

Università degli studi di Padova
Dipartimento di Ingegneria
dell'Informazione

Corso di laurea in Ingegneria dell'Informazione

**Studio e simulazione delle procedure di handover
nello standard per reti cellulari LTE**

Studente
Roberto Barumerli
612131

Relatore
Leonardo Badia

Correlatore
Marco Zanforlin

Anno accademico 2012-2013

INDICE

1. Introduzione	2
1.1 Premessa	2
1.2 Long Term Evolution (LTE)	3
1.2.1. 3rd Generation Partnership Project (3GPP)	3
1.2.2. Novità sulla struttura della rete in LTE	3
1.2.3. Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)	4
1.3 Simulatore NS3	5
2. Mobilità ed Handover nelle reti cellulari	6
2.1 Panoramica sulle procedure di handover	6
2.2 Handover in LTE	7
2.2.1. Premessa	7
2.2.2. Struttura della rete LTE	7
2.2.3. Panoramica sui protocolli utilizzati in LTE	8
2.2.4. Convenzioni sul stato utente	10
2.2.5. Measurement Report	11
2.2.6. Realizzazione dell'handover da e verso una rete LTE	11
3. Simulazione	15
3.1 Il simulatore ns3	15
3.1.1. Struttura di un programma	15
3.1.2. Primo esempio in ns3 – LTE	15
3.2 Librerie ed elementi utilizzati per la simulazione	17
3.2.1. Esempio <i>lena-x2-handover.cc</i>	17
3.2.2. Librerie aggiuntive	19
4. Scenari realizzati e risultati	22
4.1 Scenari studiati	22
4.1.1. Prima simulazione	22
4.1.2. Seconda simulazione	22
4.1.3. Terza simulazione	23
4.1.4. Quarta simulazione	23
4.2 Risultati ottenuti e grafici	24
4.2.1. Prima simulazione	24
4.2.2. Seconda simulazione	26
4.2.3. Terza simulazione	28
4.2.4. Terza simulazione Bis	30
4.2.5. Quarta simulazione	31
5. Conclusioni	33
Bibliografia	34

1 INTRODUZIONE

1.1 Premessa

L'obiettivo di questo testo è quello di studiare, simulare e osservare come in una rete cellulare mobile di quarta generazione venga gestita la mobilità degli utenti.

Reti di questo tipo prevedono infatti che gli utenti si colleghino tramite un canale wireless permettendo, durante una chiamata ad esempio, a questi di muoversi senza che la connessione venga interrotta.

Questo grado di libertà, la mobilità, richiede però un'attenta gestione perché la capacità di trasmissione, in una rete wireless, è inversamente proporzionale alla distanza tra antenna e utente.

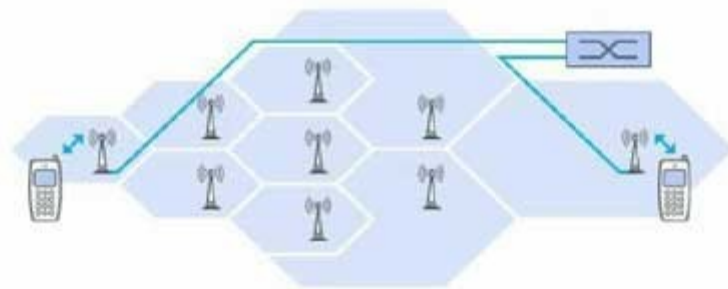


Figura 1: Struttura a celle di una rete mobile

A fronte di questo problema la rete di accesso è stata strutturata a celle adiacenti in ognuna delle quali è presente un'antenna che gestisce la connessione da e verso gli utenti e il sistema interno. Questa struttura di rete consente una buona copertura ma deve prevedere che un utente in movimento possa mantenere una connessione attiva e usufruibile quando passa da una cella ad un'altra adiacente (ad esempio non deve cadere la linea quando una chiamata è in corso). Le tecniche e i metodi, per garantire che servizi e connessioni utente restino attivi, sono detti di Handover.

In questo testo verranno realizzati due simulazioni per studiare le problematiche derivate dalla mobilità degli utenti e come sono gestite in una rete LTE.

Nel primo verrà messo in evidenza come variano i parametri della connessione in funzione della posizione dell'utente rispetto ad un'antenna con un certo raggio di copertura.

Nel secondo invece verrà realizzata una simulazione con più utenti in movimento e più antenne cercando di riprodurre un'ambientazione urbana.

Si studierà come può variare la qualità delle connessioni in base allo spostamento degli utenti.

1.2 Long Term Evolution (LTE)

1.2.1 3rd Generation Partnership Project (3GPP)

Il 3rd Generation Partnership Project è un accordo di collaborazione fra enti che si occupano di standardizzare sistemi di telecomunicazione [1]. In particolare si occupano di produrre Reports e Specifiche riguardanti le tecnologie mobili di terza generazione e le sue evoluzioni.

In figura (2) è disponibile una timeline degli standard realizzati dal 3GPP. In particolare con la Release 8 vengono definiti gli standard LTE, i quali sono un'evoluzione delle reti cellulari di terza generazione.

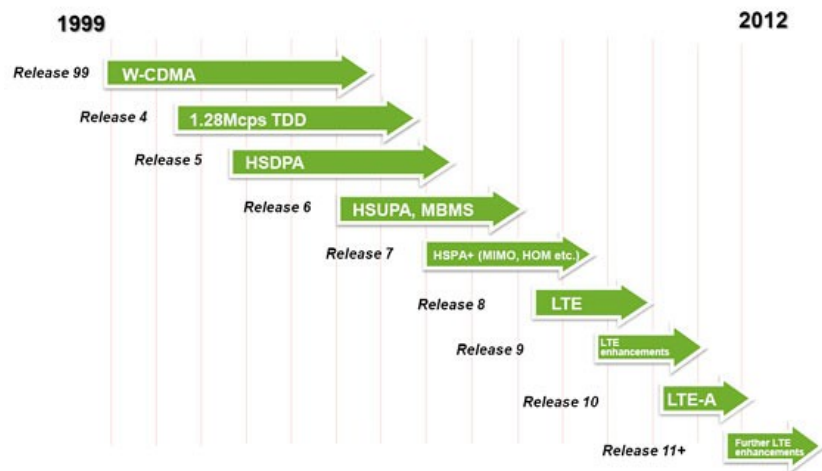


Figura 2: Release e rispettive tecnologie redatte dal 3GPP

1.2.2 Novità sulla struttura della rete in LTE

Una delle principali novità adottate dall'architettura LTE è stata, a livello rete dello stack ISO/OSI, la scelta dell'Internet Protocol (IP) come protocollo chiave per tutti i servizi, dalla comunicazione utente fino alla rete interna. Questo di conseguenza ha comportato che tutta la rete invii dati con una commutazione di pacchetto e non più ibrida [2] a differenza delle reti di terza generazione dove, per voce e SMS, viene usata una commutazione di circuito mentre per i servizi dati è implementata una commutazione a pacchetto. Questo ha permesso che la rete interna, schematizzata in figura (3), chiamata Evolved Packet Core (EPC), e la rete di accesso, Evolved Universal Terrestrial Access Network (E-UTRAN), siano più flessibili e facilmente implementabili [3] garantendo una buona copertura di rete dove, ad esempio, a causa della conformazione, il territorio è difficilmente raggiungibile (es. zone montuose) oppure garantire un'elevata velocità di trasmissione dati (es. zone con un elevato

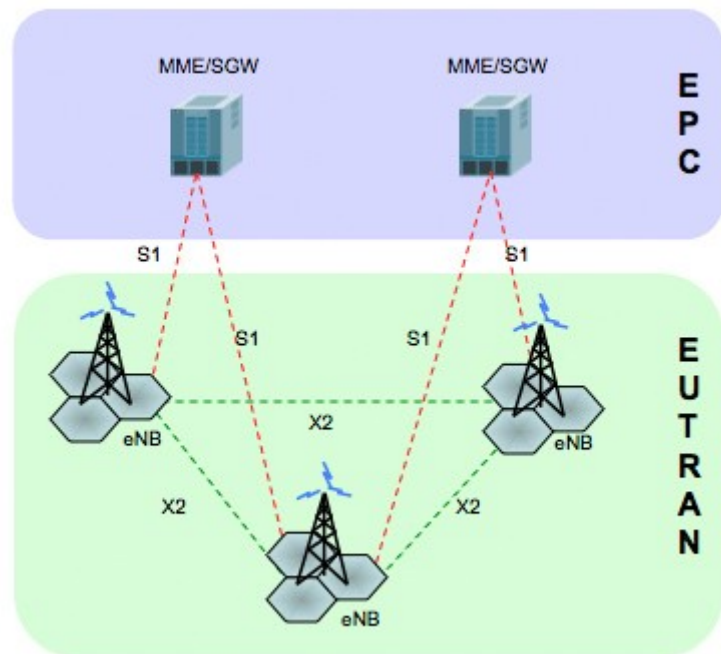


Figura 3: Struttura di una rete LTE

zone montuose) oppure garantire un'elevata velocità di trasmissione dati (es. zone con un elevato

numero di utenti collegati come, ad esempio, i centri urbani).

Una rete mobile infatti è strutturata in più livelli e più entità sono presenti e possono essere divise in macro categorie: utenti, rete di accesso e rete interna.

Gli utenti, User Equipment (UE), sono gli utilizzatori/usufruttori della rete, cioè coloro che, generano traffico dati (es. chiamate/video-chiamate, Short Message Service (SMS), traffico Internet come pagine Web o traffico VoIP). Questi possono essere ad esempio: telefoni cellulari, smartphone o chiavette Internet.

La rete di accesso invece è quel sistema di nodi provvisti di un'interfaccia radio, evolved NodeB (eNB), tramite i quali gli utenti si collegano alla rete. Questi garantiscono la copertura radio della cella a cui fanno riferimento e fanno da tramite tra la rete interna e gli utenti gestendo le connessioni dati utente, User Plane (UP), e le connessioni di controllo, Control Plane (CP).

La rete interna, che non è direttamente accessibile dall'utente, gestisce il traffico dati da e verso l'utente, la sua identificazione, la sua posizione e l'interazione con altri utenti presenti in rete.

La rete di accesso in LTE è stata rivista e aggiornata rispetto agli standard precedenti.

La nuova soluzione utilizza una rete di stazioni base (eNB) collegate tra loro con una topologia mesh [4], in particolare ogni nodo è connesso ai nodi ad esso adiacenti, e direttamente collegate alla rete interna. Questo sistema si differenzia dalla rete di seconda generazione GSM dove sono costituiti vari gruppi di nodi di accesso e ogni gruppo fa riferimento ad un unico *controller* [5]. L'accesso diretto alla rete interna ha permesso di implementare direttamente nei nodi esterni diverse funzioni, riguardanti il controllo della connessione utente (come il setup di un utente che richiede di accedere oppure la gestione degli handover) con notevoli vantaggi in termini di performance e tempi di esecuzione.

1.2.3 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)

Un'altra grossa novità portata da LTE è quella di aver implementato OFDMA, derivato dalla Frequency Division Multiple Access (FDMA), come schema di modulazione del segnale sul canale radio tra utente e nodo di accesso, eNB.

Questo schema è utilizzato nel downlink, cioè i dati dalla rete verso l'utente (downlink) mentre nell'uplink, quindi i dati dall'utente alla rete, viene usato il metodo Single Carrier-FDMA.

FDMA è una tecnica di accesso al canale da parte di più sorgenti di informazione realizzata suddividendo la banda di frequenze disponibile in più sottobande.

L'uso di FDMA e utilizzando nei sottocanali modulazioni con alti throughput, ad esempio 64QAM, la possibilità di gestire larghezze di banda fino a 20 MHz e trasmissioni multiple nel downlink possono portare a 75 Mbps in uplink e 300

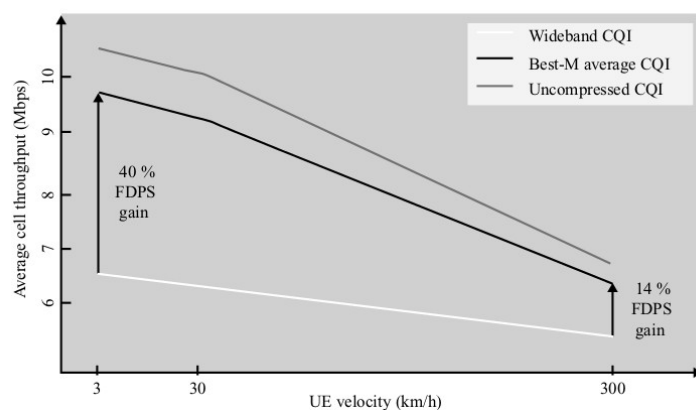


Figura 4: Throughput in funzione della velocità di spostamento dell'utente.

Mbps. Questi sono dati massimi teorici quindi con un'ottima qualità di trasmissione sul canale radio, ad esempio un utente molto vicino ad un'antenna, fermo o in movimento a bassissima velocità, e senza ostacoli tra essi, e dalla congestione della rete. Infatti se più utenti trasmettono/ricevono dati nello stesso tempo la risorsa, il throughput massimo disponibile, viene suddivisa determinando un peggioramento del throughput medio di ciascun utente. Queste elevate performance garantiscono che servizi, quali video-chiamate, siano usufruibili con buone prestazioni, ad esempio con basse latenze sulla ricezione del video.

1.3 Simulatore NS3

Il simulatore denominato *ns3*, acronimo di Network Simulator, è disponibile al sito www.nsnam.org ed è un simulatore di rete ad eventi discreti per utilizzi di ricerca o educativi [7].

Il simulatore contiene le classi necessarie per avviare test su varie tipologie di reti e protocolli (da Ethernet a Wifi). Dalla versione 3.17, disponibile da Aprile 2013, sono stati integrati nel progetto gli oggetto software necessari per simulare una rete LTE, prima disponibili un modulo esterno.

L'intero programma è rilasciato in licenza GNU GPL2 ed è scritto in C++ e Python.

La tesi sarà organizzata come segue: il Capitolo 2 tratterà delle procedure di handover con una panoramica generale sulla rete e come, le procedure, vengono realizzate in LTE, il Capitolo 3 verrà documentato il lavoro svolto con il simulatore commentando il codice scritto per le simulazioni, il Capitolo 4 metterà a disposizione i risultati numerici ottenuti dalle simulazioni ed infine il Capitolo 5 trarrà le conclusioni del lavoro svolto.

2 Mobilità ed handover nelle reti cellulari

2.1 Panoramica sulle procedure di Handover

Nelle reti cellulari la mobilità è una delle caratteristiche fondamentali.

Questa peculiarità ha reso necessario l'utilizzo di alcune tecniche specifiche, dette di *handover*, per mantenere una continuità del servizio in uso dall'utente al momento dell'eventuale passaggio da una cella all'altra a causa della limitata copertura di quest'ultime.

La **procedura di handover** infatti è quel processo che permette di cambiare canale di trasmissione, o suoi parametri, utilizzato per la connessione verso la rete di accesso (vedi eNB).

Questi metodi non si utilizzano solo quando si attraversa il confine di una cella per entrare in una cella adiacente ma anche quando la qualità del segnale radio si deteriora a tal punto da rendere inutilizzabile il link ed è richiesta una riconessione.

L'*handover* si divide in due principali categorie: **hard** e **soft** (che seguono la filosofia “break before make” e “make before break”).

Nell'*hard handover* le risorse in uso vengono rilasciate prima di riconnettersi e accedere alle nuove risorse mentre nel *soft handover* sia le risorse esistenti che le nuove vengono utilizzate e mantenute durante la procedura.

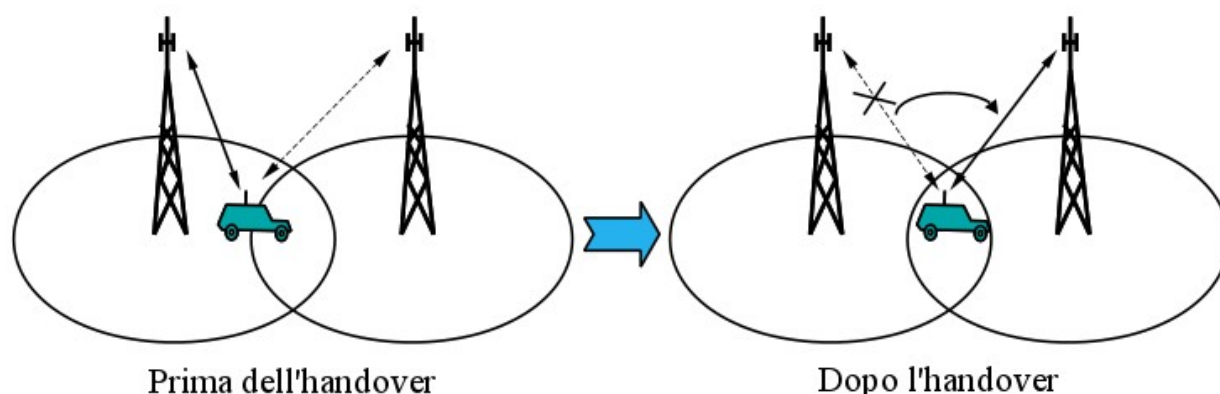


Figura 5: Bozza sul funzionamento di una procedura di handover [8]

La rete utilizza il canale di controllo utente (CP) per effettuare l'handover cioè il canale, tra UE e rete di accesso, che gestisce la connessione e al suo mantenimento affinché sia possibile trasmettere

dati utente come chiamate voce o pagine web.

La procedura richiede però un'attenta e controllata progettazione per ottenere dei risultati efficienti in quanto potrebbe causare, nei canali di controllo, picchi di traffico molto alti dovuti ad un ampio scambio di dati di servizio, utilizzati per la gestione del "salto", e con ciò, un vistoso calo in termini di qualità del servizio (QoS).

Un'altra ragione per cui l'*handover* è così essenziale nelle reti cellulari è data dal fatto che, per celle adiacenti, vengono stabiliti insieme di bande di frequenza disgiunti per minimizzare le interferenze/sovrapposizioni fra i canali. Per questo motivo si rende necessaria una negoziazione tra l'utente e la rete di accesso per (ri)definire i parametri di connessione (caso di inter-frequency handover).

2.2 Handover in LTE

2.2.1 Premessa

Con l'introduzione di LTE si aggiungono dei nuovi scenari sui quali poter operare: dalle classiche macro-celle, con una copertura dai 10 km, per zone rurali, fino a 100 km, per zone a bassa utenza, alle micro-celle, con copertura più ridotta, di qualche kilometro, per zone urbane e suburbane, sono state introdotte le *femto-celle*, o Home eNB.

Queste sono delle stazioni base di basso costo e bassa potenza pensate per ambienti indoor, quali abitazioni domestiche o uffici, e hanno l'obiettivo di estendere e migliorare la rete mobile nei luoghi chiusi [9] infatti la copertura prevista è di poche decine di metri.

Il raggio di copertura è determinato da vari fattori quali la potenza di trasmissione degli utenti, circa 24 dBm, e degli eNB, dai 46 dBm per le macro-celle ai 10 dBm per le femto, dalla presenza o meno di ostacoli, come palazzi o alberi, tra trasmettitore e ricevente. [10]

Per i vari tipi di celle, oltre alla copertura geografica, vengono previsti parametri diversi sulla trasmissione e sulle codifiche di canale (es. numero massimo di utenti collegabili, portanti su cui trasmettere), altri parametri sulla gestione della cella e proprio a causa di queste differenze, quando un utente in movimento passa da una cella all'altra, è necessario attuare delle procedure, di handover, per la riconfigurazione della connessione.

2.2.2 Struttura della Rete LTE

Uno User Equipment (UE) in rete può connettersi, ed accedere alla rete, collegandosi ad un **evolved-NodeB** (eNB), l'insieme di questi nodi costituisce la rete di accesso.

Gli eNB sono finalizzati a gestire la connessione, tramite canale radio, dell'utente in rete. Svolgono quindi una parte fondamentale nelle procedure di handover. Le funzioni previste quindi sono: rendere disponibile e monitorare lo stato del canale

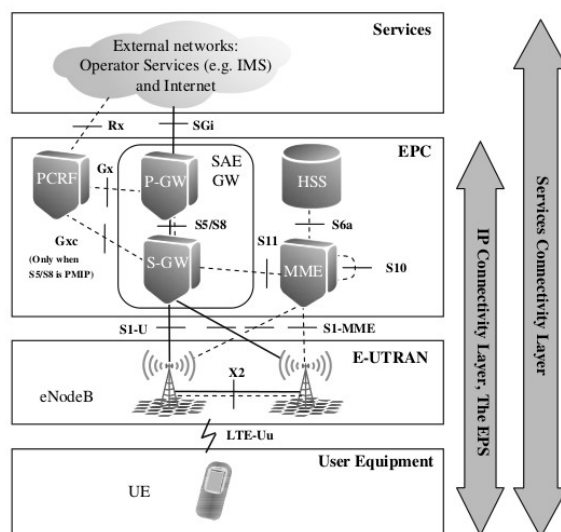


Figura 6: Struttura dettagliata della rete LTE

radio (protocollo RRM e RRC descritti nel paragrafo 2.2.3), gestire nuovi utenti, creando la nuova connessione, e provvedere alla registrazione nel sistema, allocare risorse rispetto alla Quality of Service richiesto (in LTE sono state introdotte diverse classi di utenti differenziando la qualità/velocità di accesso alla rete).

Oltre a far da tramite tra utente e sistema sono gli eNB a gestire, quasi completamente, la mobilità degli utenti (Mobility Management) richiedendo e analizzando le misurazioni dei livelli di segnale degli UE connessi e partecipando in modo significativo alle procedure di handover. Gli eNB a loro volta sono connessi al sistema interno (EPC) dove vengono effettivamente gestiti i dati utente dall'identificazione a all'instradamento.

Nella rete interna i **Mobility Management Entity** (MME) sono i server dedicati ad organizzare gli UE registrati, a registrare la loro posizione e il loro stato (se sono attivi o meno).

Un MME prevede varie funzioni quali: autenticare e registrare i vari UE nella rete gestendo quindi i dati sensibili (archiviati in un Home Subscription Server – HSS), tracciare la posizione degli UE in tempo reale (se questi sono attivi) analizzando i dati ricevuti dagli eNB, gestire la sicurezza nella trasmissione dei dati utente e dei dati di identificazione (gli eNB di fatto rendono solo disponibile un canale per la trasmissione) ed infine partecipare alle procedure di handover quando nel cambio di cella è necessario cambiare MME (due eNB diversi possono far riferimento a MME diversi),

Nella rete interna è anche presente anche una parte che comprende il SAE GW, composto dai Serving Gateway (S-GW) e dai Packet Data Network Gateway (P-GW) che gestiscono l'instradamento nella rete dei dati utente verso i server che implementano i servizi richiesti (che siano interni o esterni, es. internet).

La mobilità degli utenti, e quindi eventuali handover, viene quindi gestita dagli eNB, per i casi più semplici, mentre per cambi di cella più complessi è necessario l'apporto di un MME.

2.2.3 Panoramica sui protocolli utilizzati in LTE

Lo stack protocollare, per i livelli fisico L1, Data Link L2, e rete L3, usato in LTE per il canale di controllo presente tra UE, eNB e MME è:

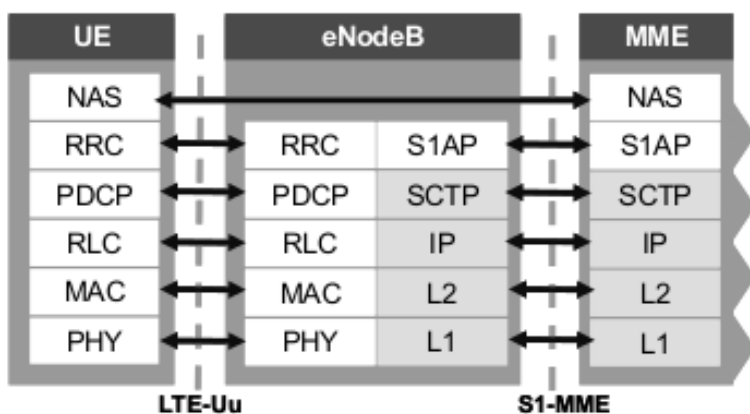


Figura 8: Protocol Stack [11]

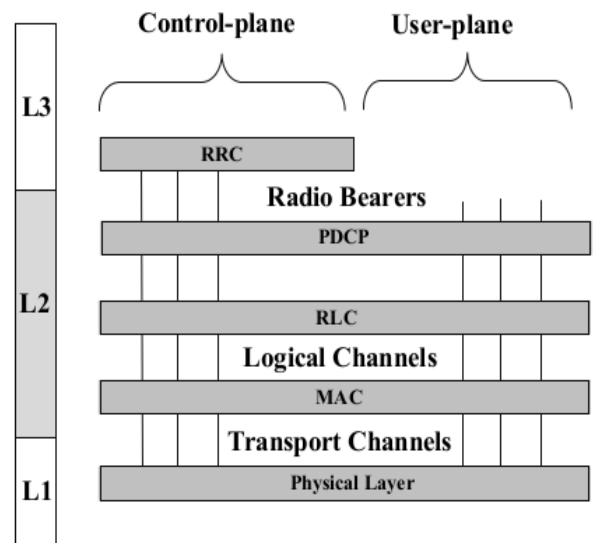


Figura 7: Dettaglio Protocol Stack [11]

Si vanno ad analizzare i protocolli presenti tra UE ed eNB per la gestione della connessione sul canale radio.

A **livello fisico** (PHY), tra utente e rete di accesso, viene implementata un'interfaccia radio che utilizza, come modulazione di segnale OFDMA e SC-FDMA.

Entrambe queste modulazioni sono varianti della modulazione FDMA. Questa modulazione prevede di dividere la banda del canale di trasmissione in sottobande associando a ciascuna delle sottoportanti, come in FDMA, ma tra loro ortogonali. A loro volta quindi ogni sottobanda utilizza uno schema di modulazione tradizionale (QPSK, 16QAM e 64QAM).

La divisione della banda disponibile permette di avere un numero maggiore di canali disponibili, anche se con velocità di trasmissione più bassa (secondo il teorema del campionamento di Nyquist-Shannon), aumentando così la capacità di trasmissione anche con condizioni pessime del canale.

L'altra opportunità offerta è quella poter realizzare un accesso multi-utente nel canale associando a ciascun utente gruppi di sottoportanti.

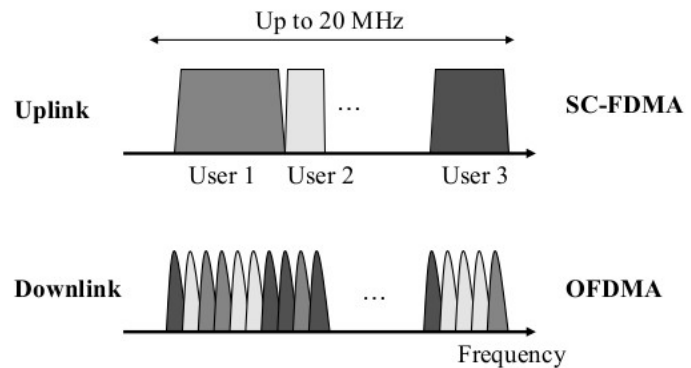


Figura 9: Suddivisione della banda tra gli utenti in OFDMA e SC-FDMA

Queste modulazioni, che ottengono ottimi throughput rispetto alle precedenti, necessitano però che il canale radio mantenga una buona qualità di trasmissione anche quando un utente è in movimento. Le procedure di handover, quindi quelle funzioni che permettono agli utenti di cambiare i parametri della connessione radio, sono implementate per migliorare la connessione radio.

A causa del degrado del canale radio (dovuto allo spostamento dell'utente) vengono ridefiniti i parametri della connessione tra utente e antenna. Questi parametri, i cui valori variano da antenna ad antenna, sono i gruppi di sottoportanti sui quali avviene la trasmissione e quale modulazione va usata per i vari sottocanali.

Nel **livello 2** (Data link), strato adibito alla frammentazione e gestione dei dati di alto livello, al controllo dell'accesso al canale radio e alla gestione della codifica di canale (comprendendo la parte necessaria per la gestione degli errori) [12].

In questo livello sono presenti gli strati MAC, RLC e PDCP.

Le funzioni principali del Packet Data Convergence Protocol (PDCP) sono la compressione degli header IP (dati utente), la protezione dell'integrità e cifratura dei segnali di controllo.

Il Radio Link Control (RLC) è responsabile della segmentazione e concatenazione dei Packet Data Unit (PDU) ricevuto dai protocolli di livello più alto e prepararli per la loro trasmissione sul canale radio, implementa una correzione d'errore di tipo ARQ.

Infine il Medium Access Control (MAC) prevede la gestione e l'accesso concorrente al canale fisico. Anche qui è presente una correzione d'errore di tipo ARQ.

A **livello 3** (Network), si hanno quei protocolli realizzati per gestire il routing e l'instradamento dei flussi di pacchetti.

In particolare per LTE si hanno i seguenti protocolli [11]: RCC, NAS, EMM ed ESM.

Il Radio Resource Control (RCC) prevede il controllo delle risorse radio in uso ed in particolare gestisce la connessione tra UE ed eNB, tra cui sono previste anche le procedure di handover.

Il Non-Access Stratum (NAS) gestisce la creazione e il mantenimento delle sessioni utente, la mobilità degli UE, la loro identificazione e il controllo delle chiamate. Il contenuto di questo protocollo non è accessibile agli eNB (uno dei motivi è che contiene dati sensibili dell'utente) ma quest'ultimi inoltrano i vari pacchetti. Il NAS è a sua volta diviso in due sottoprotocolli: EMM e ESM.

L'EPS Mobility Management (EMM) è il protocollo che gestisce la mobilità dell'UE nel sistema. Questo include funzioni per collegare o scollegare dalla rete un utente o gestirne la sua posizione in determinate Tracking Area (TA) che possono contenere una o più celle. L'EMM non contiene funzioni per la gestione diretta dell'handover (delegata invece agli strati inferiori) ma ha il compito di riattivare un utente dalla idle mode (vedere paragrafo successivo) inoltre garantisce la sicurezza e autenticazione dell'UE.

Infine l'EPS Session Management (ESM) è utilizzato per la gestione dei bearer tra UE e MME, e va ad integrare, nella E-UTRAN (rete di accesso) le procedure di bearer management.

Un bearer è un flusso dati, preventivamente filtrato, a cui è assegnato un livello garantito di servizio (QoS).

Per le procedure di handover è utile precisare che tra i protocolli utili eNB e MME (più in generale tra E-UTRAN e EPC) a livello 3 c'è S1AP che gestisce le connessioni dati e segnalazione, rispettivamente User Plane (UP) e Control Plane (CP), e partecipa nel handover quando anche EPC è coinvolto.

Inoltre gli eNB, per gestire la mobilità degli utenti, utilizzano il protocollo X2 per comunicare tra loro scambiandosi dati.

2.2.4 Convenzioni sullo Stato utente

Seguendo le specifiche del protocollo EMM esistono tre stati possibili per un utente: *Idle*, *Active*, *Detached*. Le procedure di handover variano rispetto allo stato dell'utente.

L'accesso e la registrazione iniziale prevede che l'utente passi dallo stato *Detached* a *Active*. Con questo insieme di procedure l'UE è acceso, è registrato e attivo in rete.

Lo stato *Active* prevede che sia attiva una connessione, tra UE e un eNB, tramite il protocollo RRC. In questo stato, l'utente è attivo (es. sessione VoIP, browsing o download file ecc) e, tramite l'eNB, è registrato presso un EPS. Nel protocollo RRC l'UE viene registrato con lo stato RRC_CONNECTED.

Questa attività richiede che la connessione dati utente dev'essere mantenuta e coordinata (es. si deve conoscere in quale cella l'UE è presente e, questo, deve effettuare varie misurazioni sullo stato del canale radio) prevedendo una procedura di handover più complessa gestita dalla rete. Infatti potrebbe prevedere il coinvolgimento di almeno un EPS per mantenere attivo il flusso di dati utente.

Un UE passa invece in stato di *Idle* quando questo non ci sono scambi di dati utente.

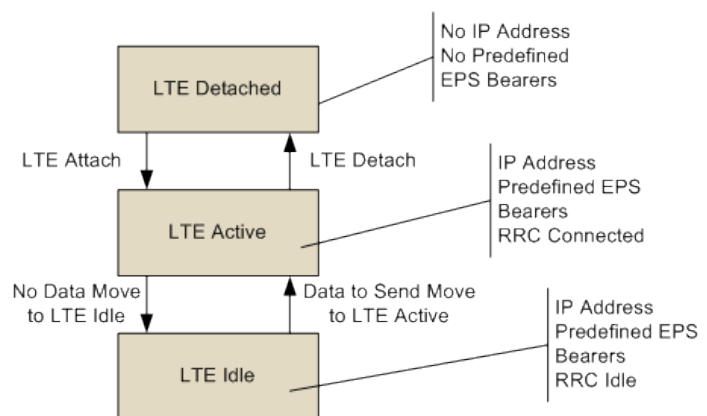


Figura 10: Stati utente previsti [13]

Questo stato è stato introdotto nelle reti mobili per diminuire il carico di dati scambiato tra UE e rete durante lo stato *Active*.

Questo stato permette però all'utente di monitorare il canale di paging per rilevare chiamate in ingresso, acquisire informazioni sul sistema ed eseguire misurazioni sulla cella a cui è connesso e a quelle vicine per eventuali rielezioni.

Questo porta a sovraccaricare meno la rete e il l'UE risparmiando potenza e banda dati disponibile. L'handover, in questo stato, è richiesto dall'UE all'eNB sorgente non richiedendo una gestione sul traffico dati.

2.2.5 Measurement Report

La decisione di trasferire un UE da una cella ad un'altra viene fatta sulla base di misurazioni richieste dall'eNB, tramite funzioni del protocollo RRC, ed effettuate dall'utente sul canale radio. Questo scambio di messaggi è la prima parte di una procedura di handover.

Grazie al protocollo RRC, un eNB può richiedere all'utente che le misurazioni, quindi il messaggio di risposta (il Measurement Report appunto), rispetti dei parametri ben specifici quali: cosa misurare, come strutturare la risposta, quante misurazioni inviare e con che frequenza effettuarle, quando fare le misurazioni (se effettuarle al verificarsi di determinati eventi oppure periodicamente).

2.2.6 Realizzazione dell'handover da e verso una rete LTE [15]

Si distinguono due casi di (hard) handover: quando l'UE è in uno stato di *Idle* e quando è nello stato *Active*.

Idle State

Nel caso in cui l'UE si trovi in *Idle* è quest'ultimo, che eseguendo varie misurazioni sulla qualità del segnale radio, decide se connettersi ad una cella o ad un'altra in base alla migliore qualità del segnale disponibile. È sempre l'utente che provvede alla registrazione nel sistema.

Active State

In questo caso è necessario seguire una procedura più complessa per mantenere la connessione dei dati utente. Infatti nello stato *Active*

l'utente sta utilizzando servizi come chiamate o videochiamate, gaming o esser connesso alla rete

Internet. In questi casi è auspicabile che la connessione in corso, al verificarsi del cambio cella, rimanga attiva e non venga interrotta questo comporta delle tecniche di salto, di handover, più complesse per permettere di mantenere la connessione e per contenere le latenze.

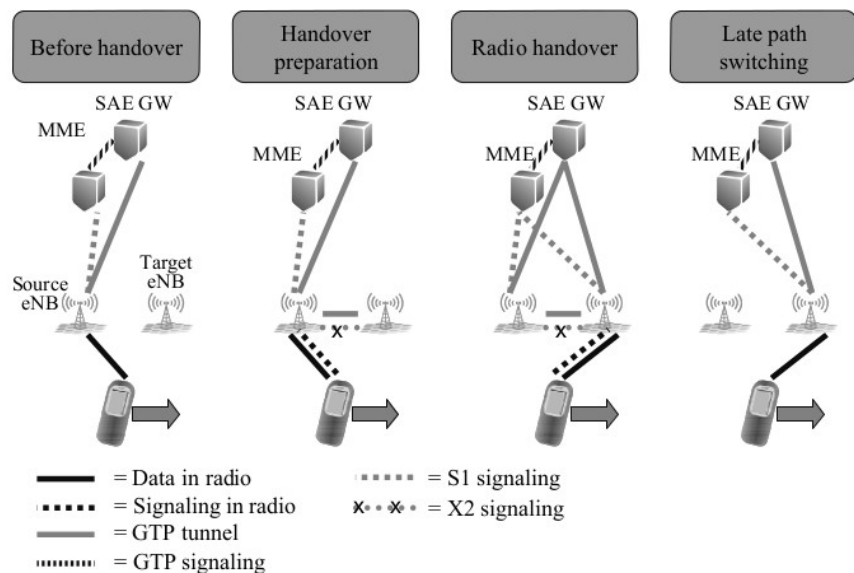


Figura 11: Step di una procedura di Handover in LTE

Per le procedure di handover vengono seguiti i principi, schematizzati in Figura 11, : la procedura è controllata dalla rete di accesso, è l'E-UTRAN infatti a decidere quando fare l'handover e quale sia la cella di destinazione, le misurazioni sul canale radio sono eseguite dall'utente, l'handover assicura che i pacchetti utente non vadano persi grazie ad un trasferimento di dati tra l'eNB sorgente e l'eNB target, la rete internanon ha il controllo della procedura: viene infatti informata di questa a handover concluso.

Si distinguono due casi di handover: *Backward Handover* e *Foward Handover*.

Sono entrambi di tipo hard handover, cioè la connessione viene interrotta per poter esser aggiornata, ma la differenza è che il primo (previsto nelle specifiche della Release 8) prevede che sia l'eNB sorgente a gestire la procedura e a preparare la rete alla riconnessione dell'utente. Questa è la procedura di default.

Il Forward Handover (previsto nella Release 9) prevede che, nel caso ci siano problemi sul canale radio, l'utente cerchi una nuova cella disponibile e che sia quest'ultima a recuperare il buffer dati dall' eNB sorgente e a gestire la riconnessione.

BACKWARD HANDOVER

In questo caso le informazioni sull'handover vengono scambiate tra utente e l'eNB sorgente attraverso il vecchio canale radio (da qui il nome *Backward*). Questo richiede le condizioni di trasmissione abbiano una buona qualità per poter, in ordine di esecuzione:

- permettere all'eNB di codificare il Measurement Report inviato dall'UE e conseguentemente preparare l'eNB target
- permettere all'UE di decodificare l'Handover Command inviato dal eNB sorgente
- gestire la riconnessione dell'UE presso l'eNB target e ripresa del flusso dati

Questa procedura prevede una breve interruzione del servizio dati in esecuzione, dal momento in cui l'UE decodifica l'Handover Command fino a quando l'eNB target non riceve l'Handover Confirm dall'utente. In questo lasso di tempo i pacchetti spediti non vengono persi grazie al dialogo diretto tra i due eNB, sorgente e target, che si assicurano di gestire il flusso dati.

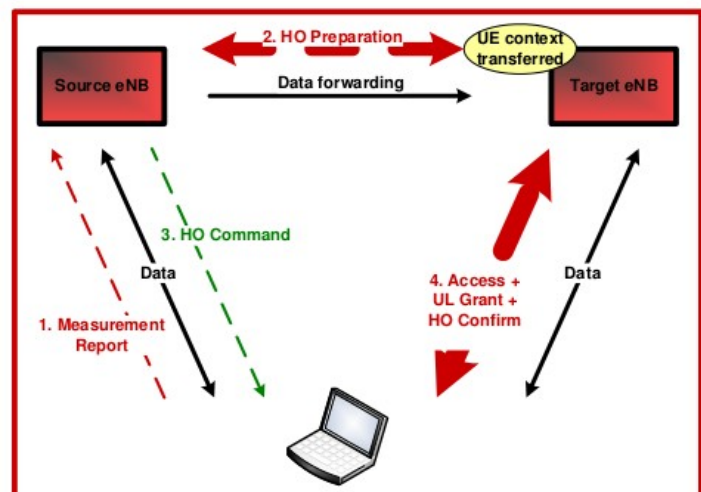


Figura 12: Successione nella procedura di handover

RLF HANDOVER

Questa procedura viene utilizzata quando, una volta che l'eNB sorgente è riuscita a ricevere dall'UE il report delle misurazioni e quindi a preparare l'eNB target, l'utente non riesce a decodificare l'Handover Command a causa di un segnale radio troppo degradato.

Quando l'UE verifica i problemi sul collegamento radio avvia un *timer* (impostato su 500ms o 1000ms). In questo lasso di tempo l'UE cerca di ristabilire la connessione con una cella disponibile per mantenere lo stato attivo.

La riconnessione ha successo se l'eNB, a cui si collega l'utente, era la cella prevista dal nodo sorgente.

Il verificarsi di questi problemi porta ad un'interruzione della connessione molto più significativa in termini di tempo, rispetto al Backward Handover, ma grazie al dialogo tra eNB sorgente e target non vanno persi pacchetti di dati nella trasmissione.

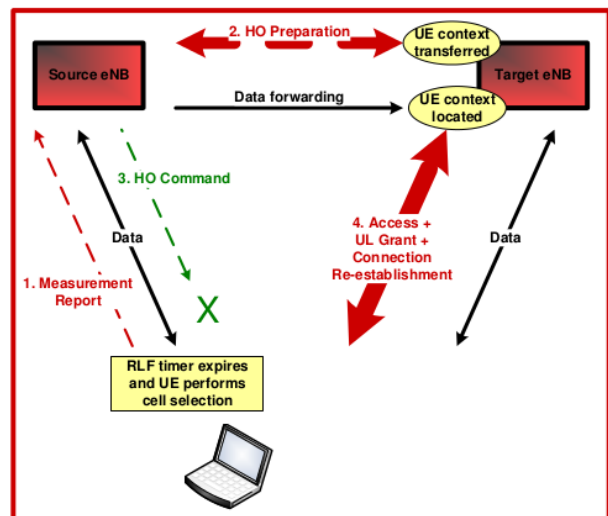


Figura 13: Sequenza di RLF Handover

NAS RECOVERY

Qui viene preso in considerazione il caso in cui l'UE tenta di stabilire una riconnessione ad un eNB che non è stato "preparato" a ricevere l'utente. Entrando nel dettaglio viene previsto il caso in cui l'utente non sia in grado di trasmettere all'eNB sorgente il proprio Measurement Report e quindi il nodo non è in grado di preparare l'eNB target.

In questa situazione l'UE passa nella modalità *Idle* e rimane in attesa di stabilire una nuova connessione.

Questa procedura aumenta il tempo di "salto" rispetto al RLF handover e, non avendo informazioni dall'utente, i dati, salvati in un buffer dell'eNB sorgente, vanno persi.

A peggiorare le cose il TCP throughput ne risente fortemente a causa della grande quantità di ritrasmissioni TCP richieste dall'utente per recuperare i dati.

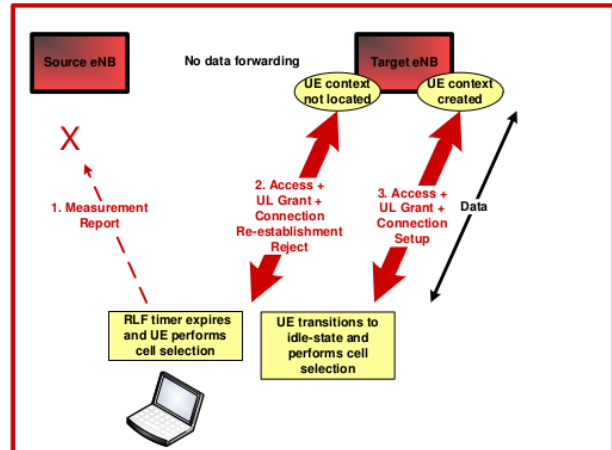


Figura 14: Procedura del NAS Recovery

FORWARD HANDOVER

Nel caso in cui l'eNB sorgente non riesca a decodificare il Measurement Report dell'UE quest'ultimo avvia comunque un timer (come nel RLF Handover) durante il quale manterrà lo stato attivo.

In questo tempo cercherà di ristabilire la connessione verso un eNB disponibile.

Se questo nodo non è preparato alla connessione dovrà, mediante uno scambio di dati con l'utente, recuperare, tramite la rete interna, i dati utente dall'eNB sorgente da cui l'UE si era scollegato.

Questa ricerca dei dati porta ad un'interruzione del servizio minore di quella rilevata utilizzando RLF Handover e il NAS Recovery con il vantaggio però che i dati, presenti nel buffer del sorgente, vanno recuperati.

I vantaggi portati dal Forward Handover sono significativi se il timer avviato dall'utente sarà calibrato in modo molto preciso.

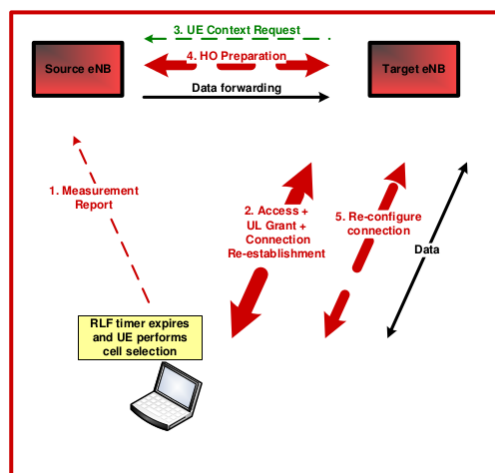


Figura 15: Procedura del Forward Handover

3 Simulazione

3.1 Il simulatore ns3

3.1.1 Struttura di un programma

Il modello LTE è una libreria software che permette di creare delle simulazioni di reti LTE potendo gestire un gran numero di componenti e parametri.

Per costruire una simulazione sono previsti diversi punti per la progettazione. Inizialmente bisogna definire la struttura scenario da simulare e successivamente, via codice, vanno realizzati la topologia o l'architettura scelta e, quindi, gestite le entità inserite, ad esempio utenti e stazioni base. Le librerie presenti mettono a disposizione degli oggetti, Helper (es. ns3::LteHelper), che permettono di definire e gestire parametri dell'intera rete: dal ritardo del canale fisico alla frequenza di invio delle PDU. È possibile poi configurare, attraverso la gestione di log o di funzioni eseguite al verificarsi di determinati eventi, la formattazione dei dati calcolati nella simulazione.

3.1.2 Primo esempio in ns3 – LTE

Verrà ora presentato il codice necessario per eseguire una simulazione base in ns3 utilizzando il modulo LTE.

In questo primo esempio verranno collegati due utenti immobili ad una stazione base e attivata una connessione dati utente in upload e in download.

La testata del programma prevede di definire le librerie del simulatore utilizzate ed in particolare: *core-module.h* contiene le librerie che avviano e gestiscono la simulazione, *network-module.h* contiene le librerie per gestire lo stack di protocolli di rete ISO/OSI, la *mobility-module.h* permette di simulare il movimento delle entità fisiche, es. utenti, ed infine *lte-module.h* è la libreria adibita a configurare una rete LTE.

```
#include <ns3/core-module.h>
```

```
#include <ns3/network-module.h>
#include <ns3/mobility-module.h>
#include <ns3/lte-module.h>

using namespace ns3;

int main (int argc, char *argv[])
{
```

Di seguito vengono creati due utenti e un eNB, dopo aver istanziato un oggetto software *LteHelper*, che mette a disposizione diversi metodi per definire i parametri della rete LTE che si andrà a simulare.

```
Ptr<LteHelper> lteHelper = CreateObject<LteHelper> ();

NodeContainer enbNodes;
enbNodes.Create (1);
NodeContainer ueNodes;
ueNodes.Create (2);
```

È importante sottolineare che i nodi creati, contenuti negli oggetti *NodeContainer*, sono, per ora, vuoti.

Il codice successivo permette di definire la mobilità dei nodi e la loro posizione iniziale. In particolare viene assegnata una posizione costante sia agli utenti che agli eNB e, non essendo specificato, verranno posizionati alle coordinate di default (0,0,0).

```
MobilityHelper mobility;
mobility.SetMobilityModel ("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility.Install (enbNodes);
mobility.SetMobilityModel ("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility.Install (ueNodes);
```

Creati e posizionati i nodi viene definita la loro funzione nella rete, installando lo stack di rete previsto per LTE, utilizzando l'oggetto *LteHelper*.

```
NetDeviceContainer enbDevs;
enbDevs = lteHelper->InstallEnbDevice (enbNodes);

NetDeviceContainer ueDevs;
ueDevs = lteHelper->InstallUeDevice (ueNodes);
```

Vengono collegati i due utenti all'unico eNB presente. Il metodo *Attach* permette di creare la simulazione per il canale e instaurare, tra utente e stazione base, una connessione.

```
lteHelper->Attach (ueDevs, enbDevs.Get (0));
```

Instaurata una connessione viene attivato un flusso dati, radio bearer, tra UE e eNB

```
enum EpsBearer::Qci q = EpsBearer::GBR_CONV_VOICE;
EpsBearer bearer (q);
lteHelper->ActivateDataRadioBearer (ueDevs, bearer);
```

Quest'ultima sezione genera un traffico in download e in upload rispetto all'utente.

La rete è ora configurata e grazie alla libreria Simulator è possibile definire i parametri di simulazione.

Viene definita la durata della simulazione, 5 ms, ed avviata:

```
Simulator::Stop (Seconds (0.005));
Simulator::Run ();
```

Terminata la simulazione vengono eliminati dalla memoria gli oggetti istanziati.

```
Simulator::Destroy ();  
return 0;  
}
```

3.2 Librerie ed elementi utilizzati per la simulazione

Il sistema *ns3* prevede una documentazione [16] fornita di simulazioni di esempi e di test. Per le simulazioni sulle procedure di handover sono stati utilizzati e modificati gli esempi presenti.

3.2.1 Esempio *lena-x2-handover.cc*

L'esempio realizzato nel file *lena-x2-handover.cc* è incluso nell'installazione del simulatore ed è reperibile alla cartella *src/lte/examples*. Questa simulazione prevede due eNB distanti tra loro ed un utente, in movimento a velocità costante. La rete interna, ruolo svolto dall'oggetto *LteHelper*, a 0.1 secondi, tempo del simulatore, esegue un handover e sposta la connessione dell'utente dal primo eNB al secondo.

SCENARIO in *lena-x2-handover.cc*

Nell'esempio utilizzato viene introdotto un grado maggiore di complessità nella topologia introdotta rispetto al primo esempio presentato.

L'utente creato, oltre a muoversi a velocità costante, dialoga, attraverso il protocollo di livello trasporto UDP, con un host remoto collegato alla rete cellulare tramite un gateway appositamente adibito. Questo richiede la gestione della comunicazione con l'host e il corretto instradamento dei pacchetti.

Per gestire una comunicazione UDP vengono settati la dimensione dei pacchetti, PDU, l'intervallo di invio di questi, il numero massimo di questi. Si utilizza il metodo statico *Config::SetDefault*.

```
Config::SetDefault ("ns3::UdpClient::PacketSize", UIntegerValue(1024));  
Config::SetDefault ("ns3::UdpClient::Interval", TimeValue (MilliSeconds(10)));  
Config::SetDefault ("ns3::UdpClient::MaxPackets", UIntegerValue(1000000));
```

È necessario poi creare un gateway di accesso alla rete cellulare. Questo gateway, PGW, è previsto nella rete interna, EPC. A questo proposito è disponibile l'oggetto *EpcHelper*, che collegato a *LteHelper*, permette di gestire l'EPC e creare un PGW.

```
Ptr<EpcHelper> epcHelper = CreateObject<EpcHelper>();  
lteHelper->SetEpcHelper(epcHelper);  
Ptr<Node> pgw = epcHelper->GetPgwNode();
```

L'host remoto viene realizzato attraverso l'oggetto *InternetStackHelper* che permette di installare nel nodo creato, attraverso il *NodeContainer*, lo stack ISO/OSI.

```
NodeContainer remoteHostContainer;  
remoteHostContainer.Create(1);  
  
Ptr<Node> remoteHost = remoteHostContainer.Get(0);  
InternetStackHelper internet;  
internet.Install(remoteHostContainer);
```

Per collegare l'host al PGW, quindi alla rete mobile, si utilizza il `PointToPointHelper` che realizza un canale fisico cablato, definendo capacità di trasmissione e ritardo di trasmissione, tra le due identità.

```
PointToPointHelper p2ph;  
p2ph.SetDeviceAttribute ("DataRate", DataRateValue(DataRate("100Gb/s")));  
p2ph.SetChannelAttribute ("Delay", TimeValue(Seconds(0.010)));  
NetDeviceContainer internetDevices = p2ph.Install(pgw, remoteHost);
```

Un ulteriore passaggio richiesto è l'instradamento dei pacchetti. In questo esempio viene definito in modo statico assegnando quindi un indirizzo IP ad ogni elemento e definendo il routing, instradamento, da seguire. L'oggetto `Ipv4AddressHelper` permette di assegnare in modo automatico un indirizzo IP a gateway e host. In particolare viene assegnato all'host l'indirizzo IP `1.0.0.2`.

```
Ipv4AddressHelper ipv4h;  
ipv4h.SetBase("1.0.0.0", "255.0.0.0");  
Ipv4InterfaceContainer internetIpIfaces = ipv4h.Assign(internetDevices);  
  
//ROUTING  
Ipv4StaticRoutingHelper ipv4RoutingHelper;  
Ptr<Ipv4StaticRouting>  
remoteHostStaticRouting=ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting(remoteHost->GetObject<Ipv4>())  
remoteHostStaticRouting->AddNetworkRouteTo(Ipv4Address("7.0.0.0"),  
Ipv4Mask("255.0.0.0"), 1);
```

Lo stack Internet va poi installato nei nodi utente, assegnando a questi un indirizzo IP, che in questo caso sarà `7.0.0.2`, e definito il routing verso l'host remoto.

```
internet.Install(ueNodes);  
Ipv4InterfaceContainer ueIpIfaces;  
ueIpIfaces = epcHelper->AssignUeIpv4Address(NetDeviceContainer(ueLteDevs));  
  
Ptr<Node> ue = ueNodes.Get(0);  
  
Ptr<Ipv4StaticRouting> ueStaticRouting = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (ue->GetObject<Ipv4> ());  
ueStaticRouting->SetDefaultRoute (epcHelper->GetUeDefaultGatewayAddress (), 1);
```

L'ultimo step per definire lo scenario è quello di installare un'applicazione del nodo utente e nell'host che generino traffico dati. A questo proposito l'esempio studiato prevedeva l'oggetto `PacketSink` il quale crea un flusso dati in entrata e in uscita dall'utente. Questa libreria però non permette di tracciare i tempi di invio e ricezione di pacchetti.

Per risolvere questo è stato modificato il codice installando un client UDP nell'host remoto e sarà configurato per inviare dati al server UDP previsto nell'utente.

In LTE è previsto che un flusso dati utente vada associato ad un radio bearer che, a seconda della Quality of Service definita, cercherà di garantire un throughput minimo a seconda del servizio richiesto, ad esempio video-chiamata o chiamata.

```
//installazione del server nell'utente  
UdpServerHelper server (dlPort);  
ApplicationContainer serverApps = server.Install(ue);  
  
//installazione del client nell'host  
UdpClientHelper client (ueIpIfaces.GetAddress (0), dlPort);  
ApplicationContainer clientApps = client.Install(remoteHost);  
  
//creazione del radio bearer  
Ptr<EpcTft> tft = Create<EpcTft> ();  
EpcTft::PacketFilter dlpf;  
dlpf.localPortStart = dlPort;  
dlpf.localPortEnd = dlPort;  
tft->Add (dlpf);
```

Per tracciare i pacchetti inviati dall'host, e quindi ricevuti dall'utente, viene attivato il sistema di log presente in *ns3* attraverso la funzione *LogComponentEnable* che stampa a video i dati registrati dagli oggetti definiti nei parametri. Viene attivato per *UdpServer* e *UdpClient*.

```
LogComponentEnable ("UdpClient", LOG_INFO);
LogComponentEnable ("UdpServer", LOG_INFO);
```

Al termine della simulazione si avranno dei risultati dove nel *TraceDelay TX* si ha la traccia del pacchetto inviato mentre, al contrario, *TraceDelay RX* si avranno i dati del pacchetto ricevuto, comprensivi di delay e throughput.

```
TraceDelay TX 1024 bytes to 7.0.0.2 Uid: 12 Time: 0.105579
TraceDelay RX 1012 bytes from 1.0.0.2 Sequence Number: 1 Uid: 13 TXtime: +105578844.0ns
RXtime: +118999999.0ns Delay: +13421155.0ns Throughput: (bps) 603227
```

```
TraceDelay TX 1024 bytes to 7.0.0.2 Uid: 15 Time: 0.205579
TraceDelay RX 1012 bytes from 1.0.0.2 Sequence Number: 2 Uid: 18 TXtime: +205578844.0ns
RXtime: +218999999.0ns Delay: +13421155.0ns Throughput: (bps) 603227
```

HANDOVER in *lena-x2-handover.cc*

Questo esempio mostra, come descritto nella documentazione [17], come avanzare una richiesta di handover ad uno specifico utente e come tracciare, cioè in questo caso stampare a video, i dati del salto.

Con le funzioni disponibili è possibile ricavare vari tipi di dati come la cella di provenienza e di arrivo e i dati identificativi dell'utente. Qui un esempio dell'output della traccia:

```
LteUeRrc/HandoverStart UE IMSI 1: previously connected to CellId 1 with RNTI 1, doing
handover to CellId 2
LteUeRrc/HandoverEndOk UE IMSI 1: successful handover to CellId 2 with RNTI 1
```

Per definire i trigger su determinati eventi è necessario definire, tramite la funzione *Config::Connect*, la funzione da eseguire al verificarsi di questi.

Di seguito il codice di esempio che richiama il metodo di stampa al verificarsi dell'inizio della procedura di handover:

```
Config::Connect ("/NodeList/*/DeviceList*/LteUeRrc/HandoverStart", MakeCallback
(&NotifyHandoverStartUe));
```

Infine per generare la richiesta di handover dal sistema è necessario installare, nei nodi che contengono gli eNB, il modulo contenente il protocollo X2, che permette di comunicare tra loro e gestire il salto.

```
lteHelper->AddX2Interface (enbNodes);

lteHelper->HandoverRequest (Seconds (0.100), ueLteDevs.Get (0), enbLteDevs.Get (0),
enbLteDevs.Get (1));
```

Con *HandoverRequest* si genera la vera e propria richiesta di salto. I parametri richiesti rispettivamente sono: il tempo a cui eseguire la procedura, l'utente, la cella iniziale e la cella di arrivo.

3.2.2 Librerie aggiuntive

Pur mantenendo, nelle simulazioni create, una struttura molto simile all'esempio *lena-x2-handover.cc* sono state utilizzate delle funzioni e degli oggetti software aggiuntivi per integrare ed ampliare i dati calcolati.

Simulator::Schedule

Simulator::Schedule è un metodo che permette di programmare l'esecuzione della funzione specificata nei parametri al tempo di simulazione indicato.

Nelle simulazioni create viene utilizzato per stampare a video la posizione, su tre dimensioni ed ogni mezzo secondo, dell'utente indicato.

```
Simulator::Schedule(Seconds(0.5), &PrintPosition, ueNodes);
```

In particolare *PrintPosition* è una funzione appositamente creata per stampare la posizione nello spazio dell'utente e la distanza dalla posizione della stazione base.

```
void PrintPosition(NodeContainer ue, Vector enb_p) {
    Vector p = ue.Get (0)->GetObject<MobilityModel> ()->GetPosition ();
    Vector v = ue.Get (0)->GetObject<MobilityModel> ()->GetVelocity ();

    std::cout<<"UePosition: "<<p<<" Distance: "<<CalculateDistance(p,enb_p)
        << std::endl;

    Simulator::Schedule(Seconds(0.5), &PrintPosition, ueNodes);
}
```

LteUePhy/ReportUeMeasurements

Un altro elemento utilizzato è il trigger che viene attivato ogni qual volta un utente esegue una misurazione sullo stato del canale radio. La funzione invocata stampa a video i dati misurati del canale, verso che cella sono stati effettuati e se questa è quella con cui sta trasmettendo o meno.

La traccia è:

```
Config::Connect ("/NodeList/*/DeviceList/*/LteUePhy/ReportUeMeasurements", MakeCallback
    (&ReportUeMeasurementsCallback));
```

mentre è la funzione *ReportUeMeasurementsCallback* che si occupa della stampa.

```
void ReportUeMeasurementsCallback (std::string path, uint16_t rnti, uint16_t cellId,
    double rsrp, double rsrq, bool servingCell) {

    std::cout<<"UE measurement t: "<<Simulator::Now().GetSeconds()<<" s RNTI: "<<rnti
        <<" CellID: "<<cellId<<" RSRP: "<<rsrp<<" RSRQ: "<<rsrq<<"
    ServingCell: "
        <<servingCell<<std::endl;
}
```

Un possibile risultato ottenuto è il seguente:

```
UE measure t: 1.4 s RNTI: 1 CellID: 1 RSRP: -88.7736 RSRQ: -3.01187 ServingCell: 1
```

ns3::Cost231PropagationLossModel

Per estrarre dei dati più verosimili possibili è stato utilizzato un modello di attenuazione del canale radio, normalmente introdotto dal mezzo trasmissivo, che simula una zona urbana. In questo modo si ottiene un'attenuazione molto più alta, alla stessa distanza tra utente e eNB, rispetto a quella di default.

```
lteHelper->SetAttribute ("PathlossModel", StringValue ("ns3::Cost231PropagationLossModel"));
```

Handover Automatico

Dall'ultima versione del modulo LTE, [18], è stata integrata nei nodi eNB, quindi nelle classi che gestiscono i protocolli sulla mobilità (RRC), la gestione dell'handover automatico. È possibile, impostando determinate soglie, far eseguire la procedura di handover in modo indipendente.

Le soglie previste sono due: *servingHandoverThreshold*, se il valore misurato di RSRQ dall'UE verso la cella con cui è collegato è minore o uguale di questo parametro allora il eNB considera la possibilità, rispetto alle misurazioni fatte verso le celle vicine, di effettuare l'handover. Il secondo parametro è *neighbourHandoverOffset* che prevede di eseguire l'handover se la differenza tra il RSRQ della cella vicina e la cella a cui l'utente è collegato è maggiore o uguale del parametro handover.

Il codice necessario è:

```
Config::SetDefault ("ns3::LteEnbRrc::ServingCellHandoverThreshold",UintegerValue (30));  
Config::SetDefault ("ns3::LteEnbRrc::NeighbourCellHandoverOffset",UintegerValue (1));
```


4 Scenari realizzati e risultati

4.1 Scenari studiati

4.1.1 Prima simulazione

In questa simulazione si è costruito uno scenario molto semplice creato da un'eNB, un utente ed un host remoto.

La struttura del codice è quella utilizzata nell'esempio *lena-x2-handover.cc* dove sono state attivate le tracce per la misurazione utente, i log per gli oggetti *UdpClient* e *UdpServer* e, tramite *Simulator::Schedule*, ogni secondo viene stampata la posizione utente.

L'utente, attivo presso l'eNB, invierà e riceverà pacchetti dal host remoto utilizzando il protocollo User Datagram Protocol (UDP) ogni 0.01 secondi.

Viene poi fatto allontanare l'utente, con velocità lineare, dalla stazione base. Per far questo si è utilizzato il modello *ns3::ConstantVelocityMobilityModel* e installato nel nodo utente con il seguente codice:

```
MobilityHelper ueMobility;  
ueMobility.SetMobilityModel("ns3::ConstantVelocityMobilityModel");  
ueMobility.Install(ueNodes);  
  
ueNodes.Get(0)->GetObject<MobilityModel>()->SetPosition(uePosition);  
ueNodes.Get(0)->GetObject<ConstantVelocityMobilityModel>()  
    ->SetVelocity(Vector(speed,0, 0));
```

Utente e stazione base avranno coordinate iniziali (0,0,0).

I variabili utilizzate saranno: la velocità utente, considerando uno spostamento con una bicicletta, 15 km/h, e con un'automobile 50 km/h, e la potenza di trasmissione dell'eNB, previste per pico celle, 15dBm.

Verranno registrati i seguenti dati in funzione della distanza tra UE e eNB: throughput ricevuto dall'utente, ritardo sulla ricezione dei pacchetti e potenza del segnale radio registrato dall'utente, Reference Signal Received Power (RSRP).

4.1.2 Seconda simulazione

Questa simulazione è un'evoluzione della prima e viene installata una seconda stazione base a distanza variabile dalla prima.

Alla struttura del codice viene poi aggiunta la gestione per l'handover automatico.

Lo scenario prevede il primo eNB alle coordinate (0, 0, 0) e il secondo ad una distanza variabile (x, 0, 0) in funzione della potenza trasmessa dal nodo.

In questo testo verrà utilizzata una potenza di trasmissione di 15 dBm con una distanza di 800 m tra una stazione base e l'altra.

Verranno considerate le velocità utente della prima simulazione.

I dati registrati, come nella prima simulazione, verranno calcolati e confrontati rispetto all'attivazione delle procedure di handover o meno.

4.1.3 Terza simulazione

Questo esempio si pone l'obiettivo di valutare le procedure di handover in uno scenario con quattro utenti e cinque celle disposte a croce, secondo lo schema, con una distanza di 5000 m l'una dall'altra.

	eNB	
eNB	eNB	eNB
	eNB	

L'obiettivo è quello di registrare il throughput e il delay medio di trasmissione rispetto al tempo con e senza l'attivazione dell'handover. Le celle trasmetteranno a 46 dBm mentre gli utenti si sposteranno a velocità costante.

Il codice utilizzato per permettere il posizionamento causale è il seguente:

```
MobilityHelper ueMobility;  
ueMobility.SetPositionAllocator ("ns3::RandomRectanglePositionAllocator",  
    "X", StringValue ("ns3::UniformRandomVariable[Min=4000|Max=6000]"),  
    "Y", StringValue ("ns3::UniformRandomVariable[Min=4000|Max=6000]"));
```

Mentre per lo spostamento:

```
ueMobility.SetMobilityModel ("ns3::RandomWalk2dMobilityModel",  
    "Mode", StringValue ("Distance"),  
    "Distance", StringValue ("10000"),  
    "Speed", StringValue("ns3::UniformRandomVariable[Min=27.77|Max=27.77]"),  
    "Direction", StringValue("ns3::UniformRandomVariable[Min=0|Max=1.57]"),  
    "Bounds", StringValue ("-2000|12000|-2000|12000"));  
  
ueMobility.Install(ueNodes);
```

4.1.4 Quarta simulazione

In questa simulazione si vuole studiare se, in LTE, risulta essere più efficiente un'alta densità di stazioni base, quindi con una potenza trasmessa minore, oppure, aumentando la potenza trasmessa, mantenere una bassa densità di queste.

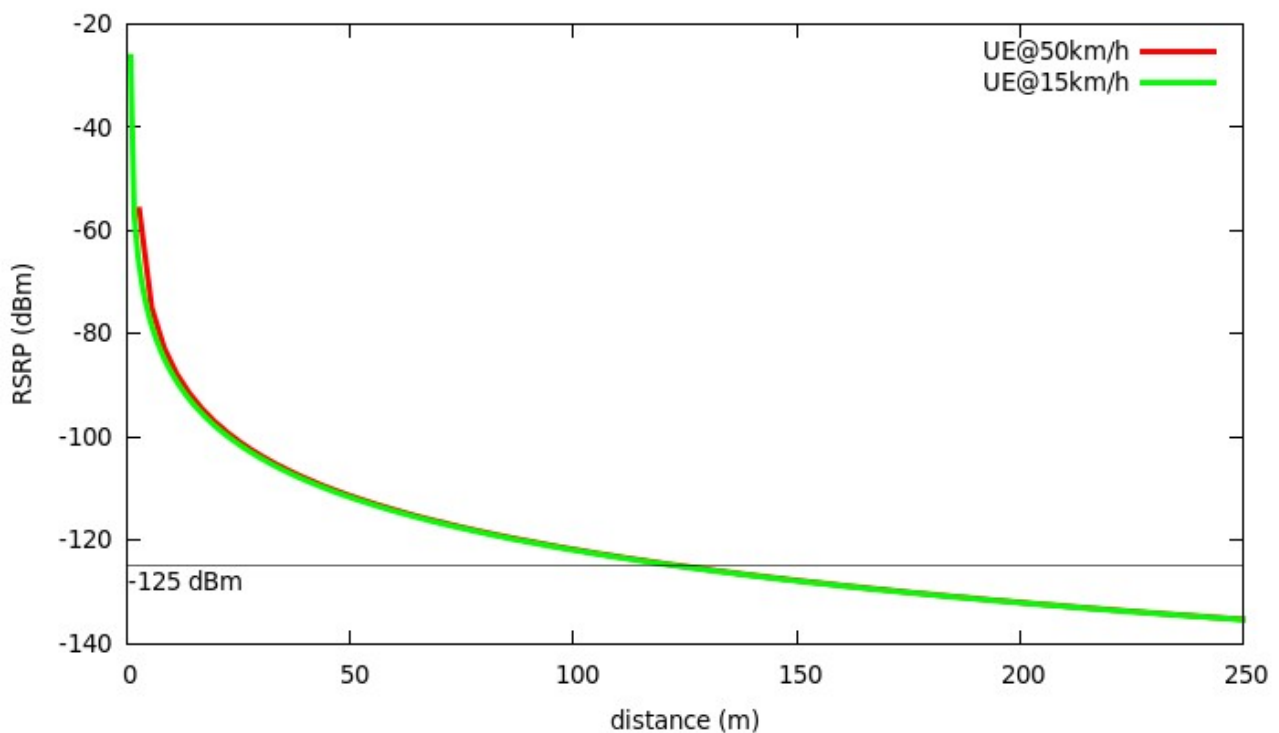
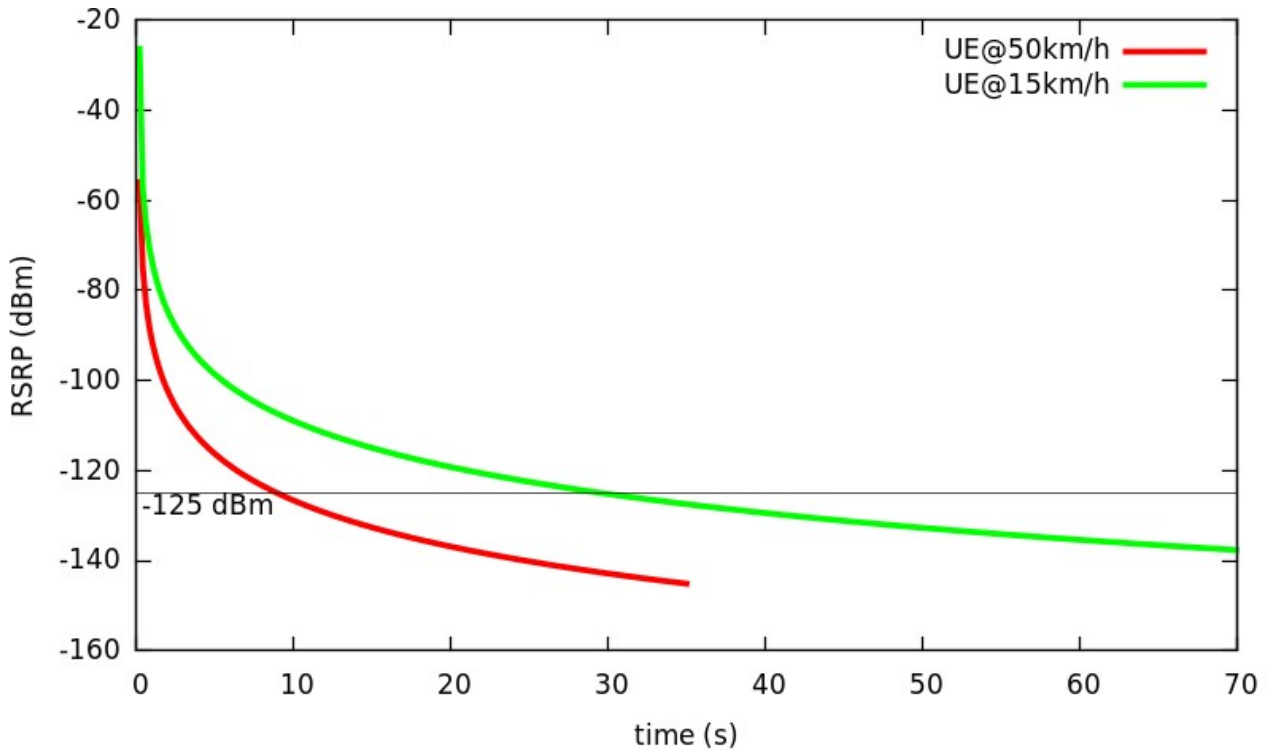
Inizialmente si posizioneranno, lungo un asse, due eNB configurati con una potenza di 46 dBm a 6000 metri di distanza. Successivamente si utilizzeranno quattro nodi a 30 dBm con 2000 metri di distanza ed infine si inseriranno sette nodi a 15 dBm a 800 metri uno dall'altro.

L'utente si muoverà con una velocità di 100 km/h.

4.2 Risultati ottenuti e grafici

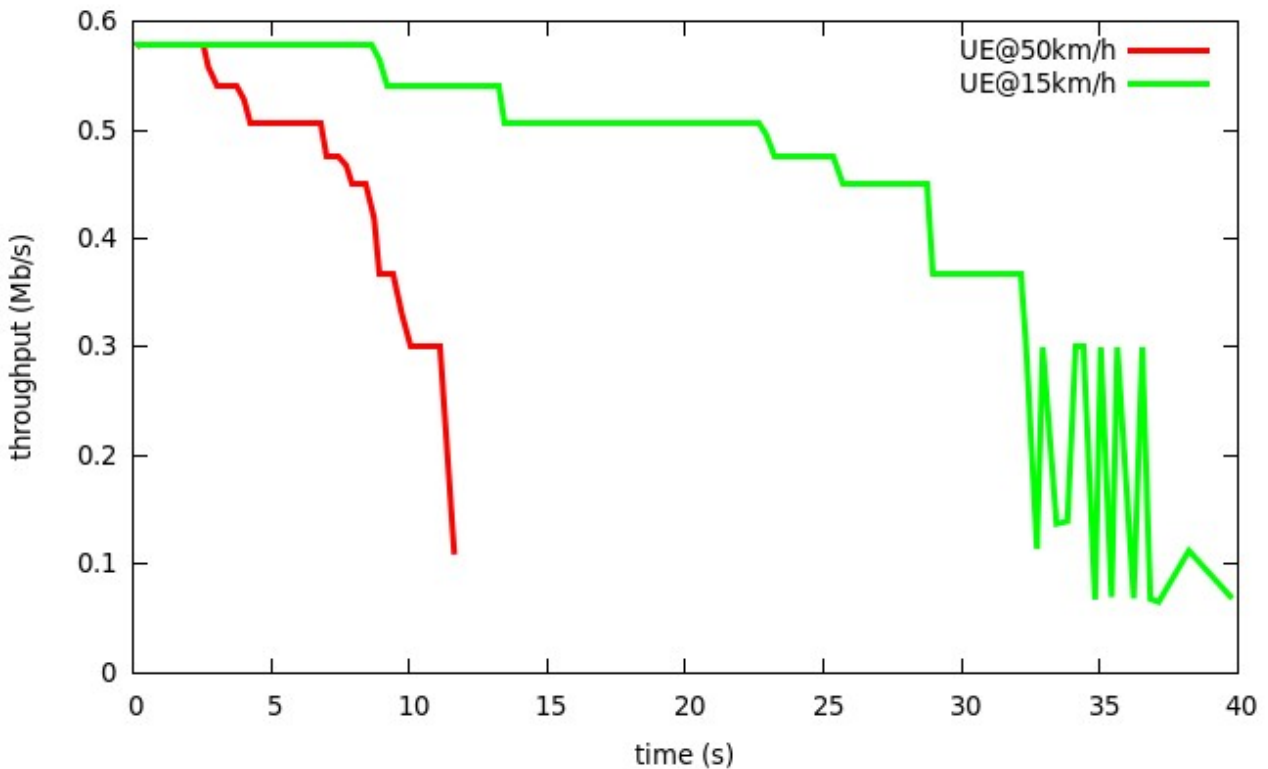
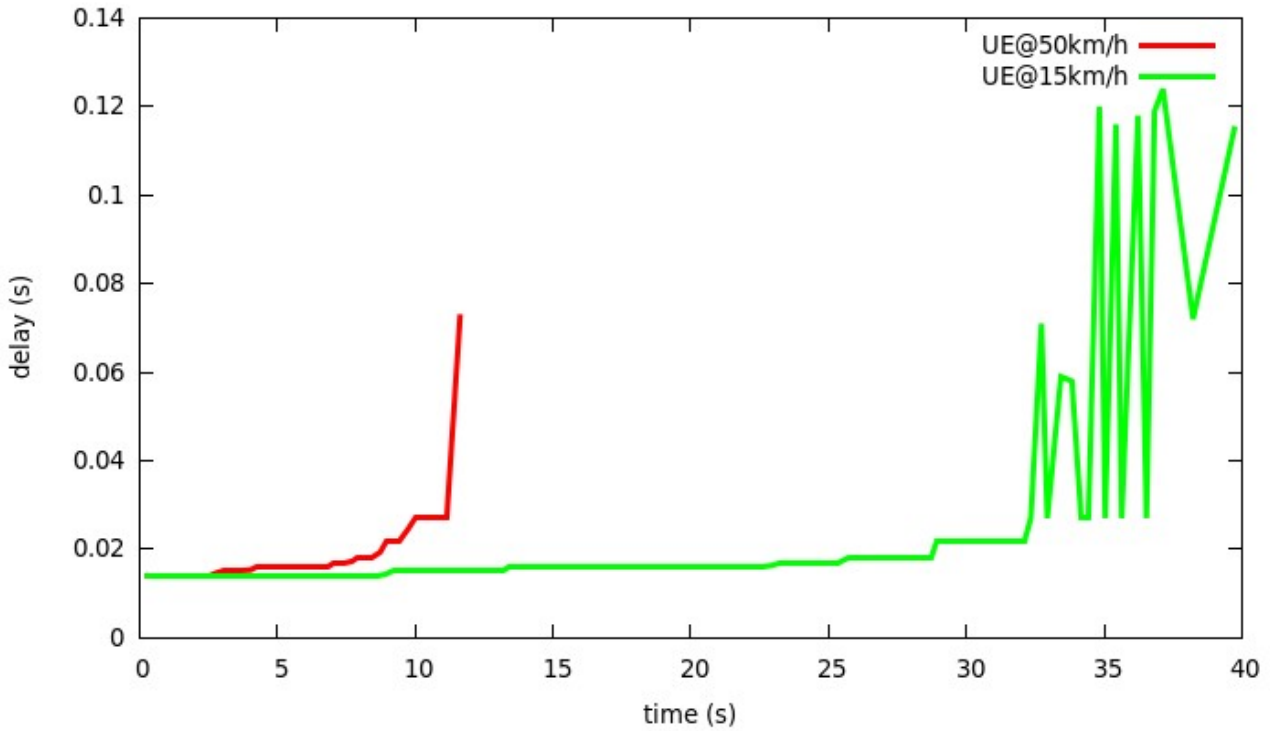
4.2.1 Prima simulazione

Per la prima simulazione sono stati tracciati tre grafici: potenza ricevuta in funzione del tempo trascorso e della distanza percorsa, ritardo di ricezione dei pacchetti e throughput rispetto al trascorrere del tempo.



Dai risultati ottenuti nei primi due grafici si può notare che maggiore è la distanza tra utente e stazione base maggiore è l'attenuazione, quindi l'inefficienza, del canale fisico. Si è notato che un'attenuazione minore di -125 dBm l'utente perde la connessione con la rete e non riceve così dati dalla rete. Inoltre dal primo grafico, RSRP vs tempo, si può osservare che una maggiore velocità dell'utente è più difficile da gestire per la rete in quanto la potenza ricevuta si degrada più rapidamente.

Gli altri parametri registrati sono il ritardo sulla ricezione dei pacchetti e il throughput rispetto al tempo.

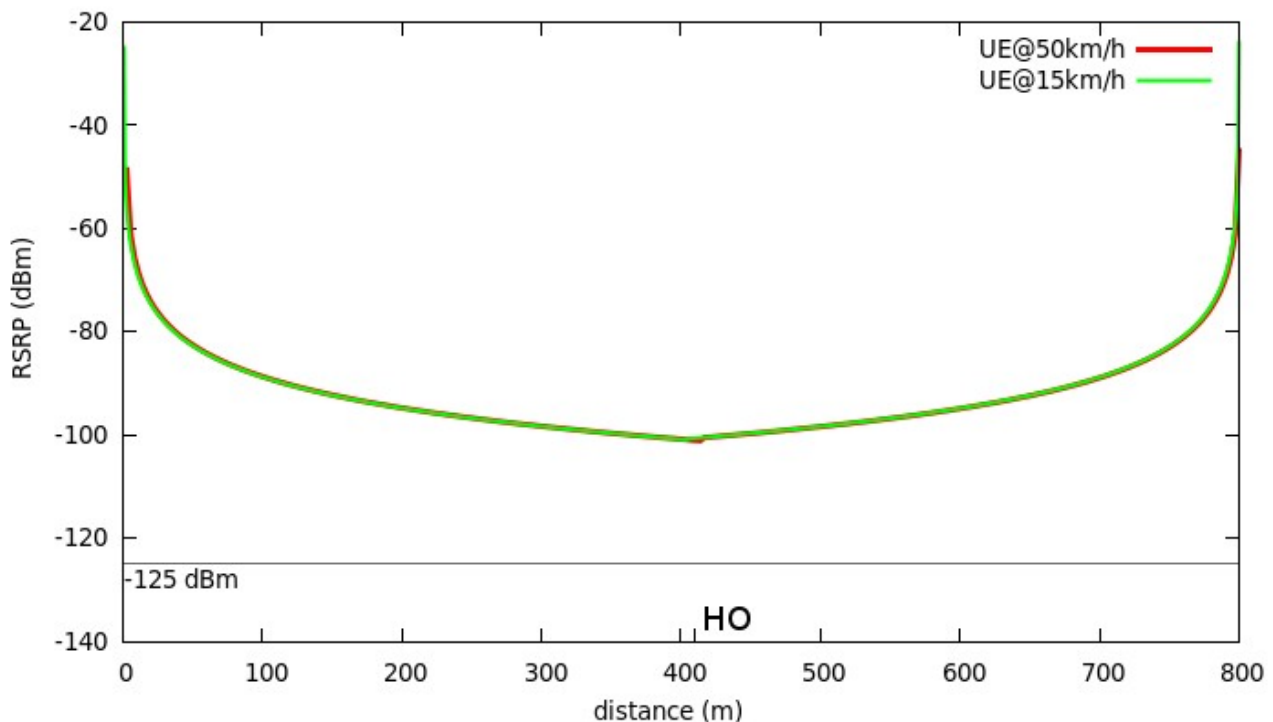


È possibile notare come, all'allontanamento dell'utente dalla stazione base, il ritardo sui dati ricevuti aumenti e di conseguenza il throughput diminuisca fino all'interruzione della ricezione, e la conseguente perdita di pacchetti, a causa del canale radio troppo degradato. La necessità quindi di una riconnessione verso una nuova stazione base, che garantisca un canale radio sufficientemente stabile, è fondamentale per mantenere attivo il trasferimento di dati.

Per la simulazione eseguita a 50 km/h dopo 30 s circa il rumore rilevato dalle misurazioni è imputabile all'arrivo di più pacchetti nello stesso istante temporale. Questo pregiudica i valori delle misurazioni essendo queste un valore medio: vengono infatti registrati i dati per ogni pacchetto ricevuto e quindi calcolata una media dei valori ogni mezzo secondo.

4.2.2 Seconda simulazione

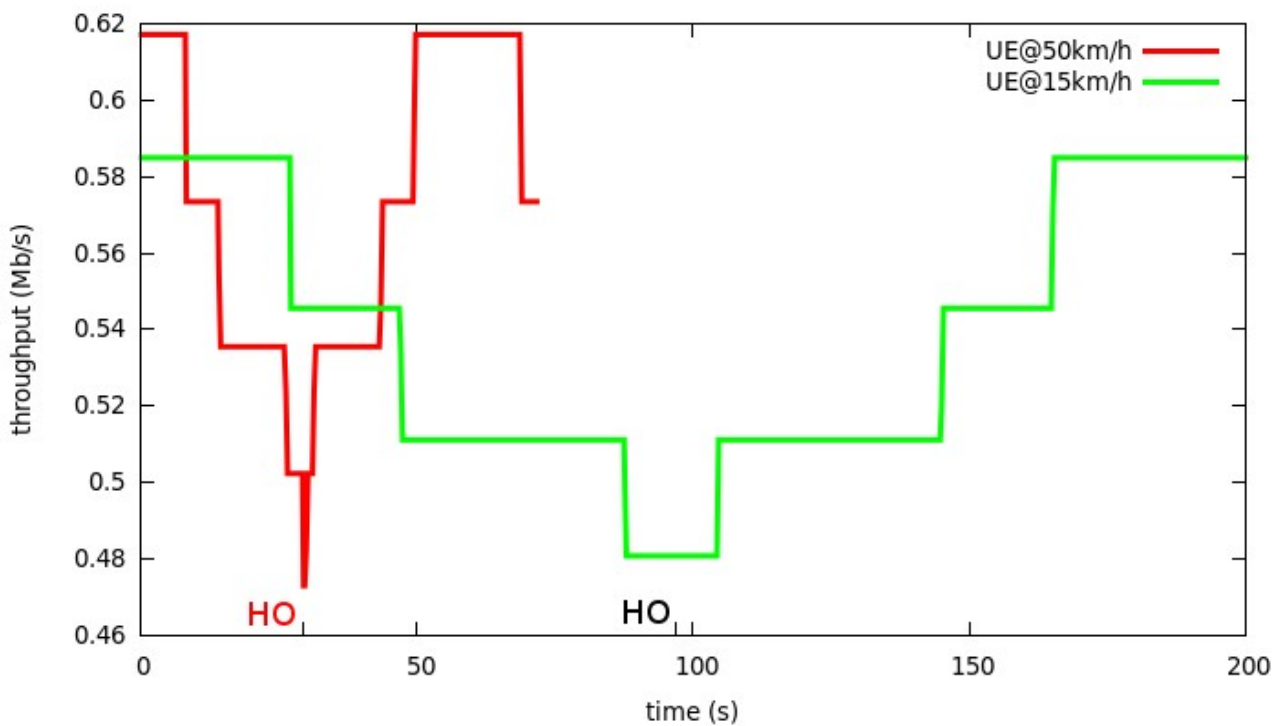
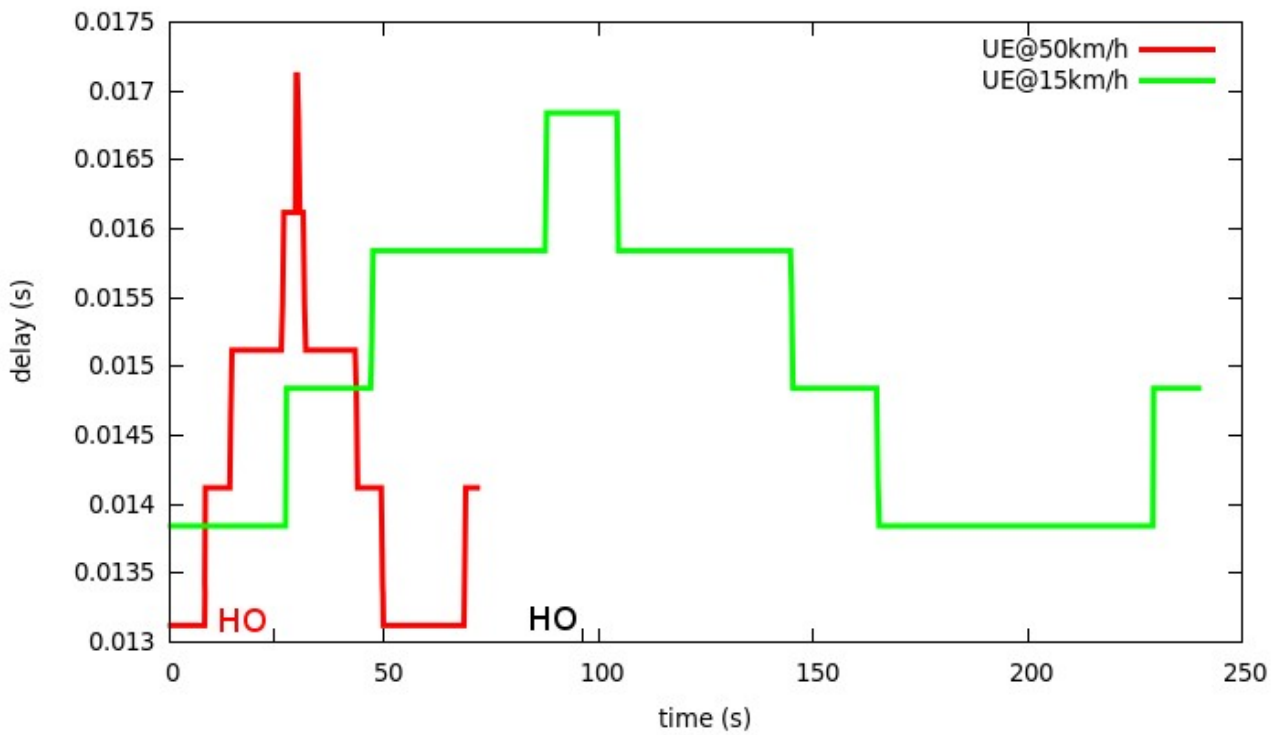
La seconda simulazione prevede due stazioni base ad una distanza di 800 metri con una potenza trasmessa di 15 dBm. Verrà fatto muovere un utente, dal primo verso il secondo eNB, alla velocità di 15 km/h e 50 km/h. La simulazione terminerà quando l'utente percorrerà un chilometro di distanza dalla prima stazione.



Il primo grafico verifica come la potenza ricevuta dall'UE, contrariamente dalla prima simulazione, si mantenga elevata rispetto alla distanza percorsa dall'origine. Si può notare infatti che negli istanti in cui avviene l'handover, segnati con label *HO* nel grafico, ai tempi 97.18 s per l'UE con velocità 15 km/h e a 29.98 s per l'utente a velocità 50 km/h, si ha un'inversione dell'andamento in positivo della potenza registrata. L'handover, cioè il salto dalla prima alla seconda cella, permette, all'utente, di mantenere delle buone condizioni sul canale radio. Il limite precedentemente rilevato di -125 dBm non viene infatti raggiunto.

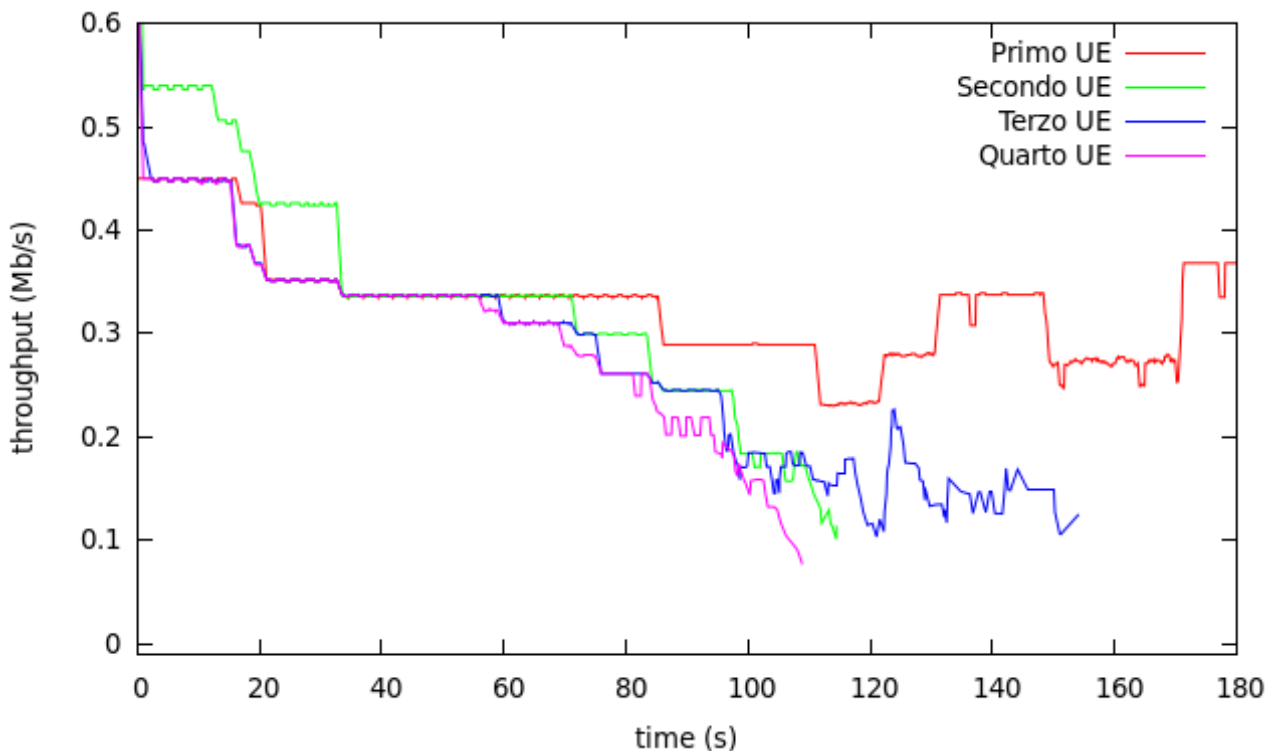
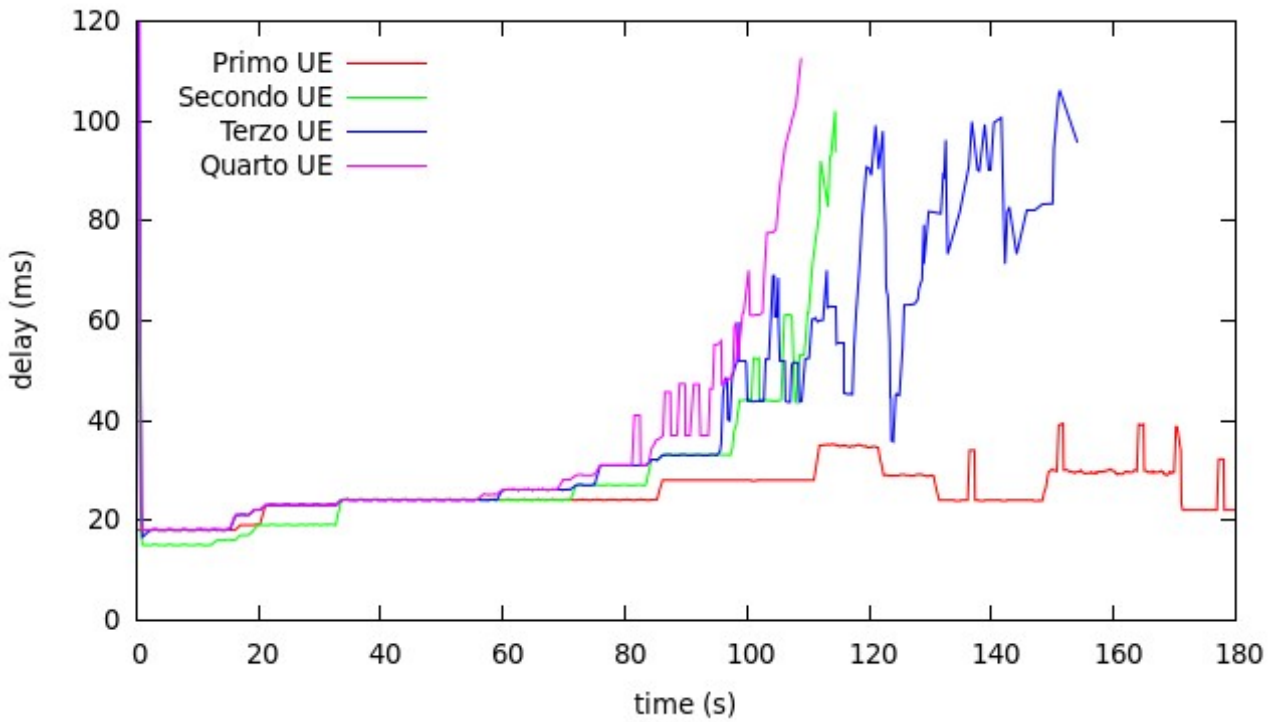
I due grafici, per le due velocità, sono molto simili a causa della semplicità di simulazione, ad esempio non viene tenuto conto di un'eventuale congestione della rete.

Nel secondo e terzo grafico sono stati registrati i ritardi di ricezione dei pacchetti e il throughput medio. Si è registrato che, grazie alla procedura di handover, la connessione viene mantenuta attiva seppur con un peggioramento delle prestazioni negli istanti vicini alla riconnessione.



4.2.3 Terza simulazione

I risultati ottenuti, con handover disattivato, per 180 secondi di simulazione:

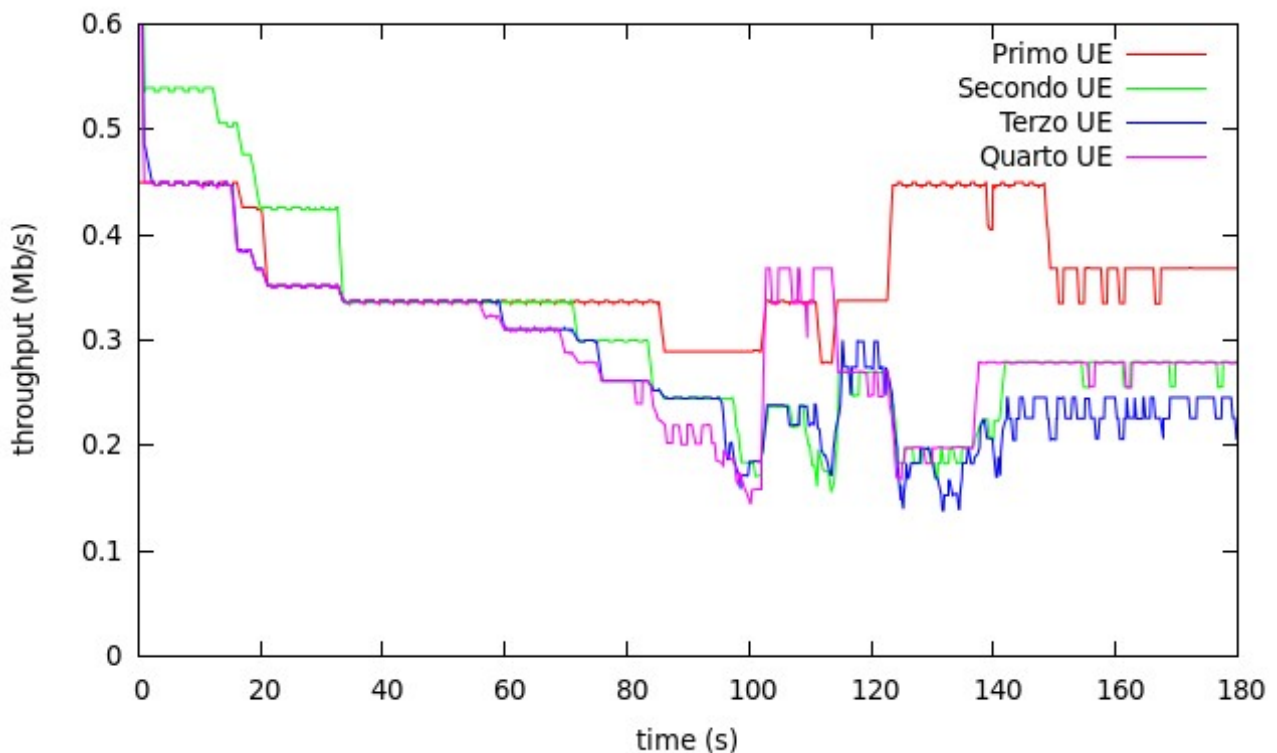
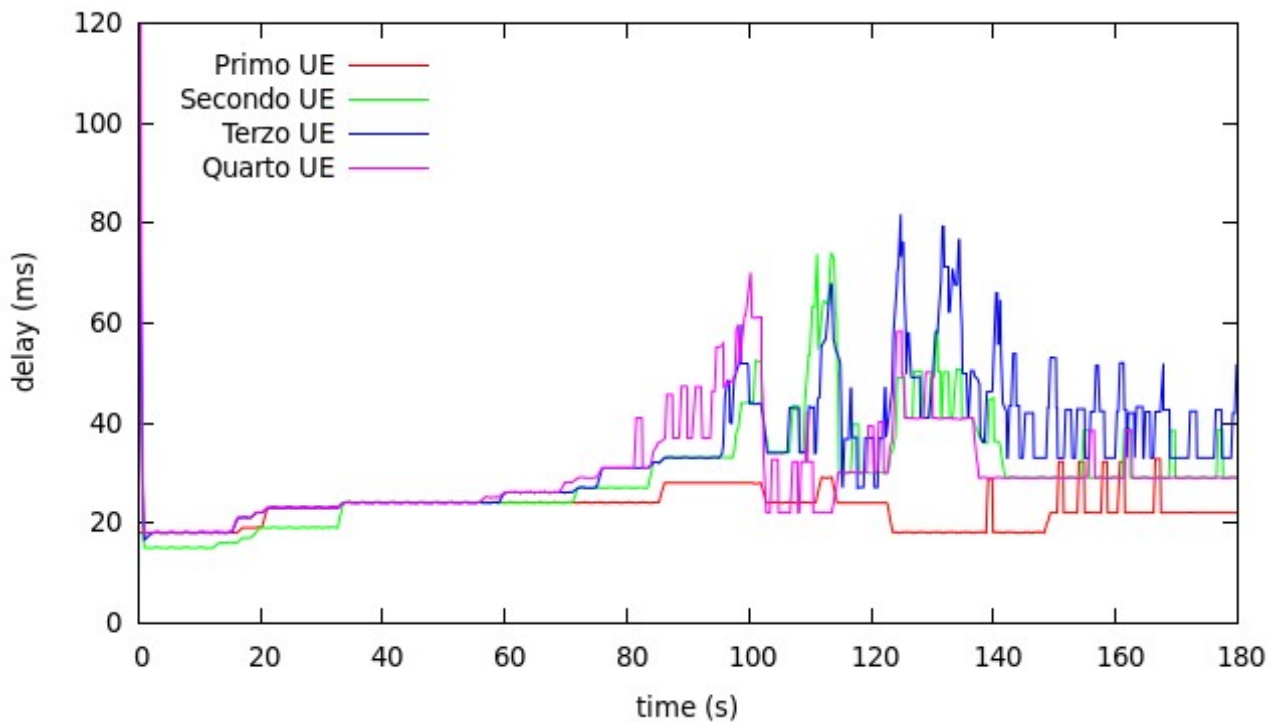


Come risultato nei casi più semplici gli utenti, superato un certo tempo, perdono la connessione e non ricevono più dati a causa delle condizioni radio troppo degradate.

La forte variabilità dei grafici è dovuta alla velocità molto elevata dei nodi, circa 100 km/h. È stata utilizzata questa velocità a causa della distanza molto elevata tra i nodi, 5 km, che avrebbe imposto,

con velocità minori, tempi di simulazione molto più lunghi.

Attivando invece l'handover si è ottenuto il risultato:

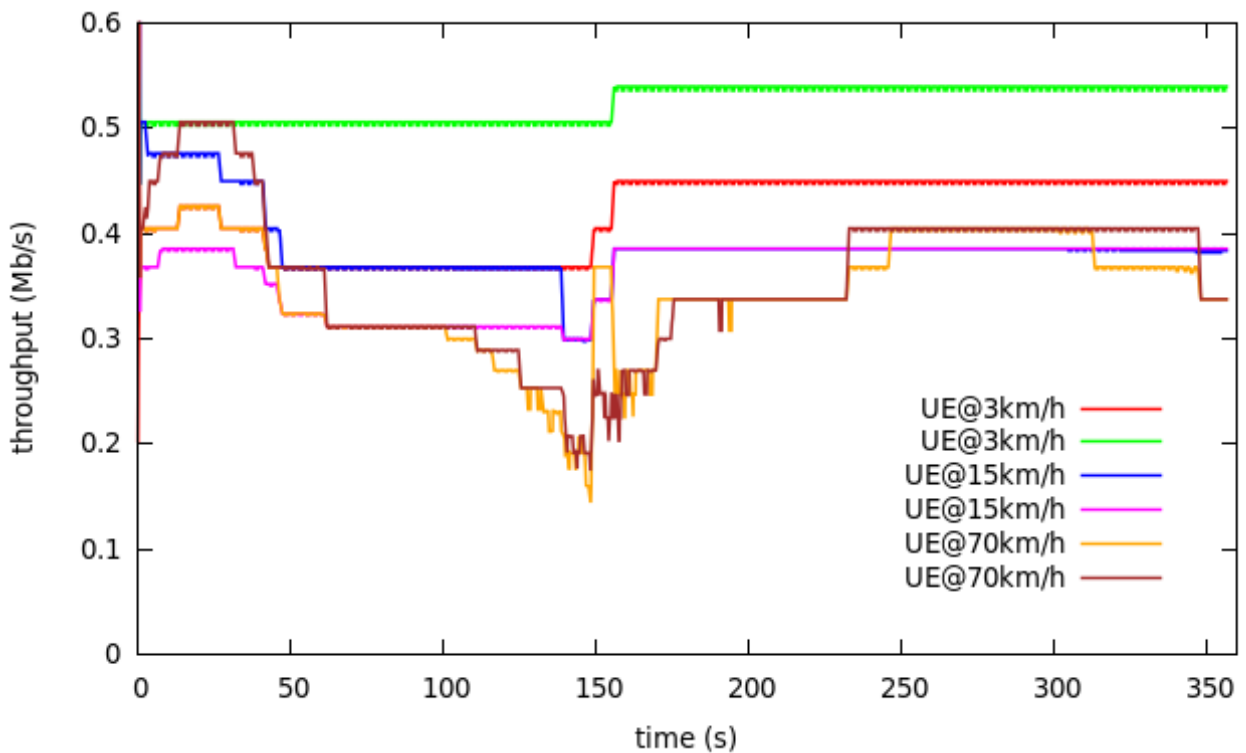
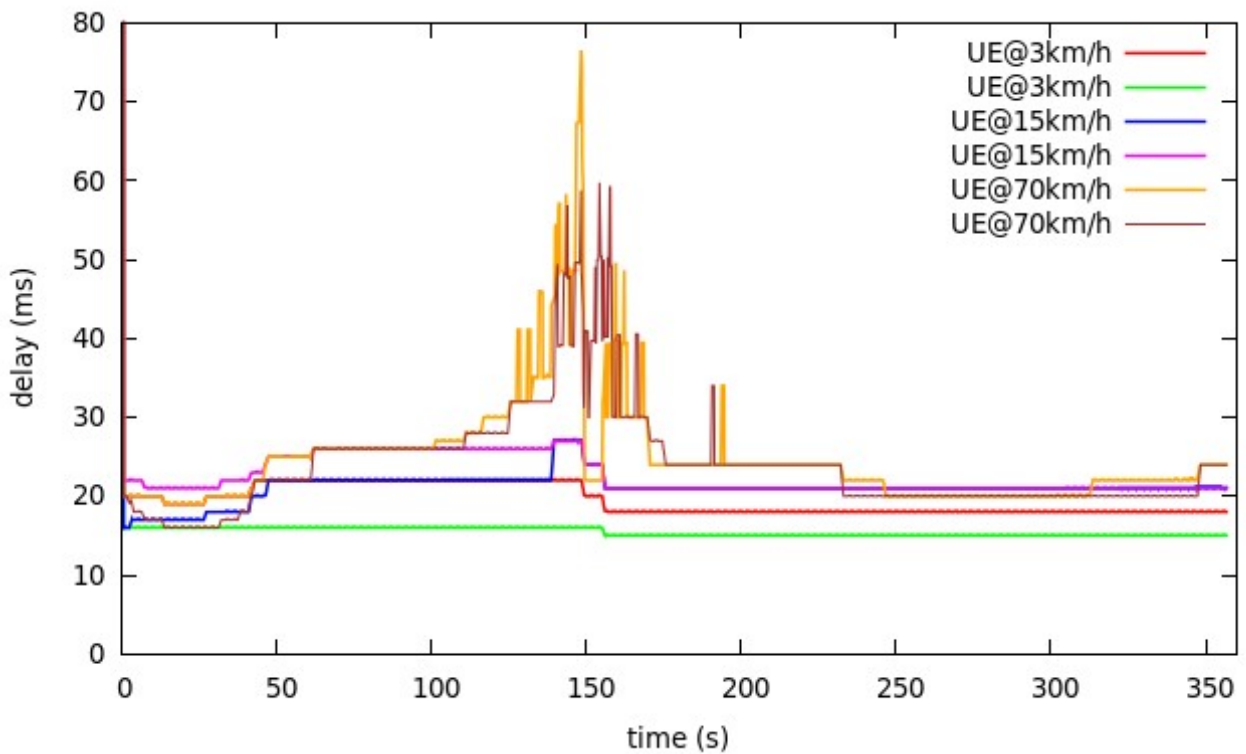


Si può vedere che sia il throughput che il delay, seppur altalenanti, rimangono entro certi limiti finiti garantendo il trasferimento di dati. Questo è stato permesso dalla capacità degli eNB di eseguire gli handover quando la potenza sul canale rilevata era troppo bassa.

L'handover risulta quindi essere una procedura vincente per mantenere attive le connessioni durante lo spostamento degli utenti.

4.2.4 Terza Simulazione Bis

In questa simulazione sono state utilizzate le velocità 3 km/h, utente a piedi, 15 km/h, utente in bicicletta, e 70 km/h, utente in macchina, per un totale di sei utenti, due per ogni velocità. La simulazione è stata fermata a 360 secondi e l'handover è stato attivato.



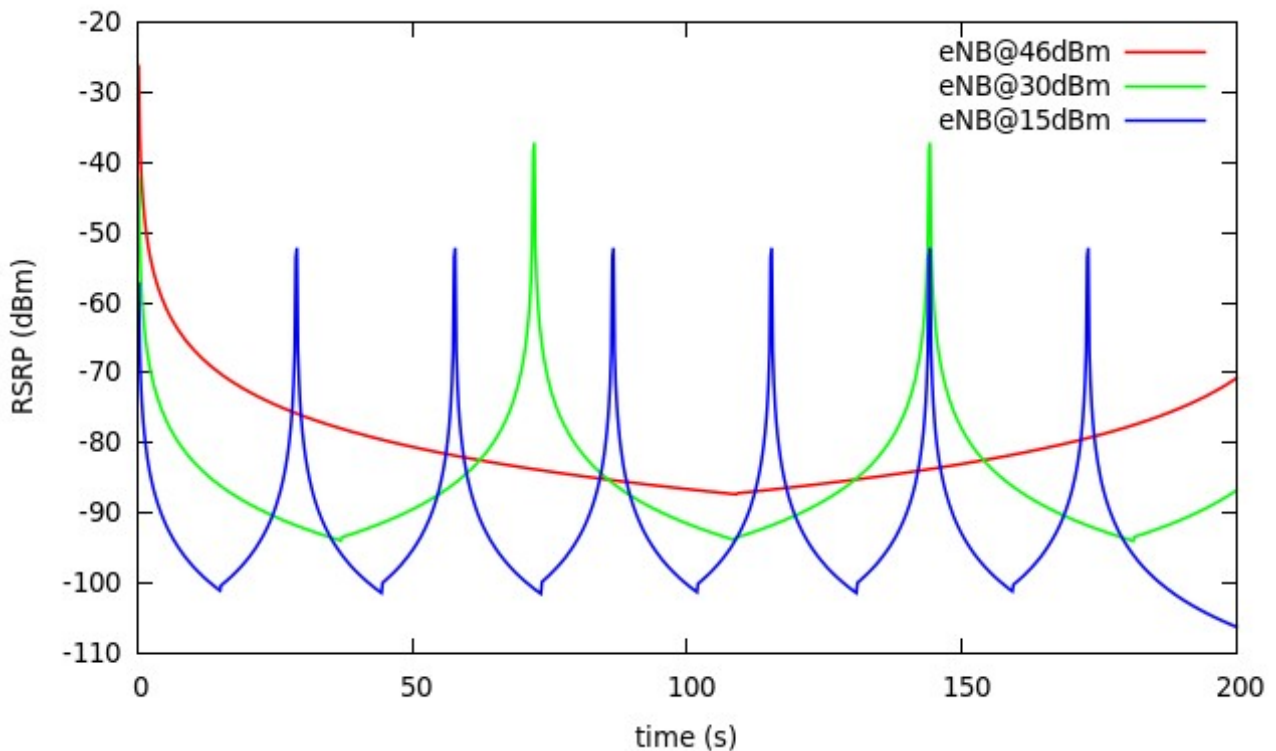
Dai grafici, come dai precedenti, si può notare che la connessione rimane attiva seppur con dei

picchi significativi sul ritardo.

La velocità risulta essere un fattore negativo sull'andamento delle curve e quindi sulla stabilità della connessione. Infatti per gli utenti con velocità di 70 km/h, pur rimanendo la connessione attiva, il ritardo di ricezione tende a variare molto più velocemente e il throughput, di conseguenza, non è stabile pregiudicando l'utilizzo di applicazioni critiche che richiedono connessioni affidabili, ad esempio gaming o video chiamate.

4.2.5 Quarta simulazione

Si riporta il grafico della potenza letta dall'utente rispetto alla distanza percorsa.

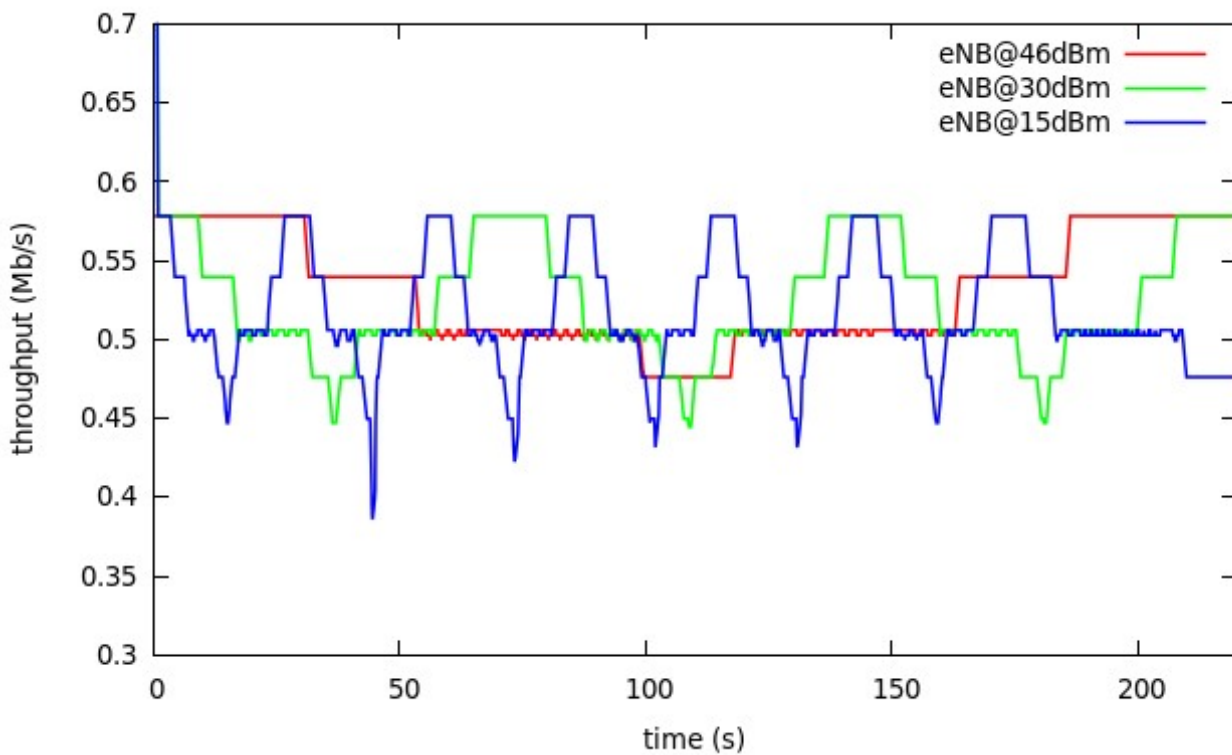
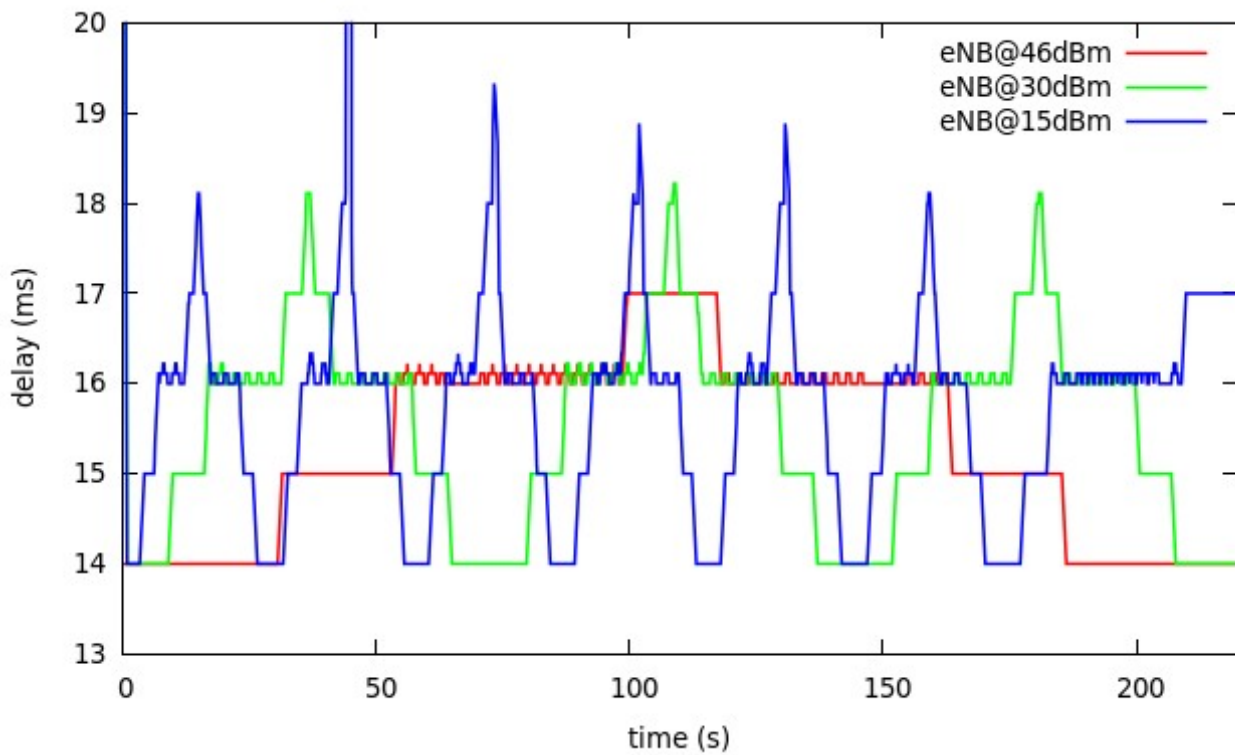


Si nota che è necessaria un'attenta taratura sulla distanza tra due stazioni base con diversa potenza. Dal grafico si può dedurre infatti che i nodi che trasmettono a 15 dBm sono troppo distanti in quanto l'utente registra un'attenuazione molto più forte rispetto alle antenne con potenza più alta.

Osservando invece i grafici relativi al delay e al throughput si può notare come le prestazioni siano molto diverse in brevi periodi di tempo.

Risulta infatti che per stazioni base più potenti il trasferimento di dati sia più performante rispetto alle altre configurazioni. Questo è dovuto alla miglior copertura e al minor scambio di dati di controllo che permettono una maggiore stabilità nel throughput e nel delay.

Dai risultati ottenuti in una situazione reale si prevede sia richiesto quindi un attento studio sul posizionamento delle stazioni base in un ambiente dove l'alta densità di utenti attivi e la conformazione del territorio pone molti ostacoli tra utente ed antenna.



Si può notare che per le macro-celle, a 46 dBm, gli andamenti sono più lineari, con picchi minori rispetto agli altri presenti, questo rende più stabile la connessione tre utenti e antenna.

5 Conclusioni

In questo lavoro sono stati analizzati i problemi, e le soluzioni, dovuti alla mobilità degli utenti in una rete mobile LTE. Da un'analisi di alto livello sulla struttura delle rete si è poi passati allo studio delle procedure di handover implementate.

È stato studiato che la limitatezza della copertura di rete delle celle e la necessità di avere un canale trasmissivo adeguato per garantire un elevato throughput sono le motivazioni principali per l'implementazione delle procedure di handover.

Grazie alla struttura interamente basata su IP della rete LTE e all'efficienza del simulatore ns3, anche se non sempre sufficientemente documentata, è stato possibile ricreare una situazione reale e valutarne i risultati.

Si è potuto constatare che il modello LTE, integrato in ns3, permette di descrivere e simulare una vasta gamma di scenari e situazioni [19], [20].

I dati calcolati mostrano come l'implementazione delle procedure di handover, al degradarsi delle condizioni del canale radio tra utente e stazione base, permettano di mantenere attivi i flussi di dati scambiati tra UE e rete.

Studiando inoltre la velocità con cui può muoversi un utente è risultato che una connessione dati risulta essere fortemente instabile, con valori di throughput e di delay, se la mobilità è elevata (circa 100m/h). Lo standard LTE ottimizza infatti i propri protocolli per un intervallo di velocità compreso tra 0 e 15 km/h.

Infine si è notato che è richiesta un'attenta progettazione sul dimensionamento e posizionamento degli eNB in quanto, pur essendo le procedure di handover fondamentali, ripetuti salti tra celle vicine portano ad una forte instabilità dei parametri della rete, tra cui il ritardo e throughput in ricezione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sito web ufficiale della 3rd Generation Partnership Project (3GPP): www.3gpp.org. Online in data 08-07-2013
- [2] Overview sulla rete interna dal sito ufficiale: www.3gpp.org/The-Evolved-Packet-Core. Online in data 08-07-2013
- [3] Overview dello standard LTE: www.3gpp.org/LTE. Online in data 08-07-2013
- [4] Lista delle topologie di rete: www.en.wikipedia.org/wiki/Network_topology#Mesh. Online in data 08-07-2013
- [5] Dispense dell'Università di www.dii.unisi.it/~abrardo/dispense_moretti.pdf. Online in data 08-07-2013
- [6] HOLMA, Harri; TOSKALA, Antti (ed.). "LTE for UMTS-OFDMA and SC-FDMA based radio access" Wiley 4 (2009).
- [7] Sito web ufficiale del simulatore Ns3: www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3. Online in data 08-07-2013
- [8] Zeng, Qing-An, and Dharma P. Agrawal. "Handoff in wireless mobile networks." *Handbook of wireless networks and mobile computing* (2002).
- [9] Ardian Ulvan and Robert Bestak . "Handover scenario and procedure in LTE-based femtocell networks." *UBICOMM 2010, The Fourth International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies*. 2010.
- [10] López-Pérez, David, and Xiaoli Chu. "Inter-cell interference coordination for expanded region picocells in heterogeneous networks." *Computer Communications and Networks (ICCCN), 2011 Proceedings of 20th International Conference on*. IEEE, 2011.
- [11] KWAK, Hyoungwon, et al. "Mobility Management Survey for Home-eNB Based 3GPP LTE Systems. *Journal of Information Processing Systems*" JIPS 4.4 (2008): 145-152.
- [12] HOLMA, Harri; TOSKALA, Antti (ed.). "LTE for UMTS-OFDMA and SC-FDMA based radio access" Wiley 3.2 (2009): 25-40.
- [13] BENVENUTO, Nevio; ZORZI, Michele (ed.). "Principles of communications networks and systems" Wiley 9 (2011): 597.
- [14] Overview sulla gestione dello stato utente in LTE: www.mpirical.com/blog/article/159. Online in data 08-07-2013
- [15] QUALCOMM, TECHNICAL PAPER: LTE Mobility Enhancements
- [16] Documentazione ufficiale delle librerie software ns3 v3.17: www.nsnam.org/docs/release/3.17/doxygen. Online in data 08/07/2013
- [17] Documentazione ufficiale sulle funzioni di handover del modulo LTE di ns3: www.lena.cttc.es/manual/lte-user.html#x2-based-handover. Online in data 08/07/2013
- [18] Documentazione sulla realizzazione delle funzioni di handover automatico del modulo LTE di ns3: www.lena.cttc.es/manual/lte-design.html#handover. Online in data 08/07/2013
- [19] F. Guidolin, L. Badia, M. Zorzi, "Implementation of 2x2 MIMO in an LTE module for the ns3 simulator," *Proceedings IEEE CAMAD, Barcelona, Spain, September 2012*.
- [20] L. Anchorà, M. Mezzavilla, L. Badia, M. Zorzi, "A performance evaluation tool for spectrum sharing in multi-operator LTE networks," *Elsevier Computer Communications*, November 2012.
- [21] David Lopez-Perez, Ismail Guvenc, Guillaume de la Roche, Marios Kountouris, Tony Q. S. Quek "Enhanced Inter-Cell Interference Coordination Challenges in Heterogeneous Networks" *IEEE Wireless Commun.* 2011

- [22] Anas, Mohmmad, et al. "Performance analysis of handover measurements and layer 3 filtering for UTRAN LTE." *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium on. IEEE, 2007.*
- [23] Aziz, Danish, and Rolf Sigle. "Improvement of LTE handover performance through interference coordination." *Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th. IEEE, 2009.*
- [24] Zheng, Naizheng, and Jeroen Wigard. "On the performance of integrator handover algorithm in LTE networks." *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th. IEEE, 2008.*
- [25] Lin, Cheng-Chung, et al. "Optimization of handover algorithms in 3GPP long term evolution system." *Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 2011 4th International Conference on. IEEE, 2011.*
- [26] Kwak, Hyoungwon, et al. "Mobility Management Survey for Home-eNB Based 3GPP LTE Systems." *JIPS 4.4 (2008): 145-152.*
- [27] Ulvan, Ardian, Robert Bestak, and Melvi Ulvan. "Handover scenario and procedure in LTE-based femtocell networks." *UBICOMM 2010, The Fourth International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies. 2010.*