

VALUTAZIONE DELLE TECNICHE DI ACCESSO AL  
MEZZO NELLE RETI CELLULARI DI NUOVA  
GENERAZIONE

RELATORE: Leonardo Badia

CORRELATORE: Daniele Munaretto

LAUREANDO: Michele Luvisotto

A.A. 2011-2012





UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE  
TESI DI LAUREA

VALUTAZIONE DELLE TECNICHE  
DI ACCESSO AL MEZZO NELLE  
RETI CELLULARI DI NUOVA  
GENERAZIONE

RELATORE: Leonardo Badia

CORRELATORE: Daniele Munaretto

LAUREANDO: *Michele Luvisotto*

Padova, 24 luglio 2012



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Panoramica di una rete LTE</b>	<b>5</b>
2.1	Introduzione . . . . .	5
2.2	Architettura LTE . . . . .	6
2.3	Stack protocollare E-UTRAN . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Broadcasting e tecniche di Modulazione e Codifica</b>	<b>11</b>
3.1	Video broadcasting in LTE . . . . .	11
3.2	Modulazione e codifica in LTE . . . . .	11
3.3	Impatto dell'MCS sulle prestazioni di un sistema LTE . . . . .	13
3.4	Articoli correlati . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Risultati delle simulazioni</b>	<b>17</b>
4.1	Scenario di base . . . . .	17
4.2	Valutazione delle prestazioni . . . . .	20
4.3	Risultati . . . . .	22
4.4	Conclusioni . . . . .	25
<b>A</b>	<b>Codice e comandi eseguiti</b>	<b>27</b>
A.1	Il codice . . . . .	27
A.2	I comandi da terminale . . . . .	28
	<b>Bibliografia</b>	<b>31</b>



# Capitolo 1

## Introduzione

Il 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project (3GPP) è un accordo di collaborazione fra enti che si occupano di standardizzare sistemi di telecomunicazione [1]. Nel novembre 2004 ha lanciato un progetto per definire l'evoluzione a lungo termine dello standard Universal Mobile Telecommunication System (UMTS), lo standard di base della terza generazione di reti cellulari. Questo progetto ha preso il nome di Long Term Evolution (LTE), che in inglese indica “evoluzione di lungo periodo”, con riferimento appunto all'evoluzione dello standard UMTS.

LTE si inserisce in uno scenario in cui il traffico dati su dispositivi mobili è in forte espansione, come riportato in Fig. 1.1. Si prevede che uno dei principali servizi offerti dalle reti di nuova generazione sarà lo streaming video. Consumare un video in streaming non significa più solo guardarlo, ma anche condividerlo su piattaforme apposite (ad es. Youtube) o social network. In base alle previsioni di mercato, è probabile che il video dominerà il traffico su dispositivi mobili nei prossimi anni, poiché il suo contenuto ha bit rates molto più alte di qualsiasi altro contenuto scambiabile su dispositivi mobili. Si prevede che il traffico video crescerà con una Compound Annual Growth Rate (CAGR), cioè un tasso di crescita annuale composto, del 90% tra il 2011 e il 2016, la più alta tra le applicazioni mobili. Dei 10.8 Exabytes (EB) al mese che si prevede verranno scambiati su reti mobili nel 2016, 7.6 saranno dovuti al traffico video (Fig. 1.2). In [6] si può trovare una panoramica sulle previsioni relative al traffico dati sui dispositivi mobili per il quinquennio 2011-2016, da cui sono tratti i dati di questo paragrafo.

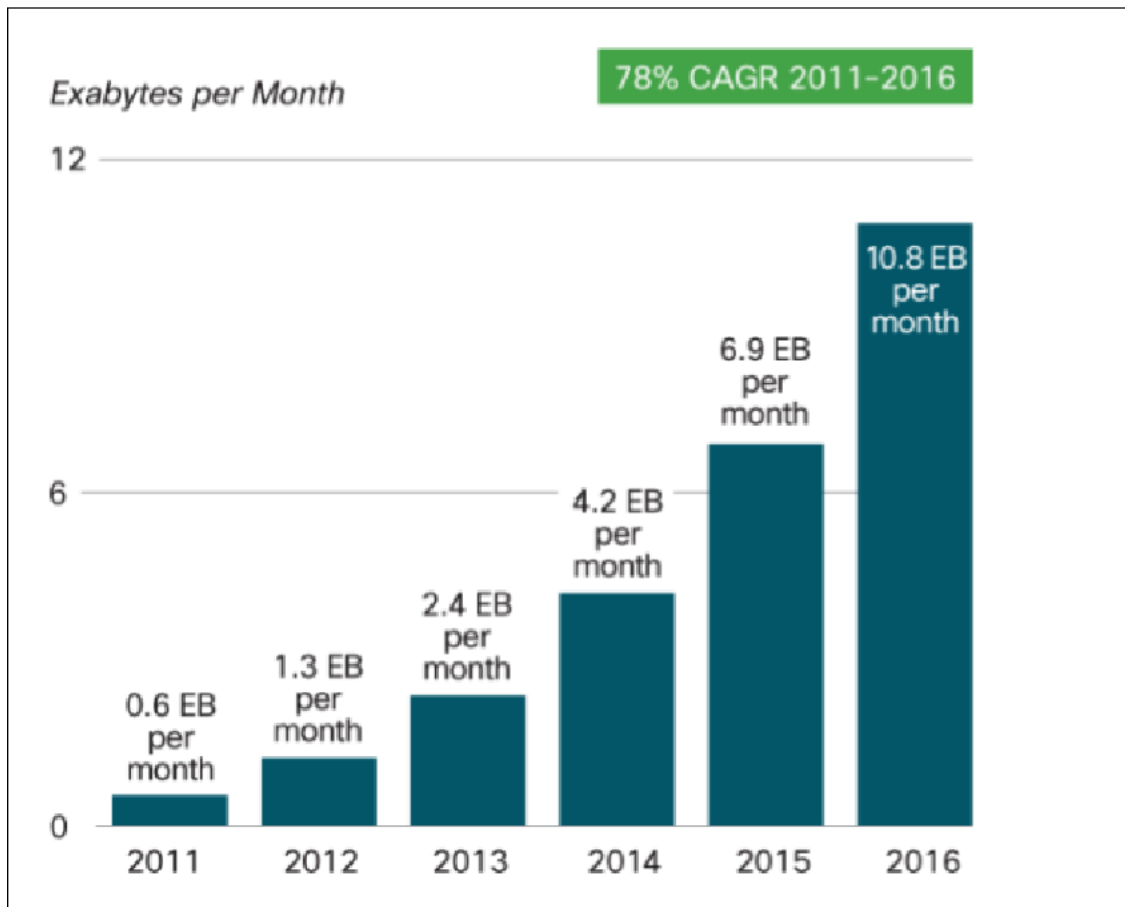


Figura 1.1: Previsione sull'evoluzione del traffico dati su dispositivi mobili dal 2011 al 2016, misurato in Exabytes al mese. Tratto da [6].

Il modello di streaming video implementato in questa tesi è di tipo broadcast (una singola sorgente di informazione trasmette a diversi destinatari). Quando si trasmette in modalità broadcast ad utenti eterogenei per posizione e qualità di ricezione del segnale, assume una grande importanza la modulazione con cui vengono trasmessi i pacchetti [5]. Questa tesi si propone di simulare una rete LTE a singola cella, analizzando le prestazioni del servizio offerto tramite le metriche tradizionali (delay e throughput) ed il numero di utenti serviti, al variare della modulazione adottata.



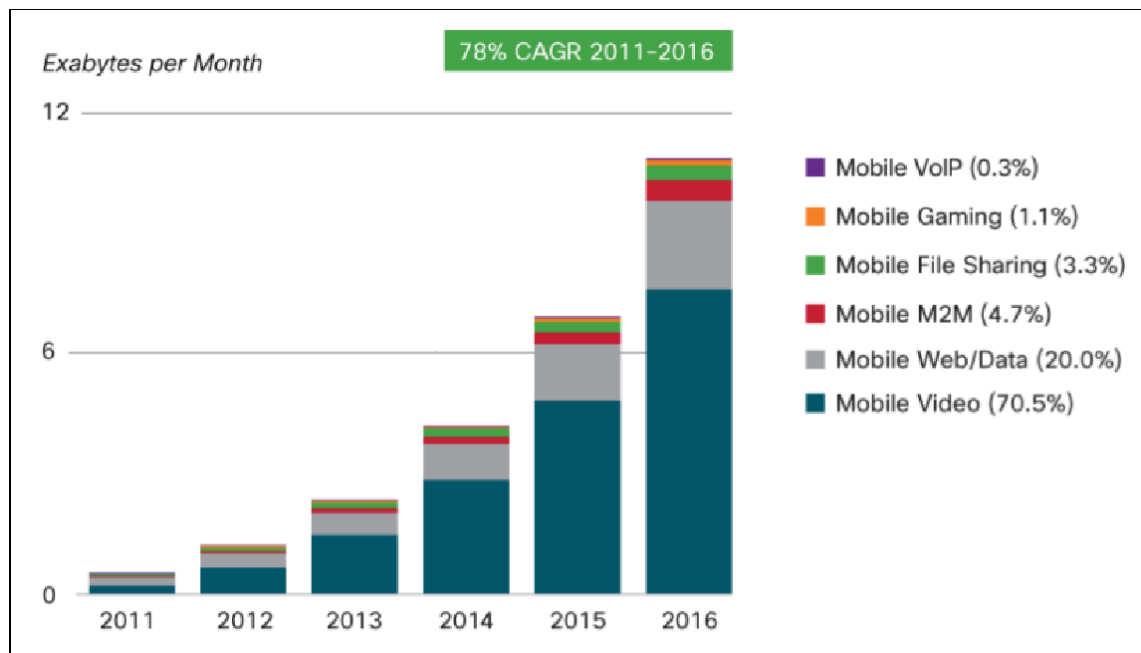


Figura 1.2: Previsioni sulla diversificazione del traffico dati su dispositivi mobili dal 2011 al 2016. Tratto da [6].

Come simulatore di rete è stato scelto ns-3 (network simulator 3), un simulatore di rete a tempi discreti molto usato in ambito di ricerca [19]. ns-3 è un framework libero protetto da licenza GNU GPLv2, in cui il core e i vari modelli aggiunti sono scritti in C++. Poiché la simulazione è incentrata principalmente sulla tecnologia LTE, è stato aggiunto al core ns-3 il modulo LENA, sviluppato al Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC), in collaborazione con Ubiquisys [20].

Il resto di questa tesi è organizzato come segue. Nel capitolo 2 sono esposti l'architettura LTE e il suo stack protocollare. Il capitolo 3 contiene informazioni sul video broadcasting in LTE e le tecniche di modulazione e codifica, con una sezione dedicata agli articoli correlati a questi temi. Nel capitolo 4 vengono presentate le simulazioni effettuate in ns-3 e i loro risultati.

## 1. INTRODUZIONE

---

# Capitolo 2

## Panoramica di una rete LTE

### 2.1 Introduzione

Il cammino verso l'introduzione delle reti LTE è cominciato nel 2004 con la definizione degli obiettivi a cui si puntava con il nuovo standard. Sono occorsi più di 5 anni per traslarli in applicazioni commerciali. Le prestazioni da raggiungere sono state stabilite basandosi sulla Release 6 di 3GPP in cui è trattata la tecnologia High Speed Packet Access (HSPA), cioè la versione più avanzata di UMTS [3]. Le principali sono:

- 100 Mbps di rate di picco in downlink, 50 Mbps di rate di picco in uplink
- Efficienza spettrale da 2 a 4 volte superiore a quella definita nella Release 6 riguardo a HSPA
- Raggiungimento di round trip time inferiori a 10 ms
- Ottimizzazione della modalità packet-switched
- Elevati livelli di mobilità (fino a 350 km/h) e sicurezza
- Ottimizzazione del consumo di potenza al terminale
- Flessibilità nell'allocazione delle frequenze, da 1.5 MHz fino a 20 MHz

Una prima versione dello standard LTE si trova nella Release 8 di 3GPP [4].

I paragrafi che seguono descrivono in breve l'architettura di un sistema LTE. Per una trattazione completa ed esaustiva della tecnologia LTE fino alla Release 8 si rimanda a [13].

### 2.2 Architettura LTE

Lo sviluppo della tecnologia LTE è proceduto in due direzioni: evoluzione dell'interfaccia radio, che porta alla realizzazione di Evolved Umts Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), ed evoluzione di tutti gli aspetti “non radio”, che prende il nome di System Architecture Evolution (SAE). L'intero sistema, composto da E-UTRAN e SAE, prende il nome di Evolved Packet System (EPS).

La rete LTE è divisa in access network, che abilita gli utenti finali a connettersi alla rete, e core network, che distribuisce i pacchetti da un utente all'altro.

La core network viene chiamata Evolved Packet Core (EPC). I nodi principali di questa rete sono:

- Packet Data Network Gateway (P-GW): gestisce la comunicazione fra EPS e Packet Data Networks (PDN) esterne
- Serving Gateway (S-GW): smista e inoltra pacchetti agli utenti e gestisce la mobilità tra LTE e altre tecnologie 3GPP
- Mobile Management Entity (MME): principale entità di controllo della core network, non è coinvolta nel traffico dei dati utente (user plane)

La access network è costituita dalla E-UTRAN, che comprende un solo nodo, la E-UTRAN Node B (eNB), generalmente definita Base Station (BS). Si tratta di un'antenna ricetrasmittente che serve i terminali mobili di utente, mettendoli in comunicazione con la core network. Le eNB sono fisse e coprono una certa area geografica, detta cella radio, servendo tutti gli utenti che si trovano in tale spazio. Compito principale della eNB è assicurare l'instaurazione di un bearer, cioè di un flusso di pacchetti IP, caratterizzati da una specifica Quality of Service (QoS), tra il gateway e l'utente finale.

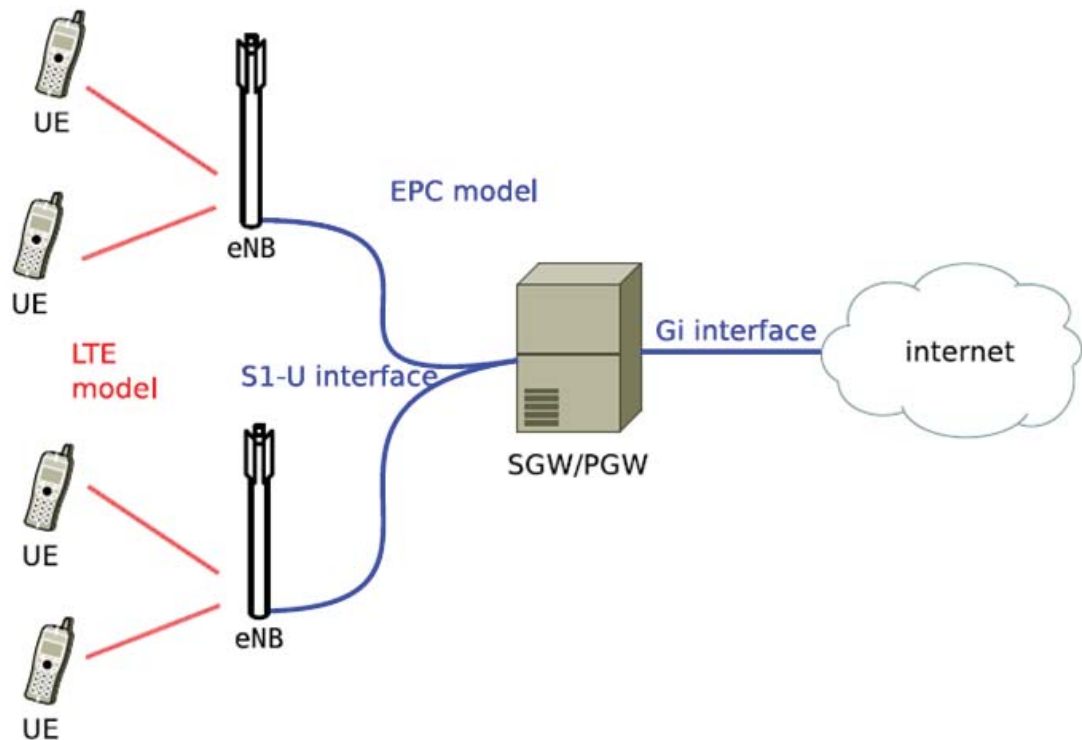


Figura 2.1: Architettura di un sistema LTE, tratta da [7].

L'utente finale si indica con il nome User Equipment (UE) ed interagisce solo con la eNB.

## 2.3 Stack protocollare E-UTRAN

Le varie componenti del sistema LTE sono organizzate secondo uno stack protocollare, contenente una serie di strati disposti in maniera gerarchica, dal livello più alto (quello applicativo) a quello più basso (quello fisico).

Come si può notare dalla figura 2.2, lo stack protocollare della rete di accesso (E-UTRAN) comprende, oltre agli strati più vicini all'utente, cinque strati caratteristici, che, dall'alto verso il basso, sono:

- Radio Resource Control (RRC): gestisce l'uso delle risorse radio da parte degli utenti, controllando sia il traffico dati (user plane) che le segnalazioni (control plane) ed assegna i dati provenienti dagli strati superiori ai radio bearers appropriati.

## 2. PANORAMICA DI UNA RETE LTE

---

- Packet Data Convergence Protocol (PDCP): relativamente allo user plane esegue la compressione dell'header IP tramite la codifica Robust Header Compression (ROHC), mentre si occupa della crittografia e della protezione d'integrità per i dati trasmessi nel control plane.
- Radio Link Control (RLC): segmenta e concatena i Packet Data Unit (PDU) provenienti dal PDCP per consentirne la trasmissione nell'interfaccia radio, riordina le sequenze di pacchetti prima di inoltrarle ai livelli superiori ed esegue la correzione d'errore tramite Automatic Retransmission Request (ARQ).
- Medium Access Control (MAC): programma la trasmissione dei dati in base alle diverse priorità, distribuisce i PDU arrivati dal RLC nei Transport Block (TB) del livello sottostante, esegue la correzione d'errore tramite Hybrid ARQ (HARQ).
- Physical Layer (PHY): si occupa delle funzioni tipiche del livello fisico, come codifica/decodifica di canale e modulazione/demodulazione.

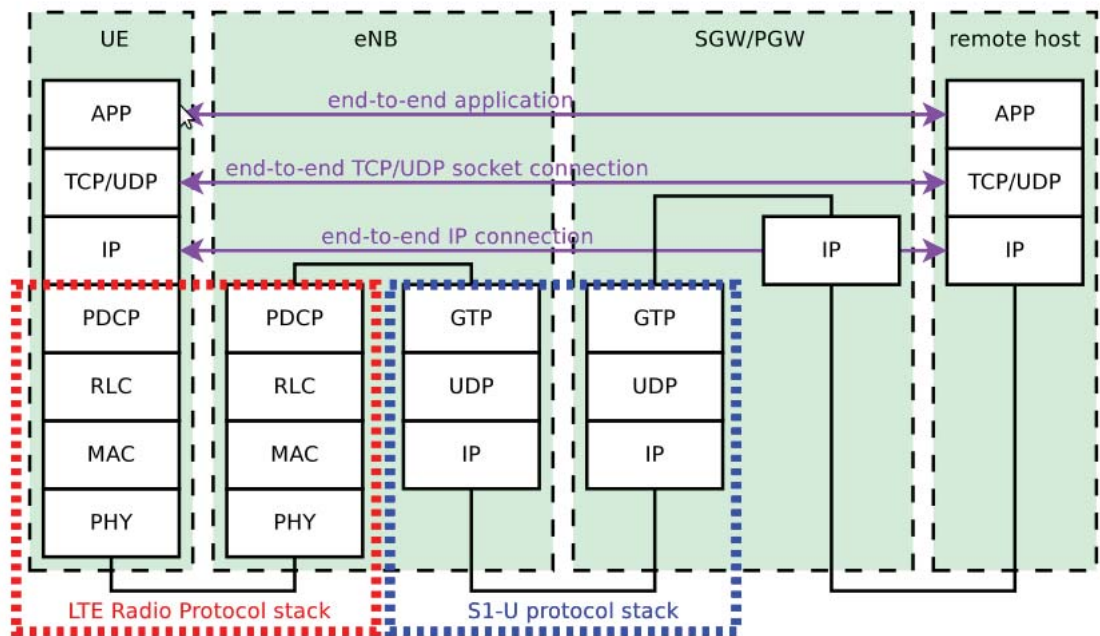


Figura 2.2: Stack LTE User plane, tratta da [7]. Non è presente RRC perchè non è implementato in LENA.

## 2. PANORAMICA DI UNA RETE LTE

---



## Capitolo 3

# Broadcasting e tecniche di Modulazione e Codifica

### 3.1 Video broadcasting in LTE

Lo streaming video in modalità broadcast è considerata una delle più importanti applicazioni della prossima generazione di reti cellulari. L'ampia larghezza di banda e la bassa latenza promesse dalla tecnologia LTE si prestano molto bene a questo tipo di traffico, di intensità e dimensioni molto elevate. In questa tesi si considera il traffico video come un flusso di dati molto grande.

### 3.2 Modulazione e codifica in LTE

Quando si trasmette in modalità broadcast, occorre tener conto che ciascun utente sarà caratterizzato da una particolare posizione rispetto alla BS e qualità del segnale. Queste caratteristiche vengono riassunte dalla metrica Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR) e, basandosi sulla SINR, a ciascun utente viene assegnato un indice che testimonia la qualità del canale di comunicazione tra quell'utente e la BS, il Channel Quality Indicator (CQI).

In LTE il livello MAC consente di programmare la distribuzione dei pacchetti ai vari utenti in base alle esigenze, usando uno strumento detto MAC Scheduler, che garantisce estrema flessibilità nella distribuzione delle informazioni ai vari

utenti.

La modulazione nella trasmissione in downlink è realizzata in LTE con il metodo Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), in cui il dominio della frequenza è diviso in più bande e la trasmissione dei simboli avviene contemporaneamente in bande diverse tramite degli schemi di modulazione tradizionali. In LTE le modulazioni usate sono 3: QPSK, 16-QAM e 64-QAM. Per una trattazione specifica sull'OFDM si veda [13], mentre per informazioni sulle modulazioni tradizionali si consulti [5]. A ciascuna di queste tre modulazioni può essere associata una specifica codifica di canale, identificata tramite la sua code rate. L'unione di modulazione e codifica viene chiamato Modulation and Coding Scheme (MCS). In una BS LTE sono disponibili numerosi MCS.

La flessibilità offerta dalla presenza di diversi MCS e dalla possibilità di usare il MAC Scheduler ha portato alla realizzazione di una tecnica che consente di massimizzare le prestazioni del sistema di comunicazione tenendo conto delle CQI dei vari utenti connessi al sistema. Questa tecnica è nota come Adaptive Modulation and Coding (AMC).

L'idea alla base di AMC è semplice: si sfruttano le variazioni del canale wireless nel tempo, spazio e frequenza adattando dinamicamente i parametri di trasmissione, cioè l'MCS in uso, alle condizioni del canale tra la BS e gli utenti. Ciascun MCS ha una specifica data rate e livello di robustezza (SINR minimo), che lo rendono ottimo per l'uso in una certa configurazione di condizioni ambientali: se le condizioni di canale sono pessime si usano MCS che garantiscono un'elevata robustezza, se sono buone si usano MCS che consentono di aumentare il throughput [8].

La suite LENA prevede un modulo AMC il cui funzionamento rispecchia molto da vicino quanto appena accennato [7]. La BS calcola, per ogni UE, la sua efficienza spettrale partendo dalla sua SINR, misurata con il primo pacchetto spedito. Viene poi consultata una tabella che, in base all'efficienza spettrale, restituisce il CQI corrispondente e viene scelto l'MCS più adatto.

### 3.3 Impatto dell'MCS sulle prestazioni di un sistema LTE

In questa tesi si vuole verificare come la scelta di un MCS piuttosto che un altro influenzi le prestazioni di un sistema di comunicazione. In particolare vengono considerate le metriche classiche, vale a dire throughput (in bit/s e normalizzato) e ritardo, alle quali viene aggiunto anche il numero di utenti serviti sugli utenti totali. Consideriamo, infatti, che scegliendo MCS molto performanti, capaci di garantire alti valori di throughput e bassi ritardi, diminuisce la robustezza degli stessi, perciò gli utenti con le condizioni di canale peggiori saranno esclusi dalla comunicazione. Ciascun sistema deve, pertanto, realizzare un compromesso tra il raggiungimento di prestazioni elevate e la garanzia di una copertura adeguata.

Gli MCS considerati sono quelli usati dalla tecnologia LTE, che si possono trovare nella Tabella 3.1 <sup>1</sup>. Come si può notare vi sono 15 particolari CQI che fanno riferimento a delle specifiche efficienze spettrali, alle quali si associano gli MCS. In particolare, oltre alle efficienze spettrali presenti in tabella, si considerano anche quegli MCS corrispondenti all'efficienza spettrale media tra due voci della tabella consecutive (ad es. l'MCS 2 corrisponde all'efficienza spettrale 0.1933, media di 0.1523 e 0.2344). Si rimanda a [2] per uno schema più dettagliato e una panoramica del procedimento con cui il modulo AMC sceglie le dimensioni dei pacchetti in base al CQI.

### 3.4 Articoli correlati

Alla trasmissione di video in modalità broadcast su reti wireless sono dedicati numerosi articoli. Alcuni di essi considerano la codifica video standard H.264/AVC. Ad esempio, in [11] troviamo un'analisi delle prestazioni di questa codifica in sistemi broadcast, con particolare attenzione alla potenza di calcolo dei dispositivi mobili, ai vincoli di ritardo imposti dalle applicazioni e alle condizioni di ricezione degli utenti, variabili nel tempo e nello spazio. La maggior parte di

---

<sup>1</sup>In ns-3 la numerazione degli MCS è leggermente diversa rispetto alla tabella: il primo indice di MCS disponibile è 0 e l'ultimo è 28. Per ottenere gli indici degli MCS in ns-3 da questa tabella basta quindi sottrarre 1 all'indice presente in tabella. Si noterà nel capitolo successivo che, nei grafici, gli MCS variano da 0 a 28.

### 3. BROADCASTING E TECNICHE DI MODULAZIONE E CODIFICA

---

Tabella 3.1: Tabella degli MCS disponibili, tratta da [2]

Indice CQI	Efficienza spettrale	MCS	Modulazione	Code rate x 1024
0	fuori portata			
1	0.1523	1	QPSK	78
2	0.2344	3	QPSK	120
3	0.3770	5	QPSK	193
4	0.6016	7	QPSK	308
5	0.8770	9	QPSK	449
6	1.1758	11	QPSK	602
7	1.4766	13	16QAM	378
8	1.9141	15	16QAM	490
9	2.4063	17	16QAM	616
10	2.7305	19	64QAM	466
11	3.3223	21	64QAM	567
12	3.9023	23	64QAM	666
13	4.5234	25	64QAM	772
14	5.1152	27	64QAM	873
15	5.5547	29	64QAM	948

essi, tuttavia, fa riferimento all'estensione scalabile di questa codifica, chiamata appunto Scalable Video Coding (SVC) e presentata in [24]. L'uso di una codifica scalabile, associata alle tecniche di AMC presentate nei paragrafi precedenti, apre la strada alla realizzazione di algoritmi per lo scheduling dei pacchetti in maniera intelligente. In [16] viene presentata una struttura generale per lo scheduling opportunistico di pacchetti video trasmessi in modalità broadcast. Sulla base di questa struttura, in [15] viene proposto un algoritmo per massimizzare la qualità video percepita da tutti gli utenti dati dei vincoli sulla capacità di canale. Un altro esempio di algoritmo di packet scheduling si può trovare in [10], in cui si considera un sistema composto da due livelli: quello superiore sfrutta la teoria del controllo lineare a tempi discreti, quello inferiore distribuisce i pacchetti a tutti gli utenti in modo equo (tecnica nota come Proportional Fair Scheduling). Le prestazioni dei più conosciuti algoritmi di packet scheduling in un sistema LTE, valutando solo la trasmissione in downlink e considerando un traffico video, sono analizzate in [22].

In [8] sono illustrati i fondamenti delle tecniche AMC per sistemi Multiple Input Multiple Output (MIMO) a banda larga, evidenziando come esse consentano di fornire significativi guadagni nella capacità di canale. In [12] viene analizzato il problema di quali MCS debbano trovarsi nella BS per consentire di sfruttare fino in fondo le potenzialità di AMC. Vengono presentati degli algoritmi di complessità elevata, in cui si prende in considerazione anche la correzione di errore tramite HARQ, e delle versioni più semplici adatte ad implementazioni pratiche. In [21] si analizza il ritardo introdotto dal sistema AMC, che richiede la misurazione aperiodica del CQI dei vari utenti e l'eventuale adattamento dell'MCS con cui trasmettere. Viene confrontato un sistema di questo tipo con un sistema in cui si ha perfetta conoscenza del canale ad ogni istante, concludendo che esiste un trade-off tra la minimizzazione dell'overhead causato dalla segnalazione (CQI) e l'aumento delle prestazioni.

In [23] si confronta una rete che trasmette sempre nel miglior modo possibile (best effort), indipendentemente dal tipo di traffico, con una che differenzia le modalità di trasmissione in base alla QoS richiesta dal traffico. In esso si dimostra che la differenziazione e la gerarchizzazione del traffico sono cruciali quando un

### 3. BROADCASTING E TECNICHE DI MODULAZIONE E CODIFICA

servizio che richiede ritardi molto bassi (es. VoIP) è combinato con una tipologia di traffico non sensibile al ritardo (es. navigazione web). Per questo motivo vengono distinti diversi tipi di traffico in base alle loro esigenze e ad ognuno di essi viene assegnato un identificatore detto QoS Class Identifier (QCI). Informazioni sui diversi tipi di QCI possono essere trovate in [14].

# Capitolo 4

## Risultati delle simulazioni

### 4.1 Scenario di base

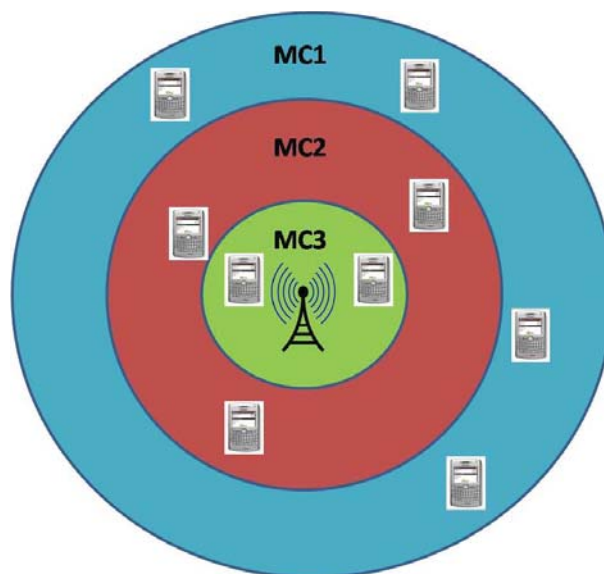


Figura 4.1: Scenario implementato in ns-3.

Lo scenario implementato in ns-3 nelle simulazioni eseguite è descritto nella Fig. 4.1: c'è una sola BS e 30 utenti, divisi in tre gruppi, ciascuno da 10 utenti. La Fig. 4.1 è tratta da [15], in cui lo scenario implementato era molto simile. Gli utenti del primo gruppo sono posizionati in maniera casuale entro un raggio di 100 metri dalla BS (la zona verde nella Fig. 4.1, indicata con MC3), quelli del secondo gruppo sono posizionati in maniera casuale con una distanza dalla BS compresa tra 100 metri e 1 km (la zona rossa nella Fig. 4.1, indicata con MC2) e

#### 4. *RISULTATI DELLE SIMULAZIONI*

---

quelli del terzo gruppo sono posizionati in maniera casuale con una distanza dalla BS compresa tra 1 km e 10 km (la zona blu nella Fig. 4.1, indicata con MC1). Gli utenti sono fermi.

La comunicazione avviene in modalità broadcast: la BS trasmette lo stesso pacchetto a tutti gli utenti, con un MCS che viene di volta in volta fissato (si consulti l'Appendice A per vedere come è stato modificato il core di ns-3 per fissare l'MCS desiderato).

Oltre a ciò che viene mostrato in Fig. 4.1, nella simulazione è stata realizzata anche la core network o EPC, seguendo il procedimento spiegato in [7]. È stata pertanto creata una rete point-to-point cablata che collega il nodo P-GW a cui fa riferimento la BS con un nodo Remote Host avente accesso alla rete internet. Sono state inoltre installate delle applicazioni nei vari UE in grado di generare traffico in downlink (il traffico in uplink non è stato considerato nella simulazione). Infine, sono stati attivati i bearers, scegliendo come tipo di traffico quello corrispondente al QCI numero 3, relativo al Buffered Video Streaming, cioè streaming video non usato per le video-chiamate [14]. Nonostante il traffico sia stato dichiarato di tipo video, non sono stati fatti interventi particolari sui pacchetti, considerando l'astrazione che vede il traffico video come un flusso di dati molto grande.

Il MAC Scheduler è il modello in ns-3 della LTE MAC Scheduler Interface Specification pubblicata dal FemtoForum [9]. Il modello del canale radio è l'implementazione in ns-3 della formula di Friis per la propagazione (classe `ns3::FriisSpectrumPropagationLossModel`). Per ulteriori informazioni consultare il riferimento di questa classe nella documentazione di ns-3 [17].

La rete point-to-point che collega il nodo P-GW al nodo remoto ha i seguenti parametri:

- Data rate: 100 Gb/s
- Delay: 10 ms
- Maximum Transmission Unit (MTU): 1500 byte



La rete LTE formata dalla BS e dai 30 utenti ha, invece, questi parametri:

- Bandwidth in downlink, misurata in numero di Resource Blocks (RB): 25
- E-UTRAN Absolute Radio Frequency Channel Number (EARFCN) in downlink: 100
- Potenza in trasmissione: 10 dBm negli UE, 30 dBm nella eNB
- Figura di rumore: 9 dB negli UE, 5 dB nella eNB

Il tempo di simulazione è di 5 secondi. La dimensione dei pacchetti è di 500 byte (530 con l'header PDCP). L'intervallo tra gli stessi cambia a seconda della configurazione di traffico scelta. Detto  $\lambda$  il tasso di arrivo dei pacchetti (in pacchetti al secondo), sono state considerate tre configurazioni:

- Traffico basso:  $\lambda = 1$ , intervallo di 1 secondo tra pacchetti consecutivi
- Traffico medio:  $\lambda = 10$ , intervallo di 100 ms tra pacchetti consecutivi
- Traffico alto:  $\lambda = 100$ , intervallo di 10 ms tra pacchetti consecutivi

Si è scelto di provare diverse configurazioni di traffico per capire come variano i risultati non soltanto in base all'MCS scelto (obiettivo primario della tesi), ma anche all'intensità e alle dimensioni del traffico, che dipendono dal contesto applicativo.

Negli esempi riportati in [7] la dimensione dei pacchetti rimane invariata rispetto al valore standard, cioè 1000 byte. La scelta di ridurre la dimensione a 500 byte è stata presa dopo una serie di anomalie riscontrate durante la simulazione. Avendo scelto inizialmente 1000 byte come taglia di un pacchetto, si era notato che, nel caso di traffico basso, con gli MCS più bassi (0, 2 e 4) ciascun nodo aveva, a livello PDCP, throughput nullo, cioè non riceveva alcuno dei pacchetti trasmessi. Tramite appositi strumenti di debug ci si è accorti che i pacchetti venivano effettivamente ricevuti dagli utenti, ma non riuscivano a passare dal livello RLC a quello PDCP perché il tempo necessario per il riordinamento dei pacchetti stessi eccedeva il tempo di timeout standard imposto a livello PDCP (100 ms),

facendo sì che tutti i pacchetti venissero scartati. Si è allora deciso di provare a ridurre la dimensione dei pacchetti e ci si è accorti che con pacchetti di 500 byte il problema non si presentava più. Riducendo la dimensione sotto i 1000 byte, inoltre, risultano più contenuti i valori del ritardo, che, altrimenti, presentava dei picchi a valori troppo elevati.

## 4.2 Valutazione delle prestazioni

I grafici presentati nel paragrafo successivo fanno riferimento a delle metriche rilevate al livello PDCP. Il ritardo calcolato, quindi, non è l'effettivo tempo che un pacchetto ha impiegato per viaggiare nel canale radio tra eNB e UE, ma l'intero intervallo di tempo trascorso dal momento in cui il pacchetto è arrivato nella eNB a quello in cui è stato effettivamente ricevuto dall'UE destinatario, comprensivo di tempo di attesa in coda ad altri pacchetti ed eventuali tempi dovuti alle ritrasmissioni. Per un esempio delle tracce PDCP da cui sono stati tratti i risultati, in particolare il ritardo, si veda la Fig. 4.2, contenente le prime voci della traccia PDCP relativa alla configurazione di traffico basso e all'MCS 0.

Oltre al ritardo, misurabile direttamente dalle tracce PDCP, l'altra metrica fondamentale nel valutare le prestazioni di una rete di comunicazione è il throughput, ovvero la rate a cui il sistema è in grado di trasmettere pacchetti con successo, [5]. Sono state effettuate due misurazioni del throughput: throughput normalizzato e throughput medio, entrambe ricavabili dai dati presenti in Fig. 4.2 ed in tutte le tracce PDCP.

Il throughput normalizzato è stato calcolato in questo modo:

$$\text{normalized throughput} = \frac{B_{rx}}{B_{tx}} \quad (4.1)$$

- $B_{rx}$ , totale dei byte ricevuti
- $B_{tx}$ , totale dei byte trasmessi

Esprime il rapporto tra i pacchetti spediti dalla BS e quelli effettivamente ricevuti dagli utenti. Esso è sempre compreso tra 0 e 1, da cui l'attributo "normalizzato".

### 4.3 VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI

%	start	end	CellId	IMSI	RNTI	LCID	nTxPDU	TxBytes	nRXPDU	RxBytes	delay	stdDev	min	max	PduSize	stdDev	min	max
0	0	0.25	1	1	1	1	1	530	1	530	0.184	0	0.184	0.184	530	0	530	530
0	0	0.25	1	2	2	1	1	530	1	530	0.184999	0	0.184999	0.184999	530	0	530	530
0	0	0.25	1	3	3	1	1	530	1	530	0.185999	0	0.185999	0.185999	530	0	530	530
0	0	0.25	1	4	4	1	1	530	1	530	0.186998	0	0.186998	0.186998	530	0	530	530
0	0	0.25	1	5	5	1	1	530	1	530	0.187998	0	0.187998	0.187998	530	0	530	530
0	0	0.25	1	6	6	1	1	530	1	530	0.188997	0	0.188997	0.188997	530	0	530	530
0	0	0.25	1	7	7	1	1	530	1	530	0.189997	0	0.189997	0.189997	530	0	530	530
0	0	0.25	1	8	8	1	1	530	1	530	0.190996	0	0.190996	0.190996	530	0	530	530
0	0	0.25	1	9	9	1	1	530	1	530	0.191996	0	0.191996	0.191996	530	0	530	530
0	0	0.25	1	10	10	1	1	530	1	530	0.192995	0	0.192995	0.192995	530	0	530	530
0	0	0.25	1	11	11	1	1	530	1	530	0.193995	0	0.193995	0.193995	530	0	530	530
0	0	0.25	1	12	12	1	1	530	1	530	0.194994	0	0.194994	0.194994	530	0	530	530
0	0	0.25	1	13	13	1	1	530	1	530	0.195994	0	0.195994	0.195994	530	0	530	530
0	0	0.25	1	14	14	1	1	530	1	530	0.196994	0	0.196994	0.196994	530	0	530	530
0	0	0.25	1	15	15	1	1	530	1	530	0.197993	0	0.197993	0.197993	530	0	530	530
0	0	0.25	1	16	16	1	1	530	1	530	0.198993	0	0.198993	0.198993	530	0	530	530
0	0	0.25	1	17	17	1	1	530	1	530	0.199992	0	0.199992	0.199992	530	0	530	530
0	0	0.25	1	18	18	1	1	530	1	530	0.200992	0	0.200992	0.200992	530	0	530	530

Figura 4.2: Esempio traccia PDCP. Le prime due colonne indicano l'intervallo della simulazione in cui sono effettuate le misure (da 0 a 0.25 secondi). L'utente è indicato nella colonna International Mobile Subscriber Identity (IMSI). Le altre colonne importanti sono TxBytes, RxBytes e delay. Notare la dimensione del PDU, 530 byte.

Il throughput medio è espresso dalla seguente equazione:

$$average\ throughput = \frac{B_{rx} \cdot 8 \cdot 10^{-6}}{T_{sim}} \quad (4.2)$$

- $B_{rx}$ , totale dei byte ricevuti
- $T_{sim}$ , tempo di simulazione (in secondi)

Esprime la quantità di informazione ricevuta dagli utenti nell'unità di tempo. È espresso in Mbit/s.

L'ultima metrica presa in considerazione è il numero di utenti attivi. È stato considerato inattivo un utente che presenti un throughput normalizzato pari a 0, cioè che non abbia mai ricevuto alcun pacchetto.

I valori specifici di throughput e ritardo per ciascun MCS sono stati ricavati facendo una media dei valori di throughput e ritardo di ciascun utente, escludendo gli utenti inattivi.

### 4.3 Risultati

In questa sezione si presentano i grafici riassuntivi delle simulazioni effettuate.

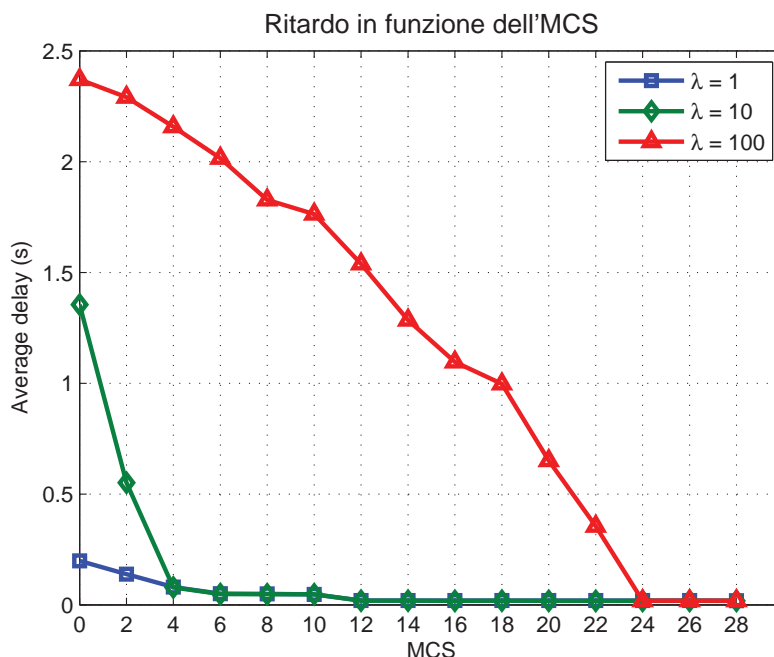


Figura 4.3: Andamento del ritardo al variare dell'MCS.

Si comincia dal ritardo, riportato in Fig. 4.3. L'andamento dei grafici è decrescente per tutte e tre le configurazioni di traffico: questo conferma l'intuizione secondo cui ad MCS bassi corrispondono prestazioni inferiori (ritardi più elevati). Notiamo, in particolare, che i primissimi MCS (0, 2 e 4) presentano valori molto alti rispetto agli MCS successivi. Andiamo ora ad analizzare nel dettaglio le tre configurazioni. Nel caso di traffico basso il ritardo parte da circa 200 ms per l'MCS 0, poi cala gradualmente raggiungendo un minimo di circa 20 ms. Andamento simile, ma con picco iniziale più alto (oltre 1 secondo), per il caso di traffico medio, il cui grafico, dopo l'MCS 4, si sovrappone quasi totalmente con quello del traffico basso. Profondamente diverso è, invece, il caso di traffico alto, in cui il ritardo parte da un valore altissimo (circa 2.5 secondi) e si mantiene ad alti livelli (sopra 0.5 secondi) fino all'MCS 20, raggiungendo i valori più bassi solo per MCS superiori a 22, mentre negli altri due casi erano stati raggiunti molto prima.

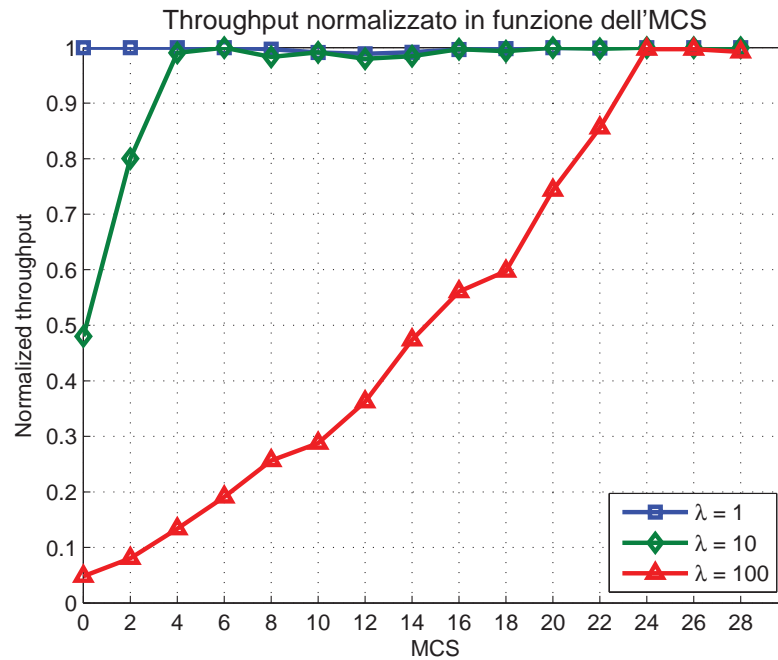


Figura 4.4: Andamento del throughput normalizzato al variare dell'MCS.

Speculare a quello del ritardo è l'andamento del throughput normalizzato, ricavato dalla formula 4.1 e riportato in Fig. 4.4. Esso risulta molto basso per MCS bassi e circa unitario per gli MCS più elevati. Nel caso di traffico medio parte da 0.5 e arriva brevemente ad un valore accettabile (0.991 per l'MCS 4). Nel caso di traffico basso rimane pressoché costante intorno a 1, sintomo che l'intensità è talmente bassa che tutti i pacchetti vengono spediti con successo, indipendentemente dall'MCS. Nel caso di traffico alto parte da valori molto bassi (0.048 per l'MCS 0) e sale con fatica, raggiungendo valori attorno ad 1 solo a partire dall'MCS 24.

Il throughput medio, calcolato con la formula 4.2 e riportato in Fig. 4.5, ci mostra come in tutti e tre i casi ci sia un andamento crescente, in maniera analoga al grafico precedente, ma i valori raggiunti nelle tre configurazioni sono sensibilmente diversi. Nel caso di traffico basso il throughput rimane pressoché costante attorno a 4.2 kb/s, dato che si parla di 530 byte (4240 bit) spediti ogni secondo. Nel caso di traffico medio il valore, dopo pochi MCS iniziali in cui cresce rapidamente, si attesta intorno ai 42 kb/s, poiché sono 530 byte (4240 bit) spediti ogni 0.1 secondi. Infine, nel caso di traffico alto, il throughput parte molto basso

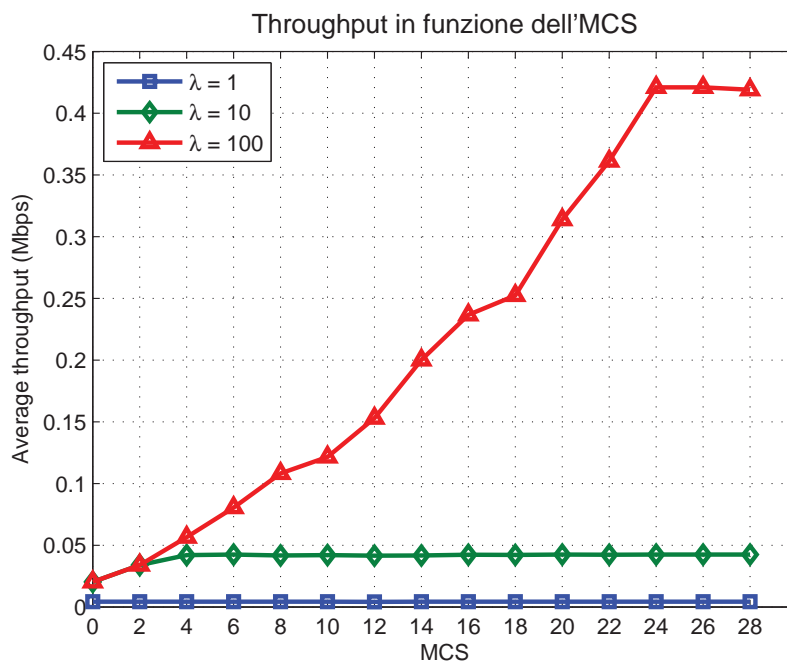


Figura 4.5: Andamento del throughput medio al variare dell'MCS.

(circa 20 kb/s, come nel caso medio) e cresce gradualmente, raggiungendo per MCS superiori a 24 il valore massimo di 420 kb/s, dato che vengono spediti 530 byte (4240 bit) ogni 0.01 secondi.

È significativo il grafico degli utenti attivi, Fig. 4.6, che si mantiene uguale per tutte e tre le configurazioni di traffico. Mentre per throughput e delay le cose migliorano man mano che si aumenta l'MCS, per gli utenti attivi la conclusione è opposta. Gli MCS più bassi (0, 2, 4 e 6) garantiscono una copertura totale, con tutti e 30 gli utenti attivi. Il valore poi cala con l'aumentare dell'MCS, fino all'ultimo MCS (28) in cui ci sono solo 20 utenti attivi: tutti gli utenti del terzo gruppo (zona blu della Fig. 4.1) non sono raggiunti.

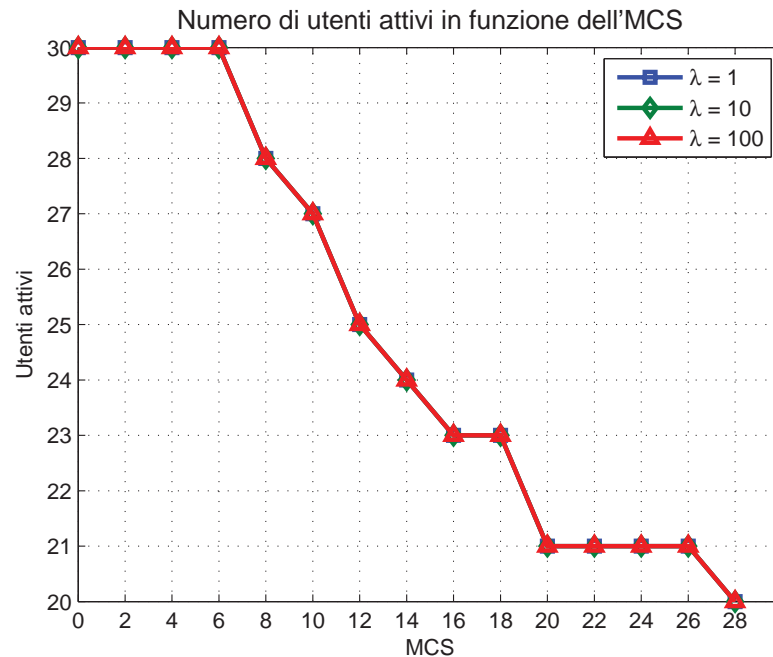


Figura 4.6: Numero di utenti attivi al variare dell'MCS.

## 4.4 Conclusioni

In questa tesi si sono analizzate le prestazioni di una rete LTE con una sola BS e 30 utenti, al variare degli MCS e dell'intensità di traffico.

I grafici ottenuti ci portano a tre conclusioni fondamentali:

- Gli MCS più bassi (bassi ordini di modulazione e bassi code rates) garantiscono elevata robustezza (tutti gli utenti raggiunti), ma scarse prestazioni in termini di throughput e delay; al contrario, gli MCS più elevati (alti ordini di modulazione e alti code rates) garantiscono la massima efficienza in termini di prestazioni, al prezzo di rinunciare a servire gli utenti con le condizioni peggiori (solitamente quelli più lontani dalla BS).
- Le prestazioni di un sistema, in termini di throughput e delay, dipendono in termini relativi dal MCS scelto, ma in termini assoluti dall'intensità del traffico, che può causare grandi variazioni.
- La robustezza di un sistema è indipendente dall'intensità del traffico e dipende solo dal MCS scelto.

#### 4. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

---

Il progetto di un sistema di comunicazione deve tenere conto di questo trade-off tra efficienza e robustezza e scegliere di volta in volta la configurazione migliore per servire il maggior numero possibile di utenti garantendo le migliori prestazioni possibili.

Dal punto di vista pratico, abbiamo rappresentato il traffico video come un flusso di dati di intensità elevata. I casi più interessanti, dunque, sono le configurazioni di traffico medio e alto. Si veda ad esempio [21], in cui per la simulazione di uno streaming video su LTE sono stati adottati pacchetti da 350 byte con tempo di interarrivo medio di 3.65 ms ( $\lambda \simeq 274$ ).

Considerando il caso di traffico medio, si nota che gli MCS 0 e 2 vanno esclusi nel sistema simulato, in quanto comportano ritardi troppo elevati (sopra i 500 ms). Gli MCS 4 e 6, invece, riescono a garantire contemporaneamente: ritardi bassi (rispettivamente 79 ms e 49 ms), throughput normalizzato elevato (rispettivamente 0.991 e 1) e robustezza (tutti e 30 gli utenti vengono serviti). Essi corrispondono ad un'efficienza spettrale rispettivamente di 0.3770 bit/s/Hz e 0.6016 bit/s/Hz. Utilizzando il procedimento inverso rispetto a quello adoperato in [7] per ricavare l'efficienza spettrale a partire dalla SINR, otteniamo che i valori di SINR relativi a tali MCS sono rispettivamente 4.36dB e 9.13dB. Queste sono approssimativamente le condizioni di canale ideali, che consentono di ottenere le massime prestazioni e la massima robustezza.

Considerando il caso di traffico alto la situazione peggiora. Se decidiamo di escludere tutti gli MCS che comportano ritardi superiori a 500 ms, dobbiamo limitarci solo a quegli MCS compresi tra il 22 e il 28. In questo caso gli utenti più lontani dalla BS saranno comunque esclusi dal servizio (21 utenti serviti con MCS 22, 24 e 26, 20 utenti serviti con MCS 28). Tra questi MCS, quello che garantisce la migliore combinazione di prestazioni e robustezza è il numero 26, per il quale si ha: ritardo 18 ms, throughput normalizzato 0.997 e throughput medio 42.106 kb/s. L'MCS 26 è associato ad un'efficienza spettrale di 5.1152 bit/s/Hz, corrispondente ad un valore di SINR di 45.4dB. Vengono richieste, dunque, condizioni di canale tanto migliori quanto più il traffico è intenso.



# Appendice A

## Codice e comandi eseguiti

### A.1 Il codice

Lo scenario implementato in questa tesi si trova nel sorgente `amc_simulation.cc`. Il codice segue abbastanza da vicino gli esempi contenuti nella User Documentation del manuale di LENA, [7]. Le eccezioni principali sono:

- Non è stato inserito un solo UE, ma 30, divisi in tre gruppi.
- Il posizionamento degli utenti segue quanto indicato nella Sez. 4.1 e rappresentato nella Fig. 4.1.
- Il traffico avviene solo in downlink, non in uplink, e il bearer è impostato come spiegato nella Sez. 4.1.
- Sono stati aggiunti 3 parametri impostabili da linea di comando: `mod`, che stabilisce l'MCS usato, `traffic`, che stabilisce la configurazione di traffico e `sim`, che stabilisce il numero della simulazione.

Il codice è stato compilato ed eseguito dieci volte per ogni combinazione di MCS e configurazione di traffico. Ogni volta è stato cambiato il seed del generatore di numeri casuali di ns-3 basandosi sul valore del parametro `sim`, come mostrato in Fig. A.1. In questo modo i dati ottenuti sono mediati rispetto alle posizioni degli utenti.

```
//Mobilità
SeedManager::SetRun (sim);
SeedManager::SetSeed (sim);
MobilityHelper mobility;
mobility.SetMobilityModel ("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility.Install (enbNodes);
```

Figura A.1: Uso della classe `SeedManager` per modificare il seed del generatore di numeri casuali in ns3.

Oltre al sorgente appena citato, è stato modificato anche un sorgente dal core di ns-3, il file `lte_amb.cc`, in modo da forzare l'MCS scelto, indipendentemente dalle CQI degli utenti. Vi è stata aggiunta una variabile globale `g_mod`, contenente il valore attuale di `mod`, e il valore del corrispondente CQI è stato inserito nel codice, come mostrato in Fig. A.2. Il parametro `mod` varia tra 1 e 15, corrispondente agli MCS pari tra 0 e 28 (vedi nota 1 nella Sez. 3.3). Il CQI corrispondente è stato ottenuto sottraendo 1 a `mod`.

```
NS_LOG_DEBUG (this << "\t CQI " << rbgCqi);
// fill the cqi vector (per RB basis)
for (uint8_t j = 0; j < rbgSize; j++)
{
    cqi.push_back (mod-1);
}
rbgMap.clear ();
```

Figura A.2: Modifica del sorgente `lte_amb.cc` per forzare un MCS.

I grafici sono stati realizzati in MATLAB, basandosi sui dati del tracing PDCP. Per maggiori informazione sul tracing in ns-3 consultare [18], per il tracing in LTE fare invece riferimento a [7].

## A.2 I comandi da terminale

Prima di cominciare l'esecuzione occorre salvare il sorgente nella directory di installazione di LENA.

Per compilare il sorgente usare il comando `waf`:

---

```
./waf
```

Per l'esecuzione della simulazione, prendendo come esempio il caso dell'MCS 0, della configurazione di traffico basso e della prima simulazione:

```
./waf --run amc_simulation --mod=1 --traffic=1 --sim=1
```



# Bibliografia

- [1] 3GPP, <http://www.3gpp.org/>. *The 3rd Generation Partnership Project (3GPP) unites telecommunications standards bodies.*
- [2] 3GPP. *R1-081483*. Conveying MCS and TB size via PDCCH.
- [3] 3GPP, <http://www.3gpp.org/article/release-6>. *Release 6*.
- [4] 3GPP, <http://www.3gpp.org/article/release-8>. *Release 8*.
- [5] N. Benvenuto and M. Zorzi. *Principles of Communications Networks and Systems*. Wiley, 2011.
- [6] CISCO. Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2011-2016. Technical report, [http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white\\_paper\\_c11-520862.html](http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.html), 2011.
- [7] CTTC, <http://lena.cttc.es/manual>. *Manuale LENA release M2*.
- [8] S. Catreux et al. Adaptive modulation and MIMO coding for broadband wireless data networks. *IEEE Communications Magazine*, 2:108–15, Giugno 2002.
- [9] FemtoForum, <http://www.smallcellforum.org/resources-technical-papers>. *LTE MAC Scheduler Interface Specification v1.11*.
- [10] G. Piro L.A. Grieco G. Boggia R. Fortuna and P. Camarda. Two-level down-link scheduling for real-time multimedia services in LTE networks. *IEEE Transactions on Multimedia*, 13(5):1052–1065, Ottobre 2011.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [11] J. Afzal T. Stockhammer T. Gasiba and W. Xu. Video streaming over MBMS: A system design approach. *IEEE Journal of Multimedia*, 1(5):25–35, Agosto 2006.
- [12] R. Cohen G. Grebla and L. Katzir. Cross-layer hybrid FEC/ARQ reliable multicast with adaptive modulation and coding in broadband wireless networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 18(6):1908–1920, Dicembre 2010.
- [13] H. Holma and A. Toskala. *Lte for Umts - Ofdma and Sc-fdma Based Radio Access*. Wiley, 2009.
- [14] IXIA, [http://www.ixiacom.com/pdfs/library/white\\_papers/policy\\_management.pdf](http://www.ixiacom.com/pdfs/library/white_papers/policy_management.pdf). *Quality of Service (QoS) and Policy Management in Mobile Data Networks*.
- [15] D. Munaretto D. Jurca and J. Widmer. Scalable video broadcast in cellular networks: Impact on QoS and network resources. *IEEE ISCC 2010*, Giugno 2010.
- [16] D. Munaretto. Opportunistic scheduling and rate adaptation for scalable broadcast video streaming. *IEEE WoWMoM 2011*, Giugno 2011.
- [17] NSNAM, <http://www.nsnam.org/docs/release/3.14/doxygen/index.html>. *ns-3 API Documentation*.
- [18] NSNAM, <http://www.nsnam.org/docs/release/3.14/manual/ns-3-manual.pdf>. *ns-3 Manual*.
- [19] NSNAM, <http://www.nsnam.org/>. *Ultime releases di ns-3*.
- [20] N. Baldo M. Miozzo M. Requena and J. Nin Guerrero. An open source product-oriented LTE network simulator based on ns-3. In *14th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM 2011)*, Miami Beach, FL (USA), Novembre 2011.
- [21] R. Basukala H.A.M. Ramli K. Sandrasegaran and L. Chen. Impact of CQI feedback rate/delay on scheduling video streaming services in LTE downlink. In *12th IEEE International Conference on Communication Technology (ICCT)*, pages 1349–1352, Novembre 2010.

- 
- [22] R. Basukala H.A.M. Ramli K. Sandrasegaran and R. Patachaianand. Performance of well known packet scheduling algorithms in the downlink 3GPP LTE system. *IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications (MICC)*, pages 815–820, Dicembre 2009.
- [23] I. Siomina and S. Wanstedt. The impact of QoS support on the end user satisfaction in LTE networks with mixed traffic. *IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 1–5, Settembre 2008.
- [24] T. Stockhammer T. Schier and T. Wiegand. Mobile video transmission using Scalable Video Coding. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 17(9):1204–1217, Settembre 2007.