

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria delle Telecomunicazioni



Algoritmi per l'allocazione delle risorse in reti cellulari ad alta efficienza energetica

Relatore: Prof. Antonio CAPONE

Co-relatore: Ing. Ilario FILIPPINI

Tesi di Laurea di:

Alberto DE RONZI

Matr. 784943

Anno Accademico 2012 - 2013

*A mamma e papà
Per avermi dato TUTTO*

INDICE

Elenco delle Figure e delle Tabelle.....	6
Sommario.....	8
Introduzione	9
Capitolo 1 - Green Networking	12
1.1 Introduzione	12
1.2 Ottimizzazione hardware.....	13
1.2.1 Antenne.....	13
1.2.2 RF Trasceiver.....	14
1.2.3 Baseband Processing.....	14
1.2.4 Amplificatori di Potenza	15
1.2.5 Discontinuous Transmission e Sleep Mode	15
1.2.6 Gestione dinamica della banda	16
1.2.7 Adattamento alle dinamiche del sistema	17
1.3 Miglioramento delle implementazioni di rete	18
1.3.1 Reti eterogenee.....	18
1.3.2 Utilizzo di ripetitori	19
1.3.3 Base station cooperative	19
1.3.4 Distribuzioni Multi-RAT	20
1.4 Modifica della gestione del sistema	21
1.5 Limitazioni del risparmio energetico nelle reti cellulari	22
1.6 Letteratura	25
1.6.1 Sleep mode	26
1.6.2 Micro celle.....	28
1.6.3 Context Awareness e separazione Dati-Segnalazione	28
Capitolo 2 - BCG2 Beyond Cellular Green Generation	30
2.1 Copertura a richiesta per un'alta efficienza energetica.....	32

2.2 Technical Challenges	34
2.2.1 Context Awareness	34
2.2.2 Resource Management.....	35
2.2.3 Tecnologie radio per la rete di segnalazione	36
2.3 Architettura di rete	37
2.3.1 Rete di segnalazione.....	40
2.3.2 Rete dati.....	41
2.3.3 Signaling Management Entity (SME).....	45
2.3.4 Terminali Mobili - Requisiti e funzioni aggiuntive.....	45
2.4 Modelli di Potenza	46
2.5 Context Management.....	47
2.5.1 Modello di riferimento	47
2.5.2 Modelli di informazioni sulla posizione.....	48
2.5.3 Modelli di informazioni sullo stato della Rete.....	50
2.5.4 Modelli di informazioni sui profili d'applicazione e d'utente.....	51
2.6 Resource Management.....	51
2.6.1 Gestione delle risorse Best Server	52
2.6.2 Gestione delle risorse sulla base dello stato della rete.....	53
2.6.3 Gestione delle risorse basata sui profili di traffico e d'utente.....	54
CAPITOLO 3 – Algoritmi per l'efficienza energetica: descrizione e implementazione	55
3.1 Algoritmi: descrizione.....	55
3.1.1 Assegnazione On demand (AO)	56
3.1.2 Ottimizzazione periodica del Layout (OPL)	57
3.2 OMNeT++	60
3.3 GreenSim.....	61
3.3.1 Controllore.....	63
3.3.2 Antenna e SmallCell	64
3.3.3 Utente.....	65
3.4 Principali procedure di rete.....	67

3.4.1 Calcolo potenza ricevuta.....	67
3.4.2 Nascita di un utente /Assegnamento / Handover.....	68
3.4.3 Riordino delle connessioni e handover.....	69
3.4.4 Ottimizzazione Periodica	70
3.5 Algoritmi: implementazione	70
3.5.1 Associazione OnDemand (AO)	71
3.5.2 Ottimizzazione periodica del layout (OPL)	71
Capitolo 4 – Risultati	71
4.1 Lo scenario	72
4.1.1 Caratteristiche Antenna.....	73
4.1.2 Calcolo del Rate	74
4.1.3 Profilo di Traffico.....	75
4.2 Calibrazione	77
4.3 Scenario base per il confronto dei risultati.....	80
4.4 Risultati numerici dell’algoritmo di associazione iniziale	80
4.4.1 Rate Based (AO RB)	81
4.4.2 Energy Based (AO EB)	86
4.5 Ottimizzazione periodica del layout (OPL)	89
Conclusioni.....	94
Bibliografia.....	97

Elenco delle Figure e delle Tabelle

Figura 1 Concetto di risparmio energetico nelle reti cellulari.....	23
Figura 2 Impatto del network management e delle tecnologie sulle performance energetiche.....	23
Figura 3 Modelli in input	30
Figura 4 Modello Spazio-temporale per la domanda di traffico degli utenti	31
Figura 5 Context e resource management	32
Figura 6 Funzionamento rete dati e rete segnalazione	33
Figura 7 Architettura BCG2.....	38
Figura 8 Architettura rete di Backhaul.....	39
Figura 9 Modello Consumo Energetico DBS	42
Figura 10 Modello lineare di potenza semplificato.....	46
Figura 11 Modello di potenza semplificato con sleeping mode	47
Figura 12 Basic Position model - Informazioni sulla posizione più best server	49
Figura 13 Advanced position model - Informazioni sulla copertura	50
Figura 14 Network status model - Informazioni sulla copertura e stato della rete	51
Figura 15 Periodical Layout Optimization Algorithm	58
Figura 16 Scenario di simulazione	62
Figura 17 Traffico FTP	66
Figura 18 Procedura di nascita / assegnamento	69
Figura 19 Playground GreenSim.....	72
Figura 20 Tabella Parametri Antenna	74
Figura 21 Gaussiana bidimensionale	76
Figura 22 Scenario 2010	78
Figura 23 Calibration Dense Urban: Coupling Loss.....	79
Figura 24 Calibration Dense Urban: SINR	79
Figura 25 Calibration Dense Urban: Mean Normalized User Throughput.....	79

Figura 26 Consumo di energia del sistema - AO RB – traffico Basso	81
Figura 27 Tempo totale di attivazione ed energia consumata per antenna - AO RB – traffico Basso	82
Figura 28 Throughput medio per utente - AO RB - traffico Basso	83
Figura 29 Consumo di energia del sistema - AO RB – traffico Alto	83
Figura 30 Throughput medio per utente - AO RB - traffico Alto	84
Figura 31 Tempo totale di attivazione ed energia consumata per antenna - AO RB – traffico Alto	84
Figura 32 Consumo di energia del sistema - AO RB – traffico Medio.....	85
Figura 33 Throughput medio per utente - AO RB - traffico Medio.....	85
Figura 34 Consumo di energia del sistema - AO EB – traffico Basso.....	86
Figura 35 Throughput medio per utente - AO EB - traffico Basso.....	87
Figura 36 Consumo di energia del sistema - AO EB – traffico Alto	87
Figura 37 Throughput medio per utente - AO EB - traffico Alto	88
Figura 38 Tempo totale di attivazione ed energia consumata per antenna - AO RB – traffico Alto	88
Figura 39 Consumo di energia del sistema - OPL – traffico Basso	90
Figura 40 Throughput medio per utente - OPL - traffico Basso	90
Figura 41 CDF dei rate – OPL – traffico Basso.....	91
Figura 42 CDF dei rate - OPL – traffico Alto.....	92
Figura 43 Consumo di energia del sistema - OPL – traffico Alto	92

Sommario

L'aumento costante del traffico nelle reti cellulari comporta un aumento del consumo energetico. Ciò ha portato gli operatori ad interessarsi al green-networking per ridurre la spesa dovuta al consumo energetico. Nelle reti cellulari, esso è da imputare principalmente alla rete di accesso e in particolare alle base station. Tra le soluzioni proposte dalla comunità scientifica c'è la possibilità di adattare il consumo delle base station con il livello di carico di traffico. Ci si è resi conto però che solo spegnendo completamente le base station inutilizzate si può ridurre significativamente il consumo energetico, in particolar modo utilizzando micro celle. Il progetto BCG2 ha inoltre proposto il paradigma di separazione della rete dati da quella segnalazione.

In questo lavoro di tesi, sfruttando le innovazioni precedenti, sono stati creati degli algoritmi di associazione utente-base station e di riallocazione periodica delle connessioni volti a minimizzare il consumo energetico senza ridurre eccessivamente la QoS degli utenti. Gli algoritmi sono stati implementati in un simulatore di rete cellulare secondo il paradigma di separazione dati-segnalazione, sviluppato nell'ambito della tesi. I risultati sono stati confrontati con gli algoritmi attualmente utilizzati nella gestione tipica di una rete cellulare evidenziando una notevole efficacia nella riduzione del consumo energetico dell'intera rete.

Parole chiave: green networking, cellular networks, LTE, BCG2

Introduzione

Nell'ultimo decennio si è assistito ad un incremento costante del traffico nelle reti cellulari, in particolare dall'introduzione del traffico dati affiancato al traffico voce. Questo aumento è coinciso con l'aumento del consumo energetico. In Italia, Telecom Italia consuma più di 2TWh per anno, circa l'1% della domanda totale nazionale, seconda solo al sistema ferroviario. Le antenne delle reti cellulari sono responsabili di circa il 60% - 80% del consumo totale. Questo comporta una spesa sempre più imponente per gli operatori.

E' nato quindi un nuovo ambito nella ricerca, chiamato "green networking", volto ad ottimizzare le reti e renderle energeticamente efficienti. Oltre ad un aspetto economico e ambientale (globalmente l'ICT supera l'intera l'industria aeronautica per emissioni di CO2) c'è anche un aspetto sociale. Reti con un basso consumo energetico possono essere installate in paesi in via di sviluppo che non avrebbero le risorse economiche ed ambientali per soddisfare la richiesta energetica di una rete "tradizionale". Potrebbero essere usate anche in situazioni di emergenza, come dopo un disastro naturale, dove l'energia erogata è minima.

Son state proposte quindi diverse soluzioni al problema. Si parte ovviamente da rendere i componenti attuali più efficienti. Son stati creati apparati che scalano il consumo energetico con il carico di lavoro. La componente fissa di energia, ovvero che non dipende dal carico dell'apparato, però rimane sempre troppo elevata, quindi un approccio più radicale è disattivare completamente le risorse non necessarie. In particolare le reti cellulari sono dimensionate per il traffico di picco. Nel resto della giornata, e in particolare nei periodi di basso traffico, le reti risultano eccessivamente sovra dimensionate.

Son stati proposti quindi diversi algoritmi per decidere quando e quali antenne spegnere. L'obiettivo del risparmio energetico contrasta però con la qualità del servizio minima da garantire. Si è dimostrato che è possibile ridurre

significativamente il consumo energetico pur mantenendo una QoS accettabile soprattutto nelle aree urbane.

Un'ulteriore innovazione è stata l'introduzione delle micro celle. Base Station dal raggio di copertura ridotto e quindi potenza emessa ed energia consumata minore. Le micro celle possono essere aggiunte allo scenario con macro celle già esistenti per soddisfare la capacità delle zone più attive in termini di traffico. In questo modo è possibile spegnere le macro celle ridondanti che consumano molta energia lasciando attive solo le micro celle.

Il progetto BCG2 ha ideato una soluzione che promette di aumentare ulteriormente l'efficienza energetica: la separazione delle funzionalità dati-segnalazione. Creando due reti specifiche, una per i dati e l'altra per la segnalazione si può garantire la copertura totale dell'area grazie a grandi celle di segnalazione, a basso data rate ma alta efficienza energetica e offrire capacità solo dove serve effettivamente grazie alle celle dati (in particolare grazie alle small cell).

Il nostro lavoro si concentra su un'ottimizzazione dinamica del consumo energetico nel paradigma di segnalazione di BCG2. Abbiamo individuato due fasi nella gestione tipica di una rete cellulare in cui intervenire per diminuire il consumo energetico. La prima è l'associazione utente-antenna. Attualmente viene eseguita sulla base di poche informazioni, che non tengono conto del consumo energetico. La gestione delle informazioni sullo stato della rete e degli utenti, unita alla separazione dati-segnalazione, ci hanno permesso di migliorare questa procedura con buoni risultati.

Il secondo punto di lavoro è complementare al primo. Abbiamo aggiunto alla gestione quasi real-time del consumo energetico, una procedura periodica di riordino e ottimizzazione del sistema. Mentre il primo approccio è locale e riguarda il singolo utente, nel secondo si prende in considerazione l'intero sistema e si cerca di renderlo globalmente più efficiente.

Questi algoritmi son stati implementati in un simulatore interamente realizzato in questo lavoro di tesi basato sul framework Omnet++. Il nostro simulatore permette di costruire una rete cellulare secondo il paradigma di separazione di BCG2 con diversi parametri configurabili, tra cui le caratteristiche delle antenne e del traffico. La struttura modulare del software permette anche future implementazioni di diversi algoritmi sullo stesso scenario di rete.

Organizzazione della tesi

La tesi è suddivisa in 4 capitoli.

Nel primo si parlerà di Green Networking e delle novità che questo paradigma comporta. Verranno esplorate varie innovazioni tecnologiche presenti in letteratura che son state prese in considerazione per la creazione dei nostri algoritmi.

Nel secondo capitolo l'attenzione si concentrerà sul progetto BCG2 e su come ha implementato i concetti del green networking. Gli scenari descritti da questo progetto saranno utilizzati nelle nostre simulazioni.

Nel terzo capitolo verrà descritta la filosofia degli algoritmi e la loro implementazione. Verrà illustrato il simulatore e il suo funzionamento. Saranno descritte le implementazioni delle principali procedure di una rete cellulare.

Infine nel capitolo 4 saranno descritti in dettaglio gli scenari utilizzati per le simulazioni e commentati i risultati numerici ottenuti grazie all'applicazione degli algoritmi.

Il lavoro si chiude con una sezione in cui vengono riportati commenti conclusivi e idee per eventuali sviluppi futuri.

Capitolo 1 - Green Networking

1.1 Introduzione

Nell'ultimo decennio il consumo energetico del settore ICT è divenuto un problema di primissimo piano. Si calcola che questo sia tra il 2 e il 10% del consumo mondiale con un tasso di crescita del 15%-20% annuo [1].

Le emissioni di CO₂ dell'industria ICT superano ormai quelle dell'intera industria aeronautica [2]. I principali consumatori di energia in questo settore sono i grandi data centers, le server farm e le reti di telecomunicazioni.

In Italia, Telecom Italia consuma più di 2TWh per anno, circa l'1% della domanda totale nazionale, seconda solo al sistema ferroviario. In particolare nell'UMTS un singolo Node-B consuma circa 800W [3] e globalmente le antenne contribuiscono tra il 60 e l'80% al consumo totale della rete.

Parlando dell'aspetto economico, si stima che in totale gli operatori wireless mondiali spendano annualmente più di 10 miliardi di dollari per l'elettricità, una porzione consistente del loro OPEX.

Ciò è alla base dell'introduzione di politiche di riduzione dell'energia anche nell'ambito delle telecomunicazioni. Viene definito quindi "green networking" tutto l'insieme degli approcci che introducono il risparmio energetico nella progettazione e nel funzionamento delle reti, dei dispositivi e dei protocolli.

Da un punto di vista strettamente ambientale, l'obiettivo del green networking punta ad una minimizzazione delle emissioni dei gas serra (GHG). Un ovvio primo passo consiste nell'utilizzare quanto più possibile le fonti energetiche rinnovabili. In aggiunta, un'altra possibile soluzione consiste nel progettare componenti a basso consumo in grado di offrire lo stesso livello di performance.

Nonostante la novità dell'argomento, sono già stati prodotti modelli e soluzioni per far fronte al problema del consumo energetico nelle comunicazioni e alcune di queste soluzioni sono già in fase di introduzione nei dispositivi da parte delle aziende produttrici.

Le attività di ricerca in corso possono essere raggruppate in tre grandi filoni:

- Ottimizzazione hardware
- Miglioramento delle implementazioni di rete
- Modifica della gestione del sistema

1.2 Ottimizzazione hardware

Un primo miglioramento nell'efficienza energetica è ottenibile andando ad operare direttamente sulle componenti hardware che costituiscono la fonte effettiva del consumo. Queste possono essere rese più efficienti in senso assoluto (es. minor dispersione), ma anche più intelligenti: possono per esempio adattare il consumo al carico di lavoro richiesto. Infatti, le reti di telecomunicazioni sono dimensionate sul traffico delle ore di picco. In realtà la porzione di tempo in cui il traffico è inferiore al 10% del picco durante il giorno è pari a circa 30% nei giorni feriali e 45% nei festivi [4]. C'è quindi ampio margine su cui risparmiare. Le principali componenti hardware che influiscono sul profilo energetico di una base station (BS) sono: antenne, RF transceiver, base band processor e amplificatori di potenza.

1.2.1 Antenne

Il guadagno di efficienza in specifici tipi di antenne omnidirezionali, settoriali o direzionali può essere ottenuto ottimizzando la struttura dell'antenna congiuntamente al miglioramento della rete di alimentazione. Per le antenne stampate l'uso di nuovi materiali a bassa perdita come il metallo e materiali

dielettrici portano notevoli miglioramenti e in generale a seconda delle configurazioni specifiche vi è un grado di miglioramento tecnologico molto elevato per le antenne.

Grazie al MIMO e a schemi di *beamforming* si può aumentare il data rate per una certa potenza trasmissiva fissata, o equivalentemente è possibile ridurre la potenza di trasmissione necessaria per raggiungere una determinata velocità dei dati.

1.2.2 RF Transceiver

Le innovazioni nelle architetture degli RF transceiver (RF TRX) hanno come obiettivo la riduzione dei costi e l'ottimizzazione del consumo energetico offrendo flessibilità in termini di condizione operative, variazioni di banda e frequenze utilizzate. Per il miglioramento dell'efficienza energetica si possono adottare approcci che vanno a modificare sia la parte circuitale che gli algoritmi a livello di sistema.

1.2.3 Baseband Processing

La capacità della base station e il numero di utenti che è in grado di supportare hanno un impatto diretto sulla capacità di calcolo necessaria ad ogni BS. Per le small cell (BS in cui gli apparati hanno costo, dimensioni e capacità computazionali inferiori rispetto a quelli delle tradizionali macro celle) questa capacità di calcolo è un contributo significativo al consumo di energia elettrica. Per soddisfare le richieste di traffico vengono utilizzati algoritmi di *signal processing* sempre più complessi, la sfida consiste nel trovare un compromesso tra architetture di BaseBand (BB) flessibili ed energeticamente efficienti. Una soluzione che permette di ottenere un risparmio energetico consiste nell'utilizzare degli algoritmi di *BB processing* in grado di adattare il consumo energetico in accordo con il numero di utenti attivi.

1.2.4 Amplificatori di Potenza

Nelle comunicazioni mobili, gli amplificatori di potenza delle macro BS sono i componenti responsabili della maggior parte del consumo energetico, essi operano ad alti valori di potenza indipendentemente dal carico della BS, causando per la maggior parte del tempo uno spreco di energia. In [5] si è identificato un grande potenziale per il risparmio energetico nell'ambito degli amplificatori di potenza. La riduzione del consumo energetico può essere ottenuta percorrendo due strade: la prima strada, definisce l'*ottimizzazione del punto di lavoro degli amplificatori di potenza* per livelli di segnali arbitrari, in modo da ottimizzare l'efficienza energetica per bassi, medi e alti carichi di traffico. Il secondo approccio propone la *disattivazione degli stadi degli amplificatori di potenza* per il risparmio energetico nei periodi senza trasmissione di segnali. In situazione di carico variabile, l'utilizzo congiunto delle due tecniche permette di ottenere grandi miglioramenti nell'efficienza energetica.

Altri studi sempre nell'ambito del miglioramento dei dispositivi d'accesso hanno mostrato come un ulteriore risparmio energetico possa essere ottenuto utilizzando meno potenza per le risorse wireless non utilizzate. In [6] viene mostrato come fino al 97% delle risorse wireless nei sistemi OFDM non siano utilizzate nelle celle d'accesso. In [7] un approccio simile viene proposto anche per i sistemi W-CDMA. Alcune tecniche che possono essere utilizzate a tal proposito sono:

1.2.5 Discontinuous Transmission e Sleep Mode

Durante i periodi di basso traffico, la maggior parte della capacità delle BS rimane inutilizzata per molte ore. Anche durante i periodi di carico moderato una parte significativa delle risorse rimane inutilizzata. Di conseguenza i

consumi operativi e quelli dovuti alla potenza trasmessa possono essere ridotti enormemente nei periodi di traffico moderato rispetto al traffico delle ore di picco. Nel caso non ci siano utenti da servire una BS può essere messa in modalità di *discontinuous transmission* (DTX) o *sleep* per ridurre il consumo. È possibile definire diversi livelli di DTX, in base alla loro durata, che può variare da pochi simboli OFDM fino a diverse ore. Una possibile divisione in relazione alla durata di una sub-frame (1 ms) e di una radio frame (10 ms) è la seguente:

Micro DTX: meno di una sub-frame.

Short DTX: meno di una radio frame (ma almeno più di una sub-frame).

Long DTX: una o più radio frame. Deve essere comunque sufficientemente corta da permettere ai terminali mobili di eseguire la procedura di *cell selection* e di effettuare misure per la mobilità.

Sleep mode: Più lungo del Long DTX, gli utenti non sono in grado di ricevere le portanti delle BS che operano in sleep mode.

L'utilizzo della DTX è più efficiente quando il carico sulla cella è basso.

1.2.6 Gestione dinamica della banda

Al contrario della DTX che opera sull'asse temporale, la gestione della banda opera nel dominio della frequenza, permettendo un alto risparmio energetico negli amplificatori di potenza tramite una gestione dinamica della banda determinata in base al carico della rete. L'adattamento dinamico della banda offre potenzialmente un ulteriore risparmio energetico a livello di sistema andando a ridurre l'interferenza inter-cella attraverso l'utilizzo di uno schema di riuso frequenziale in cui il coefficiente di riuso sia maggiore di 1 nei periodi di basso traffico. Questa soluzione richiede il coordinamento con le celle vicine,

tramite messaggi di segnalazione per poter determinare la miglior configurazione frequenziale.

1.2.7 Adattamento alle dinamiche del sistema

Le BS possono adattare le trasmissioni dati alle condizioni di canale ottimizzando l'allocazione delle risorse e, dunque, l'efficienza energetica. Per far questo devono avere più informazioni riguardo lo stato del canale e del sistema in generale. Si deve quindi far fronte ad un trade-off: più informazioni di canale portano ad un decremento dell'energia necessaria alla trasmissione dei dati ma aumenta il dispendio energetico dovuto all'overhead. L'obiettivo è identificare quante informazioni di canale l'algoritmo ottimale deve utilizzare e in quale modo devono essere acquisite tali informazioni. Gli algoritmi per il controllo del link dipendono dalla periodicità e dalla granularità dei report provenienti dagli utenti. La periodicità di tali report deve essere sincronizzata con le fluttuazioni del canale.

Un'altra possibilità potrebbe essere quella di fornire più o meno capacità a seconda della domanda nella zona e/o periodo di tempo. Una funzionalità *on-demand* può ridurre il consumo totale di potenza della stazione base rispetto ad uno stato *always-on*, senza degradare le prestazioni della rete.

Analizzando gli approcci proposti dal primo filone, si può concludere che il miglioramento dell'efficienza energetica dei dispositivi, e in generale del singolo sito, può già portare dei notevoli miglioramenti nella riduzione del consumo energetico dei sistemi wireless. Tuttavia non si riesce comunque a far fronte al consumo di potenza di base delle base station attive. Converrebbe quindi adottare un approccio più radicale che permetta di spegnere completamente le BS quando non utilizzate.

1.3 Miglioramento delle implementazioni di rete

Un altro campo d'indagine per il risparmio energetico è una razionalizzazione del layout della rete. Per esempio installare una singola BS per coprire un'area molto grande può risultare inefficiente. Si può migliorare la pianificazione aggiungendo nuove metriche di performance come la copertura e l'efficienza spettrale.

Di seguito sono elencate diverse strategie di distribuzione adottabili: celle di dimensione variabile, utilizzo di ripetitori, la cooperazione tra BS e la distribuzione multi-RAT.

1.3.1 Reti eterogenee

Per quanto riguarda l'ottimizzazione energetica di una rete, è noto che l'utilizzo di una rete composta da BS piccole e a basso consumo energetico, con una densità di siti adeguata, può portare un ampio miglioramento rispetto ad una topologia a bassa densità di siti ad alta potenza. L'energia media consumata da una BS dipende dalle dimensioni della cella e dalla copertura, pertanto le micro celle consumeranno meno energia rispetto alle macro celle grazie alle condizioni di propagazione migliori e alle aree di copertura più piccole (tipicamente 100 m di raggio). Le reti cellulari odierne consistono principalmente in macro base station, che vengono impiegate negli ambienti rurali, sub-urbani e urbani, con dei raggi di copertura dell'ordine dei 500 fino ai 2500 m, con un grado di copertura del 90%. Con la migrazione verso i sistemi LTE, si assisterà ad una densificazione della rete, con *ISD* tra le celle anche inferiore a 500 m. Gli studi riportati in [8] mostrano come si possa ottenere un notevole risparmio energetico affrontando il problema di dimensionamento/pianificazione con una rete eterogenea. Si useranno le macro BS per assicurare la copertura e le small cell principalmente per garantire la capacità soprattutto in ambienti indoor. Un'altra

strategia consiste nella separazione dell'intera rete in due parti: zona ad alto traffico e zone a basso traffico; le dimensioni di cella vengono determinate in base alla distribuzione spaziale del traffico. In questo tipo di rete l'utilizzo di celle di diverse dimensioni può portare ad un risparmio energetico rispetto al caso uniforme senza ridurre la QoS.

Un'altra decisione che può essere presa per ridurre il consumo energetico della rete radio riguarda la scelta delle opportune configurazioni delle BS. Bisogna ottimizzare individualmente i componenti di ogni tipologia di BS.

1.3.2 Utilizzo di ripetitori

I ripetitori, consumando meno potenza rispetto alle macro BS, sono energeticamente molto più efficienti rispetto a quest'ultime. Per poter raggiungere un'efficienza energetica ottimale la soluzione migliore potrebbe essere uno scenario ibrido con ripetitori o *scenario multi-hop*. È possibile confrontare tra di loro diverse tecniche di ripetizione, come *amplifica-e-inoltra* o *decodifica-e-inoltra*, per valutarne l'efficienza energetica e scegliere la migliore. In [6] è studiato uno scenario ibrido, in cui alla copertura delle macro BS sono stati aggiunti dei ripetitori per la copertura indoor; dalle simulazioni effettuate si è visto come con 5 ripetitori per macro cella si riesce a fornire una copertura adeguata con un minore consumo energetico per area rispetto ad uno scenario senza ripetitori.

1.3.3 Base station cooperative

I meccanismi di cooperazione permettono un incremento dell'efficienza energetica di una base station sfruttando la diversità, il coordinamento dell'interferenza tra le celle tramite uno scheduling coordinato, il beam-forming coordinato ed elaborazione congiunta.

La cooperazione tramite l'elaborazione congiunta è una delle tecniche più promettenti nel caso sia disponibile un'unità centrale. Tuttavia pur essendo l'approccio che raggiunge i migliori risultati tra i vari schemi, CoMP (Coordinated Multi-point transmission/reception, una tecnica di elaborazione congiunta in cui il terminale mobile comunica con più settori o celle) è anche quello che richiede un maggior overhead di segnalazione. Per facilitare la cooperazione tra base station esistono in letteratura diverse architetture e protocolli di trasporto, i quali giocano un ruolo importante nella progettazione della rete di backhaul e hanno quindi un impatto sul consumo energetico totale.

1.3.4 Distribuzioni Multi-RAT

Con GSM, UMTS, HSPA e LTE le tecnologie ad accesso radio (RAT) disponibili sono molteplici e spesso collocate nella stessa area o addirittura nello stesso sito. Le tecniche di risparmio energetico nelle distribuzioni Multi-RAT si focalizzano sull'ottimizzazione della distribuzione del traffico tra le varie RAT. Il maggior risparmio energetico si avrà adottando una strategia di distribuzione del carico ottimale, dove il traffico sarà assegnato al RAT più idoneo e più energeticamente efficiente. In questo modo si potrà ridurre il numero di base station attive in base alla reale domanda di traffico sulla rete ottenendo notevoli vantaggi.

I due ambiti di ricerca proposti finora, miglioramento dei dispositivi d'accesso e delle implementazioni di rete, hanno un grande limite: pur migliorando l'efficienza energetica, non permettono alla BS di spegnersi e quindi avere un consumo energetico pari a zero.

1.4 Modifica della gestione del sistema

Un possibile risparmio energetico è stato identificato, grazie alle attività di ricerca del terzo filone, nella gestione dinamica della capacità della rete, adattando il sistema alla domanda di traffico reale, seguendo le variazioni di carico sia nel breve che nel lungo periodo.

I risparmi sul consumo derivano dalla riconfigurazione delle BSs in stati di risparmio energetico nei casi in cui ci sia poco traffico sulla rete, per esempio quando non ci sono utenti attivi da servire o se gli utenti possono essere serviti da altre celle.

Dato che ottimizzare la rete dinamicamente a seconda del carico è un problema computazionalmente intrattabile [9] sono stati proposti dei metodi euristici per decidere quale cella mettere in sleep mode [10] [11] [12]. La gestione della rete proposta in [11] consiste in una pianificazione di rete dinamica, basata sull'intensità di traffico istantanea, che riduce il numero di dispositivi d'accesso attivi quando sono sottoutilizzati, per esempio durante i periodi notturni nelle aree commerciali urbane. Quando una BS viene spenta, la copertura radio e la fornitura di servizio verranno presi in carico dai dispositivi rimasti attivi, con un eventuale piccolo aumento della potenza trasmissiva per garantire la disponibilità del servizio in tutta l'area. La decisione di spegnimento di un dispositivo è un processo critico, bisogna mantenere i requisiti sulla qualità del servizio e i vincoli di copertura.

Il dimensionamento delle celle viene fatto sulla base della domanda di traffico di picco, come avviene normalmente nelle aree metropolitane. Questa pianificazione diventa sovradimensionata nelle aree in cui per alcuni periodi temporali il traffico è molto minore rispetto al suo valore di picco. Durante questi periodi è possibile spegnere alcune BS a condizione che la copertura dell'area sia preservata. Assumiamo che durante i periodi di picco un'area sia

servita da K celle, ognuna con un traffico f , raggiungendo la qualità del servizio desiderata (QoS). Quando il traffico diminuisce, diciamo xKf (con $x < 1$) nell'intera area, solo xK celle saranno necessari per ottenere la stessa QoS, preservando la copertura dell'area. In questo modo $(1-x)K$ celle possono essere spente rispetto al totale K , risparmiando una frazione di energia uguale a $(1-x)$, riducendo il consumo totale ad una frazione x dell'originale. La scelta del valore di x deve essere presa con cura: lo spegnimento di molte celle porta ad un grande risparmio energetico, però a causa di particolari profili di traffico potrebbe essere possibile lo spegnimento solo per periodi di tempo brevi. In questo caso lo spegnimento di un numero minore di BS per un periodo temporale più lungo potrebbe portare ad un maggiore risparmio energetico. In questo modo è possibile ottenere risparmi energetici dell'ordine del 25-30%. Questo dato fornisce un enorme incentivo, agli operatori delle reti cellulari, per elaborare approcci dinamici alla gestione delle risorse nelle loro reti, ottenendo grandi risparmi energetici. Questo approccio non è però applicabile alle aree con una densità di traffico bassa e celle di grandi dimensioni, dato che la copertura radio non potrebbe essere garantita nel caso si spegnessero alcune celle. In queste zone infatti, non essendoci problemi di capacità, il numero di celle è già il minimo sufficiente a garantire la copertura totale dell'area.

1.5 Limitazioni del risparmio energetico nelle reti cellulari

L'idea di base dietro alla gestione dinamica della capacità della rete consiste nello sfruttare la capacità disponibile nelle reti cellulari quando il traffico è basso per poter mettere un sottoinsieme di base station in uno stato inattivo a basso consumo energetico Figura 1. Questo perché tipicamente le base station sono caratterizzate da una differenza notevole tra la potenza minima dello stato attivo e quella consumata nei periodi di inattività/sleep.

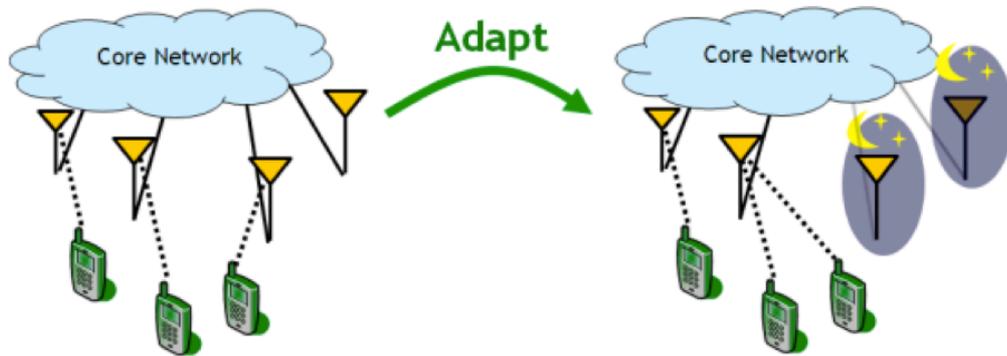


Figura 1 Concetto di risparmio energetico nelle reti cellulari

Pertanto le strategie di gestione dell'energia a livello di sistema sono l'approccio più promettente per realizzare un profilo energetico della rete proporzionale al carico di traffico. Il comportamento energetico ideale che si può desiderare da una strategia di gestione dell'energia è un consumo energetico dell'intero sistema che dipenda linearmente dal carico della rete, molto basso nel caso in cui non ci sia traffico fino a un valore massimo in full load Figura 2.

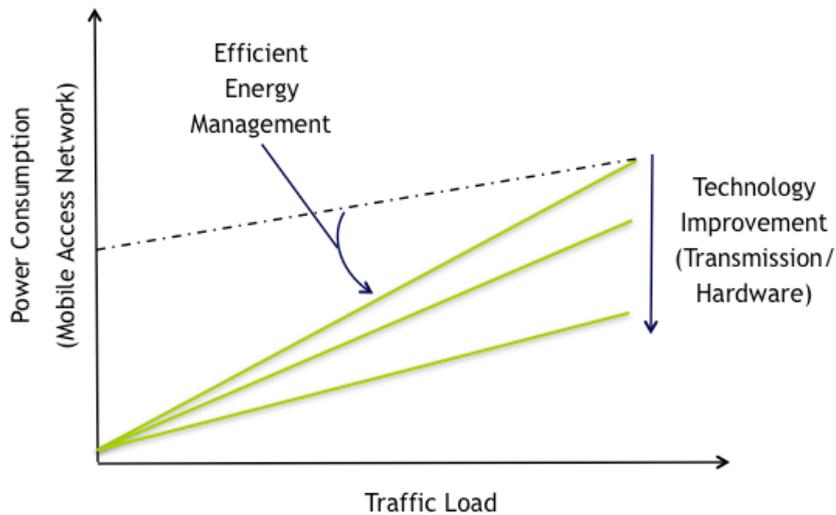


Figura 2 Impatto del network management e delle tecnologie sulle performance energetiche

Se si riuscisse a raggiungere questo comportamento ideale eventuali miglioramenti tecnologici futuri andranno a sommarsi a quelli ottenuti da una gestione efficace dell'energia. Sfortunatamente ci sono alcuni vincoli legati alle architetture delle reti cellulari tradizionali che impediscono una gestione ottimale dell'energia e, più in generale, il raggiungimento di un'elevata riduzione del consumo energetico.

Il concetto alla base delle reti d'accesso wireless è la copertura totale dell'area di servizio, che assicura l'accesso alla rete ai terminali degli utenti presenti nell'area in qualsiasi momento. L'area di copertura massima che potenzialmente una cella può coprire dipende da diversi parametri, tra cui la potenza trasmessa e le condizioni di propagazione.

Dove la densità di traffico è bassa, i layout delle celle comunemente adottati sono solitamente guidati dalla necessità della piena copertura sfruttando tutto il raggio della cella, limitando la sovrapposizione con le celle vicine a quanto è necessario per la gestione della mobilità.

Nelle aree in cui il traffico è molto alto invece, la densità delle base station è incrementata in modo da ridurre la dimensione della cella e incrementare la capacità disponibile per unità di area. Come risultato il layout della rete è caratterizzato da una copertura ridondante dove ogni punto dell'area sarà servito da diverse stazioni radio base. E' abbastanza evidente come le procedure di gestione dell'energia nelle architetture tradizionali di una rete cellulare possano sfruttare questa ridondanza di copertura, necessaria per fornire sufficiente capacità nel caso di traffico elevato, solo quando il traffico è basso. Inoltre per poter garantire una copertura totale in qualsiasi momento, una parte non trascurabile della rete non potrà mai essere spenta anche se non ci sono utenti attivi.

E' stato mostrato come con l'introduzione delle strategie di risparmio energetico nelle attuali reti cellulari sia possibile ottenere, in base ai profili di traffico utilizzati e ai layout di rete, un risparmio energetico dell'ordine del 25%-30%. Paradossalmente questo risparmio potrebbe addirittura ridursi (in percentuale) nel prossimo futuro con l'introduzione delle nuove architetture di rete basate sulle micro celle, in quanto le micro-celle offrono alta capacità con una limitata sovrapposizione delle aree, lasciando poco spazio per la gestione dell'energia in quanto fondamentalmente tutte le cellule sono essenziali per garantire una copertura completa.

Pertanto il comportamento ideale mostrato in Figura 2 non può essere realizzato con l'attuale sistema d'accesso delle reti cellulari tradizionali, è necessario rimodellare la struttura della rete e fornire metodi innovativi per poter sempre garantire l'accesso alla rete.

Una delle soluzioni proposte nell'ambito del terzo filone di ricerca consiste nella separazione della parte di segnalazione, tra terminali mobili e rete d'accesso, dalla trasmissioni di dati. In questo modo si può mantenere una copertura full-time sfruttando il risparmio energetico dato dallo spegnimento delle celle dati. Siccome la segnalazione da sola genera un data-rate molto basso, la rete di segnalazione d'accesso può essere progettata per un'alta efficienza energetica e per una copertura molto ampia adottando adeguati livelli MAC e PHY. Le celle dati invece saranno ancora ottimizzate per alti data rate e raggi di copertura minori per far fronte alle richieste di traffico attuali e future.

1.6 Letteratura

Il primo richiamo al concetto di green networking si ha nel 2003 con [13]. Gli autori intuiscono che Internet è un terreno vergine per il risparmio energetico. Aumentare l'efficienza energetica non comporta semplicemente un risparmio economico da parte degli operatori. Un costo minore porta una diffusione

maggiore, anche in aree povere di risorse (economiche o energetiche) come paesi in via di sviluppo o zone colpite da disastri naturali. Calcolano che per trasmettere un Byte su un link wired si consumano circa 0,128-0,225 Joule, mentre per trasmetterlo per 100 m in wireless solo 1,6 microJoule: i link wireless sono quindi due o tre volte più efficienti dei corrispondenti wired. Propongono come soluzione principale l'introduzione dello sleep mode per gli apparati di rete. Notano però che occorre ottimizzare i protocolli di Internet affinché supportino questi cambi di stato degli apparati.

1.6.1 Sleep mode

Nelle reti cellulari il primo elemento da prendere in considerazione per implementare lo sleep mode è l'antenna. Si parla di forzare alcuni elementi nello stato di sleep nel WiFi in [14] e [15] e nelle reti ad-hoc multi hop in [16].

Troviamo diversi articoli che studiano lo sleep mode da diverse prospettive.

In [11] [12] e [17] si studia una pianificazione dinamica della rete. Questa è dimensionata secondo la domanda di picco, ma durante i periodi di basso traffico rimane largamente sottoutilizzata. Gli autori quindi propongono di spegnere alcune antenne lasciando alle rimanenti il compito di colmare i buchi di copertura. Ciò comporta un leggero aumento della potenza trasmessa dalle antenne ancora attive (trascurabile rispetto al guadagno dato da un'antenna spenta), che dev'essere contenuto per non eccedere i limiti elettromagnetici imposti per legge. Si studiano quindi diverse politiche per lo spegnimento delle BS. Quando si prende la decisione di spegnere una BS si può aspettare che non ci siano più utenti nella cella, o non accettare nuove richieste e terminare il servizio degli utenti presenti o infine spegnerla immediatamente forzando gli handover degli utenti ancora attivi nella cella. Gli stessi autori effettuano test con diversi layout: celle esagonali, crossroad o Manhattan e diverse tipologie di

traffico, comprese tracce reali. Dimostrano di esser in grado di raggiungere il 25% - 30% di risparmio energetico.

Gli autori di [10] sono i primi a creare un modello ILP per minimizzare il consumo energetico e assicurare la copertura degli utenti attivi garantendogli una certa QoS. Il modello è applicabile a diverse tecnologie: wlan, wimax, 2G/3G/4G. Propongono l'uso di un'unità centralizzata di gestione per la stima del traffico nelle varie ore della giornata.

In [4] formulano un problema di minimizzazione del costo totale che permette un compromesso flessibile tra le performance di QoS ed energia. Dividono il problema in due sottoproblemi: associazione utente-antenna e accensione-spegnimento dell'antenna, poiché suppongono il primo molto più veloce rispetto al secondo. I periodi di spegnimento delle BS tradizionali infatti sono dell'ordine delle decine di minuti, mentre le associazioni vengono effettuate in microsecondi. Dichiarano di ottenere un risparmio energetico del 70%-80% soprattutto nelle aree urbane.

In [18] si pone l'accento sul cambio dello scenario dell'interferenza dovuto allo spegnere e riaccendere le antenne. Inoltre considerano che spegnendo un'antenna l'utente potrebbe associarsi ad un'antenna più lontana e quindi aumentare la propria potenza di trasmissione consumando più energia. Dimostrano che negli scenari reali questo aumento di distanza e quindi di energia è minimo, anche in situazioni di basso carico con molte BS spente. Questo è dovuto al fatto che gli utenti tendono ad aggregarsi anche nei periodi di basso traffico e quindi rimarranno attive le antenne a loro più vicine.

In [9] elaborano un metodo di ottimizzazione offline che faccia da limite superiore rispetto alle condizioni operative. Cercano di ri-arrangiare le associazioni utente-antenna per poter spegnere il maggior numero di antenne non utilizzate. Dopo aver formulato un problema ne propongono una soluzione euristica. Affermano che riuscire a predire la posizione dell'utente può portare a

notevoli vantaggi anche nei periodi di alto traffico. Concludono sostenendo che data la natura elastica del traffico web-like aggregare gli utenti in poche celle ha un impatto lieve sulla QoS ma importante sul risparmio energetico.

Tutti gli approcci descritti precedentemente cercano di ottimizzare il consumo energetico in periodi abbastanza lunghi (giorno e notte).

In [19] si cerca di effettuare un'ottimizzazione con una scala temporale minore. Si fa distinzione tra voce e dati dando priorità alla prima. Il consumo energetico scala con la domanda di traffico, evitando eccessivi sovradimensionamenti.

1.6.2 Micro celle

Un altro grande ambito di ricerca è l'uso di microcelle. In [8] confrontano lo scenario costituito da sole macro celle che variano il consumo energetico con il traffico, con uno scenario di sole micro celle e infine uno scenario ibrido. Si concentrano sul risparmio energetico senza tener conto della probabilità di blocco di una chiamata. Concludono mostrando come lo scenario ibrido sia il più efficiente da un punto di vista energetico.

Anche in [20] viene testato uno scenario ibrido con macro e micro celle. Introducono la metrica di consumo di energia per area (Watt per km², ovvero il consumo di potenza medio in una cella diviso per la sua misura). Gli autori forniscono un framework per valutare e ottimizzare l'implementazione di reti cellulari rispetto al numero medio di micro celle per macro cella e della dimensione delle macrocelle. Confermano che l'uso e l'attivazione delle micro celle permette di diminuire il consumo energetico pur continuando a raggiungere la QoS richiesta.

1.6.3 Context Awareness e separazione Dati-Segnalazione

Un'ulteriore innovazione tecnologica utile all'incremento del risparmio energetico è il paradigma "context awareness". In [21] viene manifestata la

necessità di ottenere reti cellulari in cui la gestione si concentri sulla pianificazione e sul monitoraggio delle performance. Ciò è possibile con l'introduzione della context awareness che permette alla rete di auto organizzarsi dinamicamente. In [22] viene sviluppata per la prima volta l'idea della separazione tra le celle di segnalazione e quelle dati. In questo modo si può creare una rete di segnalazione a basso data-rate ma alta efficienza spettrale ed energetica grazie a performanti livelli MAC e PHY. Questo permette di avere una rete dati dinamica che non ha più il limite della copertura globale, ma solo della capacità. Questa innovazione, esplorata ulteriormente in [23] come parte del progetto BCG2 permette di esser 50 volte più efficiente rispetto allo scenario attuale.

Infine citiamo un approccio differente rispetto agli altri, che prevede di condividere le risorse radio tra più operatori nei momenti di basso carico [24]. Quando una regione è coperta da due operatori, ma basterebbero le risorse di uno solo per soddisfare la richiesta di traffico, si potrebbero implementare delle politiche di condivisione della rete. E' stato calcolato un risparmio energetico del 20% con l'utilizzo di questa tecnica. Gli operatori però non son sempre favorevoli a questo approccio. Un rischio su tutti è quello che l'operatore che ospita la rete del concorrente possa analizzare e profilare il traffico che transita sui suoi apparati.

Il nostro lavoro implementa molte delle innovazioni sopra citate: consideriamo uno scenario ibrido (macro e micro celle) e ideale, con la possibilità di accendere e spegnere le antenne dinamicamente con una frequenza vicina a quella delle associazioni utente-antenna. Abbiamo celle di segnalazione e celle dati e un completo controllo della context awareness.

Capitolo 2 - BCG2 Beyond Cellular Green Generation

In questo capitolo si illustreranno le caratteristiche del progetto BCG2 che sfrutta come idea di base la separazione nelle reti wireless della parte di segnalazione da quella dati, tale separazione permette una configurazione dinamica ed efficiente della rete in base al carico richiesto. Questa concezione si discosta da quella delle reti cellulari tradizionali in quanto i vincoli di copertura per le trasmissioni dati vengono rilassati. In questa maniera le base station dati hanno la libertà di entrare in *sleep mode* in caso di basso profilo di traffico, lasciando alle BS di segnalazione il compito di garantire la copertura.

Per la valutazione del potenziale risparmio energetico, si utilizzano come input quattro modelli [25] [26]. Questi modelli sono: la topologia della rete, il modello spazio-temporale delle richieste d'utente, l'algoritmo di gestione delle risorse per l'attivazione delle base station e l'andamento del consumo energetico delle BS al variare del carico di lavoro.

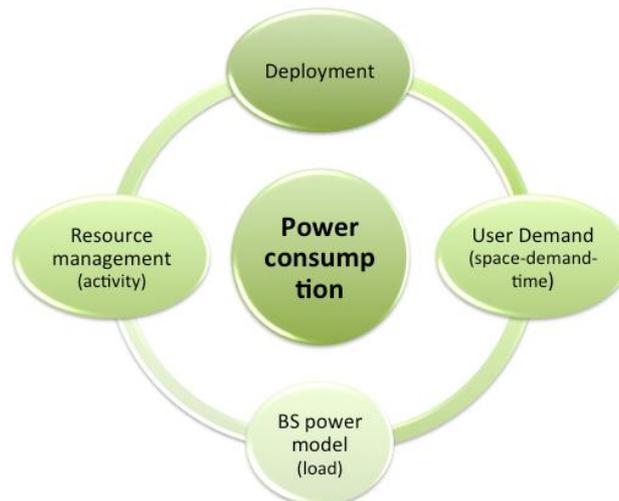


Figura 3 Modelli in input

Per descrivere le richieste degli utenti si utilizza un modello spazio-temporale del traffico. Quest'ultimo può essere modellato direttamente o tramite un duplice modello composto da un modello spazio-tempo per la posizione degli utenti e un modello domanda-tempo per il traffico.

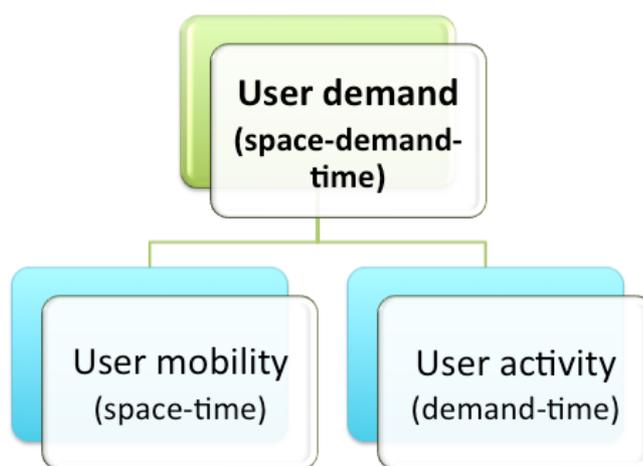


Figura 4 Modello Spazio-temporale per la domanda di traffico degli utenti

Diversi livelli di astrazione sono possibili nella modellazione del consumo energetico delle BS per via delle numerose componenti hardware di cui sono composte. La topologia della rete definisce la distribuzione degli utenti nelle celle, che può quindi determinare il carico di una stazione. Il carico può influenzare il consumo energetico di una stazione, sarà quindi necessario uno schema di gestione delle risorse per pilotare l'attivazione delle BS.

Il resource management si occupa di fornire la miglior configurazione di rete per servire le richieste degli utenti, per far ciò è necessaria una conoscenza sul **context** del servizio: sia lato utente (QoS, posizione, etc..) sia lato rete (risorse disponibili, stato delle BS, etc..)

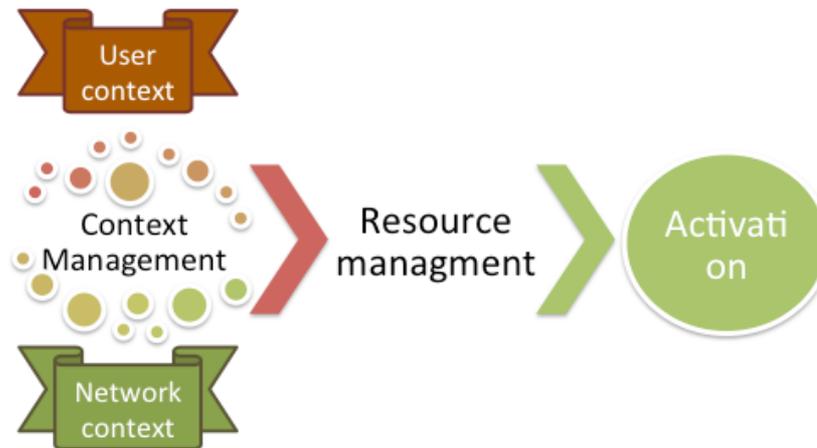


Figura 5 Context e resource management

In questo capitolo dopo aver discusso brevemente del cambiamento di paradigma nella progettazione della nuova rete, basato sulla separazione della rete di segnalazione da quella dati, verranno analizzate le “sfide tecniche” che ne derivano. Nella parte rimanente si descriveranno le assunzioni e i concetti utilizzati per la definizione dei principali modelli di riferimento utilizzati per la valutazione delle performance del sistema: il layout della rete, i modelli energetici per le BS e i modelli informativi richiesti dal context management per le potenziali strategie di gestione delle risorse che possono essere implementate.

2.1 Copertura a richiesta per un’alta efficienza energetica

Il principio alla base di questo approccio deriva dalla considerazione che per poter garantire un servizio “sempre connesso” non è necessario trasmettere molte informazioni. Bisogna solo fornire informazioni che permettono al terminale mobile di connettersi alla rete quando desidera e di essere raggiunto dalla procedura di paging.

La separazione tra rete di segnalazione e rete dati introduce due vantaggi. Il primo è la possibilità di spegnere le base station per l'accesso dati quando non ci sono utenti attivi. Il secondo è la possibilità di progettare le base station di segnalazione, che sono le uniche a dover garantire sempre la copertura, per bassi data rate e trasmissioni a lungo raggio. Cosa che è chiaramente più efficiente dell'attuale architettura in cui i dati e la segnalazione sono combinati.

La Figura a) schematizza il funzionamento della rete dati. Nelle aree in cui non ci sono utenti attivi nessuna base station dati è attiva per evitare lo spreco di risorse radio. Nella Figura b) viene invece mostrato come i nodi di segnalazione forniscano copertura anche dove non ci sia un utente attivo. L'idea è quindi quella di avere da una parte, una rete per l'accesso dati flessibile e intelligente progettata per un alto data rate e dall'altra, una rete di segnalazione fissa che garantisca la copertura dell'intera area, i cui dispositivi radio sono progettati per essere energeticamente efficienti nel caso di trasmissioni a lungo raggio e a basso bit rate.

Da questo nuovo approccio nascono una notevole quantità di problemi tecnici causati dall'interazione tra rete di segnalazione e reti dati che richiede un ulteriore lavoro di ricerca nell'ambito delle reti di telefonia mobile.

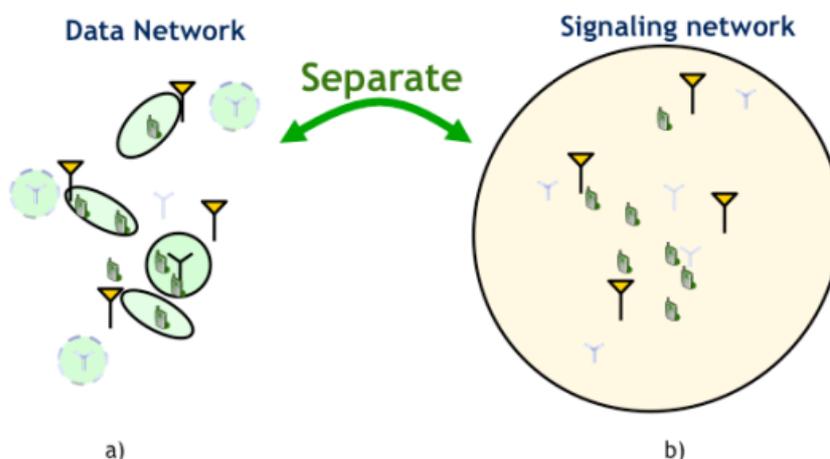


Figura 6 Funzionamento rete dati e rete segnalazione

Una considerazione finale va fatta sul concetto di copertura. Tradizionalmente un utente è definito coperto se può ricevere il segnale di almeno una base station. Tuttavia altre definizioni di copertura possono essere applicati alla nuova architettura, un utente coperto potrebbe essere definito come un utente che può informare un dispositivo di segnalazione della sua richiesta di connessione e comunicare con almeno un punto di accesso dati assegnato. E' possibile definire una copertura ancora più estrema in cui un utente è coperto se può ricevere una trasmissione da una base station di segnalazione all'interno di un dato intervallo di tempo o comunicare con almeno una base station, sia di segnalazione che dati

2.2 Technical Challenges

In questo paragrafo verranno analizzate le sfide tecniche relative a questa nuova architettura. Nel seguito verranno commentate queste sfide e, ove opportuno, si discuterà su come siano connesse ai vantaggi introdotti dal nuovo sistema.

2.2.1 Context Awareness

I meccanismi di segnalazione tradizionali adottati dalle attuali tecnologie cellulari interagiscono con i terminali degli utenti per ottenere informazioni sui servizi richiesti e con gli elementi della rete necessari per fornire tali servizi. La rete di segnalazione della nuova architettura necessita di un maggior numero di informazioni da parte degli utenti a causa della separazione della base station di segnalazione che riceve le richieste dagli utenti dalla base station della rete dati che allocherà le risorse. Questa informazione è necessaria per poter caratterizzare quello che viene chiamato *context* del servizio richiesto. Il context è l'elemento chiave che permette alla rete di segnalazione di attivare gli algoritmi di selezione delle risorse appropriati per la rete dati.

La prima e fondamentale informazione da includere nel context è la posizione del terminale utente rispetto al potenziale access point che può servire la sua richiesta, cosa non necessaria nell'architettura tradizionale in quanto la stazione radio-base che riceve la richiesta è anche quella che servirà l'utente.

Il servizio di localizzazione utilizzato per la stima della posizione del terminale dell'utente può essere parte delle funzionalità previste dalla nuova rete di segnalazione o essere fornito da sistemi esterni. Diversi sistemi di localizzazione possono essere utilizzati anche in parallelo per ottenere la migliore valutazione possibile che verrà poi utilizzata dalla rete mobile quando necessario, in base allo scenario (ad esempio outdoor o indoor) e ai servizi supportati dal terminale (ad esempio posizionamento satellitare).

La sola posizione potrebbe non essere sufficiente ad identificare la base station ottimale in quanto la qualità del canale radio, tra il terminale e la base station, potrebbe essere degradata da ostacoli o altre cause di attenuazione. E' quindi necessario mappare in modo appropriato le informazioni relative alla posizione con degli stimatori della qualità del canale radio relativo alle base station dell'area visitata. Il sistema può per esempio utilizzare misure fornite dai terminali durante le sessioni dati attive, che possono essere memorizzate insieme alla posizione e utilizzate per richieste future. Un altro elemento che può caratterizzare il *context* di un utente oltre alla sua posizione è una stima della sua mobilità. Con l'utilizzo di queste informazioni è possibile identificare quale base station attivare in base alla traiettoria, evitando in questo modo di selezionare una cella che con alta probabilità verrà abbandonata rapidamente dal terminale durante il suo spostamento.

2.2.2 Resource Management

La gestione delle risorse si occupa di selezionare e allocare le risorse necessarie per servire un utente nella base station a cui è stata indirizzata la richiesta. Le

procedure di selezione delle risorse rappresentano una componente chiave della nuova architettura per ridurre il consumo energetico in quanto determinano lo stato energetico dei dispositivi di rete. Queste procedure oltre alle informazioni di context del servizio richiesto dall'utente devono anche tenere in conto dello stato della rete e dei suoi dispositivi. La selezione o l'attivazione di una base station per servire un utente non è di per sè un'operazione difficile. Sfortunatamente ottimizzare il processo decisionale è molto più complicato. Anche l'identificazione di un obiettivo ottimizzato non è facile, a causa dell'ovvio trade-off fra costo energetico e performance e per gli altri vincoli coinvolti come la qualità del servizio richiesta, i limiti di capacità, la tecnologia della base station in range e le risorse radio disponibili.

Il resource management è naturalmente un processo di decisione online e l'incremento del costo energetico dovuto a una richiesta di servizio dipende dallo stato della base station. Se la base station è già attiva l'incremento necessario a servire un utente addizionale è tipicamente molto minore rispetto al caso in cui è necessaria la ri-attivazione. Anche la mobilità è un'informazione molto importante da tener in conto nell'algoritmo decisionale, bisogna fare in modo di selezionare una sequenza di base station che seguano il movimento dell'utente.

2.2.3 Tecnologie radio per la rete di segnalazione

La rete di segnalazione proposta per questa nuova architettura presenta caratteristiche uniche tra cui: robustezza, basso consumo energetico, lungo raggio e bassi data rate. Pertanto la progettazione di tale rete richiede un cambiamento di paradigma rispetto agli approcci tradizionali.

La necessità di creare aree di copertura relativamente grandi per le BS di segnalazione porta ad utilizzare basse frequenze che forniscono migliori condizioni di propagazione e maggior capacità di penetrazione degli ostacoli. La

necessità di ridurre al minimo il consumo energetico tende a privilegiare uno schema di accesso *time based* che consente una migliore gestione del consumo energetico in base al livello di traffico. Tecnologie che utilizzano antenne multiple possono essere sfruttate per migliorare le prestazioni energetiche e, se necessario, per supportare il servizio di localizzazione.

A livello di architettura, sono possibili diverse soluzioni che vanno da scenari estremi in cui tutte le funzionalità di segnalazione per la gestione delle sessioni dati sono implementate nella nuova rete di segnalazione, a casi ibridi in cui solo la configurazione della sessione è gestito dalla rete di segnalazione, mentre il controllo della sessione è delegata alla rete dati come nei sistemi wireless attuali. In qualsiasi caso, la comunicazione e l'integrazione tra le funzioni di controllo delle reti dati e la rete di segnalazione è una parte critica della progettazione del sistema. Per quanto riguarda la gestione della mobilità la rete di segnalazione offre nuove opportunità per migliorare l'efficienza. In particolar modo diventa molto rilevante nel caso in cui la topologia di rete sia composta da celle molto piccole capaci di fornire un'alta capacità per area ed efficienza energetica. Con la tecnologia tradizionale l'unico fattore limitante all'utilizzo di celle di piccole dimensioni è la gestione della mobilità che richiede procedure di handover rapide. Con una rete di segnalazione separata, i requisiti di prestazione sugli handover possono essere rilassati in quanto le decisioni possono essere prese in anticipo e comunicate al terminale utente attraverso un canale radio robusto.

2.3 Architettura di rete

In questo sottocapitolo verrà descritta l'architettura del sistema BCG2 identificando i componenti di base e le loro funzionalità. I componenti di base del sistema sono dispositivi fisici o porzioni di rete con ruoli specifici. Le funzionalità del sistema sono funzioni logiche, composte da algoritmi e

protocolli di comunicazione, che possono essere implementati e localizzati nei componenti fisici in diversi modi.

Nella Figura 7 sono illustrati i componenti principali dell'architettura BCG2.

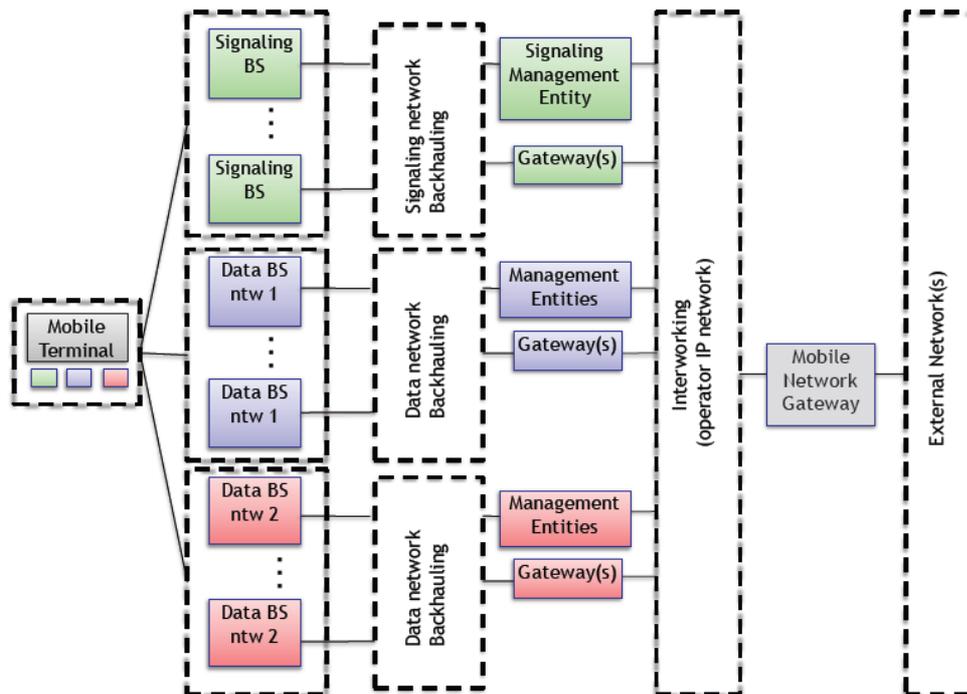


Figura 7 Architettura BCG2

- *Rete di segnalazione:* La rete di segnalazione è un nuovo elemento introdotto dal sistema BCG2 che si occupa di fornire la piena connettività agli utenti e di attivare le risorse per le comunicazioni dati a richiesta.
- *Reti dati:* Le reti dati hanno il compito di fornire le risorse radio per le sessioni dati degli utenti mobili. Nell'architettura BCG2 possono essere adottate reti dati multiple o eterogenee come anche le tecnologie legacy.
- *Backhaul e Interworking:* Le reti di backhaul (Figura 8) sono essenziali per interconnettere le reti dati e di segnalazione alle reti di backbone degli operatori mobili.

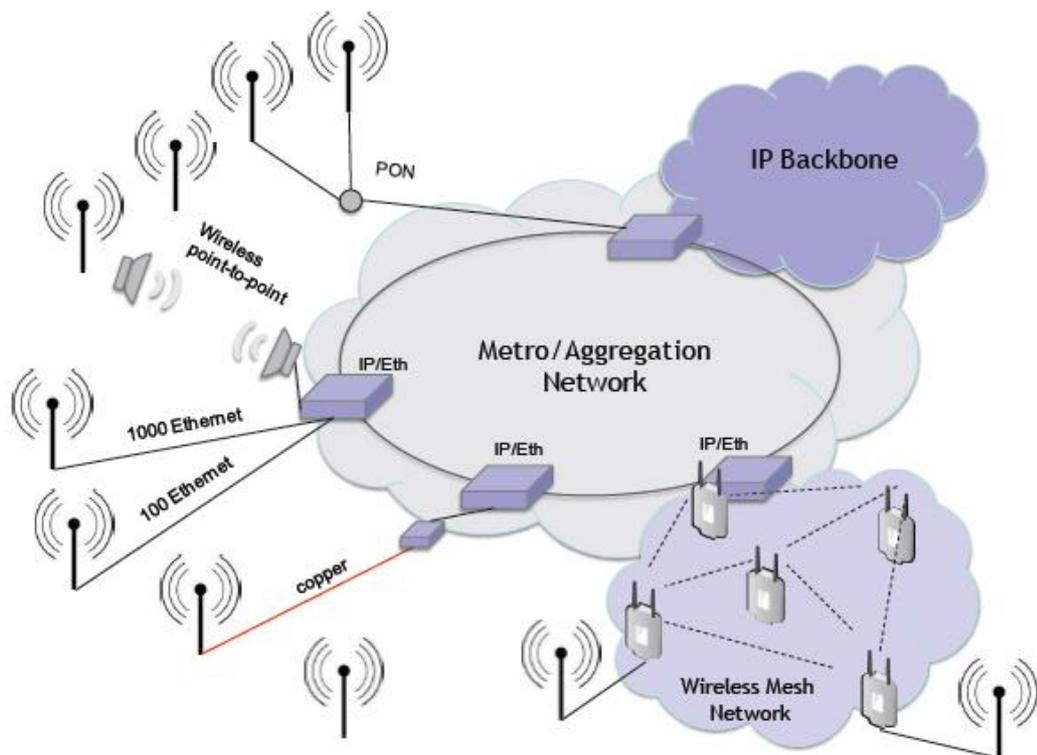


Figura 8 Architettura rete di Backhaul

L'interazione tra gli elementi della rete di segnalazione e quella dati è fondamentale è necessario per il corretto funzionamento dell'intero sistema. Le principali funzionalità del sistema sono:

- *Gestione del context*: Differentemente dalle tecnologie mobili legacy, in BCG2 le informazioni di contesto sono essenziali per assegnare alle sessioni dati le risorse più appropriate. Queste informazioni permettono alla rete di stimare quale base station dati può attivare una sessione con il terminale mobile indipendentemente dal fatto che la base station sia inattiva (sleep mode).

- *Selezione e attivazione delle risorse*: In base alle informazioni di context la rete è in grado di effettuare la selezione e l'attivazione delle risorse. Questa funzione, che è equivalente a quella svolta dal radio resource management delle tecnologie tradizionali, è molto più complessa nei sistemi BCG2 in quanto la selezione delle risorse avviene tra più BS e quindi tra un insieme più grande. Quando le risorse selezionate appartengono ad una base station in sleep mode, le procedure di attivazione si incaricano del cambio di stato della BS.
- *Gestione della sessione e della mobilità*: La gestione della sessione e della mobilità sono le principali funzioni di segnalazione eseguite dalla nuova rete. Rispetto alle architetture tradizionali è necessaria un'interazione tra le BS di segnalazione e le BS dati.

2.3.1 Rete di segnalazione

La rete di segnalazione ha i seguenti ruoli nell'architettura BCG2:

- Copertura ai MT (Mobile Terminal) in idle. Quando un MT viene attivato cercherà per prima cosa una cella di segnalazione a cui collegarsi. Le procedure di attivazione di una nuova sessione o di paging avvengono tramite la rete di segnalazione.
- Supporto della mobilità in stand-by, per esempio la procedura di cell reselection.
- Gestione della transizione tra gli stati di attività e inattività. Questo include le procedure di setup di una sessione e quelle di selezione delle risorse radio per servire una nuova sessione utilizzando le informazioni di contesto disponibili.
- Gestione della mobilità in idle mode e fornire assistenza alla gestione della mobilità in active mode.

- Raccolta delle informazioni di contesto. Le informazioni di contesto sono usate dalla rete di segnalazione per la selezione e gestione delle risorse. Perciò queste informazioni devono essere rese disponibili/accessibili alla rete di segnalazione. Inoltre la rete di segnalazione stessa è responsabile del recupero di parte di queste informazioni, per esempio se un terminale mobile non dispone di un ricevitore GPS la rete di segnalazione dovrà stimare la posizione usando sia le misurazioni del MT (sul segnale in downlink) che la potenza ricevuta in uplink dal terminale.

2.3.2 Rete dati

In questa sezione si discuterà del ruolo, delle caratteristiche e funzionalità delle reti dati nell'architettura BCG2. Si analizzeranno i punti in comune e la cooperazione con la rete di segnalazione e infine verranno proposte alcune possibili soluzioni per l'architettura di rete.

Ruolo delle reti dati nell'architettura BCG2

Il ruolo delle reti dati nell'architettura BCG2 consiste nel fornire accesso dati agli utenti che sono in modalità attiva. La principale sfida nella loro progettazione consiste nel grado di libertà che si riesce a raggiungere; deve essere in grado di adattarsi velocemente alle variazioni di traffico, alla mobilità dell'utente e alle richieste di *sleep* e *wake up*. L'ottimizzazione della rete rispetto al consumo energetico implica la necessità di avere interazione tra le BS a diversi livelli. La rete dati deve essere inoltre in grado di estrarre il contesto dall'ambiente e sfruttare queste informazioni, in aggiunta a quelle già disponibili, per adattarsi. Infine è necessaria anche la definizione dell'interazione tra le BS dati e quelle di segnalazione.

BS Dati

I diversi tipi di DBS (Data Base Station) sono definiti dai loro parametri hardware, quali il numero delle antenne e la loro potenza trasmissiva, che ne determinano il raggio di copertura.

Le DBS utilizzate nell'architettura BCG2 devono avere delle caratteristiche specifiche, quali:

- **Modalità sleep:** Le modalità di *sleep* di una DBS sono le funzionalità chiave che permettono il risparmio energetico nell'architettura BCG2. Pertanto le base station dati sono progettate in maniera tale da avere diversi livelli di sleep mode. Un esempio è mostrato nella Figura 9.

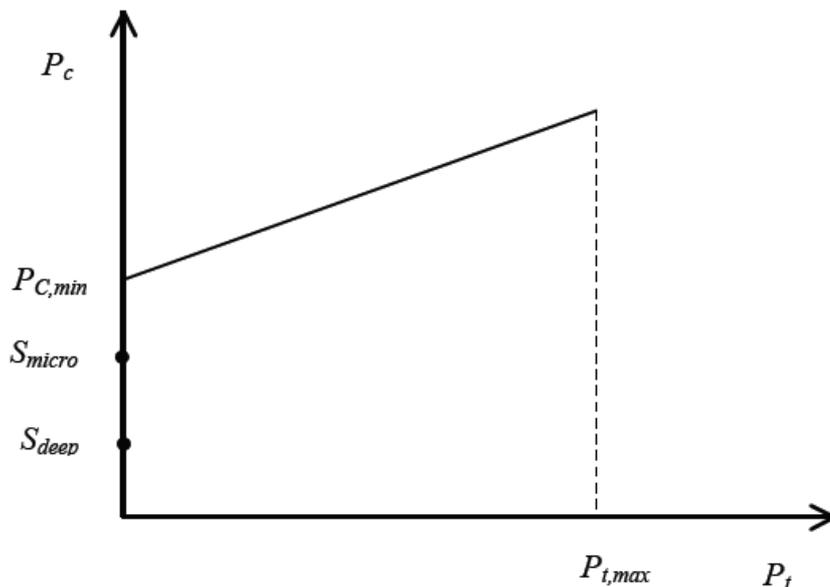


Figura 9 Modello Consumo Energetico DBS

- *Micro sleep mode:* in questo stato, le DBS sono in grado di spegnersi o di diminuire il consumo energetico di alcune parti hardware per una durata di pochi time slot. Questa caratteristica è in grado di

portare dei guadagni nel consumo in reti con un carico moderato e con uno scheduling ottimizzato per esso. L'utilizzo di un periodo di sleep così corto non dovrebbe comportare troppa interazione tra la rete dati e quella di segnalazione dato che la DBS dovrebbe essere in grado di agire autonomamente.

- *Deep sleep mode*: negli scenari in cui il carico è molto basso per lunghi periodi di tempo, le DBS possono spegnere la maggior parte del loro hardware ed entrare in uno stato detto Deep Sleep. Questa modalità permette un considerevole risparmio energetico, anche se la gestione della rete diviene più complicata in quanto bisogna gestire delle richieste utenti verso DBS spente che richiedono un periodo di “risveglio” più lungo, dovendo dirottare le richieste dell'utente verso altre DBS già attive.

- **Estrazione del context**: La rete dati, così come la rete di segnalazione, deve essere in grado di ottenere informazioni come la posizione, la mobilità, requisiti delle applicazioni, etc. In questo caso le informazioni ottenute dalle DBS possono essere unite a quelle ottenute dalle SBS (Signaling Base Station).
- **Interfaccia con la rete di segnalazione**: L'interfaccia con le base station di segnalazione dovrà essere veloce in modo da permettere un rapido adattamento alle variazioni di carico sulla rete. Perciò si potrebbe pensare a delle connessioni dirette tra DBS e SBS con dei canali di segnalazione specifici. Così come l'interfaccia con un eventuale controllore centrale.
- **Funzionalità di segnalazione da mantenere**: E' chiaro che alcune caratteristiche, come la stima di canale e la sincronizzazione, verranno

ancora eseguite dalle DBS per i canali dati attivi. Nel caso di scenario con un traffico elevato, in cui tutte le DBS sono attive, anche la gestione della mobilità (inclusi gli handover) e l'accesso casuale potrebbero essere gestite dalle base station dati, vista la vicinanza di quest'ultime dagli utenti. Tuttavia, quando la rete non è a pieno carico e vi sono delle DBS inattive, alcune funzionalità potrebbero essere delegate alle SBS.

- **Funzionalità di segnalazione delegabili alla SBS:** Quando il carico della rete non è eccessivo e alcune DBS sono inattive, alcune funzionalità possono essere delegate alle base station di segnalazione, tra cui:
 - *Gestione della mobilità:* le base station di segnalazione si occuperanno degli handover basandosi sulle misurazioni inviate dalle SBS e dalle DBS attive. Inoltre misurazioni compiute anteriormente, come quelle ottenute dall'analisi del context, potranno aiutare le decisioni del mobility management.
 - *Misurazioni della posizione:* possono essere eseguite dalle SBS o in modo congiunto dalle DBS.
 - *Misurazioni per l'analisi del context:* similmente a quanto descritto per le DBS, misurazioni per l'analisi del context possono essere definite per le SBS.
 - *Gestione dello sleep mode*
 - Micro sleeps: la DBS entra in modalità pre-spegnimento. Delay di switch on e off brevi.
 - Deep sleeps: in questo caso la DBS si spegne completamente. I delay sono più lunghi.

2.3.3 Signaling Management Entity (SME)

Nella totalità della rete composta da rete di segnalazione e rete dati, assumiamo l'esistenza di un'entità che si occupa della gestione della segnalazione e della gestione relativa al consumo energetico delle DBS. Indichiamo questa entità come Signaling Management Entity (SME).

Lo SME è uno degli elementi chiave per l'implementazione di tutte le nuove funzionalità di segnalazione di BCG2. Esso interagirà con le SBS, anch'esse elemento chiave nella segnalazione della nuova architettura. L'esatta divisione delle funzioni di segnalazione tra SBS e SME dipenderanno dalle soluzioni tecnologiche che verranno scelte per l'implementazione di BCG2. In ogni caso lo SME sarà sempre il nodo centrale in carica delle funzioni di interworking con le entità delle reti dati (DBS e Mobile Terminal - MT).

La SME ha una funzione passiva di monitoraggio e una attiva decisionale.

Per ogni BS mantiene le informazioni su power profile, modello di comportamento energetico in funzione del traffico, capacità e posizione e monitora costantemente il loro stato (MT associati, consumo energetico). Tiene traccia anche dei MT (posizione aggiornata, profilo, traffico richiesto, BS associata).

Per la funzione decisionale, la SME attiva la modalità active/sleep delle BS e associa gli MT alle DBS.

2.3.4 Terminali Mobili - Requisiti e funzioni aggiuntive

I terminali devono scambiare messaggi sia con la rete di segnalazione (control plane) che con la reti dati (data plane) a cui sono connessi e quindi gestire simultaneamente interfacce multiple verso le due reti. In particolare devono fornire costantemente informazioni di context alla SME come dati sulla posizione e sul traffico richiesto.

2.4 Modelli di Potenza

Per poter avere una rapida stima dell'efficienza energetica si può utilizzare un modello energetico lineare semplificato, che mette in relazione la potenza in ingresso con il traffico servito.

Approssimazione lineare $P_{in} \sim L$

Possiamo derivare una relazione lineare tra l'alimentazione del sistema e il carico, per ogni istante t avremo:

$$P_{in}(t) = P_{offset} + \frac{1}{\Delta} \cdot L(t)$$

Come mostrato in Figura 10, con

$$\Delta = \Delta_1 \cdot \Delta_2$$
$$P_{offset} = P_{offset1} + \frac{1}{\Delta} \cdot P_{offset2}$$

Dove Δ_1 è l'efficienza della dissipazione di potenza in aria, Δ_2 è l'efficienza del payload utile trasmesso, $P_{offset1}$ è la potenza statica e $P_{offset2}$ è la potenza utilizzata per l'overhead.

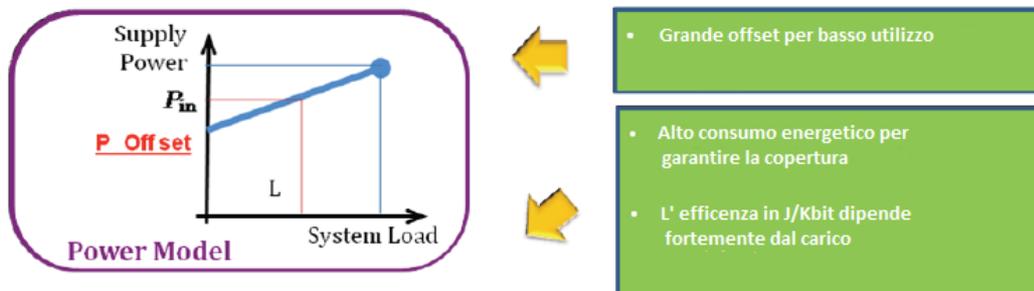


Figura 10 Modello lineare di potenza semplificato

Quando si considera anche lo sleeping mode della base station si aggiunge al grafico un ulteriore punto, che indica il consumo della base station in sleep mode (assenza di traffico), come mostrato in Figura 11. L'offset dello sleep mode è minore perché parte delle componenti della base station sono spente. Il modello energetico generale diventa quindi:

$$P_{in}(t) = \begin{cases} P_{offset} + \frac{1}{\Delta} \cdot L(t) & \text{in trasmissione} \\ P_{sleep} & \text{in sleep mode} \end{cases}$$

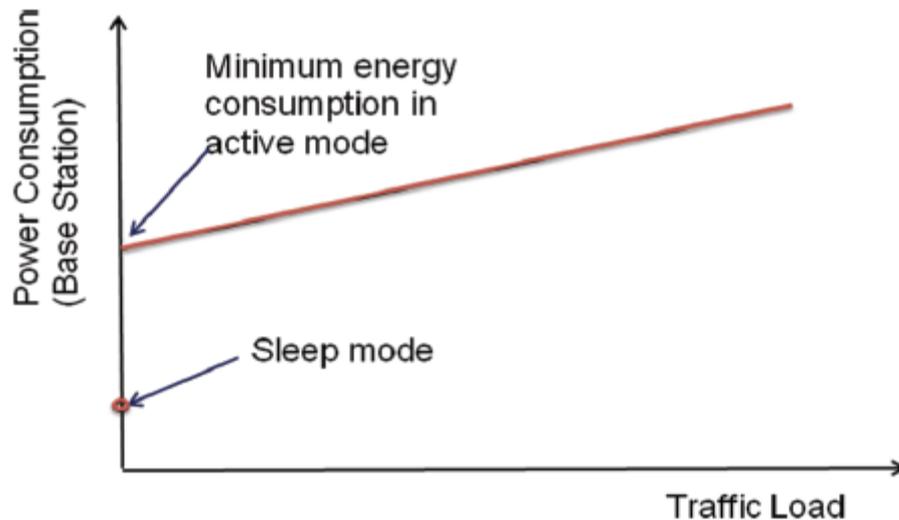


Figura 11 Modello di potenza semplificato con sleeping mode

2.5 Context Management

2.5.1 Modello di riferimento

I meccanismi di segnalazione tradizionali, adottati dalle attuali tecnologie cellulari, interagiscono con il terminale dell'utente per acquisire informazioni sulle richieste di servizio e con gli elementi della rete necessari a soddisfare tali richieste. Il terminale mobile invia le proprie richieste di servizio alla stessa base

station che poi allocherà le risorse necessarie per soddisfare tali richieste. Viceversa, la rete di segnalazione di BCG2 necessita di ottenere più informazioni dall'utente a causa della separazione della base station di segnalazione, che riceve le richieste, dalla rete dati che dovrà allocare le risorse. Inoltre a causa delle aree di copertura molto grandi delle SBS, le richieste inoltrate dall'utente possono essere ricevute da una base station che potrebbe essere molto distante rispetto alla posizione dove il servizio viene richiesto. Perciò la base station non può ricevere direttamente le informazioni relative ai parametri della comunicazione, ma deve basarsi sulle informazioni raccolte dal terminale mobile, da altra base station o da vecchie richieste provenienti dalla stessa posizione.

Sono dunque necessarie più informazioni per poter caratterizzare quello che viene chiamato "context" di una richiesta di servizio e a causa della separazione delle BS l'acquisizione di questo context è più complicata rispetto alle tecnologie cellulari tradizionali. La qualità delle informazioni raccolte diventa cruciale in BCG2, in quanto il context è l'elemento chiave che permette alla rete di segnalazione di attivare gli algoritmi di attivazione e selezione delle risorse appropriati per la rete dati.

Di seguito verranno presentati alcuni esempi di allocazione delle risorse sulla base delle informazioni di context. Questi modelli semplificati prendono in considerazione solo un sottoinsieme delle possibili informazioni di context quali la posizioni, lo stato della rete, il profilo applicativo e il profilo d'utente.

2.5.2 Modelli di informazioni sulla posizione

- **Informazioni sulla posizione accurate**

La posizione è un aspetto importante dell'informazione di context in BCG2. Nel modello di riferimento si assume che l'informazione relativa alla posizione sia disponibile quando viene effettuata una richiesta per una

sessioni dati attraverso un sistema di posizionamento esterno. Ovviamente la sola posizione non è un'informazione sufficiente per la selezione delle risorse necessarie per instaurare la sessione dati richiesta dall'utente. L'informazione aggiuntiva minima richiesta è la base station con le migliori caratteristiche di propagazione rispetto alla posizione dell'utente. Il modello che considera le informazioni sulla posizione e il "best server" viene chiamato *basic position model* (Figura 12).

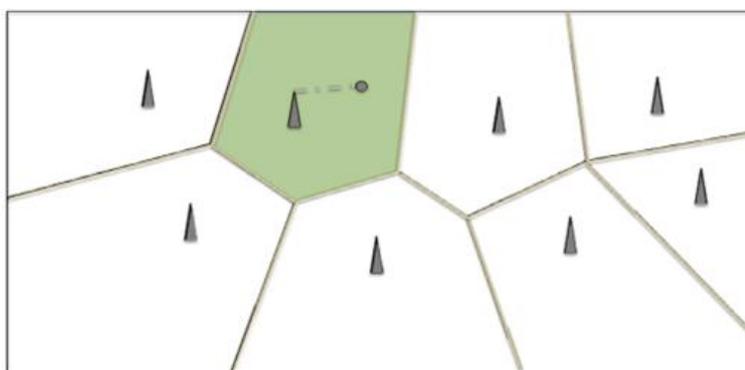


Figura 12 Basic Position model - Informazioni sulla posizione più best server

- **Informazioni sul canale e sulla copertura**

In aggiunta alle informazioni di posizione e di best server, altre informazioni in grado di arricchire il context riguardano la copertura e la qualità del canale radio di altre base station. Data la posizione dell'utente e una qualità di canale target (per esempio in termini di minimo SNR o minimo data rate) assumiamo sia possibile conoscere la lista delle base station in grado di servirlo. In pratica in questo modello, chiamato *advanced position model*, sono incluse informazioni riguardanti la copertura di *tutte* le base station. In questo modo posso applicare algoritmi che mi permettono di scegliere, sulla base di altri fattori, anche un'antenna diversa dalla migliore in termini di Rate.

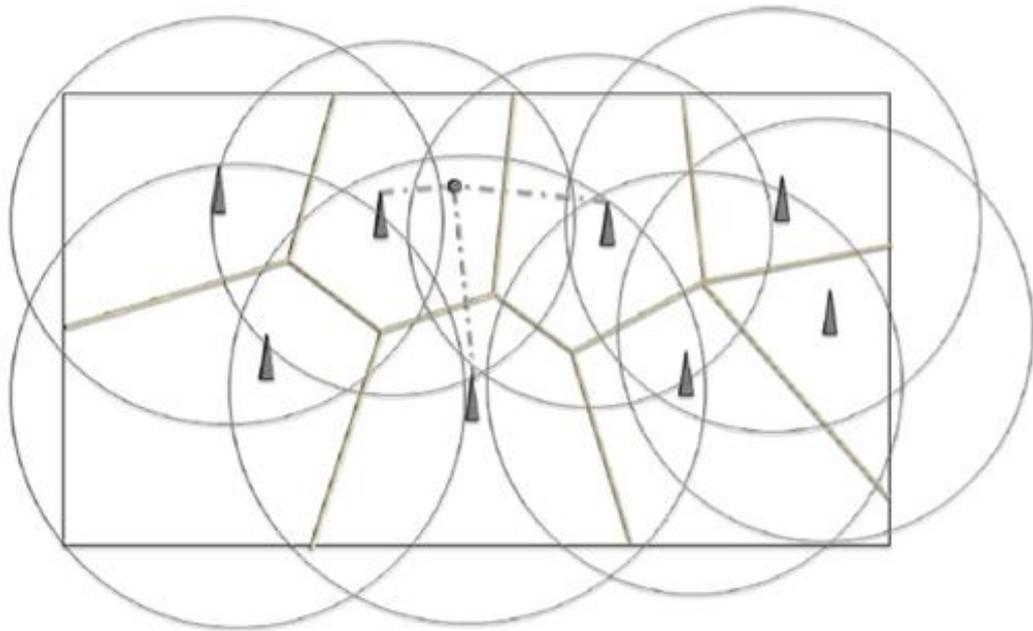


Figura 13 Advanced position model - Informazioni sulla copertura

2.5.3 Modelli di informazioni sullo stato della Rete

In aggiunta alla posizione del terminale, le informazioni riguardanti lo stato della rete sono particolarmente utili in BCG2 per la selezione della base station dati e le sue risorse radio. Le informazioni sullo stato della rete includono l'operatività delle BS (active/sleep) e l'ammontare delle risorse radio disponibili per una nuova sessione dati.

Il modello di riferimento che considera lo stato della rete è costruito sull'advanced position model, al quale oltre alla lista di BS che coprono una data posizione viene aggiunta l'informazione sullo stato delle BS e l'informazione sulla possibilità di servire una data richiesta con le risorse disponibili.

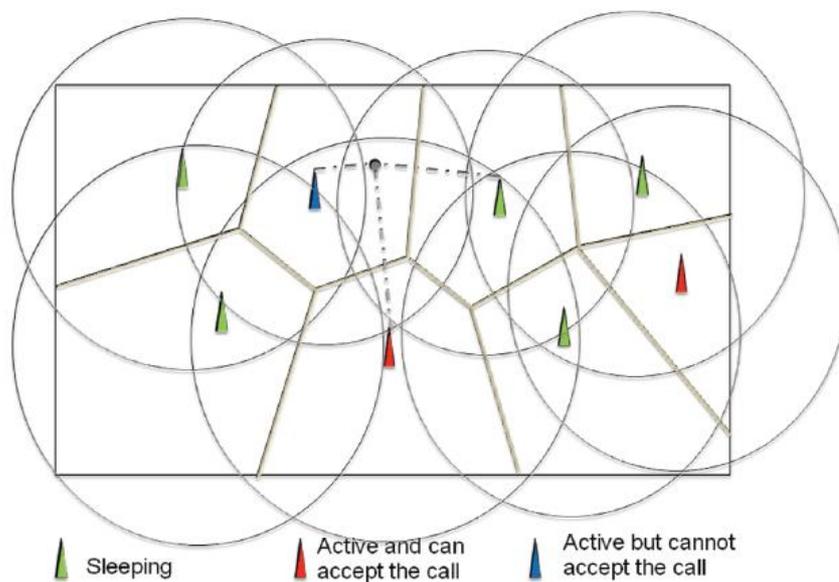


Figura 14 Network status model - Informazioni sulla copertura e stato della rete

2.5.4 Modelli di informazioni sui profili d'applicazione e d'utente

Infine consideriamo un modello di riferimento per le informazioni di context in cui si considerano in modo semplificato anche le caratteristiche della sessione dati richieste e il profilo degli utenti. Assumiamo un numero t di classi d'utente e un numero s di classi di sessione dati. Basandosi su (t,s) , sulla posizione, sulla copertura e sullo stato della rete verrà creata una lista ordinata delle base station più adatte a soddisfare la richiesta di sessione.

2.6 Resource Management

La gestione delle risorse è un punto centrale dell'architettura proposta in quanto definisce come i terminali mobili accederanno alla rete. Un modello di gestione delle risorse definisce le politiche principali nell'assegnazione delle risorse al terminale mobile che vuole iniziare una comunicazione o effettuare un handover a causa della mobilità.

Sono due i tipi di risorse da assegnare:

- La DBS che serve la richiesta
- Le risorse radio della DBS servente da allocare al terminale mobile (il tipo di risorse dipende dalla tecnologia adottata).

In ogni modello le principali politiche riguardano l'attivazione/spengimento delle DBS, la selezione di quale di esse servirà la richiesta e quali risorse radio verranno utilizzate.

2.6.1 Gestione delle risorse Best Server

Questa strategia si basa sul *basic position model* definito nei paragrafi precedenti. Data posizione del terminale mobile l'algoritmo per la gestione delle risorse determina la DBS in grado di servire in modo ottimale la richiesta. Questo modello è il più semplice, non c'è bisogno di conoscere né lo stato attuale della rete né le mappe di copertura.

Il modello può essere caratterizzato dalle seguenti politiche:

- Selezione della DBS servente: sempre il miglior servente per il terminale mobile
- Selezione delle risorse radio: le prime risorse disponibili che soddisfano la domanda di traffico dell'utente

Se la base station *best server* non è attiva assumiamo che venga attivata per servire la richiesta. Se non ci sono abbastanza risorse disponibili nella *best server* DBS la richiesta viene persa. Scegliendo questa politica si favorisce la qualità per il terminale mobile e si riduce il consumo energetico della sua batteria rispetto ai modelli che seguono. Le risorse della rete non sono

ottimizzate, anche perchè le richieste perse potrebbero essere servite da altre DBS che non siano *best server*.

2.6.2 Gestione delle risorse sulla base dello stato della rete

Questa strategia si basa sul *network status model* e punta a diminuire il consumo energetico totale della rete. Viene creata una lista delle DBS disponibili ordinata in base alla qualità del collegamento e alla disponibilità di risorse radio, la prima della lista sarà la *best server* del *basic position model*.

Il modello dello stato di rete specifica se una DBS è accesa oppure no. Ci riferiremo alla DBS con posizione nella lista più alta e attiva come *best active server* (BAS), in modo simile chiameremo *best inactive server* (BIS) la DBS con posizione più alta in lista ma inattiva.

Il modello dello stato della rete specifica anche l'ammontare delle risorse disponibili. Conoscendo la quantità di risorse richieste dell'utente, si dice che un BAS è disponibile se le risorse richieste dall'utente sono minori o uguali a quelle rimaste al BAS. In questo caso chiameremo *best active and available server* (BAS2) la DBS con posizione nella lista maggiore e abbastanza risorse disponibile da soddisfare la richiesta.

Il modello può essere caratterizzato dalle seguenti politiche:

- Selezione della DBS servente:
Selezionare la *best active and available server* (BA2S) se possibile, altrimenti selezionare la *best inactive server* (BIS)
- Selezione delle risorse radio:
Selezionare le prime risorse disponibili. Se non viene trovata nessuna BA2S bisogna attivare la BIS. Se non ci sono BIS, la richiesta viene persa a causa delle insufficienti risorse di rete.

2.6.3 Gestione delle risorse basata sui profili di traffico e d'utente

Questa strategia è un'estensione della gestione delle risorse basata sullo stato della rete. In questo modello un utente è caratterizzato da una classe t e da un tipo di sessione s che vuole iniziare (voce, dati,...). In base ai valori di (t,s) e al rate raggiungibile viene determinata la quantità di risorse r che devono essere assegnate all'utente mobile.

CAPITOLO 3 – Algoritmi per l’efficienza energetica: descrizione e implementazione

In questo capitolo vengono descritti gli algoritmi di allocazione delle risorse proposti in questa tesi. Inoltre viene descritto il simulatore sviluppato e usato per il test degli algoritmi. Il simulatore è sviluppato all’interno del framework simulativo OMNeT++ [27]. Dopo una sezione iniziale di descrizione teorica degli algoritmi vengono esposte le principali caratteristiche di OMNeT++, il capitolo prosegue quindi con la descrizione dell’implementazione del simulatore e degli algoritmi.

3.1 Algoritmi: descrizione

In questa sezione verranno illustrati gli algoritmi per l’efficienza energetica nelle reti cellulari ideati in questo lavoro di tesi. La loro implementazione nel simulatore verrà descritta nel sottocapitolo 3.4 e infine i risultati numerici ottenuti saranno commentati nel capitolo 4.

Per affrontare il problema abbiamo ideato due approcci complementari. Il primo mira ad ottimizzare il singolo assegnamento utente-antenna inserendo nuovi parametri decisionali. Il secondo invece propone un approccio globale, più radicale e invasivo, ovvero un’ottimizzazione periodica dell’intero schema di associazioni utente-antenna.

Tutti gli algoritmi descritti in seguito possono essere realizzati grazie alla separazione della rete di segnalazione da quella dati e grazie alla context awareness. La prima innovazione permette di spegnere le antenne dati ove non necessarie senza generare buchi di copertura grazie alla presenza delle antenne di segnalazione. Questo porta ad un notevole risparmio energetico. La seconda innovazione permette di avere una visione globale del sistema e quindi di

prendere le decisioni avendo a disposizione un numero maggiore di informazioni, ovvero lo stato di ogni antenna (accesa o spenta, numero di utenti associati a quell'antenna, rate potenziale offerto a ciascun utente) e di ogni utente (posizione, backlog, ecc.).

3.1.1 Assegnazione On demand (AO)

L'obiettivo del problema è minimizzare il consumo energetico del sistema mantenendo il throughput medio più alto possibile per gli utenti. Le due parti sono in linea di principio in contrapposizione, per garantire un throughput migliore occorre spesso consumare più energia. D'altro canto si può azzerare il consumo energetico non offrendo alcun servizio agli utenti.

Abbiam deciso quindi di seguire due criteri, il primo orientato al throughput e il secondo al consumo energetico.

Algoritmo orientato al throughput

Il primo algoritmo, Assegnazione On Demand Rate Based (AORB), assegna un utente ad un'antenna spenta solo se questa può offrirgli un rate più alto di quello offerto dalla migliore antenna accesa. L'unità di gestione centralizzata (Controllore) conosce la situazione di tutta la rete e quindi può stimare le prestazioni che ogni antenna può offrire all'utente. Quando l'utente invia una richiesta di associazione non tutte le antenne sono accese, ma il Controllore può decidere di accenderne una. Confronerà il rate più alto r_{on} offerto da un'antenna accesa a_{on} con quello più alto r_{off} offerto da un'antenna spenta a_{off} . Se l'antenna spenta fornisce un rate superiore di una data percentuale del rate offerto dall'antenna accesa allora il controllore attiverà la nuova antenna.

In formule, se

$$r_{\text{off}} > r_{\text{on}} * (1 + \alpha)$$

dove α è una costante arbitrariamente configurabile, ovvero se l'antenna spenta può garantire un rate significativamente migliore dell'antenna già accesa, allora l'utente si assocerà ad **a_off**, altrimenti ad **a_on**.

Algoritmo orientato al risparmio energetico

In contrapposizione all'algoritmo appena descritto questo approccio (Assegnazione OnDemand Energy Based, AOEB) mira a diminuire il consumo di energia nel sistema. In questo caso avremo un rate minimo da garantire **rate_min**, quindi il Controllore non avrà l'obiettivo di assegnare l'utente all'antenna che gli offrirà il miglior rate. Se esiste nel playground un'antenna già accesa **a_on** che può fornire un rate r_{on} maggiore o uguale del **rate_min** all'utente, il Controllore effettuerà l'associazione. Se non esiste alcuna antenna già accesa allora si avvierà la procedura di accensione per la migliore antenna spenta.

Ovvero, se

$$r_{\text{on}} > r_{\text{min}} * (1 + \eta)$$

dove η è una costante arbitrariamente configurabile, allora l'utente verrà associato ad **a_on**. Altrimenti, presa la migliore antenna spenta in termini di rate effettivo disponibile, l'utente si assocerà a quest'ultima.

3.1.2 Ottimizzazione periodica del Layout (OPL)

Grazie alla context awareness, il Controllore è costantemente aggiornato sullo stato della rete, quindi abbiamo creato un algoritmo periodico che si occupa di riordinare tutte le associazioni utente-antenna cercando di ridurre il consumo

energetico. Questo algoritmo (schematizzato in Figura 15) cerca di rimediare all'approccio greedy e locale dell'Associazione su richiesta. Il Controllore infatti ad ogni richiesta di connessione cerca di assegnare l'utente alla antenna migliore *attuale*. L'obiettivo della OPL è analizzare i potenziali risparmi energetici aggiuntivi che una procedura di riallocazione globale delle connessione può avere rispetto a delle scelte contestuali e greedy. Per questa ragione l'algoritmo proposto si basa più su una ricerca quasi esaustiva delle possibili soluzioni che su un ragionamento dal punto di vista della complessità computazionale.

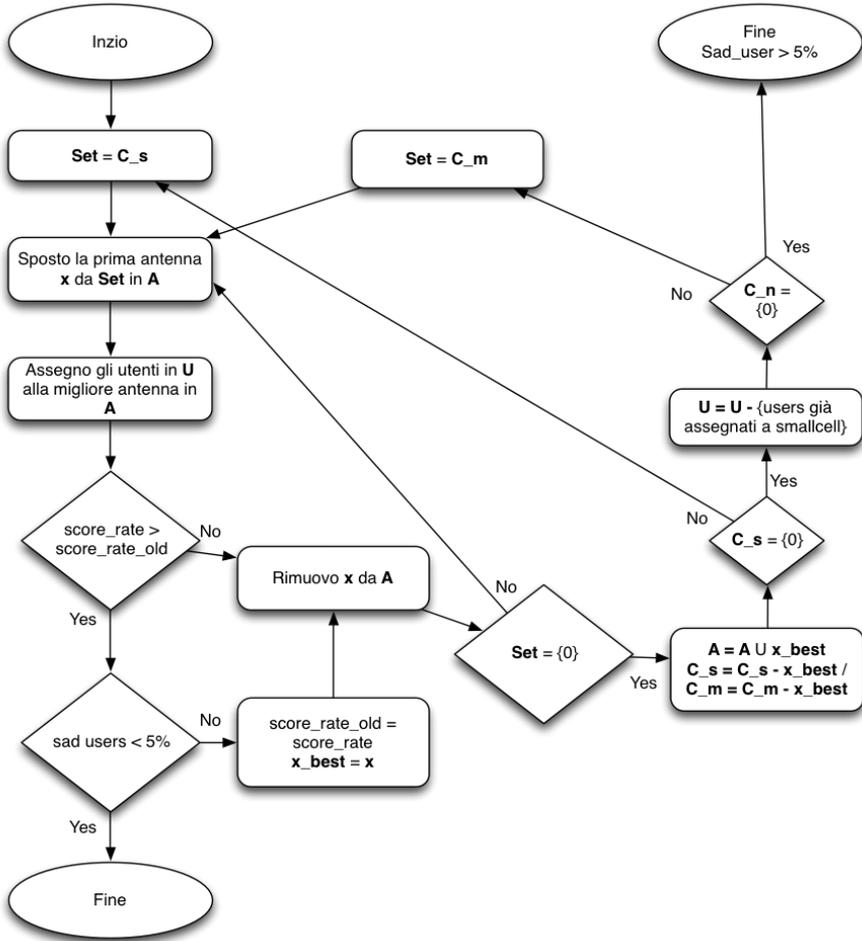


Figura 15 Periodical Layout Optimization Algorithm

Il problema consiste nel trovare una matrice di associazioni utente-antenna che minimizzi il consumo energetico totale, pur soddisfacendo ad un vincolo di QoS, ovvero almeno una certa, arbitraria, percentuale di utenti deve terminare il download entro il tempo massimo impostato.

L'algoritmo privilegia l'associazione degli utenti alle small cell. Nel caso in cui queste non fossero sufficienti, si provvederà ad accendere le macro celle necessarie a servire gli utenti non ancora associati.

Definiamo C_s e C_m gli insiemi rispettivamente delle small cell e delle macro celle candidate all'accensione. I due insiemi sono ordinati in modo decrescente rispetto alla somma dei rate che le antenne possono offrire a tutti gli utenti. Questo per privilegiare le antenne che hanno maggior probabilità di servire nel miglior modo più utenti.

Sia U invece l'insieme degli utenti attivi ordinati in modo decrescente in base al back log. Si cercherà di servire nel miglior modo possibile gli utenti che hanno un tempo di permanenza residuo maggiore e quindi un maggior impatto nelle prestazioni del sistema.

Supponiamo di azzerare le associazioni attuali e di ricostruire la matrice delle associazioni da zero.

L'algoritmo prevede l'accessione virtuale di un'antenna per volta e il calcolo delle associazioni di tutti gli utenti. Una volta definita la metrica **score_rate** pari alla somma dei rate garantiti ad ogni utente, viene scelta l'antenna con il più alto **score_rate**. Se la percentuale di utenti con rate inferiore al rate minimo è inferiore alla soglia impostata, l'algoritmo termina. Altrimenti, l'algoritmo procede con l'accensione virtuale di una nuova antenna tra le small cell non ancora accese. La procedura continua ad accendere virtualmente le antenne fino a quando il numero di utenti con rate superiore a quello minimo è superiore alla soglia impostata. Nel caso in cui, pur accendendo tutte le small cell, la

condizione di terminazione non viene raggiunta, l'algoritmo passa a considerare le macro cell. Il loro scopo è unicamente colmare le aree senza copertura lasciate dalle small cell. Quindi gli utenti già assegnati ad una small cell non cambieranno associazione.

L'algoritmo termina quando la soglia minima di utenti con rate maggiore del rate minimo viene superata o in ogni caso quando vengono accese tutte le antenne disponibili. Nel caso in cui il sistema a pieno carico non riesca a soddisfare il vincolo richiesto, l'algoritmo fornisce comunque una delle migliori soluzioni possibili.

3.2 OMNeT++

Il simulatore è basato sulla piattaforma OMNeT++, un insieme di librerie scritte in C++. Il suo punto di forza risiede nell'essere modulare ed estensibile, quindi facilmente adattabile ad ogni esigenza. Può essere usato per reti wired o wireless, reti di code ecc. Inoltre, grazie a progetti esterni indipendenti, esistono specifici scenari di simulazione per reti di sensori, ad-hoc, ottiche ecc.

OMNeT++ offre un IDE basato su Eclipse e per la simulazione due tipi di interfaccia: una da CLI per le esecuzioni batch ed una grafica utile per il debugging.

Nella simulazione possono essere create diverse tipologie di moduli (es. antenna ed utente, ma anche cpu, memoria, scheda di rete). Per ogni tipologia di modulo possono essere create più istanze, anche in contemporanea, che possono attivarsi e disattivarsi in qualsiasi momento della simulazione. Il tempo è scandito tramite eventi discreti. Viene creata infatti una coda FES (Future Event Set) dove vengono aggiunti e/o eliminati gli eventi generati dai moduli sotto forma di messaggi. Il destinatario del messaggio può essere un qualsiasi modulo collegato al mittente tramite un link precedentemente instaurato. In alcuni casi destinatario

e mittente del messaggio possono anche coincidere. I messaggi/eventi possono esser aggiunti in qualsiasi punto del FES. In genere vengono inseriti nel FES aggiungendo un offset al tempo simulato attuale. Ai messaggi si può attribuire anche una priorità, in modo che scorrendo la lista due messaggi con uguale tempo di arrivo possano esser elaborati secondo un ordine preciso.

Ogni modulo può generare diversi tipi di messaggi, destinati a diversi moduli.

La simulazione inizia con l'inizializzazione dei vari moduli e dei link tra di essi, in questa fase si generano i primi messaggi che daranno l'avvio alla simulazione vera e propria. La fine può essere programmata dopo un certo periodo di tempo simulato o reale, determinata da un evento particolare o da un comando esterno impartito tramite CLI o interfaccia grafica. Alla fine i moduli vengono terminati ed eseguono le ultime operazioni (principalmente raccolta dati e statistiche) prima di esser deallocati.

3.3 GreenSim

Lo scenario considerato nel simulatore è una rete cellulare LTE composta da 7 siti esagonali trisettoriali (120 gradi per settore), equidistanziati, per un totale di 21 macro celle. E' stato implementato anche un meccanismo di wrap-around, per cui il bordo esterno di un esagono coincide con il bordo dell'esagono opposto. Questo per simulare quanto più possibile uno scenario reale con una copertura pressoché globale.

Alle 21 macrocelle fisse, possono essere aggiunte, in numero variabile, delle hot zone. Ovvero delle zone ad alta intensità di traffico. All'interno di queste hotzone, disposte casualmente sul playground, si possono installare small cell. Queste sono rappresentate da antenne isotropiche con potenza emessa ed energia consumata minore. Le 21 macrocelle e le small cell sono tutte base station dati

che supponiamo possano accendersi e spegnersi senza intaccare la copertura globale del territorio. Aggiungiamo infatti un'unica antenna speciale (il Controllore) con copertura globale su tutto il playground che si occupa della segnalazione e della gestione di tutta la rete. (Figura 16)

Gli utenti vengono generati secondo un tasso prestabilito. Quando sono presenti hot zone, la percentuale di utenti localizzati nelle hot-zone rispetto a quella di utenti distribuiti sull'intero scenario può essere variata a piacere. Una volta attivi effettuano il download di un file di dimensione prefissata. Quando han scaricato il file, o se il tempo di download supera un tempo limite, si disattivano. Gli utenti sono statici e rimangono nella stessa posizione per tutta la durata del download. Tuttavia, il simulatore è facilmente estendibile a scenari dinamici con modelli di mobilità arbitrari.

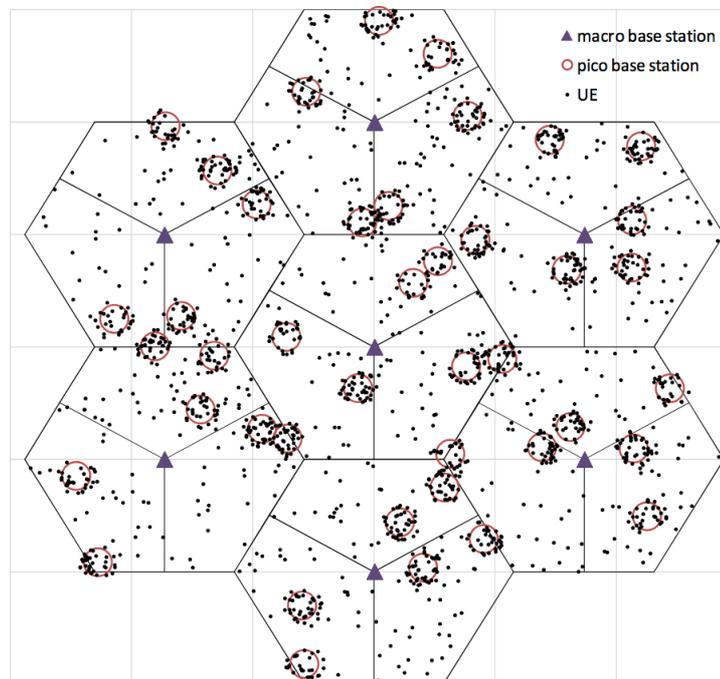


Figura 16 Scenario di simulazione

Riassumendo il simulatore è composto principalmente da 4 tipologie di moduli:

- Controllore
- Users
- Antenna
- SmallCell

Nel seguito sono analizzati in dettaglio.

3.3.1 Controllore

Il Controllore, come il nome suggerisce, è l'entità principale della simulazione, esegue la maggior parte delle azioni e simula una grande cella che copre tutto il playground e si occupa della parte di segnalazione e gestione della rete.

Le principali funzioni sono:

Controllo costante dello stato rete: il controllore mantiene costantemente aggiornata la situazione della rete: stato delle antenne (accese, in stand by, numero di utenti in coda), numero di utenti ancora attivi e numero di utenti "scontenti" ovvero che non han terminato il download in almeno 4 secondi.

Assegnamento user-antenna: gli utenti, quando si attivano o quando c'è la possibilità di un handover, inviano al Controllore le proprie misure della potenza ricevuta da tutte le antenne (sia accese che spente). Il controllore mantiene la situazione attuale della rete e quindi può calcolare l'interferenza e quindi l'effettivo SINR e il rate raggiungibile per ogni coppia user-antenna.

Ad ogni esecuzione dell'algoritmo di assegnamento, nel caso in cui venga scelta un'antenna diversa dalla corrente, il controllore avvierà la procedura di handover.

Ottimizzazione periodica: questa funzione è opzionale e la frequenza di esecuzione può essere variata. Il controllore analizza lo stato attuale della rete e prova ad ottimizzare gli assegnamenti con l'obiettivo di far consumare quanta meno energia possibile al sistema.

3.3.2 Antenna e SmallCell

Questi due moduli sono essenzialmente identici, le differenze si limitano solo ad alcuni parametri come altezza rispetto al suolo, potenza trasmessa, potenza consumata ecc.

Inoltre le reciproche posizioni delle macro celle (modulo Antenna) sono fisse in ogni simulazione, mentre la locazione delle smallcell può variare. Le funzioni interne però operano nello stesso modo, quindi le descriveremo come un'unica entità.

Il concetto base su cui ruota BCG2 è la separazione dati-segnalazione e quindi la possibilità di spegnere le antenne. Queste infatti hanno 3 stati di funzionamento: on, sleep (micro DTX) e standby.

Per simulare la suddivisione in TTI dell'asse temporale, il tempo di simulazione viene fatto scorrere mediante messaggi di clock inviati ogni ms a tutti i moduli.

Ogni antenna è dotata di una coda FIFO in cui inserisce gli utenti, il primo della coda viene servito ogni TTI, in modo da simulare uno scheduler Round Robin. Quando l'utente termina il download, o raggiunge il tempo massimo di permanenza o effettua un handover viene istantaneamente rimosso dalla coda.

Le principali funzioni del modulo Antenna sono:

Dati: Ad ogni TTI l'antenna, se attiva, invia i dati al primo utente della coda. Se con questo pacchetto, l'utente ha terminato il download viene terminata la connessione con l'utente.

Analisi richieste di associazione: Su richiesta da parte del Controllore, tramite un messaggio di richiesta di associazione di un particolare utente, l'antenna controlla se sono disponibili le risorse necessarie per inserire l'utente nella coda e, in caso positivo, inizia la procedura di accensione.

Accensione e spegnimento: Esecuzione delle procedure per il passaggio tra i diversi stati di funzionamento.

Gestione Energia: l'antenna monitora il consumo energetico istante per istante. Al termine della simulazione ogni antenna riporta l'energia totale consumata e il tempo totale di permanenza nello stato "on".

3.3.3 Utente

Gli utenti vengono generati dal controllore con intervalli d'arrivo distribuiti secondo una distribuzione esponenziale negativa. Quando si attivano cercano di scaricare un file di dimensioni prefissate in un tempo massimo configurabile, dopodiché si disattivano.

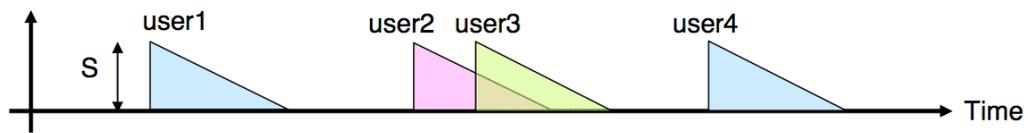


Figura 17 Traffico FTP

Funzioni principali del modulo Utente:

Context Generation: L'utente fornisce al Controllore i dati necessari per generare il context tramite il quale verranno prese le decisioni sulle associazioni. In particolare l'utente fornisce la posizione e le misure di potenza delle antenne circostanti.

Download Data: funzione principale dell'utente. Monitora la QoS, e si disattiva senza terminare il download se il tempo di permanenza nel sistema supera il tempo limite impostato.

Associazione: Su comando del Controllore, l'utente si associa (eseguendo se necessario l'handover) all'antenna assegnata.

Mobility (funzione in fase sperimentale): l'utente può avere diverse "strategie" di movimento:

- può muoversi liberamente su tutto il playground;
- può attivarsi all'interno di una hotzone e rimanerne all'interno per tutta la durata del download
- può attivarsi in un punto qualsiasi del playground ma convergere verso una hot zone
- può spostarsi di hotzone in hotzone

Ovviamente l'utente, a step prefissati, dovrà aggiornare il Controllore delle nuove misure di potenza.

3.4 Principali procedure di rete

In questo paragrafo vedremo come alcune procedure fondamentali di una rete cellulare sono state implementate all'interno del simulatore.

3.4.1 Calcolo potenza ricevuta

L'utente calcola la potenza ricevuta da ogni antenna (accesa o spenta) grazie a queste equazioni

$$PathLoss = P_1 + (P_2 * \log_{10}(R))$$

$$CouplingLoss = -MaxAntG + A_{tot} + Shadowing + PathLoss + WallLoss$$

$$P_{rx} = MaxRfOutput - CouplingLoss$$

Dove

- P_1 e P_2 : sono due valori parametrici dipendenti dallo scenario (Urbano, Rurale, etc)
- R : distanza utente – antenna in Km
- $MaxAntG$: Guadagno massimo dell'antenna nella direzione di puntamento
- A_{tot} : coefficiente di attenuazione angolare dell'antenna (funzione dei due angoli –orizzontale e verticale- tra direzione di puntamento dell'antenna e utente)
- $Shadowing$: valore casuale lognormale che simula lo shadowing
- $WallLoss$: Wall Penetration Loss (valore dipendente dallo scenario)
- $MaxRfOutput$: Massima potenza emessa dall'antenna

3.4.2 Nascita di un utente /Assegnamento / Handover

Il Controllore genera periodicamente un utente con un tasso derivato dalla seguente funzione:

$$\lambda \left[\frac{file}{sec} \right] = \frac{d_{PopulationDensity} \cdot A_{playground} \cdot r_{perUserRate} \cdot \alpha_{DailyProfile}(t)}{16 [Mbit]}$$

Dove:

- $d_{PopulationDensity}$: densità utenti [user/km]
- $A_{playground}$: Area dello scenario considerato (dipendente dall'ISD) [Km]
- $r_{perUserRate}$: rate medio utenti durante la giornata
- $\alpha_{DailyProfile}$: percentuale di carico rispetto al traffico di picco (dipende dal periodo della giornata considerato)

L'utente calcola le potenze ricevute come descritto in precedenza e invia la lista delle potenze al Controllore. Per diminuire la complessità del codice, l'utente invia anche la potenza che potrebbe ricevere da antenne al momento spente. Ciò non costituisce un problema in quanto le stesse informazioni potrebbero essere ricavate dal Controllore semplicemente fornendo la posizione dell'utente (essendo già a conoscenza della posizione di tutte le antenne ed eventualmente di precedenti misurazioni di potenza). Questo, conoscendo lo stato della rete, in particolare quali antenne sono accese, calcola l'interferenza, l'SINR e il rate che ogni antenna offre all'utente. Compilata la lista sceglie la migliore antenna secondo l'algoritmo selezionato. Invia quindi una richiesta all'antenna candidata. Questa, analizzando le risorse interne, se disponibili, risponderà al Controllore con un Ack, eventualmente ritardato dal tempo di accensione se in

stato di sleep. Una volta ricevuto l'Ack il Controllore informa l'utente dell'associazione all'antenna candidata e del rate possibile. Infine l'utente comunica all'antenna la propria identità e il suo backlog. (Figura 18)

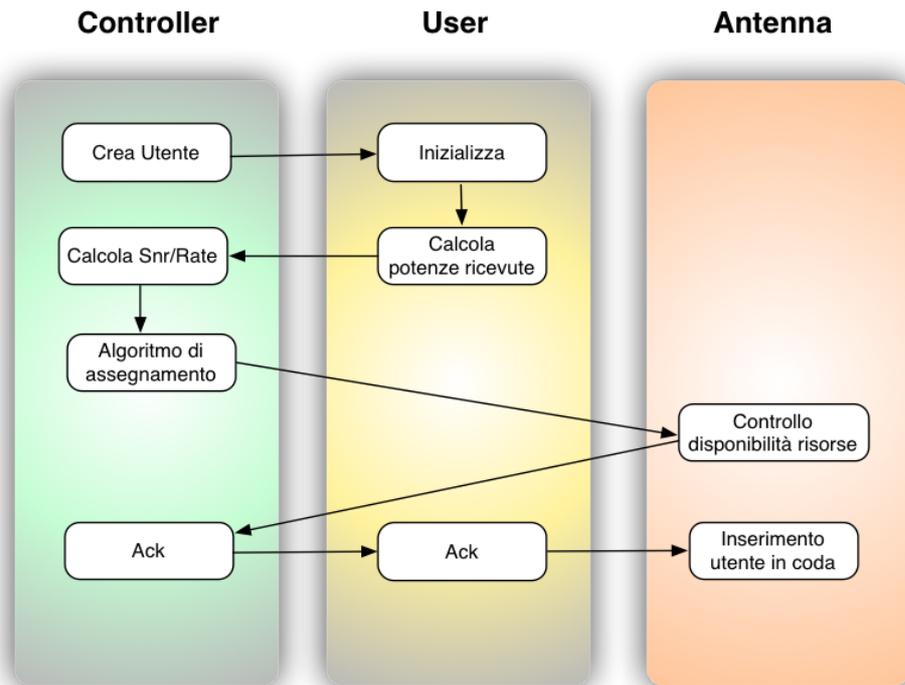


Figura 18 Procedura di nascita / assegnamento

3.4.3 Riordino delle connessioni e handover

Ogni antenna accesa genera interferenza. Quindi nel caso di cambiamento di stato di un'antenna cambiano tutti i SINR e quindi i rate percepiti dagli utenti. Il controllore avendo conoscenza dello stato della rete si occupa di riordinare le altre connessioni esistenti. Esso informa tutti gli utenti del cambiamento, e questi invieranno le nuove potenze ricevute.

Il controllore quindi rieseguirà l'algoritmo di assegnamento per tutti gli utenti. Possono verificarsi tre casi:

- L'utente rimane associato alla stessa antenna con lo stesso rate
- L'antenna rimane la stessa ma l'utente riceve un rate differente
- L'utente effettua un handover verso un'altra antenna

Nel primo caso il Controllore non fa niente, l'utente continua ad esser servito come prima. Nel secondo caso invece il Controllore invia un messaggio ad Antenna ed Utente con il nuovo rate da adottare.

Nell'ultimo caso invece il Controllore invia prima la richiesta alla nuova antenna, se questa è disponibile, allora informa l'utente. Questa volta l'utente prima di associarsi alla nuova antenna invierà un messaggio all'antenna corrente per chiudere la connessione. L'antenna, una volta eliminato l'utente dalla propria coda, nel caso in cui esso fosse l'ultimo, inizierà la procedura di spegnimento.

3.4.4 Ottimizzazione Periodica

Periodicamente il Controllore effettua una procedura di ottimizzazione dello stato della rete in termini di consumo energetico (OPL). Una volta terminato l'algoritmo descritto in precedenza (Paragrafo 3.1.2), il Controllore verifica quali cambiamenti sono stati decisi per ogni utente ed effettua tutte le necessarie procedure di handover.

3.5 Algoritmi: implementazione

In questa sezione verrà illustrato come le due tipologie di algoritmi, Associazione OnDemand e Ottimizzazione periodica del layout sono stati implementati nel simulatore.

3.5.1 Associazione OnDemand (AO)

Quando l'utente invia la propria lista di potenze ricevute (una per ogni antenna, accesa o spenta che sia) è il Controllore a calcolare l'interferenza, quindi il SINR e quindi il rate massimo istantaneo (perché non tiene conto di quanti altri utenti sono in coda nell'antenna e ne condividono le risorse). Nei nostri algoritmi si tiene conto del rate effettivo (diverso dal rate massimo, dipende infatti anche dal numero di utenti totale serviti dalla stessa antenna) dato dalla qualità del canale che l'utente sperimenterà associandosi alla relativa antenna e dello stato attuale della stessa, e quindi la scelta dell'antenna non può basarsi solo sulla sola potenza ricevuta.

Ricordiamo che l'obiettivo principale è quello di far risparmiare energia al sistema e ciò è possibile principalmente disattivando le BS.

3.5.2 Ottimizzazione periodica del layout (OPL)

Il Controllore ad inizio simulazione si auto invia un messaggio ritardato di t secondi (intervallo di ottimizzazione). Quando arriva il messaggio, il Controllore effettua la procedura OPL e produce una soluzione, ovvero una matrice di associazioni utente-antenna. Conoscendo la situazione attuale individua le differenze rispetto alla nuova soluzione (handover o cambi di rate) ed invia i messaggi agli utenti per forzarli a effettuare l'handover. A seguito della OPL verranno quindi eseguiti diversi handover prima di riprendere il normale corso della simulazione. Tra i messaggi inviati dal Controllore c'è anche un nuovo auto messaggio ritardato per avviare la prossima procedura di OPL.

Capitolo 4 – Risultati

In questo capitolo verrà descritto in dettaglio lo scenario utilizzato per le simulazioni e le caratteristiche dei vari moduli coinvolti. Verranno inoltre descritti e commentati i risultati ottenuti dalla simulazione degli algoritmi di AO e OPL.

4.1 Lo scenario

Lo scenario preso in considerazione è simile al Dense Urban 2020, estratto dal Doc2 [28], un documento rilasciato da GreenTouch Consortium che descrive dettagliatamente gli scenari di riferimento.

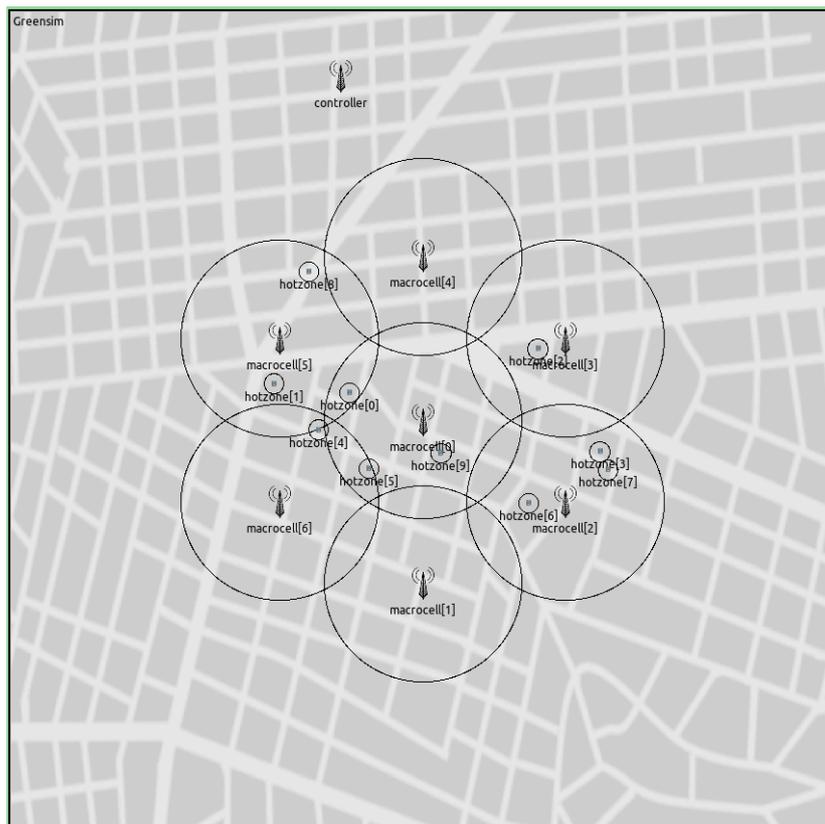


Figura 19 Playground GreenSim

Sono state create 10 HotZone, disposte in modo casuale sul playground (unico limite è una distanza reciproca di almeno 50m).

L'HotZone è una zona definita attraverso una gaussiana bidimensionale in cui viene generata una quantità di traffico maggiore rispetto al resto dello scenario.

All'interno di ogni HotZone è stata posta una small cell esattamente al centro. In alcune simulazioni abbiamo disposto due small cell per HotZone, posizionate in modo simmetrico rispetto al centro (Figura 19).

Per ogni scenario sono state effettuate diverse simulazioni indipendenti da 500sec l'una per poi mediare i risultati.

Come metrica sono stati usati il consumo energetico totale di tutte le antenne (compreso del backhauling) e il throughput medio degli utenti. Inoltre, abbiamo tracciato anche il tempo totale di permanenza nello stato "on" di ogni antenna.

4.1.1 Caratteristiche Antenna

Sia le macro cell che le small cell implementano sistemi di risparmio energetico. In particolare sono accese solo nel caso in cui ci sia almeno un utente da servire. Non appena l'ultimo utente lascia la coda, l'antenna entra in modalità microDTX. Dopo un delay fissato l'antenna entra infine in modalità deepsleep. Quando il Controllore decide di riaccendere l'antenna, tornerà operativa dopo un periodo di warm up pari a zero.

Nella Figura 20 vengono descritte in dettaglio le caratteristiche delle macro celle e delle small cell. Quest'ultime consumando molta meno potenza sono preferibili nell'assegnazione degli utenti.

	Macro Cell	Small Cell
Numero	21 (7 x 3)	10 / 20
ISD	500 m	variabile
Tilt	15°	0°
Bandwidth	20 MHz	20 MHz
Max Rf Output	49 dBm	30 dBm
Antenna height	32m	5m
Max gain	14 dBi	5 dBi
P_1	128.1	140.7
P_2	37.6	36.7
WallLoss	20 Db	20 Db
Mimo	8 x 2	2 x 2
Noise Level	-174 dBm/Hz	-174 dBm/Hz
Full Load power consumption	221.67 W	11 W
No Load power consumption	63 W	4 W
Sleep power consumption	52.3 W	2 W
Stand By power consumption	0 W	0 W
Backhaul type	Optical	Optical
Backhaul power consumption	5 W	5 W
Min distance from users	35m	10m

Figura 20 Tabella Parametri Antenna

4.1.2 Calcolo del Rate

Nella formula del calcolo della potenza ricevuta descritta precedentemente (Par. 4.3.1), oltre ai valori specificati in tabella vi è anche la voce “shadowing”.

Lo shadowing viene generato come una variabile casuale con distribuzione lognormale (deviazione standard 10Db e media nulla). In particolare ogni utente avrà un valore di shadowing fisso S_u e un valore per ogni coppia utente – sito : S_s . (Ogni sito contiene 3 settori macro o una small). Il valore complessivo di shadowing viene calcolato come:

$$S_{tot} = \frac{S_u^2 + S_s^2}{\sqrt{2}}$$

Un'antenna sarà considerata come interferente nel calcolo del SINR solo se ha almeno un utente in coda. Macro cell e Small cell operano su due bande diverse quindi non interferiranno vicendevolmente.

Per il calcolo effettivo del rate abbiamo usato le tabelle riportate nel Doc2 che associano SINR-RATE a seconda del valore di MIMO. Queste tabelle sono state ottenute dagli Alcatel Lucent Bell Labs e includono nel calcolo del Rate tutti i guadagni di scheduling: fast fading, diversità spettrale, polarizzazione d'antenna, multi-path, effetti multi-antenna e multi-utente e HARQ (Hybrid automatic repeat request). Grazie a queste tabelle possiamo utilizzare uno scheduler Round Robin (ogni antenna invia dati ad un utente alla volta utilizzando tutte le risorse momentaneamente disponibili).

4.1.3 Profilo di Traffico

Come descritto nel Paragrafo 3.4.2 il tasso di generazione degli utenti dipende da diversi fattori: area e densità del playground, rate medio giornaliero degli utenti e percentuale del rate medio dipendente dalla fascia oraria.

Per le simulazioni abbiamo estratto gli scenari da [28]. Abbiamo scelto un'area Dense Urban (area totale: 1.52 km^2 , densità: $10000 \frac{\text{utenti}}{\text{km}^2}$) con un rate medio giornaliero fisso e abbiamo analizzato tre fasce orarie pari allo 20%, 40% e 100% del rate medio. Ci riferiremo a queste tre fasce con basso, medio e alto traffico.

Gli utenti vengono generati dal Controllore nel 33% dei casi in un punto casuale del playground. Nel restante 66% invece viene prima scelta casualmente una delle Hotzone, dopo di che si sceglie un punto su una gaussiana bidimensionale (Figura 21) con punto medio coincidente con il centro della HotZone e varianza $\sigma = 30\text{m}$.

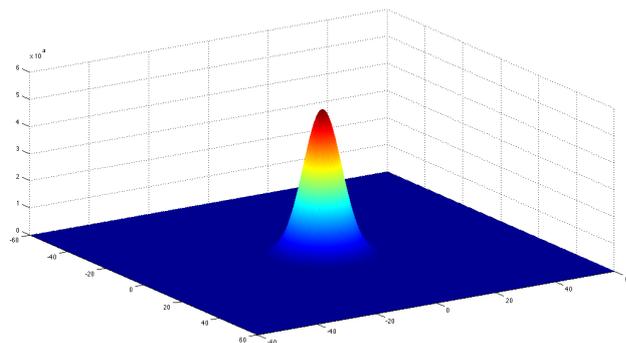


Figura 21 Gaussiana bidimensionale

Ogni utente quando viene generato cerca di scaricare un file di 16 Mbit in un tempo massimo di 4s. Dopo di che abbandona il sistema. Il massimo valore accettabile di utenti che abbandonano il sistema senza aver terminato il download è del 5% sul totale degli utenti attivati.

4.2 Calibrazione

Prima di procedere all'implementazione e all'analisi degli algoritmi di assegnazione iniziale ed ottimizzazione periodica, il simulatore è stato calibrato con altri partner del progetto GreenTouch per testare la corretta implementazione delle impostazioni di base. E' stata utilizzata una versione semplificata del simulatore sviluppato separatamente dai vari membri seguendo le stesse specifiche descritte nel Doc2.

In questa versione gli utenti hanno un comportamento FullBuffer, ovvero si attivano ad inizio simulazione ed effettuano il download di un file di dimensione virtualmente infinita. Il download termina insieme alla fine della simulazione. Una volta disposti sul playground, gli utenti rimangono connessi all'antenna (scelta come quella con miglior potenza ricevuta) senza muoversi e quindi senza effettuare handover. Le antenne sono sempre tutte accese e non vi è implementato alcun meccanismo di gestione dinamica dell'energia. Non vi sono small cell ma solo le 21 macrocelle.

Lo scenario, definito nel Doc2, viene associato alla situazione della rete cellulare nel 2010 (Figura 22) per quanto riguarda le caratteristiche tecniche delle antenne.

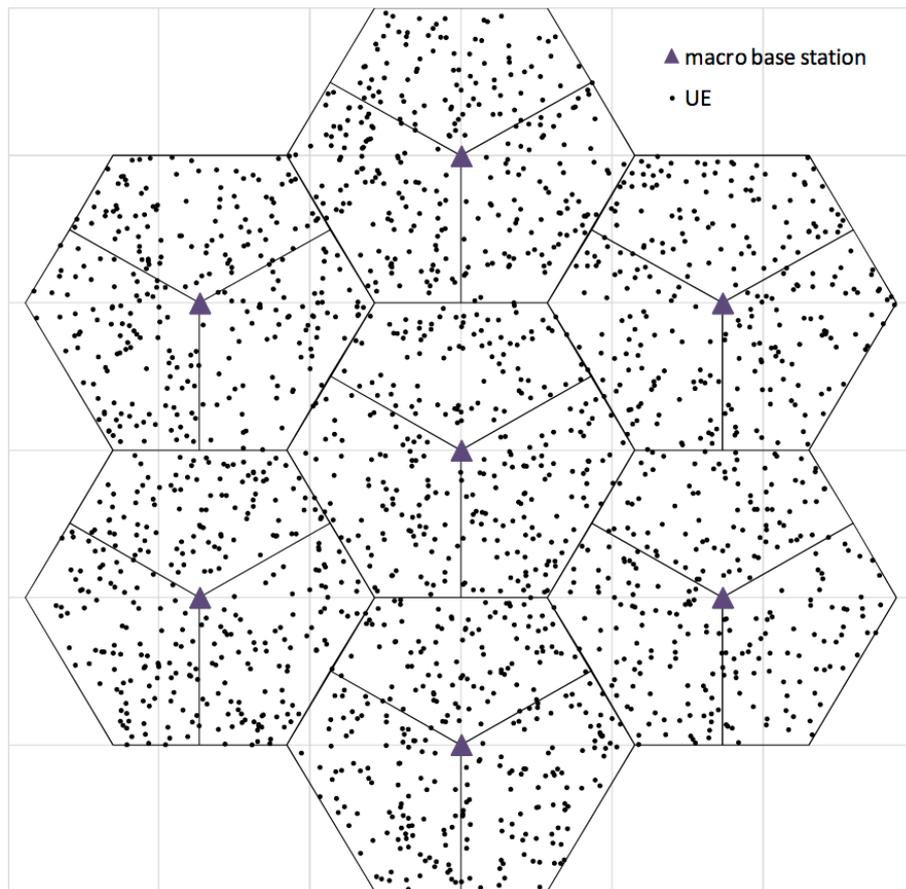


Figura 22 Scenario 2010

Le metriche scelte per la calibrazione sono il Coupling Loss (definito nel Par. 4.3.1), il SINR e Throughput medio degli utenti.

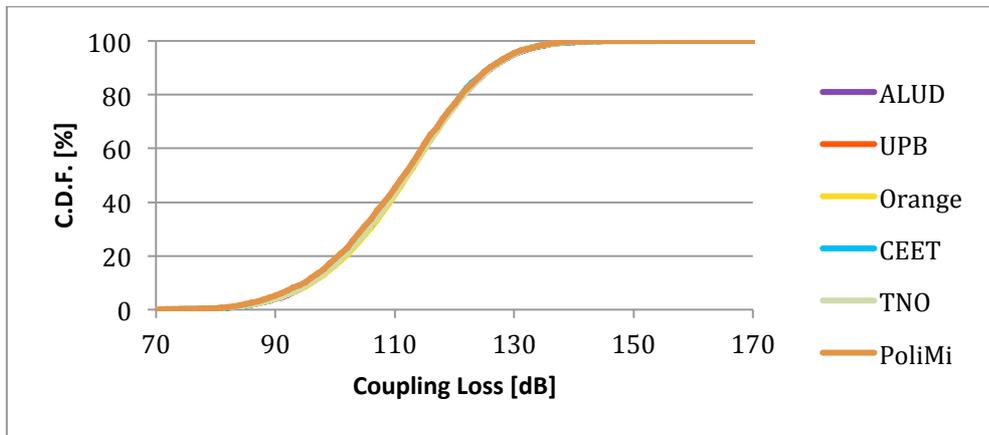


Figura 23 Calibration Dense Urban: Coupling Loss

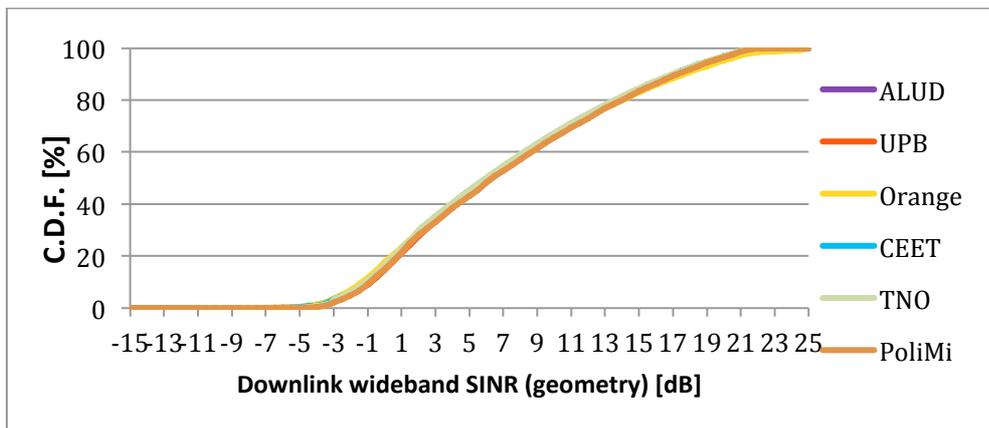


Figura 24 Calibration Dense Urban: SINR

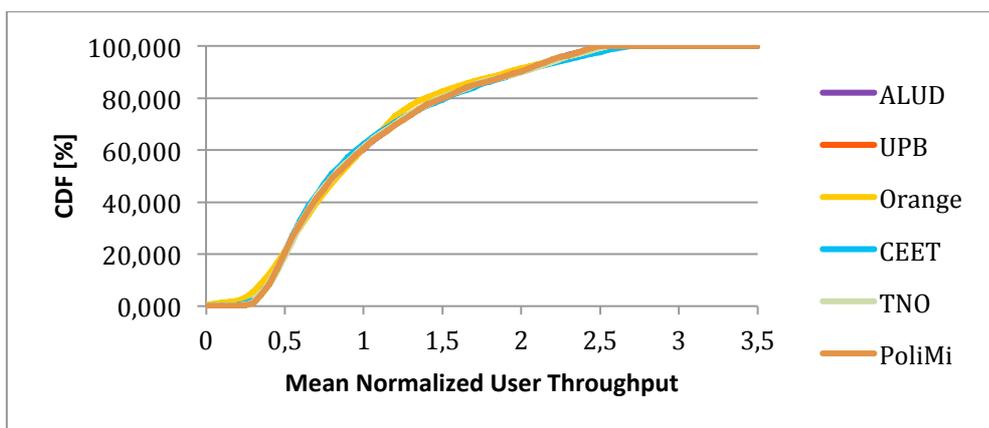


Figura 25 Calibration Dense Urban: Mean Normalized Userd Throughput

La calibrazione (Figura 23 24 e 25) è stata effettuata su 4 scenari (Dense Urban, Urban, SubUrban e Rural). I risultati han dimostrato che i 6 partner GreenTouch che han collaborato al progetto han prodotto simulatori comparabili.

Il resto del lavoro invece si è concentrato sullo scenario Dense Urban 2020.

4.3 Scenario base per il confronto dei risultati

L'algorithmo di base per l'assegnazione utente-antenna da cui siam partiti per confrontare i nostri risultati è quello attualmente usato nei sistemi cellulari. L'utente si associa all'antenna che gli fornisce la migliore potenza ricevuta, senza tener conto dell'interferenza a cui quell'associazione è soggetta o delle condizioni attuali dell'antenna. Ciò porta ad una soluzione non ottimale dal punto di vista energetico.

In queste simulazioni le antenne continuano ad avere la possibilità di accendersi e spegnersi a seconda del carico (sempre senza delay), ma il loro stato non inciderà nella scelta dell'associazione. Per distinguere i risultati di questo tipo di simulazioni nel seguito verranno denominati con BAS.

4.4 Risultati numerici dell'algorithmo di associazione iniziale

Negli algoritmi di Assegnazione OnDemand (AO), per ogni scenario di traffico (Basso, Medio, Alto) abbiam fatto variare il parametro α/η per simulare approcci più o meno aggressivi. Vediamo AO RB (Assegnazione OnDemand Rate Based) e AO EB (Assegnazione OnDemand Energy Based).

4.4.1 Rate Based (AO RB)

Ricordando la formula:

$$r_{\text{off}} > r_{\text{on}} * (1 + \alpha)$$

Un incremento del valore di α corrisponde ad un maggior risparmio energetico. Infatti il rate offerto dalla migliore antenna spenta dev'essere sempre più alto rispetto a quello offerto dalla migliore antenna accesa. Nelle nostre simulazioni α varia nel range [0.1 : 0.1 : 1.0].

Analizziamo inizialmente lo scenario con basso traffico.

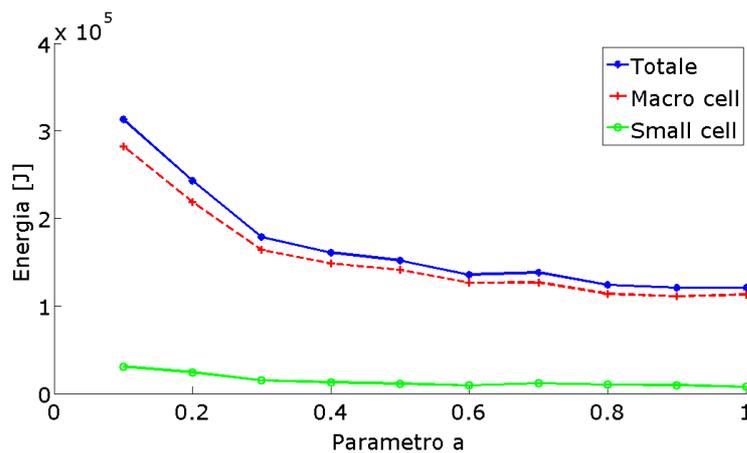
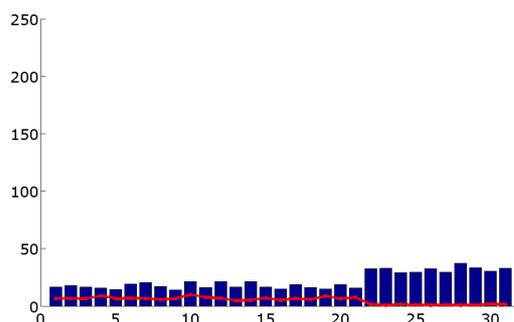


Figura 26 Consumo di energia del sistema - AO RB – traffico Basso

Nel grafico in Figura 26, è rappresentato il consumo energetico totale del sistema (curva superiore) e la sua suddivisione in contributo delle macro celle e small cell. Notiamo subito come la quota più importante sia data dalle macro celle.

In caso di basso traffico quindi abbiamo una notevole riduzione del consumo energetico (in BAS = $9.4 \cdot 10^5 [J]$) e come preventivato l'aumento del parametro α coincide con una diminuzione dell'energia consumata.



**Figura 27 Tempo totale di attivazione ed energia consumata per antenna -
AO RB – traffico Basso**

Nel grafico in Figura 27 viene rappresentato lo scenario con $\alpha = 0.5$ (l'andamento del grafico è simile con tutti i valori di α). In particolare viene raffigurato per ogni antenna il consumo energetico (linea rossa) in scala con il tempo totale di attivazione (barre blu). Sull'asse y quindi avremo i secondi e i kilo Joule.

Si nota come nonostante le smallcell rimangano nello stato “on” complessivamente più a lungo, forniscono un contributo energetico minimo.

Si noti che il maggior utilizzo delle smallcell è dovuto alla distribuzione del traffico, il 66% degli utenti infatti si attiva all'interno di una Hotzone, ovvero sotto il raggio di copertura di una smallcell.

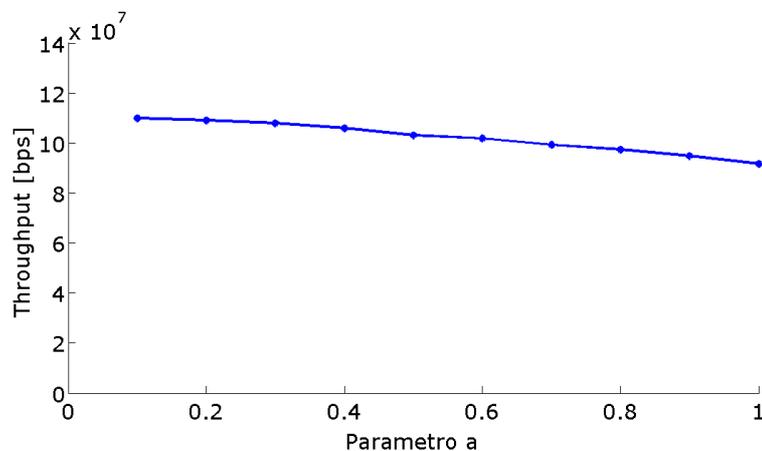


Figura 28 Throughput medio per utente - AO RB - traffico Basso

Ad una riduzione del consumo energetico segue, una riduzione del throughput medio degli utenti(Figura 28). All'aumentare di α l'algoritmo tenderà ad associare gli utenti alle antenne già accese anche se queste non offrono il rate migliore.

Analizzando lo scenario con traffico alto otteniamo risultati apparentemente discordanti.

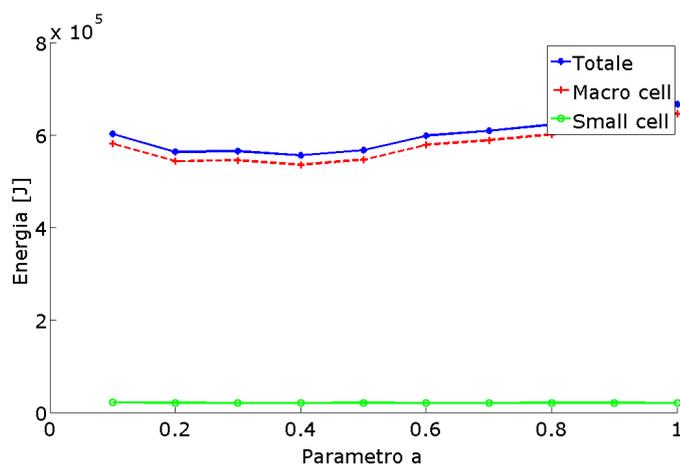


Figura 29 Consumo di energia del sistema - AO RB - traffico Alto

Notiamo (Figura 29) come pur diminuendo il consumo rispetto allo scenario base ($72.8 \cdot 10^5 [J]$), questo tende ad aumentare con l'incremento del parametro α . Nonostante questo il rate tende ugualmente a decrescere (Figura 30).

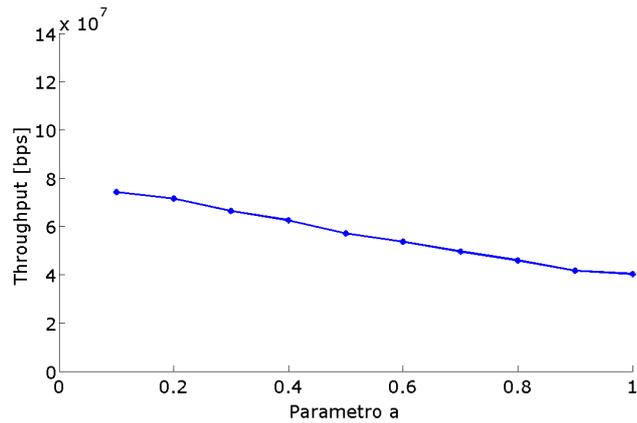


Figura 30 Throughput medio per utente - AO RB - traffico Alto

Questo perché con un traffico molto più alto del precedente si tende a saturare le risorse delle antenne (Figura 31). Queste serviranno gli utenti con un rate più basso e quindi gli utenti rimarranno nel sistema più tempo aumentandone il consumo energetico totale.

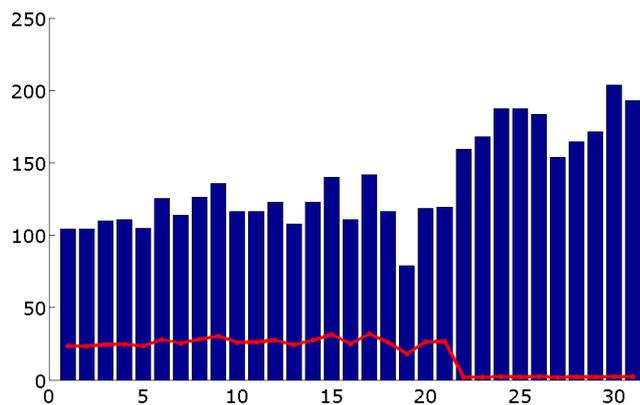


Figura 31 Tempo totale di attivazione ed energia consumata per antenna - AO RB - traffico Alto

Proviamo infine ad simulare un carico di traffico medio.

La curva del consumo energetico (Figura 32) ha un andamento che rispecchia le osservazioni precedenti. Decresce fino ad un minimo ($\alpha=0.5$) per poi risalire. La curva del throughput invece è monotona decrescente (Figura 33). Questo conferma quanto detto precedentemente: aumentando il valore del parametro α l'algoritmo tende sempre meno ad accendere una nuova antenna. Questa dovrà garantire un rate sempre più alto all'utente per poter essere selezionata. Un minor numero di antenne accese corrisponde però ad una condivisione delle risorse dello scheduler elevata, che porta quindi ancora una volta alla saturazione delle antenne con conseguente aumento dei consumi energetici.

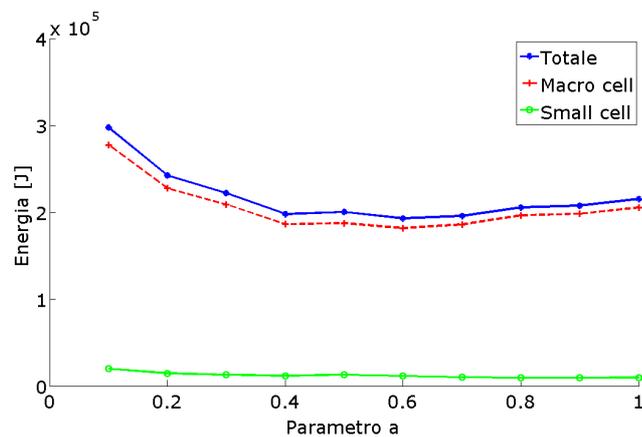


Figura 32 Consumo di energia del sistema - AO RB – traffico Medio

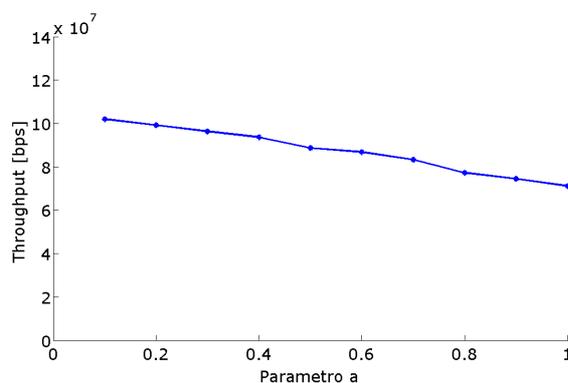


Figura 33 Throughput medio per utente - AO RB - traffico Medio

In conclusione possiamo affermare che l'algoritmo AO Rate Based apporta notevoli miglioramenti dal punto di vista del consumo energetico mantenendo limitato il calo di throughput, a patto che il sistema non sia congestionato. Essere troppo aggressivi può essere controproducente, si tenderà infatti a diminuire la QoS pur non giovando sull'efficienza energetica.

4.4.2 Energy Based (AO EB)

Il secondo approccio per l'AO è più orientato al risparmio energetico. Se nel precedente algoritmo si tendeva a massimizzare il rate offerto all'utente, ora si cerca di garantire un rate minimo limitando fortemente il numero di antenne accese.

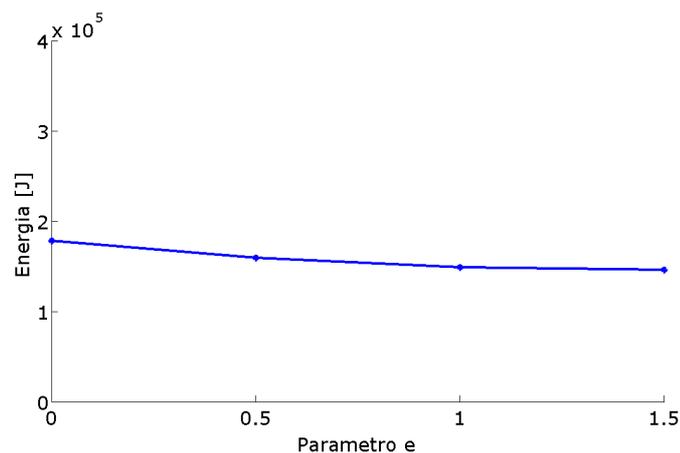


Figura 34 Consumo di energia del sistema - AO EB – traffico Basso

Partendo dalla baseline di $9.4 \cdot 10^5 [J]$ per l'energia e $13 \cdot 10^7 [bps]$ per il rate, nel caso di basso traffico abbiamo un notevole risparmio energetico (Figura 34) ma un conseguente calo del throughput (Figura 35).

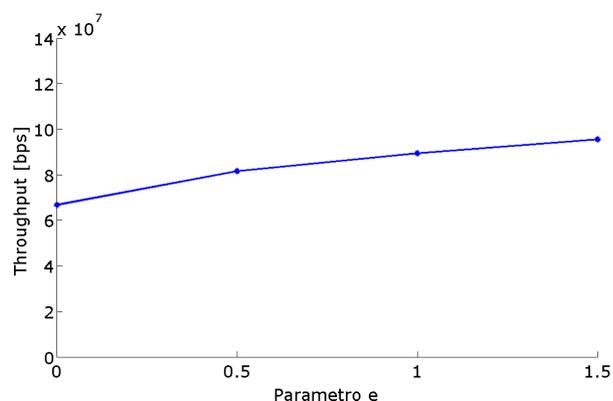


Figura 35 Throughput medio per utente - AO EB - traffico Basso

Aumentando il parametro η , e quindi innalzando il rate di soglia minimo da garantire agli utenti, notiamo un incremento della QoS e un leggero calo del consumo energetico.

Analizzando uno scenario con traffico intenso otteniamo invece risultati contrastanti. Per aumentare la capacità abbiamo aggiunto un'ulteriore small cell in ogni HotZone, arrivando così ad un totale di 20 small cell.

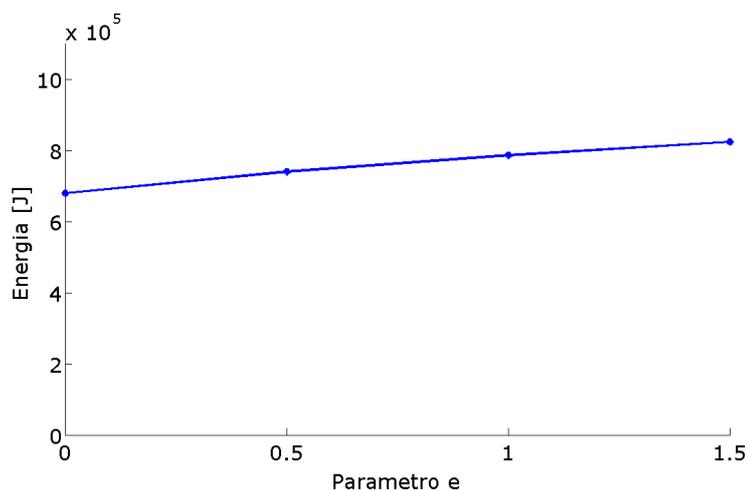


Figura 36 Consumo di energia del sistema - AO EB – traffico Alto

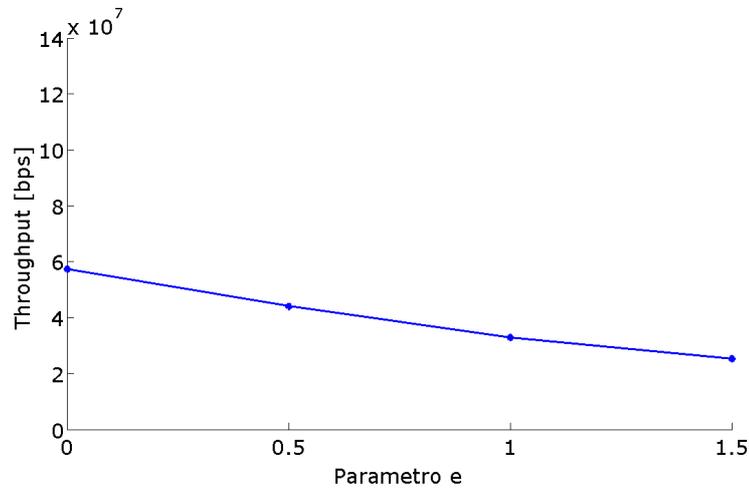


Figura 37 Throughput medio per utente - AO EB - traffico Alto

Le prestazioni del sistema originale in questo scenario son $72.8 \cdot 10^5 [J]$ per il consumo energetico e $7 \cdot 10^7 [bps]$ per il throughput. Notiamo ancora un drastico calo nel consumo energetico (Figura 36) che tende ad aumentare con l'incremento del parametro η . In questo scenario il rate medio invece di migliorare, decresce (Figura 37). Confrontando i grafici del tempo di attivazione delle antenne (Figura 38) è possibile individuare la causa.

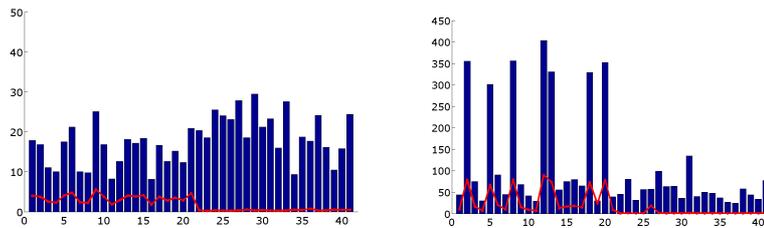


Figura 38 Tempo totale di attivazione ed energia consumata per antenna - AO RB – traffico Basso e traffico Alto

Incrementare il parametro η implica garantire agli utenti un rate minimo più alto. Per soddisfare le richieste devono essere accese sempre più antenne con conseguente aumento dell'interferenza. Nel caso di basso

traffico e quindi bassa congestione questo fenomeno non degrada la QoS. Nel caso di traffico intenso invece l'eccessiva interferenza porta ad una congestione del sistema. Le simulazioni son terminate con una percentuale di utenti che non hanno terminato il download in meno di 4 secondi ben superiore al 5% .

In conclusione l'algoritmo IA EB in condizioni di basso traffico fornisce dei miglioramenti rispetto alla BAS ma comunque inferiori rispetto a IA RB. In caso di traffico intenso invece tende a congestionare il sistema rendendo inutile il suo utilizzo.

4.5 Ottimizzazione periodica del layout (OPL)

L'algoritmo di OPL (Ottimizzazione periodica del layout) applica periodicamente un riordino dello stato delle antenne e delle associazioni ed è indipendente dall'assegnamento OnDemand. Il nostro lavoro punta a verificare se ci sia ulteriore margine di guadagno rispetto ai risultati ottenuti tramite l'AO. Siam partiti dalla condizione migliore che l'AO ci ha fornito, ovvero abbiam scelto AO RB con $\alpha = 0.5$.

Il parametro di controllo dell'algoritmo OPL è la frequenza di applicazione. L'intervallo è stato fatto variare nell'insieme:

[0.5 , 1, 2, 4, 5, 10, 15, 20] sec

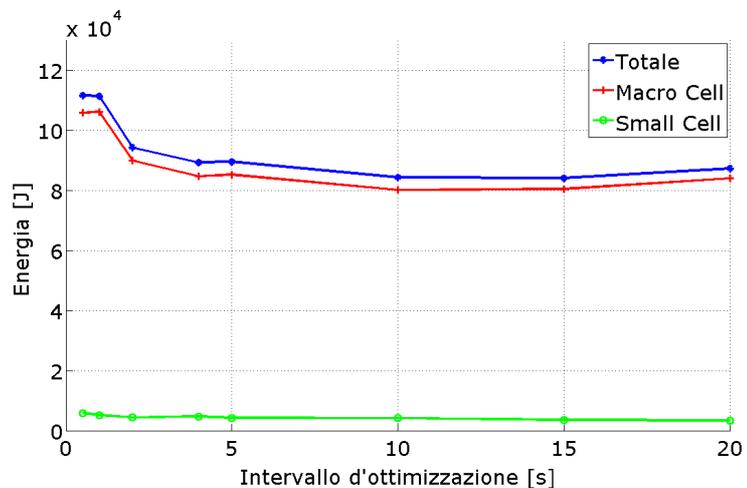


Figura 39 Consumo di energia del sistema - OPL – traffico Basso

Dal grafico in Figura 39 vediamo come in condizioni di basso traffico l' OPL permette di ridurre l'energia consumata (con il solo AO RB il consumo medio era $15 \cdot 10^4 [J]$). Notiamo però che non conviene applicare l'algoritmo troppo frequentemente: infatti viene consumata più energia, pur offrendo minor throughput (Figura 40).

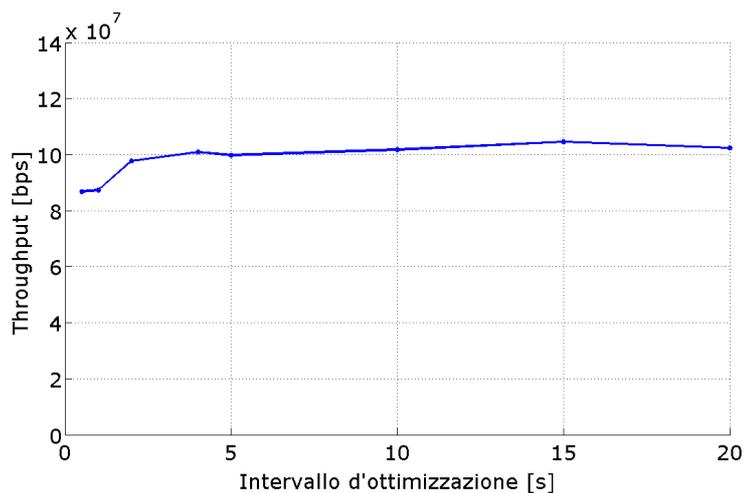


Figura 40 Throughput medio per utente - OPL - traffico Basso

Il motivo di questo comportamento è da ricercare nella tipologia di traffico.

Il tempo massimo di permanenza nel sistema è di 4 secondi (corrispondente ad un rate di $4 \cdot 10^6 [bps]$). Come si vede dalla CDF dei rate in Figura 41 però la maggior parte degli utenti ha un rate più alto (e quindi un tempo di download minore).

L'algoritmo OPL tende a concentrare gli utenti su poche antenne in modo da spegnerne quante più possibile. Questo porta ovviamente ad una degradazione della QoS. Ad esserne maggiormente danneggiati sono proprio gli utenti con buone condizioni di canale. Gli utenti con un rate basso già prima dell'esecuzione dell'algoritmo non soffriranno di un ulteriore calo di prestazioni in quanto l'OPL garantisce comunque un rate minimo.

Utenti con un rate più basso, rimarranno nel sistema più a lungo, che quindi consumerà più energia oltre ad esser più congestionato.

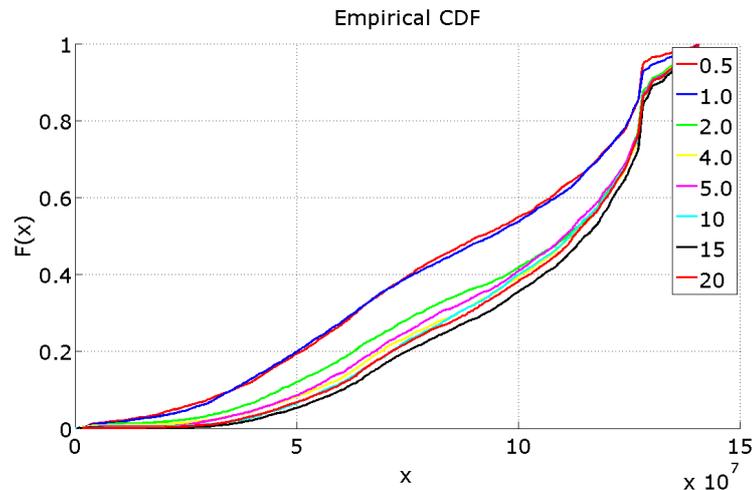


Figura 41 CDF dei rate – OPL – traffico Basso

Nel caso di traffico più elevato invece, le prestazioni medie sono già più basse, quindi ci aspettiamo che il OPL degradi meno il throughput.

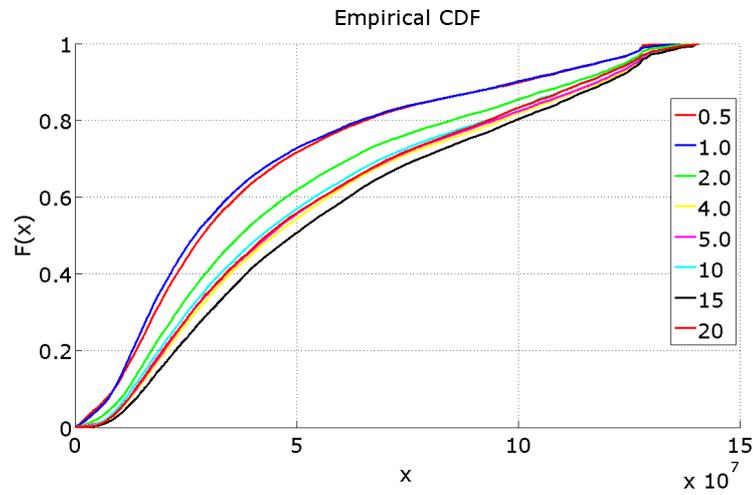


Figura 42 CDF dei rate - OPL – traffico Alto

Dalla Figura 42 notiamo infatti che gli utenti hanno in media rate più bassi (il sistema è più congestionato).

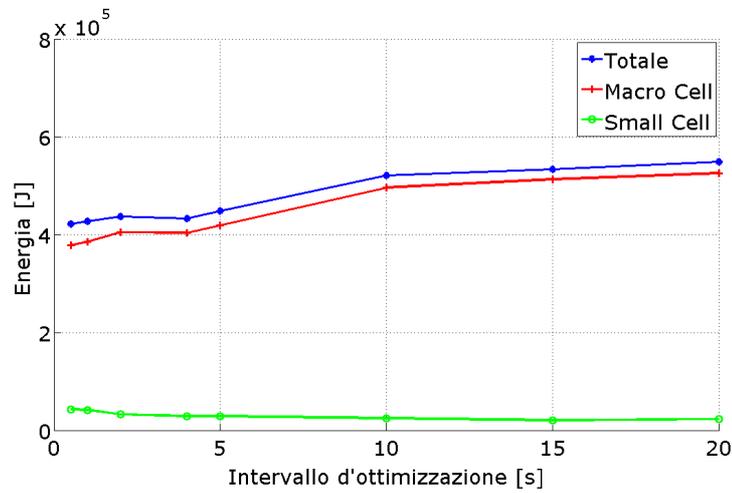


Figura 43 Consumo di energia del sistema - OPL – traffico Alto

In questo scenario quindi conviene applicare l'algoritmo anche più frequentemente (Figura 43).

L'algoritmo OPL tende ad aggregare quanti più utenti possibile nel minor numero di BS, rispettando vincoli di QoS (rate minimo garantito per il 95% degli utenti). Nel caso di basso traffico, ci sono ampi margini di miglioramento del consumo energetico, in quanto i pochi utenti sparsi per tutto il playground potranno esser concentrati su poche antenne che gli forniranno comunque un buon rate.

Esser troppo aggressivi (eseguire l'algoritmo troppo spesso) può però diminuire le prestazioni. Gli utenti con un rate molto elevato, che rimanendo attivi per poco tempo contribuiscono minimamente al consumo energetico, vengono penalizzati e quindi viene allungato il loro periodo di permanenza nel sistema con conseguente aumento del consumo.

Effettuare la procedura più raramente eviterà di rallentare molti di questi utenti in buone condizioni di propagazione, andando ad intaccare maggiormente gli utenti con basso throughput.

Nel caso di alto profilo di traffico invece, data la congestione, abbiamo pochi utenti in buone condizioni di throughput. Quindi anche applicando spesso l'OPL non andremo a decrementare marcatamente il rate degli utenti, quindi non aumenterà il consumo di energia.

Conclusioni

La crescita continua del traffico nelle reti cellulari ha portato ad una crescita del consumo energetico del sistema. Questo ha spinto gli operatori di telecomunicazioni ad occuparsi dell'efficienza energetica dei loro apparati di rete. L'insieme degli studi e delle soluzioni su questo aspetto è noto in letteratura come "green networking".

Partendo dalla riduzione del consumo energetico assoluto per singolo componente, si è introdotto il concetto di consumo modulabile in funzione del traffico. Vari studi han dimostrato che per quanto il consumo sia modulabile, la migliore soluzione è spegnere totalmente gli apparati. Nelle reti cellulari il componente principale responsabile del consumo energetico è l'apparato radio. Son state studiate varie proposte di algoritmi per ottimizzare il numero di antenne accese. Nel problema bisogna tener conto del vincolo di QoS. Diminuire eccessivamente il consumo energetico spegnendo troppe antenne potrebbe abbassare la QoS sotto i limiti accettabili e crea problemi di copertura.

Il progetto BCG2, incentrato sul green networking, ha proposto un'ulteriore innovazione rivoluzionaria. Separando le celle di segnalazione da quelle di dati si può rilassare parzialmente il vincolo della copertura totale. Questa infatti sarà garantita solo dalle antenne di segnalazione, progettate per rimaner sempre attive con basso data-rate ma alta efficienza energetica. Le antenne per i dati invece, non dovendo più garantire la copertura su tutto il territorio potranno essere attivate solo a seguito di una effettiva domanda di traffico. Questo scenario è possibile grazie alla context awareness, ovvero ad una conoscenza dello stato della rete dettagliata, costantemente aggiornata e alla base dell'allocazione delle risorse di rete. Unità centralizzate di gestione, avendo a disposizione informazioni sull'intera rete, potranno prendere delle decisioni globali tenendo conto di molti più fattori rispetto alle reti attuali.

Il nostro lavoro di tesi si è concentrato sulla gestione e sull'utilizzo del context. Grazie ad esso abbiamo potuto sviluppare algoritmi di associazione utente-antenna orientati all'efficienza energetica. Abbiamo ideato e implementato due tipologie di algoritmi: la prima riguarda strettamente l'associazione utente-antenna. Abbiamo modificato la procedura utilizzata attualmente nelle reti cellulari orientandola al risparmio energetico. La seconda tipologia sfrutta maggiormente il context awareness. Avendo una visione globale del sistema abbiamo cercato di ottimizzare periodicamente tutte le associazioni utente-antenne.

Grazie al simulatore di rete cellulare di nuova generazione sviluppato nel lavoro di tesi abbiamo potuto implementare e testare gli algoritmi ideati. Abbiamo confrontato i nuovi risultati con quelli ottenuti dalle procedure standard utilizzate dalle reti attuali. Abbiamo dimostrato che quando il sistema non è congestionato si possono ottenere ottimi risultati con una politica di associazione più intelligente. Questo risparmio può essere ulteriormente incrementato eseguendo periodicamente l'algoritmo di ottimizzazione globale delle associazioni utente-antenne.

Questa tesi offre diverse prospettive di sviluppo. Una prima indagine può essere quella di valutare come impatti un ritardo nell'attivazione/disattivazione delle antenne sulle strategie di allocazione di risorse e sul risparmio energetico. E' possibile inoltre raffinare la gestione della mobilità degli utenti e quindi implementare un sistema di predizione che permetta alla rete di anticipare i movimenti degli utenti e annullare nuovamente il problema del delay di cambio di stato.

Si può ancora estendere la topologia delle antenne, rendendola meno omogenea e uniforme. E' possibile considerare un playground più grande con diversi controllori che comunicano tra di loro. Si possono infine studiare nuovi algoritmi

che permettano di gestire diverse tipologie di traffico, con diverse classi di servizio.

Bibliografia

- [1] Global Action Plan. [Online]. <http://www.globalactionplan.org.uk>
- [2] BusinessGreen Blog. [Online]. <http://blog.businessgreen.com>
- [3] Motorola. (2008) Node B datasheets. [Online]. <http://www.motorola.com/>
- [4] Kyuho Son, Hongseok Kim, Yung Yi, and Bhaskar Krishnamachari, "Base Station Operation and User Association Mechanisms for Energy-Delay Tradeoffs in Green Cellular Networks," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on (Volume:29 , Issue: 8)*, pp. 1525 - 1536, 2011.
- [5] T. Bitzer, T. Bohn, D. Wiegner, A. Pascht D. Ferling, "Power Efficient Transceivers to Enable Energy-Efficient Mobile Radio Systems ," *Bell Labs Technical Journal, Wiley, ,* pp. 59-76, 2010.
- [6] E. Katranaras (Eds.) M.A. Imran, "Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown," *Deliverable D2.3, EU FP7*, 2010.
- [7] A. Rezgui, P. Krishnamurthy, P. Pacharintanakul D. Tipper, "Dimming Cellular Networks ," *IEEE GLOBECOM '10 ,* 2010.
- [8] F. Richter and G. Fettweis, "Cellular Mobile Network Densification Utilizing Micro Base Stations ," *IEEE ICC '10 Cape Town*, pp. 1-6, 2010.
- [9] M. Bjelica, B. Moon, L. Kencl, J.-Y. Le Boudec K. Dufková, "Energy savings for cellular network with evaluation of impact on data traffic performance," *Wireless Conference (EW), 2010 European*, pp. 916-923, 2010.
- [10] A. Capone, M. Bogarelli J. Lorincz, "Energy savings in wireless access networks through optimized network management," *Wireless Pervasive Computing (ISWPC), 2010 5th IEEE International Symposium on*, pp. 449-454, 2010.

- [11] Marco Ajmone Marsan, Luca Chiaraviglio, Delia Ciullo, and Michela Meo, "Optimal energy savings in cellular access networks," *Proc. first International Workshop on Green Communications (GreenComm)*, 2009.
- [12] Luca Chiaraviglio, Delia Ciullo, Michela Meo, and Marco Ajmone Marsan, "Energy-efficient management of UMTS access networks," *Teletraffic Congress, 2009. ITC 21 2009. 21st International*, pp. 1-8, 2009.
- [13] Maruti Gupta and Suresh Singh, "Greening of the Internet," *SIGCOMM*, 2003.
- [14] M. Conti, E. Gregori, and A. Passarella. G. Anastasi, "A performance study of power-saving policies for Wi-Fi hotspots ," *Computer Networks*, 45(3) , pp. 295 – 318 , 2004.
- [15] F. H. P. Fitzek, G. Sasso, and M. Katz. G. P. Perrucci, "Energy saving strategies for mobile devices using wake-up signals ," *In 4th International Mobile Multimedia Communications Conference* , 2008.
- [16] M. Conti, and A. Passarella G. Anastasi, "Power management in mobile and pervasive computing systems ," *Algorithms for Wireless and Mobile Networks* , pp. 535–576, 2005.
- [17] Luca Chiaraviglio, Delia Ciullo, Michela Meo, and Marco Ajmone Marsan, "ENERGY-AWARE UMTS ACCESS NETWORKS," *The 11th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC'08)* , 2008.
- [18] Balaji Rengarajan, Gianluca Rizzo, Marco Ajmone Marsan, and Barbara Furletti, "QoS-Aware Greening of Interference-Limited Cellular Networks," *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2013 IEEE 14th International Symposium and Workshops on a*, pp. 1-9, June 2013.
- [19] Z. Yang, S. Zhou, and Z. Niu J. Wu, "A traffic-aware dynamic energy-

- saving scheme for cellular networks with heterogeneous traffic ,," *ICCT'11*, pp. 357 –361, sept 2011.
- [20] F. Richter, and G. Fettweis. A. J. Fehske, "Energy efficiency improvements through micro sites in cellular mobile radio networks," *In Proceedings of the IEEE Global Communications Conference, 2009*.
- [21] Ulrich Barth and Edgar Kuehn, "Self-Organization in 4G Monile Networks: Motivation and vision," *Wireless Communication Systems (ISWCS), 2010 7th International Symposium on*, pp. 731 - 735, 2010.
- [22] Antonio Capone, Andrè Fonseca dos Santos, Ilario Filippini, and Gloss Bernd, "Looking Beyond Green Cellular Networks ,," *Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS), 2012 9th Annual Conference on*, pp. 127-130, 2012.
- [23] Antonio Capone, Ilario Filippini, Bernd Gloss, and Ulrich Barth, "Rethinking Cellular System Architecture for Breaking Current Energy Efficiency Limits ,," *Sustainable Internet and ICT for Sustainability (SustainIT), 2012*, pp. 1-5, 2012.
- [24] M. A. Marsan and M. Meo, "Energy efficient management of two cellular access networks ,," *Proc. ACM GreenMetrics, Seattle, WA, Jun 2009*..
- [25] "BCG2 D2 Reference Models," 2011.
- [26] "BCG2 D1 "Architecture"," 2011.
- [27] Community OMNeT++. Omnetpp. [Online]. <http://omnetpp.org/>
- [28] Mobile Communication WG, "Architecture Doc 2: Reference Scenarios,".