



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Facoltà di Ingegneria dell'informazione, informatica e statistica

Corso di laurea Magistrale in Ingegneria Elettronica

**ADAPTIVE VIDEO STREAMING:
PRESTAZIONI DASH IN RETI RADIOMOBILI ETEROGENEE**

Relatore

Prof.ssa Maria Gabriella Di Benedetto

Correlatore

Ing. Pietro Obino
Telecom Italia S.p.A

Candidato

Alessio Putignano
Mat: 1134365

Anno Accademico 2014/2015

*Quale mondo giaccia al di là di questo mare non so,
ma ogni mare ha un'altra riva, e arriverò.*

(Cesare Pavese, Il mestiere di vivere)

INDICE

Abstract	6
1. Introduzione.....	7
2. Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (DASH)	11
2.1 Creazione dell'MPD e relativo player	18
2.1.1 MPD.....	18
2.1.1 Player video	20
3. Long Term Evolution (LTE)	24
3.1 Architettura	27
3.2 Collegamento dati	34
3.2.1 Canali Fisici	35
3.2.2 Canali di Trasporto	36
3.2.3 Canali Logici	36
3.3 Quality of Service e Bearers	38
3.4 Handover.....	40
3.4.1 Panoramica generale.....	40
3.4.2 Intra-LTE Handover (X2) ^[17]	41
3.5 Parametri di rete	43
4. Test in laboratorio	47
4.1 Qualità video percepita.....	47
4.2 Scelta progettuale	50
4.3 Setup di laboratorio per misure in box anecoico	51
4.3.1 Camera anecoica.....	51
4.3.2 Banco di test	54
4.3.3 Scenari di misure in camera anecoica	59
4.3.4 Caso ideale.....	60
4.3.5 Terminali interferenti	61
4.3.6 Segnale con rumore additivo.....	63
4.3.7 Inter-RAT LTE-3G.....	67
4.4 Camera riverberante.....	71
4.4.1 Banco di test	78
4.4.2 Misure in camera totalmente riflettente con stirrer da 30 a 60 [deg/s] e valore di attenuazione sul rumore pari a 30 dB.	83

4.4.3	Confronto al variare delle condizioni carico in camera riverberante con livello di attenuazione sul rumore pari a 40dB e stirrer con rotazione a 60 [deg/s].....	86
4.4.4	Conclusioni misure in camera riverberante.....	88
5.	Conclusioni.....	90
6.	Bibliografia e Sitografia.....	92
7.	Ringraziamenti	94

Abstract

La continua evoluzione delle tecnologie radiomobili cellulari, il crescente volume produttivo di dispositivi LTE (Long Term Evolution) quali smartphone e tablet, le nuove esigenze di servizi di rete come il video streaming, sono i punti focali sui quali si basa questo lavoro di tesi. Il flusso dati in video streaming costituisce, oggi, il maggior utilizzo delle risorse di rete. Una sua analisi porta ad una maggiore comprensione in quelli che, se presenti, potranno costituire eventuali colli di bottiglia nelle architetture di rete di moderna concezione. Questo lavoro si concentra sull'analisi del protocollo di video streaming DASH (Dynamic Adaptive Streaming over HTTP) in contesti radiomobili eterogenei, valutandone la capacità di adattarsi alle varie condizioni di copertura, rumorosità di canale e fading sul segnale servente. L'analisi prestazionale fa riferimento a misure in laboratorio attraverso l'uso di box anecoico e camera riverberante utilizzando segnali di rete LTE in esercizio. In ultimo, avendo consolidato la robustezza della modulazione OFDMA caratterizzante l'LTE, si valuta quali potrebbero essere le ottimizzazioni da compiere sul client DASH al fine di poter garantire un'ottima qualità di servizio senza un eccessivo utilizzo di risorse radio.

1. Introduzione

Quest'ultimo decennio è stato caratterizzato da una vertiginosa crescita produttiva industriale di dispositivi radiomobili capaci di accedere ad internet attraverso l'uso di apposite tecnologie. La diffusione e produzione su vasta scala di dispositivi mobili innovativi, quali smartphone e tablet, ha reso necessaria la fornitura di nuovi servizi, inimmaginabili fino a poco tempo fa. Salvare e condividere i propri documenti nel cloud, seguire in diretta la propria squadra del cuore sullo smart tv o tablet, videochiamare un proprio parente oltre oceano, sono solo alcuni di quei servizi che oggi riteniamo utili e necessari, ma di fatto concretizzabili grazie all'evoluzione delle reti di telecomunicazione. Queste nuove esigenze spingono i fornitori di servizio internet verso la continua ricerca e innovazione degli apparati di rete di moderna concezione quali 4G e 5G.

La spinta innovativa in questa direzione, se pur gestita dai fornitori del servizio internet, deve rispettare il trend di necessità degli utenti, quindi del mercato. Infatti, dalle recenti analisi svolte dalla **Global mobile Supplier Association (GSA)** è evidente come il mercato dei dispositivi mobili sia fortemente influenzato dalla continua richiesta da parte degli utenti, di dispositivi LTE e come questa sia di rilevante interesse economico per i maggiori hardware LTE competitor.

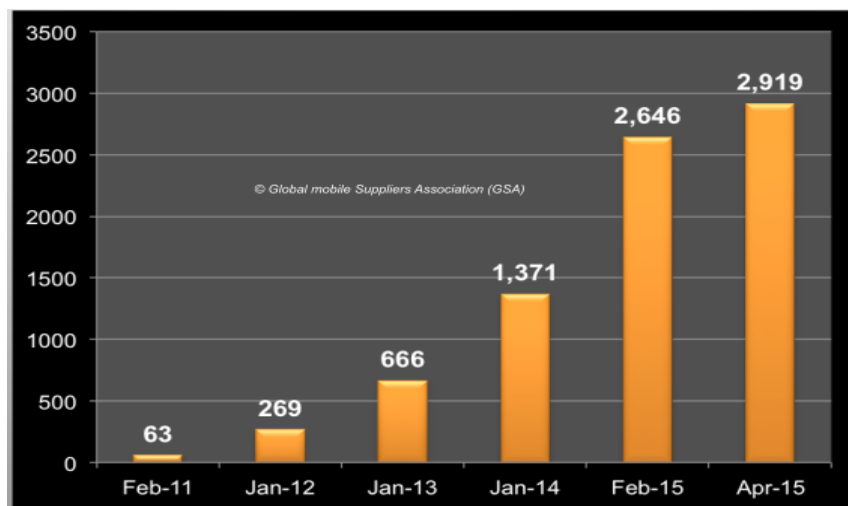


Figura 1: Crescita del mercato dei dispositivi LTE¹

Nel periodo di tempo compreso tra il Febbraio 2011 e l'Aprile 2015, la richiesta di device

¹ Il grafico riportato fa riferimento ai dati raccolti da GSA. Per ulteriori considerazioni e approfondimenti si faccia riferimento al sito ufficiale: <http://www.gsacom.com/>

LTE è stata caratterizzata da una crescita del 93% e, sempre nello stesso periodo 297 aziende hanno considerato l’LTE la principale tecnologia di accesso ad internet per i dispositivi radiomobili.

Il continuo diffondersi di questi device, porta ad una redistribuzione dei servizi di rete. Infatti, fino a qualche anno fa, questa era caratterizzata da un traffico dati principalmente basato sullo scambio di mail o sharing di file dalle piccole dimensioni. Oggi le reti, pur dovendo continuare a garantire gli stessi servizi offerti con lo stesso QoS (Quality of Service), necessitano dell’integrazione di nuovi servizi. Quindi le reti di nuova concezione, dovendosi mantenere in linea con il trend di mercato, dovranno continuamente far fronte alle continue variazioni delle esigenze degli utenti radiomobili.

Secondo i dati emersi dal **CISCO Visual Networking Index Global Mobile Data Traffic Forecast**^[1], risulta evidente come l’intensiva commercializzazione e diffusione di terminali mobili LTE implichi una ridefinizione delle priorità nell’instradamento del traffico internet. Infatti, da questi dati risulta che:

- Il traffico da rete mobile globale nel 2014 ha subito una crescita del 69% producendo un volume dati pari a 2.5 exabyte² al mese, contro gli 1.5 exabyte del 2013.
- Il traffico video da dispositivi mobili costituiva il 55% rispetto al traffico mobile totale del 2014 e tenderà ad arrivare al 79% nel 2019.

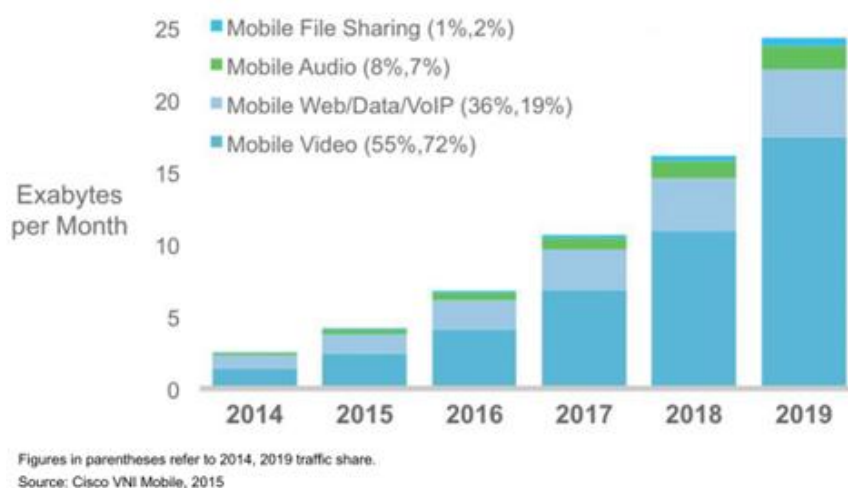


Figura 2: Andamento del traffico dati video^[1]

- Nel 2014 le connessioni 4G hanno generato un traffico dati 10 volte superiore alle reti non 4G.

² Exabyte è pari a 1×10^{18} byte.

- Nel 2014 gli smartphone costituivano il 29% dei dispositivi mobili totali in uso, producendo un volume di traffico dati pari al 69% del totale radiomobile.
- Nel 2014 il numero totale di tablet connessi in rete era pari a 74 milioni, producendo un volume di dati mobile pari 2.5 volte quello degli smartphone.
- Il numero totale di dispositivi mobili connessi nel 2014 ha superato il numero totale della popolazione mondiale.

Seguendo quest'andamento, si prevede che nel 2019 il traffico dati mobile mensile totale sarà superiore a 24.3 exabyte, il progressivo aumentare di smartphone e tablet costituirà i $\frac{3}{4}$ del totale. Sempre per quest'anno il traffico dati 4G supererà di oltre la metà il traffico dati totali (circa il 68%), pur costituendo il 26% delle connessioni internet totali, generando un volume dati 10 volte superiore rispetto alle reti non 4G.

Nel 2019 i tablet connessi costituiranno circa il doppio del traffico prodotto da tutti i dispositivi mobili connessi nel 2014, generando un traffico dati di circa 3.2 exabyte al mese ovvero 1.3 volte superiore al mobile globale del 2014.

I dati riferiti a questo modello di business ci portano a pensare che l'evoluzione delle architetture di rete mobile, dovendo rispettare le esigenze dell'utente, permetteranno di garantire un profitto per le aziende fornitrici del servizio dati, se queste si concentreranno sullo sviluppo e l'ottimizzazione del backhaul per i dispositivi mobili, così come sull'accesso ai dati e a tutti quei servizi maggiormente richiesti, quali il video streaming.

E' proprio su quest'ultimo aspetto che questo lavoro di tesi si concentra maggiormente, analizzando il comportamento del protocollo di video streaming DASH nel contesto radiomobile, con particolare attenzione all'architettura di rete LTE.

Nel tentativo di ricreare negli ambienti di osservazione le stesse condizioni d'uso riscontrate in campo, è stata valutata la qualità video percepita dall'utente al variare delle condizioni di copertura di rete, utilizzando in laboratorio dei nodi di rete con le stesse parametrizzazioni dei nodi di esercizio. Per poter ottenere un confronto diretto tra la codifica di sorgente e il reale flusso video consegnato al client video DASH è stato sviluppato un server di video streaming, nel quale sono stati "codificati" alcuni video adattativi con formati video bitrate variabile. Sono stati individuati i parametri di rete LTE che caratterizzano il comportamento al variare dei contesti di copertura radio e, attraverso il controllo di questi parametri, sono state ricreate in laboratorio, all'interno di un box anecoico o di una camera riverberante, gli scenari di handover e di propagazione tipici delle reti radiomobili in esercizio. Nel box anecoico (cap.4 par. 4.3), si è analizzato il

comportamento del client DASH a bordo cella, così come nel caso di inter-RAT handover, valutando inoltre la riallocazione delle risorse radio da parte dell'eNodeB, al variare delle condizioni di carico della cella LTE in uso. Sempre in questo scenario si è analizzata l'adattatività del protocollo di video streaming, al variare del rapporto segnale-rumore caratterizzante la comunicazione, ovvero introducendo del rumore additivo sulla banda di download.

In camera riverberante (cap.4 par. 4.4) è stata valutata la qualità video percepita al variare delle condizioni dinamiche del segnale, ovvero nel caso in cui l'ambiente propagativo generi dei multipath sul segnale LTE. Sono state compiute misure al variare del fading sul segnale servente e al variare delle condizioni qualitative del canale, intese come rapporto segnale rumore (SINR).

2. Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (DASH)

Negli ultimi decenni, l'**Hypertext Trasfer Protocol (HTTP)** è stato il protocollo di trasmissione maggiormente utilizzato in internet per la consegna di contenuti multimediali, così come per il video streaming. Ad oggi, i servizi sulle reti internet sono **best-effort**, quindi non sono progettati per garantire la qualità del servizio stesso nel trasporto attraverso la rete. L'utilizzo di protocolli di controllo della qualità del trasporto richiederebbero degli accordi tra chi gestisce il servizio di streaming e il Network Operator la cui complessità e i costi relativi non sono pensabili in un contest, come quello attuale dove la generazione dei contenuti e la distribuzione del video sono sempre più spontanee. La larga diffusione sul mercato degli smartphone e l'uso diffuso di contenuti video hanno spinto l'industria e gli enti di standardizzazione a trovare delle soluzioni migliorative della qualità percepita nello streaming video su http attraverso internet, soprattutto per garantire la fluidità e la continuità del contenuto anche in condizioni di uso estremo della rete. Questo, nonostante ci sia stato un veloce sviluppo di protocolli e di servizi di video streaming anche in ambito radiomobile, non permette di erogare i servizi stessi con qualità garantita, il risultato è quello di una percezione da parte dell'utilizzatore finale radiomobile di servizi statici, cioè da usufruire in condizioni di buona copertura e "da fermi" nella posizione che garantisce una qualità accettabile. Un metodo ampiamente utilizzato, se pur non classificabile come protocollo di streaming è il **Progressive Download**. Infatti il progressive download costituisce un'alternativa allo streaming convenzionale, con il quale il client può scaricare attraverso http un file multimediale e la sua visualizzazione potrebbe avvenire leggendo il contenuto direttamente dalla path del proprio storage. Storicamente il primo approccio verso un servizio di streaming è stato affrontato da 3GPP con l'**Adaptive HTTP Streaming (AHS)**^[2]. L'idea base è quella di dividere il contenuto multimediale in segmenti dalla durata prefissata, ognuno di questi codificato con differenti velocità e con differenti risoluzioni audio-video. Quindi, il client effettua una richiesta http GET del segmento temporale necessario con risoluzione e velocità di codifica corrispondente alla capacità del canale che sta utilizzando. In altri termini, l'adattatività del contenuto video avviene lato client in base alle condizioni di banda disponibile a scapito di una maggiore occupazione di memoria lato server. Le relazioni tra contenuti multimediali, banda disponibile e contenuto dei segmenti, è gestito nel caso AHS dal **Media Presentation Description (MPD)** file.

L'MPD è un file di tipo **eXtensible Markup Language (XML)** che include le differenti risoluzioni così come le varie **Uniform Resource Locator (URL)** del server. Tale approccio è stato utilizzato da numerose aziende, molte delle quali hanno sviluppato la propria soluzione, quali ad esempio **Microsoft Smooth Streaming, Adobe Dynamic HTTP Streaming, Apple HTTP Live Streaming e YouTube.**

Nel corso del 2012 l'ISO/IEC ha sviluppato la norma 23009-1 "Dynamic Adaptive Streaming over HTTP" (DASH) ^[3], basandosi sui principi esposti per l'AHS, quindi risponde all'esigenza di adattare il flusso audio-video alle condizioni di carico della rete, ovvero alla banda disponibile dall'utente. L'accesso al servizio DASH avviene, come richiamato dal nome stesso dello standard, attraverso l'HTTP. L'utilizzo dell'HTTP da parte del DASH ne ha permesso una rapida diffusione anche grazie al risparmio economico, questo perché vengono utilizzati apparati e servizi (architetture HTTP) già esistenti. Di contro però, va fatto notare che l'uso di internet come rete di trasporto, non avendo questa una gestione della qualità del servizio come nel caso di dedicate (rif. IEEE802.1p rfc2474), comporta comunque l'uso di una rete in condizioni di servizi best effort. In particolare, su rete mobile, l'HTTP 1.0 è stato diffuso intorno al 1996 quando le reti internet non prevedevano servizi ad oggi largamente utilizzati quali Life TV o Streaming Video. Quindi, al momento in cui questo lavoro viene scritto, lo streaming video non prevede ottimizzazioni di rete quali potrebbero essere ad esempio nel caso di reti LTE, dei bearer dedicati. Questa carenza rende il video streaming un servizio al pari di qualsiasi altro. Va fatto notare che questa pecca non è insita nel protocollo utilizzato, ma fa riferimento a particolari ottimizzazioni delle configurazioni di rete.

Uno scenario tipico di un flusso audio-video adattativo è riportato in figura 3.

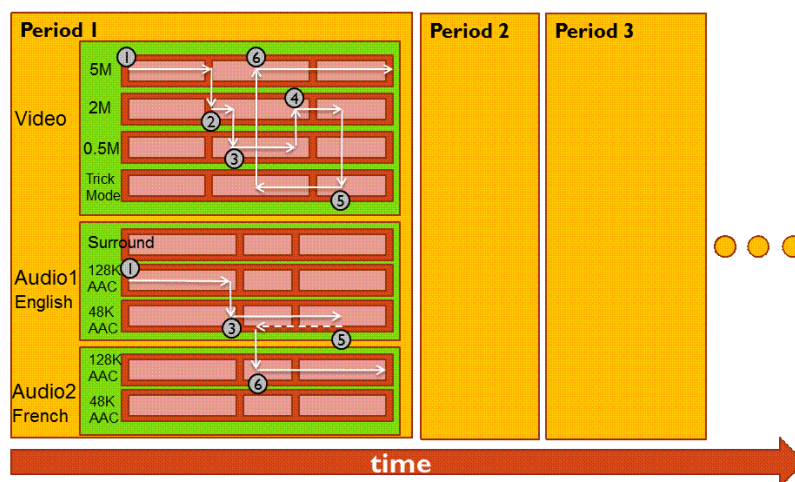


Figura 3: Esempio di video streaming

Si può notare come l'intero contenuto multimediale sia suddiviso in vari periodi, ognuno dei quali è caratterizzato da varie qualità video, dove con il termine qualità si fa riferimento a vari bitrate disponibili. Il contenuto video è suddiviso in risoluzioni variabili da 5 Mbit/s a 0.5 Mbit/s, mentre la traccia audio è costituita da due contenuti in lingua.

Il contenuto audio in inglese è caratterizzato da tre formati disponibili ovvero una traccia surround e due tracce stereo compresse in AAC. Situazione analoga per l'audio in francese ad esclusione del formato surround. Ogni sessione di video streaming inizierà con una richiesta da parte del client verso il server, questa comunicazione avverrà attraverso delle HTTP GET. Nel caso DASH, una volta inviata la richiesta, il server provvederà a inviare un file tipo “.mpd”.

Nel caso in esempio si suppone che le condizioni di rete siano ottimali, quindi lo streaming inizierà (punto1) con una risoluzione video pari a 5 Mbit/sec e traccia audio in inglese con qualità pari a 128 Kbit/s. La scelta della traccia audio avviene lato client, ovvero sarà l'utente a decidere quale tipo di audio voler ascoltare, mentre la risoluzione, così come per il video, salvo casi specifici, verrà automaticamente selezionata in base alla banda disponibile dal client video.

Potrebbe accadere che l'utente, ad esempio muovendosi in contesti urbani con minor copertura di rete, subisca una diminuzione della propria banda disponibile (punto2). Questa è la fase di maggior criticità dei protocolli di video streaming adattativi. Infatti ci sarà un meccanismo alla base del quale il flusso video scalerà la risoluzione evitando così eventi di freezing del video stesso.

Nel punto 3 si suppone che le condizioni di rete siano talmente peggiorate da costringere un bitrate pari a 0.5 Mbit/s con una riduzione della qualità audio a 48 Kbit/s. A questo punto potrebbe succedere che l'utente si muova verso zone a maggiore copertura di rete (punto 4) e decida dopo un certo periodo di tempo di mettere in pausa il proprio player (punto5) selezionando la traccia audio in francese³. Nella fase in cui il video è in pausa, il server non invierà nessun ulteriore contenuto informativo al client, con ovvi vantaggi sia da lato rete che client. Si suppone quindi che dopo un certo periodo di tempo, l'utente continui la visualizzazione del video e in questo caso la rete permetta un bitrate pari a 5 Mbit/s.

Il meccanismo alla base del protocollo che permette l'adattatività alle condizioni di rete sono le continue GET del client verso il server e viceversa, è ovvio che più frequenti

³ Il **trick mode** fa riferimento a tutti i casi differenti al comune play del video, quali potrebbero essere ad esempio, il passaggio ad una sequenza video differente, l'avanti veloce o il riavvolgimento del video.

saranno queste richieste e più “dinamica” sarà l’adattatività del flusso video. La frequenza con cui queste avvengono è gestita dalla lunghezza temporale dei **Segment**.

In generale un contenuto multimediale di tipo DASH sarà caratterizzato da:

- Media Presentation Description (MPD);
- Segment;
- Profile.

Il **Segment** è una porzione del file originale, questo non vuol dire che un singolo Segment sia un file video tipo .avi .mkv o qualsiasi altro formato video, ma lo si può immaginare come un contenitore, nel quale sono racchiuse oltre alle informazioni di tipo video anche ulteriori, quali potrebbero essere ad esempio i sottotitoli multilingua. Tutte queste informazioni verranno incluse nel file .mpd, sarà poi il player del client a interpretare in modo corretto il contenuto informativo di questo.

I **Profile** sono una serie di restrizioni, specificate nell’MPD e quindi nei vari Segment, questi fanno riferimento ai **Digital Rights Management (DRM)**, ovvero tutti quei casi soggetti a speciali vincoli di copyright.

La struttura concettuale di un MPD è riportata in figura 4, si può notare come questo sia composto da vari periodi ognuno dei quali è identificato da un “id” e da un intervallo temporale.

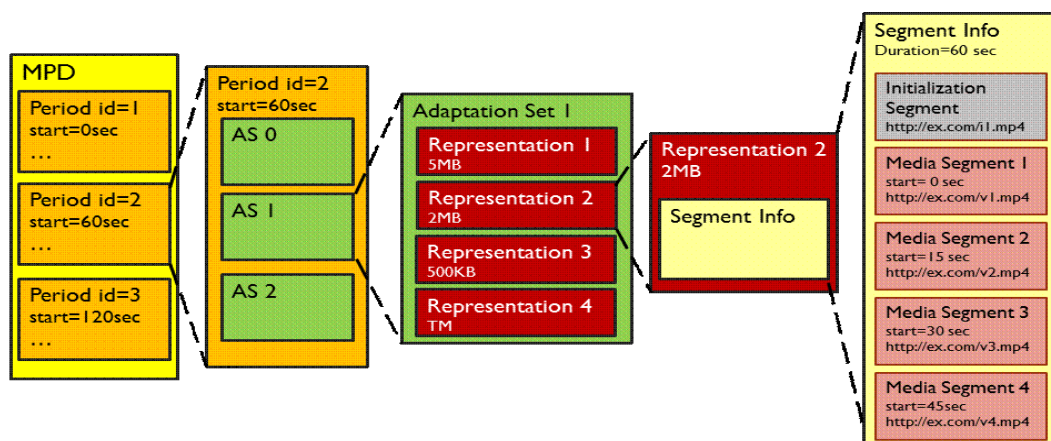


Figura 4: Suddivisione MPD

Ogni periodo comprende un Adaptation Set (indicati in figura con AS) ovvero la risoluzione che caratterizzerà il contenuto audio-video, quindi ogni Adaptation Set sarà suddiviso in vari Segment.

Questi puntano a delle URL e suddividono in sequenze temporali le varie rappresentazioni

del contenuto multimediale. Va fatto notare che, ogni Segment, da specifica, è caratterizzato da una lunghezza temporale fissa e da un peso in termini di byte variabile. Questa variabilità è dovuta alle risoluzioni del file video consegnato. Infatti è ovvio pensare che, se un video della durata di 10 minuti con una risoluzione R possa essere rappresentato con X bit, lo stesso video rappresentato con una risoluzione 5R necessiti di 5X bit⁴.

La scelta della lunghezza temporale dei segmenti sarà gestita dallo sviluppatore dell'MPD, in generale si tenderà a scegliere segmenti “corti” di circa 2 secondi per scenari tipo Live o TV Streaming, mentre segmenti più lunghi di circa 10 secondi, verranno preferiti in tutti quei casi in cui non vi saranno condizioni “restrittive” sulla banda utilizzabile ovvero nel contesto On Demand. In figura 5 è riportato un caso reale di un file .mpd^[5].

```

1 <MPD xsi:schemaLocation="urn:mpeg:DASH:schema:MPD:2011" profiles="urn:mpeg:dash:profile:isoff-main:2011"
2 <type="static" mediaPresentationDuration="PT0H9M56.46S" minBufferTime="PT15.0S">
3
4 <BaseURL>http://www-itec.uni-klu.ac.at/ftp/datasets/mmsys12/BigBuckBunny/bunny_15s/
5 </BaseURL>
6 <Period start="PT0S">
7 <AdaptationSet bitstreamSwitching="true">
8 <Representation id="0" codecs="avc1" mimeType="video/mp4" width="320" height="240" startWithSAP="1" bandwidth="45351">
9 <SegmentBase>Initialization:sourceURL="bunny_15s_50kbit/bunny_50kbit_dashNonSeg.mp4" range="0-864"/>
10 </SegmentBase><SegmentList duration="15">
11 <SegmentURL media="bunny_15s_50kbit/bunny_50kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="865-85711"/>
12 <SegmentURL media="bunny_15s_50kbit/bunny_50kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="85712-167272"/>
13 <SegmentURL media="bunny_15s_50kbit/bunny_50kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="167273-257817"/>
14
15 ...
16
17 <SegmentURL media="bunny_15s_50kbit/bunny_50kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="3233158-3314721"/>
18 <SegmentURL media="bunny_15s_50kbit/bunny_50kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="3314722-3381352"/>
19
20 </SegmentList>
21 </Representation>
22 <Representation id="1" codecs="avc1" mimeType="video/mp4" width="320" height="240" startWithSAP="1" bandwidth="88563">
23 <SegmentBase>
24 <Initialization:sourceURL="bunny_15s_100kbit/bunny_100kbit_dashNonSeg.mp4" range="0-866"/>
25 </SegmentBase>
26 <SegmentList duration="15">
27 <SegmentURL media="bunny_15s_100kbit/bunny_100kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="867-172126"/>
28 <SegmentURL media="bunny_15s_100kbit/bunny_100kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="172127-330085"/>
29 <SegmentURL media="bunny_15s_100kbit/bunny_100kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="330086-511574"/>
30
31 ...
32
33 <SegmentURL media="bunny_15s_100kbit/bunny_100kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="6326228-6480264"/>
34 <SegmentURL media="bunny_15s_100kbit/bunny_100kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="6480265-6603126"/>
35
36 ...
37
38 </SegmentList>
39 </Representation>
40 <Representation id="19" codecs="avc1" mimeType="video/mp4" width="1920" height="1080" startWithSAP="1" bandwidth="3748236">
41 <SegmentBase>
42 <Initialization:sourceURL="bunny_15s_8000kbit/bunny_8000kbit_dashNonSeg.mp4" range="0-870"/>
43 </SegmentBase>
44 <SegmentList duration="15">
45 <SegmentURL media="bunny_15s_8000kbit/bunny_8000kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="871-11289088"/>
46 <SegmentURL media="bunny_15s_8000kbit/bunny_8000kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="11289089-20371164"/>
47 <SegmentURL media="bunny_15s_8000kbit/bunny_8000kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="20371165-29889374"/>
48
49 ...
50
51 <SegmentURL media="bunny_15s_8000kbit/bunny_8000kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="273901770-277390120"/>
52 <SegmentURL media="bunny_15s_8000kbit/bunny_8000kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="277390121-279458386"/>
53 </SegmentList>
54 </Representation>
55 </AdaptationSet>
56 </Period>
57 </MPD>
58

```

Figura 5: Esempio MPD

⁴ Il calcolo appena descritto è puramente intuitivo, introdotto al solo fine di una maggiore comprensione

Come si può notare dall'esempio, l'MPD è composto da un unico Period formato da vari Adaptation Set, inizializzati da un "id".

```

5 | <Period start="PT0S">
6 |   <AdaptationSet bitstreamSwitching="true">
7 |     <Representation id="0" codecs="avc1" mimeType="video/mp4" width="320" height="240" startWithSAP="1" bandwidth="45:
8 |     <SegmentBase><Initialization sourceURL="bunny_15s_50kbit/bunny_50kbit_dashNonSeg.mp4" range="0-864"/>
9 |   </SegmentBase>
10 |   <SegmentList duration="15">
11 |     <SegmentURL media="bunny_15s_50kbit/bunny_50kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="865-85711"/>
12 |     <SegmentURL media="bunny_15s_50kbit/bunny_50kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="85712-167272"/>
13 |     <SegmentURL media="bunny_15s_50kbit/bunny_50kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="167273-257817"/>
14 |     <SegmentURL media="bunny_15s_50kbit/bunny_50kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="257818-344291"/>
15 |     <SegmentURL media="bunny_15s_50kbit/bunny_50kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="344292-426276"/>
16 |
17 |     ....
18 |

```

Figura 6: Segment con risoluzione 320x240

```

37 |     <Representation id="19" codecs="avc1" mimeType="video/mp4" width="1920" height="1080" startWithSAP="1" bandwidth="3748236">
38 |     <SegmentBase>
39 |       <Initialization sourceURL="bunny_15s_8000kbit/bunny_8000kbit_dashNonSeg.mp4" range="0-870"/>
40 |     </SegmentBase>
41 |     <SegmentList duration="15">
42 |       <SegmentURL media="bunny_15s_8000kbit/bunny_8000kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="871-11289088"/>
43 |       <SegmentURL media="bunny_15s_8000kbit/bunny_8000kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="11289089-20371164"/>
44 |       <SegmentURL media="bunny_15s_8000kbit/bunny_8000kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="20371165-29889374"/>
45 |       <SegmentURL media="bunny_15s_8000kbit/bunny_8000kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="29889375-37700449"/>
46 |
47 |       ...
48 |       <SegmentURL media="bunny_15s_8000kbit/bunny_8000kbit_dashNonSeg.mp4" mediaRange="277390121-279458386"/>
49 |     </SegmentList>
50 |   </Representation>
51 | </AdaptationSet>
52 </Period>
53 </MPD>

```

Figura 7: Segment con risoluzione 1920x1080

L'AdpationSet sarà selezionato in automatico in base alla banda disponibile dal Client, infatti, da un confronto tra le figure 6 e 7, si può vedere come a bande maggiori **"bandwidth=3748236"** corrispondano risoluzioni maggiori **"width=1920 height 1080"**. Ovviamente, avendo una risoluzione maggiore, si necessiterà di un maggior numero di bit per rappresentare l'informazione, come si può notare nel campo **"mediaRange"**. Quello che non varia nei due esempi presi in considerazione è la durata temporale dei segmenti, infatti in entrambi i casi questi vengono caratterizzati da una lunghezza pari a 15 secondi **"SegmentList duration =15"**.

Come già detto, l'MPD non è una codifica del video ma una caratterizzazione del flusso audio-video contenuto in un server. Infatti per poter visualizzare il video correttamente, bisognerà fare molta attenzione a come questo verrà costituito. La sua corretta

interpretazione non è univocamente determinata, poiché ogni MDP sarà caratterizzato da specifici codec, i quali possono essere correttamente interpretati solo se il player video ne prevede la loro implementazione.

Questo è stato un passaggio fondamentale, poiché la corretta interpretazione di un MPD da parte di un player video non è così banale.

Il caso preso come esempio può essere visualizzato con VLC, basterà premere Ctrl+N e copiare l'indirizzo:

<http://www-itec.uni->

klu.ac.at/ftp/datasets/mmsys12/BigBuckBunny/bunny_15s/BigBuckBunnyNonSeg_15s_isoff_main_DIS_23009_1_v_2_1c2_2011_08_30.mpd

Se si andasse ad esaminare l'MPD, ci si accorgerebbe che questo non è stato suddiviso in più Period. Infatti è caratterizzato da *“statWithSAP=1”* la conseguenza di questa specifica la si può notare provando un forward e backward con VLC, entrambe le proprietà non sono attuabili poiché l'MPD non lo permette, quindi l'utente sarà costretto a visualizzare l'intero video.

Poiché questo lavoro di tesi ha come obiettivo l'analisi del protocollo DASH in vari contesti radiomobili, non si analizzeranno maggiormente le specifiche XML dell'MPD.

Per i nostri fini di analisi comportamentale del protocollo, un MPD come quello sopra citato, è risultato poco utile, poiché poco si presta alle nostre esigenze di testing del DASH. Questo ci ha portato a creare un server di video streaming sfruttando le funzionalità del server Open Source Apache 2 e integrando le librerie H.264, nel quale sono stati introdotti alcuni video adattativi di tipo DASH.

Si è ritenuto più conveniente creare video, possibilmente adattativi, composti da più periodi, perchè in un caso reale, l'utente dovrebbe essere libero di scegliere se visualizzare l'intero filmato o andare direttamente alla sessione di maggiore interesse.

Creare un mpd con più period, sarà possibile attraverso la specifica *“statWithSAP=0”*⁵, che renderà necessaria una temporizzazione tra questi. Di seguito è riportato uno schema concettuale di un generico client DASH.

⁵ Per maggiori dettagli sulle specifiche dell'mpd, si faccia riferimento al testo ufficiale^[1].

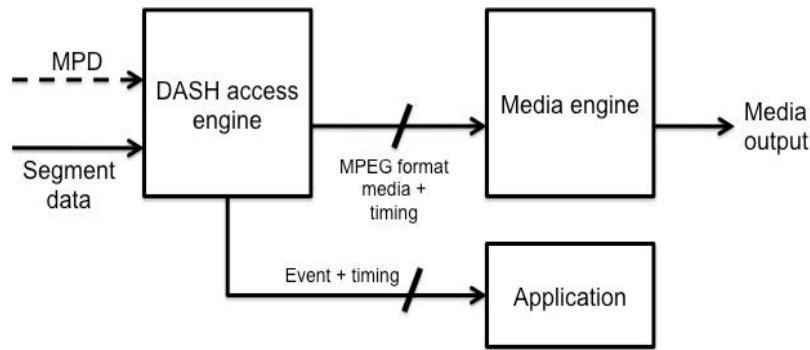


Figura 8: Media Output

Dalla figura 8^[3] si può notare che l'input al Client DASH, ovvero l'ingresso a **DASH access engine** è costituito dal MPD più il Segment data.

Bisogna però fare attenzione a non fraintendere questa rappresentazione, infatti, un player DASH legge un MPD, l'informazione sui Segment è racchiusa nell'MPD, e in esso saranno racchiuse tutte le informazioni necessarie alla corretta visualizzazione del file di streaming. Se per qualche motivo si avesse la necessità di visualizzare come i singoli segmenti vengano consegnati al client, lo si dovrà specificare nell'MPD.

La consegna dei singoli Segment potrebbe essere utile in una fase di analisi del corretto funzionamento del protocollo.

In uscita dalla Dash acces engine si avrà, oltre al video in formato MPEG, un **Event+timing**, questo perché bisognerà tener conto della possibilità in cui un utente decida (**Application**) di mettere in pausa lo streaming magari per selezionare un contenuto audio differente.

2.1 Creazione dell'MPD e relativo player

2.1.1 MPD

La rapida diffusione del DASH è stata resa possibile anche grazie alla disponibilità di software open source.

Nel nostro caso, per la creazione di un MPD e il relativo ambiente di test, abbiamo utilizzato una macchina con **Ubuntu 14.10**^[6] e alcuni software liberi quali: **gedit**^[7], **ffmpeg**^[8] e **MP4Box**^[9] sviluppato da GPAC^[9], per cui le seguenti procedure avranno validità solo in queste specifiche condizioni.

Lo scopo è stato la realizzazione di un DASH adattativo, dove la parte adattativa farà riferimento al bitrate del flusso video. A tal fine si utilizzerà una generica sorgente video e la si codificherà con diversi bitrate per fare questo si userà ffmpeg nel seguente modo:

```
ffmpeg -i il_mio_video.mp4 -an -b:v 100k -s 1024x436 -vcodec libx264 il_mio_video.100k.mp4
ffmpeg -i il_mio_video.mp4 -an -b:v 250k -s 1024x436 -vcodec libx264 il_mio_video.250k.mp4
ffmpeg -i il_mio_video.mp4 -an -b:v 500k -s 1024x436 -vcodec libx264 il_mio_video.500k.mp4
ffmpeg -i il_mio_video.mp4 -an -b:v 1000k -s 1024x436 -vcodec libx264 il_mio_video.1000k.mp4
ffmpeg -i il_mio_video.mp4 -an -b:v 2000k -s 1024x436 -vcodec libx264 il_mio_video.2000k.mp4
ffmpeg -i il_mio_video.mp4 -an -b:v 5000k -s 1024x436 -vcodec libx264 il_mio_video.5000k.mp4
ffmpeg -i il_mio_video.mp4 -an -b:v 7000k -s 1024x436 -vcodec libx264 il_mio_video.7000k.mp4
ffmpeg -i il_mio_video.mp4 -vn -ac 2 -acodec libfdk_aac -profile:a aac_he -f mp4 mp4_il_mio_video-69k.mp4
```

Questa procedura permetterà di caratterizzare il nuovo video sorgente in formato H.264^[11] con vari bitrate creando ad esempio il file **“il_mio_video-7000k.mp4”** caratterizzato da un video bitrate di 7 Mbps e un file audio **“mp4_il_mio_video-69k.mp4”**.

Per comodità e per esigenze software future, è consigliabile scomporre la parte audio dalla parte video, poiché la creazione dell'MPD sarà un processo che richiederà l'utilizzo di MP4Box, il quale permette di ottenere il codec idoneo ai nostri scopi solo in particolari condizioni iniziali. Abbiamo ritenuto utile poter visualizzare direttamente la qualità del video espressa in bitrate variabile con le condizioni di rete, dunque si è caratterizzato ogni singola risoluzione con un sottotitolo descrivente le relative proprietà. La creazione di un sottotitolo, nel caso di 250 kbps, avverrà attraverso l'uso di qualsiasi editor di testo creando un file.srt nel seguente modo:

```
1
00:00:00,970 --> 00:04:48,000
Risoluzione video 1920x1080 Bitrate 250k
2
00:04:48,000 -->00:14:00,000
Risoluzione video 1920x1080 Bitrate 250k
```

Questo file sarà incluso nel sorgente come segue:

```
ffmpeg -i il_mio_video.mp4 -an -b:v 250k -s 1920x1080 -vcodec libx264 -vf subtitles=il_mio_sotto_titolo.srt 250k.mp4
```

Procedura analoga per le altre risoluzioni. Ottenuti quindi i vari file sorgenti si formerà un unico MPD contenente le risoluzioni video desiderate, nel seguente modo:

```
MP4Box -dash 10000 -bs-switching no -segment-name "%s_" -url-template -out il_mio_video_10sec.mpd  
il_mio_video_100k.mp4  
il_mio_video_250k.mp4  
il_mio_video_500k.mp4  
il_mio_video_1000k.mp4  
il_mio_video_2000k.mp4  
il_mio_video_5000k.mp4  
il_mio_video_7000k.mp4  
mp4a-sintel-69k.mp4
```

Questo comando realizzerà un MPD con segmenti lunghi 10 secondi caratterizzato da differenti risoluzioni video, ovvero la qualità peggiore sarà pari a 100 kbps e la migliore 7000 kbps.

Va fatto notare che quella appena descritta è solo una delle possibili realizzazioni di un video DASH, presa come esempio poiché ne è stata testata e garantita la corretta funzionalità. L'ampia gamma di opzioni caratterizzanti un video streaming DASH non può essere descritta interamente in questo lavoro, ma farà riferimento a specifici settaggi di ffmpeg e MP4Box per i quali si consiglia di far riferimento alla documentazione ufficiale^[4]. Realizzato l'MPD, questo dovrà essere validato, ovvero si verificherà la corretta sintassi attraverso il seguente validatore: <http://dashif.org/conformance.html>.

Potrebbe succedere che la validazione non vada a buon fine, in tal caso bisognerà analizzare nel dettaglio il codice XML del MPD e correggerlo manualmente. Questi errori sono vari e casuali generati in fase di “codifica” in DASH, dipendono da innumerevoli fattori che possono essere la codifica del file iniziale (prima del passaggio in H.264), la risoluzione video, la lunghezza dei segmenti ecc.

Validato e corretto l'MPD da eventuali bug bisognerà realizzare il player video.

2.1.1 Player video

Il player potrà essere in grado di decodificare correttamente solo alcuni tipi di codec, più

ampia sarà la gamma di codec disponibili più sarà prossima la creazione di un player video DASH universale. Va fatto notare che la corretta funzionalità del player fa riferimento anche, nel caso in cui questo venga implementato nel browser, al browser utilizzato. Nei casi che verranno esposti si farà riferimento al browser Google Chrome.

HTML5

La prima realizzazione del player video è stata effettuata attraverso HTML5 come riportato di seguito:

```
<p>Player DASH </p>
<video controls="controls" width="500" height="400">
<source src="il_mio_file_dash.mpd" />
<source src="il_mio_file.mp4" />
</video></p>
<p>Your browser does not support the video tag or the file format of this video. </p>
```

Analizzando la sintassi, si nota che il player farà riferimento a una sorgente esterna “*source src*” leggendo prima il file *.mpd* e successivamente *.mp4*.

Da test in laboratorio, monitorando il throughput del nostro server, si è notato che un player di questo tipo compie un primo download del file *.mpd* e, successivamente quello del file *.mp4*. Solo dopo aver terminato la sessione di download del *.mp4* avverrà la visualizzazione del contenuto multimediale. Per maggior sicurezza abbiamo confrontato la stessa situazione del sorgente, ma variando la sintassi in html, ovvero omettendo la riga:

```
<source src="il_mio_file_dash.mpd" />
```

Anche in questo caso abbiamo riscontrato lo stesso comportamento, dunque si può dire che un player di questo tipo permette di effettuare il download e la visualizzazione di un file tipo *.mp4*, non rispettando quindi il modello di client precedentemente analizzato (figura 8).

Dash.all.js

Un secondo player realizzato e analizzato fa uso di un java script^[12]. Per quanto si è potuto constatare che questo player funziona bene solo in alcuni casi specifici, ovvero solo partendo con una determinata codifica video iniziale e solo scrivendo una specifica sintassi in MP4Box e, soprattutto solo nel caso in cui non si voglia realizzare un DASH adattativo. Quindi a noi poco utile per un'analisi dettagliata del comportamento del protocollo. Viene comunque riportato per una maggiore comprensione su quali siano state le alternative progettuali che hanno portato alla scelta della soluzione finale.

La realizzazione di questo player è stata ottenuta facendo riferimento ad un file video sorgente nominato *"oceans-clip.mp4"*. Attraverso il seguente comando:

```
MP4Box -dash 2000 -frag 2000 -rap -frag-rap -segment-name _%s -rap oceans-clip.mp4
```

Si otterrà il relativo video DASH con lunghezza dei segmenti pari a due secondi, questo potrà essere interpretato dal player implementato nel browser attraverso la realizzazione di un pagina di index, come segue:

```
<!DOCTYPE html>
<html>
  <head><title>Adaptive Streaming in HTML5</title>
  <script src="http://...myserverpath/dash.all.js"></script>
  <script>
    // setup the video element and attach it to the Dash player
    function setupVideo() {
      var url = "http://...myserverpath/oceans-clip_dash.mpd";
      var context = new Dash.di.DashContext();
      var player = new MediaPlayer(context);
        player.startup();
        player.attachView(document.querySelector("#videoplayer"));
        player.attachSource(url); }
  </script>
  <style>
  video {
    width: 80%;
    height: 80%;
```

```
}  
</style>  
</head>  
  <body onload="setupVideo()">  
    <h1>Adaptive Streaming with HTML5</h1>  
    <video id="videoplayer" controls></video>  
  </body>  
</html>
```

Abbiamo notato che un player di questo tipo è caratterizzato da un throughput molto basso, questo è quello che effettivamente ci si aspetta, avendo realizzato un DASH costituito da vari segment di dimensione (intesa in byte) “piccola”.

Ulteriore verifica è stata effettuata attraverso il comando “*ispeziona elemento*” di Chrome. Infatti, posizionandoci nella sezione “*network*” è possibile visualizzare i vari segment letti dal player.

Bisogna far notare che in questo caso, la loro visualizzazione è resa possibile perché l’MPD fornisce questa informazione. In generale non sarà così, poiché l’informazione sulla URI del server e le informazioni relative al file multimediale verranno mascherate, per ovvi motivi di sicurezza e copyright. La necessità di caratterizzare il video sorgente con particolari risoluzioni video, così come l’esigenza di poter scegliere lo stesso video ma caratterizzato da una lunghezza dei segmenti variabile secondo le nostre esigenze, ci ha spinti verso la realizzazione di un server DASH di test.

MP4Client

Il player che maggiormente ha soddisfatto le nostre esigenze è stato MP4Client, questo permette di poter visualizzare a schermo vari parametri della sessione di streaming, quali ad esempio la traccia video selezionata o il throughput istantaneo del client. Inoltre il suo utilizzo è possibile su macchine Ubuntu, Windows e Android, e per quest’ultime prenderà il nome di **Osmo4**^[13].

La possibilità di poter essere integrato in diversi sistemi operativi è di notevole praticità, infatti ha permesso il testing del protocollo DASH sia su dispositivi mobili quali smartphone e tablet android che dongle LTE collegato ad un laptop.

3. Long Term Evolution (LTE)

Negli ultimi decenni si è potuto notare come la telefonia mobile abbia subito un rivoluzionario cambiamento, infatti si è passati da un semplice telefono cellulare ad architetture più complesse quali smartphone e tablet. Quindi non più un terminale orientato alle chiamate vocali ma dispositivi in grado di fornire una vasta gamma di servizi aggiuntivi. Per soddisfare queste necessità sono indispensabili architetture e protocolli di rete evoluti in grado di sfruttare al meglio le bande di frequenze disponibili per le telecomunicazioni. Il progetto **Long Term Evolution (LTE)** promosso da **3rd Generation Partnership Project (3GPP)** nasce nel Novembre del 2004 arrivando alla sua prima versione ufficiale (Release 8) nel 2008. Questa si basa sul rafforzamento del **Universal Terrestrial Radio Access (UTRA)** e sull'ottimizzazione dell'architettura di accesso radio **Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)**.

L'LTE è parte integrante dello standard UMTS e prevede numerose modifiche e migliorie quali^[14]:

- utilizzo della modulazione OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) per il downlink e SC-FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) per l'uplink;
- efficienza spettrale (ovvero numero di bit al secondo trasmessi per ogni hertz della portante) 3 volte superiore alla più evoluta versione dell'UMTS, ovvero l'HSPA;
- velocità di trasferimento dati in download fino a 326,4 Mb/s;
- velocità di trasferimento dati in upload fino a 86,4 Mb/s;
- velocità di trasferimento dati al bordo della cella da 2 a 3 volte superiori all'UMTS/HSPA;
- RTT (Round Trip Time, Latenza) inferiore ai 10 ms (contro i 70 ms dell'HSPA ed i 200 ms dell'UMTS);
- utilizzo di un minimo di 1,25 MHz ed un massimo di 20 MHz di banda per ciascun utente con ampia flessibilità (contro i 5 MHz fissi del W-CDMA);
- applicabilità flessibile a diverse bande di frequenza, incluse quelle del GSM, dell'UMTS-WCDMA e di nuove bande a 2,6 GHz con possibilità di aggiungere nuove bande nel tempo a seconda delle necessità.
- Ottimo supporto in mobilità. Sono state registrate elevate prestazioni fino a 350 km/h, o addirittura sino ai 500 km/h, a seconda della banda di frequenza usata.

- Supporto di trasmissioni secondo la tecnica MIMO;
- Supporto di schemi di modulazione QPSK, 16 QAM e 64 QAM.

Oltre a questi aspetti, l’LTE fornisce agli utenti (UE) connessioni con diverse qualità di servizio (QoS). A ciascun flusso informativo è associata una specifica classe di QoS e il flusso IP con la sua specifica classe costituisce un bearer. La rete è in grado di gestire contemporaneamente più bearer di uno stesso utente: ad esempio durante una comunicazione vocale (VoiP), un utente potrebbe accedere ad sito web, o scaricare un file tramite il protocollo FTP. I pacchetti FTP saranno associati con classe best effort mentre quelli relativi alla chiamata VoiP avranno bisogno di una QoS più elevata. Le rete è strutturata in modo da gestire efficacemente le diverse QoS garantendo al tempo stesso sicurezza e privacy degli utenti e delle loro informazioni.

Lo schema di trasmissione di downlink è basato su un sistema OFDM, nello specifico su OFDMA. Questo sistema adottato dall’LTE permette benefici relativi alla sua robustezza. Gli schemi di modulazione in downlink disponibili sono QPSK, 16QAM e 64QAM. Lo spettro a disposizione viene suddiviso in più vettori, chiamati sub-carrier, ortogonali l’uno dall’altro (figura 9).

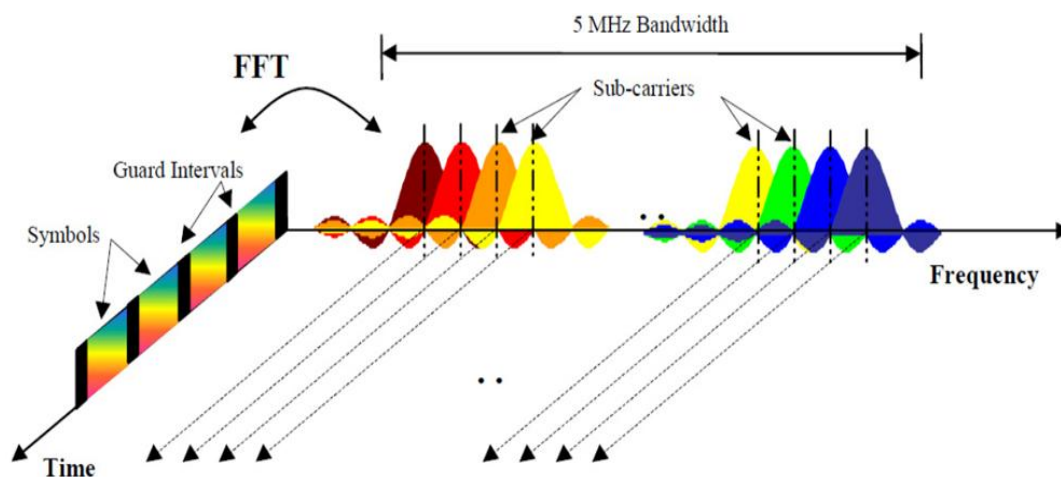


Figura 9: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

Ogni simbolo OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) è una combinazione lineare dei segnali presenti su ciascuna sottoportante ad un certo istante e, generalmente, questi sono molto più lunghi dei simboli trasmessi su sistemi single carrier con un equivalente data rate. Ognuna di queste sub carrier viene modulata con un basso valore di data rate.

Per contrastare l'interferenza di intersimbolo (**ISI**) dell'OFDM dovuta alla diffusione del ritardo del canale può essere aggiunto un intervallo di sicurezza a ogni simbolo nel dominio del tempo. Questo intervallo viene chiamato prefisso **CP (Cyclic Prefix)** il quale viene inserito in modo prioritario rispetto al simbolo OFDM. Idealmente per sistemi OFDM non si ha interferenza da canale adiacente (**ICI**). Un'altra caratteristica importante di questi sistemi è l'utilizzo della trasformata di Fourier (**Fast Fourier Transform – FFT**) per la conversione dei simboli nel segnale da trasmettere. Nello specifico, una FFT inversa (**Inverse Fast Fourier Transform - IFFT**) in trasmissione per ottenere dai simboli associati alle singole sottoportanti il segnale da trasmettere, ed una FFT in ricezione per ottenere dal segnale ricevuto i simboli ad esso associati in corrispondenza delle varie sottoportanti. L'**OFDMA** è una tecnica di accesso multiplo, basata sulla modulazione OFDM, che consiste nell'assegnare a ciascun utente una parte della banda disponibile per un determinato intervallo di tempo. Proprio per questa ragione, a volte, si usa dire che l'OFDMA può essere considerata una tecnica in cui vengono combinate la modulazione OFDM e l'accesso FDMA. Poiché si tratta di una tecnica di tipo adattativo, funzione della qualità del canale radio, se l'assegnazione delle sotto bande viene eseguita in maniera sufficientemente veloce, consente di raggiungere prestazioni molto elevate sia dal punto di vista di robustezza alle rapide variazioni del fading e sia per quanto riguarda le interferenze co-canale, permettendo allo stesso tempo di ottenere un'efficienza spettrale particolarmente elevata. La caratteristica di assegnare a ciascun utente solo una porzione delle sottobande disponibili consente di variare la potenza di trasmissione richiesta per comunicare con ognuno di essi a seconda delle necessità. Stesso discorso vale anche per la qualità di servizio (QoS) che può essere adattata a seconda del tipo di applicazione (voce, video streaming, accesso ad internet, ecc...) che l'utente intende utilizzare. Per quanto riguarda uplink, invece, si preferiscono schemi di modulazione SC-FDMA con cyclic prefix sia per la modalità FDD che per la TDD.

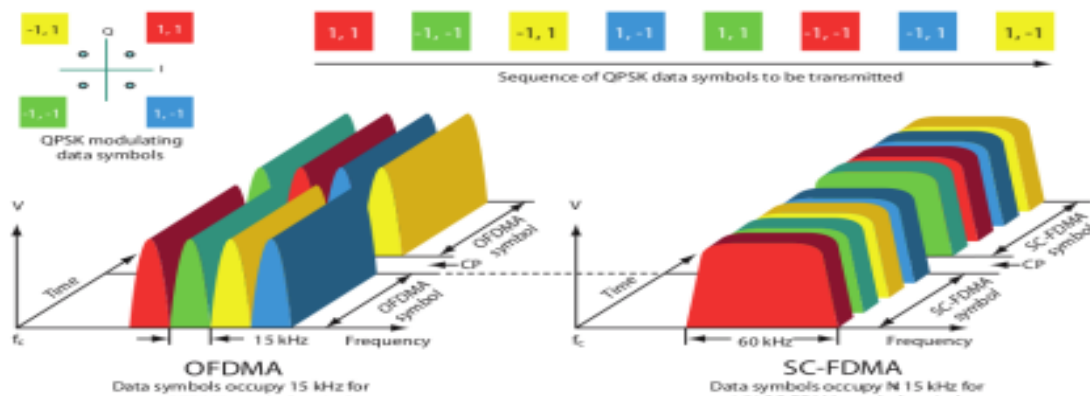


Figura 10: Confronto tra OFDMA e SC-FDMA

SC-FDMA trasmette i quattro simboli dati della QPSK in serie, ogni simbolo occuperà una banda di $N \times 15$ KHz. Dal punto di vista dell'assegnazione delle sottoportanti per l'accesso all'utente ci sono due differenti approcci: il **SC-FDMA localizzato** (Localized FDMA o LFDMA) ed il **SC-FDMA distribuito**.

Nell'approccio LFDMA ogni terminale usa per trasmettere un insieme di sottoportanti adiacenti. In sostanza è come se a ciascun utente venisse assegnata una specifica porzione di banda per la comunicazione con la stazione radio base. L'approccio alternativo è quello distribuito di cui, una possibile realizzazione, è quella denominata **Interleaved FDMA (IFDMA)**. In questo caso le singole sottoportanti assegnate a ciascun utente sono a distanza prefissata e sono intervallate con quelle assegnate agli altri utenti. Questo secondo approccio risulta maggiormente immune rispetto agli errori di trasmissione, in quanto l'informazione da trasmettere viene distribuita sull'intera banda disponibile.

Poiché questo lavoro di tesi sarà concentrato principalmente sul livello applicativo di una rete LTE, la struttura del frame, nonché la struttura dello slot, non verrà trattata ma si rimanderà alla documentazione ufficiale^[18].

3.1 Architettura

Il maggior punto di forza della rete LTE risiede nell'EPC il quale, sfruttando e migliorando le architetture di rete già esistenti, permette una semplificazione nella consegna del traffico dati. Le architetture GSM sono definite circuit switching, ovvero ogni volta che si vuole stabilire una connessione bisognerà dedicare alcune risorse tra chi chiama e chi riceve la chiamata (caso VoIP), generalmente queste reti fanno riferimento a chiamate telefoniche o

a brevi messaggi sms.

L'evoluzione del GSM è il GPRS ovvero una rete packet switching. Con questa tecnologia i dati vengono trasportati in pacchetti senza la creazione di un apposito circuito permettendo così di avere strutture più flessibili ed efficienti. Nel GPRS la core network è composta da una parte relativa alla commutazione di pacchetto e una relativa alla commutazione di circuito, quest'ultima ereditata dal GSM.

Dal GPRS si è passati al UMTS (3G). Quando il 3GPP decise di perfezionare le reti 3G stabili di usare come protocollo di trasporto dei servizi l'**Internet Protocol (IP)** e quindi si abbandona il concetto di reti a commutazione di circuito concentrandosi esclusivamente su packet switching ereditate dall'UMTS.

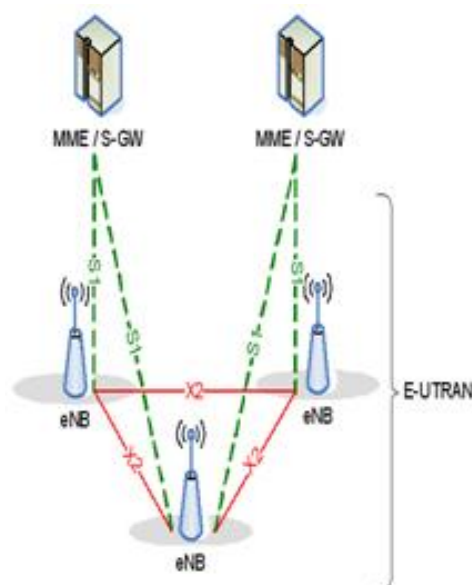


Figura II: Evolved NodeB

L'LTE ha una architettura di rete semplificata rispetto all'UMTS. La rete di accesso è costituita da un unico elemento l'**Evolved NodeB (eNB)** che include tutte quelle funzionalità che in UMTS erano gestite separatamente dal NodeB e dal Radio Network Controll (RNC).

Come già detto, in LTE tutti i dati viaggiano su protocolli a pacchetto, questo permette di avere una core network con struttura unificata senza alcuna distinzione tra il dominio a pacchetto e quello a circuito. Inoltre, tutti i nodi di rete sono interconnessi tramite interfacce standardizzate in modo da consentire l'interoperabilità tra hardware realizzato con tecnologie diverse.

L'E-UTRAN è costituita unicamente da eNB interconnessi tramite l'interfaccia X2, mentre gli MME saranno connessi tramite l'interfaccia S1 agli eNB.

Il compito dell'E-UTRAN è la gestione delle operazioni relative alla trasmissione dei segnali sul canale radio e possono riassumersi in quattro funzionalità principali:

- **Radio Resource Management**: si occupa di tutte le funzioni relative alla gestione dei bearer, come ad esempio la gestione delle risorse radio, il controllo della mobilità, lo scheduling e l'allocazione dinamica delle risorse.
- **Header compression**: questa funzione si occupa di comprimere l'intestazione dei pacchetti IP in modo da ridurre quanto più possibile il traffico di segnalazione. Questo è molto importante soprattutto per i pacchetti di piccole dimensioni, come ad esempio quelli VoIP.
- **Security**: tutti i dati trasmessi sul canale radio vengono opportunamente criptati e la gestione della sicurezza prevede non solo la cifratura dei dati ma anche l'autenticazione di utente e rete così come il controllo di integrità delle unità informative.
- **Connectivity to the EPC**: questa funzione si occupa di gestire i messaggi di segnalazione verso i nodi delle CN, in particolare verso il MME e verso il S-GW.

Questa struttura di rete semplificata permette di ridurre l'interazione tra i vari layer, diminuendo quindi la latenza e la quantità di dati di segnalazione. A causa dell'assenza del RNC, l'LTE non supporta meccanismi di soft/softer handover, caratteristici dell'UMTS, quindi quando un terminale si sposterà da una cella ad un'altra gestite da due diversi eNB, saranno necessari meccanismi di protezione dei dati durante la procedura di handover. Per una maggiore flessibilità l'eNB può essere connesso a più MME/S-GW, che possono gestire più efficacemente il traffico degli UE serviti dall'eNB in esame.

Considerando l'architettura di rete LTE (figura 12) possiamo schematizzare le funzionalità dei vari blocchi nel seguente modo:

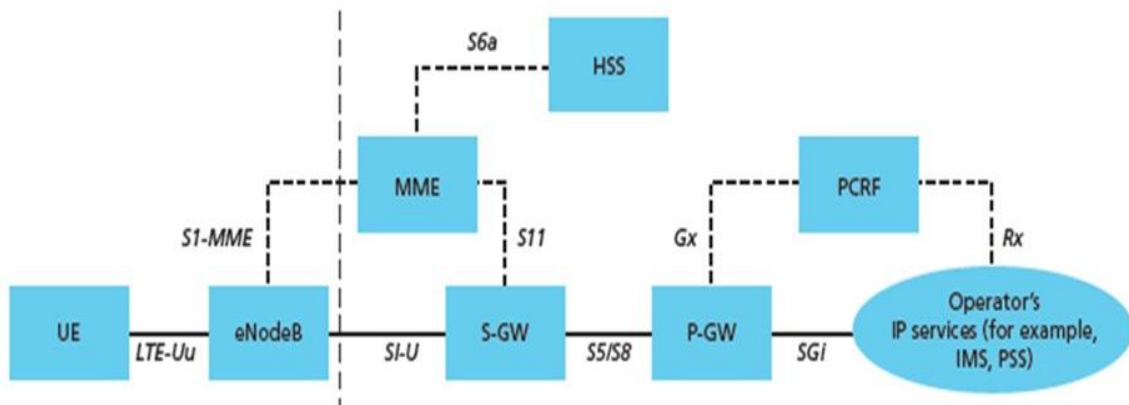


Figura 12: EPS (Evolved Packet System) = E-UTRAN (Evolved Terrestrial Radio Access Network) + EPC (Evolved Packet Core)

L'eNB si occupa di^[15]:

- Functions for Radio Resource Management: Radio Bearer Control, Radio Admission Control, Connection Mobility Control, Dynamic allocation of resources to UEs in both uplink and downlink (scheduling);
- IP header compression and encryption of user data stream;
- Selection of an MME at UE attachment when no routing to an MME can be determined from the information provided by the UE;
- Routing of User Plane data towards Serving Gateway;
- Scheduling and transmission of paging messages (originated from the MME);
- Scheduling and transmission of broadcast information (originated from the MME or O&M);
- Measurement and measurement reporting configuration for mobility and scheduling;
- Scheduling and transmission of PWS (which includes ETWS and CMAS) messages (originated from the MME);
- CSG handling.

La **Core Network** si occupa del trasferimento dei dati verso le reti a pacchetto esterne. I principali nodi logici che la costituiscono sono:

Home Subscriber Server (HSS): Si tratta di un database con tutte le informazioni utili per la gestione di un utente mobile. In particolare la corrispondenza tra le identità temporanee assegnata all'UE e l'identità dell'utente stesso, il profilo di QoS sottoscritto, le reti PDN a cui si può connettere e l'identità della MME presso cui è registrato. L'HSS include anche

l'Authentication Center (AuC) che si occupa di generare le chiavi per la cifratura dei dati e per la mutua autenticazione dell'utente e della rete.

Serving Gateway (S-GW): si tratta del nodo di interfaccia con la rete di accesso E-UTRAN e con le altre reti 3GPP (tipo UMTS/GPRS). Si occupa della gestione della mobilità di un terminale mobile che si sposta da un eNB ad un altro. Inoltre, memorizza i pacchetti di un UE nello stato idle e gestisce il download dei pacchetti durante le operazioni di paging necessarie per ristabilire una connessione tra UE e CN. Come riportato nella documentazione ufficiale, i S-GW ha le seguenti funzioni^[16]:

- The local Mobility Anchor point for inter-eNB handover;
- Mobility anchoring for inter-3GPP mobility;
- E-UTRAN idle mode downlink packet buffering and initiation of network triggered service request procedure;
- Lawful Interception;
- Packet routing and forwarding;
- Transport level packet marking in the uplink and the downlink;
- Accounting on user and QCI granularity for inter-operator charging;
- UL and DL charging per UE, PDN, and QCI.

PDN Gateway (P-GW): si occupa dell'allocazione degli indirizzi IP agli UE e della gestione dei flussi informativi sulla base di specifiche QoS e sulle informazioni fornite dal PCRF. Inoltre, svolge le funzioni di interfaccia con le reti a pacchetto esterno (non3GPP). Ha quindi le seguenti funzioni:

- Per user based packet filtering (by e.g. deep packet inspection);
- Lawful Interception;
- UE IP address allocation;
- Transport level packet marking in the downlink;
- UL and DL service level charging, gating and rate enforcement;
- DL rate enforcement based on APN-AMBR;

Mobility Management Entity (MME)^[16]: è il principale nodo di controllo della core network. Gestisce la segnalazione tra UE e CN e si occupa delle procedure di instaurazione

della connessione per un terminale che si connette per la prima volta alla rete. Inoltre tiene traccia della posizione del terminale mobile, gestisce le operazioni di paging e si occupa dell'assegnazione delle identità temporanee ai singoli UE. In sintesi, questo si occupa di:

- NAS signalling;
- NAS signalling security;
- AS Security control;
- Inter CN node signalling for mobility between 3GPP access networks;
- Idle mode UE Reachability (including control and execution of paging retransmission);
- Tracking Area list management (for UE in idle and active mode);
- PDN GW and Serving GW selection;
- MME selection for handovers with MME change;
- SGSN selection for handovers to 2G or 3G 3GPP access networks;
- Roaming;
- Authentication;
- Bearer management functions including dedicated bearer establishment;
- Support for PWS (which includes ETWS and CMAS) message transmission;
- Optionally performing paging optimisation.

Policy Control and Charging Rules Function (PCRF): il PCRF è il nodo responsabile del controllo delle QoS. Gestisce l'assegnazione dei flussi dati alle diverse classi e decide come il Policy Control Enforcement Function (PCEF) che risiede nel P-GW dovrà gestire i flussi dati rispettando gli accordi sottoscritti con gli utenti.

Per una maggiore comprensione torna utile rappresentare (figura 13) in giallo i nodi logici, in blu i layer relativi al segnale RF e in bianco i blocchi di controllo.

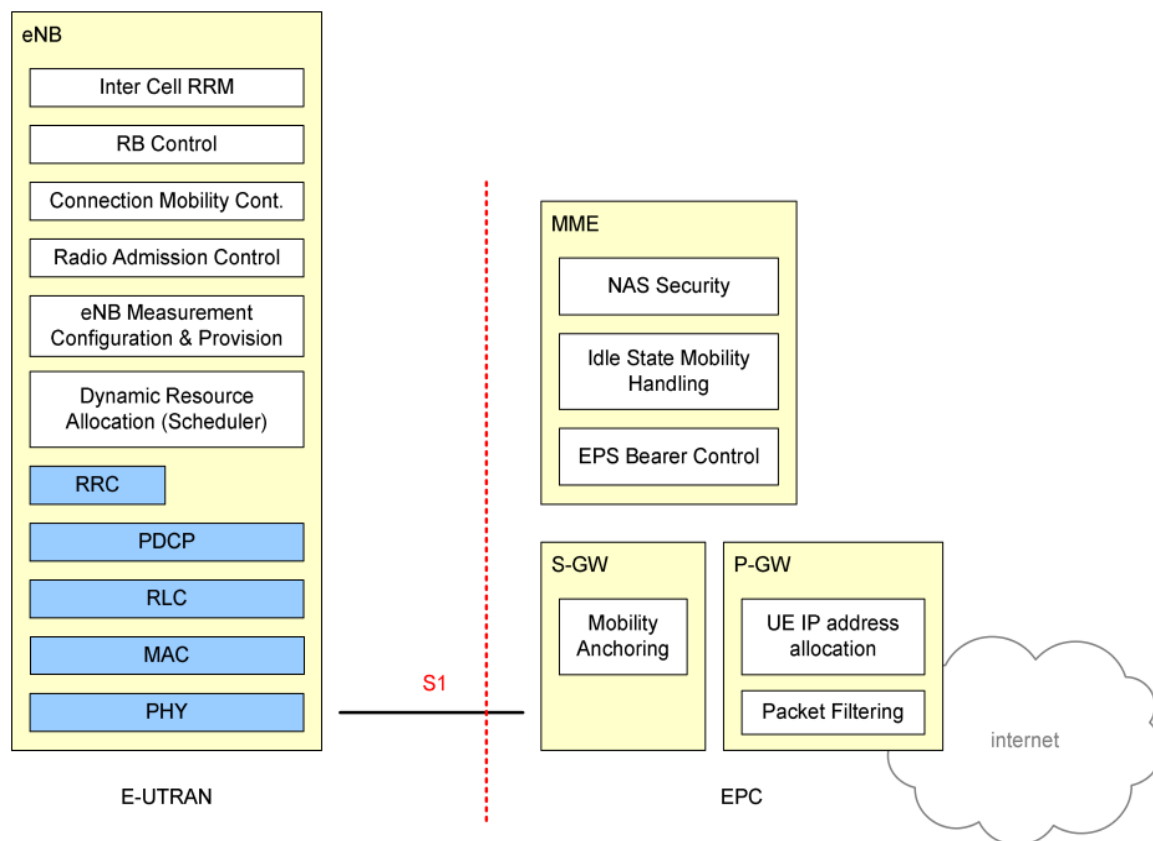


Figura 13: Blocchi funzionali tra E-UTRAN e EPC

Oltre ad una riduzione dei nodi necessari al trasporto del traffico, l'EPC separa la user plane dalla control plane. La User Plane si occupa di funzioni quali: Broadcast, Paging, gestione della connessione RRC del EPS Bearer, controllo del RB, NAS. Una descrizione approfondita sulle varie funzionalità dei layer è ampiamente trattata nella documentazione ufficiale^[15].

3.2 Collegamento dati

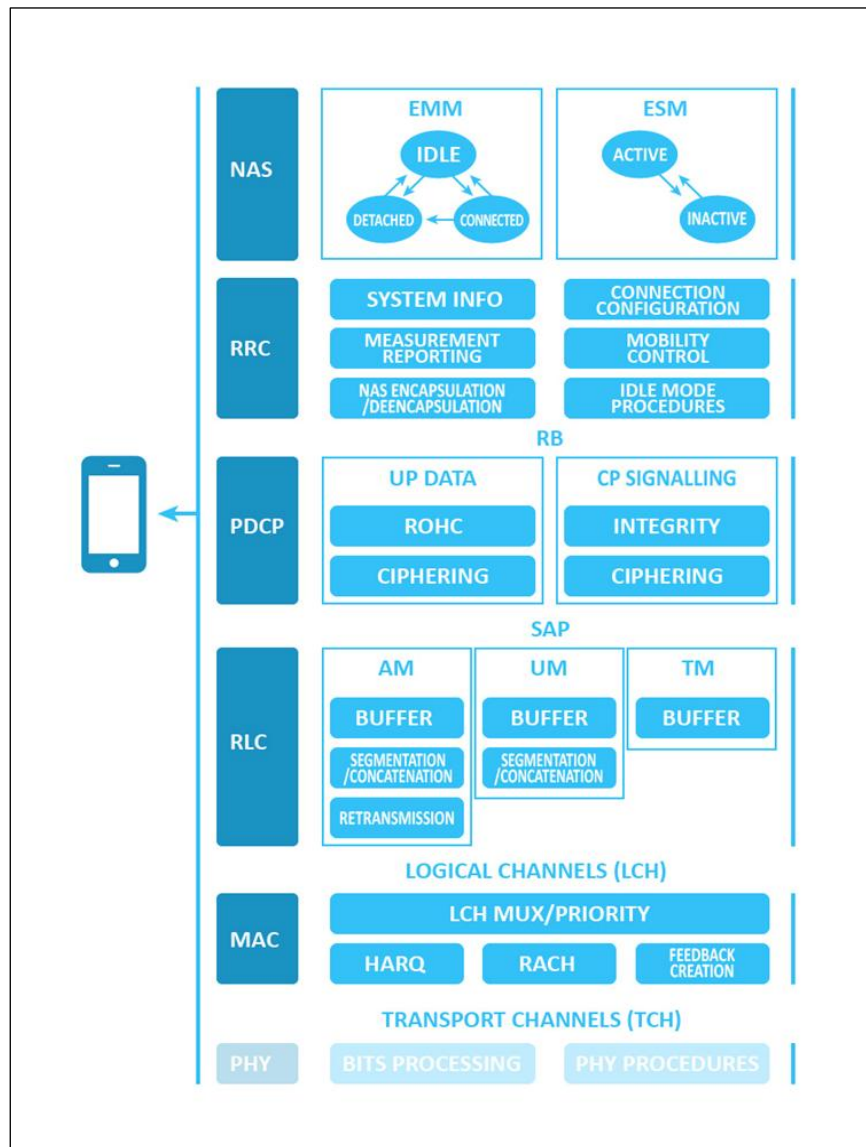


Figura 14: Layer e Procedure

I punti d'accesso alla rete presenti tra strato fisico e il MAC forniscono i **canali di trasporto**, mentre i punti d'accesso di servizio tra il MAC e RLC forniscono i **canali logici**. I **Radio Bearer**, invece, vengono definiti alla fine dello strato PDCP.

L'E-UTRAN fornisce le funzionalità Automatic Repeat-reQuest (ARQ), le quali permettono la correzione degli errori tramite ritrasmissioni riconosciute a livello 2 e Hybrid Automatic Repeat-reQuest HARQ che assicura una corretta consegna dei dati tra

entità paritarie a livello fisico. L'HARQ è un canale con protocollo *stop and wait* con ritrasmissioni asincrone in downlink e in maniera opposta con ritrasmissioni sincrone per quanto riguarda l'uplink.

3.2.1 Canali Fisici

Vengono utilizzati per trasportare l'informazione al soprastante strato MAC.

I Canali Fisici In Downlink sono:

Physical Broadcast Channel (PBCH): fornisce le informazioni di sistema per tutti gli UE che tentano di accedere al canale, queste informazioni vengono contenute nel Master Information Block (MIB) e usa uno schema di modulazione QPSK.

Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH): specifica il tipo di segnale ricevuto dal UE, inoltre indica il simbolo OFDM usato dal PDCCH. Ogni PCFICH trasmesso contiene informazioni relative al Control Format Indicator (CFI).

Physical Downlink Control Channel (PDCCH): il suo compito principale fa riferimento alle procedure di scheduling. Il PDCCH genera un messaggio Downlink Control Information (DCI) che porta le informazioni relative a un UE o gruppo di UE.

Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH): è un canale fisico di report per lo status di ARQ quali il HARQ ACK/NACK, ovvero indica se un determinato blocco di informazioni è stato ricevuto correttamente.

I Canali Fisici In Uplink sono:

Physical Uplink Control Channel (PUCCH): fornisce una serie di segnali di controllo, quali ad esempio lo Scheduling Requests (SR).

Physical Uplink Shared Channel (PUSCH): è la controparte del PDSCH.

Physical Random Access Channel (PRACH): è il canale utilizzato nelle funzioni di accesso random. Costituisce l'unica trasmissione non sincrona per l'UE in LTE. Non è sincronizzato poiché i ritardi di propagazione in downlink e uplink sono noti al PRACH quando questo è in uso.

3.2.2 Canali di Trasporto

Questi possono essere distinti in base alla loro funzione, ovvero in canali di trasporto per il Downlink e Uplink.

I *Canali di Trasporto in Downlink* sono:

Broadcast Channel (BCH): è usato dalle stazioni base per fornire informazioni di segnalazione alla stazione radio mobile. Quest'ultima ha bisogno di tali informazioni per trovare una rete, sincronizzarla e conmetterla ad esso.

Downlink Shared Channel (DL-SCH): è il canale principale per i trasferimenti dati in downlink. Viene usato da diversi canali logici.

Paging Channel (PCH): il suo utilizzo principale è quello di mandare un avviso al terminale mobile e indica l'arrivo di una chiamata. Praticamente è un canale logico che invia messaggi alla stazione mobile.

Multicast Channel (MCH): è un canale di trasmissione usato per trasferire informazioni da una sorgente a uno o più dispositivi che operano all'interno di un'area di copertura radio.

I *Canali Di Trasporto Uplink* sono:

Uplink Shared Channel (UL-SCH): è un canale trasmissivo che viene usato per il trasporto dati degli utenti da una o più stazioni mobili che possono trasmettere nel canale.

Random Access Channel (RACH): è usato per trasferire le informazioni di controllo da un terminale mobile alla rete, ad esempio per l'accesso iniziale per l'instaurazione della connessione o per aggiornamenti della posizione all'interno dell'area. Può anche essere usato per il trasporto di piccoli e non frequenti pacchetti dati proveniente dall'utente.

3.2.3 Canali Logici

Possono essere suddivisi in due classi, ovvero canali di controllo e di traffico.

I *canali di controllo* sono:

Broadcast Control Channel (BCCH): questo canale di controllo fornisce informazioni di sistema per tutti i terminali mobili collegati all'eNB.

Paging Control Channel (PCCH): è un canale di controllo usato per informazioni di

paging quando si sta cercando una unità nella rete.

Common Control Channel (CCCH): usato per informazioni d'accesso casuali, ad esempio per azioni che includono l'instaurazione di una connessione.

Multicast Control Channel (MCCH): viene utilizzato per le informazioni necessarie per la ricezione multicast.

Dedicated Control Channel (DCCH): è utilizzato per trasportare informazioni di controllo specifiche dell'utente, come ad esempio per azioni di controllo, comprendendo il controllo di potenza, passaggi di consegne, ecc.

I *canali di traffico* sono:

Dedicated Traffic Channel (DTCH): usato per la trasmissione dei dati dell'utente.

Multicast Traffic Channel (MTCH): questo canale invece trasmette i dati di più utenti (multi cast).

A questo punto può tornare utile vedere schematicamente come i canali logici, di trasporto e fisici siano connessi tra di loro, distinguendo il caso uplink dal downlink.

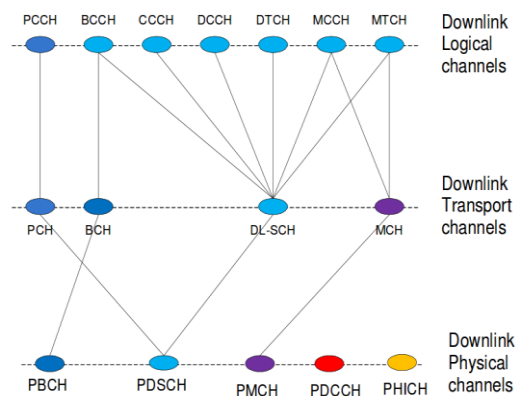


Figura 15: Canali in Downlink

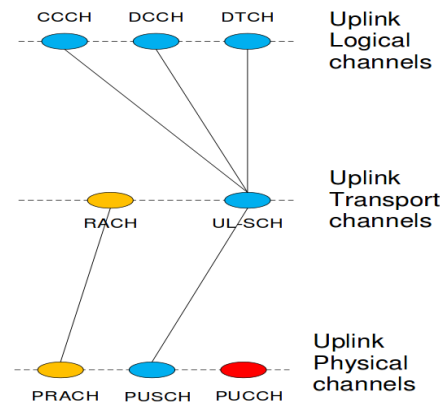


Figura 16: Canali in Uplink

3.3 Quality of Service e Bearers

Supponiamo che un terminale radio mobile connesso alla rete LTE stia utilizzando degli applicativi quali ad esempio potrebbero essere la visualizzazione di un video su YouTube. Supponiamo che durante lo streaming video l'utente riceva una chiamata vocale, viene ovvio pensare che durante la ricezione di una telefonata, l'utente non sia interessato allo streaming video, ma sia maggiormente interessato ad avere una comunicazione "fluida". Quindi sarà necessario un sistema che permetta la migliore allocazione di risorse in base al servizio di rete utilizzato. I bearer sono un set di configurazioni di rete che permettono di garantire la qualità del servizio (QoS) attraverso un "sistema di priorità".

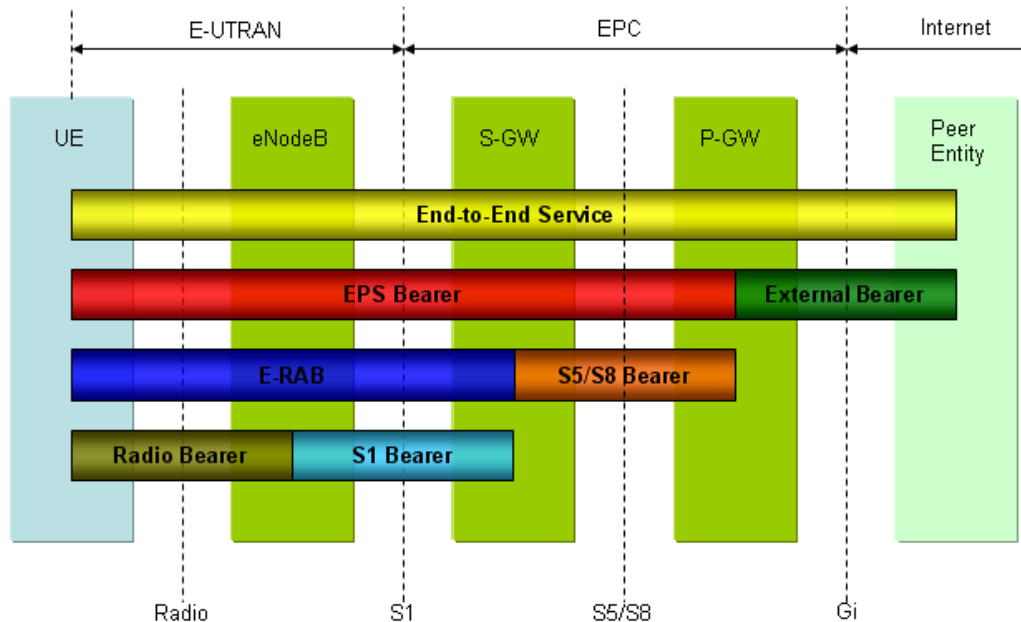


Figura 17: Bearer e interfacce utilizzate

Come si può notare in figura 17, i bearer interessano l'intera architettura di rete, ovvero da E-UTRAN a Internet.

Per capire come sia stato implementato il QoS in reti LTE bisogna spiegare i tipi di bearer esistenti e le rispettive proprietà.

Esistono due classi di bearer:

- **Default Bearers:** questi vengono attivati ogni volta che un UE si connette con il PDN Gateway (P-GW) e rimangono attivati finché la connessione tra i due rimane attiva. Potrebbe verificarsi il caso in cui un UE debba connettersi con due PDN, allora in questo caso bisognerà attivare due default bearer. Il primo verrà creato nella procedura di Attach

mentre il secondo farà riferimento alla procedura di Activate del bearer. Quando il secondo default bearer sarà abilitato, questo dipenderà unicamente dall'UE. Ogni Default Bearer sarà associato ad un indirizzo IP.

- **Dedicate Bearers:** sono tutti gli ulteriori bearer attivati dall'EPS durante la stessa connessione.

Una suddivisione schematica della gerarchia dei bearer, oltre al Default e Dedicated, è riportato qui di seguito dove vengono suddivisi in base al rispettivo bit rate.

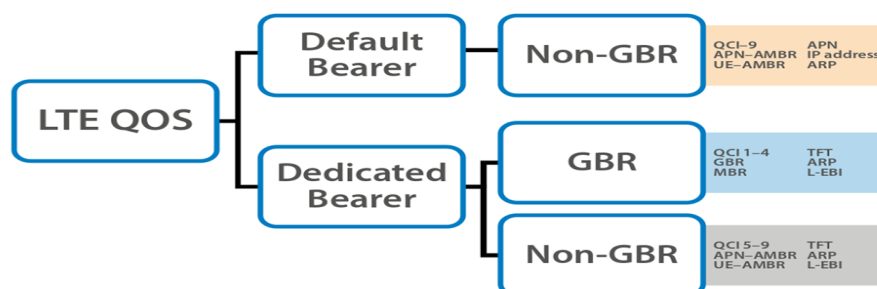


Figura 18: Suddivisione Bearer

Minimum Guaranteed Bit Rate (GBR): questi bearer hanno risorse dedicate durante tutta la durata della trasmissione. Sono quindi dedicati a flussi informativi ad elevata priorità come quelli voce (VoIP). Garantiscono alti data rate, ritardi e tassi d'errore contenuti. Per default, il GBR garantisce un bit rate minimo ma in alcuni casi sarà necessario stabilire e definire un bit rate massimo Maximum Bit Rate (MBR). Sia l'uplink che il downlink vengono trattati nello stesso modo.

Non-GBR: questi bearer possono essere utilizzati per applicazioni che non richiedono bitrate particolarmente elevati, come ad esempio web browsing o trasferimenti FTP. Non ci sono risorse allocate per questi bearer.

Ogni bearer è descritto da due parametri: **QoS Class Identifier (QCI)** e **Allocation and Retention Priority (ARP)**.

Ogni QCI è caratterizzato da: un livello di priorità, un ritardo e un massimo tasso di perdita di pacchetti accettabile. Vi sono 9 possibili QCI standardizzati in LTE (figura 19) che permettono di rendere uniforme la gestione del traffico tra i vari operatori. Da notare che il VOIP Call è quello a priorità maggiore.

QCI	Bearer Type	Priority	Packet Delay	Packet Loss	Example
1	GBR	2	100 ms	10	VOIP Call
2		4	150 ms	10	Video Call
3		3	50 ms		Online Gaming (Real Time)
4		5	300 ms	10	Video Streaming
5	Non-GBR	1	100 ms		IMS Signaling
6		6	300 ms		Video, TCP based services e.g. email, chat, ftp etc.
7		7	100 ms	10	Voice, Video, Interactive gaming
8		8	300 ms	10	Video, TCP based services e.g. email, chat, ftp etc.
9					

Figura 19: Quality of Service Identifier

Il parametro ARP è utilizzato per la gestione della procedure di accesso nel caso di congestioni della cella e influisce sulla priorità con cui vengono instaurate le connessioni dei vari utenti. Tuttavia, una volta che la connessione è stata instaurata, questo parametro non ha alcuna influenza sulla gestione del flusso informativo da parte della rete.

3.4 Handover

3.4.1 Panoramica generale

Le tecnologie radiomobili cellulari permettono l'utilizzo di servizi distribuiti nel territorio, la delocalizzazione implica necessariamente problemi legati alla copertura a radio frequenze per l'utente radiomobile. Questa non può essere omogenea in tutte le regioni geografiche, infatti è naturale pensare che un ambiente urbano richieda maggiori coperture rispetto ad uno meno densamente popolato, ciò è legato sia a problemi relativi alla compatibilità elettromagnetica che economici. Anche in un ambiente urbano, spesso la copertura RF risulta non omogeneamente distribuita, infatti potrebbero verificarsi casi in cui una zona abbia copertura LTE mentre poco distante, tale copertura venga meno. Questo potrebbe verificarsi ad esempio nel passaggio da una rete LTE a una rete 3G. Analogamente, un dispositivo radio mobile potrebbe risentire della perdita di segnale, ad esempio nel passaggio da un ambiente outdoor a indoor. Sarà così necessario un meccanismo che permetta la gestione di questi eventi, queste procedure sono note come handover.

Gli handover possono essere classificati nel modo seguente:

1. In base ai sistemi coinvolti: **inter system** quando vengono coinvolte due tecnologie diverse per l'accesso al mezzo fisico tipo da 3G a 2G e viceversa. Mentre si parla di **intra system** handover quando la tecnologia rimane invariata, tipo da 3G a 3G.
2. In base alle modalità: possono essere **iter mode** quando non variando la tecnologia, varia la tecnica di modulazione al variare della cella. Vengono definiti handover **intra mode** quando pur variando la cella non varia la modulazione.
3. In base alle frequenze coinvolte: si parla di handover **intra frequency** quando le celle coinvolte operano alla stessa frequenza, mentre, se varia la frequenza, si farà riferimento ad **inter frequency** handover.
4. In base alla durezza: in questo caso si parlerà di **hard** handover nel caso in cui si interrompa il collegamento prima dell'instaurazione di uno nuovo. Mentre si farà riferimento a **soft** e **softer** handover quando l'UE sarà connesso alla rete UTRAN (tipico dell'UMTS) tramite più canali, allora con una diminuzione del segnale proveniente dal canale si potrebbe passare ad una nuova cella (soft) e ci si potrebbe agganciare ad una nuova portante operante nella stessa cella (softer).

Per quanto riguarda LTE, i meccanismi di handover agiscono in modo hard e vengono gestiti dall'eNB. Ai fini dello sviluppo di questa tesi, quello che interessa è capire come questi agiscano sull'architettura di rete, in particolar modo come questi influiscano sullo streaming video. I processi di handover verranno analizzati in laboratorio tramite un box anecoico. Essendo le casistiche di handover varie e dipendenti da un contesto specifico si farà maggiore attenzione agli scenari valutabili in laboratorio in base alle tecnologie messe a disposizione. Quindi ad esempio gli Inter-MME handover non verranno analizzati.

3.4.2 Intra-LTE Handover (X2)^[17]

Questo tipo di HO (handover) riguarda l'interfaccia X2 ovvero quella relativa alle comunicazioni tra due eNB, il sorgente (S-eNB) e la destinazione (T-eNB). Si sta facendo riferimento al caso in cui un terminale si muova tra due celle servite dallo stesso MME ma da eNB diversi.

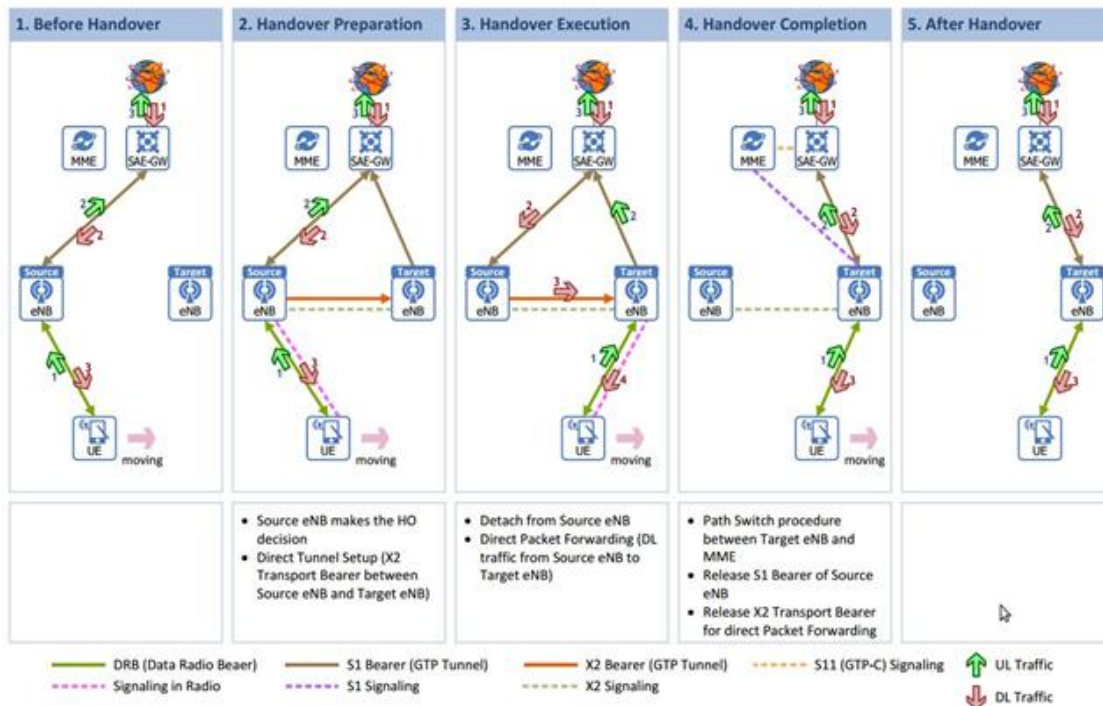


Figura 20: X2 handover

Questa procedura di HO non richiede l'utilizzo dell'EPC quindi tutti i messaggi verranno scambiati tra i nodi. L'UE è connesso alla rete e sta effettuando traffico dati sia in upload che in download, la rete manderà il messaggio **RCC CONNECTION RECONFIGURATION**, ovvero le informazioni necessarie per misurare i parametri di rete utili per la procedura di HO. Infatti va ricordato che le procedure di HO si attivano su soglie in potenza, ovvero con un confronto tra la potenza dei segnali trasmessi dall'eNB e inviati all'UE, ovvero l'UE si aggancerà alla cella con potenza di segnale maggiore. A questo punto l'UE manderà un messaggio di **MEASUREMENT REPORT** e S-eNB deciderà se rimanere agganciato o meno alla cella corrente. Questa scelta avverrà attraverso il **RESOURCE STATUS RESPONSE**. Nel caso si decida di cambiare eNB, S-eNB invierà un **HANDOVER REQUEST** al T-eNB, questo permetterà di preparare la rete alla procedura di handover e quindi si attiveranno tutte le operazioni di **UE Context**, quali il **Security Context** e **RB Context**. Il T-eNB farà quindi un check sulle risorse disponibili e, in caso di esito positivo, rinvierà un **HANDOVER REQUEST ACKNOWLEDGE** al S-eNB attivando tutte le operazioni a livello di RRC. In questa fase saranno previste anche le operazioni relative alla sicurezza sul T-eNB, così come un nuovo RACH o parametri quali il SIB ecc.

Il S-eNB per effettuare l'handover invierà quindi un messaggio a livello RCC ovvero un

RRC CONNECTION RECONFIGURATION così come un **mobilityControlInformation**, attivando quindi le procedure relative alla cifratura dell'informazione.

A questo punto, S-eNB invierà un **eNB STATUS TRANSFER** al T-eNB per trasmettere lo status **PDCP** e **HFN** dei E-RAB. In questa fase si inizializzeranno nel T-eNB i bearer sui dati e, oltre a questo, l'UE cercherà di accedere al T-eNB attraverso le **Random Access Procedure**. Se questa procedura ha esito positivo allora verrà inviato al T-eNB un **RRC CONNECTION RECONFIGURATION COMPLETE**. A questo punto il T-eNB invierà all'MME un **PATH SWITCH REQUEST** per informarlo che la UE ha cambiato cella, comprese anche le informazioni relative al **TAI+ECGI** del target. L'MME invierà un **MODIFY BEARER REQUEST** al **SGW**, se in questa fase il PDN GW richiede informazioni riguardo la localizzazione dell'UE, l'MME includerà anche un messaggio con queste informazioni. Quindi il SGW invierà dati in downlink all'eNB usando gli indirizzi e i nuovi **TEID** e provvederà al **MODIFY BEARER RESPONSE** dell'MME. A questo punto il SGW manderà dei segnali per concludere la comunicazione con S-eNB, MME comunicherà con T-eNB attraverso il **PATH SWITCH REQ ACK** per informare sulla conclusione della procedura di handover. Quindi attraverso il **UE CONTEXT RELEASE**, S-eNB provvederà a liberare le risorse di rete.

Quanto appena illustrato è solo una parte della messaggistica di handover ed è stato introdotto per fornire una panoramica della messaggistica scambiata tra i vari layer. Ai nostri fini, quello che sarà di maggiore interesse è capire come le condizioni radio influenzino lo streaming video, in altre parole si cercherà di trovare un legame tra qualità video percepita dall'utente e parametri di rete che portino a quella specifica risoluzione.

3.5 Parametri di rete

Di seguito vengono riportati alcuni dei parametri di rete utili nelle fasi di analisi delle condizioni radio. Va fatto notare che alcuni di questi fanno riferimento al particolare terminale utilizzato, come ad esempio il valore RSRP che dipende dalla sensibilità del circuito in ricezione del **Device Under Test (DUT)**. Infatti se una misura nel box anecoico ha fatto rilevare un valore di RSRP pari a -100dBm, variando il terminale e mantenendo le stesse condizioni di propagazione, potrebbe risultare un valore di RSRP differente.

Physical Throughput Physical può essere definito come il throughput trasmesso a livello fisico ed è misurato in Kbit/s.

Reference signal received power (RSRP)^[22]

E' la media in potenza di tutte le sottoportanti incluse nel resource block ricevute dal terminale e fornisce un'indicazione sul livello di potenza della cella LTE a cui il terminale è agganciato. Come da specifica:

“is defined as the linear average over the power contributions (in [W]) of the resource elements that carry cell-specific reference signals within the considered measurement frequency bandwidth. For RSRP determination the cell-specific reference signals R0 according TS 36.211 [3] shall be used. If the UE can reliably detect that R1 is available it may use R1 in addition to R0 to determine RSRP. The reference point for the RSRP shall be the antenna connector of the UE. If receiver diversity is in use by the UE, the reported value shall not be lower than the corresponding RSRP of any of the individual diversity branches.

Applicable for:

- *RRC_IDLE intra-frequency;*
- *RRC_IDLE inter-frequency;*
- *RRC_CONNECTED intra-frequency;*
- *RRC_CONNECTED inter-frequency”.*

RSSI^[22]

E' un parametro che permette di valutare l'entità del rumore sulla portante riferita allo specifico resource block.

“The received wide band power, including thermal noise and noise generated in the receiver, within the bandwidth defined by the receiver pulse shaping filter. The reference point for the measurement shall be the antenna connector of the UE”.

Applicable for:

- *RRC_IDLE inter-RAT,*
- *RRC_CONNECTED inter-RAT*

Reference Signal Received Quality (RSRQ)^[22]

E' un parametro che indica le condizioni radio calcolato attraverso RSRP e RSSI e fornisce un'indicazione sulla qualità della cella LTE su cui il terminale è agganciato (interferita da altre celle o “rumorosa”):

$$RSRQ = RB_{dB} \times \frac{RSRP}{RSSI} ;$$

Dove con RB è indicata la quantità di banda che può essere schedulata nell'eNB e allocata per UE.

Ovvero come da specifica: “*is defined as the ratio $N \times RSRP / (E\text{-UTRA carrier RSSI})$, where N is the number of RB's of the E-UTRA carrier RSSI measurement bandwidth. The measurements in the numerator and denominator shall be made over the same set of resource blocks. E-UTRA Carrier Received Signal Strength Indicator (RSSI), comprises the linear average of the total received power (in [W]) observed only in OFDM symbols containing reference symbols for antenna port 0, in the measurement bandwidth, over N number of resource blocks by the UE from all sources, including co-channel serving and non-serving cells, adjacent channel interference, thermal noise etc. The reference point for the RSRQ shall be the antenna connector of the UE. If receiver diversity is in use by the UE, the reported value shall not be lower than the corresponding RSRQ of any of the individual diversity branches.*

Applicable for:

- RRC_IDLE intra-frequency,
- RRC_IDLE inter-frequency,
- RRC_CONNECTED intra-frequency,
- RRC_CONNECTED inter-frequency”.

Signal-to-Interference plus Noise Ratio (SINR):

Misura il valore segnale rumore totale ricevuto dal dispositivo incluso anche il rumore interferente fuori dal resource block.

Channel Quality Indicator (CQI):

Il CQI è un indicatore dello qualità della comunicazione a RF, si distinguono due tipi di CQI aperiodici e periodici. Ad ogni livello di CQI corrisponde una specifica modulazione così come un specifico rate di codifica.

Ai valori di CQI compresi tra 1 e 6 verranno associate modulazioni di tipo QPSK da 7 a 9 di tipo 16QAM e da 10 a 15 64QAM come si può notare in figura 21.

CQI	Modulazione	Code Rate
1	QPSK	0.076
2	QPSK	0.12
3	QPSK	0.19
4	QPSK	0.3
5	QPSK	0.44
6	QPSK	0.59
7	16-QAM	0.37
8	16-QAM	0.48
9	16-QAM	0.6
10	64-QAM	0.45
11	64-QAM	0.55
12	64-QAM	0.65
13	64-QAM	0.75
14	64-QAM	0.85
15	64-QAM	0.93

Figura 21: Tabella CQI

Le condizioni di copertura radio possono essere sintetizzate attraverso i parametri riportati in figura 22, notiamo che a un livello di segnale classificato come buono corrisponde un valore di RSRP compreso tra -80 e -90 dBm.

		RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SINR (dB)
RF Conditions	Excellent	>=-80	>=-10	>=20
	Good	-80 to -90	-10 to -15	13 to 20
	Mid Cell	-90 to -100	-15 to -20	0 to 13
	Cell Edge	<=-100	<-20	<=0

Figura 22: Sintesi parametri di rete

Le analisi del comportamento del protocollo DASH in reti radiomobili sia nel box anecoico che in camera riverberante, sono state effettuate tenendo a mente questi parametri, valutando quando possibile il comportamento del client video partendo da una condizione iniziale a RF caratterizzata da un livello di RSRP pari a -100 dBm.

4. Test in laboratorio

4.1 Qualità video percepita

Nella fase di testing del protocollo DASH si è cercato di definire una relazione tra alcuni dei parametri di rete LTE e il comportamento del DASH inteso come la variazione della qualità del video percepita dall'utente.

Considerando una generica catena di trasmissione che va dal server di video streaming, nel quale sono racchiuse le sorgenti, al terminale radio mobile (figura 23), si possono identificare vari blocchi funzionali che andranno ad influenzare la qualità finale del video in esame.

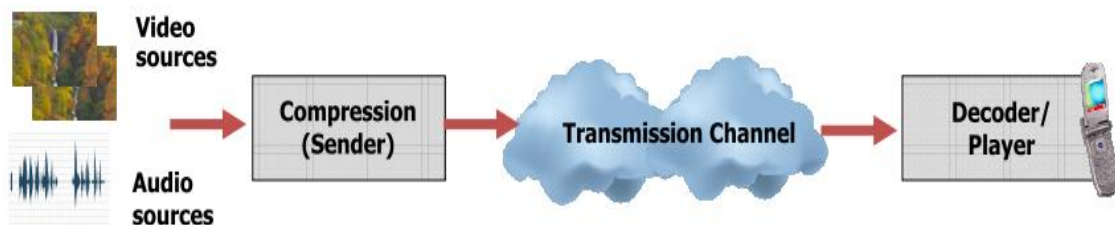


Figura 23: Catena di trasmissione

La sorgente video subirà una codifica e una compressione dell'informazione iniziale. La necessità di codifica è strettamente legata al tipo di utente al quale consegnare il flusso informativo poiché ogni client video sarà in grado di decodificare correttamente alcuni codec. La compressione è legata alla necessità di dover trasmettere la stessa informazione con il minor numero di byte "tollerabile", in modo da ridurre il tempo di impiego delle risorse di rete. E' ovvio che in base al tipo di tecnica di compressione, che sia questa a perdita di informazione (**lossy**) o senza perdita di informazione (**lossless**), si potrà rimanere prossimi il più possibile alla qualità del video sorgente.

Oltre la sorgente, l'informazione dovrà essere trasmessa attraverso un canale, in esso le cause che potrebbero portare ad una perdita di informazione sono varie e dipendono dal tipo di canale utilizzato. In generale questo introdurrà degli errori sull'informazione, i quali possono esprimersi attraverso una perdita di pacchetti dovuti ad esempio ad un livello di rumore nel canale elevato, così come potrebbero verificarsi ritardi o jitter sull'informazione. Ad ogni modo un canale trasmissivo, per quanto questo possa essere il più possibile ideale, introdurrà degli errori che andranno analizzati per ogni specifico caso.

Superato il canale, l'informazione verrà ricevuta dall'utente e, in questa fase, potrebbero verificarsi dei processi di ritrasmissione dell'informazione nel caso in cui questa sia stata notevolmente corrotta dalle condizioni di rete.

Da questo schema si può intuire come i fattori che andranno ad influenzare la qualità finale siano vari e agiscano in più punti nella catena di trasmissione. Dunque definire uno standard qualitativo non è un'operazione banale.

In questa direzione sono stati sviluppati molti studi da svariati enti tra cui l'ITU-T^{[19][20]}, in linea generale gli approcci qualitativi propongono la definizione dello standard attraverso un modello matematico universalmente valido, definendone specifici **KPI** (Key Performance Indicators) per il **QoS**.

La creazione di un modello matematico implica la scelta di specifici codificatori di sorgente così come di destinazione e sarà fondato su due approcci differenti, ovvero **Reference Model** e **No Reference Model**. Con il Reference Model si cercherà di valutare la qualità video destinazione confrontandone la perdita di informazione rispetto al video sorgente. Questo confronto avviene attraverso specifici KPI che riguarderanno l'intera catena di trasmissione. Va fatto notare che un modello come questo, oltre a non poter mai sostituire una valutazione soggettiva da parte dell'utente finale, è fortemente legata alla codifica di sorgente utilizzata, così come alle condizioni di rete. Infatti al variare della codifica potrebbe succedere che alcuni KPI possano non essere più considerati validi. Il No Reference Model farà riferimento a tutti quei casi in cui non è noto il video sorgente poiché ad esempio questo potrebbe essere un contenuto criptato, quindi ne è impossibile un confronto diretto. Questo approccio si concentra maggiormente sul lato rete valutando la perdita di informazione dovuta alle condizioni radio. Anche in questo caso la definizione di un modello universalmente valido è difficile da ottenere, poiché le condizioni radio dipendono dalla tecnologia utilizzata (LTE, 3G, WiFi, ecc), inoltre la perdita di informazione è fortemente legata al tipo di protocollo utilizzato.

La ricerca di uno standard qualitativo video è un argomento di forte interesse per molte aziende nel settore. Alcuni sviluppi in questa direzione si riferiscono ad un modello di riferimento definito attraverso specifici KPI^[10] di rete, quali ad esempio il tempo di accesso al server, il tempo di download, il tempo di freezing ecc.

In figura 24 si riporta l'esempio di un applicativo sviluppato da SwissQual, il quale considerando alcuni KPI^[10], fornisce una valutazione dettagliata della qualità video finale.

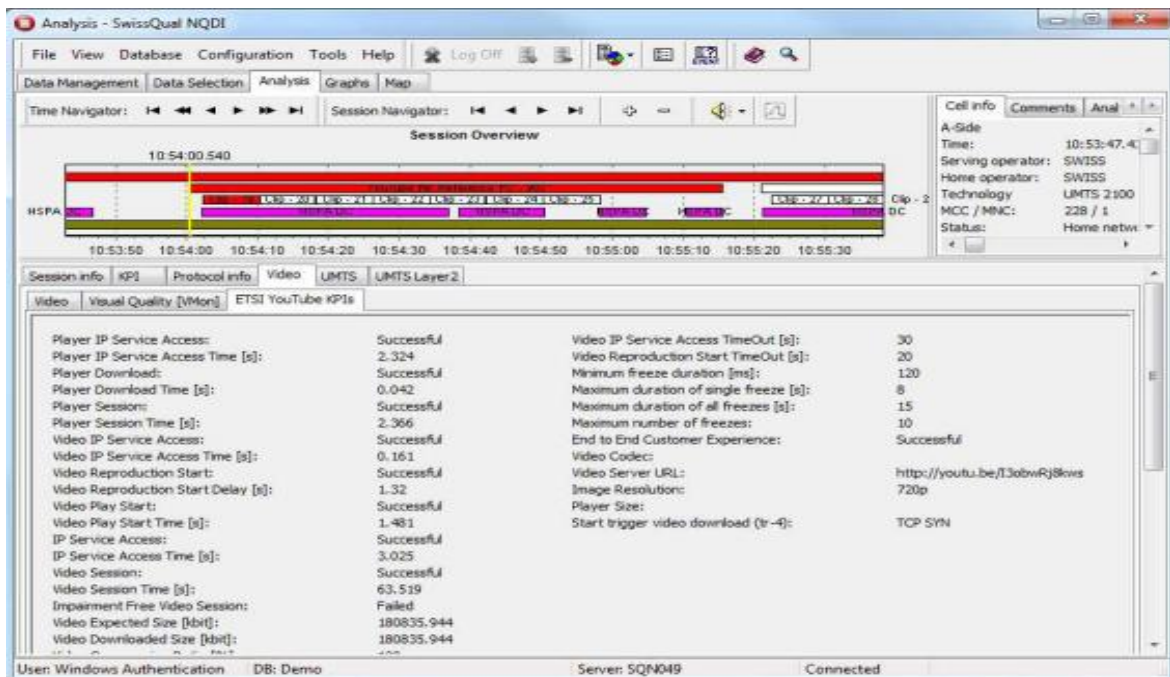


Figura 24: Software SwissQual

Nella figura successiva (figura 25) è rappresentato lo stesso software ma nel caso in cui la consegna del video avvenga attraverso un protocollo di adaptive video streaming, quale ad esempio potrebbe essere il DASH.



Figura 25: Software SwissQual nel caso di Adaptive video streaming

Come si può notare, tutti i KPI precedentemente definiti e validati non possono essere

considerati poiché il protocollo utilizzato farà riferimento a differenti configurazioni di consegna dell'informazione.

4.2 Scelta progettuale

Volendo valutare come la qualità video venga influenzata dalle condizioni di rete e avendo appurato che un modello universalmente valido, al momento, non è stato ancora definito, si è ritenuto potesse essere utile caratterizzare il flusso video DASH attraverso dei sottotitoli, i quali indicheranno istante per istante la risoluzione visualizzata dall'utente.

Sapendo che l'adattatività del flusso video in un protocollo come il DASH può essere intesa sia in termini di bitrate variabile che in pixel rappresentativi l'immagine, si è deciso di caratterizzare il video con un bitrate variabile. Questa scelta è stata influenzata dai terminali di test utilizzati. Infatti essendo caratterizzati da uno schermo mediamente da 5 pollici, una buona risoluzione video, quale potrebbe essere 2540 x 1440⁶, poco si presta ai nostri scopi poiché poco apprezzabile su uno schermo di piccole dimensioni.

Si è deciso quindi di far riferimento ai formati proposti da Google^[21] fissando la risoluzione riga colonna e variando il bitrate. Questi video sono stati allocati sul server di streaming di test al seguente indirizzo: sivtest.ddns.net/DASH/BitrateVar/.

Si è scelto di caratterizzarli con un bitrate rispettivamente di: 100k, 250k, 500k, 1000k, 2500k, 5000k e 7000k [bit/sec] e con qualità audio fissa. La scelta della non scalabilità dell'audio non consiste in una limitazione nell'analisi del protocollo di streaming. Infatti contenuti audio rilevanti (in termini di peso in byte) possono essere riscontrati nei casi di traccia dolby surround 5.1, le quali se pur significative, necessiteranno di bitrate molto minore rispetto alla risoluzione del video in HD.

Ogni video è stato caratterizzato da una lunghezza dei segmenti rispettivamente di 10 secondi e 2 secondi. I segmenti più lunghi permetteranno al client video Osmo4, nelle nostre condizioni di analisi, di caricare un buffer di circa 8 secondi, mentre gli altri saranno caratterizzati da un buffer con lunghezza prossima a 1,5 secondi.

Un buffer da 8 secondi poco si presta alle nostre esigenze, perché si è cercato di analizzare il protocollo anche nei casi di handover, ritenendo come parte maggiormente sensibile alle condizioni di rete, la richiesta tramite GET del client video al server. Infatti è proprio in questa fase che un'erronea valutazione della banda disponibile al client potrebbe portare a risoluzioni video non ottimali, così come ad eventi di freezing video.

⁶ Le dimensioni riportate fanno riferimento al numero di pixel riga per numero di pixel colonna.

Un buffer da 8 secondi non consente la GET nell'istante in cui è avviata la procedura di handover, infatti va ricordato che questi hanno una durata temporale "breve" che va da meno di 1 secondo per casi di intra handover a circa 8 per gli inter-RAT. Quindi, ponendoci nelle condizione meno favorevoli al client video, si è deciso di utilizzare video caratterizzati da una lunghezza dei segmenti pari a 2 secondi.

4.3 Setup di laboratorio per misure in box anecoico

Il laboratorio, sito nella sede Telecom Italia di Roma in Via di Val Cannuta 250, è dotato di diverse stazioni radio base collegate alla rete in esercizio. Nel laboratorio sono presenti le stesse tecnologie che Telecom Italia utilizza nella rete geografica per fornire i servizi di accesso radiomobile. Per l'attività della tesi sono stati utilizzati dei nodi LTE in tecnologia Nokia rilegati su MME di Venezia. Tutti i segnali a radiofrequenza sono raccolti e trattati da una matrice di combinazione e attenuazione (HOSM16 Rhode&Schwarz) che consente di controllare i livelli di segnale sui suoi 6 canali di uscita. Su ogni canale di uscita può essere presente una combinazione di due o più segnali d'ingresso opportunamente attenuati in modo tale da ricreare una condizione cosiddetta d'interferenza sul terminale sotto osservazione. I canali di uscita della matrice possono essere collegati a diversi ambienti di test. Uno di questi è costituito dalla camera anecoica descritta nel seguente paragrafo.

4.3.1 Camera anecoica

La camera anecoica (figura 26) è una struttura di laboratorio che permette la propagazione di un segnale in assenza di riflessione, ovvero salvo particolari configurazioni, permette la propagazione della sola onda diretta.

La struttura di questo ambiente permette il totale isolamento, in un determinato intervallo di frequenze, dai fenomeni elettromagnetici esterni ad essa. Internamente vengono rivestite da speciali pannelli assorbenti in ferrite, generalmente di forma conica, i quali sono in grado di creare apprezzabili fenomeni di attenuazione sul segnale.

La camera anecoica è stata sviluppata da ETS Lindgren per operare nel range di frequenze da 600 MHz a 6000 MHz e per garantire un isolamento maggiore di 120 dB.

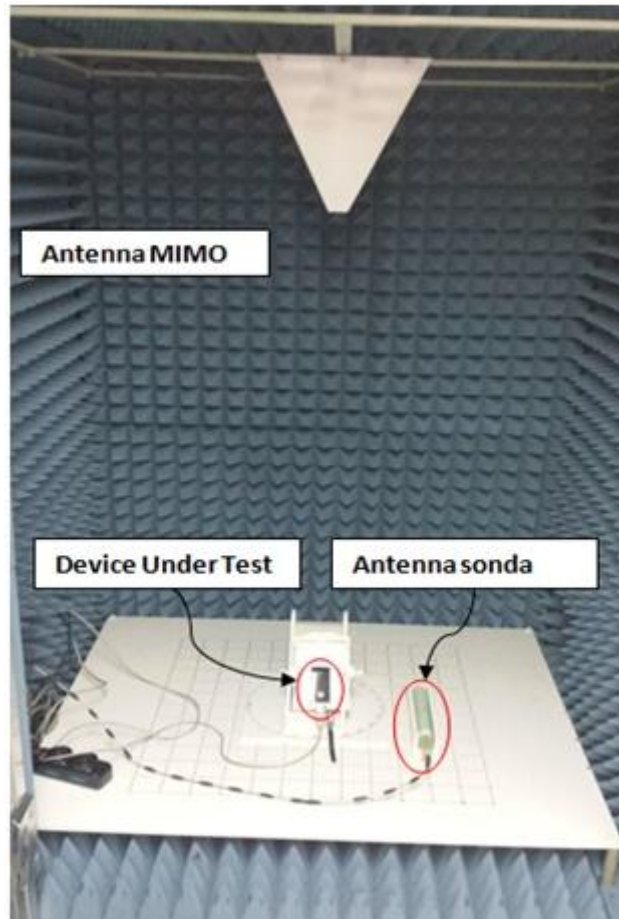


Figura 26: Camera anecoica

La camera è dotata di antenna **Multiple Input Multiple Output (MIMO)** di tipo logaritmico cross-polarizzata progettata per realizzare un campo uniforme (± 2 dB) sul piano di lavoro nello stesso range di frequenze della camera.

Inoltre, la camera consente di isolare il terminale dall'ambiente circostante e di ricreare delle condizioni di test controllato in propagazione assimilabile allo spazio libero, mettendo in evidenza il singolo fenomeno che si desidera osservare.

Infatti, in riferimento al piano di lavoro e con un'attenuazione di 0 dB inserita dalla matrice di controllo su un segnale LTE, il terminale misurerà un livello di RSRP di circa -70 dBm che è equivalente al posizionamento del terminale in una zona con buona copertura. L'allontanarsi dalla stazione radio base è esprimibile come un affievolimento in potenza del segnale (condizione di bordo cella) riproducibile attenuando gradualmente il segnale della servente. Agendo sulla matrice di controllo è possibile inserire nell'ambiente di propagazione (camera anecoica) un secondo segnale LTE che agirà come stazione target, aumentandone gradualmente il livello di RSRP (diminuendo l'attenuazione sul segnale) in modo tale da ricreare le condizioni di handover tra la cella servente e quella target. In

questa condizione il terminale mobile avvia le procedure di handover andando a ricercare celle adiacenti e porta a termine la procedura non appena si creano le condizioni previste dallo standard.

Agendo opportunamente sulla matrice si riesce a forzare il terminale ad effettuare la procedura di handover a valori limite dell'RSRP in condizioni di utilizzo che favoriscono l'uso di modulazioni più robuste ma meno efficienti in termini di bit per Hertz (QPSK). In questo modo si cerca di determinare le soglie in potenza di un segnale LTE, intese come valore di RSRP, che forzano lo scaling della risoluzione video.

Infatti, il DASH adatta la risoluzione del video in base alle condizioni di banda disponibile dall'utente, ovvero in base al suo throughput. Ci si aspetta quindi che un affievolimento del segnale porti ad una graduale diminuzione della risoluzione video. L'uso della camera anecoica deve essere gestito con particolare attenzione proprio per il comportamento dei sistemi radiomobili. Infatti durante una sessione di test, l'apertura della porta può provocare degli effetti non controllati. Un comportamento tipico del'RSRP di una sessione di misura è il seguente (figura 27), caratterizzato da variazioni del parametro RSRP, dovute all'apertura del box durante la sessione di test.

L'apertura della camera anecoica si rende necessaria per variare la condizione interna dell'ambiente di test, ad esempio introducendo ulteriori dispositivi che possono generare traffico. Le variazioni del segnale rilevato dal terminale sono dovute all'aumento del rumore di fondo causato da eventuali interferenti in banda LTE o dal rumore dei dispositivi inseriti in camera.

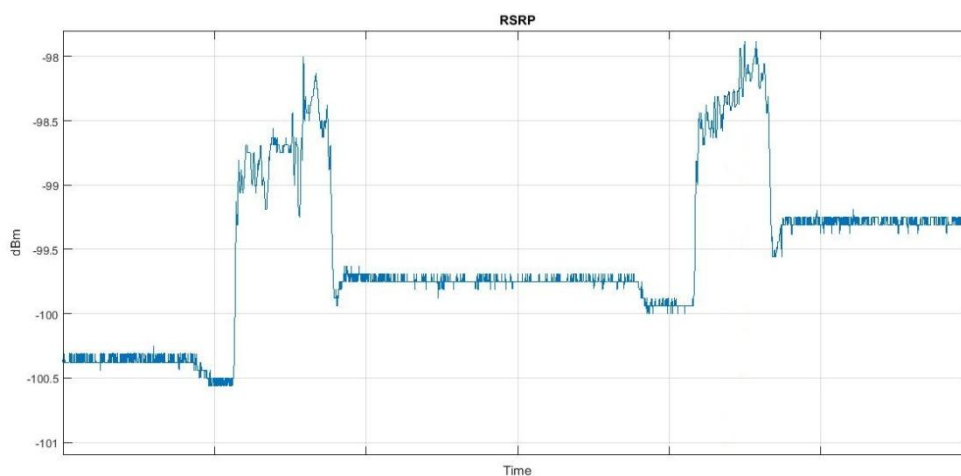


Figura 27: Generica sessione di misura

4.3.2 Banco di test

In figura 28 è riportato lo schema del set-up di laboratorio.

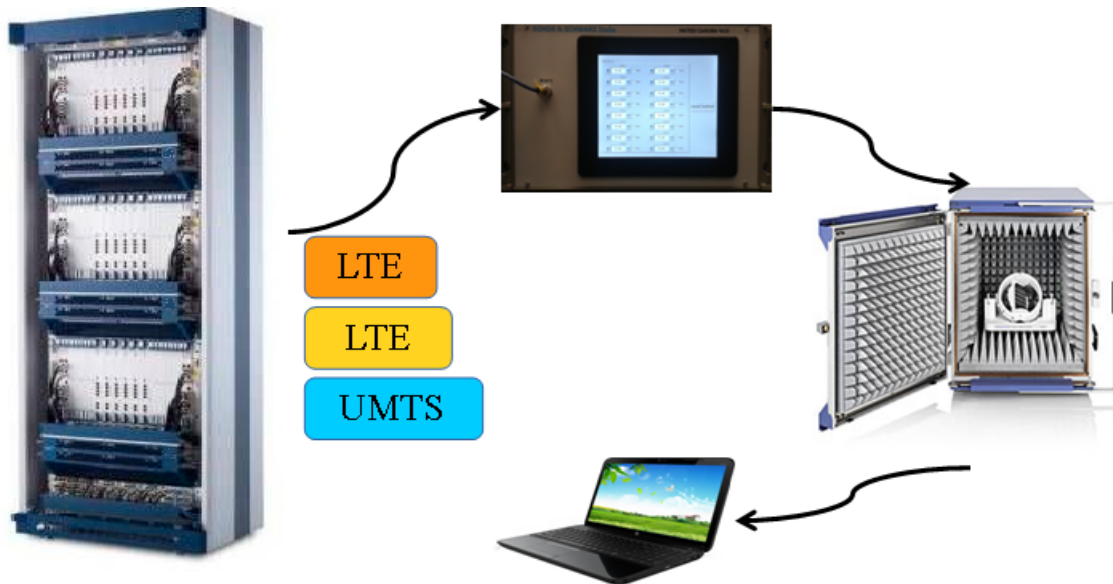


Figura 28: Banco di test in camera anecoica

I segnali introdotti nel box provengono da un nodo di servizio in tecnologia Nokia e per quanto riguarda la rete LTE 800, fanno riferimento all'MME di Venezia.

Prima di poter essere utilizzati, questi segnali verranno inviati nella matrice di combinazione e attenuazione (HOSM16 Rhode&Schwarz). Questo passaggio è fondamentale, infatti la matrice offre la possibilità di agire sul livello in potenza dei segnali al suo ingresso, permettendo dunque di creare vari scenari di propagazione, offrendo così la possibilità di valutare il comportamento del device in varie condizioni di copertura. In uscita dalla matrice di attenuazione, il segnale verrà inviato nel box anecoico. Oltre all'antenna MIMO all'interno del box è presente un'antenna campione (3126-800 ETS Lindgren)⁷ di un analizzatore di spettro (FSW Rhode&Schwarz) situato esternamente a questa, che permette di analizzare l'entità del segnale di test così come la presenza di eventuali interferenti.

Un esempio dello spettro del segnale LTE 800 MHz è riportato in figura 29. Come si può notare, il segnale LTE è caratterizzato da una portante a 806 MHz un valore in potenza di

⁷ Confrontare con figura 28.

circa -113.4 dBm^8 e una larghezza di banda pari a 10 MHz. Nella figura successiva (figura 30) è visualizzato lo stesso tipo di segnale, ma nel caso in cui il terminale stia effettuando del traffico dati, ovvero è rappresentato l'istante dopo il GET al server, ovvero il download del Segment.

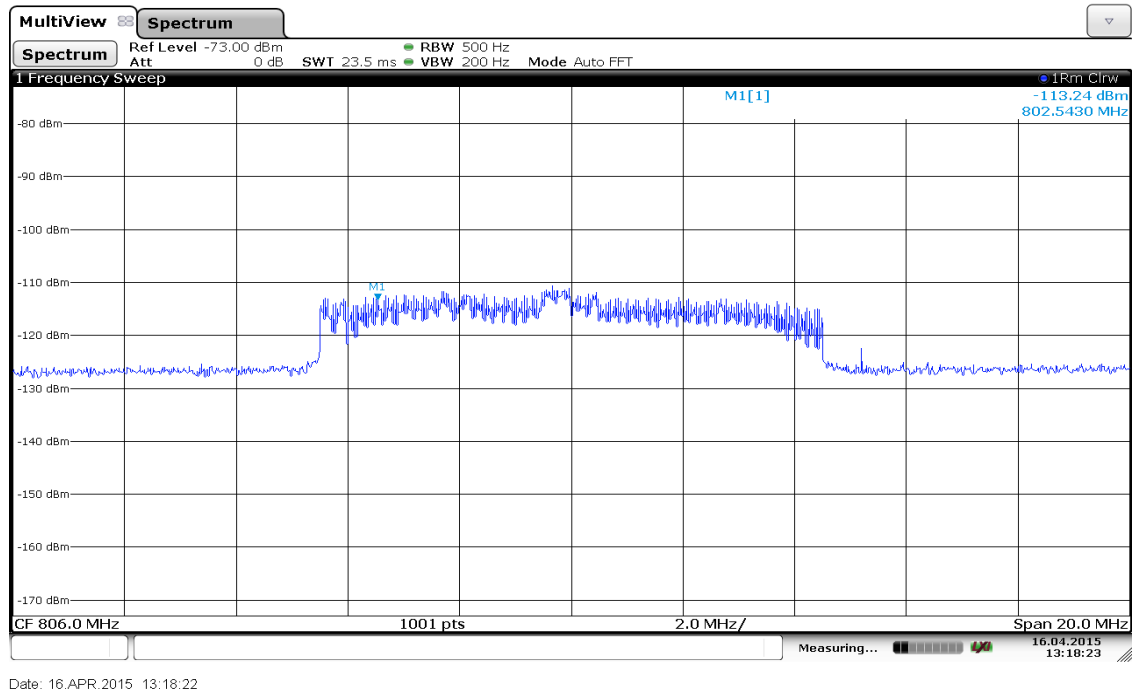
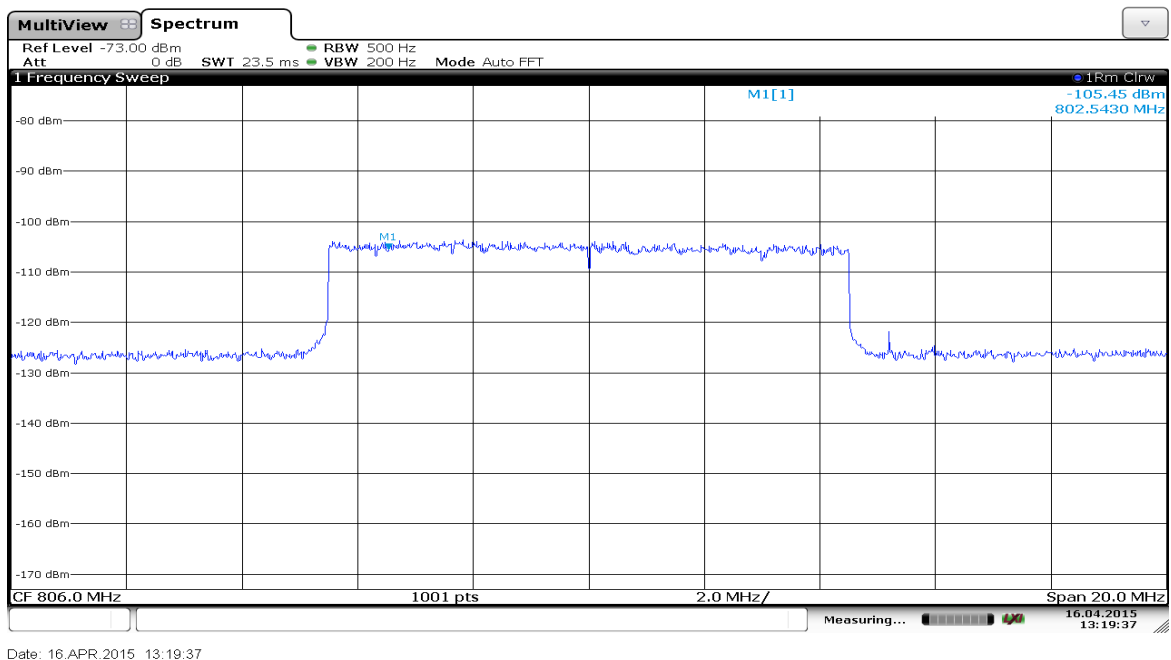


Figura 29: Spettro del segnale LTE 800

⁸ Il valore in potenza fa riferimento alla posizione del marker dello strumento.



Date: 16.APR.2015 13:19:37

Figura 30: Spettro del segnale LTE 800 con traffico dati

Sia in questa figura che nella precedente si possono notare delle piccole spurie nella banda superiore del segnale, queste sono dovute all'irradiazione della tensione di alimentazione di alcuni cavi USB situati all'interno del box. La presenza di queste spurie poco influenza il comportamento del dispositivo e il loro contributo potrebbe essere limitato schermando i connettori con appositi tappi a RF.

Per tutti i test si è scelto di utilizzare un segnale SISO e non MIMO. Questa configurazione non implica una limitazione alle nostre misure, è stata scelta al solo fine di spingere il protocollo DASH e quindi il client video nelle condizioni di rete più sfavorevoli allo streaming video. Per la strumentazione disponibile nel laboratorio ogni dispositivo analizzato deve possedere un chipset Qualcomm, questo perché la fase di analisi della messaggistica scambiata tra il device e l'eNB, ovvero il "log della misura", avviene attraverso un software proprietario di Qualcomm chiamato QXDM. Questo software permette di analizzare fino al livello fisico il segnale ricevuto dal dispositivo.

L'interfacciamento tra il dispositivo situato all'interno del box anecoico ed il software installato su un laptop⁹ avviene attraverso le porte USB di entrambi. Da qui la necessità dei cavi usb all'interno del box.

Tutte le sessioni di test, sia che facciano riferimento alle misure in camera anecoica sia quelle in camera riverberante, sono state effettuate utilizzando come device di test un dongle LTE Huawei.

⁹ Il laptop sarà posizionato all'esterno della camera anecoica

I passaggi che portano alla cattura e analisi del log vengono riportati in figura 31.

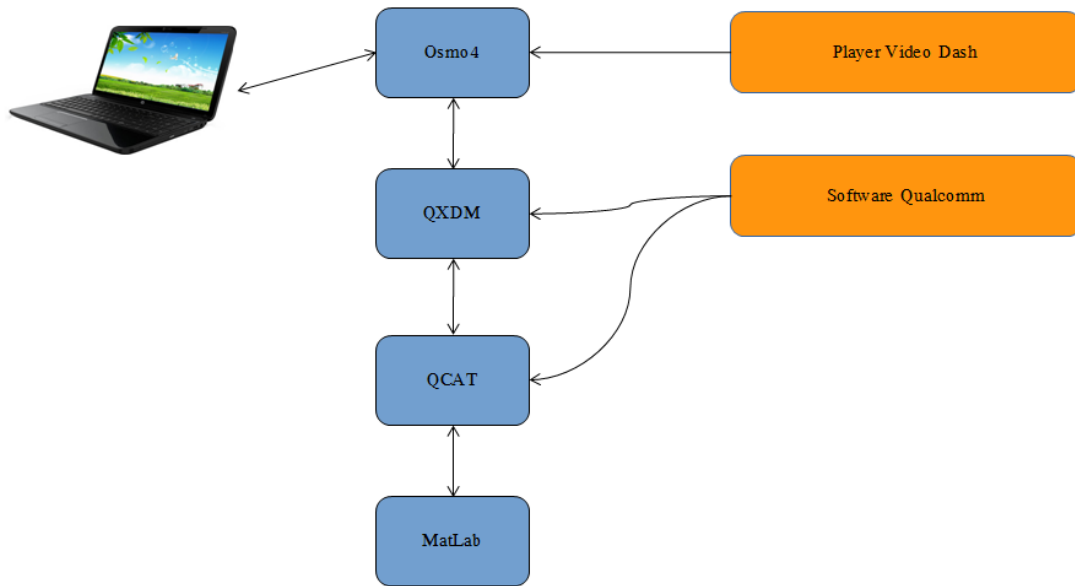


Figura 31: Analisi del Log File

Il log, come già detto, verrà analizzato attraverso QXDM di cui se ne riporta una schermata.

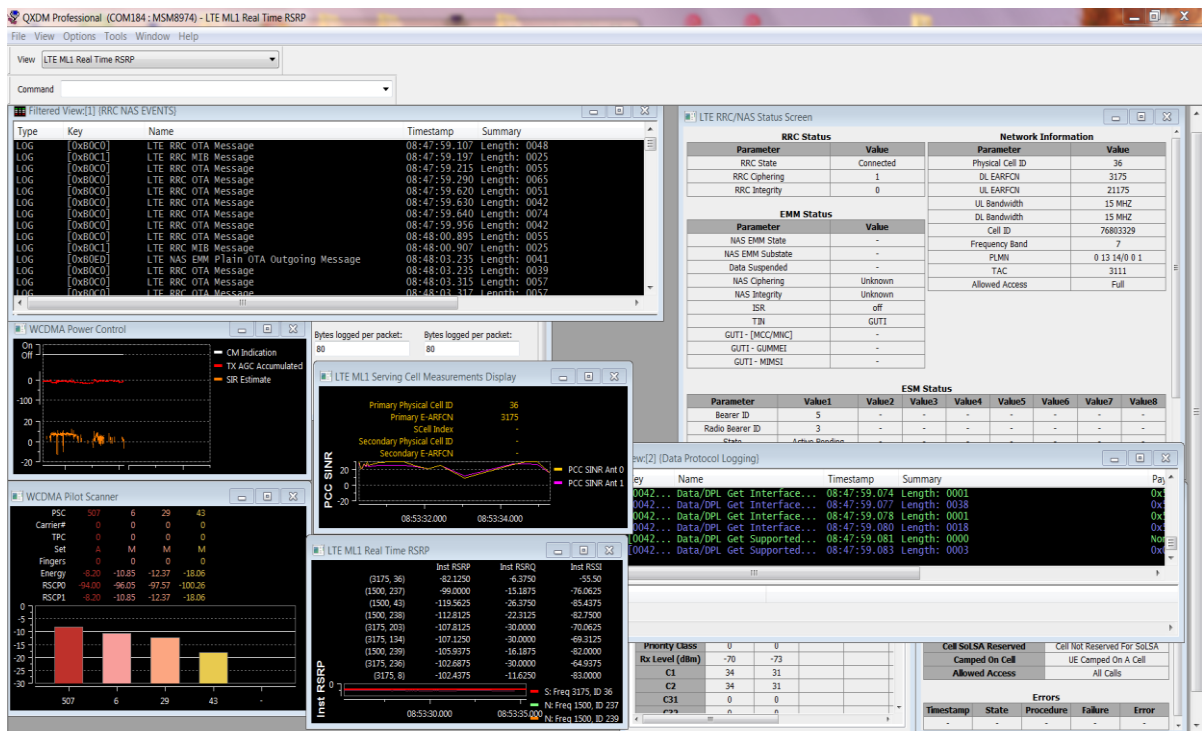


Figura 32: Schermata QXDM

La struttura del software permette di analizzare tutti i segnali scambiati tra i vari layer, sarà dunque necessario, ai fini di una facilitazione della post elaborazione del log, creare apposite maschere che permettano di visualizzare solo la parte dei parametri di rete interessati.

Quindi ogni misura ha rispettato i seguenti passaggi:

1. Attivazione della comunicazione tra device e laptop.
2. Avvio del player video (Osmo4).
3. Simulazione delle condizioni di propagazione.
4. Cattura del log.
5. Post analisi del log con QCAT¹⁰.
6. Elaborazione dei dati con MatLab.

In generale tutti i player video che acquisiscono il flusso video da internet prevedono una fase di pre-load del contenuto informativo, che si manifesta come un ritardo nel play. Questo permette di accumulare risorse e quindi incrementare il buffer, in modo da compensare eventuali fluttuazioni di banda durante la sessione di download.

Una particolarità che abbiamo riscontrato in tutte le misure e in tutte le condizioni di propagazione è legata alla risoluzione video iniziale. In tutte le misure di video streaming con segmenti pari a 2 secondi, abbiamo notato che questo inizia con la risoluzione minima disponibile mantenendola per circa 10 secondi. Se pur le relazioni tra risoluzione video e banda disponibile siano racchiuse nell'mpd, in nessuna sua specifica ne è definito tale comportamento. Analogo discorso vale per alcuni video di test proposti da Google¹¹. Questa condizione potrebbe essere espressa nel *profile* utilizzato, ma al momento non sono state compiute maggiori ricerche a riguardo perché questo comportamento può essere trascurato per le nostre specifiche condizioni di valutazione del protocollo di video streaming.

Ulteriore particolarità del comportamento del DASH è anche dovuto alla rete utilizzata. Nel caso di misure LTE sappiamo che questa è caratterizzata da una adattatività della modulazione alle condizioni di canale e ogni modulazione definirà uno specifico code rate. Se nell'istante in cui il client DASH effettua la GET al server, la modulazione prevede un

¹⁰ Ulteriore software Qualcomm che permette la lettura dei log.

¹¹ <http://dash-mse-test.appspot.com/dash-player.html>

valore basso di rate, il player visualizzerà il video con la risoluzione consentita per quello specifico rate e tale risoluzione durerà per tutta la lunghezza del segmento.

4.3.3 Scenari di misure in camera anecoica

La camera anecoica offre quindi la possibilità di simulare e valutare vari scenari propagativi. Le condizioni radio di maggior interesse per i nostri scopi sono state:

- Terminali Interferenti.

Questa condizione è ottenuta andando a caricare la cella LTE con ulteriori terminali, analizzando quindi come questa situazione influenzi il comportamento dell'DUT (Device Under Test). Ci aspettiamo che l'introduzione di ulteriori utenti facenti traffico LTE vada a limitare le risorse radio disponibili al device di video streaming, poiché eNB provvederà ad una riallocazione delle risorse di rete.

- SINR variabile.

Abbiamo valutato la qualità video percepita dall'utente al variare del rapporto segnale rumore caratterizzante la comunicazione, ovvero introducendo nel box anecoico un rumore di tipo termico agente nella stessa banda in download del segnale LTE in analisi.

- Handover.

Nello specifico abbiamo ritenuto poco significativi i casi di handover intra e inter frequency poiché, queste procedure, temporalmente sono molto brevi (meno di 1 secondo), quindi oltre a essere difficilmente analizzabili nel dettaglio, poco si prestano allo stress del client video. Si è considerato di maggiore interesse andare ad analizzare nel dettaglio un handover da LTE verso UMTS.

Ci si aspetta che il passaggio a nuova tecnologia caratterizza da throughput minore vada a ridurre la risoluzione del video. Inoltre potrebbero avvenire fenomeni di freezing dovuti al tempo necessario all'instaurazione di una nuova connessione verso un tipo differente di rete di accesso internet.

Prima di iniziare ogni specifica misura abbiamo ritenuto utile valutare le condizioni radio che permettano di ottenere lo scaling del video, quindi ci siamo posti ad un valore di banda LTE tale da garantire valori di throughput poco superiori alla massima risoluzione video ottenibile, ovvero intorno a 8 Mbyte. Tale condizione fa riferimento al paragrafo 4.3.4 (Caso ideale)

4.3.4 Caso ideale

In questa misura, le condizioni di rete sono tali da poter portare la banda di throughput dell'utente prossima alla banda necessaria per attivare lo scaling del video, ovvero per una banda disponibile prossima a 7 Mbps (figura 33), ponendoci quindi in condizione di piena copertura. Tale configurazione è stata ottenuta imponendo un valore di attenuazione in matrice pari a 48 dB al quale corrisponde un RSRP di circa -108 dBm (figura 34).

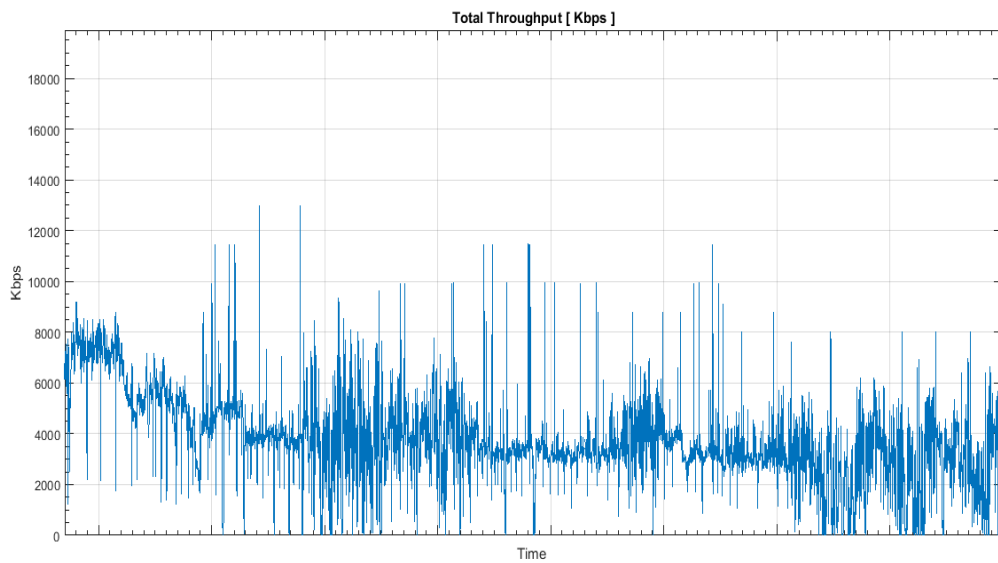


Figura 33: Throughput totale caso ideale

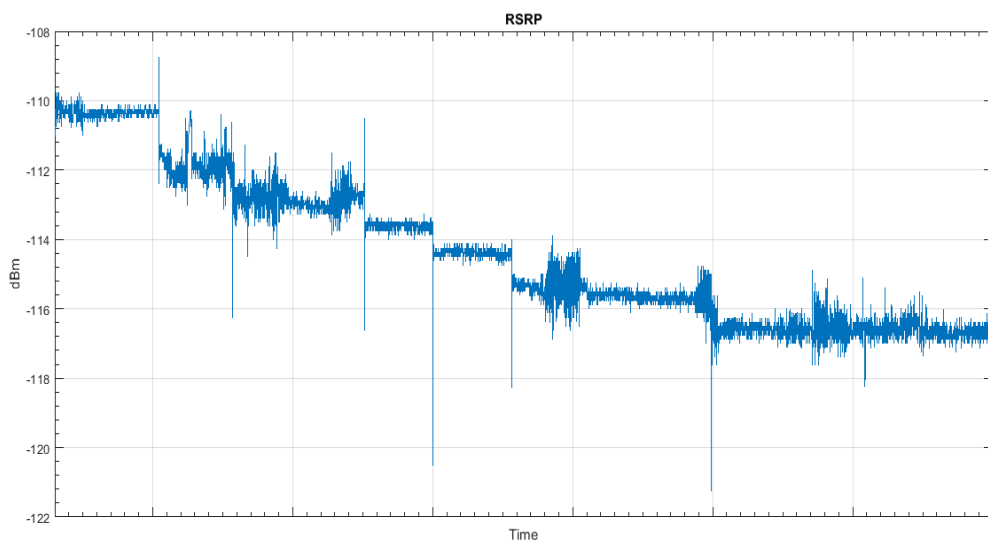


Figura 34: RSRP caso ideale

In tali condizioni abbiamo agito ulteriormente sul valore di attenuazione del segnale analizzando il comportamento del protocollo, quindi la sua scalabilità in risoluzione al diminuire della banda disponibile.

La risoluzione video, in questa fase, è scalata da 7 Mbps a 2.5 Mbps, con un RSRP finale pari a circa -117 dBm. Questo ha permesso di validare la corretta configurazione del server, rete e client video, permettendo di definire i parametri di rete di base per le successive misure.

4.3.5 Terminali interferenti

In questa misura si è voluto valutare come la riallocazione delle risorse da parte dell'eNB vada ad influenzare il comportamento del protocollo DASH.

A tal proposito sono stati introdotti nel box anecoico, oltre al dongle LTE due ulteriori terminali, entrambi Samsung S4 facenti traffico. Il primo attraverso lo streaming video di un file 4K tramite l'app di YouTube e il secondo attraverso il download di un file da 800 Mbyte.

Si è predisposto il segnale LTE in ingresso al box con un valore di RSRP fisso a -106 dBm avviando quindi il video streaming con Osmo4. Le condizioni iniziali sono caratterizzate da un flusso video con risoluzione pari a 7 Mbps, che risulta essere in linea con il throughput iniziale (figura 35) di circa 7 Mbps¹².

Ad ogni accesso di un utente corrisponderà una riallocazione delle risorse da parte dell'eNB, che si manifesterà come una diminuzione della banda disponibile al DUT.

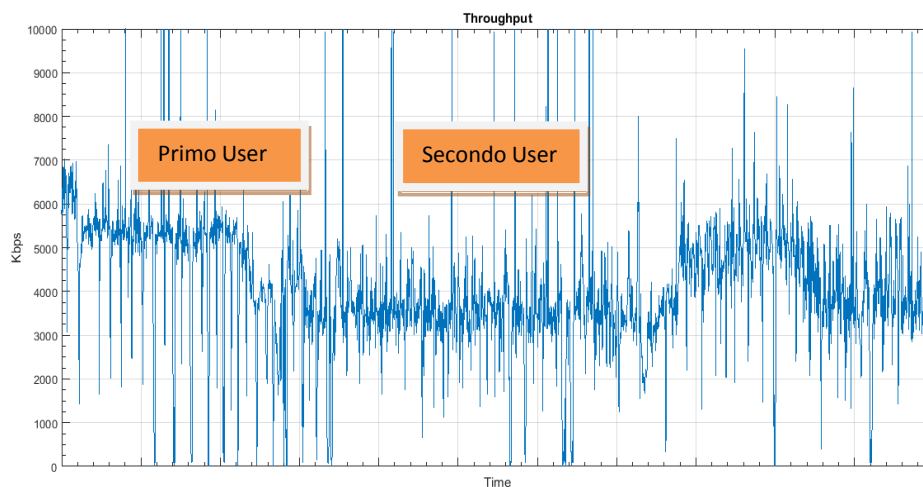


Figura 35: Throughput totale caso terminali interferenti

¹² Tutte le figure in questo paragrafo fanno riferimento alle condizioni radio acquisite sul dongle LTE

Dall'RSRP (figura 36) si possono notare cerchiati in rosso i momenti di apertura della porta del box.



Figura 36: RSRP caso terminali interferenti

Aprendo il box si introduce rumore in camera, poiché la schermatura dell'ambiente viene meno, quindi come si può notare in figura 37, come al picco verso il basso del RSRP corrisponda un peggioramento del RSRQ, poiché quest'ultimo è un indicatore della qualità del canale trasmissivo ottenuta da un confronto del RSRP e RSRI.

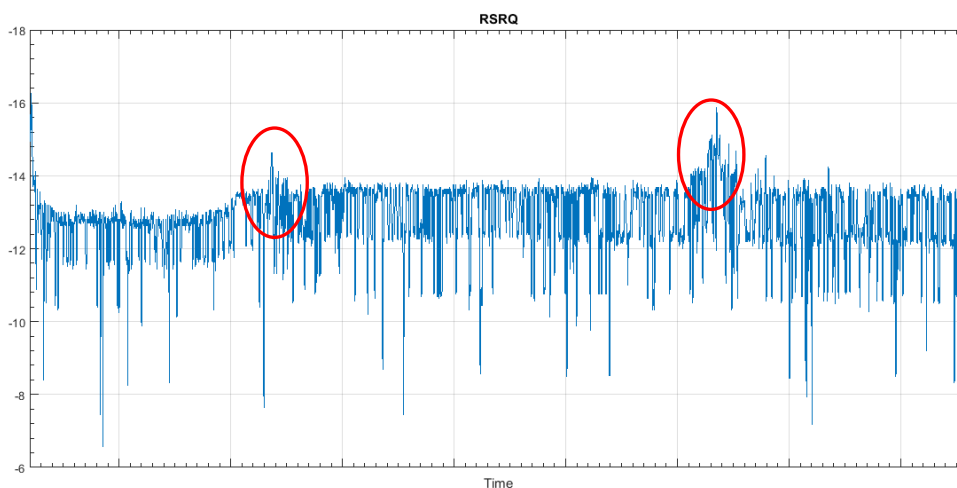


Figura 37: RSRQ caso terminali interferenti

Dall'analisi del CQI (figura 38) possiamo notare come l'andamento temporale di questa sessione di test sia caratterizzata da valori 9 e 10 di CQI, ai quali corrisponde un Code Rate

di 0.6 e modulazione 16-QAM per il 9, mentre Code Rate 0.45 e modulazione 64-QAM per il CQI 10. In figura 39 si riporta l'andamento medio dei valori di CQI misurati, ovvero l'istogramma di queste misure. Come si può notare, la sessione di misura è stata caratterizzata prevalentemente da un CQI pari a 9, quindi la presenza di ulteriori terminali interferenti si manifesta con un livello di CQI poco inferiore rispetto alla condizione di cella scarica con un terminale in video streaming DASH.

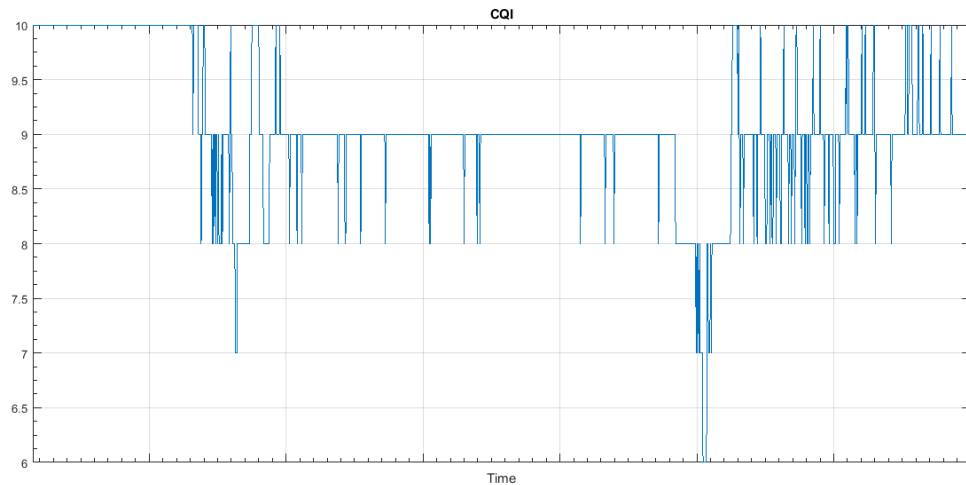


Figura 38: CQI caso terminali interferenti

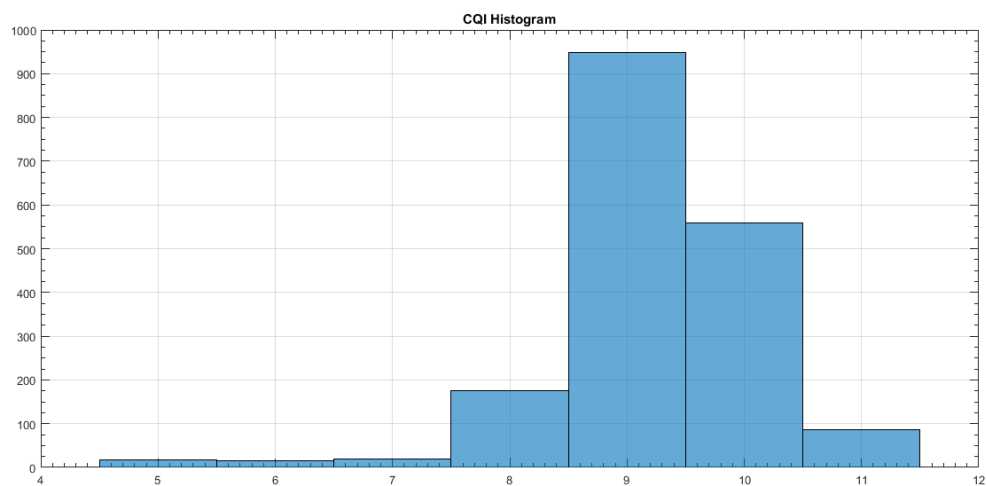


Figura 39: CQI medio caso terminali interferenti

4.3.6 Segnale con rumore additivo

Questa misura è stata effettuata per valutare come la presenza di un rumore additivo nella banda in download vada a peggiorare la qualità della comunicazione, quindi come questa condizione si rifletta in termini di risoluzione video. Durante questo test le condizioni radio

sono state talmente sfavorevoli da generare il freezing del player video.

Quest'evento è risultato essere molto raro, ottenibile in presenza di un canale trasmissivo fortemente rumoroso. In tutte le altre tipologie di test il player ha sempre agito efficacemente scalando in risoluzione.

L'introduzione del rumore nel canale è stata ottenuta attraverso un generatore di segnali Rodhe&Swarz settato con rumore di tipo termico, larghezza di banda pari a 20 MHz e portante a 806 MHz. Il livello in potenza del rumore è stato gestito attraverso la matrice di attenuatori. Queste misure fanno quindi riferimento a un segnale LTE con un livello di RSRP pari a -98 dBm e con un livello di rumore crescente.

L'incremento del rumore è stato ottenuto agendo a scatti di 1dB sugli attenuatori. In figura 40 si può notare l'andamento del throughput in questa sessione di test. E' caratterizzato da un valore iniziale prossimo a 7 Mbps e finale intorno a 4.5 Mbps. Da questi valori ci aspettiamo che il player DASH fornisca una risoluzione video iniziale di 7 Mbps e si stabilisca intorno a 2.5 Mbps. Nella realtà non è stato così, il player ha iniziato lo streaming con una risoluzione di 7 Mbps e ha oscillato tra 7 e 0.5 Mbps per tutta la sessione di test, fino al suo totale freeze nella fase finale. Sempre da questa figura si possono notare dei cali di throughput dovuti all'aumentare del livello del rumore in quel preciso istante.

La rete in un primo momento risente fortemente del peggioramento del canale ed è come se andasse a limitare le risorse destinate all'utente per compensare il peggioramento delle condizioni propagative. Questa situazione perdurerà finché la rete, variando la modulazione, non riesca a ristabilire un throughput idoneo.

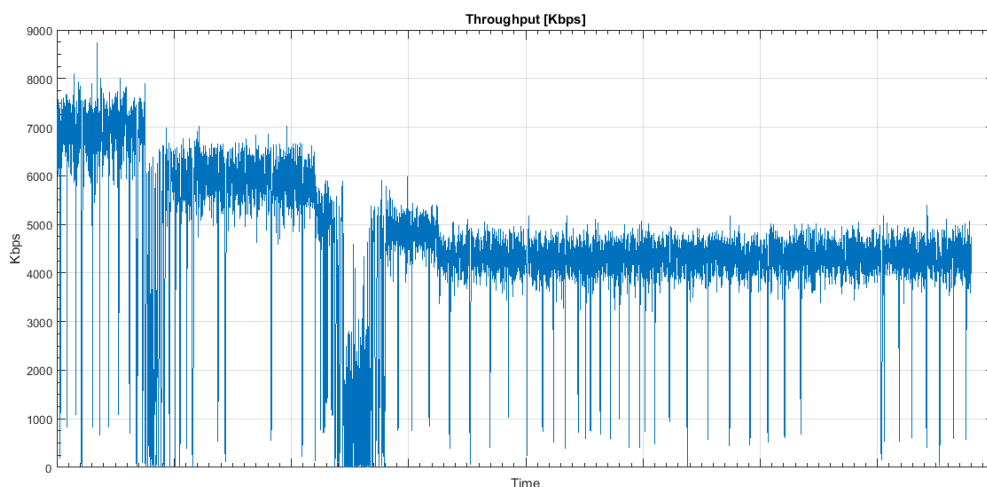


Figura 40: Throughput caso canale rumoroso

In figura 41 si riporta l'andamento del SINR. Il suo andamento a gradini è dovuto al progressivo aumentare del livello di rumore nel canale. Questo peggioramento delle condizioni di propagazione si manifesta anche nel RSRQ (figura 42), infatti si può notare come la sessione di streaming inizi con un valore oscillante tra -11 e -14 dBm per poi "stabilizzarsi" intorno a -15,5 dBm. La fase iniziale del RSRQ presenta forti oscillazioni intorno ad un valore medio. Confrontando tale situazione con l'andamento del SINR possiamo notare come la prima fase di misura sia stata caratterizzata da una variazione più rapida dell'attenuazione sul segnale di rumore in uscita dalla matrice di attenuazione.

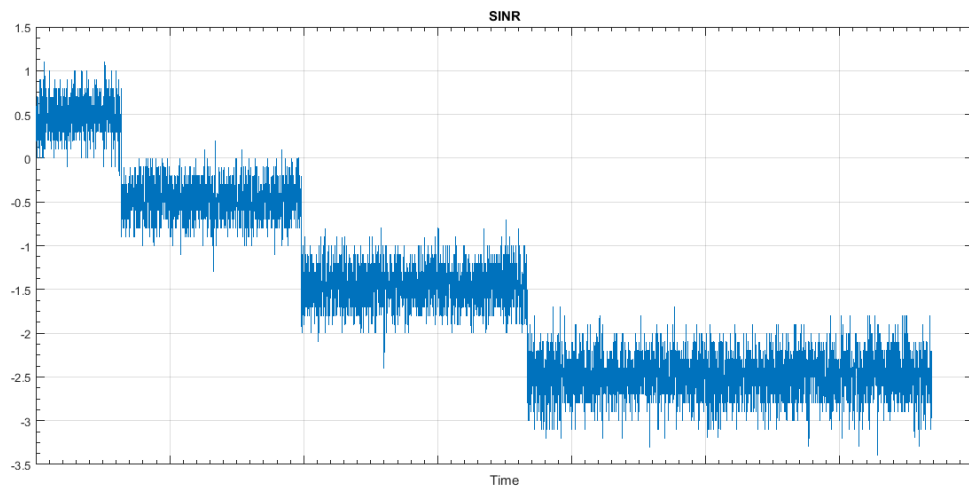


Figura 41: SINR con canale rumoroso

Evidentemente la rapida crescita del rumore nel canale si ripercuote lato rete con un'oscillazione dei valori di RSRQ.

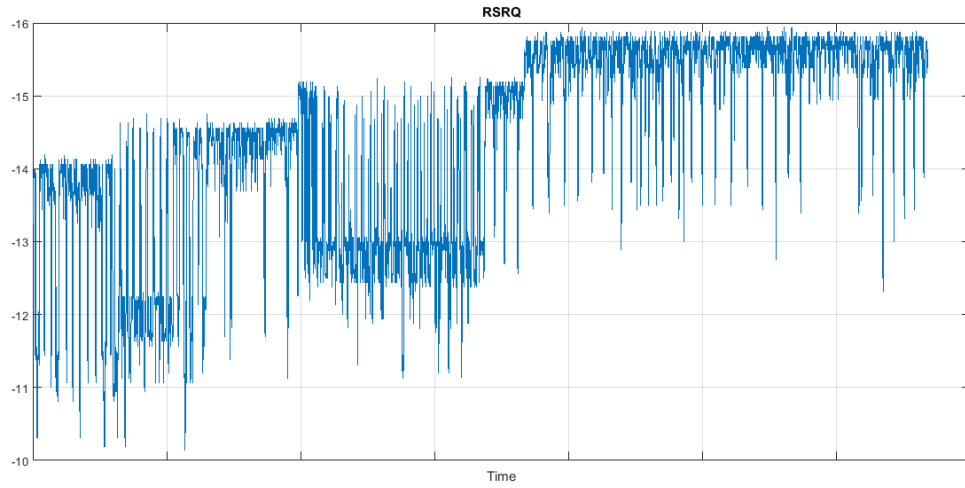


Figura 42: RSRQ con canale rumoroso

Anche se poco significativi, per completezza dell'analisi si riportano gli andamenti temporali dell' RSRP e del CQI.

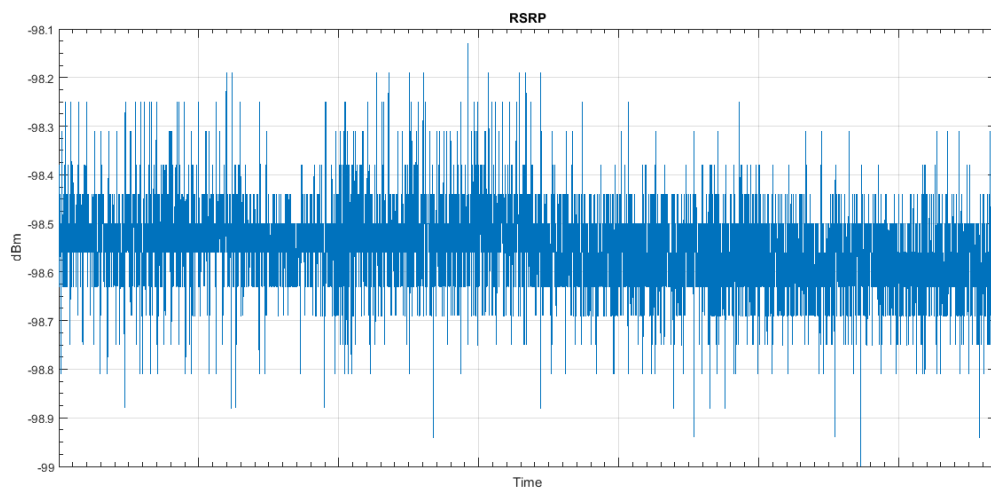


Figura 43: RSRP con canale rumoroso

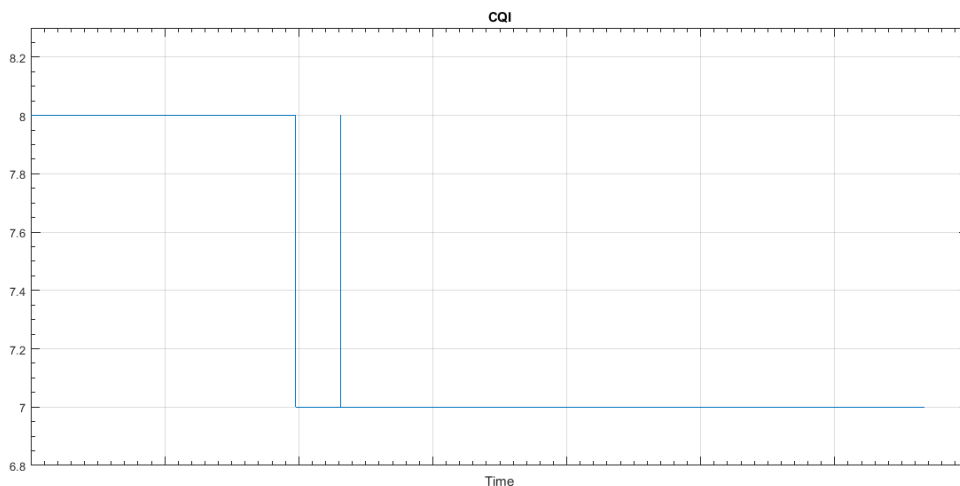


Figura 44: CQI con canale rumoroso

4.3.7 Inter-RAT LTE-3G

Come ultima misura nel box anecoico abbiamo l'inter-RAT da LTE 800 a UMTS.

In ingresso al box sono stati inviati sia il segnale di una cella LTE 800 MHz che una UMTS 2100 MHz.

Ci aspettiamo che il passaggio ad una tecnologia diversa porti ad una riduzione della risoluzione video, poiché il 3G garantisce throughput molto inferiori rispetto all'LTE. Inoltre essendo questo tipo di handover un processo della durata di qualche secondo (circa 8), ci si aspetta che il buffer video venga interamente svuotato. In tale condizione, il client non potrà più fare affidamento sulle risorse precedentemente accumulate creando quindi una condizione fortemente sfavorevole allo streaming video.

Per attivare la procedura di handover si agirà sul livello di potenza dei segnali presenti nel box anecoico, ovvero sull'attenuazione del segnale LTE uscente dalla matrice di attenuazione. La condizione iniziale è stata caratterizzata da un livello del segnale "ottimo" sia per l'UMTS che per l'LTE. Quest'ultima presenta un RSRP pari a -91 dBm. Va ricordato che le simulazioni nel box anecoico rappresentano, almeno in questo caso, una condizione di ottimo per la propagazione del segnale. Infatti, oltre a essere assenti fenomeni riflessivi, ci si pone nella condizione in cui la cella sia occupata da un solo utente (cella scarica) con un livello del segnale 10 dBm superiore rispetto al suo analogo misurato in campo.

Si è deciso di iniziare la sessione di misure da un livello di RSRP pari a -91 dBm, in questo modo si è cercato di enfatizzare maggiormente come la perdita in potenza del segnale vada

ad influenzare la risoluzione del video.

In figura 45 è riportato il throughput caratterizzato da un andamento decrescente.

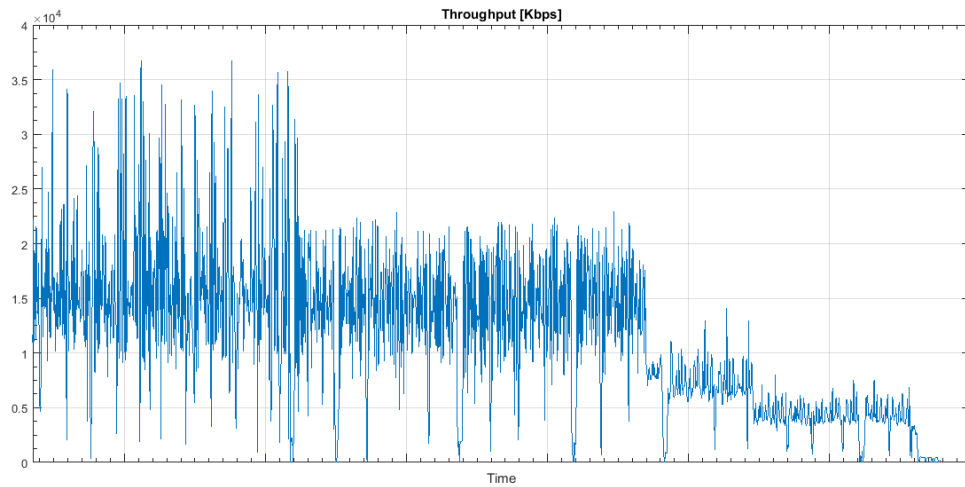


Figura 45: Throughput caso inter-RAT

La diminuzione del throughput è stata ottenuta agendo sul livello del segnale LTE uscente dalla matrice. Infatti, come si può notare in figura 46, si è agito compiendo inizialmente due attenuazioni espresse come una perdita di 10 dBm e successivamente con attenuazioni esprimibili come una diminuzione dell'RSRP pari a 5dBm.

La maggior attenuazione iniziale è dovuta alla necessità di portare il throughput il più prossimo possibile al valore che permette lo scaling video del client DASH. Infatti osservando la figura 45, si può notare un throughput iniziale prossimo a 15 Mbps quindi molto maggiore della massima risoluzione video ammessa.

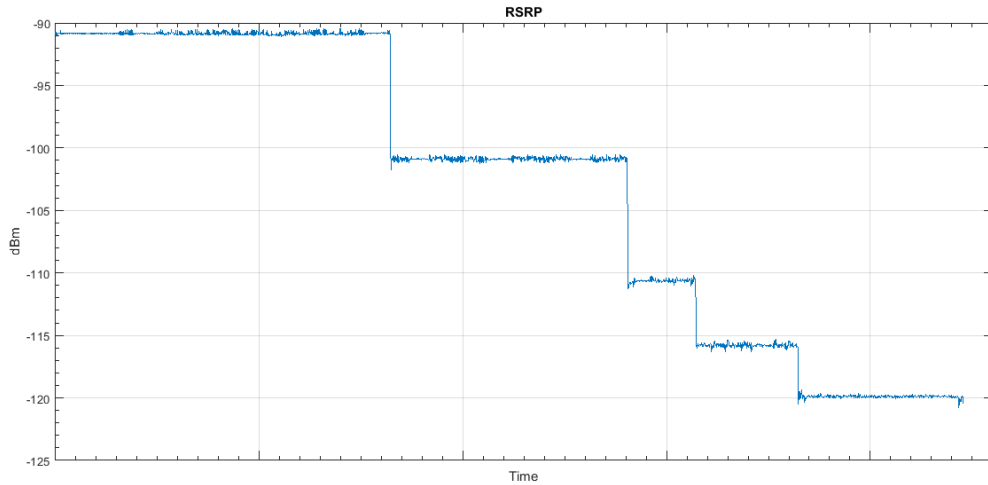


Figura 46: RSRP caso inter-RAT

La perdita in potenza del segnale è percepita dal DUT come un peggioramento delle condizioni radio, infatti si può notare l'andamento dei fattori qualitativi della comunicazione come una riduzione dell'RSRQ (figura 47) così come del CQI (figura 48). In quest'ultima si può vedere come il valore del CQI sia fortemente legato all'RSRP, ovvero si nota come questo oscilli intorno ad un valor medio legato alle condizioni radio.

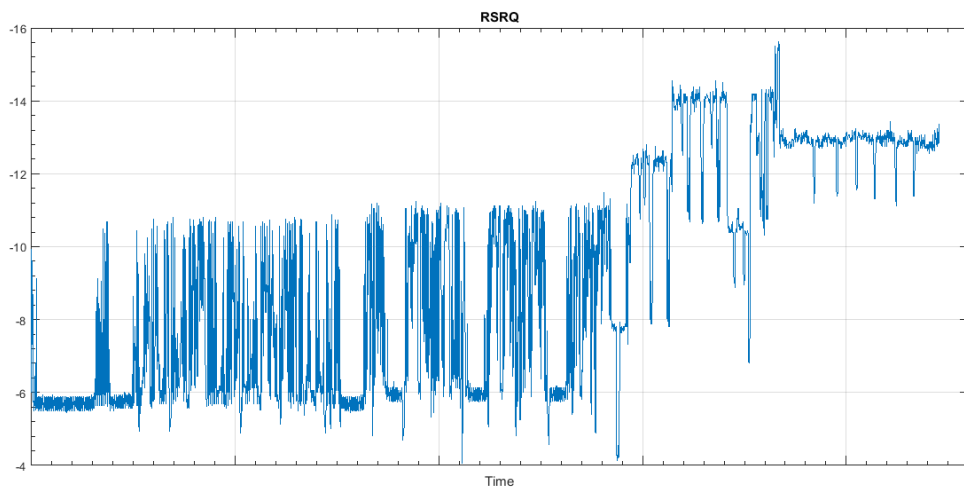


Figura 47: RSRQ caso inter-RAT

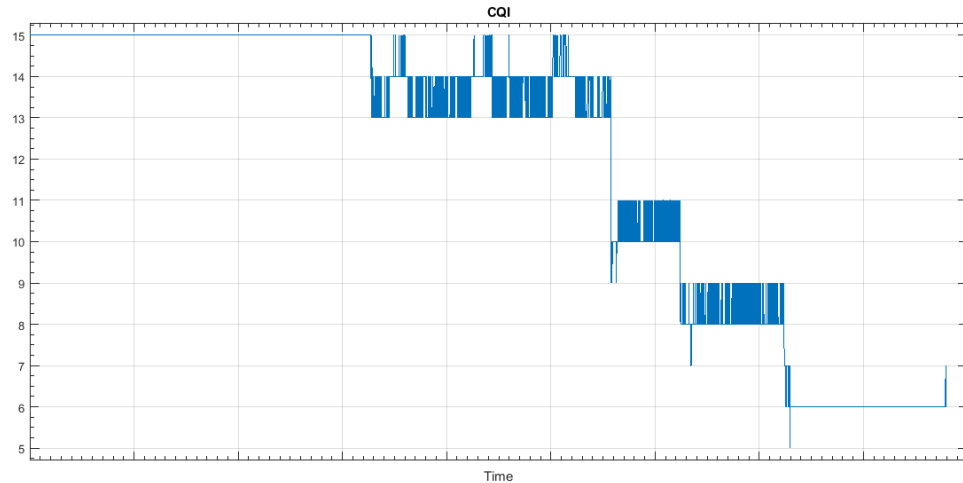


Figura 48: CQI caso inter-RAT

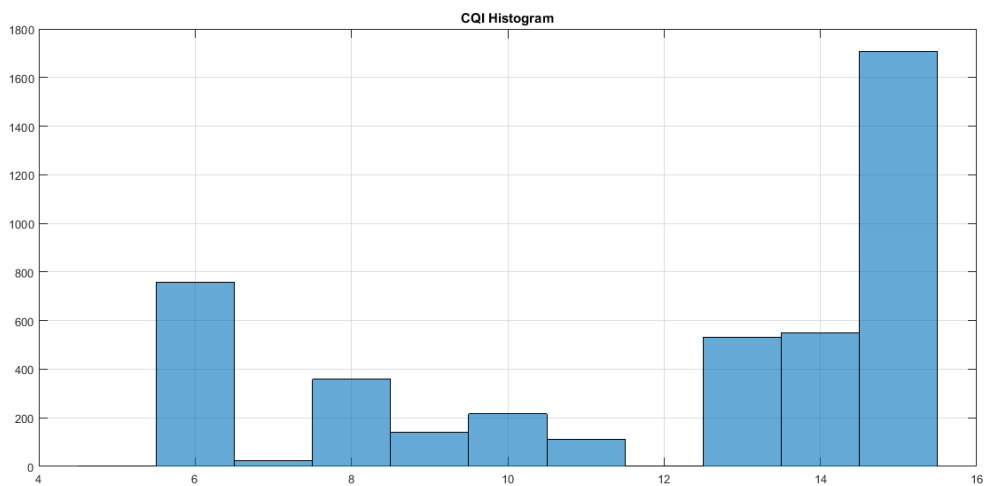


Figura 49: CQI medio caso inter-RAT

La distribuzione dei CQI è fortemente diversa dai casi precedentemente analizzati, infatti assume uno spettro di valori molto più ampio. Questa diversità è dovuta al fatto che la misura è stata caratterizzata da un livello iniziale del segnale LTE molto alto, subendo una progressiva attenuazione fino all'attivazione dell'handover.

Durante questa sessione abbiamo potuto constatare una progressiva riduzione della risoluzione video da 7 Mbps fino a 500 Kbps. Non è stato possibile scendere oltre il valore di 500 Kbps poiché il segnale UMTS utilizzato è stato imposto con una condizione di ottima copertura radio.

4.4 Camera riverberante

Ogni apparecchiatura elettrica ed elettronica sarà sempre affetta da radiazioni di tipo elettromagnetiche, queste possono essere dovute a fenomeni naturali o di origine umana, così come da processi fisici voluti o inattesi. Un tipico esempio di radiazione non voluta potrebbe essere l'effetto doppler in una comunicazione radiomobile.

In uno scenario reale la propagazione elettromagnetica del segnale sarà sempre soggetta a fenomeni di riflessione multipla e multipath. Il loro effetto potrà essere valutato in laboratorio tramite l'utilizzo di camere riverberanti (CR).

Queste sono costituite da una camera schermata, le cui dimensioni dipendono dalle frequenze dei campi elettromagnetici analizzabili al suo interno. La frequenza minima analizzabile determinerà la minima dimensione lineare della camera riverberante. Ovvero la lunghezza d'onda del segnale elettromagnetico a frequenza minima analizzabile sarà pari alla lunghezza fisica minima di una grandezza della CR. In generale non vi saranno restrizioni circa la forma e le dimensioni massime delle CR, ad esempio un volume compreso tra 75 m³ e 100 m³ è generalmente utilizzato per frequenze tra 200 MHz e 18 GHz. Frequenze inferiori a 200 MHz implicherebbero CR di dimensioni maggiori.

Il loro interno è caratterizzato da superfici riflettenti, generalmente in alluminio, alcune di queste sono costituite da pannelli riflettori rotanti, noti come **stirrer**. Questi hanno dimensione dipendente dal range di frequenze per la quale la camera è stata progettata. In generale la dimensione dello stirrer verrà imposta dalla minima lunghezza d'onda del segnale analizzabile, ovvero dovranno essere costituiti da una lunghezza pari a $\lambda/4$ e una larghezza pari a $3/4$ della dimensione lineare minima della CR.

Il loro azionamento determina la variazione delle condizioni di propagazione del campo elettromagnetico multi modale interno. In base alle rotazioni è possibile considerare l'ambiente statisticamente uniforme e isotropico, mentre il campo elettromagnetico potrà essere considerato con polarizzazione uniforme. Quest'ultimo, a causa della rotazione degli stirrer, avrà un andamento fortemente variabile in termini di potenza, dunque per questioni di sicurezza, ma non solo, sarà necessario progettare le CR con ottimi valori di isolamento a radiofrequenza con l'ambiente esterno. I test in camera riverberante, nel contesto radiomobile, vengono effettuati per determinare come la presenza di riflessioni del segnale sorgente (multipath) vadano ad influenzare per l'utente la percezione qualitativa della connessione. I multipath saranno sempre presenti in tutti gli scenari propagativi reali, questi infatti, in un contesto urbano, saranno dovuti alla riflessione dovuta ai palazzi.

Mentre in altri casi, come la propagazione del segnale in scenari indoor, saranno dovuti alle riflessioni da mobili o finestre.

L'uso delle camere riverberanti per i testing di architetture wireless costituisce una recente metodologia di analisi in crescente sviluppo^[23]. Inoltre è stato dimostrato come l'uso delle CR costituiscano un ottimo metodo di misura per la valutazione dell'assorbimento e riflessione del segnale^[25].

Oltre gli aspetti appena citati, un ambiente così costituito, dà la possibilità di valutare il comportamento del segnale ricevuto dal device, nel caso di visibilità e non, tra l'antenna trasmittente e la ricevente.

Le camere riverberanti permettono dunque di valutare i seguenti parametri:

- **Delay spread time**, ovvero la differenza tra il tempo di arrivo della prima replica dal multipath (**Line Of Sight**) e l'ultima;
- **Coherence time**^[26] è usato per caratterizzare la natura tempo-variante della dispersione in frequenza del canale, nel dominio del tempo, ovvero indica la durata temporale tale da avere risposta impulsiva del canale invariata;
- **Coherence bandwidth** (ottenuta attraverso il “decay time” e “quality factor”)^{[27][28]}.

Relativamente al tipo di multipath analizzato, la banda del canale può essere quantificata attraverso la banda di coerenza che fornisce una misura dell'intervallo di frequenze per le quali la risposta impulsiva del canale ha un andamento costante.

Questi parametri forniranno una valutazione delle condizioni di propagazione in termini probabilistici e statistici del fenomeno elettromagnetico all'interno della CR. Le proprietà appena citate permettono, inoltre, l'utilizzo di quest'ambiente per il testing in tecnologie di accesso radio LTE^[30].

La propagazione all'interno della camera riverberante è fortemente legata alle sue condizioni di carico, inteso come quantitativo di oggetti assorbenti disposti internamente a questa, così come dalla loro collocazione fisica. Per cui i modi propagativi dei campi elettromagnetici al suo interno saranno funzione di queste condizioni.

Data la diversità dei fenomeni riflessivi al suo interno, al fine di definire un parametro che ne esprima l'evoluzione temporale e non solo, è possibile caratterizzare ogni camera riverberante attraverso il “**reverberation chamber quality factor**” (**Q**), che è definito come segue^[23]:

$$Q = \frac{16\pi^2 V}{\eta_{TX} \eta_{RX} \lambda_3} \left\langle \frac{P_{AveRec}}{P_{input}} \right\rangle$$

Con:

- V , volume della camera espresso in $[m^3]$;
- λ , lunghezza d'onda espressa in $[m]$;
- $\left\langle \frac{P_{AveRec}}{P_{input}} \right\rangle$, rapporto tra la media della potenza ricevuta in ingresso dopo una rotazione dello stirrer e il suo valore in ingresso;
- η , sono le efficienze di antenna rispettivamente in trasmissione e ricezione che, se non dichiarate dal costruttore, possono considerarsi prossime a 0,75 per antenne tipo log periodiche e 0,9 per antenne a tromba.

I test da noi effettuati sono stati svolti su rete LTE 800 MHz con tecnologia Nokia, presso i laboratori dell'Università Politecnica delle Marche. La camera riverberante utilizzata è caratterizzata da:

- Dimensioni: 6,5 $[m^3]$;
- Z-Folded Stirrer, con velocità di rotazione variabile tra 1 e 80 $[deg/s]$;
- X-Folded Stirrer¹³ con velocità di rotazione variabile tra 1 e 80 $[deg/s]$;
- Modo fondamentale di risonanza a 45 MHz¹⁴;
- Antenna Kathrein 800010454v01¹⁵.

Le possibili configurazioni di carico interne vengono riportate qui di seguito (da figura 50 a 53).

¹³ Dove Z, X fanno rispettivamente riferimento alla direzione nel piano trasversale e orizzontale.

¹⁴ Il modo fondamentale misurato in MHz è ottenuto come: $F_{m,n,l} = 150 \sqrt{((m/L)^2 + (n/W)^2 + (l/H)^2)}$, dove m, n, l, sono gli indicatori di modo, e L, W, H fanno riferimento alle dimensioni della CR espresse in $[m]$.

¹⁵ Nel caso di BTS LTE 800 MHz.

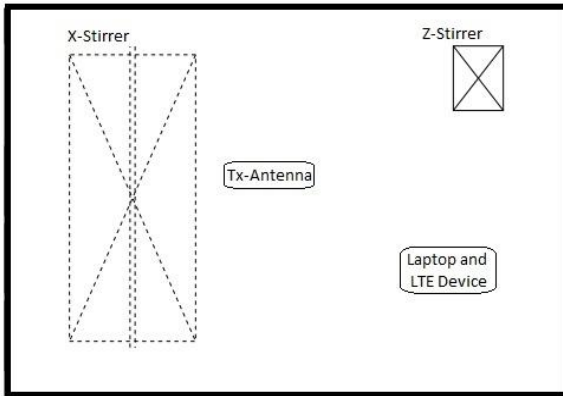


Figura 50: Camera riverberante totalmente riflettente

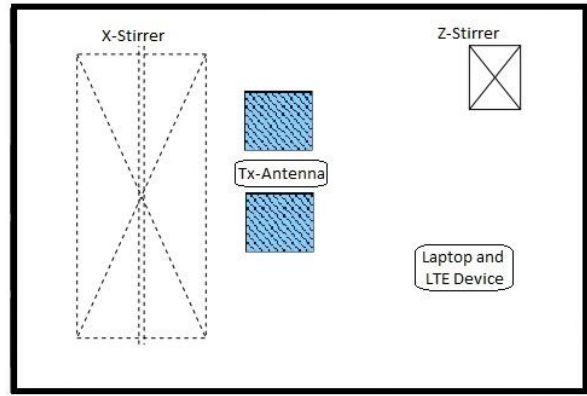


Figura 51: Camera riverberante con due pannelli assorbenti

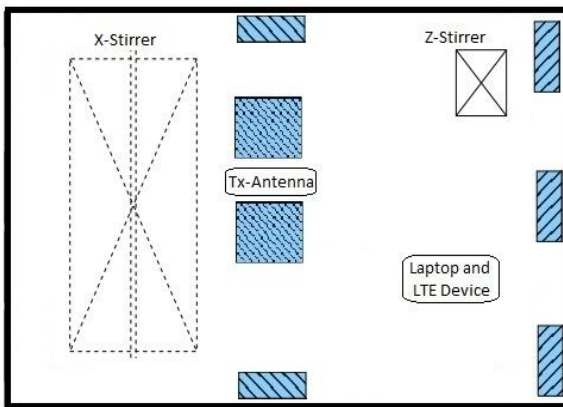


Figura 52: Camera riverberante parzialmente carica

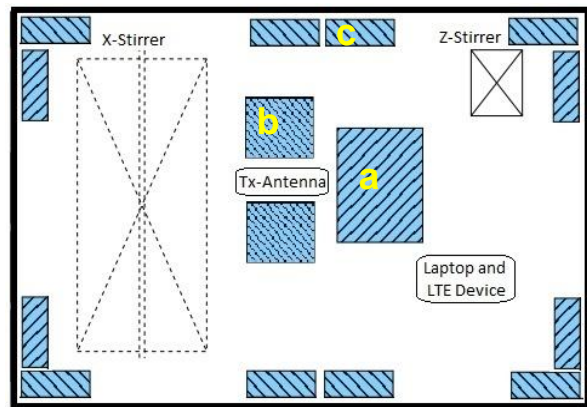


Figura 53: Camera riverberante totalmente carica

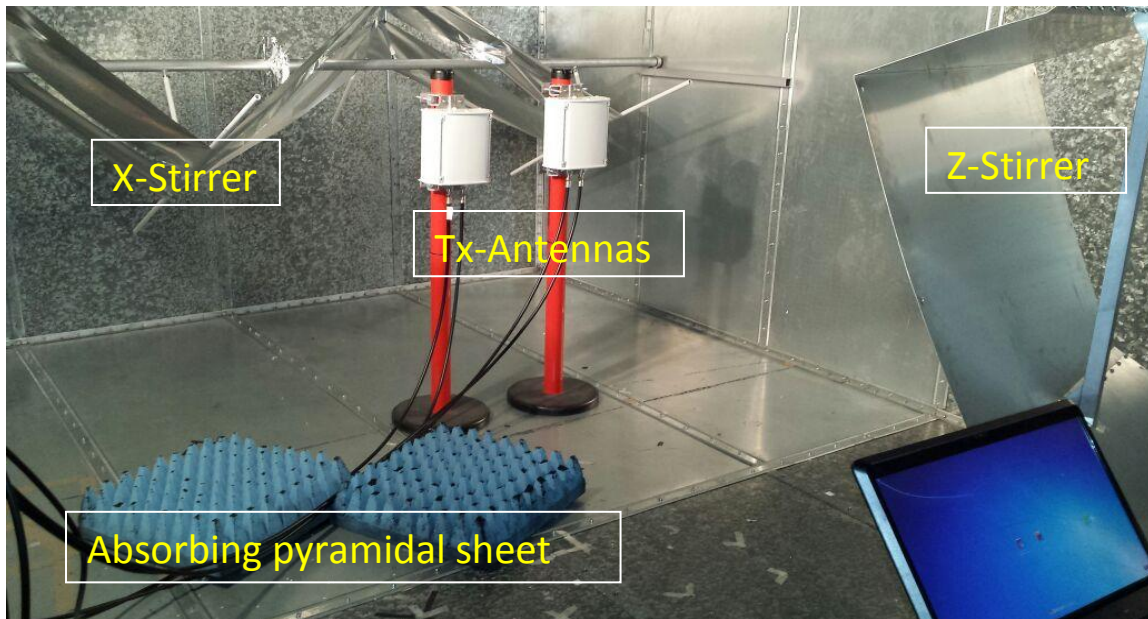


Figura 54: Camera riverberante con due pannelli assorbenti

La figura 53 può essere considerata come riferimento per tutte le configurazioni degli scenari di test. Con “a” si fa riferimento ad un volume assorbente di dimensione 120 x 40 x 150 [cm] totalmente rivestito da pannelli di coni assorbenti (Emerson & Cuming VHP-8-NRL). Con “b” vengono indicate delle superfici assorbenti disposte nelle vicinanze dell’antenne trasmettenti, come si può notare anche in figura 54, mentre con “c” si fa riferimento a particolari piani assorbenti distribuiti all’interno della camera (Emerson & Cuming ANW-77). In tutte le configurazioni di carico il tipo di pannelli rimarrà invariato, ciò che varierà sarà la loro distribuzione all’interno della camera riverberante.

Poiché il segnale LTE verrà irradiato da un’antenna direttiva con un’ampiezza del lobo principale pari a 120°, una configurazione della camera come quella riportata in figura 51 permette una riduzione del contributo riflesso dal pavimento proveniente dal lobo principale dell’antenna.

Analogo discorso varrà per la configurazione di figura 52 nella quale, oltre a limitare i contributi riflessivi del lobo principale proveniente dal pavimento, si tenterà di ridurre i contributi d’onda riflessa dovuti alle componenti irradiate dai lobi secondari laterali, ponendo dei pannelli assorbenti in prossimità dell’antenna trasmittente, ovvero nelle prossimità delle pareti adiacenti l’antenna e sul piano inferiore al supporto di questa.

In tutte le configurazioni illustrate nelle immagini precedenti non si pone nessun vincolo sulla superficie superiore della camera che rimarrà in tutti i casi totalmente riflettente.

Per i nostri fini abbiamo ritenuto interessante valutare anche la condizione di non visibilità

tra l'antenna trasmittente e ricevente. Ovvero tra DUT e l'antenna trasmittente è stata posizionata una struttura solida assorbente, in modo tale che le componenti in campo maggiormente ricevute dal device siano costituite prevalentemente dai contributi riflessi del segnale (figura 53).

Va fatto notare che la presenza di ogni singolo pannello assorbente corrisponderà ad un'attenuazione in potenza del segnale ricevuto da DUT, quest'aspetto va preso in considerazione nel caso in cui si decida di valutare le condizioni di propagazione al variare delle condizioni di carico della camera riverberante. Ovvero bisognerà considerare nelle condizioni statiche (intese come assenza di rotazione da parte degli stirrer) lo stesso livello in potenza del segnale alla stessa frequenza di lavoro ricevuto dal DUT nelle varie condizioni di carico. Inoltre, la presenza di pannelli assorbenti implica una riduzione del fattore di qualità della camera riverberante.

Per le nostre misure abbiamo ritenuto utile portare il livello di segnale nelle condizioni iniziali di misura pari ad un RSRP di -100 dBm.

Se si considera la propagazione in un ambiente indoor costituito da un volume V e una finestra di area A , trascurando gli effetti dovuti dal vetro che costituisce la finestra e considerando fenomeni riflessivi ideali dovuti solo alle pareti dello scenario considerato, il fattore di qualità teorico Q , riferito a questa particolare condizione di propagazione, è definito come^[31]:

$$Q = \frac{8\pi V}{\lambda A}$$

Un andamento tipico di Q al variare delle condizioni di carico della camera riverberante considerata è riportato in figura 55, dove si fa riferimento ad un ambiente costituito da una camera $5 \times 4 \times 3$ [m³] con una finestra di 1.2×1.5 [m²].

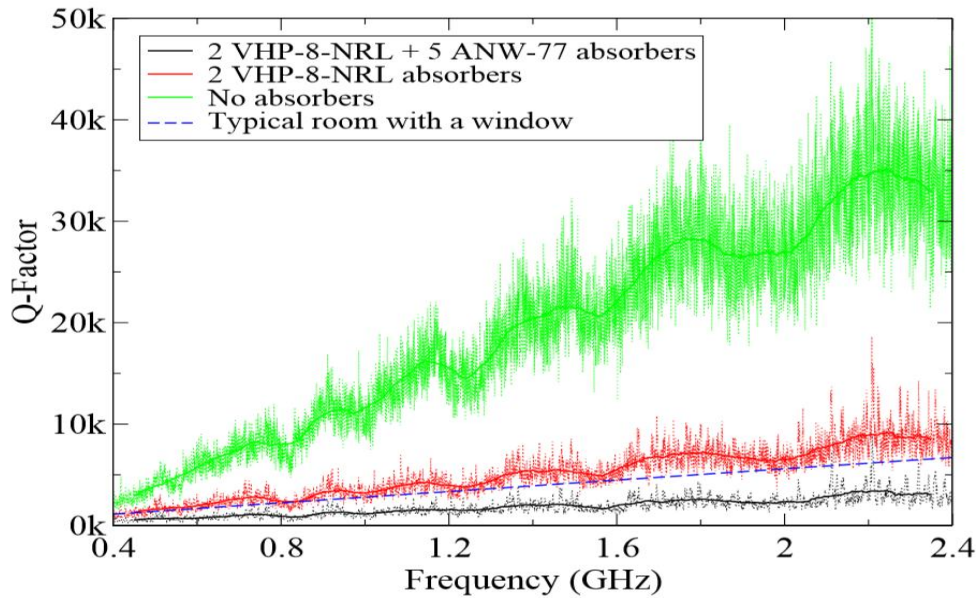


Figura 55: Andamento di Q al variare delle condizioni di carico della camera riverberante^[32]

La linea blu tratteggiata indica il Q teorico, si può notare un andamento decrescente all'aumentare delle condizioni di carico assorbente all'interno della camera. La riduzione di Q determina anche un miglioramento della **banda di coerenza** così come una variazione del “**delay power profile**”.

In figura 56 si riporta, per lo stesso caso in analisi, l'andamento della banda di coerenza ovvero il range di frequenze per le quali due componenti a frequenze differenti possono considerarsi fortemente correlate.

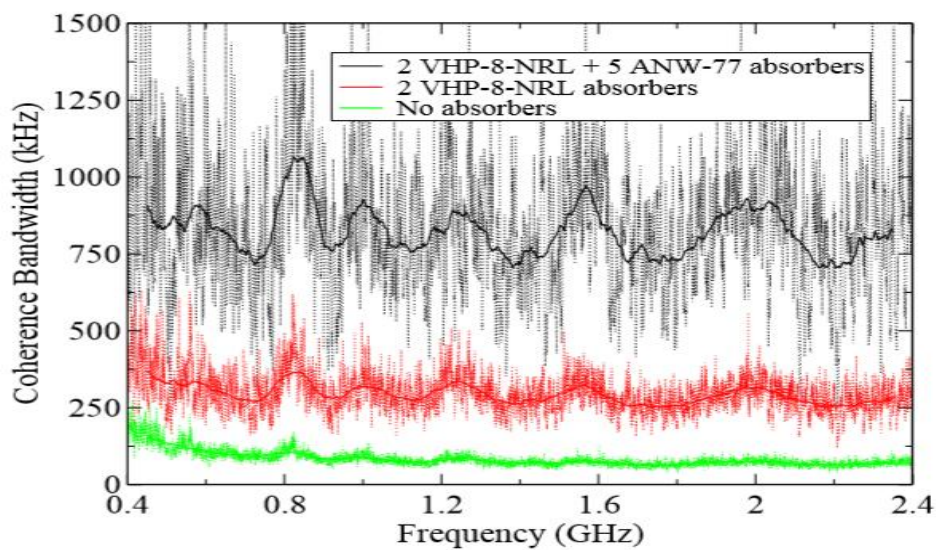


Figura 56: Banda di coerenza al variare delle condizioni di carico della camera riverberante^[32]

In figura 57 viene riportato l'andamento power delay profile al variare delle condizioni di carico. Questo indica l'intensità del segnale ricevuto dal multipath in funzione del "time delay", fornendo un'indicazione sulla differenza temporale tra i contributi di multipath ricevuti. Nel caso in esame il valore è stato ottenuto con una rotazione crescente dello stirrer verticale, con valori rispettivamente di 0, 30 e 80 [deg/s].

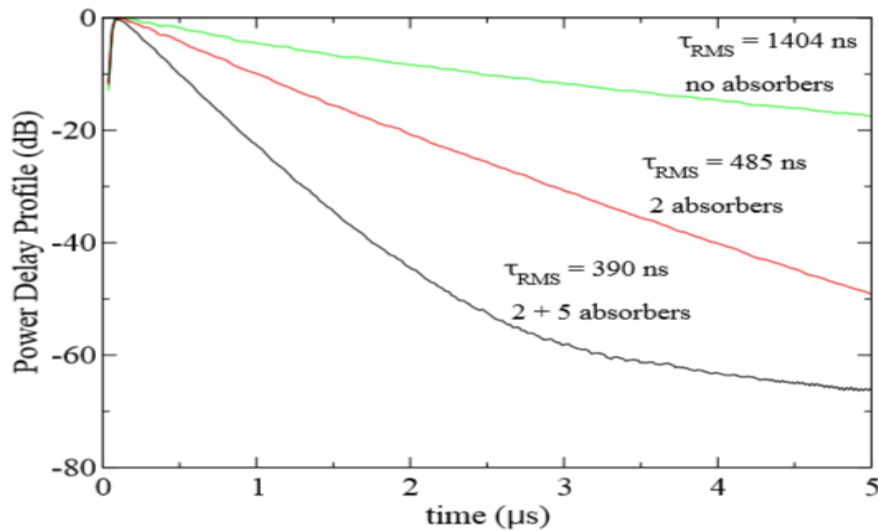


Figura 57: Power Delay Profile al variare delle condizioni di carico della camera riverberante^[32]

4.4.1 Banco di test

Il set-up di laboratorio per le misure in camera riverberante è riportato in figura 58, dove con "A" si indica un eNB in tecnologia Nokia. Va ricordato che le misure da noi compiute fanno riferimento ad un segnale LTE 800MHz. Questa scelta è stata influenzata dalle precedenti analisi nel box anecoico. In tal modo si è cercato di valutare la qualità video percepita dall'utente radiomobile al variare dei contesti propagativi del segnale, ovvero attraverso un confronto tra le misure ottenute in due ambienti di test differenti.

Nella figura 58, "B" fa riferimento ad uno splitter a due vie, il quale permette per ogni suo singolo canale, in base alla configurazione utilizzata, l'utilizzo di due segnali come input e uno di output o viceversa. Per le nostre esigenze è stato configurato utilizzando come ingressi un segnale LTE 800 MHz e un rumore termico nella banda di download ottenuto tramite un generatore segnali "E" con larghezza di banda pari a 20 MHz, portante a 800.6 MHz e livello in potenza variabile in base alle esigenze, poiché anche in questo contesto di misure abbiamo voluto valutare il comportamento del protocollo DASH nel caso in cui la comunicazione radiomobile sia caratterizzata da un canale affetto da rumore aggiuntivo, ovvero un'analisi al variare del SINR.

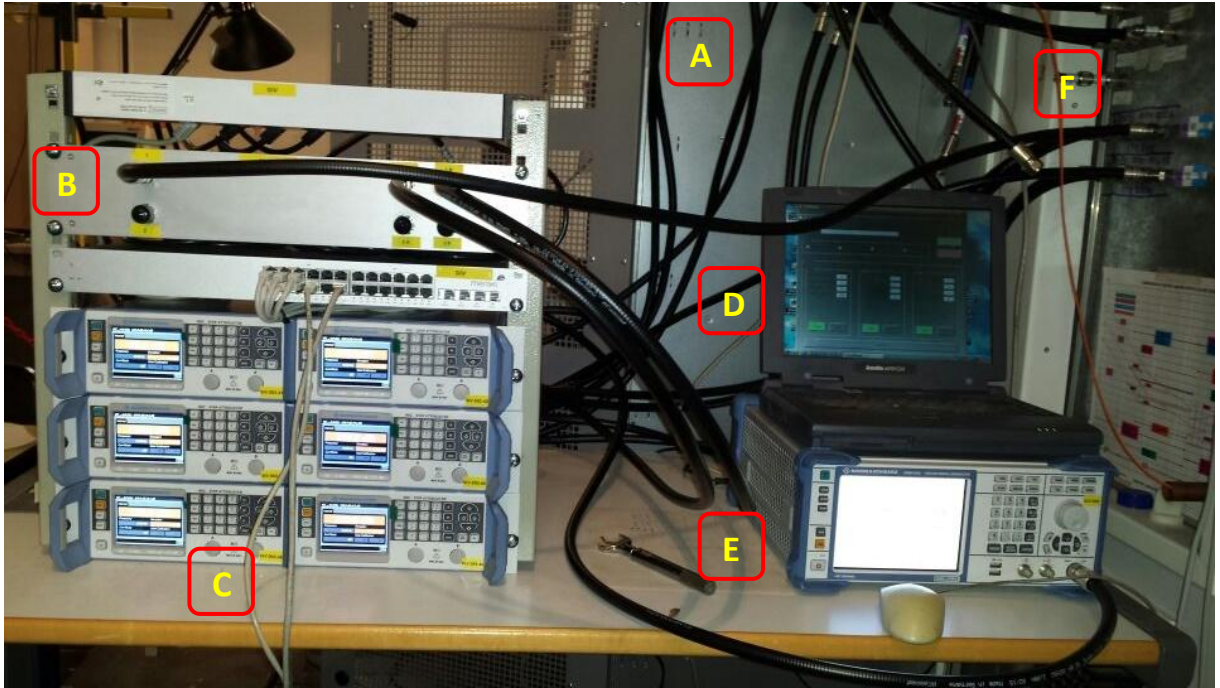


Figura 58: Configurazione del banco di test per analisi in camera riverberante

La condizione di SINR variabile è stata resa possibile conflueno i segnali in una matrice di attenuazione 6x6 “C”, i segnali verranno quindi inviati in camera riverberante attraverso i rispettivi connettori di ingresso “F”.

La gestione della velocità di rotazione degli stirrer è ottenuta attraverso un apposito software installato su un laptop ”D” esternamente la CR. All’interno di questa verrà posizionato il DUT costituito dallo stesso dongle LTE utilizzato per le misure nel box anecoico, quindi il relativo laptop per l’acquisizione del log. Non potendo essere fisicamente presenti all’interno della CR nella fase di misura, e dovendo visualizzare la qualità video selezionata dal client DASH al variare delle condizioni di rete, è stato utilizzato Remote Desktop di Microsoft per gestire il laptop situato internamente alla CR attraverso un ulteriore laptop posizionato esternamente. I due PC sono stati interconnessi attraverso una coppia di trasduttori fast ethernet da rame a fibra. La fibra è stata fatta passare in una delle guide d’onda predisposte nel pannello tecnico della camera riverberante stessa, non alterando così l’isolamento della camera. In questo modo è stato possibile controllare a monitor le operazione effettuare sul laptop interno, così come la risoluzione video del player DASH.

Le misure in camera riverberante si dividono in due tipologie: **tunned mode** e **stirred mode**. Entrambe le metodologie valutano le variazioni del campo elettromagnetico

all'interno della camera al variare della rotazione degli stirrer. Con il tunned mode si compiono rotazioni a scatti dello stirrer e ad ogni scatto di rotazione si valuta l'entità del campo elettromagnetico. Questa tipologia di misura è una procedura molto lunga e richiede vari campioni (dipendenti dalla frequenza di lavoro) per ogni posizione dello stirrer. L'approccio da noi utilizzato è lo stirred mode che si differenzia da quello precedentemente citato nella rotazione dello stirrer.

Infatti in questo caso lo stirrer avrà una rotazione costante per tutta la misura e i fenomeni riflessivi al suo interno saranno funzione della velocità.

Questa dipenderà da vari parametri, quali ad esempio la sensibilità del DUT. Infatti ogni device sarà caratterizzato da una sensibilità diversa e dovrà essere in grado di interpretare correttamente le variazioni del campo elettromagnetico, espresso in termini di guadagno e perdita di potenza del segnale ricevuto. In altre parole, se la variazione del campo è maggiore rispetto al tempo di campionamento del DUT, questo potrebbe trascurare alcuni campioni (sottocampionamento) rendendo la misura poco accurata, annullandone la validità.

Inoltre le rotazioni dello stirrer caratterizzeranno dei picchi e degli affievolimenti del segnale. Questi valori potranno essere correttamente interpretati dal DUT se compresi nel range di potenze acquisibili dal device.

Gli aspetti appena citati, quindi, andranno a determinare la velocità massima alla quale lo stirrer potrà ruotare. Inoltre il numero di campioni acquisito deve essere tale da poter permettere un'adeguata valutazione delle condizioni propagative caratterizzanti il campo elettromagnetico all'interno della CR.

Per poter rendere valida la misura bisognerà rispettare la seguente relazione:

$$\Omega_m(f) < \frac{c^3}{8 V f^2 Q N^{0.5}}$$

Dove:

- Ω_m rappresenta l'evoluzione dello stirrer misurato in [rotazioni/s] nella frequenza di lavoro espressa in [Hz];
- c è la velocità della luce, ovvero 3×10^8 [m/s];
- Q è il fattore di qualità della camera riverberante nella frequenza di lavoro;
- N è il massimo numero di campioni indipendenti nella frequenze di lavoro;

- V è il volume della camera riverberante.

Ad esempio una camera con un volume di $V=100 \text{ m}^3$, $f=10 \text{ GHz}$, $Q=10^4$ e $N=1000$ richiederà un $\Omega_m(f) < 0.1$ rotazioni al secondo.

La formula precedente sarà considerata come una linea guida su quella che potrà essere la velocità massima tollerabile poiché, come già detto, questa dipende dal singolo device utilizzato, dalla frequenza alla quale si compie la misura, dal tipo di camera riverberante (Q) e dal suo carico. Per cui in linea di principio, prima di compiere ogni misura, sarà opportuno valutare se la velocità di rotazione selezionata permette di ottenere significativi risultati e, in caso di esito negativo, identificare la velocità minima e massima ammissibile. Le nostre misure sono state effettuate per ogni condizione di carico, inizialmente con lo stirrer non in movimento e successivamente con una rotazione pari a 30 e 60 [deg/s], ovvero pari a 0,083 e 0,166 [giri/s]. Per garantire la validità delle misure bisognerà valutare l'andamento complessivo dei parametri considerati su un giro dello stirrer.

Al variare della velocità di rotazione ci attendiamo un andamento dell'RSRP variabile in modulo, aspettative ampiamente rispettate dai test in laboratorio, come si può vedere in figura 59.

Infatti questa è caratterizzata da una condizione iniziale con un livello di RSRP pari a -100dBm. Attivando lo stirrer con una velocità di 30 [deg/s] il valore dell'RSRP subisce un'oscillazione in modulo compresa tra -103 e -96 dBm. Questa fase è seguita da uno stop della rotazione e una sua successiva riattivazione con un valore di rotazione pari a 60 [deg/s]. Una velocità maggiore dello stirrer implica una frequenza di oscillazione maggiore rispetto alla precedente, ma anche in questo caso con valori compresi tra -103 e -96 dBm.



Figura 59: Andamento RSRP al variare della velocità di rotazione dello stirrer

La differenza di circa 2 dB tra il valore di RSRP iniziale e quello finale è dovuta alla differente posizione di stop dello stirrer. Infatti questa influisce sulle condizioni di riflessione all'interno della camera anecoica, quindi sul valore in potenza di segnale percepito dal device. Considerando questo comportamento, abbiamo deciso, per le nostre misure, di far riferimento ad una posizione iniziale dello stirrer 0° imposta tramite il relativo software di gestione.

Come nel caso delle misure tramite box anecoico, abbiamo valutato le condizioni del collegamento radio attraverso i parametri SINR e RSRQ e la degradazione della qualità del canale tramite il CQI, poiché questo indica come la BTS (Base Transceiver Station) seleziona lo schema di modulazione più idoneo alle condizioni di canale.

Le misure effettuate fanno riferimento a differenti condizioni di carico, per ognuna di queste abbiamo compiuto le seguenti operazioni:

1. Scelta della condizione di carico;
2. Regolazione sulla matrice di attenuazione del livello in potenza del segnale LTE tale da ottenere un RSRP iniziale pari a -100 dBm;
3. Misura senza rotazione dello stirrer;
4. Misura con rotazione dello stirrer pari a 30 [deg/s];
5. Misura con rotazione dello stirrer pari a 60 [deg/s];
6. Stop dello stirrer;
7. Attenuazione sul livello di rumore in ingresso in camera riverberante pari a 30

dB;

8. Misura senza rotazione dello stirrer;
9. Misura con rotazione dello stirrer pari a 30 [deg/s];
10. Misura con rotazione dello stirrer pari a 60 [deg/s];
11. Stop dello stirrer;
12. Attenuazione sul livello di rumore in ingresso in camera riverberante pari a 40 dB;
13. Misura senza rotazione dello stirrer;
14. Misura con rotazione dello stirrer pari a 30 [deg/s];
15. Misura con rotazione dello stirrer pari a 60 [deg/s];

Nei paragrafi successivi si analizzeranno alcuni dei dettagli più significativi raccolti dei log nelle sessioni di misura. Questi sono stati ottenuti in post elaborazione attraverso i software QCAT e MatLab.

Si cercherà di enfatizzare come la variazione delle condizioni di carico della camera riverberante e la presenza di rumore additivo nella banda di download del segnale LTE influiscano sulla qualità della connessione radiomobile e come questo peggioramento delle condizioni radio vada a riflettersi sul flusso dati di video streaming.

4.4.2 Misure in camera totalmente riflettente con stirrer da 30 a 60 [deg/s] e valore di attenuazione sul rumore pari a 30 dB.

Qui di seguito verranno riportati i dati analizzati durante la sessione di misura corrispondente ad una condizione di carico nulla, ovvero camera riverberante totalmente riflettente e con una velocità dello stirrer pari a 0, 30 e 60 [deg/s], con un livello di attenuazione del rumore pari a 30 dB. Come visto precedentemente, il throughput in queste condizioni di copertura ha un andamento molto variabile per tutta la sessione di traffico. Nonostante la sua variabilità questo tenderà ad oscillare intorno ad un valor medio stabilito in base alle condizioni di copertura radio. Ovvero dipenderanno dal livello in potenza ricevuto sul device e dalla condizione di rumorosità del canale. In un contesto reale il livello di potenza dipenderà dalla distanza dell'utente radiomobile rispetto alla cella servente, così come dal numero di utenti in cella connessi allo stesso eNB, come visto nelle misure in camera anecoica.

Inoltre la potenza di segnale ricevuta dall'utente dipenderà dalla quantità di multipath

caratterizzanti la comunicazione dati.

Considerando una sessione dati con copertura LTE di un utente radiomobile in viaggio su un treno ad alta velocità, si avrà un livello di RSRP fortemente variabile. Queste fluttuazioni saranno dovute al movimento fisico dell'utente verso nuove celle con copertura LTE, le quali potrebbero essere servite da eNB differenti. Le variazioni in potenza termineranno nel momento in cui l'utente rallenti il suo movimento, come ad esempio nel caso di arrivo nelle stazioni ferroviarie. L'RSRP di una sessione dati avrà un andamento simile a quello precedente visto in figura 59.

Un'analisi del throughput complessivo in tutta la sessione dati sarà poco significativa perché il contesto nel quale questo verrà analizzato sarà molto vario. In tal caso bisognerà analizzare il dettaglio di ogni singolo scenario, cercando di individuare le potenziali criticità della connessione in quel contesto specifico. Di seguito quindi verranno riportati gli andamenti del throughput mediato in un giro di stirrer così come in assenza di rotazioni. In figura 60 si riportano i tre valori del throughput, rispettivamente, partendo da sinistra verso destra, faranno riferimento a misure con velocità nulla dello stirrer, 30 e 60 [deg/s]. Si può notare come la variazione di rotazione e quindi l'aumento di multipath del segnale, vada a diminuire di circa 800 Kbps il throughput totale ricevuto dal device. Questa diminuzione, se pur rilevante, non ha portato nessun effetto sul client video DASH poiché per come è stato idealizzato, il video è caratterizzato da una risoluzione massima pari a 7 Mbps, quindi ampiamente sostenibile da una connessione dati caratterizzata da un throughput medio di circa 8 Mbps.

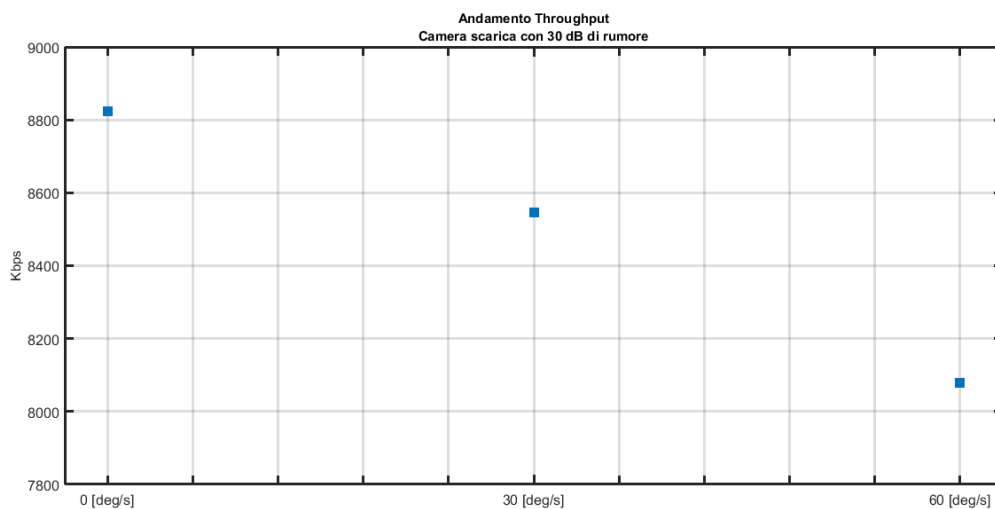


Figura 60: Andamento medio del throughput al variare della velocità dello stirrer

L'effetto delle rotazioni dello stirrer andrà ad influenzare le condizioni di propagazione del segnale, queste verranno percepite dal device come un peggioramento del parametro RSRQ. In figura 61 è rappresentato il suo andamento nel tempo al variare della velocità di rotazione dello stirrer.

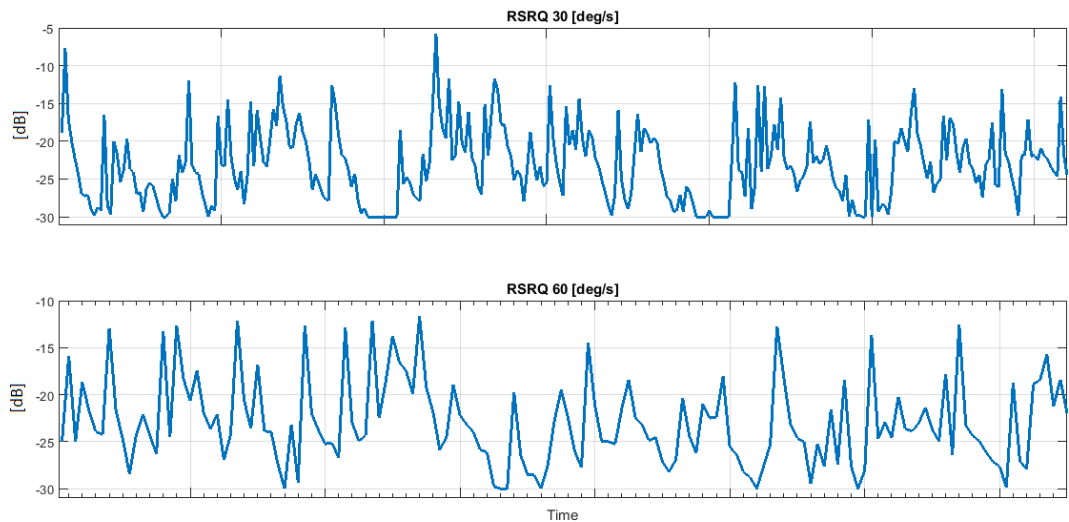


Figura 61: Confronto tra RSRQ al variare della velocità dello stirrer

Va ricordato che le misure qui riportate fanno riferimento ad un livello in potenza del rumore costante, quindi la forte variabilità del RSRQ è dovuto principalmente alla creazione di riflessioni del segnale dovuti alle rotazioni dello stirrer. Sia in questa che nelle successive misure abbiamo notato che una rotazione dello z-stirrer con velocità pari a 30 [deg/s] corrisponde al massimo peggioramento delle condizioni radio. Infatti con questo valore abbiamo spesso riscontrato valori di RSRQ prossimi a -30 dB. Un valore così basso ha determinato in questo e negli altri casi, una disconnessione da parte del terminale. Ovvero il segnale LTE in quel contesto non è in grado di garantire la qualità del servizio prestabilita, quindi il device avvierà e porterà a termine le procedure di handover. Va fatto notare che valori di RSRQ prossimi a -30 dB sono da considerarsi un caso limite che difficilmente si potrà riscontrare nel caso di misure in campo.

In questa sessione anche l'andamento nel tempo del CQI (figura 62) sarà molto variabile e anche in questo caso dipenderà dalle oscillazioni del segnale dovute alla rotazione dello stirrer. Va ricordato che il valore di CQI determina il tipo di modulazione utilizzato e quindi il rate associato a questa.

Nel nostro caso la modulazione varierà dal caso peggiore (CQI=5) QPSK con code rate

0.44, al caso migliore (CQI=10) con modulazione di tipo 64 QAM e code rate 0.45. La diminuzione del rate disponibile implica un aumento del numero di bit di ridondanza per il codice utilizzato perchè il code rate è definito come il rapporto tra il data rate allocato nel sub frame e il massimo data rate allocabile nel sub frame a parità di condizioni. Quindi code rate più bassi saranno associati a canali maggiormente rumorosi perché necessiteranno di maggiori bit di protezione di codice.

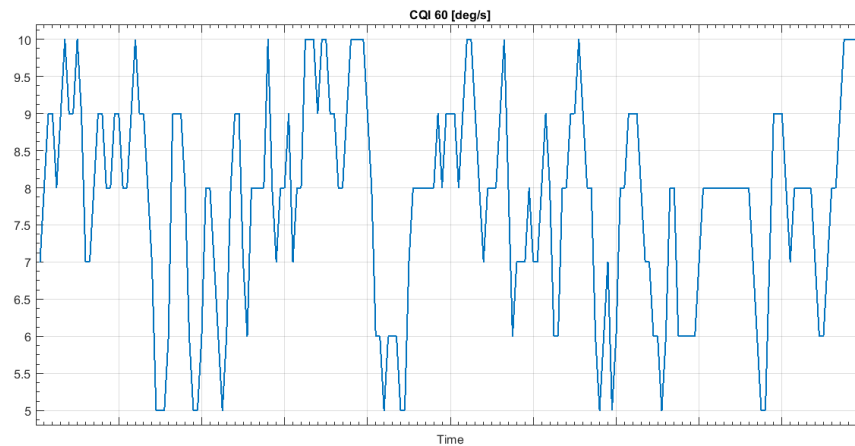


Figura 62: Andamento temporale CQI con stirrer a 60 [deg/s]

In media il CQI per questa sessione di misure è stato pari a 7 il che indica che mediamente la sessione dati è stata caratterizzata da una modulazione di tipo 16-QAM con un code rate di 0.37.

4.4.3 Confronto al variare delle condizioni carico in camera riverberante con livello di attenuazione sul rumore pari a 40dB e stirrer con rotazione a 60 [deg/s].

In questo paragrafo vengono riportati i valori di RSRQ (figura 63) e CQI (figura 64) misurati considerando la velocità dello stirrer a 60 [deg/s] e un livello di rumore crescente. Andremo quindi a valutare come le condizioni di carico della camera riverberante influiscano sulle condizioni qualitative propagative del segnale LTE e come queste influenzino la qualità video finale.

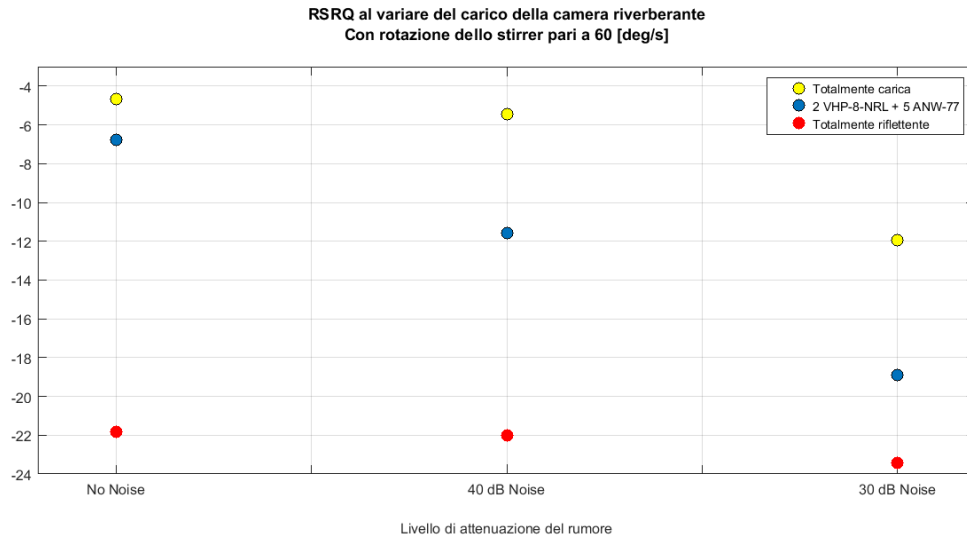


Figura 63: Confronto tra RSRQ al variare della condizione di carico in camera riverberante

L'andamento del RSRQ in condizioni di camera carica al variare del livello di rumore è riportato in giallo e fa riferimento alle configurazioni di carico precedentemente analizzate (figura 53). Si può notare come l'RSRQ sia caratterizzato da un andamento decrescente all'aumentare del livello di rumore in banda di download.

Infatti partendo con un valore iniziale di circa -5 dB in assenza di rumore, decresca di quasi 1 dB per un livello di attenuazione del rumore pari a 40 dB, portandosi a -12 dB corrispondente al massimo valore di rumore nel canale. Questo andamento decrescente è indice di come le condizioni del segnale stiano peggiorando. Comportamento analogo è riferito alle condizioni di carico indicate in blu, le quali fanno riferimento ad una configurazione in camera come riportato in figura 52. Un particolare andamento dell'RSRP è quello riportato in rosso riferito alle condizioni di camera riverberante totalmente riflettete. In questo caso l'alto numero di multipath dovuto all'assenza di pannelli assorbenti viene interpretato dal device LTE come una condizione di canale rumoroso, anche in assenza di rumore additivo, facendo rilevare un livello di RSRQ prossimo -22 dB.

Va fatto notare che in un contesto reale un livello di RSRQ così basso non è misurabile, poiché il livello di rumore sul canale di questo tipo sarà talmente alto da non consentire una connessione dati LTE. Questo eccessivo peggioramento dell'RSRQ porterà all'attivazione delle procedure di handover. In figura 64 vengono riportati gli andamenti del CQI nelle stesse condizioni appena citate. Anche in questo caso si può notare come la condizione caratterizzata da maggiori riflessioni determini valori di CQI molto bassi, intorno a 6 in assenza di rumore additivo sul segnale LTE, questo valore tende a diminuire

con il peggioramento delle condizioni radio.

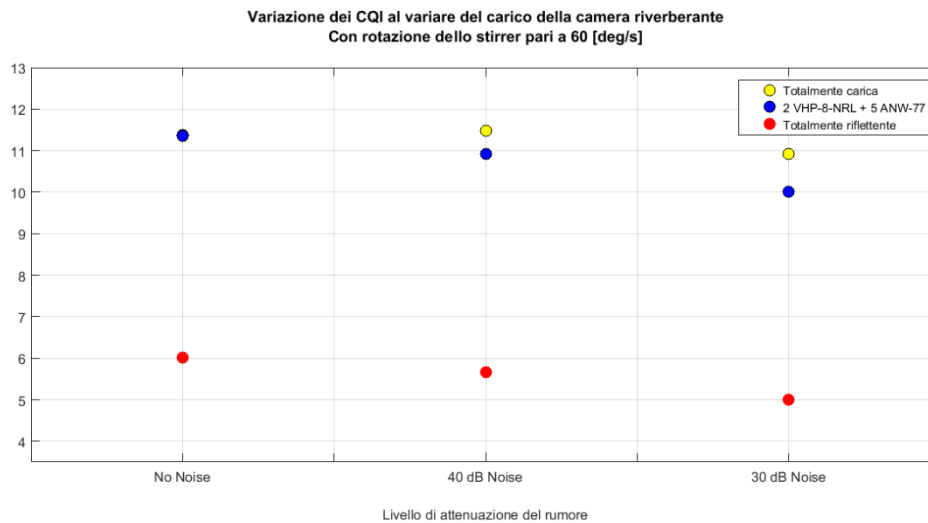


Figura 64: Andamento dei CQI al variare delle condizioni di carico in camera riverberante

La condizione di camera carica e quella parzialmente carica vengono caratterizzate da valori di CQI intorno a 11¹⁶, anche in questo caso hanno un andamento decrescente all'aumentare del livello del rumore. Quindi da questo confronto tra le condizioni di carico della camera riverberante possiamo notare come effettivamente la presenza di materiale assorbente all'interno di questa comporti un andamento di parametri di rete LTE molto prossimi a quelli definiti da specifica. La presenza di multipath del segnale viene rilevata come un peggioramento delle caratteristiche qualitative della comunicazione LTE, di contro però gli stessi fenomeni che degradano la comunicazione portano a dei picchi del livello di RSRP che in base alla natura del fenomeno interferente, ovvero interferenze costruttive o distruttive, potrebbe portare ad un lieve aumento o diminuzione totale del throughput totale.

4.4.4 Conclusioni misure in camera riverberante

Il comportamento del client DASH nello scenario di misure in camera riverberante è stato caratterizzato dai valori di bitrate riportati qui di seguito.

¹⁶ Il CQI per le condizioni di camera carica e parzialmente carica in assenza di rumore è coincidente, dalla figura non si nota la sovrapposizione dei due valori.

Risoluzione video [Mbps]: Camera totalmente carica			
	No stirrer	30 [deg/s]	60 [deg/s]
No Noise	7	7	7
40 dB	7	7	7
30 dB	7	7	7

Risoluzione video [Mbps]: Camera parzialmente carica (2 VHP-8-NRL + 5 ANW-77)			
	No stirrer	30 [deg/s]	60 [deg/s]
No Noise	7	7	7
40 dB	7	$7 \div 2.5$	$2.5 \div 0.5$
30 dB	7	$7 \div 2.5$	$2.5 \div 0.5$

Risoluzione video [Mbps] : Camera totalmente riflettente			
	No stirrer	30 [deg/s]	60 [deg/s]
No Noise	7	7	7
40 dB	7	$2.5 \div$ freezing	$2.5 \div 0.5$
30 dB	7	$2.5 \div$ freezing	$2.5 \div 0.5$

In queste misure il comportamento del client ha risentito fortemente del valore di rumore presente nella banda di download, infatti indipendentemente dal valore di rotazione dello stirrer, l'introduzione del rumore è stata l'unica condizione che ha effettivamente messo in crisi il flusso dati in video streaming.

Per quanto riguarda le fluttuazione dell'RSRP, queste hanno influenzato poco il comportamento del client DASH perché, pur variando fortemente in modulo, mantengono un valore medio che dipende dalle condizioni di canale, quindi mediamente la risoluzione video, in assenza di rumore, sarà direttamente proporzionale al valore di throughput disponibile all'utente. Tuttavia, così come per il caso di misure in ambiente anecoico, il player DASH stabilisce la risoluzione video in base all'esatto valore di banda letto nel'istante di GET.

5. Conclusioni

È stato sviluppato un server DASH ottimizzando alcune componenti Open Source per consentire un'analisi in real time della qualità percepita dal cliente radiomobile dei servizi di video streaming. Attraverso un ambiente di propagazione controllato (camera anecoica) abbiamo valutato il comportamento del protocollo di video streaming DASH in alcuni scenari propagativi tipici per un utente radiomobile. Nel caso di connessione dati con rete LTE abbiamo potuto constatare come la robustezza della modulazione OFDMA permetta di garantire, anche nelle condizioni più sfavorevoli, un throughput abbastanza alto non scendendo mai sotto i valori di 2,5 Mbps. La qualità del formato video con un throughput pari a 2,5 Mbps corrisponde, secondo i canoni consigliati da Google ^[21], ad un 480p, quindi poco inferiore a quelli che possono essere considerati i formati video in HD.

Questo valore di throughput è il limite inferiore al di sotto del quale non si è riusciti a scendere con l'impiego di una singola cella LTE prima di perdere definitivamente la connessione. In un contesto reale, al peggiorare delle condizioni radio della cella servente, il terminale provvederà ad attivare e concludere le procedure di handover verso la cella target prima di arrivare a perdere la connessione con la servente, andando ad operare in condizioni tali da garantire throughput più alti.

È stato verificato che anche la durata della fase di handover non risulta essere critica per la qualità del servizio percepita.

Contesti propagativi costituiti da forti fenomeni di riflessione del segnale, ricreati in ambiente riverberato (camera riverberante), hanno poca influenza sulla banda del client video, maggiori problemi vengono invece riscontrati nel caso di canale fortemente rumoroso, com'è ovvio che sia. Anche questi casi, pur costituendo una condizione di limite inferiore non ottenibile in un contesto di misure in campo, permettono di garantire una qualità video non inferiore a 480p.

Entrambi gli scenari di misura effettuati sono stati ottenuti con una configurazione del segnale LTE in modalità SISO che come già detto è stata scelta per andare ad individuare le peggiori condizioni radio ottenibili. In generale, nel contesto reale, le configurazioni del segnale saranno di tipo MIMO e forniranno all'utente un banda doppia rispetto alle misure da noi effettuate.

Quindi possiamo dire che, in uno scenario reale, l'LTE nelle condizioni propagative meno favorevoli permette ampiamente di sostenere un flusso video streaming DASH con un formato video HD minimo prossimo a 720p.

Per quanto riguarda il protocollo DASH, se le risoluzioni rese disponibili sul server sono ben dimensionate, possiamo sostenere che mostra una buona adattatività anche alle peggiori condizioni di copertura radio, garantendo la consegna ottimale del video con un consumo in termini di traffico minimo.

Le misure da noi condotte fanno riferimento al caso in cui l'accesso alla rete avvenga tramite un dongle LTE collegato ad un laptop. In queste condizioni abbiamo visto che la consegna di file video con bitrate di 7 Mbps non è mai stata soggetta a freezing audio-video e non si sono mai verificati eventi di rebuffering. Non è stato possibile effettuare le stesse prove con smartphone di diversi costruttori a causa, probabilmente, di un limite dell'attuale versione del client Osmo4 per i sistemi Android su smartphone che non permette di visualizzare il filmato di test per più di 20 secondi.

In ultimo, vorrei esprimere un mio personale suggerimento riguardo la possibilità di migliorare l'adattatività video sui dispositivi radiomobili aggiungendo un elemento di controllo oltre alla verifica di banda disponibile al client DASH e la relativa risoluzione video.

Ritengo poco utile, pur essendo possibile in termini di banda disponibile, visualizzare una risoluzione video tipo 4K¹⁷ su un dispositivo dalle ridotte dimensioni fisiche dello schermo, quale potrebbe essere ad esempio uno smartphone da 5 pollici, in quanto l'utente poco potrebbe apprezzare i dettagli di una qualità così elevata.

Inoltre la consegna di un formato video in queste condizioni si ripercuote lato rete con un "eccessivo" impiego di risorse. Dunque ritengo che il client di adaptive streaming dovrebbe acquisire inizialmente l'informazione sul tipo di hardware utilizzato e adattare il formato video oltre che alle condizioni di copertura radio anche con le dimensioni del display in uso.

¹⁷ 2160p(4K) = 3840 x 2160 pixel

6. Bibliografia e Sitografia

- [1] Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014–2019.
- [2] 3GPP TS 26.247-3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Transparent end-to-end Packet-switched Streaming Service (PSS); Progressive Download and Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (3GP-DASH);
- [3] ISO/IEC 23009-1 Information technology-Dynamic adaptive streaming over HTTP (DASH). Part 1: Media presentation description and segment formats;
- [4] [http://gpac.wp.mines-telecom.fr/2012/02/01/dash-support/;](http://gpac.wp.mines-telecom.fr/2012/02/01/dash-support/)
- [5] [http://www-itec.uni-klu.ac.at/ftp/datmaset/msys12/BigBuckBunny/bunny_15s/;](http://www-itec.uni-klu.ac.at/ftp/datmaset/msys12/BigBuckBunny/bunny_15s/)
- [6] [http://www.ubuntu-it.org/;](http://www.ubuntu-it.org/)
- [7] <https://wiki.gnome.org/Apps/Gedit;>
- [8] [http://www.ffmpeg.org/;](http://www.ffmpeg.org/)
- [9] [http://gpac.wp.mines-telecom.fr/;](http://gpac.wp.mines-telecom.fr/)
- [10] ETSI TS 102 250-5 V2.3.1-Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS aspects for popular services in mobile networks; Part 5: Definition of typical measurement profiles.
- [11] ITU. H.264. SERIES H: AUDIOVISUAL AND MULTIMEDIA SYSTEMS. Infrastructure of audiovisual services – Coding of moving video;
- [12] <https://github.com/Dash-Industry-Forum/dash.js;>
- [13] [http://gpac.wp.mines-telecom.fr/player/;](http://gpac.wp.mines-telecom.fr/player/)
- [14] http://it.wikipedia.org/wiki/LTE_%28telefonia%29;
- [15] <http://www.3gpp.org/specifications/releases/72-release-8;>
- [16] <http://www.3gpp.org/DynaReport/23401.htm;>
- [17] 3GPP TS 36.423: “Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 Application Protocol (X2AP)”;
- [18] ETSI TS 136 211 v8.9.0 (2010-01) “LTE. Evolved Universal Terrestrial Radio Access(E_UTRA) Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 8.9.0 Release 8)”;
- [19] [ITU-T H.264] Recommendation ITU-T H.264 (2014), Advanced video coding for generic audiovisual services;
- [20] [ITU-T J.149] Recommendation ITU-T J.149 (2004), Method for specifying accuracy and crosscalibration of Video Quality Metrics (VQM);
- [21] <https://support.google.com/youtube/answer/1722171?hl=it;>
- [22] ETSI TS 136 214 V9.1.0 (20120-04); LTE-Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer – Measurement (3GPP TS 36.214 version 9.1.0 Release9);
- [23] IEC 61000-4-21: ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) – Part 4-21:Testing and measurement techniques – Reverberation chamber test methods ;
- [24] A. Skarbratt, J. Asberg, and C. Orlenius, “Over-the-air performance testing of wireless terminals by data throughput measurements in reverberation chamber,” in Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), 2011, pp. 615–619.

- [25] C. L. Holloway, D. A. Hill, J. M. Ladbury, P. F. Wilson, G. Koepke, and J. Coder, "On the use of reverberation chambers to simulate a Rician radio environment for the testing of wireless devices," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 11, pp. 3167–3177, Nov. 2006.
- [26] A. Sorrentino, G. Ferrara, and M. Migliaccio, "On the coherence time control of a continuous mode stirred reverberating chamber," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 10, pp. 3372–3374, 2009.
- [27] C. L. Holloway, H. A. Shah, R. J. Pirkl, K. A. Remley, D. A. Hill, and J. Ladbury, "Early time behavior in reverberation chambers and its effect on the relationships between coherence bandwidth, chamber decay time, RMS delay spread, and the chamber buildup time," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 54, no. 4, pp. 714–725, Aug. 2012.
- [28] X. Chen, P.-S. Kildal, C. Orlenius, and J. Carlsson, "Channel sounding of loaded reverberation chamber for over-the-air testing of wireless devices: Coherence bandwidth versus average mode bandwidth and delay spread," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 678–681, 2009.
- [29] G. Ferrara, M. Migliaccio, and A. Sorrentino, "Characterization of GSM non-line-of-sight propagation channels generated in a reverberating chamber by using bit error rates," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 49, no. 3, pp. 467–473, Aug. 2007.
- [30] M. Andersson, A. Wolfgang, C. Orlenius, and J. Carlsson, *Measuring Performance of 3GPP LTE Terminals and Small Base Stations in Reverberation Chambers*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009, ch. 12, pp. 413–458.
- [31] D. A. Hill, *Electromagnetic Fields in Cavities: Deterministic and Statistical Theories*. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2009, p. 206
- [32] M. Barazzetta, D. Micheli, F. Moglie and V.M. Primiani: "Over-the-Air Performance Testing of a Real 4G LTE Base Station in a Reverberation Chamber".

7. Ringraziamenti

La strada è stata lunga e contorta, le difficoltà, le giornate nere e quelle passate su una scrivania, sono state compagne del mio percorso. Ma ora che la fatica è passata, tutto sembra più leggero. Guardandomi posso gioire per quello che sono diventato. Sarò sempre grato alle persone speciali che hanno reso possibile tutto questo.

Vorrei ringraziare la Prof.ssa Maria Gabriella Di Benedetto per aver creduto in me offrendomi quest'importante opportunità di tesi. Per avermi dato l'occasione di approfondire, ancora una volta, argomenti così affascinanti.

Un ringraziamento particolare a Pietro Obino, Renzo Lattanti e Marco Carlucci, per avermi accolto in Telecom Italia, offrendomi supporto tecnico anche nelle giornate lavorative più impegnative. Per aver messo a mia disposizione laboratori, attrezzature e personale. Per aver reso possibile tutto questo. Grazie.

Grazie a Nicola Di Florio, per la sua pazienza, disponibilità e per l'aiuto di questi giorni.

Vorrei ringraziare il Prof. Valter Mariani Primiani dell'università Politecnica delle Marche, per aver messo a disposizione laboratori, attrezzature e documentazione, dando così maggior completezza a questo lavoro. Inoltre un doveroso ringraziamento per il loro supporto tecnico a Davide Micheli, Massimo Barazzetta e Franco Moglie.

In ultimo ma non per importanza, vorrei ringraziare le persone che da sempre subiscono i miei amorevoli umori. Grazie alla mia ragazza Angela, per essere riuscita a tollerare le mie giornate da orso.

Un immenso ringraziamento ai miei genitori e a mio fratello, per i loro sacrifici e privazioni. E' solo per voi se sono arrivato fin qui, spero siate orgogliosi di me.

A voi dedico questo lavoro.