



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Università degli Studi di Padova

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria dell'Informazione

***Analisi delle prestazioni di reti ibride
Wi-Fi e LTE tramite simulazione di rete.***

Laureando

Massimiliano Pesce 610853/INF

Relatore

Prof. Leonardo Badia

Correlatore

Ing. Daniele Munaretto

Anno Accademico 2011 / 2012

ABSTRACT - Questa tesi si occupa della coesistenza tra reti cellulari e Wireless Local Area Network (WLAN). Per la rete cellulare si prende in considerazione l'ultima evoluzione dello standard Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), proposta dal 3rd Generation Partnership Project (3GPP), lo standard Long Term Evolution di Quarta Generazione (LTE 4G), mentre per la rete WLAN lo standard IEEE 802.11a. Viene quindi analizzata la coesistenza tra reti eterogenee tramite l'uso del simulatore di reti ns-3.

È stato implementato codice nello stesso simulatore, che segue la programmazione definita nel linguaggio C++ e sono state eseguite campagne simulative per l'ottenimento di dati analizzati in seguito attraverso il software MATLAB.

INDICE

CAPITOLO 1	INTRODUZIONE	7
CAPITOLO 2	LE TECNOLOGIE LTE E WI-FI	11
	LA TECNOLOGIA LTE.....	11
	<i>CARATTERISTICHE GENERALI</i>	11
	<i>STRUTTURA DELLA RETE</i>	13
	<i>DOWNLINK</i>	16
	<i>UPLINK</i>	18
	LA TECNOLOGIA IEEE 802.11A.....	19
	<i>CARATTERISTICHE GENERALI</i>	20
	RELATED WORK.....	23
CAPITOLO 3	IL SIMULATORE NS-3	27
	IL MODELLO LTE.....	29
	IL MODELLO EPC.....	30
CAPITOLO 4	SIMULAZIONE DELLA RETE	33
	SCENARIO E STRUTTURA DEL SISTEMA.....	34
CAPITOLO 5	PERFORMANCE EVALUATION	37
	THROUGHPUT MEDIO.....	37
	THROUGHPUT FINESTRATO.....	41
	CONFRONTO THROUGHPUT APPLICAZIONI CON DIVERSO PACKET RATE.....	43
CAPITOLO 6	CONCLUSIONI	47
CAPITOLO 7	BIBLIOGRAFIA	49

Capitolo 1

INTRODUZIONE

L'incedere del progresso tecnologico, con l'avvento degli smartphones (dispositivi portatili in grado di fornire vari servizi, come l'accesso a internet, la possibilità di effettuare telefonate e messaggi, giocare, visualizzare foto e video, ecc.), spinge alla ricerca di sistemi sempre più sofisticati ed efficienti per la trasmissione di contenuti multimediali di alta qualità puntando a dare un'importante esperienza "real time" all'utente. A questo proposito la tecnologia Long Term Evolution (LTE) si presenta come un importante strumento, atteso su gran parte dei mercati mondiali. In questo lavoro si cercherà di analizzare una possibile integrazione con la tecnologia Wi-Fi 802.11a [1] attraverso l'utilizzo del simulatore di rete ns-3 , concentrando l'analisi sul throughput di tale rete ibrida.

La prospettiva futura per le reti di comunicazione mobili sembra identificarsi sempre più nella nuova tecnologia LTE Rel-10 e nella sua successiva evoluzione LTE-Advanced. Tale sviluppo prevede una rete con prestazioni molto simili a quelle ottenute in ambiente domestico o lavorativo, garantendo quindi gli stessi requisiti di velocità e qualità, pur trovando applicazione in uno scenario di tipo mobile.

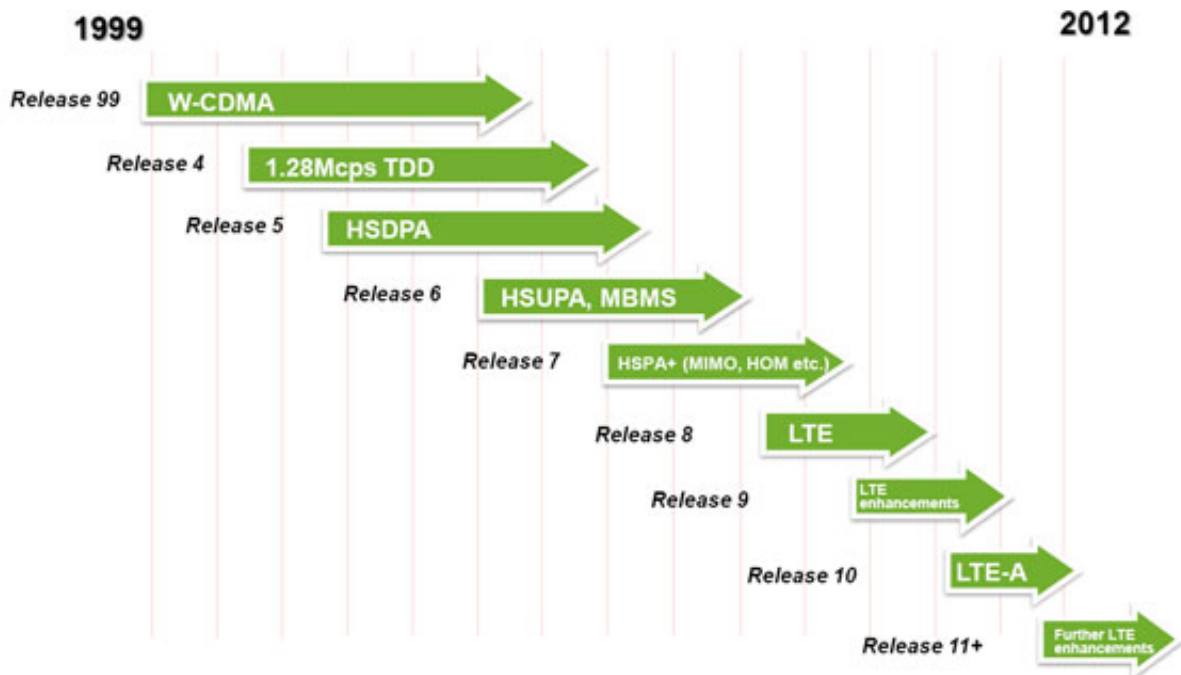


Fig. 1.1 - Evoluzione delle tecnologie 3GPP.

Le linee guida, tracciate dal 3rd Generation Partnership Project (3GPP)¹ [2], sono quelle distintive della tecnologia LTE e prevedono una convergenza verso le reti packet-oriented, all'Internet Protocol (all-IP), abbandonando la precedente versione a commutazione di circuito per la trasmissione voice. Infatti, anche le trasmissioni di tipo voce saranno implementate seguendo questo standard in un modello già noto con il nome Voice-over-IP (VoIP). Tuttavia una particolarità delle reti LTE è di poter fornire all'utente delle elevate prestazioni nella fruizione di contenuti multimediali importanti come i contenuti video. Ciò che si promette questa tecnologia è di arrivare, assieme ai suoi prossimi sviluppi, a poter trasmettere video in alta definizione in tempo reale. Per fare ciò appare quindi evidente come sia necessario rispettare vincoli stretti, al fine di garantire alte velocità di trasmissione anche in condizioni non ottimali. In seguito saranno analizzate con maggiore dettaglio le caratteristiche delle reti LTE, ma lo scopo di questo elaborato è di analizzare il comportamento di questa rete se ad essa venisse affiancata un'altra rete, già da tempo sul mercato, di tipo Wi-Fi.

¹ 3rd Generation Partnership Project è un'alleanza, formalizzata nel dicembre 1998, tra diversi enti internazionali di standardizzazione per sistemi di telecomunicazioni.

Tutto ciò per riuscire a raggiungere quelle prestazioni di cui si è accennato in precedenza.

In particolare, verrà studiata la coesistenza tra le reti LTE e IEEE 802.11a ponendo particolare attenzione alle variazioni del throughput in base alla scelta di alcuni parametri.

Nella prima parte saranno presentate le due tecnologie (LTE e IEEE 802.11a) evidenziando gli aspetti più importanti mentre in seguito sarà analizzata la convivenza tra le due sfruttando delle simulazioni eseguite al calcolatore mediante un simulatore di rete, noto come ns-3. Da qui saranno poi presentati i risultati di tali simulazioni sotto forma di grafici e si cercherà di trarre delle conclusioni che evidenzino come la rete possa esprimere le migliori potenzialità sotto l'influenza di alcuni principali parametri come, ad esempio, il numero di utenti che sono collegati ai due network. Infine, dalle conclusioni si potrà capire quali siano le possibili configurazioni che riescono a sfruttare al meglio la coesistenza delle reti.

Capitolo 2

LE TECNOLOGIE LTE E WI-FI

LA TECNOLOGIA LTE

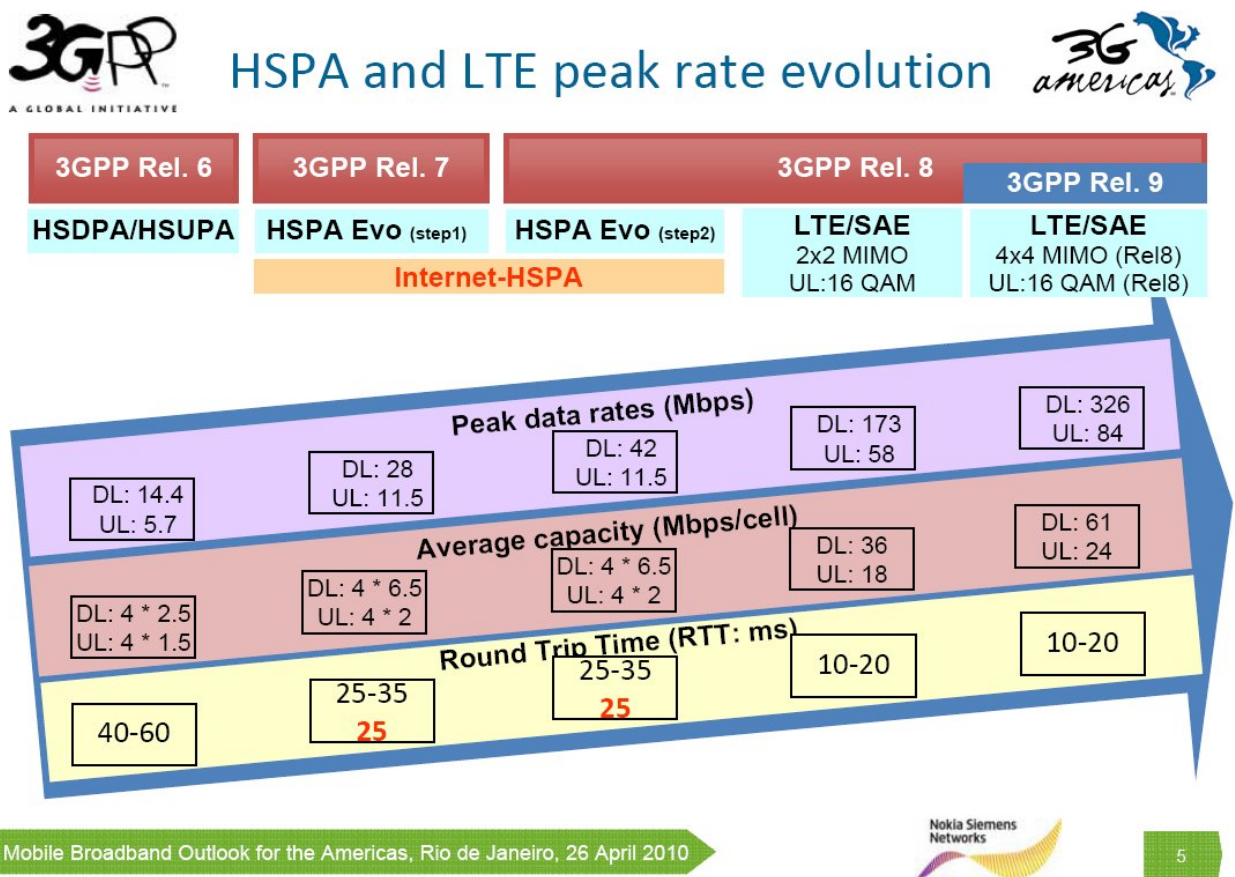
Nata nel 2009 dall'accordo di collaborazione 3GPP tra i principali enti di standardizzazione nelle telecomunicazioni, si colloca in posizione intermedia tra gli standard di Terza Generazione (3G) e quelli di Quarta Generazione (4G), ancora in fase di sviluppo. L'obiettivo principale è quello di promuovere la diffusione della banda larga in mobilità raggiungendo velocità di connessione wireless anche superiori a 1 Gbps.

CARATTERISTICHE GENERALI

Le migliorie, a oggi, previste rispetto alla precedente tecnologia 3G, apportate dalle nuove reti 3GPP-LTE possono essere riassunte in [3]:

- Velocità di trasferimento dei dati in download fino a 100 Mbps
- Velocità di trasferimento dei dati in upload fino a 50 Mbps
- Efficienza spettrale tre volte superiore alla versione più evoluta dell' UMTS, ovvero High Speed Packet Access (HSPA).

- Basse latenze (inferiori a 100 ms per il passaggio dallo stato idle allo stato active, e inferiori a 5 ms per piccoli pacchetti IP).
- Supporto per almeno 200 utenti per cella con oltre 5 MHz di banda.
- Supporto ottimale della mobilità (garantita fino ai 15 km/h, alte prestazioni dai 15 ai 120 km/h, funzionale fino ai 350 km/h).
- Prestazioni garantite con coperture ottenute tramite celle di 5 km, con minima degradazione per celle di 30 km.



Via: 3g4g.blogspot.com

Fig. 2.1 - Evoluzione delle prestazioni delle reti di nuova generazione [2].

Tali risultati potranno essere ottenuti attraverso l'implementazione di alcune specifiche, quali [3]:

- Utilizzo della modulazione Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) per il downlink e Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) per l'uplink.
- Utilizzo di un minimo di 1.25 MHz e un massimo di 20 MHz di banda per ciascun canale, allocabile con flessibilità.
- Applicabilità flessibile a diverse bande di frequenza, incluse quelle di GSM, UMTS e WCDMA e di nuove bande a 2.6 GHz, con la possibilità di aggiungere nuove bande all'occorrenza.
- Supporto Multiple Input Multiple Output (MIMO).
- Supporto di schemi di modulazione Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), 16-Quadrature Amplitude Modulation (16QAM) e 64QAM sia un UL che in DL
- Supporto di tecniche di duplexing Frequency Division Duplex (FDD) e Time Division Duplex (TDD), utili ad esempio per le trasmissioni voice.

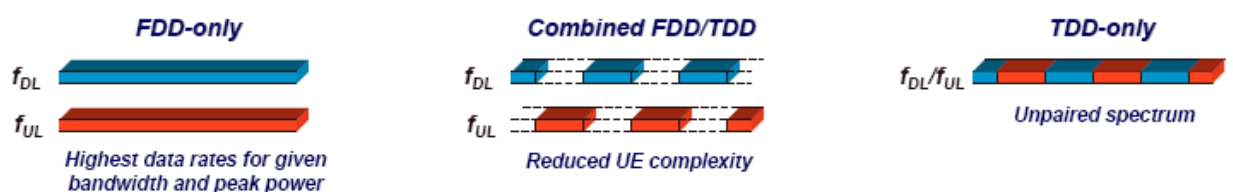


Fig. 2.2 - Tecniche di duplexing dello standard [4].

STRUTTURA DELLA RETE

La rete LTE o Evolved Universal Terrestrial Access Network (E-UTRAN) rappresenta lo standard di accesso alla Core Network (CN). Lo standard previsto per quest'ultima è invece descritto dal System Architecture Evolution (SAE) definito con lo scopo di supportare i servizi offerti dalla rete di accesso LTE.



Fig. 2.3 - Struttura dell'EPS.

Assieme, SAE e LTE formano il sistema Evolved Packet System (EPS). L'architettura di rete LTE ha una struttura semplificata rispetto a quella UMTS. La rete di accesso è costituita da un unico elemento chiamato evolved Node B (eNB), che racchiude tutte le funzionalità che in precedenza erano gestite dal Node B e Radio Network Control (RNC) [5][3]. A differenza delle tecnologie precedenti, come già detto, tutti i dati viaggiano su protocolli a pacchetto ed è proprio questo il motivo per cui la core network è strutturata in modo unificato senza distinzione tra dominio a pacchetto e dominio a circuito.

Il terminale LTE è denominato User Equipment (UE) [6] e rappresenta ciò che più si avvicina al concetto di smartphone, in altre parole un dispositivo in grado di trasmettere e ricevere diversi flussi di traffico in mobilità. L'UE è costituito da due parti: il Mobile Equipment (ME) che individua il terminale hardware vero e proprio e l'Universal Subscriber Identity Module (USIM) che contiene le informazioni riguardanti l'utente, la rete e i servizi supportati [5].

UE ha quindi il compito di gestire la modulazione/demodulazione, eseguire misure di qualità sul canale, controllare la potenza del segnale e il carico di cella, gestire le procedure di handover.

La rete di accesso vera e propria è costituita da evolved Node B (eNB) [7] connessi tra loro tramite l'interfaccia X2 [8], mentre ogni nodo eNB è a sua volta connesso alla CN attraverso l'interfaccia S1 [8]. La rete formata da nodi eNB, che costituisce la rete di accesso E-UTRAN, gestisce tutte le operazioni riguardanti la trasmissione dei segnali sul canale radio che possono essere riassunte nelle quattro seguenti funzionalità:

Radio Resource Management, Header Compression, Security, Connectivity to the Evolved Packet Core (EPC).

La core network, invece, si occupa del trasferimento dei dati da e verso le reti a pacchetto esterne. I principali nodi logici che la costituiscono sono [5][9]:

- Home Subscriber Server (HSS): database contenente tutte le informazioni utili per gestire un utente mobile.
- Serving Gateway (S-GW): è il nodo d'interfaccia tra la rete di accesso E-UTRAN e le altre reti 3GPP. Si occupa della gestione della mobilità di un terminale mobile che si sposta da un eNB a un altro.
- Packet Data Network (PDN) Gateway (P-GW): alloca gli indirizzi IP ai vari UE e gestisce i flussi di dati sulla base delle specifiche QoS (Quality of Service) e sulle informazioni fornite dal PCRF. Ad ogni flusso informativo è associata una specifica classe di QoS che assieme al flusso IP stesso forma ciò che è noto come "bearer".
- Mobility Management Entity (MME): è il nodo di controllo della core network più importante. Gestisce la segnalazione tra UE e CN e si occupa della prima connessione di ogni terminale alla rete. Tiene traccia delle posizioni dei terminali mobili e assegna le identità temporanee ai singoli UE.
- Policy Control and Charging Rules Function (PCRF): è il nodo responsabile del controllo delle QoS. Assegna i flussi alle varie classi e decide come il Policy Control Enforcement Function (PCEF) che si trova nel P-GW deve intervenire nella gestione dei flussi dati.

L'insieme di tutte queste funzioni proprie della CN risiede nell'Evolved Packet Core (EPC), introdotta per la prima volta dal 3GPP nella Release 8 dello standard, definita come la componente principale dell'architettura SAE.

Tale struttura è meglio illustrata dalla figura sottostante.

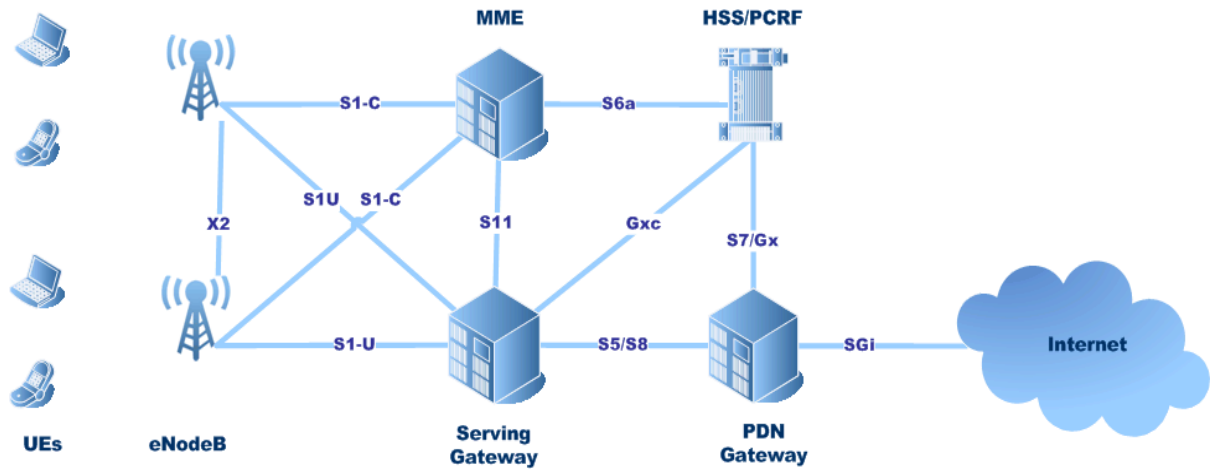


Fig. 2.4 - Struttura dell'EPS.

DOWNLINK

Allo scopo di soddisfare i requisiti preposti, la tecnologia LTE utilizza protocolli di accesso al mezzo basati sulla divisione della banda disponibile in un insieme di sottoportanti ortogonali tra loro: la Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) [10][11].

Evoluzione multi-utente della Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) [11][9], l'accesso al mezzo OFDMA consiste nell'assegnare a ciascun utente un sottoinsieme delle sottoportanti in cui viene suddivisa la banda disponibile per un determinato intervallo di tempo. Per questa ragione, a volte si usa dire che si tratta di una tecnica in cui vengono combinate la modulazione OFDM e l'accesso Time Division Multiple Access (TDMA) [5]. Essendo tale tecnica di tipo adattativo, attraverso veloci algoritmi di allocazione delle risorse, è possibile ottenere le prestazioni migliori dalla rete in base alle situazioni in cui versa permettendo allo stesso tempo di raggiungere un'elevata efficienza spettrale, in particolare se combinata con le tecniche MIMO [11][9], che prevede l'utilizzo di più antenne integrate nel dispositivo e nella base station per trasmettere in parallelo e nelle due direzioni vari flussi di dati. Per la fase di downlink, la configurazione di base 2x2 impiega due antenne a trasmettitore e due a ricevitore, mentre è possibile anche l'utilizzo della configurazione 4x4. Grazie a questa tecnica è possibile raggiungere quei valori di efficienza già descritti.

Un'altra caratteristica della rete LTE è quella di adattare la qualità del servizio (QoS) a seconda del tipo di applicazione che l'utente vuole utilizzare.

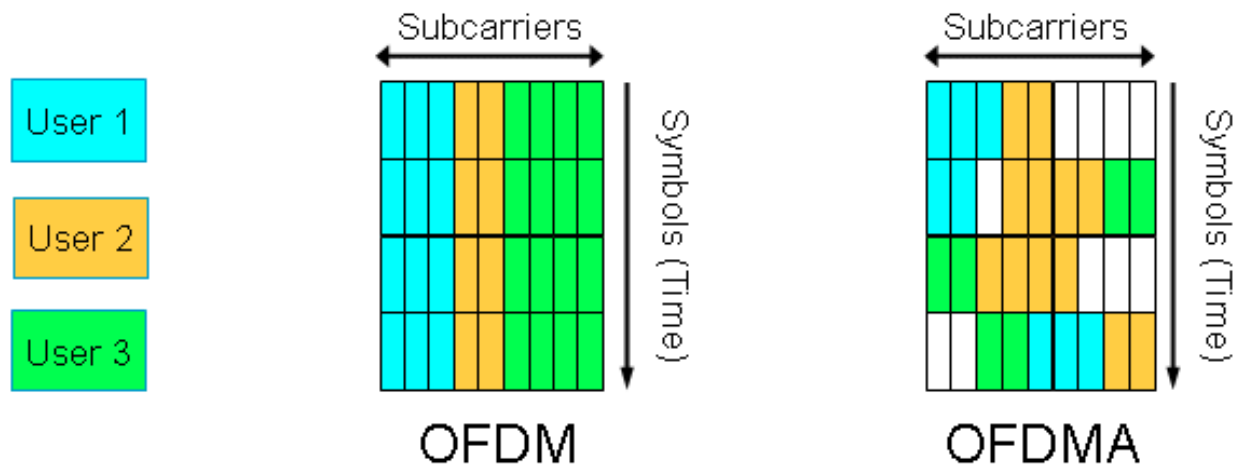


Fig. 2.5 - OFDM vs. OFDMA [4].

Un esempio semplificato di suddivisione delle risorse è rappresentato in Fig. 2.6. Ogni quadrato rappresenta un "blocco di risorsa" (Resource Block – RB) o "Physical Resource Unit" (PRU) che viene assegnato dinamicamente agli utenti [9].

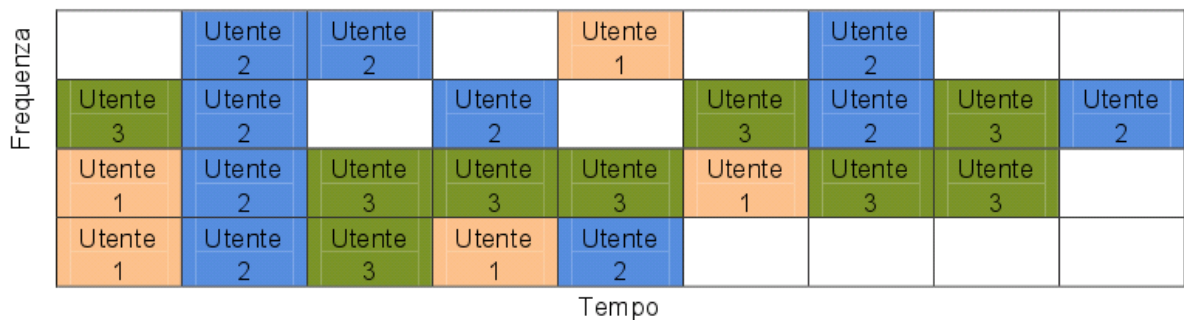


Fig. 2.6 - Esempio di ripartizione delle risorse radio.

I parametri radio della rete LTE in downlink sono riassunti in [9]:

- I blocchi di risorsa sono composti da 12 sottoportanti OFDMA da 15 kHz ciascuna per una larghezza di banda totale di 180 kHz.
- La durata di un intervallo (slot) è di 0.5 ms.

- 7 simboli formano un intervallo, un blocco di risorse comprende almeno 84 simboli. Assieme, 2 intervalli (14 simboli) formano una sotto trama con la quale è definito l'intervallo di trasmissione minimo (TTI) di 1 ms. Una trama radio è composta da 10 sotto trame (20 intervalli) e dura 10 ms.
- I tipi di modulazione usati per le sottoportanti sono il QPSK, il 16-QAM e il 64-QAM con 2, 4 e 6 bit per simbolo. La scelta del tipo di modulazione (AMR) avviene in modo dinamico tramite una programmazione temporale selettiva della gestione delle risorse radio (RRC) sulla base della qualità momentanea del canale radio segnalato dal dispositivo terminale.
- Le risorse minime di programmazione sono costituite da 2 blocchi di risorse.
- Il cambiamento di frequenza può essere effettuato in base agli intervalli.

UPLINK

Similmente a come avviene in OFDMA, anche in questo tipo di accesso al mezzo, vengono impiegate una serie di sottoportanti ortogonali per trasmettere le informazioni contenute nei simboli modulati, che vengono però trasmesse sequenzialmente e non in parallelo. Tale protocollo viene implementato nel Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) ed è stato scelto perché in grado di ridurre i consumi di corrente e i costi dei dispositivi [12]. Infatti, tale politica di accesso al mezzo richiede un Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) minore rispetto alla duale OFDMA. L'accesso multiplo SC-FDMA costituisce una novità nell'ambito delle comunicazioni mobili [9].

Il funzionamento prevede che ogni utente utilizzi differenti sottoportanti (ortogonali con le portanti degli altri utenti) per trasmettere i simboli e che questi simboli vengano trasmessi uno alla volta in sequenza [5][9].

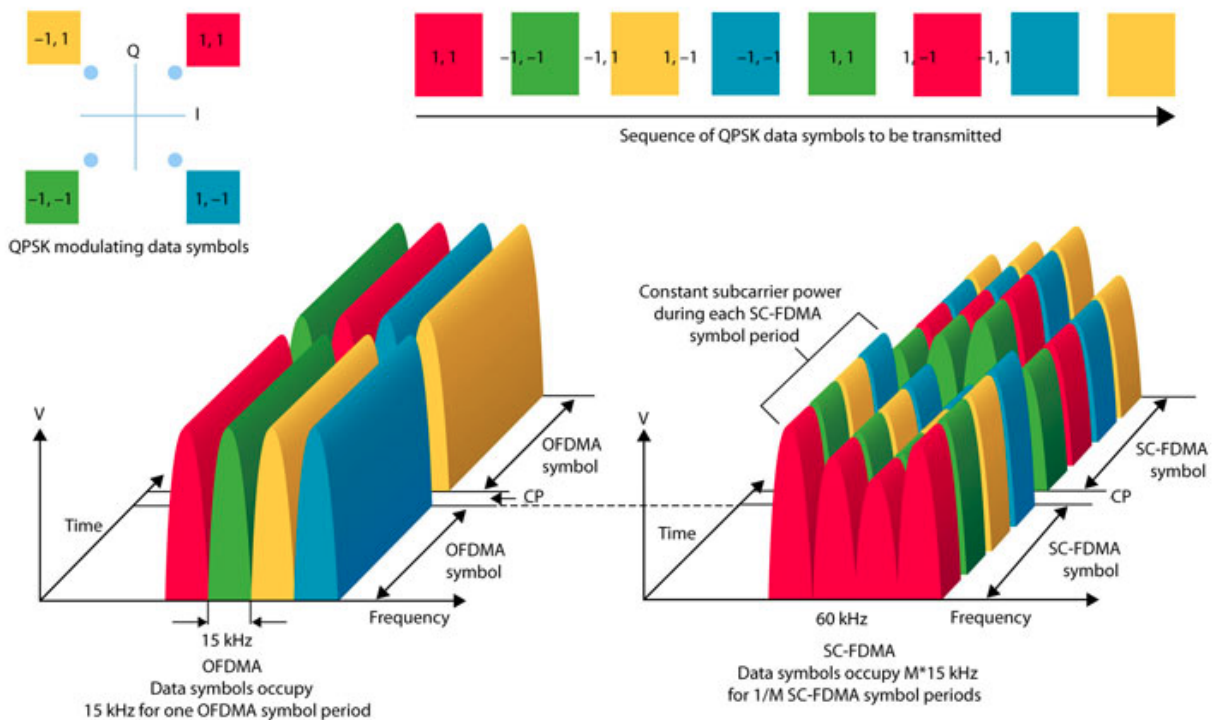


Fig. 2.7 - SC-FDMA [13].

LA TECNOLOGIA IEEE 802.11A

La tecnologia 802.11a viene comunemente identificata con il più immediato logo Wi-Fi, certificazione della Wi-Fi Alliance [1], l'organizzazione che garantisce la compatibilità tra dispositivi che usano lo standard 802.11. Di largo impiego e vasta praticità ha ridotto al minimo l'utilizzo di cavi di comunicazione aprendo all'uso della tecnologia wireless in ambienti domestici, lavorativi, luoghi pubblici, ecc. La presenza di un punto d'accesso Wi-Fi (Access Point – AP) permette la connessione a banda larga al network desiderato eliminando, di fatto, la necessità di cercare una più datata presa Ethernet. Questo tipo di comunicazione (che sarà quello utilizzato nelle simulazioni) sfrutta la presenza di un AP in grado di gestire tutta la rete, è chiamata comunicazione “infrastructure based”, a differenza della “infrastructureless” che permette agli utenti di comunicare tra di loro senza la presenza della supervisione dell'AP.

Lo standard 802.11a fa parte di un'ampia famiglia, sviluppata dal gruppo 11 dell'IEEE 802, che comprende varie versioni dello standard, classificate con una lettera; in tutto

gli standard della famiglia sono quattro (a, b, g, n) mentre gli altri (c, d, e, f, h, ...) riguardano estensioni e miglioramenti del servizio. In questo elaborato verrà preso in considerazione il protocollo 802.11a.

CARATTERISTICHE GENERALI

Rilasciato nel 2001, lo spazio delle frequenze utilizzato prevede le bande 5.15-5.25, 5.25-5.35 e 5.725-5.825 GHz [14]. Lavora con una velocità massima di 54 Mbps nonostante che, nella realtà, la velocità disponibile all'utente sia di circa 24 Mbps. Infatti i 54 Mbps riguardano la velocità del livello fisico, mentre il data rate, a causa di overhead, e meccanismi di risoluzione degli errori, risulta circa la metà [15]. Utilizza una modulazione di tipo OFDM su 64 sottoportanti ortogonali in cui una sequenza di bit (R bit/s) viene prima mappata in valori complessi, di solito attraverso una modulazione QAM e in seguito convertita da serie a parallelo in un vettore di $N = 64$ componenti. Quest'ultime sono poi modulate su bande di frequenza separate attraverso un modulatore. A ricevitore, vengono posti dei filtri interpolatori che selezionino la banda della relativa componente, riuscendo a ricostruire il segnale trasmesso. In particolare, si trasmette il segnale OFDM:

$$s(t) = \sum_n a_n e^{j2\pi f_n t} \quad , \quad 0 \leq t \leq T_s \quad , \quad f_n = \frac{n}{T_s} \quad , \quad 0 \leq n \leq N-1$$

L'ortogonalità (conseguenza anche delle proprietà degli esponenziali complessi) si ha se la durata $T_s = N/R$ dei simboli trasmessi sulle sottoportanti è legata alla spaziatura in frequenza dalla relazione $\Delta f = 1/T_s$. Per la trasmissione, a sua volta, del segnale OFDM sono svolti altri passaggi importanti che prevedono il campionamento del segnale e l'applicazione di trasformate di Fourier. Per ulteriori informazioni si faccia riferimento a [16].

L'accesso al mezzo è di tipo CSMA/CA. Può supportare fino ad un massimo di otto canali separati senza interferenza. La tecnologia OFDM prevede la suddivisione della banda disponibile in N sottobande che vengono poi modulate indipendentemente le une dalle altre. In seguito il flusso modulato sarà trasmesso in parallelo sulle N sottoportanti in modo da aumentare le prestazioni del sistema. In particolare per lo standard a, il numero N vale 64, di cui dodici sono azzerate per ridurre l'interferenza tra canali adiacenti (ottenendo 52 portanti utili per canale) e quattro sono usate per

trasmettere dei simboli pilota per calcolare le statistiche del canale. I flussi multipli di dati vengono trasmessi su ciascuna sottobanda secondo una specifica modulazione (BPSK, QPSK, 16QAM o 64QAM). Possono inoltre venire impiegati dei codici convoluzionali [17].

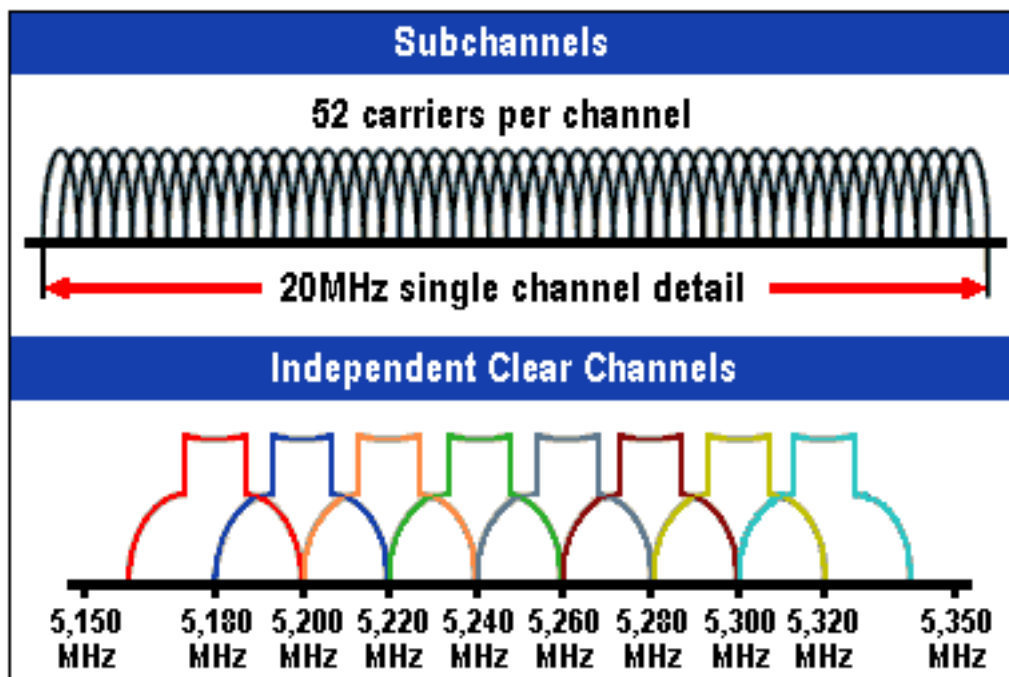


Fig. 2.8 - Suddivisione della banda nella tecnologia IEEE 802.11a.

Nello standard sono possibili due tipi di accesso al mezzo: Point-Coordination Function (PCF) e Distributed-Coordination Function (DCF). PCF è adatto per comunicazioni che prevedano un'unità centrale (l'Access Point) in grado di coordinare gli utenti sotto il suo raggio di copertura attraverso un'adeguata tecnica di "polling". Tuttavia tale metodo non ha avuto grande fortuna tanto che solamente pochi dispositivi sono stati prodotti per soddisfare questa tecnica. Il DCF invece si basa sul protocollo di tipo Carrier Sense Multiple Access con Collision Avoidance (CSMA/CA). Gli utenti, non appena percepiscono il canale libero, inviano il loro nuovo Medium Access Control Service Data Unit (MSDU) contenente anche i dati da trasmettere. Tuttavia, se due utenti rilevano allo stesso istante il canale libero ("idle") potrebbe occorrere una collisione. Al fine di evitare tale circostanza, il MAC della tecnologia 802.11 definisce uno schema atto a diminuire la probabilità di collisione. La "Collision Avoidance" utilizza periodi di backoff casuali basati su slot temporali.

Ogni stazione possiede un timer di backoff, espresso in unità di slot, che può assumere valori all'interno dell'intervallo $[0, BW-1]$ chiamato Contention Window (CW), dove BW è la finestra di backoff. Al primo tentativo di trasmissione di un dato pacchetto la BW è impostata al valore di BW_{min} . Quando un utente ha un pacchetto da trasmettere, ascolta il canale. Se il canale risulta libero, continua ad ascoltarlo per un periodo di tempo definito nel Distributed InterFrame Space (DIFS), che vale, per esempio, $34 \mu s$ per 802.11a. Dopo aver sentito libero il canale per questo intervallo di tempo aggiuntivo, l'utente fa partire il timer di backoff, il quale viene decrementato mentre il canale viene percepito libero e fermato quando invece il canale risulta occupato. Dopo che è stato fermato, il timer viene riattivato nel momento in cui il canale è stato rilevato libero per un tempo maggiore del DIFS. Solo quando il timer si esaurisce, viene trasmesso il pacchetto MSDU. Se il pacchetto MSDU collide, allora la CW viene raddoppiata e il nuovo BW assume il valore $\min(2*BW, BW_{max})$ dove BW_{max} è il massimo valore delle finestre. L'intero processo viene ripetuto. Ad ogni modo, tale soluzione potrebbe non garantire la totale immunità alle collisioni, ma sicuramente è un metodo che ne diminuisce le probabilità.

Da notare che spesso un dispositivo radio è equipaggiato con una sola antenna ed è pertanto in grado di trasmettere o ricevere in tempi diversi. Una collisione non può venire riconosciuta mentre l'antenna sta lavorando in modalità half-duplex, pertanto la trasmissione di un MSDU deve essere esplicitamente confermata. L'accesso base 802.11 adotta uno schema a doppia "handshake". Il mittente attende un tempo pari al DISF e all'intervallo del relativo backoff e poi trasmette il suo MSDU. Quest'ultimo viene ricevuto dopo un ritardo di propagazione e, a ricevitore, viene atteso un ulteriore Short InterFrame Space (SIFS) prima di rispedire il relativo segnale di accettazione ACK. La durata del SIFS deve essere minore del DISF per dare la precedenza ai segnali di accettazione rispetto ai pacchetti dati.

Tra i problemi che nascono nei networks wireless, è ben noto il problema dell'"hidden terminal", ma per una ricerca più approfondita si faccia riferimento a [17].

RELATED WORK

L'analisi sulle prestazioni di reti ibride è campo d'indagine e ricerca molto frequentato. Questo lavoro proverà a valutare la coesistenza tra rete LTE e 802.11a, ovvero tra reti con diverse caratteristiche. L'obiettivo principale è quello di valutare l'integrazione tra differenti tecnologie, in particolare a livello MAC del sistema. La rete LTE si basa su protocolli di accesso al mezzo di tipo OFDMA, una commistione tra la modulazione OFDM e l'accesso TDMA. Allo stesso modo anche lo standard IEEE 802.16 utilizza una modulazione OFDMA, e in questo è molto simile al relativo concorrente LTE. D'altro canto, la tecnologia 802.11a prevede un accesso al mezzo di tipo CSMA/CA e una modulazione OFDM per la trasmissione in parallelo dei simboli.

Un'analisi sulla coesistenza tra la tecnologia IEEE 802.11 e la tecnologia (in linea di principio a livello MAC, quindi, molto simile alla LTE) IEEE 802.16 delle reti WiMax, viene effettuata nell'articolo [18]. Le tecnologie a confronto adottano la stessa modulazione OFDM mentre sono profondamente diverse per quanto riguarda il livello MAC, motivo valido per il confronto. In questo articolo viene seguito l'aspetto della compresenza delle due reti, non compatibili tra loro per default, sulla banda dei 5 GHz, valutando gli aspetti di interferenza mutua e le variazioni di prestazione. Anche per questo studio è stata realizzata una campagna di simulazioni grazie ad un tool simulativo basato su SWAN/JiST.

Un altro articolo che propone inoltre una soluzione per la convivenza tra queste due reti, fatte lavorare intorno a portanti di 2.4 GHz è [19]. Qui viene proposta una soluzione in grado di risolvere i problemi dovuti alla mutua interferenza tra le due reti: viene richiesto che le due tecnologie lavorino in intervalli di tempo separati (Time Division Operation - TDO). Poiché lo standard WiMax opera con delle Base Station (BS), mentre Wi-Fi utilizza degli Access Point (AP), tale obiettivo richiede un particolare protocollo per garantire che non solo la BS WiMax e AP Wi-Fi siano sincronizzate, ma anche le varie stazioni-utenti lo siano. Anche in questo articolo sono riportati i risultati di simulazioni.

Un altro studio interessante sulle reti eterogenee è [20]. Partendo dal fatto che molti operatori propongono ai propri clienti diverse tecnologie di accesso alla rete, come ad esempio Wi-Fi, WiMax, Bluetooth, 3G, LTE, ecc., viene considerato l'aspetto benefico di questo tipo di offerta, ossia un potenziale aumento del throughput della rete se

l'utilizzo combinato delle diverse reti disponibili venisse ottimizzato. A tal fine, in questo articolo, si presenta un approccio proprio della teoria dei giochi, considerando caratteristiche quali l'insieme degli utenti, le loro possibili azioni e un valore di "ricompensa" identificato dagli autori con il throughput ricevuto dai singoli utenti. In questo articolo, a differenza di quanto avviene in questo elaborato, viene analizzata la componente mobile dello scenario, valutando gli effetti dello spostamento dell'utente sulle prestazioni e portando un'analisi di tipo matematico descrittivo piuttosto che partire da un approccio simulativo.

È possibile, inoltre, trovare un'analisi sull'interferenza tra tecnologia LTE e Wi-Fi in [21] dove si sviluppano due possibili configurazioni della rete ibrida: LTE/Wi-Fi dual-mode base station, dove quest'ultima è in grado di lavorare con entrambe le tecnologie, e LTE/Wi-Fi co-site nel quale ci sono due stazioni fisicamente separate in grado di collaborare tra loro. Lo studio, come in questo lavoro, prevede anch'esso delle campagne simulative.

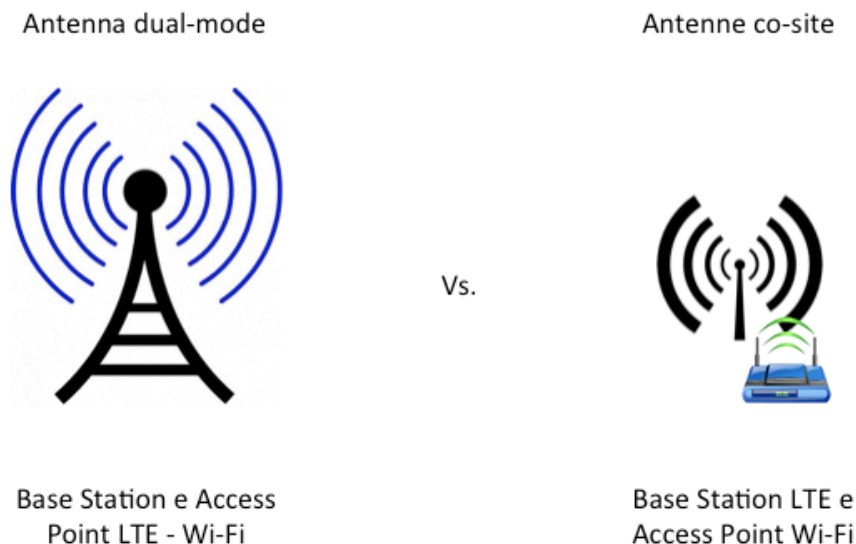


Fig. 2.9 - Differenza tra configurazioni Dual-Mode e Co-Site.

Infine, un articolo di riferimento che analizza nel dettaglio una strada per la valutazione della qualità del servizio percepita dall'utente è [22]. L'obiettivo di questo lavoro è quello di mostrare l'efficienza di alcuni tools per il calcolo della Quality of

Experience (QoE), un parametro utile per permettere ai provider di adattare e migliorare, in tempo reale, la qualità della trasmissione in scenari di tipo wireless.

Per concludere, vale la pena citare uno studio condotto da Qualcomm, che propone una soluzione alla gestione del traffico dati in una rete ibrida 3G/LTE e Wi-Fi. Qui vengono proposti degli algoritmi “intelligenti” in grado di canalizzare in traffico sulle due diverse reti in base a una serie di parametri e in maniera dinamica. Per maggiori informazioni si consulti [23].

Un interessante articolo che propone invece uno studio del sistema IEEE 802.11b, diversamente da quanto fatto in questo elaborato, mettendo in luce l’ottimizzazione delle risorse radio in base a parametri economici è [24]. In questo lavoro si cerca di stabilire una possibile correlazione tra l’assegnamento delle risorse ai vari utenti in base alla condizione di soddisfazione degli stessi con riferimento al costo del servizio che hanno pagato.

Infine, è utile citare uno studio che rivede gli algoritmi di routing con lo scopo di tenere in considerazione la Quality of Service (QoS) nelle reti eterogenee di tipo wireless. Vengono affrontati questi algoritmi cercando di renderli “consapevoli” della qualità che il servizio richiede. Viene inoltre proposto un tool capace di percepire le eventuali variazioni del livello di QoS, in modo tale da fornire un parametro utile per la creazione di nuovi algoritmi. L’articolo in questione è [25].

Capitolo 3

IL SIMULATORE NS-3

Ns-3 [26] è un simulatore di rete a eventi discreti adibito ad uso didattico e di ricerca utile per lo studio di protocolli e sistemi di telecomunicazione. Interamente scritto in C++, permette all'utente una vasta possibilità di scelte nella creazione delle campagne simulative cercando di aderire fedelmente alla realtà. A tal fine ns-3 cerca di evitare approssimazioni eccessive presentando modelli che possano trovare applicazione pratica mantenendo una certa coerenza con i test simulativi.

Da ricordare che il progetto ns-3 rappresenta ancora un cantiere aperto, oggetto di continui aggiornamenti e integrazioni; non è quindi un software statico, ma in continua evoluzione. Questo lavoro si basa interamente sulla simulazione di una particolare configurazione di rete ottenuta grazie ai moduli presenti nella versione aggiornata delle reti LTE del simulatore, vale a dire il modulo Lena che integra con migliorie l'acerba implementazione disponibile di base nel pacchetto ns-3.

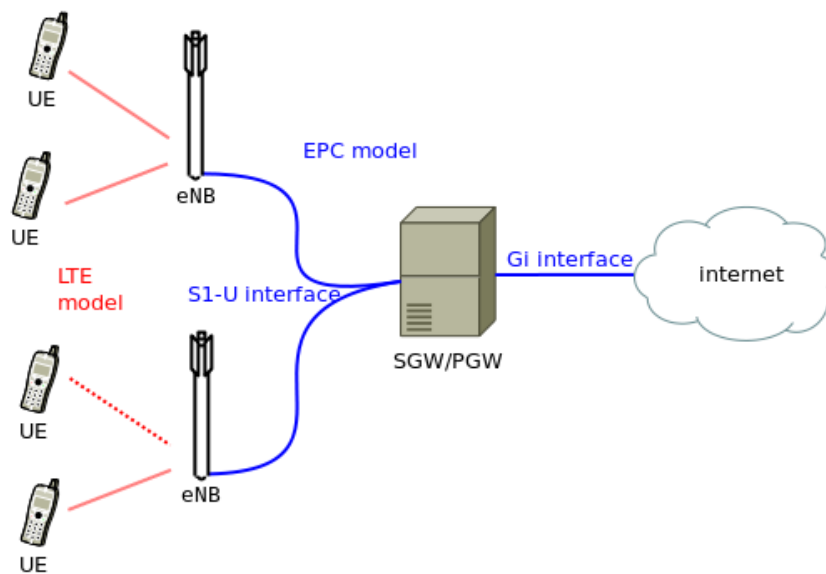


Fig. 3.1 - Architettura generale del modello LTE-EPC.

Per meglio comprendere lo sviluppo del lavoro sono, tuttavia, necessarie alcune precisazioni sulla struttura del modulo Lena [27], mentre per una più approfondita descrizione del software si faccia riferimento a [28].

L'architettura generale del modulo Lena si divide in due elementi principali:

- Il modello LTE che include Radio Resource Control (RRC) [29], Packet Data Coverage Protocol (PDCP) [30][31], Radio Link Control (RLC) [32][33], Medium Access Control (MAC) [29], Physical Layer (PHY) le quali risiedono interamente nei nodi UE e eNB;
- Il modello Evolved Packet Core (EPC) che include interfacce di rete, protocolli ed entità. Quest'ultime risiedono nei nodi S-GW, P-GW e MME (già citati in precedenza) e in parte anche nell'eNB.

IL MODELLO LTE

Il modello LTE è stato progettato per permettere la valutazione dei seguenti aspetti della rete LTE [27]:

- Radio Resource Management
- QoS-aware Packet Scheduling
- Inter-cell Interference Coordination
- Dynamic Spectrum Access

Al fine di garantire, inoltre, un sufficiente livello di dettaglio per una corretta valutazione degli aspetti sopra esposti, sono stati considerati i seguenti requisiti [27]:

1. A livello radio, la granularità del modello deve raggiungere almeno il livello dei Resource Block (RB). Questa unità fondamentale viene infatti usata per l'assegnazione delle risorse, senza questo minimo livello di precisione, risulterebbe impossibile modellare accuratamente lo scheduling dei pacchetti e l'interferenza inter-cella.
2. Il simulatore deve essere in grado di gestire fino a dieci eNB e un centinaio di UE. In questo modo si evita di utilizzare un simulatore di livello link-layer, un simulatore che scende fino al dettaglio del singolo simbolo. Questo perché avere un modello a livello di simbolo significa implementare tutto il livello fisico PHY, la cui enorme complessità limiterebbe pesantemente le simulazioni.
3. Deve essere possibile configurare all'interno del simulatore differenti celle che utilizzino differenti sistemi di portanti e bande. Le bande impiegate da diverse celle possono anche sovrapporsi e il calcolo dell'interferenza deve essere eseguito propriamente secondo la situazione.
4. Per essere il più vicino possibile alla realtà e allo standard LTE, il simulatore deve supportare il MAC Scheduler API pubblicato dal FemtoForum [34]. Questa interfaccia può essere utilizzata dai produttori di femtocelle per l'implementazione degli algoritmi di RRM.
5. Il simulatore LTE deve contenere una propria implementazione dell'API definita in [34]. Questo per mantenere indipendenza dalle diverse specifiche

dei costruttori. Da notare che le specifiche [34] sono solamente a livello logico, l'implementazione fisica è lasciata ai costruttori.

6. Il modello deve essere utilizzato per simulare la trasmissione di pacchetti IP provenienti dagli strati superiori della pila protocollare. Con ciò, è da intendere che sia lo Scheduling LTE che il Radio Resource Management non lavorano con pacchetti IP ma con RLC PDUs, che sono ottenuti dalla suddivisione e concatenazione di pacchetti IP da parte delle entità RLC. Così le funzionalità dello strato RLC deve essere modellato accuratamente.

IL MODELLO EPC

Il modello Evolved Packet Core (EPC) fornisce, nella simulazione, la connettività di tipo IP end-to-end al modello LTE. In particolare garantisce il supporto per la connessione a internet di molti UEs attraverso la connessione dei vari eNB con un singolo SGW/PGW. Per questo modello sono state rispettate le seguenti specifiche [27]:

1. Il solo tipo di Packet Data Network (PDN) supportato è l'IPv4.
2. Le funzionalità dei Serving Gateway (SGW) e PDN Gateway (PGW) sono implementate in uno stesso nodo che verrà indentificato come nodo SGW/PGW.
3. Gli scenari con mobilità inter-SGW non vengono considerati. Di conseguenza, nelle simulazioni verrà presentato un solo nodo SGW/PGW.
4. Un requisito del modello EPC è che deve essere in grado di simulare le trasmissioni end-to-end di applicazioni realistiche.
5. Deve presentare la possibilità di simulare topologie di rete con molteplici eNBs, equipaggiati con differenti tecnologie.
6. Deve essere permesso a ciascun utente l'utilizzo di differenti applicazioni con diversi profili Quality of Service (QoS). Quindi devono essere supportate più EPS bearer per ogni utente.
7. Il compito principale del modello EPC è la gestione del "data plane". Allo stato attuale, un modello accurato per l'EPC "control plane" non presenta una priorità. Di conseguenza il necessario "control plane" può essere modellato per

via semplificata, lasciando tale compito agli oggetti “helper” definiti nella versione base del simulatore ns-3.

Capitolo 4

SIMULAZIONE DELLA RETE

Grazie al modulo Lena del simulatore ns-3, le simulazioni per la valutazione delle prestazioni del sistema ibrido LTE e IEEE 802.11a si sono basate sul calcolo del throughput in funzione del numero di utenti collegati alla rete ibrida. In particolare si è valutato il contributo che la rete Wi-Fi può dare alla LTE e in quali situazioni è possibile ottenere il miglior beneficio. Per prima cosa sarà presentato lo scenario in cui si sono svolte le simulazioni, includendo i parametri della rete e le grandezze d'interesse per l'ottenimento dei risultati. In seguito verrà spiegato il primo risultato utile ottenuto, ovvero l'andamento del throughput medio della rete ibrida e un secondo risultato importante che riguarda invece l'andamento del throughput finestrato. Infine, sarà poi discussa l'influenza, sulle prestazioni, delle caratteristiche dell'applicazione, valutando in quale misura le performance della rete vengono influenzate.

SCENARIO E STRUTTURA DEL SISTEMA

Lo scenario simulativo prevede 10 utenti in posizione fissa disposti secondo lo schema illustrato dalla Fig. 4.1. Ogni utente può trovarsi solamente in una di due situazioni; può essere:

1. collegato solo alla rete LTE;
2. collegato sia alla rete LTE che alla rete IEEE 802.11a.

Per semplicità, la disposizione degli utenti è fissa e resta invariata per tutte le simulazioni, ciò che varia è la loro condizione di connessione. Questa semplificazione permette di evitare l'uso di complicati algoritmi di movimento dei dispositivi all'interno della cella LTE oltre che a semplificare un'analisi che ha come scopo principale quello di fornire una prima soluzione di base al problema della coesistenza di queste due reti, lasciando uno studio più approfondito ad altre sedi.

Il background simulato è quindi quello della Fig. 4.1 dove sono presenti 10 dispositivi (smartphone - UE) disposti in linea a 20 m l'uno dall'altro e il primo si trova ad una distanza di 900 m dalla base station LTE (eNB). I valori delle distanze sono stati scelti per soddisfare i requisiti di popolazione e copertura, cioè avere un modesto numero di UE sia sotto il raggio di copertura dell'AP Wi-Fi, che è al massimo (ottenendo però scarse prestazioni) 150 m, sia in una situazione di prestazioni medie della rete LTE. Se tutti gli utenti si fossero trovati molto vicini alla Base Station, non avrebbe avuto senso integrare una copertura già ottima (LTE) con una coadiuvante (Wi-Fi).

In questo scenario, per motivi di simmetria e di efficiente uso degli spazi, non avere un utente in corrispondenza dell'AP Wi-Fi significa perdere parte del contributo della rete IEEE 802.11a. Per questi motivi, l'utente 6 è stato posto in corrispondenza dell'AP Wi-Fi, mentre gli utenti che si collegano alla rete WLAN sono, via via, quelli che si trovano attorno all' access point e che sono dunque i più vicini. In altre parole, gli utenti che vengono collegati alla rete WLAN sono quelli che permettono di ottenere le migliori prestazioni, ovvero quelli che si trovano nelle vicinanze del punto d'accesso. Per esempio, nella configurazione con cinque utenti collegati alla rete WLAN, questi sono gli utenti 4,5,6,7 e 8; allo stesso modo, con 6 utenti, si hanno 3,4,5,6,7 e 8 oppure 4,5,6,7,8, e 9 (per ragioni di simmetria sono la stessa cosa) e così via.

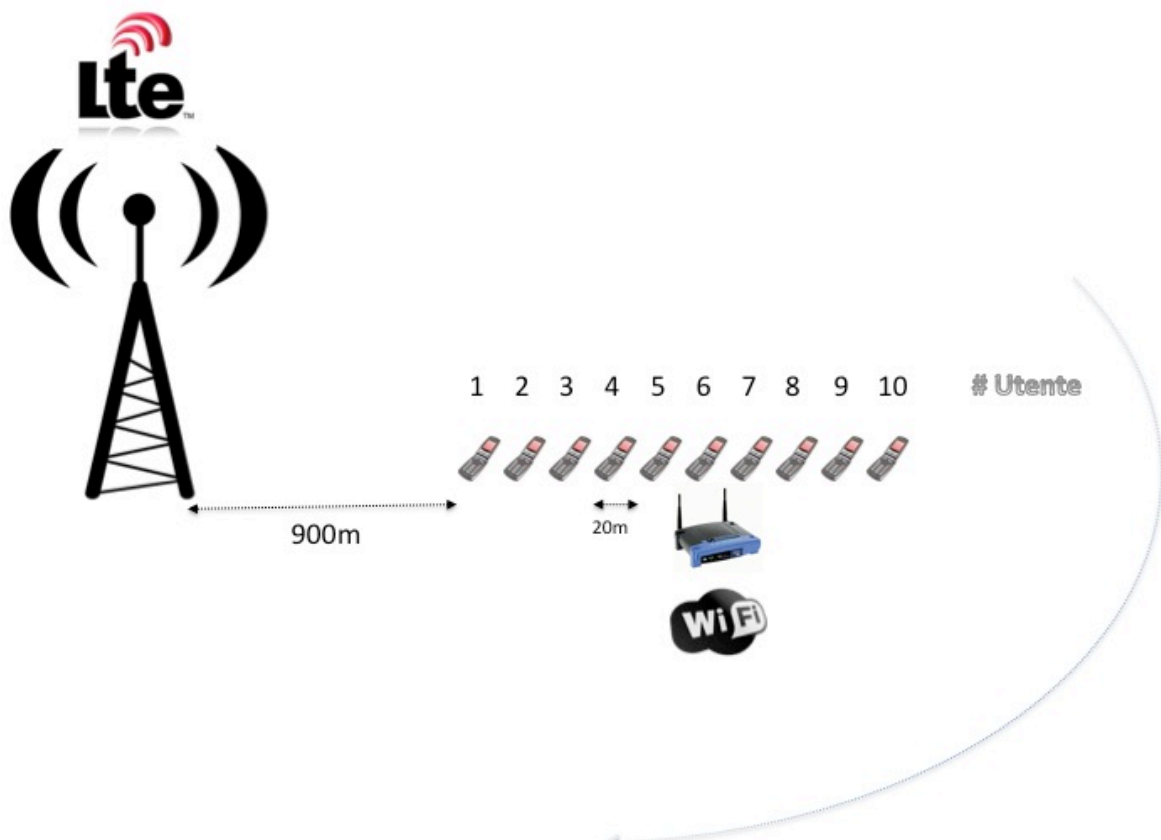


Fig. 4.1 - Scenario della campagna simulativa.

Il calcolo delle quantità d'interesse (throughput) è stato effettuato monitorando il traffico dati installando un'applicazione server ricevente su ognuno dei nodi UE e un'applicazione client installata su un remote-host collegato alla rete ibrida tramite Internet. In altre parole, su ogni smartphone sono state installate due applicazioni (server) che fossero in grado di ricevere dati attraverso le due reti, cellulare e WLAN. I dati ricevuti da tali applicazioni vengono trasmessi da due applicazioni uguali (client), installate su di un dispositivo (remote host) che è collegato sia alla rete WLAN che alla rete LTE/SAE attraverso Internet. Di conseguenza, un utente collegato a entrambe le reti ha la possibilità di ricevere una maggiore quantità di dati sfruttando appunto la presenza di entrambe le applicazioni. Queste possiedono le medesime caratteristiche, generano pacchetti di tipo User Datagram Packet Protocol (UDP) a un data rate di 1 MB/s.

Il collegamento alla rete ibrida è quindi stato fatto come parallelo di due applicazioni client nel remote-Host, una collegata alla rete LTE/SAE e una collegata alla IEEE 802.11a.

La rete LTE invece è stata creata considerando un “bearer” adatto alla trasmissione di contenuti video, associando al flusso IP una propria QoS. Un articolo di riferimento che analizza un parametro complementare alla QoS, la Quality-of-Experience (QoE) e il modo con cui calcolare tale parametro è [22].

Nella tabella sono raccolti i parametri delle simulazioni.

Numero totale utenti	10
Data Rate	1 MB/s
Packet Size	1000 Bytes
Numero massimo di pkts trasmessi	10^6
Durata simulazione	5 s

Tabella 4.1 - Parametri simulazione.

I dati (ottenuti grazie alle tracce in output dal modulo Lena, tracce Rlc [27], e al monitoraggio del traffico Wi-Fi su ogni nodo UE) sono stati in seguito analizzati studiando le statistiche del primo e del second'ordine (media e varianza) e sono stati utilizzati per esprimere risultati attraverso grafici descrittivi.

Le prestazioni di rete saranno valutate considerando una metrica di throughput, definita come il numero di bit ricevuti dai livelli RLC per la rete cellulare e MAC per la WLAN, diviso per la durata della simulazione (5 s).

Nell'analisi del throughput finestrato, la metrica utilizzata è simile, ad eccezione del fatto che sono stati analizzati gruppi di bit in sequenza e rapportati alla relativa finestra temporale mobile della lunghezza di 100 ms.

Capitolo 5

PERFORMANCE EVALUATION

In questo capitolo si analizzano i grafici ottenuti dalle simulazioni per cercare di valutare quale può essere la situazione ottimale per la coesistenza tra le due reti, LTE e Wi-Fi.

THROUGHPUT MEDIO

Il throughput medio preso qui in considerazione rappresenta la media aritmetica dei throughput medi temporali dei singoli utenti di una particolare realizzazione statistica.

La Fig. 5.1 mostra la situazione che si è verificata in una specifica simulazione e ha lo scopo di illustrare la differenza tra i throughput Wi-Fi e LTE. Non si tratta quindi di una media di simulazioni statisticamente indipendenti, ma solamente della condizione in cui gli utenti si sono trovati in base a un solo seme per la generazione dei parametri casuali della rete.

Le simulazioni in seguito effettuate hanno avuto l'obiettivo di valutare in quale condizione la rete ibrida risponde con prestazioni mediamente migliori rispetto ad altre. In altre parole, è stata simulata la trasmissione di pacchetti video ai vari utenti facendo variare il numero di utenti connessi sia alla rete LTE che alla rete IEEE

802.11a. Ad esempio, nella prima simulazione si è calcolato in modo separato sia il throughput LTE che quello Wi-Fi con tutti gli utenti collegati a entrambe le reti.

Nella situazione particolare di tre utenti collegati solamente alla rete LTE e sette che si appoggiano a entrambe le reti, si ottiene un particolare andamento riassunto nel seguente grafico.

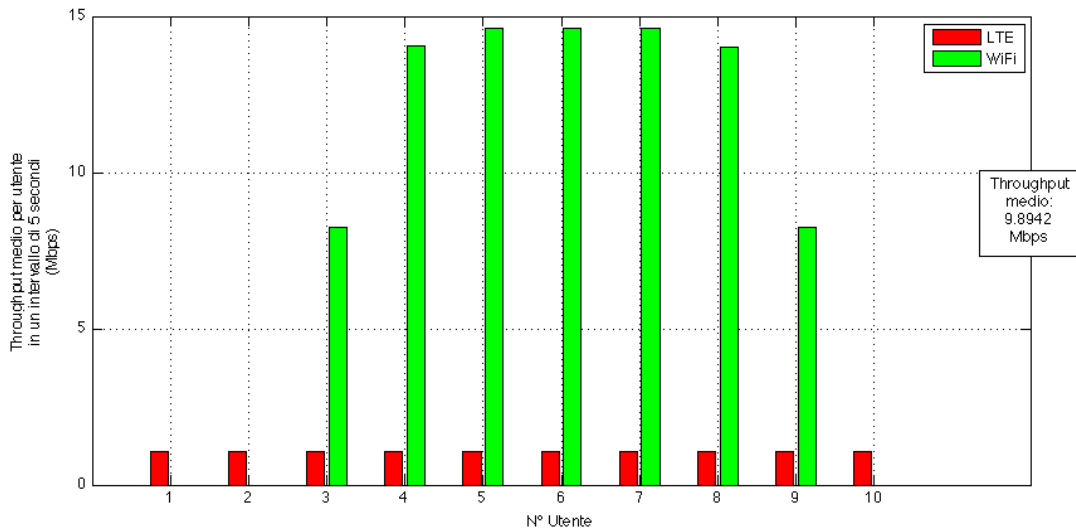


Fig. 5.1 - Throughput medio Wi-Fi e LTE dei singoli utenti.

Appare evidente un netto miglioramento delle prestazioni per gli utenti che ricevono i dati da ambo le reti, mentre gli utenti che sono collegati solamente alla rete cellulare mostrano un livello di throughput pressoché identico tra loro per il fatto che la distanza dalla base station sia praticamente la stessa. La casella a destra nella Fig. 5.2 mostra il throughput medio calcolato come somma totale dei throughput sia Wi-Fi che LTE e diviso per il numero di utenti. Ciò che viene messo in evidenza è il netto contributo che la rete Wi-Fi può fornire in caso di scarsa copertura della rete LTE. Sono però da tenere in considerazione due fatti importanti: il primo è che non tutti gli utenti vengono supportati allo stesso modo, il secondo, che gli utenti che possono ottenere giovamento devono necessariamente trovarsi sotto il raggio di copertura dell'AP. Inoltre, l'analisi proposta in questo elaborato è volta a ottimizzare le prestazioni dal punto di vista del gestore di rete, guardando alle prestazioni medie che possono essere garantite, non volendosi soffermare nella ricerca di un punto operativo ideale per il singolo dispositivo.

Ripetendo la stessa analisi anche per le altre situazioni e considerando questa volta differenti semi casuali, sono state fatte simulazioni indipendenti i cui risultati sono esposti in Fig. 5.2, dove il valore dell'ascissa è il numero di utenti collegati a entrambe le reti.

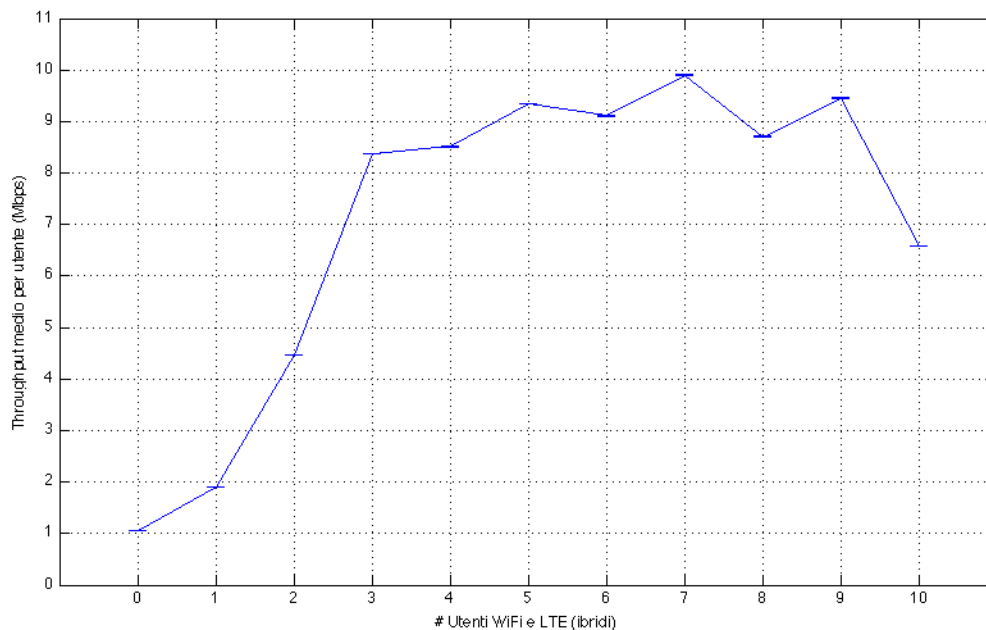


Fig. 5.2 - Throughput medio per utente in funzione del numero di utenti collegati alla rete ibrida LTE e Wi-Fi.

I dati statistici sono frutto di un centinaio di simulazioni in grado di ritrarre al meglio numerose situazioni casuali che la rete può mostrare. Da queste numerose simulazioni, sono stati effettuati calcoli statistici del primo e second'ordine (media e varianza), individuabili nei grafici con delle barrette verticali che delimitano l'intervallo di variazione dei campioni. L'impressione di avere a che fare con linee brevi orizzontali è dovuta al fatto che la varianza dei dati statistici è di molto inferiore al valore dei dati. Tuttavia una situazione più chiara la si può percepire osservando il grafico di Fig. 5.1.

Detto questo, laddove, in base alle necessità della rete, l'operatore ritenga che la copertura di una determinata zona sia insufficiente, l'aggiunta di un dispositivo di

accesso Wi-Fi è in grado di migliorare le prestazioni, permettendo anche all'utente singolo di ottenere giovamento.

Tuttavia, come mostra non banalmente la Fig. 5.2, all'aumentare del numero di dispositivi collegati alla rete Wi-Fi non corrisponde sempre un aumento delle prestazioni medie del sistema. Questo fatto può essere compreso pensando al metodo di accesso al mezzo delle reti IEEE 802.11: CSMA/CA. Più alto è il numero di utenti che provano a usare la risorsa comune e maggiore è la probabilità di avere collisioni con conseguente riduzione della performance. È quindi nell'interesse del gestore della rete gestire le connessioni degli utenti ai due diversi network della rete ibrida raggiungendo quella configurazione che meglio ne sfrutta le caratteristiche. Nello specifico le simulazioni svolte in questo contesto mostrano che potendo collegare al network ibrido un totale di dieci utenti, la scelta migliore sta nel connettere i sette più vicini all'AP a entrambe le reti, e lasciare i tre più lontani supportati dalla sola LTE. Questa scelta ovviamente penalizza i tre esclusi, ma sul piano globale si dimostra azzeccata.

Tenendo come riferimento ancora la Fig. 5.2, appare singolare l'andamento altalenante per i valori intermedi del numero di utenti sulla rete Wi-Fi. Tale fatto può essere spiegato considerando che nella rete Wi-Fi, nove utenti su dieci sono posti in posizione simmetrica rispetto all'AP. Di conseguenza, due dispositivi che si trovano in condizioni di simmetria, ricevono i flussi di dati con le stesse prestazioni². Il network Wi-Fi è quindi in grado di gestire allo stesso modo utenti che sono posti alla stessa distanza dall'AP. Se fossero collegati un numero pari di clienti, mantenendo per semplicità i vincoli di posizione descritti nella Fig. 4.1, uno di essi risulterà disaccoppiato rispetto al suo simmetrico (che non c'è) e quindi andrebbe persa l'opportunità di soddisfare allo stesso modo anche un altro utente. Da ciò si evince quindi che per utilizzare al meglio il contributo della rete Wi-Fi è opportuno tenere collegati un numero dispari di utenti, in particolare nel caso in questione, sette dispositivi su dieci.

² Affermazione supportata dai risultati delle simulazioni.

THROUGHPUT FINESTRATO

Un altro dato di rilievo analizzato in questo lavoro è l'andamento temporale del throughput di alcuni utenti della rete. La situazione migliore in termini di throughput si osserva, dalla Fig. 5.2, essere la campagna simulativa di ascissa 7 in cui solo sette utenti hanno la possibilità di trasmettere sia sulla rete LTE che sulla Wi-Fi, mentre i restanti tre hanno disponibilità solo per quanto riguarda la LTE. Dai risultati delle simulazioni appare infatti chiaro che il throughput medio per utente con il maggiore valore si ottiene proprio con questa configurazione.

Sono stati considerati gli utenti in situazioni limite, ossia l'utente 9 che è il più distante dall'AP (nella configurazione 7), l'utente 6 che si trova in corrispondenza dell'AP e l'utente 4 che invece si trova a una distanza intermedia rispetto agli altri due. Se ne deduce che l'utente 5, ad esempio, avrà un andamento un po' migliore dell'utente 4 e peggiore di poco all'utente 6.

Il grafico in Fig. 5.3 esprime questi andamenti a transitorio esaurito, cioè una volta che la rete si trova a lavorare a regime.

È inoltre da sottolineare che, mentre il throughput Wi-Fi nelle simulazioni indipendenti assume valori in un certo intervallo di variabilità, quello LTE invece non evidenzia oscillazioni percettibili, ma garantisce sempre lo stesso valore con un'ottima affidabilità.

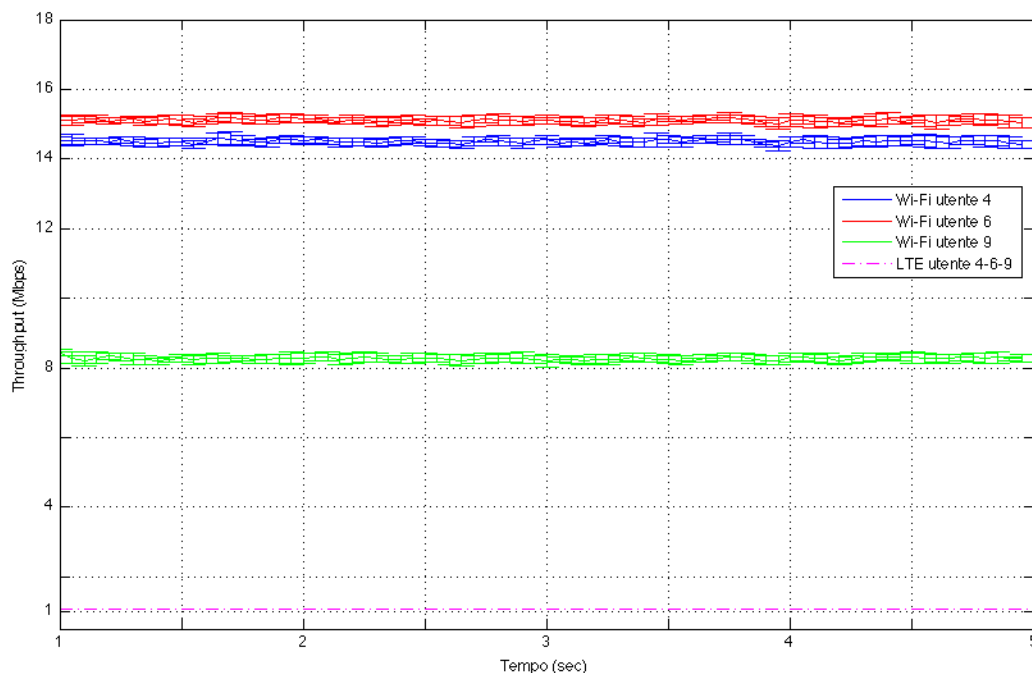


Fig. 5.3 - Andamento temporale del throughput Wi-Fi.

Il grafico in Fig. 5.3 considera la variazione del throughput nel tempo per gli utenti 4, 6 e 9. Rileva, inoltre, la situazione a transitorio esaurito ed esprime facilmente i vari livelli di prestazioni forniti dalle due reti. In base alla distanza a cui sono posti gli utenti dalla eNB e alla particolare disposizione, il contributo maggiore viene dato dalla rete WLAN, nettamente superiore alla copertura della rete LTE. Nonostante ciò, l'apporto in termini di throughput varia da utente a utente a seconda della lontananza dall'AP, com'è ragionevole che sia.

Vale la pena, infine, notare come il segnale LTE appaia molto più preciso del segnale Wi-Fi, a dimostrazione dell'elevata affidabilità che la nuova tecnologia si propone di fornire.

CONFRONTO THROUGHPUT APPLICAZIONI CON DIVERSO PACKET RATE

Un aspetto interessante apparso dai risultati delle simulazioni mostra la variazione del throughput medio per utente in base alla variazione del packet rate³ dell'applicazione installata sui client. Sono stati simulati gli stessi scenari per diversi valori del tempo inter-pacchetto: 1 ms, 2 ms, 5 ms e 10 ms. Anche in questo caso l'attenzione si è focalizzata sul rapporto tra utenti connessi alla rete ibrida e utenti collegati alla sola LTE. I parametri delle simulazioni sono riassunti nella Tabella 5.1:

Numero di utenti	10
Data rate	100-200-500-1000 KB/s
Packet Size	1000 Bytes
Numero massimo di pkts trasmessi	10 ⁶
Durata simulazione	5 s

Tabella 5.1 - Parametri simulazione.

I dati raccolti, sono riassunti nel grafico in Fig. 5.4, da interpretare in maniera analoga alla Fig. 5.2.

³ Di conseguenza, variazione anche del data rate.

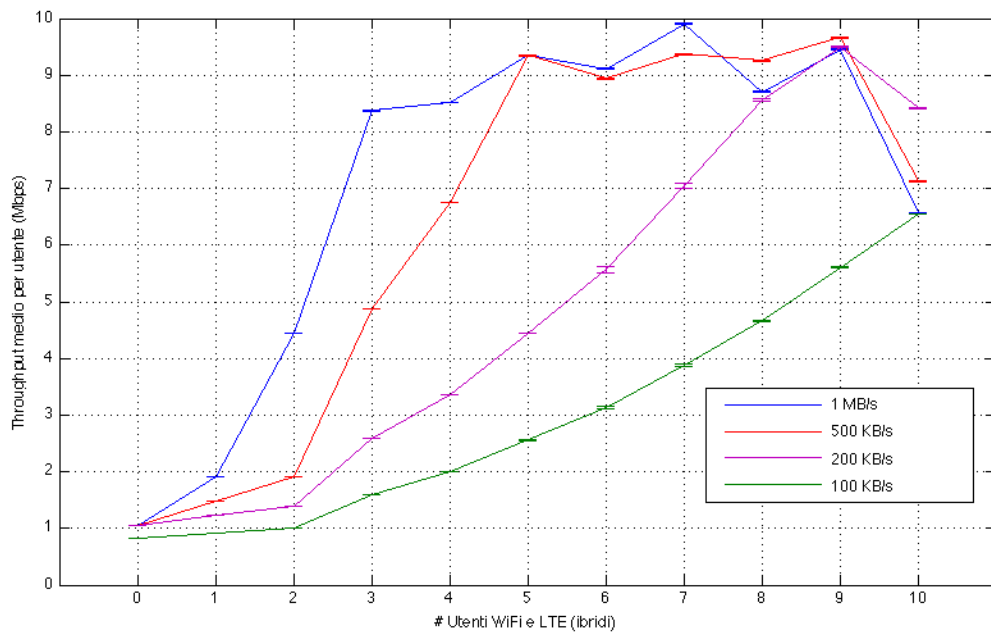


Fig. 5.4 - Confronto andamento dei throughput medi per utente in base alla velocità di generazione del traffico dati dell'applicazione.

Non dimenticando l'obiettivo di questo lavoro, che è quello di spiegare in quale situazione la rete ibrida si esprime al meglio, è necessario valutare l'influenza che può avere sulle prestazioni, quindi, anche l'applicazione per la trasmissione dei contenuti. Dal grafico di Fig. 5.4 appare evidente la differenza tra le curve che rappresentano l'andamento del throughput in funzione del numero di utenti nella rete ibrida. Sebbene di primo impatto risalti la differenza nella forma, tuttavia nella parte iniziale, le curve mostrano tutte lo stesso andamento monotono crescente. Da un certo punto in poi, però, le curve relative a data rate più elevati assumono carattere irregolare mentre le altre continuano a mantenere la stessa caratteristica di crescente monotonia. Una spiegazione a questo particolare evento sta nel considerare ancora una volta la difficoltà della rete WLAN nella gestione dei flussi dati ai vari utenti; aumentando il traffico offerto, infatti, l'applicazione impone alla rete di cercare di aumentare la velocità di trasmissione con conseguente aumento delle collisioni. Trasmettendo a velocità basse, la rete ha infatti la possibilità di operare meglio per evitare errori, cosa che diventa più complicata nel caso in cui il tempo tra due pacchetti diventi più breve. D'altra parte, mantenere una modesta velocità di generazione dei pacchetti può portare svantaggi, quali lo sfruttamento poco efficiente

di una rete che potrebbe invece sostenere un traffico più elevato, ma anche un minore throughput e, come conseguenza, maggiore lentezza ad esempio nelle applicazioni real-time. Secondo i risultati ottenuti, tuttavia, non sempre aumentare il traffico offerto significa aumento delle prestazioni del sistema. Prendendo in considerazione le curve blu e rossa, paradossalmente, utilizzare un'applicazione con velocità di generazione del traffico dati pari a 500 KB/s e mantenendo collegati nove utenti su dieci alla rete ibrida, produce un miglioramento di circa il 2% in termini di throughput rispetto alla stessa situazione, ma con rate trasmissivo doppio. Aumentare quindi la velocità di generazione dei pacchetti non comporta sempre un corrispondente miglioramento delle prestazioni, ma è da valutare con attenzione la situazione che, di volta in volta, si delinea.

Capitolo 6

CONCLUSIONI

Le analisi svolte in questo lavoro hanno valutato configurazioni efficienti per le prestazioni di una rete WLAN/LTE. Si è compreso che la rete ibrida consente alla rete LTE di ottenere un netto incremento delle performance se affiancata da una rete WLAN, ma impiegare un AP in una zona ben coperta dalla rete cellulare non sarebbe utile al fine di garantire ovunque un livello minimo di prestazioni. Per questo motivo, considerato il modesto numero di utenti presenti nella rete⁴, è opportuno piazzare l'AP Wi-Fi ad una distanza dalla base station LTE tale per cui la rete cellulare perde la capacità di soddisfare al meglio i requisiti di qualità richiesti dallo standard. Tuttavia, la tecnologia 4G prevede il possibile utilizzo di reti ibride co-site che, in altre circostanze, possono rivelarsi anch'esse efficaci in termini di prestazioni.

In questo scenario, dai risultati delle simulazioni si può concludere che in base alle necessità dell'applicazione di trasmettere a una data velocità, la situazione migliore va ricercata nel giusto compromesso tra la velocità dell'applicazione che genera i contenuti e la numerosità della popolazione presente nella cella. Talvolta può succedere che in base al numero di utenti che si collegano alla rete ibrida, sia

⁴ Un elevato numero di utenti implicherebbe un maggiore calo di prestazioni e quindi anche la soluzione co-site può rappresentare una valida alternativa.

necessario diminuire la velocità di generazione dei pacchetti per ottenere un complessivo miglioramento del throughput medio della rete.

Da quanto detto fin qui, si ritiene che l'implementazione di sistemi di assegnamento risorse in grado di gestire dinamicamente e in tempo reale le connessioni dei vari utenti, valutando in contemporanea le caratteristiche effettive della rete, possa essere un valido strumento per migliorare l'efficienza della rete. Le analisi qui svolte potrebbero essere prese in considerazione come un possibile criterio di studio per il funzionamento di questi sistemi di controllo e gestione.

Capitolo 7

BIBLIOGRAFIA

- [1] Wi-Fi Alliance, "Wi-Fi Alliance." [Online]. Available: <http://www.wi-fi.org>.
- [2] 3GPP, "LTE." [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/LTE>.
- [3] Motorola, "Long Term Evolution (LTE): A Technical Overview." 07-Mar-2010.
- [4] Massimo Celidonio and Lorenzo Pulcini, "Il sistema 3GPP LTE: Aspetti di carattere generale e le tecniche di trasmissione." .
- [5] Elena Guzzon, "Long Term Evolution." .
- [6] 3GPP TS 36.101, "E-UTRA User Equipment (UE) radio transmission and reception (version 10.7.0 Release 10)." Jul-2012.
- [7] 3GPP TS 36.104, "E-UTRA Base Station (BS) radio transmission and reception (version 10.7.0 Release 10)." Jul-2012.
- [8] Alcatel-Lucent, "The LTE Network Architecture." .
- [9] C. Gessner, A. Roessler, and M. Kottkamp, "UMTS Long Term Evolution (LTE) - Technology Introduction." Jul-2012.
- [10] Ernestina Cianca and Franco Mazzenga, "OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access)." .
- [11] Roberto Garello, Politecnico di Torino, "Caratteristiche tecniche dei sistemi wireless per reti radio digitali:OFDMA e MIMO nei sistemi a grande capacità di prossima generazione." .
- [12] David J. Goodman, Junsung Lim, Hyung G. Myung, and Polytechnic University, "Single Carrier FDMA for Uplink Wireless Transmission," *IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY MAGAZINE*, Sep. 2006.
- [13] Moray Rumney, Agilent Technologies, "3GPP LTE: Introducing Single-Carrier FDMA." 01-Jan-2008.
- [14] Filippo Giannetti, "LO STANDARD IEEE 802.11a." [Online]. Available: <http://www.iet.unipi.it/f.giannetti/documenti/wlan/Data/802.11/set811.htm>.
- [15] IEEE-SA Standards Board, "IEEE Std 802.11a-1999(R2003)." 06-Dec-2003.
- [16] Luca Reggiani, "Modulazione su più portanti OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex)." .
- [17] N. Benvenuto and M. Zorzi, *Principles of Communications Networks and Systems*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [18] Ken H. Craig, Nicholas J. Thomas, and Mike J. Willis, "Analysis of Co-existence between IEEE 802.11 and IEEE 802.16 Systems," presented at the Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2006. SECON '06. 2006 3rd Annual IEEE Communications Society on, Rutherford Appleton Lab., Chilton, 2006, vol. 2, pp. 615–620.
- [19] Y. H. Choi, H. Hwang, J. Kim, S. Park, and S. Rhee, "Energy Efficient Coexistence

of WiFi and WiMAX Systems Sharing Frequency Band,” in *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 6485, pp. 164–170.

[20] Pierre Coucheny, Bruno Gaujal, and Corinne Touati, “Different Dynamics for Optimal Association in Heterogeneous Wireless Networks,” *WiOptIEEE*, pp. 1–3, 2009.

[21] Rongrong Shang and Xinglin Wang, “Analysis and Test for Co-site of LTE and WiFi System,” presented at the IEEE International RF and Microwave Conference, Seremban, Malaysia, 2011, pp. 315–319.

[22] Leonardo Badia, Telemaco Melia, Daniele Munaretto, and Michele Zorzi, “Online QoE Computation for Efficient Video Delivery over Cellular Networks,” *IEEE COMSOC MMTC E-Letter*, vol. 6, no. 1, Mar. 2011.

[23] Qualcomm Incorporated, “A 3G/LTE Wi-Fi Offload Framework: Connectivity Engine (CnE) to Manage Inter-System Radio Connections and Applications.” Jun-2011.

[24] Leonardo Badia, Simone Merlin, and Michele Zorzi, “Resource Management in IEEE 802.11 Multiple Access Networks with Price-based Service Provisioning,” *IEEE Transactions on wireless communications*, vol. 7, no. 11, Nov. 2008.

[25] Leonardo Badia, Marco Miozzo, Michele Rossi, and Michele Zorzi, “Routing Schemes in Heterogeneous Wireless Networks Based on Access Advertisement and Backward Utilities for QoS Support,” *IEEE Communications Magazine*, pp. 67–73, Feb. 2007.

[26] “ns-3.” [Online]. Available: <http://www.nsnam.org>.

[27] CTTC, “Lena-Manual.” [Online]. Available: <http://lena.cttc.es/maual/>.

[28] *ns-3 Manual*. 2011.

[29] Bong Youl Cho, Nokia Siemens Networks, “LTE MAC/RLC/PDCP/RRC.” 27-May-2011.

[30] 3GPP TS 36.323, “E-UTRA Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification (version 10.1.0 Release 10).” Mar-2011.

[31] EventHelix, “3GPP LTE Packet Data Convergence Protocol (PDCP) Sub Layer.” 2009.

[32] 3GPP TS 36.322, “E-UTRA Radio Link Control (RLC) protocol specification (version 10.0.0 Release 10).” Jan-2011.

[33] EventHelix, “3GPP LTE Radio Link Control (RLC) Sub Layer.” 2009.

[34] FemtoForum, “LTE MAC Scheduler Interface Specification v1.11.” Oct-2010.