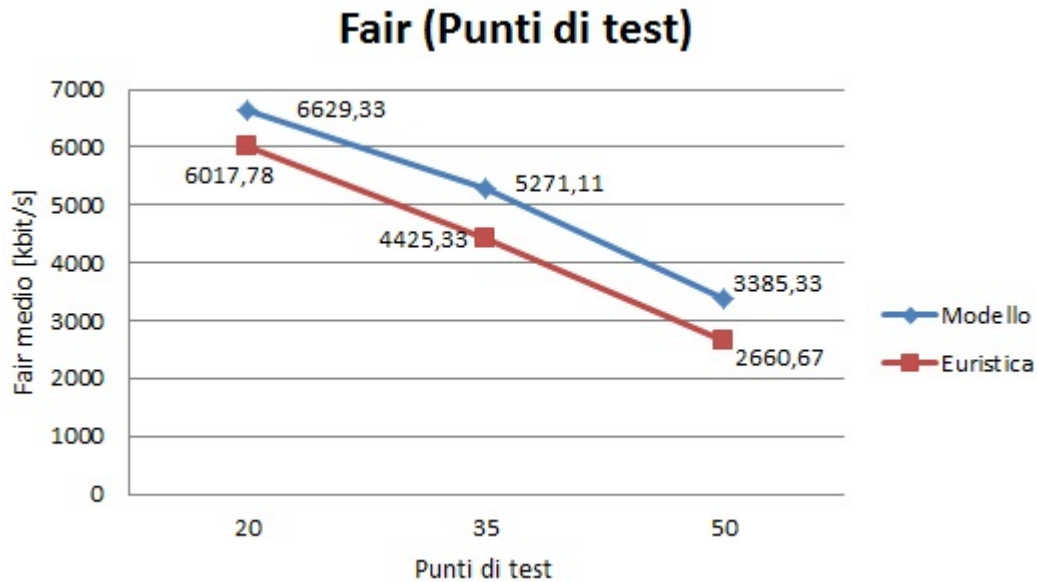


Figura 6.6: Andamento della funzione obiettivo (Test point) - Modello ed euristica semplificata

L'algoritmo che esegue la routine di scheduler, fissato il cs, determina il rate minimo presente tra i test point associati a quest'ultimo; dopodiché analizza sequenzialmente i test point associati ed esegue di volta in volta un confronto tra il throughput minimo, valutato in precedenza, e quello del test point analizzato: se il test point ha un rate percepito pari al minimo allora viene schedulato un ulteriore RB per quest'ultimo. L'algoritmo procede fino all'esaurimento dei resource block assegnabili dal cs. L'efficienza di questo approccio peggiora sensibilmente all'aumentare del numero di test point; infatti è sufficiente pensare al caso limite nel quale inizialmente tutti i test point associati al cs analizzato hanno il medesimo rate percepito, quindi pari al minimo: in questo caso il cs potrebbe terminare i resource block assegnabili prima di aver analizzato una volta tutti i test point adesso associati.

## 6.2.4 Valutazione della funzione obiettivo in funzione dei livelli di inquinamento elettromagnetico - Modello ed euristica semplificata

Nel quarto set di istanze viene valutato l'andamento della funzione obiettivo al variare dell'inquinamento elettromagnetico. Coerentemente con la caratterizzazione presentata nel capitolo 4, l'effetto dell'aumento dell'inquinamento elettromagnetico è simulato facendo diminuire la massima potenza attivabile su ogni sito candidato ( $P_{ARPA}$ ). Gli scenari analizzati mantengono le medesime caratteristiche delle istanze precedenti ad eccezione del coefficiente presente nella formula di generazione (pseudo-casuale) della  $P_{ARPA}$ , che ora varia nelle tre prove dell'istanza, e del budget, mantenuto illimitato. Le caratteristiche principali delle 10 istanze analizzate sono riassunte in tabella 6.10

Tabella 6.10: Caratteristiche principali (Inquinamento elettromagnetico) - Modello ed euristica semplificata

Siti candidati	Test point	Budget	Inquinamento elettromagnetico		
10	20	Illimitato	Standard	Limitato	Molto limitato

I valori in figura 6.7 indicano un discostamento medio tra l'euristica e il modello pari a circa il 12.47%. Le istanze risolte evidenziano una forte dipendenza del throughput dall'interferenza e dai livelli di inquinamento elettromagnetico, infatti il valore della funzione obiettivo è limitato dalla probabilità, molto alta, che esista almeno un test point associato con il minimo livello di SINR accettabile.

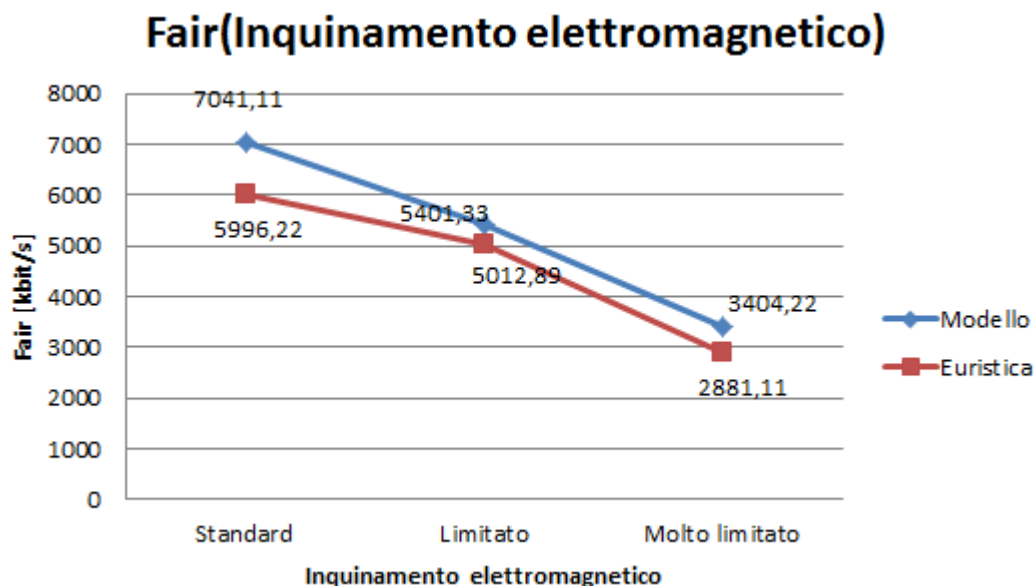


Figura 6.7: Andamento della funzione obiettivo (Inquinamento elettromagnetico) - Modello ed euristica semplificata

## 6.2.5 Analisi completa di una singola istanza

In questo paragrafo vengono presentati i risultati di un'istanza particolarmente significativa al fine di osservare tutte le grandezze dimensionate. Si è scelto di analizzare un'istanza appartenente al primo set, nella quale viene ricavata una curva di budget; infatti in questo caso viene massimizzata la user experience dell'utente tenendo fisso il valore di budget, il che differisce dagli altri modelli di pianificazione radio a costo minimo. Vengono mostrate in tabella 6.11 le principali caratteristiche dello scenario in esame:

Tabella 6.11: Caratteristiche principali (Singola istanza) - Modello ed euristica semplificata

Siti candidati	Test point	Budget [k€]		Inquinamento elettromagnetico
		Illimitato	600 400	
10	20			Standard

In tabella 6.12 sono indicate le configurazioni dei sistemi 2G e 3G dei 10 siti candidati, intesi come numero di portanti per potenza, dove per i valori di portanti e potenze valgono le considerazioni fatte nel capitolo 4. Nelle ultime tre colonne vengono mostrate, rispettivamente la potenza totale, la potenza massima attivabile sul sito candidato (l'attivazione del sistema LTE comporta un surplus di potenza da 15 W ad un massimo di 120 W) e il costo di attivazione del sistema sul cs (in modalità standard 2x2).

Tabella 6.12: Configurazioni siti candidati

Configurazione siti candidati						
Sito Candidato	GSM	DCS	UMTS	$P_{tot}[W]$	PARPA [W]	Costo [k€]
1	3x7	3x5	3x9	63	145	100
2	1x7	3x8	3x8	55	163	100
3	-	-	-	-	142	210
4	1x7	-	3x11	47	97	110
5	-	1x5	3x8	39	91	60
6	1x8	-	3x11	41	158	110
7	1x7	2x8	3x10	60	112	100
8	2x5	1x8	3x10	48	110	100
9	2x7	-	3x10	44	156	110
10	2x8	2x5	3x11	59	124	100

In figura 6.8 viene presentata la mappa dello scenario analizzato.

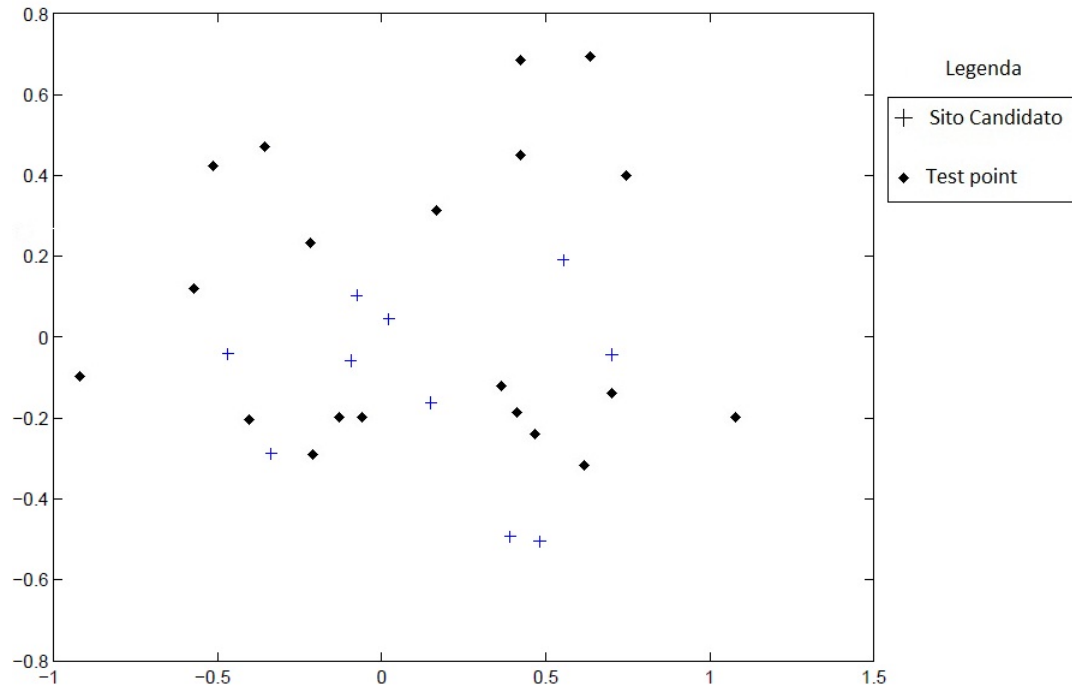


Figura 6.8: Mappa dello scenario (Singola istanza) - Modello ed euristica semplificata

## Risultati

Nelle tabelle 6.13 e 6.14 sono riassunte le grandezze dimensionate dal modello e dall'euristica.

Tabella 6.13: Risultati (Singola istanza) - Modello ed euristica semplificata - parte 1

	Budget [k€]	Fair [kbit/s]	Throughput medio [kbit/s]	Spesa [k€]
Euristica	Illimitato	6050	17310	870
	600	4598	8387	490
	400	3388	5957	220
Modello	Illimitato	6050	9800	880
	600	5808	6734	360
	400	3848	5934	210

Tabella 6.14: Risultati (Singola istanza) - Modello ed euristica semplificata - parte 2

	Budget	cs con decrementi di potenza	cs con decrementi di portanti	CS attivati (2x2)	CS attivati (4x4)
Euristica	Infinito	3	2	1	5
	600	1	0	2	1
	400	0	0	2	0
Modello	Infinito	4	2	0	7
	600	2	1	0	3
	400	0	0	2	0

In figura 6.9 si evidenzia come sia nell'euristica che nel modello l'upper bound della funzione obiettivo sia limitato dall'interferenza essendo anche in questo caso presente almeno un test point associato con il minimo indice di modulazione.



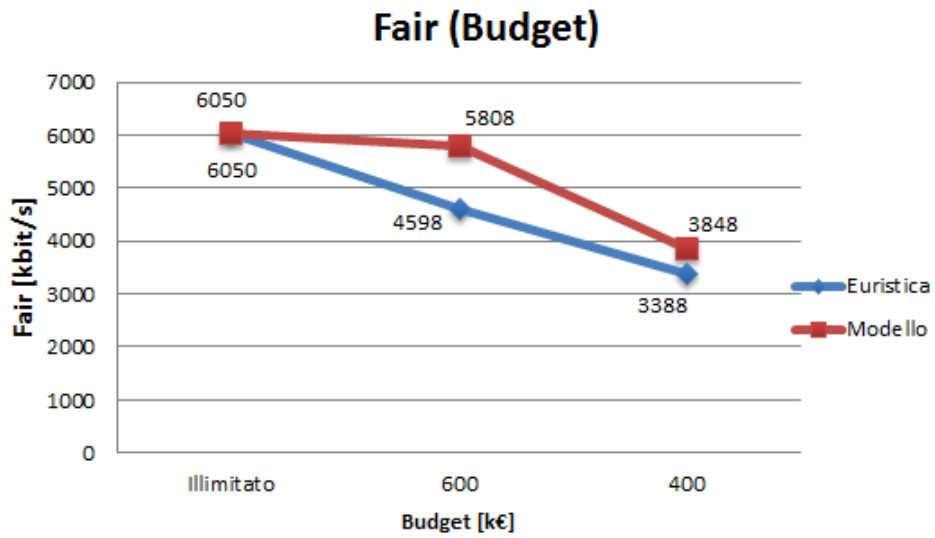


Figura 6.9: Andamento della funzione obiettivo (Singola istanza) - Modello ed euristica semplificata

Nei grafici in figura 6.10 e 6.11 vengono evidenziati il numero dei siti candidati attivati e la relativa spesa sostenuta sia dal modello che dall'euristica.

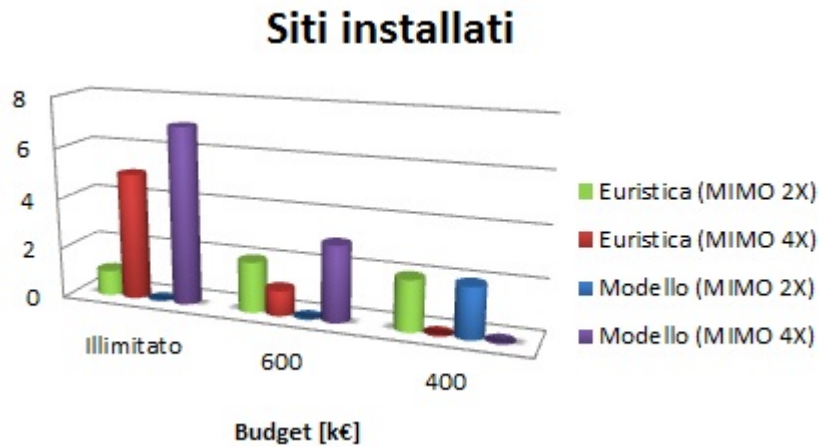


Figura 6.10: Andamento dei siti installati (Singola istanza) - Modello ed euristica semplificata

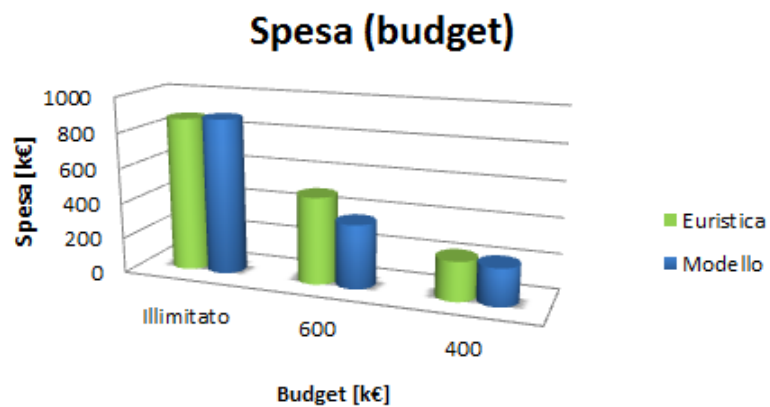


Figura 6.11: Andamento della spesa sostenuta (Singola istanza) - Modello ed euristica semplificata

Nelle figure 6.12 e 6.13 si nota che, nonostante il modello effettui una più efficace ottimizzazione rispetto all'euristica, quest'ultima riesce comunque a decrementare potenza e portanti sulle reti legacy per migliorare i risultati della funzione obiettivo.

### Siti candidati con decrementi di portanti

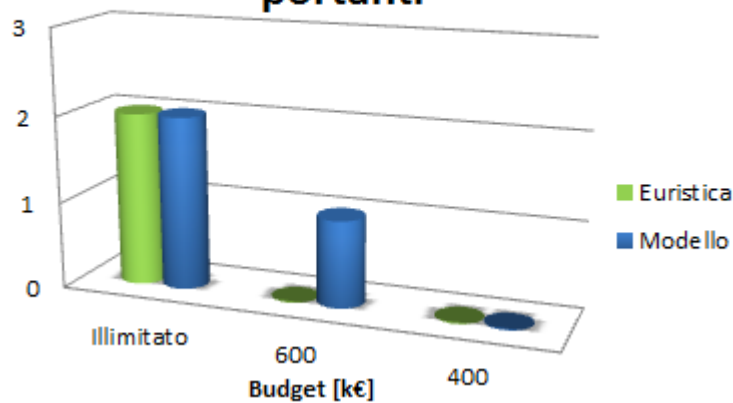


Figura 6.12: Andamento dei siti candidati con decrementi di portanti (Singola istanza) - Modello ed euristica semplificata

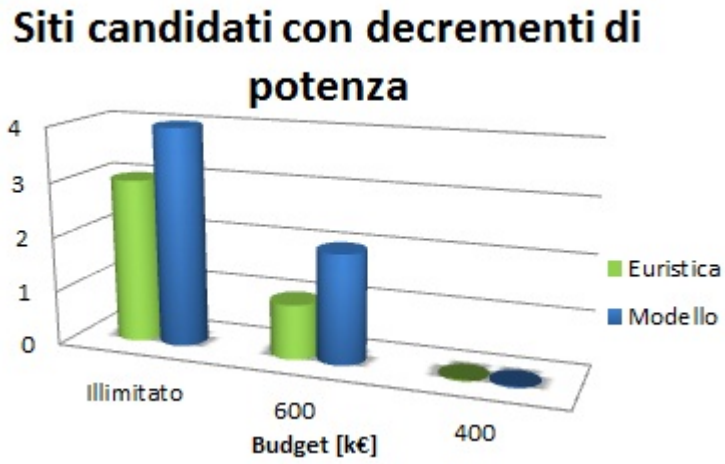


Figura 6.13: Andamento dei siti candidati con decrementi di potenza (Singola istanza) - Modello ed euristica semplificata

A titolo d'esempio viene riportata in figura 6.14 la soluzione calcolata con il modello e con l'euristica nell'istanza con budget illimitato.

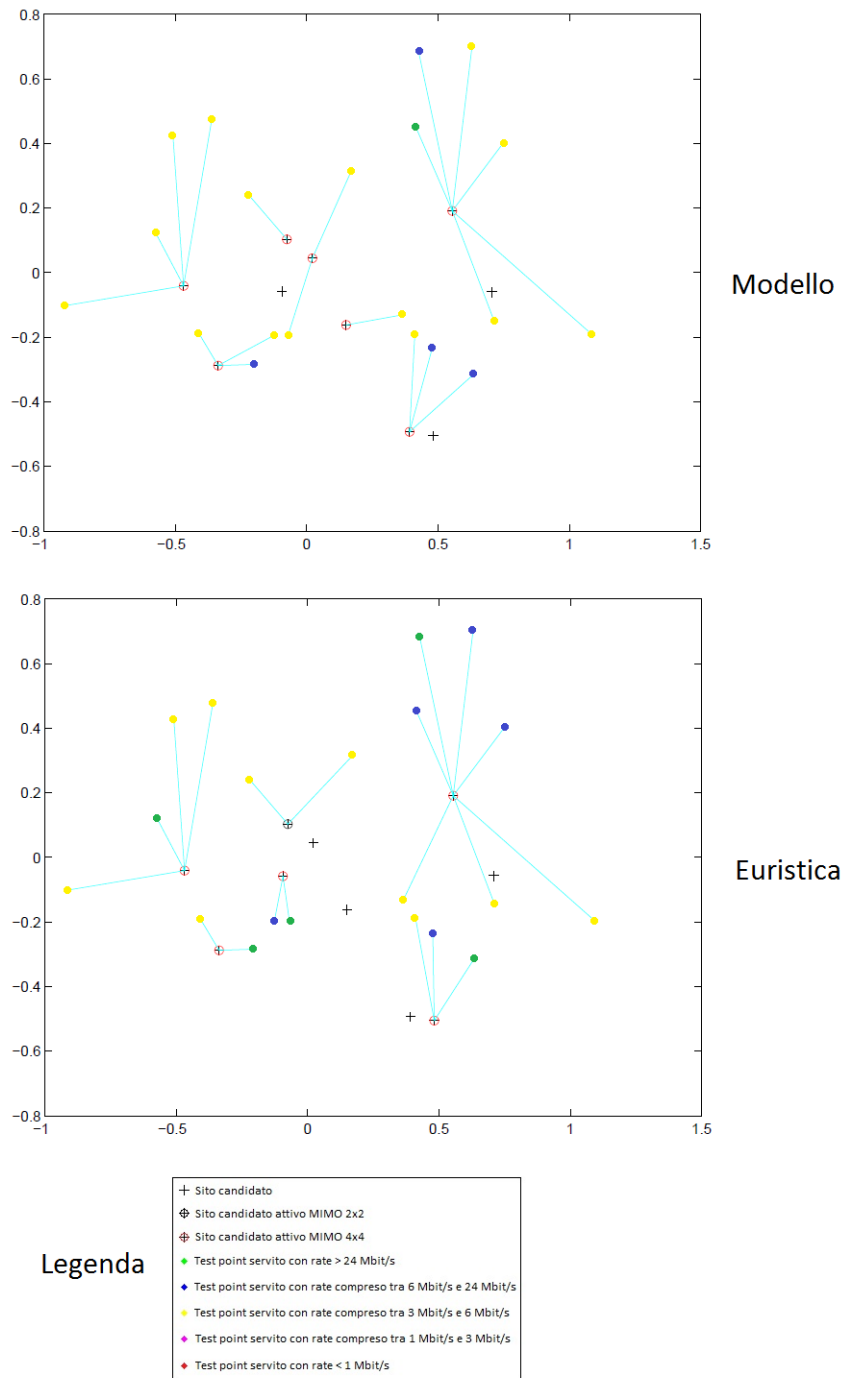


Figura 6.14: Soluzione calcolata con budget illimitato (Singola istanza)

## 6.3 Prove su metodo euristico completo

Il metodo euristico completo non porta differenze strutturali rispetto a quello confrontato con il modello e quindi ne conserva l'affidabilità. In pratica, la maggiore flessibilità introdotta grazie all'utilizzo di un numero maggiore di livelli di SINR (tabella 5.1), fa ipotizzare un possibile miglioramento delle prestazioni in termini di valori medi assunti dalla funzione obiettivo. Anche in questo caso la funzione obiettivo viene valutata facendo variare budget, numero di siti candidati, numero di utenti e inquinamento elettromagnetico; questa volta però assume maggiore importanza l'ultimo set di istanze, grazie all'introduzione dei punti sensibili. Le caratteristiche degli scenari analizzati sono riassunte nelle tabelle 6.15 e 6.16.

Tabella 6.15: Caratteristiche generali dello scenario - Euristico completa - parte 1

Scenario		Distribuzione	
Area di copertura [ $km^2$ ]	Raggio di copertura di un CS [ $km$ ]	Siti Candidati	Test Point
15	0,9	$\sigma^2 = 130m; m_x = 0$	$\sigma^2 = 400m; m_x = 0$

Tabella 6.16: Caratteristiche generali dello scenario - Euristica completa - parte 2

Presenza Siti			Rumore termico [bit/s/Hz]	Fattore di carico della rete
GSM 900	GSM 1800	UMTS 2100	$N_0$	$\eta$
70%	50%	70%	$10^{-23}$	0,7

### 6.3.1 Valutazione della funzione obiettivo in funzione del budget - Metodo euristico completo

Il primo set di istanze valuta l'andamento della funzione obiettivo, ossia del minimo valore di throughput presente in rete, al variare del budget. Le

caratteristiche principali delle 10 istanze analizzate sono riassunte in tabella 6.17.

Tabella 6.17: Caratteristiche principali (Budget) - Euristiche complete

Siti Candiati	Test Point	Budget			Inquinamento elettromagnetico
		Illimitato	~ 66%	~ 50%	
40	80				Standard

In figura 6.15 sono indicati i valori della funzione obiettivo, mediati sulle 10 istanze, assunti dalla funzione obiettivo nei tre punti di budget, corrispondenti ad un valore illimitato e successivamente a circa il 66% e al 50% di quanto speso nella prima prova. Dal grafico si può osservare come la maggior flessibilità introdotta comporti un aumento sensibile dei valori medi assunti dalla funzione obiettivo; di fatto ora sono possibili numerose associazioni tra cs e test point con valori intermedi dell'indice di modulazione.

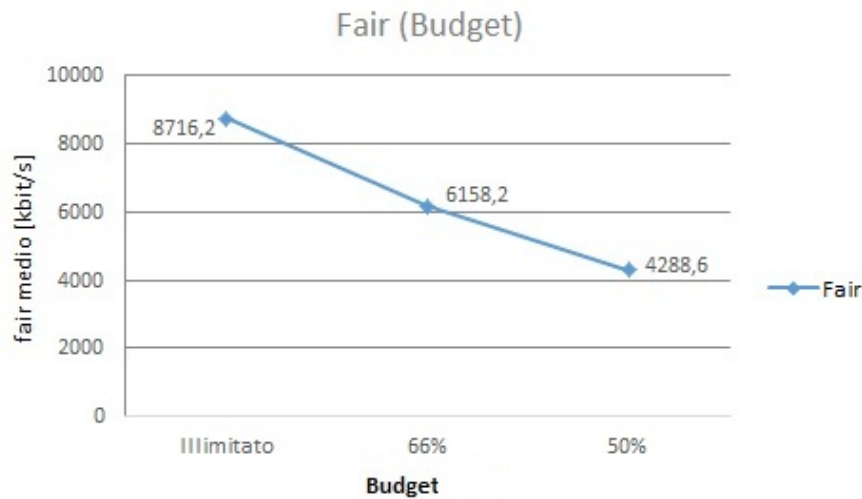


Figura 6.15: Andamento della funzione obiettivo (Budget) - Euristiche complete

### 6.3.2 Valutazione della funzione obiettivo in funzione del numero di siti candidati - Metodo euristico completo

Nel secondo set di analisi viene valutata la funzione obiettivo variando il numero dei siti candidati nello scenario in analisi. Le istanze mantengono le stesse caratteristiche descritte nel paragrafo precedente con l'eccezione del budget, posto ad un valore illimitato nei tre punti di valutazione, e dei siti candidati che vengono fatti variare. Come riassunto in tabella 6.18, per ogni istanza è stata effettuata una prima prova con 20 siti candidati, una seconda nella quale ne vengono aggiunti ulteriori 10, e infine una terza prova con complessivamente 40 siti candidati.

Tabella 6.18: Caratteristiche principali (Siti Candidati) - Euristica completa

Siti Candidati			Test Point	Budget	Inquinamento elettromagnetico
20	30	40	40	Illimitato	Standard

In figura 6.16 si evidenzia come il valore della funzione obiettivo cresca molto rapidamente con il numero dei siti candidati, a conferma di quanto già visto nelle analisi effettuate con il modello.

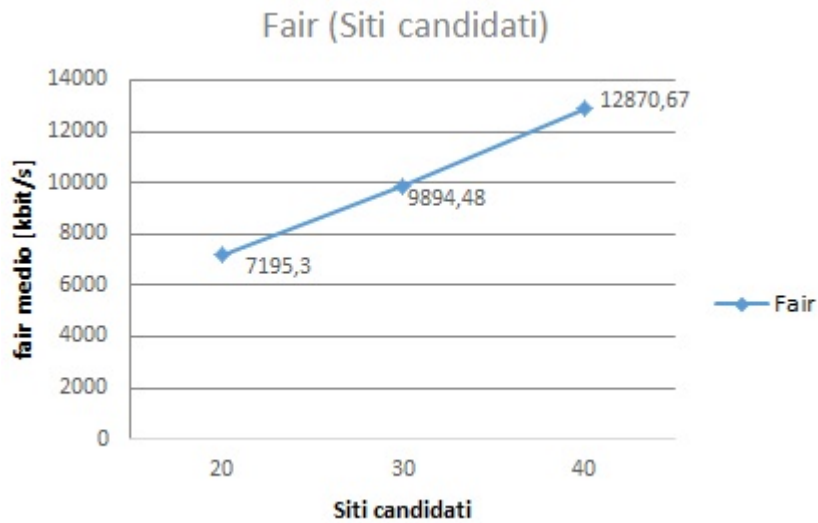


Figura 6.16: Andamento della funzione obiettivo (Siti Candidati) - Euristica completa

### 6.3.3 Valutazione della funzione obiettivo in funzione del numero dei punti di test - Metodo euristico completo

In questo set di analisi viene fatto variare il numero dei test point, tenendo fissi i siti candidati per analizzare l'effetto dell'aumento del numero di utenti all'interno dell'area di interesse. Come riportato in tabella 6.19, gli scenari analizzati mantengono le medesime caratteristiche delle istanze precedenti ad eccezione del numero di test point, che ora varia nelle tre prove dell'istanza, e del budget, mantenuto illimitato. Per ogni istanza la prima prova è stata effettuata con 30 test point, la seconda con 40 e infine la terza con 50.



Tabella 6.19: Caratteristiche principali (Test point) - Euristica completa

Siti candidati	Test point			Budget	Inquinamento elettromagnetico
20	30	40	50	Illimitato	Standard

In figura 6.17 è rappresentato l'andamento della funzione obiettivo nei tre punti di valutazione; i valori della funzione obiettivo confermano, seppur con una maggior varianza, il trend valutato nel precedente set di analisi sul numero di utenti.

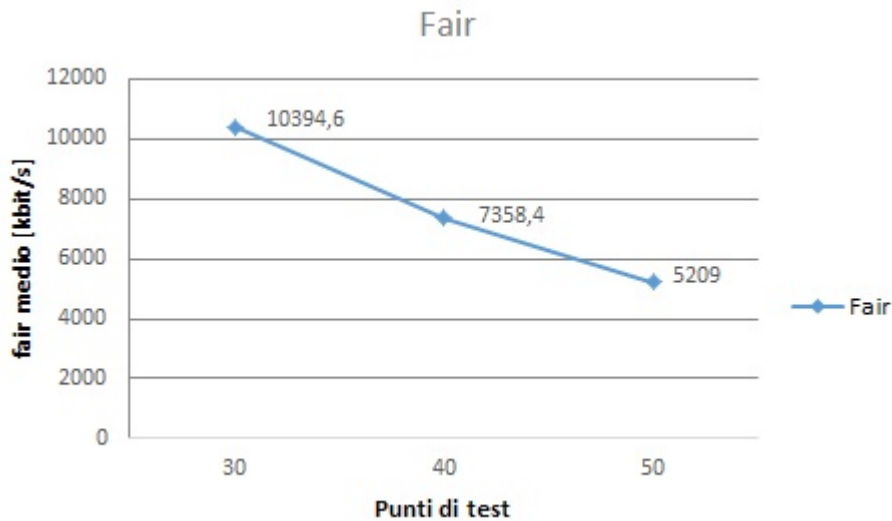


Figura 6.17: Andamento della funzione obiettivo (Test point) - Euristica completa

### 6.3.4 Valutazione della funzione obiettivo in funzione dei livelli di inquinamento elettromagnetico - Metodo euristico completo

Nel quarto e ultimo set di analisi si valuta l'andamento della funzione obiettivo al variare dei livelli di inquinamento elettromagnetico. Diversamente

dalle analisi descritte nel paragrafo 6.2.4, l'effetto dell'inquinamento elettromagnetico viene valutato attraverso la stima dei livelli di campo elettrico sui cosiddetti "punti sensibili"<sup>1</sup>. La caratterizzazione dell'inquinamento elettromagnetico viene determinata variando il coefficiente presente nella formula di generazione (pseudo-casuale) del fondo elettromagnetico presente su ogni punto sensibile nei siti candidati interessati. Le caratteristiche dello scenario sono riassunte in tabella 6.20.

Tabella 6.20: Caratteristiche principali (Inquinamento elettromagnetico) - Euristiche completa

Siti candidati	Test point	Budget	Inquinamento elettromagnetico		
			Standard	Limitato	Molto limitato
20	40	Illimitato			

I valori riportati in figura 6.18 mostrano la forte dipendenza tra performance della rete e vincoli di inquinamento elettromagnetico.

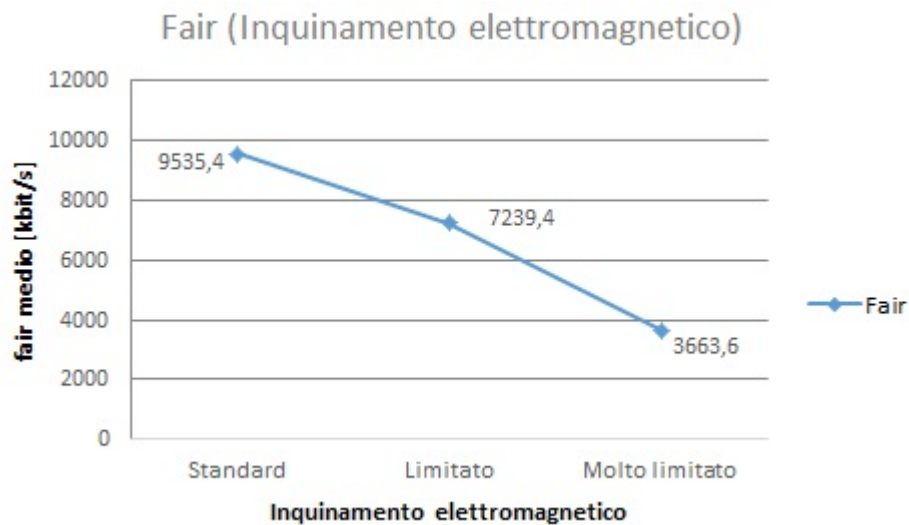


Figura 6.18: Andamento della funzione obiettivo (Inquinamento elettromagnetico) - Euristiche completa

<sup>1</sup>per i dettagli si veda il paragrafo 5.2.2.

Come già trattato nella sezione 2.2, il livello di fondo elettromagnetico dipende prevalentemente dalla potenza erogata dagli impianti radiomobili attivi nella zona prossima al punto sensibile in oggetto (altri contributi derivano da emittenti radio-televisive). La tecnica del site sharing, citata nel paragrafo 2.2.1, che consiste nella condivisione tra operatori della stessa struttura di supporto, pur riducendo i costi di installazione nonché gestione delle infrastrutture, peggiora le performance della rete percepite dall'utente in quanto il fondo EM sarà più concentrato in queste zone ponendo vincoli maggiormente stringenti sulle emissioni di potenza.

### 6.3.5 Analisi completa di una singola istanza - Metodo euristico completo

Come fatto in precedenza con le prove effettuate nella prima sezione del capitolo, si analizza nel dettaglio un'istanza particolarmente significativa. In questo caso, dato il particolare significato attribuitogli nel precedente paragrafo, e dato il fattore di novità introdotto, viene analizzata un'istanza appartenente al set analizzato nel paragrafo precedente. In tabella 6.21 sono riportate le caratteristiche dello scenario analizzato.

Tabella 6.21: Caratteristiche principali (Singola istanza) - Euristica completa

Siti candidati	Test point	Budget	Inquinamento elettromagnetico		
20	40	Illimitato	Standard	Limitato	Molto limitato

In figura 6.19 è rappresentata lo scenario dell'istanza analizzata.

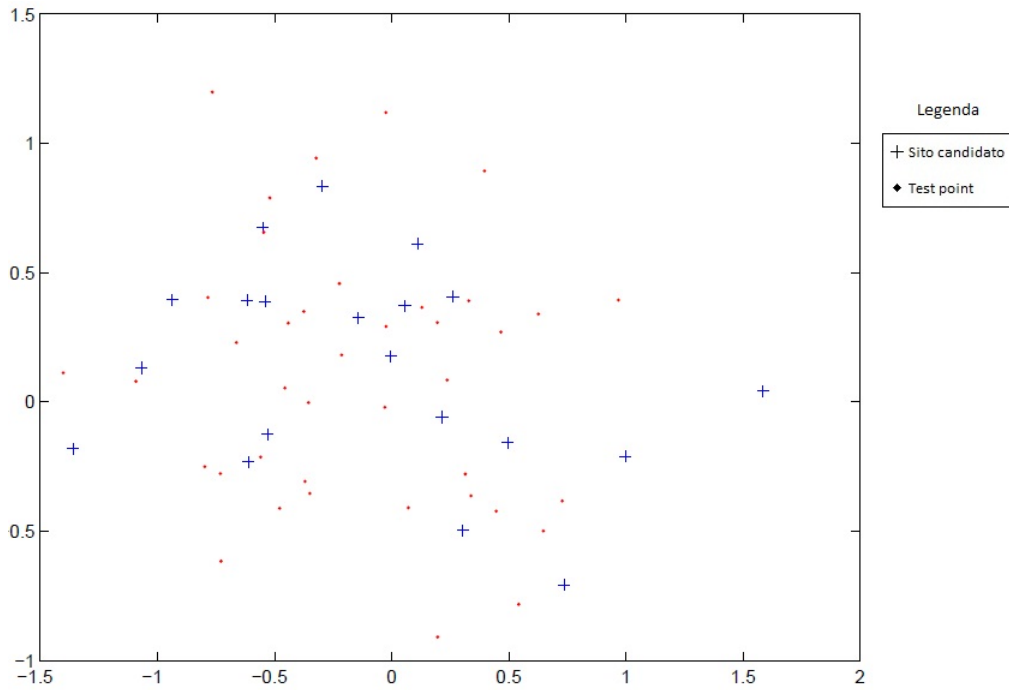


Figura 6.19: Mappa scenario (Singola istanza) - Euristica completa

## Risultati

Nelle tabelle 6.22 e 6.23 sono riassunti i valori assunti dalla funzione obiettivo e delle principali grandezze dimensionate dal tool. Come ipotizzabile il numero di siti candidati e la potenza media LTE attivata diminuiscono drasticamente al crescere dei livelli di inquinamento elettromagnetico.

Tabella 6.22: Risultati (Singola istanza) - Euristica completa - parte 1

Inquinamento elettromagnetico	Fair [kbit/s]	Throughput medio [kbit/s]
Standard	11520	23776
Limitato	10516	19410
Molto limitato	4114	9266

Tabella 6.23: Risultati (Singola istanza) - Euristiche complete - parte 2

Inquinamento elettromagnetico	CS attivati	$Pot_{LTE}$ media per sito [W]	Media punti sensibili [V/m]
Standard	10	81	1,405
Limitato	8	65	2,3032
Molto limitato	5	54	3,1703

In figura 6.20 sono stati riportati i valori che la funzione obiettivo assume nei tre scenari, si può osservare come la curva scenda molto rapidamente all'aumentare dell'inquinamento elettromagnetico.

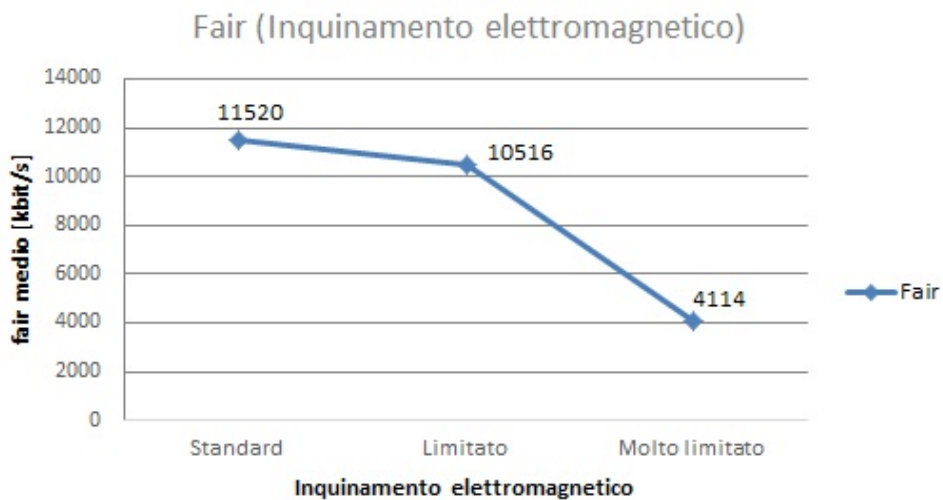


Figura 6.20: Andamento della funzione obiettivo (Singola istanza) - Euristiche complete

Il grafico in figura 6.21 mostra l'andamento dei livelli di campo, espressi in V/m, dei punti sensibili di ogni cs.

### Livello di inquinamento elettromagnetico

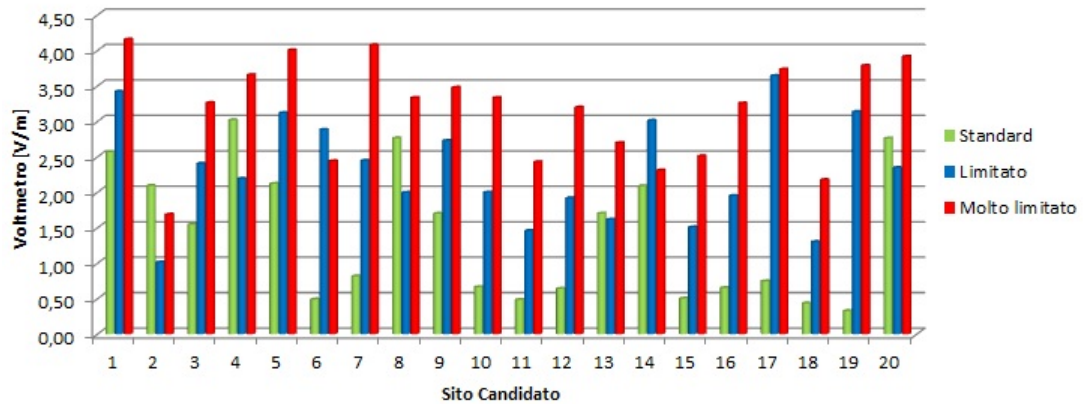


Figura 6.21: Andamento dei livelli di inquinamento elettromagnetico (Singola istanza) - Euristicata completa

### 6.3.6 Evoluzione della funzione obiettivo nelle tre fasi dell'algoritmo euristico completo

Al fine di valutare il contributo di ciascuna fase dell'algoritmo euristico alla funzione obiettivo è stata analizzata un'istanza di elevata cardinalità, le cui caratteristiche principali sono riassunte in tabella 6.24.

Tabella 6.24: Caratteristiche principali - Analisi a 3 passi

Siti candidati	Test point	Budget	Inquinamento elettromagnetico
100	200	Illimitato	Standard

In figura 6.22 è rappresentato lo scenario analizzato.

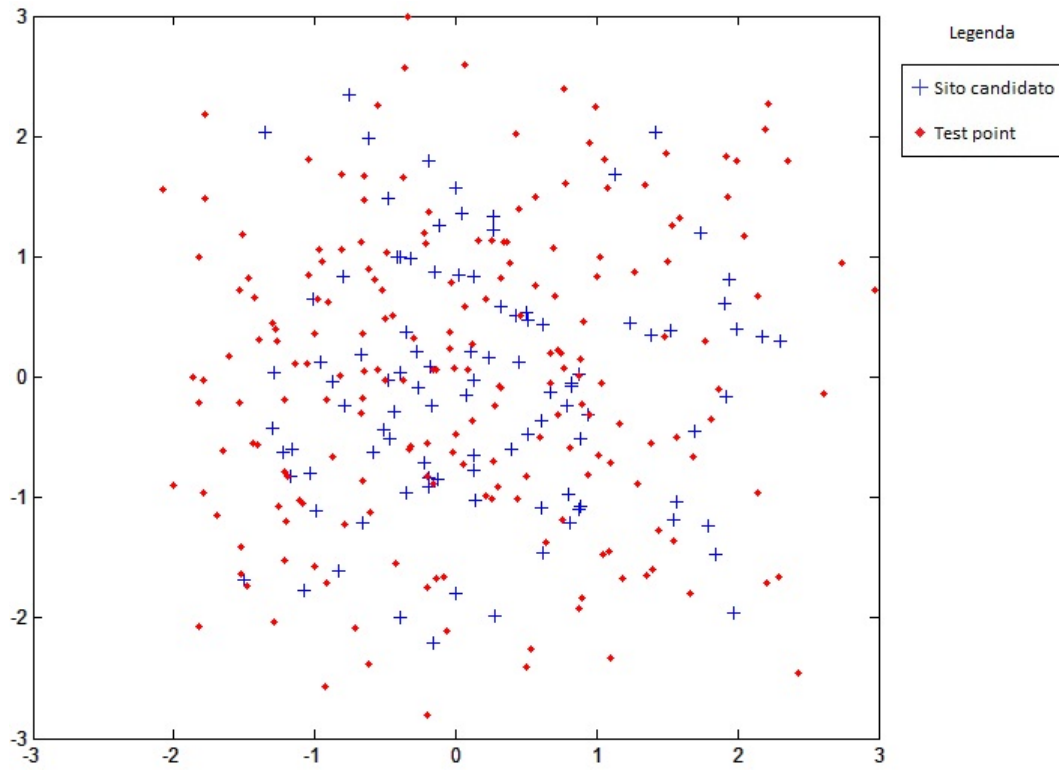


Figura 6.22: Mappa scenario - Analisi a 3 passi

Al termine dell'esecuzione dell'algoritmo di Copertura(fase 1), si osservano i risultati in tabella 6.25.

Tabella 6.25: Risultati della 1° fase (Copertura) - Analisi a 3 passi

Fair [kbit/s]	Spesa [k€]	Siti attivi (2x2)	Siti attivi (4x4)
360	2170	22	-

In figura 6.23 è rappresentato l'output della 1° fase dell'algoritmo.

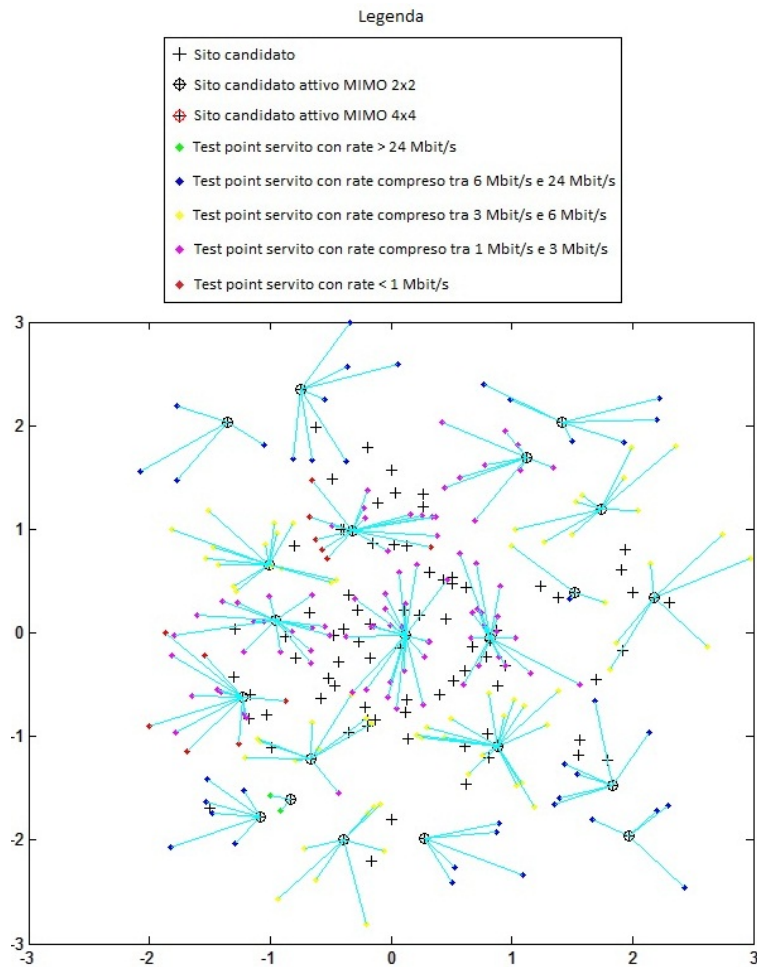


Figura 6.23: Soluzione 1° fase - Analisi a 3 passi

Al termine dell'esecuzione dell'algoritmo di Fairness(fase 2), sono stati ottenuti i risultati in tabella 6.26.

Tabella 6.26: Risultati della 2° fase (Fairness) - Analisi a 3 passi

Fair [kbit/s]	Spesa [k€]	Siti attivi (2x2)	Siti attivi (4x4)
2662	6320	58	-

In figura 6.24 è rappresentato l'output della 2° fase dell'algoritmo.



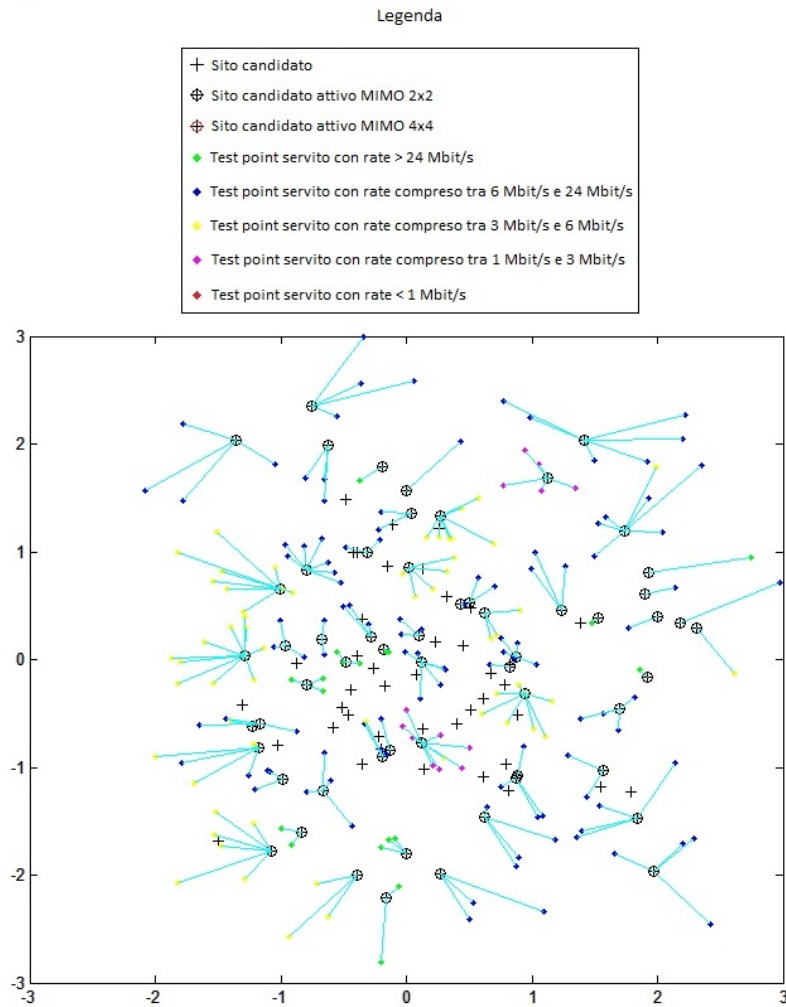


Figura 6.24: Soluzione 2° fase - Analisi a 3 passi

Al termine dell'esecuzione dell'algoritmo di MIMO(fase 3) si osservano i risultati finali riassunti in tabella 6.27.

Tabella 6.27: Risultati della 3° fase (MIMO) - Analisi a 3 passi

Fair [kbit/s]	Spesa [k€]	Siti attivi (2x2)	Siti attivi (4x4)
2700	7460	19	39

In figura 6.25 è rappresentata l'output della 3° fase dell'algorithm.

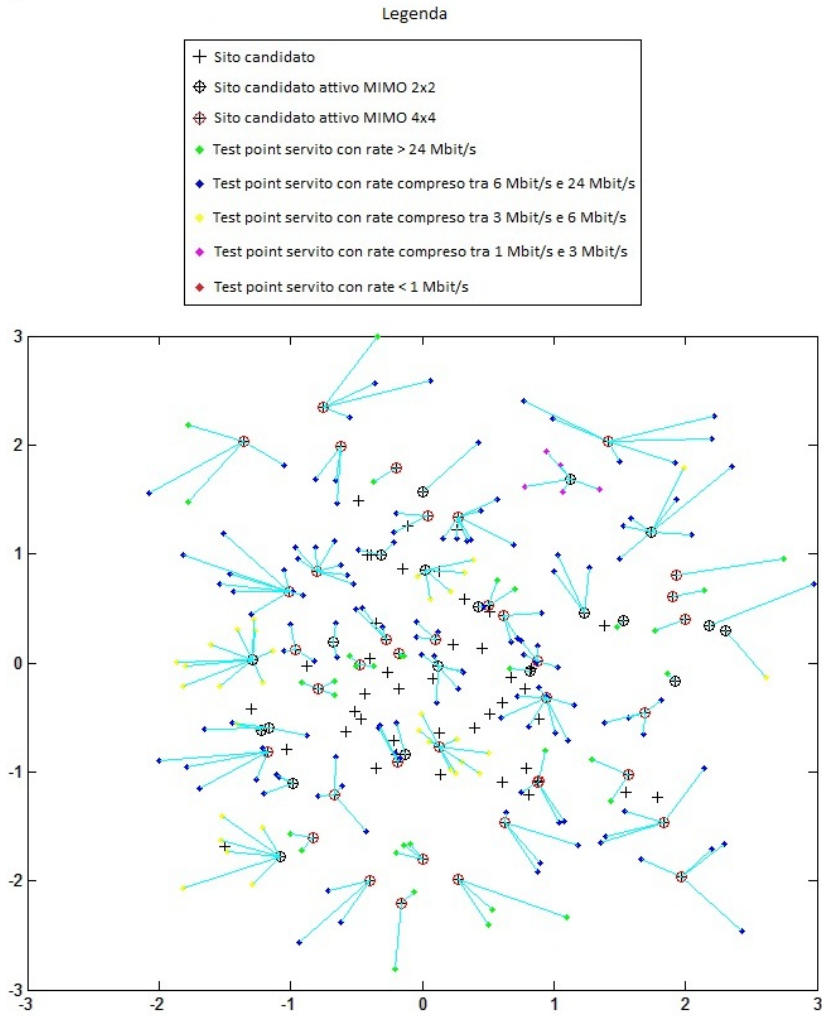


Figura 6.25: Soluzione 3° fase - Analisi a 3 passi

In figura 6.26 si può osservare l'andamento della funzione obiettivo nelle 3 fasi dell'algorithm.

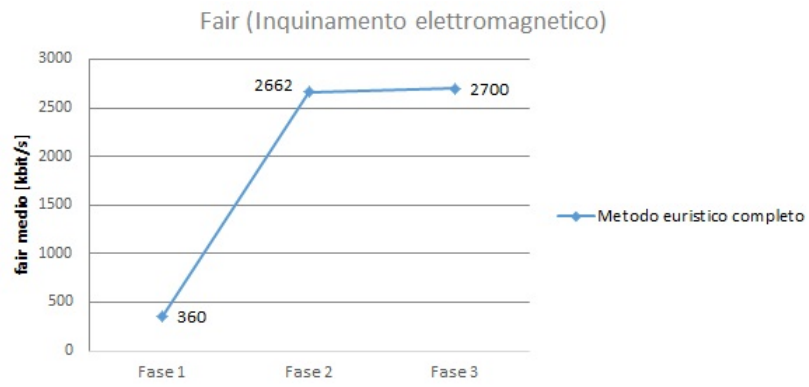


Figura 6.26: Andamento della funzione obiettivo - Analisi a 3 passi

# Conclusioni

Il crescente aumento dell'aspettativa di user experience sui terminali mobili, trainata dall'evoluzione dei terminali, impone agli operatori radiomobili uno sviluppo rapido ed efficiente della rete LTE, da considerare abilitante per la maggior parte dei servizi a banda larga come streaming multimediale ad alta qualità e online gaming. I livelli di rapidità di sviluppo ed efficienza richiesti per entrare in maniera competitiva nell'ecosistema LTE sono raggiungibili soltanto attraverso un massiccio riuso delle infrastrutture di rete esistenti e una forte interoperabilità con le reti legacy, si pensi ad esempio al servizio Circuit Switch FallBack. Le attuali conoscenze sulla compatibilità elettromagnetica e le normative comunitarie e nazionali rendono doverosa l'attenzione alle tematiche ambientali da parte degli operatori radiomobili che sono dunque responsabili della verifica e del controllo dell'impatto dei propri impianti sin dalle fasi di progettazione. Queste tematiche vengono descritte nei primi due capitoli della tesi, fornendo anche i riferimenti dei principali enti normatori e soggetti coinvolti. Il Capitolo 3 fissa il punto di partenza per lo sviluppo dei metodi di pianificazione radio LTE. Nel Capitolo 4 il problema della pianificazione radio LTE viene formulato in maniera analitica attraverso un modello di programmazione lineare intera nel quale vengono introdotte come fattore di novità proprio le tematiche relative all'upgrade incrementale e l'impatto ambientale. Tale modello riceve come parametri di ingresso la localizzazione e le configurazioni di un set di siti candidati (cs), ovvero di base station dove vi sono attivi uno o più sistemi

delle reti legacy, GSM900, DCS1800 e UMTS2100, nonché la distribuzione del traffico all'interno dell'area considerata e il budget disponibile. In particolare ogni cs è caratterizzato dalla banda e dalla potenza impegnata da ogni sistema attivo, dal costo di attivazione del sistema LTE e dai limiti di potenza attivabile per LTE dovuti ai vincoli ambientali. Il costo dell'attivazione di LTE su ogni cs è determinato in modo da favorire le attivazioni che favoriscano il riuso delle infrastrutture esistenti come ad esempio la Mixed-Mode sulla frequenza 1800 MHz. Il modello consente, dato il budget, di determinare la combinazione di configurazioni (CS, Banda e tecnica MIMO) LTE sui cs che massimizzi il minimo throughput presente in rete. Tale approccio consente di ottenere delle curve di throughput in funzione del budget, dimensionando una rete con prestazioni omogenee. Inoltre il modello è in grado di considerare delle penalizzazioni, comunque controllate, sulle reti legacy, in modo da poter ricavare risorse extra, in termini di banda e potenza, da dedicare al sistema LTE. Come già evidenziato nei capitoli precedenti, a causa della complessità del problema affrontato, il modello descritto è adeguato a risolvere istanze di moderate dimensioni a causa dei tempi necessari per ottenere una soluzione ottima. Per pianificare reti di maggiori dimensioni è necessario ricorrere ad algoritmi euristici. A tal fine, nel Capitolo 5 è stato definito un algoritmo euristico articolato in tre fasi (Copertura, Fairness e MIMO) che consente di ridurre i tempi di risoluzione, ma fornendo una soluzione sub-ottima. L'algoritmo proposto viene successivamente ampliato, diminuendo il livello di approssimazione dell'interfaccia radio e introducendo il concetto di punto sensibile. In questa seconda versione l'euristica, a differenza del modello, implementa il vincolo ambientale analizzando un set di tali punti per ogni cs sui quali viene valutato il livello di esposizione elettromagnetica. I risultati riportati nel Capitolo 6 hanno dimostrato che il modello descritto consente di ottenere soluzioni in grado di sfruttare efficientemente le risorse a disposizione, infatti vengono spesso selezionate configurazioni che prevedono il riuso delle infrastrutture e degli

apparati radianti facendo frequentemente ricorso alla possibilità di sottrarre risorse alle reti legacy in favore di LTE. In particolare è stato mostrato come il throughput minimo dipenda fortemente dal budget, dal livello di sviluppo delle reti legacy e quindi dal riuso di infrastrutture, dal traffico e dal livello di saturazione dei vincoli ambientali. I risultati dell'euristica messi a confronto con quelli del modello hanno mostrato un errore medio pari a circa il 12%, il che prova la qualità dell'euristica soprattutto se considerato che si utilizza una funzione obiettivo a valori discreti. Con la seconda versione dell'algoritmo euristico è stato possibile condurre un secondo set di istanze di cardinalità maggiore (più cs e test point) che permettono una analisi più completa sull'impatto dei livelli di saturazione elettromagnetica; infatti è possibile osservare come il throughput decresca molto più rapidamente, rispetto agli altri fattori, all'aumentare dei livelli di fondo elettromagnetico. Viene dunque posto il problema del trade-off tra i vantaggi economici e svantaggi prestazionali del site sharing citato nel Capitolo 2. Un'analisi approfondita dei risultati porta infine ad osservare come uno dei fattori limitanti sia l'interferenza. LTE, nella sua implementazione standard, non prevede riuso frequenziale, questo grazie all'utilizzo delle tecniche OFDM in cui vi è interferenza solo quando due stazioni radio base adiacenti assegnano le medesime risorse radio. è compito dello scheduler LTE quindi minimizzare questa eventualità che comunque diventa sempre più probabile al crescere del traffico; basti pensare allo scenario limite nel quale due BS adiacenti assegnino in un TTI tutte le loro risorse, si avrebbe un'interferenza del 100%. La trattazione effettuata ha volutamente usufruito di diverse approssimazioni cercando comunque di rimanere fedele alle caratteristiche principali dei sistemi considerati. L'introduzione dei concetti di upgrade incrementale delle reti e tematiche ambientali qui introdotti, possono essere oggetto di ulteriori trattazioni, non solo nell'ambito radiomobile, introducendo altri livelli di dettaglio (celle tri settoriali, presenza di microcelle, scenari multi operatore), ma anche in ambito di reti fisse e mobili distribuite (WI-FI, WI-MAX ,

reti di sensori). In particolare l'approccio qui proposto può essere esteso alle infrastrutture di backhauling delle reti radiomobili, dove assumono ampio rilievo le tematiche di upgrade incrementale e risparmio energetico.

# Bibliografia

- [1] Vittorio Trecordi *Verso la quarta generazione*
- [2] Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker *LTE - The UMTS Long Term Evolution - From Theory to Practice*
- [3] *UTRA-UTRAN Long Term Evolution (LTE) and 3GPP System Architecture Evolution (SAE)*
- [4] <http://www.lteandbeyond.com/2012/03/s1-interface-based-handover.html>
- [5] <http://www.wirelessdesignmag.com/blogs/2012/09/how-non-line-sight-backhaul-really-works>
- [6] Ing. Francesco Matera *Il sistema 3GPP LTE: Aspetti di carattere generale e le tecniche di trasmissione*
- [7] Ing. Francesco Matera *Il sistema 3GPP LTE: Aspetti di carattere generale e le tecniche di trasmissione*
- [8] Ing. Francesco Matera *Il sistema 3GPP LTE: Aspetti di carattere generale e le tecniche di trasmissione*
- [9] Ericsson, LTE - an introduction, white paper, pp. 1-16, June 2009  
<http://www.slideshare.net/GoingLTE/lte-an-introductionericsson>



- [10] *LEGGE 22 febbraio 2001, n.36 - Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici. (pubblicata nella Gazzetta Ufficiale Italiana n. 55 del 7 marzo 2001)*
- [11] *Decreto legislativo 1° agosto 2003, n. 259 Codice delle comunicazioni elettroniche (pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n.214 del 15 settembre 2003)*
- [12] *D.P.C.M. dell'8 luglio 2003 G.U. 28 agosto 2003 serie g. n. 199*
- [13] *RACCOMANDAZIONE DEL CONSIGLIO del 12 luglio 1999 relativa alla limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz (1999/519/CE) 30 luglio 1999 IT Gazzetta ufficiale delle Comunità europee*
- [14] *[http://www.provincia.milano.it/export/sites/default/protezionecivile/documenti/normativa\\_regionale/L.R.11maggio2001n-11.pdf](http://www.provincia.milano.it/export/sites/default/protezionecivile/documenti/normativa_regionale/L.R.11maggio2001n-11.pdf)*
- [15] *Norma CEI 2011-7*
- [16] *Norma CEI 2011-10*
- [17] *<http://castel.arpalombardia.it/>*
- [18] Fernando Gordejuela-Sanchez, Student Member, IEEE, and Jie Zhang, Member, IEEE, *LTE Access Network Planning and Optimization: A Service-Oriented and Technology-Specific Perspective*
- [19] J. Salo, M. Nur-Alam, K. Chang, *Practical Introduction to LTE Radio Planning*
- [20] S. Louvros, K. Aggelis and A. Baltagiannis, *LTE Cell Coverage Planning Algorithm Optimising Uplink User Cell Throughput*

- [21] Zuozhou Li e Shudong Li, *LTE Network Planning Based on Game Theory*
- [22] Oliver Stbler, Reiner Hoppe, Gerd Wlflle, Thomas Hager, Timm Herrmann, *Consideration of MIMO in the Planning of LTE Networks in Urban and Indoor Scenarios*
- [23] Jun Gu, Yufeng Ruan, Xi Chen, Chaowei Wang *A Novel Traffic Capacity Planning Methodology for LTE Radio Network Dimensioning*
- [24] Wissam El-Beaino, Ahmad M. El-Hajj, and Zaher Dawy *A Proactive Approach for LTE Radio Network Planning With Green Considerations*
- [25] Filippo Cangemi *Modelli e metodi per la pianificazione radio per reti radiomobili LTE*
- [26] [www.ampl.com/](http://www.ampl.com/)
- [27] [www.ibm.com/software/.../cplex-optimizer/](http://www.ibm.com/software/.../cplex-optimizer/)
- [28] [www.mathworks.it/products/matlab/](http://www.mathworks.it/products/matlab/)



# Appendice A

## Modello AMPL

```
##### INSIEMI #####
```

```
param s;  
param t;  
param w;  
param v;  
param k;  
param n;  
set S := {1..s};  
set TPL := {1..t};  
set BAN := {1..w};  
set NPOT := {1..v};  
set ANT := {1..k};  
set PROF := {1..n};
```

```
##### PARAMETRI #####
```

```
param C{S};
```

param CA{ANT};  
param MU{S};  
param MG{S};  
param MD{S};  
param POT{NPOT};  
param PDCS{S};  
param BDCS{S};  
param PFU{S, NPOT, BAN};  
param PFG{S, NPOT, BAN};  
param AT{S, TPL};  
param PARPA{S};  
param CAP{ANT, BAN};  
param PORTANTIMAX;  
param BUDGET;  
param PORTANTI{BAN};  
param MIMO{ANT};  
param PLTE;  
param BIGM;  
param PRB;  
param RB{PROF};  
param T{PROF};  
param SINR{PROF};  
param NOISE;  
param COP{S, TPL};  
param GUAD;  
param PRBL;  
param ETA;  
param GAMMA;  
param NABLA;

##### VARIABILI #####

```
var x{S,TPL,PROF} binary;
var config{S,BAN,ANT} binary;
var ptumts{S} integer, >= 0;
var bdc{s{S,BAN} binary;
var ptgsm{S}, >=0;
var fair;
```

##### FUNZIONE OBIETTIVO #####

```
maximize ThroughputLTE : fair;
```

##### VINCOLI #####

s.t. Budget :

```
{j in S,b in BAN,a in ANT}(C[j]+CA[a])*config[j,b,a] <= BUDGET;
```

s. t. Coerenza{j in S, i in TPL} :

```
sum{l in PROF}x[j,i,l] <= sum{b in BAN,a in ANT}config[j,b,a]*COP[j,i];
```

s. t. Assegnamento{i in TPL}:

```
sum{j in S, l in PROF}x[j,i,l] = 1;
```

s. t. ConfigLTE{j in S}:

```
sum{b in BAN, a in ANT}config[j,b,a] <= 1;
```

s. t. fairness{i in TPL}:

```
fair <= sum{j in S, l in PROF}x[j,i,l]*T[l];
```

s. t. MaxRB{j in S}:  

$$\sum_{i \in \text{TPL}, l \in \text{PROF}} \text{RB}[l] * x[j, i, l] \leq \text{ETA} * \sum_{b \in \text{AN}, \text{ANT}} (\text{PRB} * \text{PORTANTI}[b] * \text{MIMO}[a] * \text{config}[j, b, a]);$$

s. t. vincoloSINR{j in S, i in TPL, l in PROF}:  

$$\begin{aligned} & (\sum_{b \in \text{BAN}, a \in \text{ANT}} (\text{PLTE} * \text{config}[j, b, a] * \text{PORTANTI}[b] * \text{MIMO}[a] * \text{GUAD} * \text{AT}[j, i])) \geq \\ & (((\text{SINR}[l] * (\text{NOISE} + \text{PRBL} * \sum_{b \in \text{BAN}, a \in \text{ANT}, q \in \text{S}: q \neq j} (\text{PLTE} * \text{config}[q, b, a] * \text{PORTANTI}[b] * \text{MIMO}[a] * \text{GUAD} * \text{AT}[q, i]))) - \\ & \text{BIGM} * (1 - x[j, i, l])); \end{aligned}$$

s. t. PMax{j in S}:  

$$\begin{aligned} & \sum_{p \in \text{NPOT}, b \in \text{BAN}} (\text{PFG}[j, p, b] * \text{POT}[p] * \text{GAMMA} * \text{PORTANTI}[b]) + \\ & (\text{GAMMA} * \text{PDCS}[j] * \text{BDCS}[j]) + \\ & \sum_{p \in \text{NPOT}, b \in \text{BAN}} (\text{PFU}[j, p, b] * \text{POT}[p] * \text{PORTANTI}[b]) + \\ & \sum_{b \in \text{BAN}, a \in \text{ANT}} (\text{config}[j, b, a] * \text{PLTE} * \text{PORTANTI}[b] * \text{MIMO}[a]) - \\ & \text{ptgsm}[j] - \\ & \sum_{b \in \text{BAN}} (\text{GAMMA} * \text{bdcs}[j, b] * \text{PORTANTI}[b] * \text{PDCS}[j]) - \\ & \text{ptumts}[j] \leq \text{PARPA}[j]; \end{aligned}$$

s. t. CoerenzaTolta{j in S}:  

$$\text{ptumts}[j] \leq \text{BIGM} * \text{MU}[j];$$

s. t. CoerenzaTolta2{j in S}:  

$$\text{ptgsm}[j] \leq \text{BIGM} * \text{MG}[j];$$

s. t. MaxBande{j in S} :  

$$\begin{aligned} & \text{BDCS}[j] + \sum_{b \in \text{BAN}, a \in \text{ANT}} \text{config}[j, b, a] * \text{PORTANTI}[b] - \\ & \sum_{b \in \text{BAN}} \text{bdcs}[j, b] * \text{PORTANTI}[b] \leq \text{PORTANTIMAX}; \end{aligned}$$

subject to BandetolteDCS{j in S}:

$$BDCS[j] - \sum\{b \text{ in BAN}\} bdcS[j,b]*PORTANTI[b] \geq MD[j];$$

s. t. BandetDCS{j in S} :

$$\sum\{b \text{ in BAN}\} bdcS[j,b]*PORTANTI[b] \leq$$

$$\sum\{b \text{ in BAN}, a \text{ in ANT}\} config[j,b,a]*PORTANTI[b];$$

s. t. Pimumts{j in S}:

$$ptumts[j] \leq (\sum\{b \text{ in BAN}, a \text{ in ANT}\} config[j,b,a]*MU[j])* \\ (\sum\{p \text{ in NPOT}, b \text{ in BAN}\} (PFU[j,p,b]*POT[p]*PORTANTI[b]))/NABLA;$$

s. t. Pimigsm{j in S}:

$$ptgsm[j] \leq (\sum\{b \text{ in BAN}, a \text{ in ANT}\} config[j,b,a]*MG[j])* \\ (\sum\{p \text{ in NPOT}, b \text{ in BAN}\} (PFG[j,p,b]*POT[p]*PORTANTI[b]))/NABLA;$$





# Ringraziamenti

Vogliamo ringraziare il Prof. Antonio Capone per aver accettato di accompagnarci in questa sfida; un ringraziamento particolare va anche a Ilario Filippini per averci guidato e consigliato in questi mesi, sopportando piogge di email al limite dello stalking. Ringraziamo anche tutti gli amici dell'auletta, l'auletta stessa, Marisa e Giuliano per averci nutrito in questi lunghi anni, la briscola chiamata, la TI-89 Titanium e in generale tutti quei fattori che in maniera più o meno casuale hanno contribuito al raggiungimento di questo risultato (tra cui ricordiamo Samir, Remus, Manuto e Kalluri Vaanil).

Federico:

Innanzitutto desidero ringraziare i miei genitori per l'immensa pazienza; un gigantesco grazie (non basterà mai) alla mia fidanzata Federica per il traguardo che abbiamo raggiunto insieme; ringrazio infine i miei amici (Felky, Perro, Ambro e Sara) per essere tanto stupidi quanto me.

Antonio:

Desidero ringraziare la mia famiglia per avermi supportato e sopportato in questi anni; la mia ragazza Eleonora per essermi stata accanto; ringrazio infine i miei amici per aver disputato con me innumerevoli "Torneoni".

Grazie mille!

