



**UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA**

**Calidad de servicio en aplicaciones de voz en redes LTE**

**Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Telemática**

**Maestría en Telemática**

Autor: Ing. Meyli Lucy Guevara Martín

Tutor (es): MSc. Carlos A. Rodríguez López

**Santa Clara, Cuba, 2015**

## RESUMEN

La red LTE como sistema celular de banda ancha constituye la tecnología implementada que marca la vanguardia en la evolución generacional que caracteriza a estos sistemas. Su particularidad de ser una red totalmente IP hace que para ofrecer servicios de llamadas, la variante de voz sobre IP sea la alternativa viable a utilizar, la cual se ve afectada fuertemente en su desempeño por el comportamiento de los parámetros de calidad de servicio: demora, pérdida de paquetes y variación de la demora. La red de acceso de LTE ante condiciones de deterioro del radio enlace implementa eventos de radio como el *handover* orientados a atender la situación. La acción de estos eventos de radio sobre la aplicación de voz provoca efectos negativos en su desempeño como consecuencia del impacto que tiene en los parámetros de calidad de servicio a los que esta aplicación es sensible. Con el fin de garantizar la calidad de servicio, en este trabajo se identifican y caracterizan los eventos de radio que afectan a la aplicación de voz y se demuestra que con el empleo de esta información es posible efectuar acciones preventivas que mejoran el desempeño de la aplicación de voz.

**Palabras Clave:** LTE, VoLTE, eventos de radio, *buffer* de reproducción.

# ÍNDICE

RESUMEN .....	2
ÍNDICE .....	3
GLOSARIO .....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1. Caracterización de la red LTE, su implementación de la aplicación de voz y los eventos de radio que la afectan .....	5
1.1    LTE motivaciones y estandarización .....	5
1.2    Arquitectura de la red LTE .....	6
1.2.1    Arquitectura y características de la E-UTRAN .....	6
1.2.1.1    Interfaces .....	7
1.2.1.2    Protocolos .....	8
1.2.1.3    Canales que establece la red de acceso.....	10
1.2.1.4    Planificador.....	11
1.2.1.5    Mecanismo de retransmisión HARQ en LTE.....	12
1.2.2    Arquitectura y características de la red troncal EPC .....	14
1.2.2.1    Entidades .....	14
1.2.2.2    Gestión de sesión del sistema EPS.....	15
1.2.2.3    Calidad de Servicio .....	16
1.2.3    Subsistema IMS .....	16
1.3    Aplicaciones de voz en LTE.....	17
1.3.1 <i>Voice over LTE</i> (VoLTE).....	17
1.3.1.1    Implementación de VoLTE.....	18
1.3.1.2    Calidad de servicio para VoLTE .....	19
1.4    Eventos de radio en LTE.....	19
1.4.1 <i>Handover</i> .....	20
1.4.1.1    Mediciones utilizadas en el mecanismo de <i>handover</i> .....	20
1.4.1.2    Configuración de las mediciones .....	21
1.4.1.3    Eventos iniciadores de <i>handover</i> .....	22

---

1.4.1.4	Técnicas de <i>handover</i> .....	23
1.4.2	Procedimientos de <i>handover</i> .....	23
1.4.2.1	<i>Handover X2</i> .....	23
1.4.2.2	<i>Handover S1</i> .....	25
1.4.3	Caracterización del <i>handover</i> .....	28
1.4.4	Retransmisiones en el enlace ascendente.....	31
1.4.5	<i>Single Radio Voice Call Continuity (SRVCC)</i> .....	33
1.4.5.1	Arquitectura de referencia.....	33
1.4.5.2	Señalización del proceso .....	34
1.4.6	Caracterización del SRVCC .....	34
1.5	Consideraciones finales del capítulo .....	37
CAPÍTULO 2. Escenario de aplicación y mecanismo de detección de <i>handovers</i> en aplicaciones de voz en LTE.....		38
2.1	Generación de la traza VoLTE.....	38
2.1.1	Definición del simulador.....	38
2.1.2	Descripción del escenario.....	39
2.1.2.1	Topología .....	39
2.1.2.2	Modelo de movilidad.....	40
2.1.2.3	Modelo de pérdida de trayectos .....	42
2.1.2.4	Modelo de Desvanecimiento .....	42
2.1.2.5	Configuración del protocolo RLC .....	43
2.1.2.6	Planificador .....	43
2.1.2.7	Algoritmo de <i>handover</i> .....	44
2.1.2.8	Potencia de transmisión, modelo de antena y ancho de banda.....	45
2.1.2.9	Modelo de aplicación .....	45
2.1.3	Recolección de las trazas.....	46
2.2	Algoritmos del <i>buffer</i> de reproducción .....	47
2.2.1	Algoritmos de Ramjee.....	48
2.3	Algoritmos de estimación de calidad de voz para redes que soportan VoIP.....	51
2.3.1	Métodos de medición intrusivos .....	51
2.3.1.1	PESQ .....	52
2.3.2	Métodos de medición no intrusivos .....	53

---

2.3.2.1 Modelo E .....	53
2.3.3 Comparación de los métodos objetivos .....	55
2.4 Mecanismo basado en RLF para el <i>buffer</i> de reproducción .....	55
2.4.1 Propuesta del mecanismo para el evento de radio <i>handover</i> .....	57
2.5 Consideraciones finales del capítulo .....	58
CAPÍTULO 3. Evaluación del funcionamiento de la detección de <i>handovers</i> en el <i>buffer</i> de reproducción .....	59
3.1 Traza VoLTE .....	59
3.1.1 Inserción de silencios.....	60
3.2 Evaluación de los algoritmos de predicción del <i>buffer</i> de reproducción .....	61
3.3 Evaluación de los algoritmos de reproducción con detección de picos .....	70
3.4 Consideraciones finales del capítulo .....	81
CONCLUSIONES .....	82
RECOMENDACIONES.....	84
BIBLIOGRAFÍA .....	85
ANEXOS .....	90
Anexo 1 <i>Handover</i> .....	90

## GLOSARIO

3GPP: 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project

ACK: Acknowledge

ACR: Absolute Category Rating

AMR: Adaptive Multirate

AN: Access Network

API: Application Program Interface

APN: Access Point Name

ARP: Allocation and Retention Priority

ARQ: Automatic Repetition Question

AS: Application Server

BBC: Break Before Connect

BCH: Broadcast Channel

CBB: Connect Before Break

CDMA: Code Division Multiple Access

CIR: Carrier to Interference Ratio

CN: Core Network

CQI: Channel Quality Indicator

CRC: Cyclic Redundancy Code

CSCF: Call State Control Function

CSFB: Circuit Switched Fall Back

CTTC: Centre Tecnologic de Telecomunicacions de Catalunya

DCI: Downlink Control Information

DCR: Degradation Category Rating

DHCP: Dynamic Host Configuration Protocol

DL: Down Link

DL-SCH: Down Link Shared Channel

DRB: Data Radio Bearers

EMBSD: Enhanced Modified Bark Spectral Distortion

eNB: evolved NodeB

EPC: Evolved Packet Core

EPS: Evolved Packet System

E-UTRAN: Evolved UTRAN

GBR: Guaranteed Bit Rate

GPRS: General Packet Radio Service

GSM: Global System for Mobile Communication

GTP-U: GPRS Tunneling Protocol-User Plane

HARQ: Hybrid ARQ

HARQ ID: HARQ process Identifier

HO: handover

HSPA: High Speed Packet Access

HSS: Home Subscriber Server

I-CSCF: Interrogating-CSCF

IETF: Internet Engineering Task Force

IMS: IP Multimedia Subsystem

IP: Internet Protocol

IP-CAN: IP Connectivity Access Network

LENA: LTE – EPC Network Simulator

LTE: Long Term Evolution

MAC: Medium Access Control

MBR: Maximum Bit Rate

MCS: Modulation and Codification Scheme

MCH: Multicast Channel

MGSF: Media Gateway Control Function

MHO: Margin of HO

MIB: Master Information Block

MME: Mobility Management Entity

MNB: Measuring Normalizing Block

E Model: European Telecommunications Standards Institute (ETSI) Computation Model

MOS: Mean Opinion Score

NACK: Not Acknowledge  
NDI: New Data Indicator  
OTT: Over The Top solution  
PAMS: Perceptual Analysis Measurement System  
PBCH: Physical Broadcast Channel  
PCFICH: Physical Control Format Indicator Channel  
P-CSCF: Proxy-CSCF  
PCH: Paging Channel  
PDCCH: Physical Downlink Control Channel  
PDCP: Packet Data Convergence Protocol  
PDN: Packet Data Network  
PDSCH: Physical Downlink Shared Channel  
PER: Packet Error Rate  
PESQ: Perceptual Evaluation of Speech Quality  
PF: Proportional Fair  
P-GW: Packet Data Network Gateway  
PHICH: Physical Hybrid ARQ Indicator Channel  
PLMN: Public Land Mobile Network  
PMCH: Physical Multicast Channel  
PRACH: Physical Random Access Channel  
PS: Packet Switch  
PSQM: Perceptual Speech Quality Measure  
PSTN: Public Switched Telephone Network  
PUCCH: Physical Uplink Control Channel  
PUSCH: Physical Uplink Shared Channel  
QCI: QoS Class Identifier  
QoS: Quality of Service  
RACH: Random Access Channel  
RAT: Radio Access Technology  
RB: Radio Bearer  
RH: Remote Host  
RLC: Radio Link Control

RLF: Radio Link Feedback  
RNG: Random Number Generator  
ROHC: Robust Header Compression  
RRC: Radio Resource Control  
RRC: Radio Resource Control  
RS: Reference Signal  
RSRP: Reference Signal Received Power  
RSRQ: Reference Signal Received Quality  
RSSI: Received Signal Strength Indicator  
RTCP: Real Time Control Protocol  
RTP: Real Time Protocol  
RTP: Real Time Protocol  
RV: Redundancy Version  
RWPMM: Random Waypoint Mobility Model  
S1-U: S1-User Plane  
SAE: System Architecture Evolved  
SAW: Stop and Wait  
S-CSCF: Serving-CSCF  
SDP: Session Description Protocol  
SDU: Service Data Unit  
S-GW: Serving Gateway  
SIB: System Information Blocks  
SINR: Signal Interference plus Noise Ratio  
SIP: Session Initiation Protocol  
SNR: Signal Noise Ratio  
SRB: Signaling Radio Bearers  
SRVCC: Single Radio Voice Call Continuity  
SSRWPMM: Steady-State Random Waypoint Mobility Model  
TB: Transport Block  
TFT: Traffic Flow Template  
TTI: Transmission Time Interval  
TTT: Time To Trigger

UDP: User Datagram Protocol

UIT: Unión Internacional de Telecomunicaciones

UL: Up Link

UL-SCH: Up Link Shared Channel

UMB: Ultra Mobile Broadband

UMTS: Universal Mobile Telecommunication System

UTRAN: UMTS Terrestrial Radio Access Network

VoIP: Voice over IP

VOLGA: Voice Over LTE via Generic Access

VoLTE: Voice over LTE

WCDMA: Wideband Code Division Multiple Access

XCAP: Configuration Access Protocol

XML: eXtensible Mark-up Language

## INTRODUCCIÓN

Las redes inalámbricas desde sus primeros desarrollos comerciales en la década de los 80 se han afianzado en la preferencia de los usuarios debido, entre otras cualidades, a la movilidad que les confiere, siendo especialmente su demanda y popularidad lo que las hacen en la actualidad centro de investigación y continuo desarrollo. El indetenible avance en estas esferas se ha manifestado en prácticamente todas las implementaciones, sin embargo uno sobre el que más impacta la evolución tecnológica es el sistema celular [1].

El sistema celular surgió en sus inicios con el fin de proveer telefonía móvil, definiéndose como tal, según [1], a aquel que permite la comunicación entre usuarios que se desplazan libremente en lugares geográficos diferentes, en estos sistemas un transmisor cubre una zona geográfica denominada celda, las cuales constituyen la unidad básica de cobertura. En nuestros días no se puede decir que brindar telefonía sea la única finalidad de los sistemas celulares, a medida que las redes han ido evolucionando y los nuevos servicios para los usuarios han entrado en el panorama social, los sistemas celulares han ido creando nuevas capacidades con el objetivo de integrarse y ser parte activa de la vida moderna.

El sistema celular utilizó la infraestructura de la Red Pública de Conmutación Telefónica (*Public Switched Telephone Network, PSTN*), que emplea conmutación de circuitos y sistemas de señalización, para la implementación de los servicios de voz, así fue desde la primera generación que estaba basada en tecnología analógica, donde sus servicios eran únicamente de voz y se caracterizaban por su baja calidad y velocidad [1], y continuó en las generaciones que le sucedieron.

En los años 90 hizo su aparición la segunda generación de telefonía celular basada esta vez totalmente en tecnología digital. Esta nueva generación poseía novedad en estándares como GSM (*Global System for Mobile Communication*), y CDMA (*Code Division Multiple Access*) que hicieron posible que a partir de aquí existiera no solo la comunicación telefónica, sino también el envío de mensajes de texto y el *roaming* internacional, brindándole a los usuarios comunicaciones de alta calidad de voz, bajo costo de terminales, flexibilidad y capacidad para migración, bajo el mismo principio de conmutación de circuitos [1].

Sin embargo con el amplio esparcimiento del uso de Internet los servicios de conmutación de paquetes fueron introducidos con el fin de mejorar el sistema celular. Con el surgimiento del estándar GPRS (*General Packet Radio Service*), el que constituyó una extensión de la tecnología GSM, se realizó por primera vez la implementación del envío de paquetes de información por la red celular, posibilitando el establecimiento para los usuarios de servicios como: la mensajería multimedia, el correo electrónico y el acceso a Internet. De esta manera el sistema celular contaba entonces con tecnología de conmutación de paquetes para transmisión de datos [2].

Las posteriores evoluciones del sistema celular se han mantenido sobre este mismo principio (conmutación de paquetes) y todas las variaciones que se han realizado hasta la implementación de HSPA (*High Speed Packet Acces*), relativa a la generación 3.5, han ido encaminadas, entre otros factores, a mejorar las capacidades de estos canales de datos con el objetivo de soportar las demandas de las aplicaciones disponibles para los usuarios. De esta manera estas generaciones constaban con ambos tipos de conmutación, por circuitos para la voz y por paquetes para los datos [2].

En diciembre de 2009 vio la luz el primer estándar de LTE el cual devendría la primera versión de la que comercialmente se conoce como cuarta generación de sistemas celulares. Esta tecnología fue estandarizada por el 3GPP (*3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project*) y constituye una evolución del sistema UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*). El modelo LTE es diseñado e introducido con el concepto de revolucionar las tecnologías móviles de banda ancha, debido, entre otras cuestiones, a que es una red totalmente IP (*Internet Protocol*) o sea ella trabaja completamente bajo el principio de conmutación de paquetes [3]. Como LTE no soporta conmutación de circuitos se necesita de una nueva solución para las llamadas de voz, la respuesta a este problema ha sido tratada a través de varias implementaciones relacionadas con el grado de despliegue de la red LTE, existiendo una tendencia a asumir como estándar la variante de proveer el servicio implementando VoIP (*Voz sobre IP*) sobre LTE, que comúnmente se conoce como VoLTE, a través de la plataforma IMS (*IP Multimedia Subsystem*) [4].

Debido a que en LTE todos los servicios, incluyendo los de voz, convergen a una red toda IP, mantener la calidad de servicio (*Quality of Service, QoS*) es crucial para proveer aplicaciones de multimedia en un rango aceptable para las redes de nueva generación [5]. Para mantener la demanda de QoS en LTE existen modelos, mecanismos y esquemas recomendados por el IETF (*Internet Engineering Task Force*) con el objetivo de priorizar los recursos en base a los requerimientos de los usuarios y las aplicaciones que desarrollan [3]. Con respecto a la calidad de servicio para las aplicaciones de voz en particular existen métricas que poseen un gran impacto en el desempeño de esta aplicación, estas son: la demora, la pérdida de paquetes y las variaciones en la demora o *jitter*, para las cuales los receptores deben estar preparados y ser robustos en cuanto a su tratamiento. Este problema es usualmente mejorado mediante el uso de un sistema de almacenamiento en el receptor denominado *buffer* de reproducción, el cual puede mantener la pérdida de paquetes y la demora en valores mínimos, con el objetivo de acomodar cualquier variación en la demora de la red entregando al usuario una cadena de datos que satisface los desempeños correctos de la aplicación [6].

Los parámetros de calidad de servicio en las aplicaciones de voz en las redes LTE son afectados por una serie de fenómenos propios de la capa física, conocidos como eventos de radio, que actúan ante condiciones de deterioro del enlace. Poder identificarlos y prever el impacto que tendrán en los parámetros de calidad de servicio se traduciría en la posibilidad de realizar acciones preventivas orientadas a disminuir el impacto que tienen en el funcionamiento de las aplicaciones de voz, pudiendo ser obtenida consecuentemente una mejor valoración cualitativa de la percepción de los usuarios.

Sobre la base de esta situación problemática se establece como interrogante científica: ¿Existe incidencia de los eventos de radio y las acciones preventivas a ellos en la calidad de servicio de aplicación de voz en redes LTE?

Teniendo como objeto de investigación a las redes LTE y como campo de acción a las afectaciones de calidad de servicio en las aplicaciones de voz sobre estas redes.

De esta manera se establece como objetivo general: demostrar la incidencia de los eventos de radio y las acciones preventivas a ellos en la calidad de servicio de la aplicación de voz en redes LTE.

Para dar cumplimiento al objetivo general se precisan como objetivos específicos:

1. Caracterizar la red LTE según su arquitectura y su implementación de la aplicación de voz.
2. Identificar los eventos de radio influyentes en las aplicaciones de voz de la red LTE y sus afectaciones en la calidad de servicio.
3. Definir un escenario de aplicación de acciones preventivas asociado al menos a un evento de radio.
4. Proponer un mecanismo para la evaluación de la incidencia de acciones preventivas en al menos un evento de radio en la calidad de servicio de la aplicación de voz en LTE.
5. Evaluar la incidencia del mecanismo propuesto, con respecto a la calidad percibida por el usuario de la aplicación de voz en la red LTE.

Los métodos y técnicas que se prevén utilizar en el desarrollo de esta investigación son:

El método empírico de recolección de información, específicamente mediante el estudio de documentos, para de esta manera poder obtener la información necesaria referente al objeto de investigación.

Se utilizarán además los métodos teóricos:

- Histórico-Lógico: posibilitando a través del estudio de la trayectoria del objeto de acción, contextualizar el problema de investigación, sus antecedentes y desarrollo.
- Análisis y Síntesis: para lograr el tratamiento de cada elemento constituyente del campo de acción de la investigación, posibilitando el trabajo con los elementos de la red LTE, obteniendo sus partes, cualidades y relaciones y a partir de aquí lograr la integración de las partes constitutivas del campo de acción de la investigación para llegar al conocimiento de aquellos fenómenos de la red LTE que generarían eventos de interés en la calidad de servicio.
- Inductivo-Deductivo: partiendo de arribar a conclusiones generales a partir del análisis de los eventos asociados a escenarios de voz en LTE, llegar a conclusiones particulares en cuanto a su influencia cuantificable en las métricas de calidad de servicio.

En la valoración de las medidas teóricas propuestas de los parámetros de calidad trabajados se emplearán criterios de especialistas con el propósito de evaluar la validez de las mismas.

Como resultados de esta tesis se espera obtener:

1. La definición del conjunto eventos de radio que afectan la calidad de servicio en aplicaciones de voz en LTE.
2. El establecimiento de la medida en la que estos eventos influirán en las métricas de calidad de servicio relevantes para las aplicaciones de voz.
3. La comprobación de la incidencia positiva de las acciones preventivas a los eventos de radio en la calidad de servicio de las aplicaciones de voz en LTE.

La investigación aportará de manera organizada y detallada información relacionada con los fenómenos que influenciarán en los parámetros de calidad de servicio, particularmente en aplicaciones de voz, brindando un material que resuma todas las afectaciones a las que se verán sometidas estas métricas de calidad y la magnitud que se debe esperar de estas, convirtiéndose en una fuente de consultas muy útil para futuras investigaciones en temas de aplicaciones de voz en LTE.

El aporte social que se espera de esta investigación es el de contribuir con el desarrollo de las aplicaciones de voz sobre LTE con una calidad aceptable para la percepción del usuario, teniendo como motivación fundamental el que sean estas aplicaciones de las más demandadas por clientes de servicios de sistemas celulares.

El aporte teórico se basa en que sus resultados podrán ser aplicados a principios de mayor alcance, sugiriendo además ideas de aplicación en futuras investigaciones y contribuyendo de manera general a enriquecer los aspectos relacionados con el comportamiento de los parámetros de calidad de servicios para las aplicaciones de voz en las redes LTE.

Por último también propone un aporte metodológico al proveer de un material que puede ser utilizado en futuros trabajos en este campo de investigación.

La tesis se estructura en: introducción, capitulario, conclusiones, bibliografía y un anexo. En el capítulo uno se realizará un análisis de la estructura de la red LTE, sus generalidades y particularidades, las características en cuanto a la implementación de las aplicaciones de voz, así como también se realizará una identificación de los eventos de radio que afectan a la capa física LTE e impactan el desempeño de la aplicación de voz, estableciéndose los valores que adoptan parámetros de calidad de servicio bajo su influencia. En el capítulo dos se procederá a desarrollar un mecanismo para un evento de radio en particular, que funcione como caso de estudio de la incidencia de los eventos de radio y las acciones preventivas a ellos en la calidad de servicio de la aplicación de voz en redes LTE. En el capítulo tres se mostrarán resultados de la evaluación del mecanismo propuesto y se analizará el significado de los mismos. Las conclusiones del trabajo abordarán los resultados obtenidos en la investigación.

# **CAPÍTULO 1. Caracterización de la red LTE, su implementación de la aplicación de voz y los eventos de radio que la afectan**

En este capítulo se describirán características generales de la red LTE desde el punto de vista de su arquitectura y de las técnicas que utiliza como parte de su funcionamiento. Se tratará además la forma de abordar en estas redes la ejecución de la aplicación de voz atendiendo a que en LTE no se implementa la conmutación de circuitos, puntualizando lo concerniente a calidad de servicio en esta aplicación. Por último se identificarán aquellos eventos de radio que afectan el desempeño de la aplicación de voz en LTE, realizando además una caracterización de los mismos.

## **1.1 LTE motivaciones y estandarización**

El crecimiento explosivo en el número de usuarios de telefonía móvil, unido al estado tecnológico actual, han creado una fuerte demanda de aplicaciones móviles de banda ancha [7]. La tercera generación de las redes móviles permitió que las personas lograran satisfacer sus necesidades en cuanto a aplicaciones de banda ancha de gran pero pronto comenzó a mostrar síntomas de deficiencia de capacidad, siendo incapaz en un momento determinado, para cumplir con los requerimientos de los usuarios. Satisfacer entonces las necesidades de los usuarios en cuanto a estas aplicaciones, consiguiendo que los servicios ofertados resultaran atractivos, al mismo tiempo que los operadores pudieran reducir sustancialmente los gastos de operación, fueron los detonantes para que el 3GPP comenzase a trabajar en el desarrollo de LTE, como paso evolutivo a seguir después de la tecnología HSPA+. De esta manera comenzó el crecimiento de una tecnología en la que por una parte el usuario dispusiera de una amplia oferta de servicios de valor añadido con capacidades similares a las que disfruta con accesos de banda ancha residencial y a precios competitivos, y por otra el operador contara con una red de complejidad y coste reducidos [7]. Bajo este contexto entonces y tras un período de estudio e investigación surgió LTE, oficializándose como estándar en diciembre de 2009 a través del *Release 8* del 3GPP y convirtiéndose entonces en la última tecnología de la línea de evolución de esta norma [8].

LTE es una red de tecnología de nueva generación, o sea todo su despliegue se basa en el concepto de una red totalmente IP, que funciona bajo el principio de conmutación de paquetes. El termino LTE se acuñó inicialmente para denominar una línea de trabajo interna cuyo objeto de estudio era la evolución de la red de acceso de UMTS, denominada como UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Acces Network*). Formalmente, la nueva red de acceso recibe el nombre de E-UTRAN (*Evolved UTRAN*) aunque muchas veces se utiliza también el término LTE en las especificaciones como sinónimo. Asimismo, en lo concerniente a la red troncal, 3GPP utilizó el término SAE (*System Architecture Evolution*) para referirse a las actividades de estudio relacionadas con la especificación de una red troncal evolucionada de conmutación de paquetes. Formalmente, dicha red troncal se denomina EPC (*Evolved Packet Core*) o también

*Evolved 3GPP Packet Switched Domain*, y de la misma forma que pasa con la red de acceso, es común encontrar el término de SAE como sinónimo de EPC. La combinación de la red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC es lo que constituye la nueva red UMTS evolucionada y recibe el nombre formal de EPS (*Evolved Packet System*). La primera especificación del sistema EPS ha sido incluida en la *Release 8* de las especificaciones del 3GPP [9]. No obstante resulta común encontrar el término LTE para referirse a lo que formalmente se conoce como EPS o sea a la evolución de la red UMTS en su conjunto y no solamente a la E-UTRAN [10].

## 1.2 Arquitectura de la red LTE

Las arquitecturas de red contempladas en la familia de sistemas especificados por 3GPP, y por tanto la de LTE, se adaptan a la arquitectura genérica conformada por: la unidad de usuario y una infraestructura de red que se divide de forma lógica en una infraestructura de red troncal (*Core Network, CN*) y una de red de acceso (*Access Network, AN*) [9]. En la figura 1.1 se ilustra la arquitectura de la red LTE.

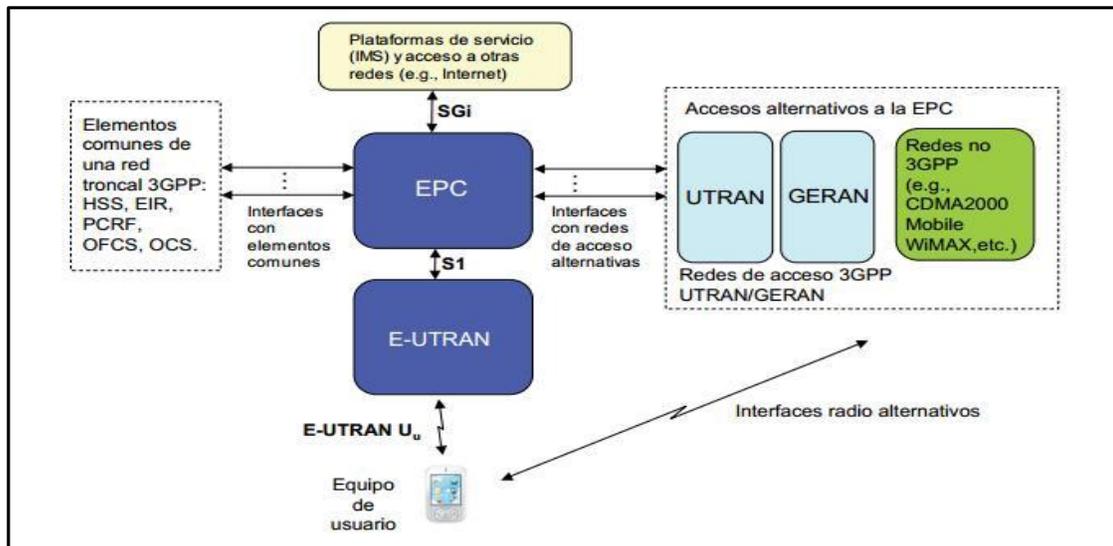


Figura 1.1 : Arquitectura de red LTE [9]

La red de acceso en LTE consiste en una evolución de la red UTRAN denominada E-UTRAN. Por su parte la red troncal que tradicionalmente se dividía en dos dominios lógicos: el dominio de circuitos, el de paquetes y el subsistema IMS, en el caso de LTE elimina el dominio de circuitos quedando constituido entonces por el dominio de paquetes y el subsistema IMS. El dominio de paquetes es denominado EPC y constituye una implementación evolucionada de GPRS que ha sido optimizada para proporcionar un servicio de conectividad IP a los equipos de usuario a través de E-UTRAN. Por su parte el subsistema IMS comprende los elementos de la red relacionados con la provisión de servicios IP multimedia basados en el protocolo SIP (*Session Initiation Protocol*) de la IETF [9].

### 1.2.1 Arquitectura y características de la E-UTRAN

La arquitectura de la red de acceso posee la estructura mostrada en la figura 1.2.

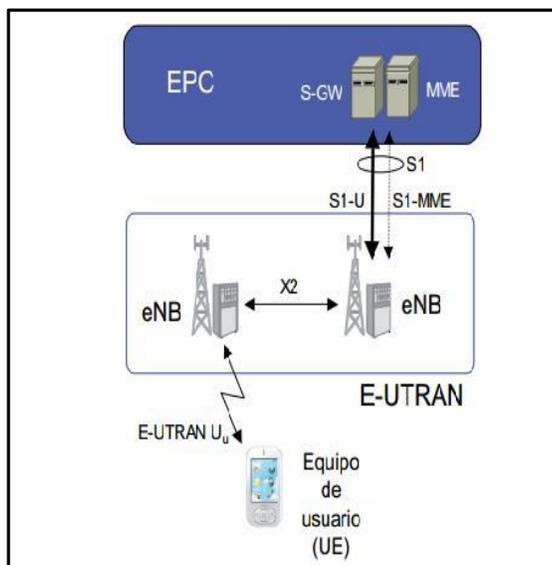


Figura 1.2: Arquitectura de la red de acceso E-UTRAN [9]

La red de acceso se compone de una única entidad de red denominada *evolved NodeB* (eNB) que constituye la estación base de E-UTRAN y que integra toda la funcionalidad de la red de acceso, proporcionando la conectividad entre los equipos de usuario (UE) y la red troncal EPC [9]. En este terminan todos los protocolos específicos de la interfaz radio mediante los cuales se realiza la transmisión de los paquetes IP desde/hacia los equipos de usuario junto con los mensajes de señalización necesarios para controlar la operación de la interfaz de radio, lo cual se denomina formalmente servicio portador radio (*Radio Bearer*, RB) [11].

La funcionalidad clave de un eNB consiste en la gestión de los recursos radio, para ello el eNB alberga funciones de control de admisión de los servicios portadores radio, control de movilidad que incluye la decisión de realizar un *handover*, asignación dinámica de los recursos de radio tanto en el enlace ascendente (*Up Link*, UL) como descendente (*Down Link*, DL), control de interferencias entre estaciones base, control de la realización y del envío de medidas desde los equipos de usuario que puedan ser útiles en la gestión de recursos, entre otras [8],[12].

### 1.2.1.1 Interfaces

Un eNB se comunica con el resto de elementos del sistema mediante tres interfaces: E-UTRAN Uu (interfaz radio), S1 y X2.

#### Interfaz radio

La interfaz radio soporta básicamente tres tipos de mecanismos de transferencia de la información en el canal radio: difusión de señalización de control, envío de paquetes IP y transferencia de señalización de control dedicada entre un equipo de usuario y el eNB [9].

La difusión (*broadcast*) de señalización de control en la zona de cobertura de la celda permite a los equipos de usuario detectar la presencia del eNB y conocer sus parámetros básicos de operación así como la identidad de los operadores de red a los que puede accederse a través del eNB [9].

La transferencia de señalización de control dedicada entre el eNB y un equipo de usuario se soporta mediante el protocolo RRC (*Radio Resource Control*). A través de dicho protocolo se gestionan el establecimiento, la modificación y la liberación de los servicios portadores de radio entre el eNB y el equipo de usuario, entre otros mecanismos claves para la gestión eficiente de los recursos radio. Respecto al envío de paquetes de usuario, cada servicio portador tiene asociado un perfil de QoS que debe satisfacerse mediante la correcta configuración de los protocolos radio así como la adecuada operación de los mecanismos de gestión de recursos radio [9].

### **Interfaz S1 (eNB-EPC)**

El plano de usuario de esta interfaz, denominado S1-U (*S1-User Plane*), proporciona un servicio de transferencia de datos de usuario entre eNB y S-GW sin garantías de entrega basado en UDP (*User Data Protocol*), denominado servicio portador S1 [9].

El plano de control, denominado S1-MME o también S1-C (*S1-ControlPlane*), se utiliza para soportar un conjunto de funciones y procedimientos de control entre eNBs y la entidad MME de la red troncal [13], entre estos procedimientos se destaca el dedicado al *handover* entre eNBs, en el que si la red E-UTRAN decide que un terminal debe cambiar de eNB en el transcurso de una conexión, y no existe una interfaz X2 entre los dos eNBs involucrados, se utiliza entonces esta interfaz para articular el procedimiento de *handover* [13].

### **Interfaz X2 (eNB-eNB)**

El plano de usuario de la interfaz X2 proporciona un servicio de transferencia de datos de usuario entre eNBs sin garantías de entrega y sin soporte de mecanismos de control de errores y de control de flujo. La transferencia de datos de usuario entre eNBs se realiza únicamente durante los procedimientos de *handover* en los que los paquetes de usuario almacenados en el eNB antiguo se transfieren al eNB nuevo. De esta forma, el cambio de eNB asociado a un procedimiento de *handover* puede resultar más transparente al usuario ya que se reduce la posible pérdida de paquetes durante el proceso [9].

El plano de control, denominado S1-MME o también S1-C, se utiliza para soportar un conjunto de funciones y procedimientos de control entre eNBs y la entidad MME de la red troncal, entre estos el soporte del mecanismo de *handover* entre eNBs, donde se realiza la transferencia del contexto de un usuario del eNB antiguo al nuevo y se controla el mecanismo de transferencia de paquetes IP en el plano de usuario de X2 [9].

#### **1.2.1.2 Protocolos**

Las torres de protocolos utilizadas en las tres interfaces de E-UTRAN (radio, X2 y S1), pormenorizadas en [13], se estructuran en torno a un plano de usuario y un plano de control. El plano de usuario abarca los protocolos utilizados para el envío del tráfico (paquetes IP) correspondiente a los servicios a los que acceden los terminales a través de la red. El plano de control se refiere a los protocolos necesarios para sustentar las funciones y procedimientos en las diferentes interfaces.

## Protocolos de la interfaz radio

El envío de paquetes IP entre el eNB y un equipo de usuario a través de la interfaz radio, concentrado en el plano de usuario, se sustenta en una torre de protocolos formada por una capa de enlace (o capa de nivel 2) y una capa física. La capa física es la encargada de realizar la transmisión, propiamente dicha, a través del canal radio. La capa de enlace se desglosa a su vez en tres subcapas:

- La subcapa PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*), que constituye la capa superior de la torre de protocolos encargada de proporcionar el punto de acceso al RB, o sea los paquetes IP del tráfico de usuario se entregan y se reciben a través del servicio de transferencia proporcionado por esta capa [13].
- La subcapa RLC (*Radio Link Control*), que permite enviar de forma fiable los paquetes PDCP entre el eNB y el equipo de usuario. Las funcionalidades básicas de esta capa son: implementar procedimientos de segmentación/concatenación de los paquetes IP recibidos de capas superiores para adaptar su tamaño a las capacidades de transmisión de la interfaz aire; implementar mecanismos de retransmisión de los paquetes recibidos erróneamente y evitar duplicidades y realizar la entrega ordenada a las capas superiores [13].

Existen tres modos de operación de la subcapa RLC: el modo transparente, que es el más simple ya que la sub-capas RLC entrega directamente a la subcapa MAC los RLC\_SDU (*Service Data Unit*) recibidos de las capas superiores y no se introducen cabeceras al mensaje ni se implementan procesos de retransmisión; el modo de No-reconocimiento, que detecta si los paquetes RLC\_SDU recibidos contienen errores, pero no implementa mecanismos de retransmisión, y el modo de reconocimiento que es el modo de operación más robusto, donde además de las funciones de segmentación/reensamblado y de ordenación de los RLC-SDU también proporciona mecanismos de retransmisión tipo ARQ (*Automatic Repetition Question*) para eliminar posibles errores introducidos por el canal radio [14].

- Finalmente la subcapa MAC (*Medium Access Control*) que es la capa encargada de controlar el acceso al canal radio, para lo que soporta funciones de *scheduling* dinámico entre equipos de usuario atendiendo a prioridades establecidas por la calidad demandada en cada una de ellas, multiplexa los paquetes RLC de diferentes servicios portadores radio en los canales de transporte ofrecidos por la capa física y realiza un control de errores mediante el mecanismo HARQ (*Hybrid ARQ*) [13].

Cada capa/subcapa de la torre de protocolos se ocupa de un conjunto de funciones concretas y define el formato de los paquetes de datos que se intercambian entre entidades remotas.

Respecto al plano de control entre el equipo de usuario y la red, éste se soporta sobre la misma capa de enlace (protocolos PDCP, RLC, MAC) y la misma capa física, utilizadas en el plano de usuario. El protocolo de nivel de red específicos de este plano es RRC (*Radio Resource Control*), este protocolo permite establecer una conexión de control entre el eNB y un equipo de usuario a través de la cual se llevan a cabo un número importante de funciones relacionadas

con la gestión operativa de la interfaz radio [13]. El protocolo establece dos estados para el terminal: el estado conectado o *RRC-connected* y el estado pasivo o *RRC-idle*. En el estado *RRC-idle*, creado para ahorrar tanta energía como sea posible, no existe conexión entre el terminal y el eNB, lo cual significa que el terminal no es reconocido por la red de acceso, en este estado aunque a nivel de aplicación el usuario está inactivo, en la interfaz de radio ocurren procesos en los que este se verá envuelto [9]. En el estado conectado, *RRC-connected*, existe una conexión activa entre el terminal y el eNB, en este caso ambos lados intercambiarán datos de usuario o mensajes de señalización sobre canales lógicos [14].

Por otro lado el protocolo RRC cubre todos los procedimientos relacionados con el establecimiento, modificación y liberación de una conexión RRC, incluyendo el aviso, activación inicial segura, establecimiento de los portadores de radio de señalización (*Signaling Radio Bearers, SRB*) y los portadores de radio que portan la información del usuario (*Data Radio Bearers, DRB*) [9]. Además el protocolo RRC soporta una serie de funciones relacionadas con la movilidad del usuario final que se encuentra en el estado conectado. Entre estas se encuentra el control de mediciones, el que se refiere a la configuración con que debe proceder el terminal así como el método para realizar los reportes al eNB [14].

La figura 1.3 muestra la pila de protocolos de esta interface representada de forma esquemática.

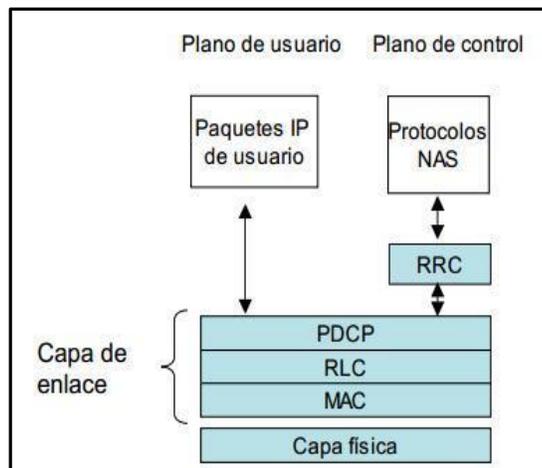


Figura 1.3: Pila de protocolos de la interfaz física [9]

### 1.2.1.3 Canales que establece la red de acceso

La interrelación entre los diferentes protocolos se hace a partir de los denominados canales lógicos, de transporte y físicos. Los Canales Lógicos se establecen entre la capa RLC y la MAC y se utilizan para describir el tipo de información de usuario y/o señalización que se transmite a través de la interfaz aire, estos se dividen en: Canales Lógicos de Control y Canales Lógicos de Tráfico [9]. Los Canales de Transporte se establecen entre la capa MAC y la capa física y básicamente aportan flexibilidad a la interfaz aire, ya que permiten multiplexar diferentes canales lógicos en un canal de transporte. Además, los canales de transporte también se utilizan para describir cómo y con qué características se transmite la información a través de la interfaz aire [9]. Los Canales de Transporte que se utilizan en el DL son: BCH

(*Broadcast Channel*), DL-SCH (*Downlink Shared Channel*), PCH (*Paging Channel*) y MCH (*Multicast Channel*). Los Canales de Transporte que se utilizan en el UL son: UL-SCH (*Uplink Shared Channel*) y RACH (*Random Access Channel*) [9].

Finalmente los denominados canales físicos describen los mecanismos físicos de transmisión/recepción a través del enlace radio tanto de la información de usuario como de la propia señalización del sistema [9]. Los Canales Físicos están divididos en Canales Físicos de Tráfico y Canales Físicos de Control. En el UL existe un solo Canal Físico de Tráfico: PUSCH (*Physical Uplink Shared Channel*) que es el canal utilizado para enviar la información de usuario [9]. Los Canales Físicos de Control en este enlace son: PUCCH (*Physical Uplink Control Channel*) que contiene información de control del UL. En particular transmite peticiones de asignación de recursos (*Scheduling Request*), reconocimientos (ACK/NACK) correspondientes al DL e información de la calidad del canal (*Channel Quality Indicator-CQI*) [9]. PRACH (*Physical Random Access Channel*) el cual es un Canal Físico de acceso aleatorio. Este canal envía un preámbulo para iniciar, por parte del móvil, el procedimiento de conexión al sistema [9].

Por su parte el DL posee dos canales para tráfico: el PMCH (*Physical Multicast Channel*) y el PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*) que transmite habitualmente información de usuario y contiene la información entregada por la capa MAC mediante el canal de transporte DL-SCH (*Downlink Shared Channel*). En particular, transporta los denominados Bloques de Información del Sistema (*System Information Blocks, SIBs*). Este no es un canal dedicado, sólo se asigna al usuario cuando tiene algo que recibir en el DL y como resultado de la gestión de recursos realizada por el algoritmo de *scheduling* de dicho enlace [9].

Los Canales Físicos de Control son: PBCH (*Physical Broadcast Channel*) que transporta información básica sobre la red, denominada Bloque de Información Maestra (*Master Information Block, MIB*) [9], PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*) que transporta los denominados Información de Control del Enlace Descendente (*Downlink Control Information, DCI*) que incluyen información de asignación de recursos para los canales de aviso (PCH) y de tráfico compartido (DL-SCH), también transporta información sobre los mecanismos de retransmisión HARQ [9], el PCFICH (*Physical Control Format Indicator Channel*) [9] y el PHICH (*Physical Hybrid ARQ Indicator Channel*) que transporta los reconocimientos (ACK/NAK) para implementar el mecanismo de HARQ en el UL[9].

#### 1.2.1.4 Planificador

En una transmisión por paquetes la asignación de recursos a usuarios es flexible y, por tanto, tiene la capacidad de adaptarse a las necesidades de cada momento. Esta particularidad es posible gracias a la sofisticación de los mecanismos de gestión de recursos radio, que incorporan una nueva funcionalidad denominada *packet scheduling* que se encarga de decidir la asignación dinámica a usuarios y que es incluida en LTE [12]. La transmisión por paquetes con un algoritmo de *packet scheduling* adecuado consigue mejorar la eficiencia espectral, ya que según lo acertado de sus decisiones se logrará un mayor o menor aprovechamiento de los recursos radio. En este sentido, la mejor granularidad temporal del sistema permite que el algoritmo de *packet scheduling* pueda asignar los recursos no sólo a los usuarios que tienen

información a transmitir sino que, entre estos, a aquellos que tengan condiciones más favorables en su radio canal particular en un momento dado. Sin embargo aunque este esquema provee flexibilidad total en cada subtrama, puede generar información de control excesiva [15].

Un método más eficiente es la planificación semi-persistente [9] en el que una asignación del DL o un consentimiento del UL son válidos para N transmisiones o recepciones en lugar de ser válido para una sola transmisión o recepción, este valor de N es configurado y señalado por el protocolo RRC. Otra opción es la agrupación de TTI (*Transmission Time Interval*) en el UL en el cual se combinan un número de subtramas y solo una realimentación HARQ es enviada para todo el grupo. Esto es especialmente útil para limitar la potencia requerida para la transmisión, por ejemplo, en el borde de la celda [13].

#### 1.2.1.5 Mecanismo de retransmisión HARQ en LTE

El mecanismo de retransmisión híbrida se implementa a nivel de capa MAC para corregir los errores introducidos por el canal radio y garantizar una transmisión fiable a través de dicho canal [16]. En LTE se emplea fundamentalmente el mecanismo de parada y espera (*Stop and Wait*, SAW) que consiste en esperar por el mensaje de reconocimiento (*Acknowledge*, ACK) en el enlace inverso para transmitir un nuevo bloque de información en el enlace correspondiente, o realizar la retransmisión en caso de recibir un mensaje de no reconocimiento (*Not Acknowledge*, NACK) [15]. El modo de operación del sistema LTE permite hasta 8 procesos de SAW – HARQ simultáneos en el enlace descendente y otros tantos en el ascendente, cada proceso HARQ utiliza su propio *buffer* de retransmisiones y se identifica mediante un indicador (*HARQ process Identifier*, HARQ-ID) de 3 bits [9].

En el enlace descendente, el mecanismo HARQ es asíncrono, es decir el proceso de retransmisión puede ocurrir en cualquier instante de tiempo después de la transmisión inicial, de modo que se necesita una señalización explícita que indique al receptor a qué paquete inicial corresponde una determinada retransmisión. Además del indicador HARQ-ID, en el enlace descendente se utilizan los siguientes indicadores:

- NDI (*New Data Indicator*): Identifica la transmisión de un paquete nuevo.
- RV (*Redundancy Versión*): Indica la versión de redundancia elegida para la transmisión o retransmisión. Habitualmente un valor RV=0 se selecciona para la transmisión inicial. El gestor de paquetes puede seleccionar diferentes valores de RV para la retransmisión de un paquete con objeto de optimizar los mecanismos de combinación propios del mecanismo HARQ.
- MCS (*Modulation and Codification Scheme*): identifica el esquema de modulación/codificación elegido. Esta selección del esquema de modulación/codificación permite adaptarse a las características instantáneas del canal móvil.

La figura 1.4 muestra esquemáticamente el proceso HARQ en el enlace descendente.

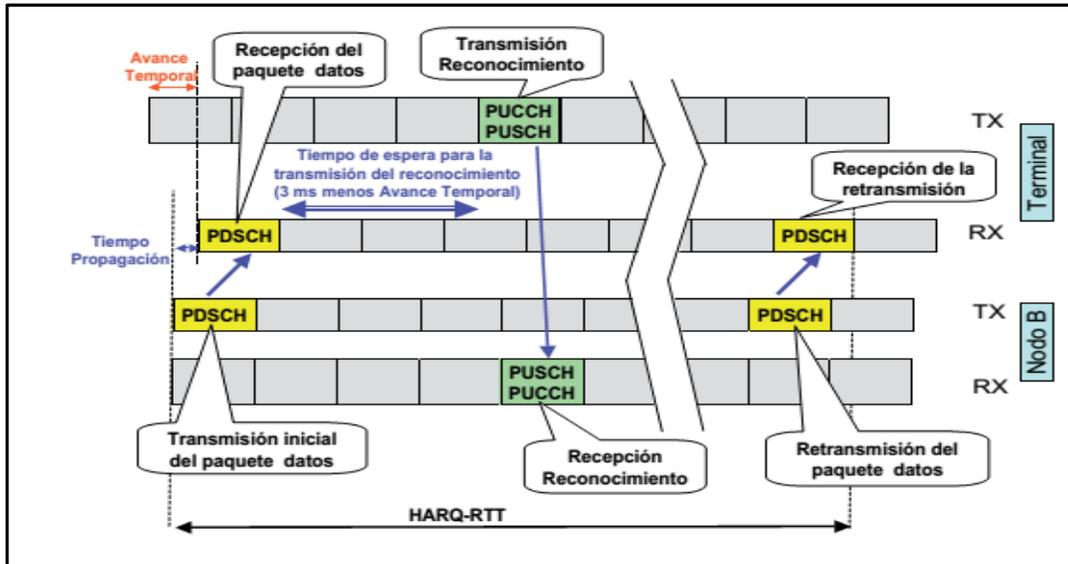


Figura 1.4: Mecanismo HARQ en el enlace descendente [9]

En el UL el mecanismo de retransmisión HARQ es síncrono, es decir los procesos de retransmisión se efectúan en instantes de tiempo predefinidos con respecto a la transmisión inicial, ello implica que no es necesario incluir un número de secuencia en el proceso HARQ. Además el proceso de retransmisión HARQ puede incluir o no mecanismos de adaptación de enlace. En el caso de no considerar mecanismos de adaptación de enlace, el mecanismo de retransmisión HARQ síncrono requiere que previamente se defina la secuencia de valores RV, debido a la ausencia de una señal de control explícita. En el caso de incluir mecanismos de adaptación de enlace el valor de RV es implícitamente indicado en el canal inverso (en este caso el canal de transmisión del eNB). La figura 1.5 muestra un esquema del mecanismo HARQ para el UL.

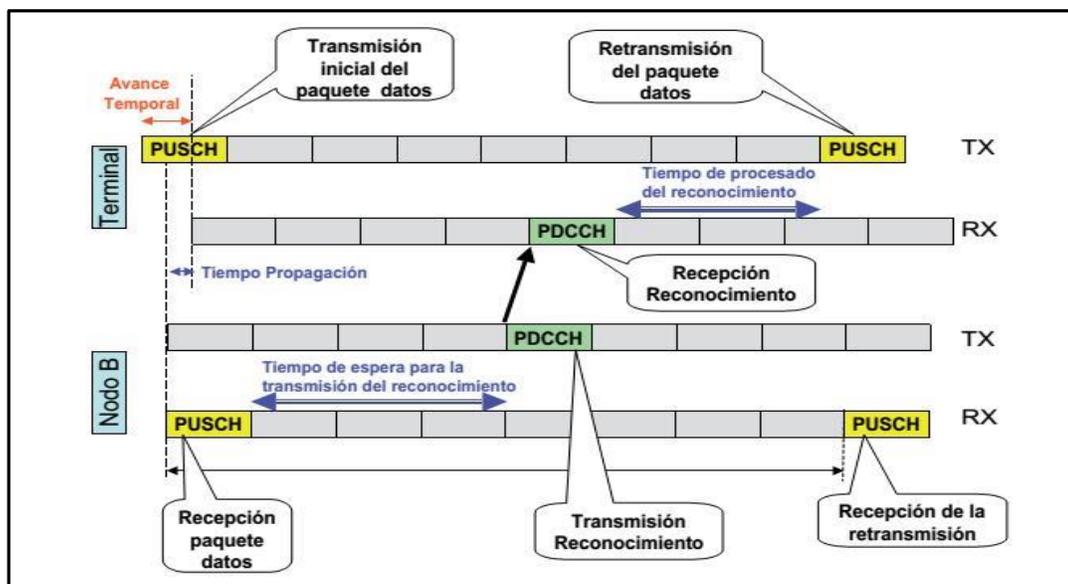


Figura 1.5: Mecanismo HARQ en el enlace ascendente [9]

## 1.2.2 Arquitectura y características de la red troncal EPC

El diseño de la red troncal EPC ha sido concebido principalmente para proporcionar un servicio de conectividad IP (evolución del servicio GPRS) mediante una arquitectura de red optimizada que permite explotar las nuevas capacidades que ofrece la red de acceso EUTRAN. La figura 1.6 muestra un esquema de la arquitectura de la red troncal.

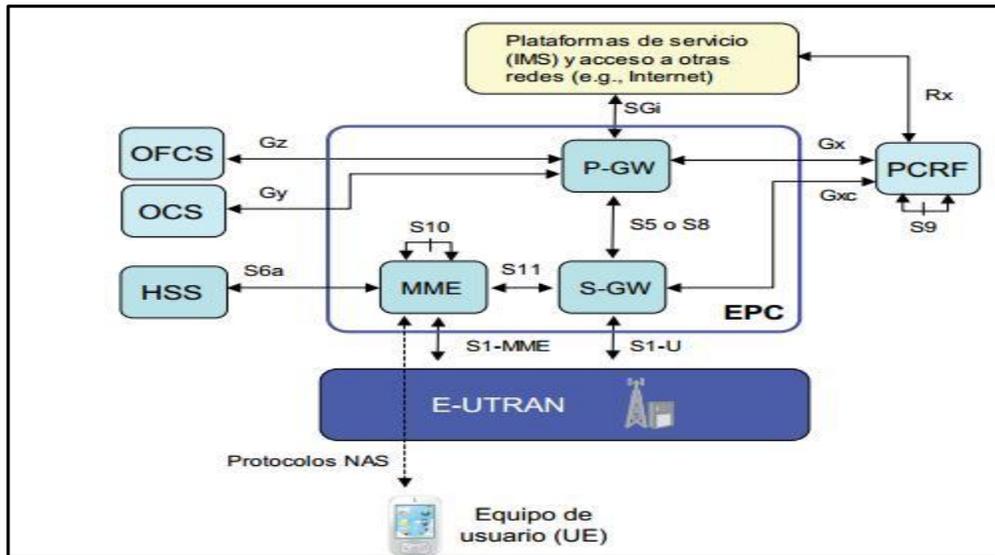


Figura 1.6: Arquitectura del núcleo de la red [9]

### 1.2.2.1 Entidades

El núcleo del sistema EPC está formado por tres entidades de red: MME (*Mobility Management Entity*), S-GW (*Serving Gateway*) y P-GW (*Packet Data Network Gateway*). Estas tres entidades, junto con la base de datos principal del sistema 3GPP denominada HSS (*Home Subscriber Server*), constituyen los elementos básicos para la provisión del servicio de conectividad IP entre los equipos de usuario conectados a través de E-UTRAN y redes externas a las que se conecta la red troncal EPC. Las funciones asociadas con el plano de usuario se concentran en las dos pasarelas, S-GW y P-GW, mientras que la entidad MME se encarga de las funciones y señalización del plano de control [9].

#### MME

La entidad MME constituye el elemento principal del plano de control de la red LTE para gestionar el acceso de los terminales a través de E-UTRAN. Las principales funciones de la entidad MME son: autenticación y autorización del acceso de los usuarios a través de E-UTRAN, gestión de los servicios portadores EPS, gestión de movilidad de los usuarios en modo *idle*, señalización para el soporte de movilidad entre EPS y redes 3GPP, y terminación de los protocolos de señalización NAS [9].

#### Serving Gateway (S-GW)

Esta entidad actúa de pasarela del plano de usuario entre E-UTRAN y la red troncal EPC. Al igual que sucede con la entidad MME, un usuario registrado en la red LTE dispone de una

entidad S-GW asignada en la EPC a través de la cual transcurre su plano de usuario. La asignación de la pasarela S-GW responde también a criterios geográficos así como de balanceo de cargas. Entre las principales funciones del S-GW se destacan: proporcionar un punto de anclaje en la red troncal EPC con respecto a la movilidad del terminal entre eNBs, de esta forma, en un proceso de *handover* entre dos eNBs, el cambio del plano de usuario puede únicamente derivar en un cambio del servicio portador S1 entre los eNBs implicados y el S-GW, manteniéndose sin cambios el resto del plano de usuario [9].

### PDN Gateway (P-GW)

Esta entidad es la encargada de proporcionar conectividad entre la red LTE y las redes externas (denominadas como *Packet Data Network*, PDN, en las especificaciones 3GPP). Es decir, a través de la entidad P-GW, un usuario conectado al sistema LTE resulta “visible” en la red externa. Por tanto, los paquetes IP generados por el usuario se inyectan en la red externa a través de esta pasarela y, viceversa, todo el tráfico IP dirigido a un terminal LTE proveniente de la red externa va a ser encaminado hasta el P-GW [9].

#### 1.2.2.2 Gestión de sesión del sistema EPS

La conectividad IP entre un UE y una red PDN de una red móvil pública terrestre (*Public Land Mobile Network*, PLMN) se conoce como servicio de conectividad PDN. Cada conexión PDN está compuesta por una o más portadoras que transportan los datos sobre el EPS como se muestra en la figura 1.7. Se establece una portadora EPS cuando el UE se conecta a una PDN, y esta permanece establecida todo el tiempo que dure la conexión, esta portadora es conocida como la portadora por defecto, cualquier portadora adicional que se establezca para la misma conexión PDN se conoce como portadora dedicada [4].

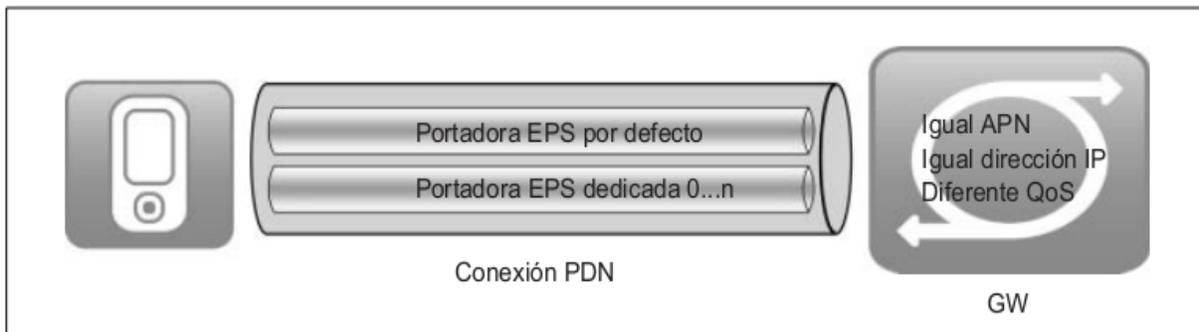


Figura 1.7: Conexión de red de paquetes de datos incluyendo portadoras EPS [4]

El UE dirige paquetes del UL a diferentes portadoras EPS basándose en filtros para paquetes del UL en las plantillas de flujo de tráfico (*Traffic Flow Template*, TFT) asignadas por el P-GW, por su parte el P-GW dirige paquetes del DL a diferentes portadoras EPS basándose en filtros para paquetes del DL en las plantillas de flujo de tráfico. Para cada portadora hay un túnel GTP-U (*GPRS Tunneling Protocol-User Plane*) entre el eNB y el S-GW, y entre el S-GW y P-GW. Cuando se ofrecen servicios vía múltiples nombres de punto de acceso (*Access Point Name*, APN), se crean una o más portadoras por defecto adicionales con nuevas direcciones IP.

### 1.2.2.3 Calidad de Servicio

El EPS provee calidad de servicio a nivel de portadora, lo que significa que todo el tráfico mapeado a la misma portadora EPS recibe el mismo tratamiento de transferencia de paquetes a este nivel. Para brindar diferente tratamiento de transferencia de paquetes a nivel de portadora se requieren portadoras EPS separadas. La portadora EPS identifica excepcionalmente flujos de tráfico que reciben un tratamiento de calidad de servicio común entre el UE y el P-GW. La TFT de la portadora EPS es el conjunto de filtros de todos los paquetes asociados con esa portadora EPS [4].

Para propósitos de diferenciación de QoS se crea una portadora dedicada que puede ser de razón de bit garantizada (*Guaranteed Bit Rate*, GBR) o no garantizada (no GBR). La(s) dirección(es) IP y APN asignadas para la portadora por defecto son utilizadas por las portadoras dedicadas dentro de la misma conexión PDN. La creación de una portadora dedicada es iniciada por la red, pero puede ser provocada mediante solicitudes de recursos hechas por el UE. La diferencia entre portadoras por defecto y dedicadas es transparente para el eNB. Una portadora EPS es referida como portadora GBR si los recursos de red dedicados a un valor GBR asociado con la portadora EPS son asignados permanentemente en el establecimiento/modificación de la portadora. De otra forma, una portadora EPS es referida como portadora no GBR [4].

Para cada portadora EPS (por defecto y dedicada), el soporte de QoS se basa en los siguientes parámetros:

- Identificador de clase de QoS (*QoS Class Identifier*, QCI): Escalar que se utiliza como referencia para acceder a parámetros específicos de nodos que controlan el tratamiento de transferencia de paquetes a nivel de portadora.
- Prioridad de asignación y retención (*Allocation and Retention Priority*, ARP): Contiene información acerca del nivel de prioridad (escalar), capacidad de derecho de prioridad (bandera) y vulnerabilidad de derecho de prioridad (bandera). El propósito fundamental de ARP es decidir si una solicitud de establecimiento/modificación de portadora puede ser aceptada o necesita ser rechazada debido a limitaciones de recursos.
- GBR: Denota la razón de bit que se espera sea provista por una portadora EPS.
- Máxima razón de bit (*Maximum Bit Rate*, MBR): Limita la razón de bit que se espera sea provista por una portadora EPS.

### 1.2.3 Subsistema IMS

El subsistema IMS es responsable de la señalización asociada a los servicios multimedia y utiliza como mecanismo de transporte los servicios de transferencia de datos proporcionados por el dominio de conmutación de paquetes (*Packet Switch*, PS). En este sentido, el subsistema IMS constituye el plano de control de dichos servicios quedando claramente separadas las funciones asociadas al transporte de la información y las funciones propias de la capa de control de los servicios [9]. Así, el subsistema IMS se materializa mediante el despliegue de infraestructura constituida por una serie de elementos (servidores, bases de datos, pasarelas) que se comunican entre sí mediante diversos protocolos, fundamentalmente

estándares del IETF, y que permiten gestionar la provisión de servicios tales como voz y video sobre IP, presencia y mensajería instantánea y servicios de llamadas en grupo. El modelo de provisión de servicios en base al subsistema IMS se estructura en tres capas: transporte, control y aplicación, tal como se muestra en la figura 1.8.

La capa de transporte representa la infraestructura de red IP, este caso lo constituye la infraestructura de la red LTE. En la capa de control se ubican los elementos especializados en la gestión de sesiones tales como los servidores de señalización SIP, así como otros elementos específicos para la interacción con redes telefónicas convencionales (pasarelas de voz sobre IP, controladores, etc.). Esta capa de control es la que se materializa mediante el subsistema IMS. La capa de aplicación residen los servidores de aplicación que albergan la lógica y datos asociados a los diferentes servicios proporcionados a través de IMS [9].

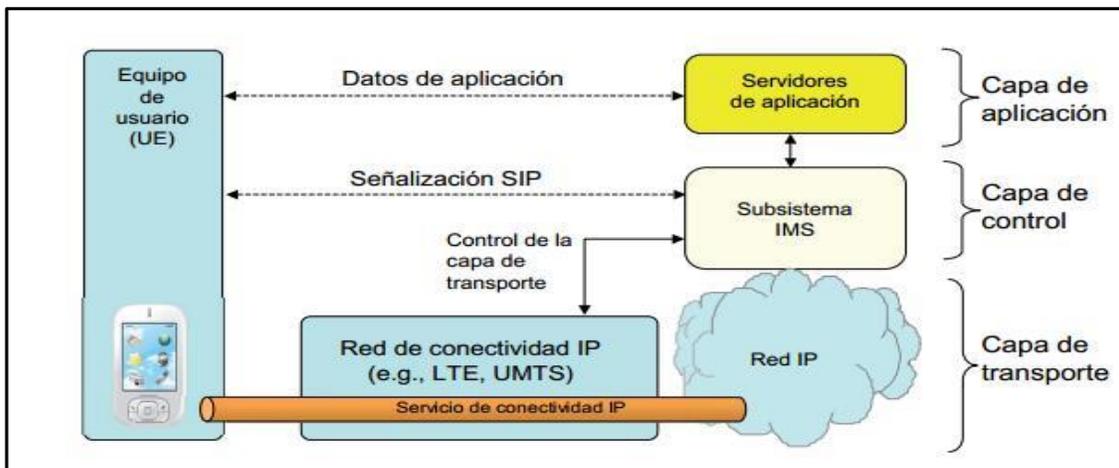


Figura 1.8: Estructura del modelo de provisión de servicios en base al subsistema IMS [9]

### 1.3 Aplicaciones de voz en LTE

Como ha sido mencionado con anterioridad la red LTE está diseñada para funcionar íntegramente en el dominio IP, soportando solamente la conmutación por paquetes. De esta manera la tradicional forma de llevar a cabo el establecimiento de llamadas basada en la conmutación de circuitos, que había sido mantenida en las generaciones anteriores, es totalmente eliminada en este caso, surgiendo entonces la necesidad de idear una nueva variante que permita el establecimiento, con un nivel de desempeño adecuado para entornos LTE, de aplicaciones de voz.

Ante esta problemática existen varias soluciones que en dependencia del estado de desarrollo y de despliegue de la red, permiten su resolución. Estas variantes son: *Simultaneous Voice LTE* [17], *Over The Top solution (OTT)* [18], *Voice Over LTE via Generic Access (VOLGA)* [19], *Circuit Switched Fall Back (CSFB)* [20] y *Voice over LTE (VoLTE)*.

#### 1.3.1 Voice over LTE (VoLTE)

VoLTE realiza la entrega de llamadas y videollamadas así como otros servicios de CS (*Circuit Switch*) sobre el núcleo íntegramente IP de la red LTE, sin hacer uso de las implementaciones

OTT. VoLTE ha sido aceptada globalmente como la solución final para proveer servicios de voz en las redes LTE. Este método habilita la completa utilización de la red LTE/IMS produciendo significativos ahorros en cuanto a gastos de operación, permitiendo la implementación entonces de una red totalmente IP [4]. Las llamadas VoLTE son establecidas sobre portadores EPS asegurando que el usuario final reciba una calidad de servicio que permita mantener una buena experiencia de usuario final en las llamadas de voz [4]. Las llamadas de VoLTE son esencialmente establecidas mediante la plataforma IMS. Una vez que el registro en LTE es finalizado, el UE inicia un proceso de registro con el núcleo IMS utilizando señalización SIP. Después de terminado este proceso, todos los servicios de CS son establecidos utilizando señalización SIP sobre portadores EPS, habiendo negociado previamente la calidad de servicio [17].

### **1.3.1.1 Implementación de VoLTE**

Una red que brinda servicios de voz sobre una plataforma IMS está conformada por: la IP-CAN (*IP Connectivity Access Network*), el control de sesión de llamada (*Call State Control Function, CSCF*), el servidor de suscriptor local (*Home Subscriber Server, HSS*), el servidor de aplicación (*Application Server, AS*) y la puerta de salida de los servicios de media (*Media Gateway Control Function, MGCF*) [10]. La red de acceso de conectividad IP (IP-CAN) es la encargada de proveer conectividad IP y movilidad, sirviendo como intermediaria para que el terminal envíe la señalización del plano de control y se transfiera la información de media hacia el núcleo de la red. En LTE la IP-Can la constituye el EPC y la E-UTRAN [19].

Las funciones de control de sesión de llamada conforman el núcleo de la red IMS y está formada por tres entidades:

- *Proxy-CSCF (P-CSCF)*: es el punto inicial de contacto del usuario y su comportamiento es el de un proxy común detectando peticiones y reenviándolas luego.
- *Interrogating-CSCF (I-CSCF)*: funciona como contacto de entrada con la red del operador para todas las conexiones con el suscriptor.
- *Serving-CSCF (S-CSCF)*: las características de esta entidad son las de manipular el proceso de registro, determinar las decisiones de ruteo, sostener las sesiones y descargar desde el HSS la información del usuario y el perfil de los servicios.

Las funciones de control de puerta de salida de servicios de media (MGCF) están relacionadas de manera directa con la señalización SIP. Esta entidad administra la circulación de sesiones a través de múltiples puertas de salida de media [19].

IMS utiliza un conjunto de protocolos entre los que se destacan SIP, SDP (*Session Description Protocol*), RTP (*Real Time Protocol*) y RTCP (*Real Time Control Protocol*), XML (*Extensible Mark-up Language*), XCAP (*Configuration Access Protocol*) y DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) [19].

Para el caso particular de VoLTE donde la red de acceso a la red IMS es LTE el sistema poseerá la arquitectura que se muestra en la figura 1.9.

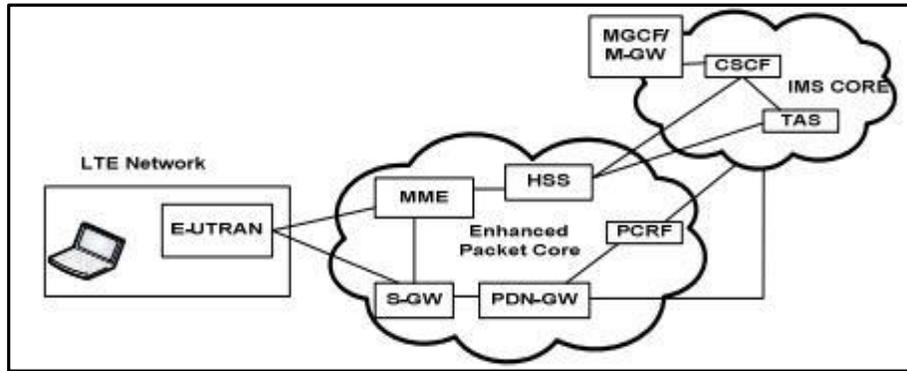


Figura 1.9: Implementación de VoLTE [4]

Donde el la IP-CAN la constituye la propia red LTE, como había sido mencionado anteriormente, el HSS que se utiliza es el que posee el núcleo de la red LTE (EPS) y las demás entidades que conforman al núcleo IMS se corresponden con las que fueron mencionadas anteriormente [19].

### 1.3.1.2 Calidad de servicio para VoLTE

Es bien conocido que los parámetros de rendimiento que afectan a la calidad percibida de la voz son la pérdida de paquetes, el retardo y la variación de la demora o *jitter*. Pero el tipo y el grado de impacto que estos parámetros tienen sobre la calidad de voz dependen de procesos de voz sobre IP (*Voice over IP*, VoIP) y de las características de la red sobre la que se soporta el servicio, que influyendo entre sí de manera compleja determinan la calidad de voz en general [21]. De esta manera es importante establecer los requerimientos de capacidad del sistema para estos servicios, lo cual es un desafío en particular en sistemas basados totalmente en paquetes como LTE.

El requerimiento de capacidad del sistema se define como el número de usuarios de VoIP satisfechos, dados un modelo de tráfico particular y restricciones de demora. Los detalles del modelo de tráfico utilizado para evaluar LTE pueden ser encontrados en [22]. Aquí, un usuario de VoIP se considera en desconexión (no satisfecho) si más del 2% de los paquetes de VoIP no arriban satisfactoriamente al receptor dentro de 50 ms y por lo tanto son descartados. Se asume una demora extremo a extremo total (de terminal móvil a terminal móvil) por debajo de 200 ms. La capacidad del sistema para VoIP puede entonces ser definida como el número de usuarios presentes por celda cuando más del 95% de los usuarios se encuentran satisfechos [12].

## 1.4 Eventos de radio en LTE

La red de acceso LTE al igual que todas las redes inalámbricas se encuentra sometida a las condiciones del espacio libre para su funcionamiento. Tal es el caso que las condiciones del enlace se pueden ver afectadas por el desvanecimiento por lluvia, las pérdidas multirayecto, el ensombresimiento por obstáculos del enlace, interferencias, ruidos, entre otras perturbaciones, que provocarán una degradación de la señal, disminuyendo su relación señal a ruido e incrementando el PER (*Packet Error Rate*). Por supuesto todas estas afectaciones

son más significativas cuando el terminal se encuentra en los bordes de la celda donde la potencia de la señal del transmisor es más débil y la interferencia es mayor, o cuando se encuentra en movimiento a altas velocidades donde el cambio de una área a otra rápidamente puede traer grandes implicaciones. Como la característica fundamental de los sistemas celulares consiste en la movilidad y en la utilización del espacio libre como medio de transmisión, todas las afectaciones que esta implementación implica deben ser conducidas de la mejor manera posible con el objetivo de brindar un buen servicio. En este sentido LTE posee una serie de eventos de radio encaminados a actuar ante determinadas situaciones referentes al deterioro de la señal. Se entiende por evento de radio a aquellos mecanismos que implementa la red de acceso ante determinadas condiciones, los que son ejecutados en escenarios del enlace predeterminados. Para el caso del funcionamiento de las aplicaciones y entre ellas VoLTE, la ocurrencia de un evento de radio va a implicar una afectación en su desempeño pues la ejecución va a generar señalización adicional, mayor carga de la red e interrupción del enlace. Estos eventos de radio que afectan a la aplicación de VoLTE en particular son: el *handover*, las retransmisiones en el enlace ascendente y la Continuidad de la Llamada de Voz con Enlace de Radio Simple (*Single Radio Voice Call Continuity*, SRVCC).

#### **1.4.1 Handover**

Según [23] se denomina *handover* (HO) al mecanismo que transfiere una llamada en proceso o una sesión de datos de una estación base a otra, o de una sección a otra dentro de una misma estación base, basándose en el decrecimiento del nivel de señal recibido desde la estación base fuente y el correspondiente crecimiento en la de destino, siendo de esta manera el *handover* uno de los principios fundamentales sobre los que se basa la gestión de la movilidad en la red LTE.

La escasez de los recursos de radio, la naturaleza dinámica del entorno de propagación, la variedad de la movilidad del usuario, así como la necesidad de maximizar el rendimiento del sistema y de minimizar el retardo, son los principales retos a los que se enfrenta el mecanismo de *handover* [23].

El *handover* se divide en dos categorías: el *handover* vertical y el *handover* horizontal. Un *handover* vertical se realiza cuando un UE se mueve de una estación base (eNB) hacia otra en la que impera una tecnología de radio acceso (*Radio Access Technology*, RAT) diferente, la cual puede ser de la misma familia 3GPP como GSM o WCDMA (*Wide Code Division Multiple Access*), u otras diferentes como WiMAX o UMB (*Ultra Mobile Broadband*). Por su parte un *handover* horizontal es aquel que se ejecuta en la misma tecnología de acceso. Además el *handover* se divide atendiendo a la banda de frecuencia en la que trabaja la celda vecina con respecto a la celda a la que pertenece el UE, este puede ser: inter- frecuencia, para el caso en que ambas bandas de frecuencia coincidan, o intra-frecuencia en el caso contrario.

##### **1.4.1.1 Mediciones utilizadas en el mecanismo de *handover***

El procedimiento para efectuar un *handover* está basado en mediciones realizadas por el UE. La decisión de efectuar un *handover* se toma en el eNB en base a niveles de señales transportadas en el canal descendente, las mediciones hechas a estas señales por el UE

generan la Señal de Referencia de Potencia Recibida (*Reference Signal Received Power*, RSRP) y la Señal de Referencia de Calidad Recibida (*Reference Signal Received Quality*, RSRQ), que son utilizadas por el UE para detectar situaciones de *handover* pre- configuradas por el eNB [23].

La medición RSRP provee de una métrica que caracteriza la fortaleza de la señal en cada celda. Esta medición se expresa como el promedio lineal de la potencia de la señal recibida en cada celda a la que se le muestrea la Señal de Referencia (*Reference Signal*, RS), aquí no se considera el ruido térmico y la interferencia inter-celda. Se usa fundamentalmente para categorizar las celdas candidatas para un *handover* de acuerdo a la fortaleza de su señal y constituye una de las variables de entrada en la decisión de *handover* [14].

La medida RSRQ también provee de una métrica que caracteriza en este caso la calidad de la señal de cada celda. RSRQ se usa en la decisión de *handover* fundamentalmente en escenarios donde las mediciones de RSRP no proveen de suficiente información para desarrollar decisiones de movilidad confiables [14].

Además de las mediciones anteriores existen otras que se utilizan en ocasiones como criterio de decisión, entre ellas tenemos: SNR (*Signal Noise Ratio*), CIR (*Carrier to Interference Ratio*), SINR (*Signal Interference plus Noise Ratio*) y RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) definidas en [14].

#### 1.4.1.2 Configuración de las mediciones

Para llevar a cabo un *handover*, el eNB debe proveer al UE con la información de configuración necesaria para realizar las mediciones. Esta información se entrega a través de la señalización dedicada del protocolo RRC. La configuración de las mediciones consiste en cinco parámetros:

Objeto de medición (*Measurement object*): representa las fuentes (celdas) a las cuales se les realizarán las mediciones establecidas.

Configuración del reporte (*Reporting configuration*): indica cuando el UE debe enviar una medición al eNodeB, además establece los parámetros que el UE debe tener en cuenta a la hora de generar un aviso de *handover*. Los factores desencadenantes del envío de un reporte son llamados eventos. La configuración del reporte también incluye información sobre qué tipo de celdas y la cantidad de ellas sobre las que se debe informar.

Identidades de medición (*Measurement identities*): se utilizan para vincular un objeto de medición con una presentación de configuración de reporte. De acuerdo con el funcionamiento es posible configurar múltiples identidades de medición a un UE, esto permite añadir múltiples disparadores de eventos de medición a una sola portadora, así como la adición del mismo disparador de evento para múltiples portadoras. El UE utiliza el número de identidad de medición como referencia al enviar informes de medición.

Configuración de cantidad (*Quantity configurations*): define las cantidades para las mediciones así como el filtrado correcto que debe ser implementado por el UE cuando realice la medición.

Intervalo de mediciones (*Measurement gaps*): consiste en el establecimiento de períodos de tiempo en los cuales el terminal interrumpe su conexión con la celda para medir determinado

parámetro establecido de la celda vecina. Esta configuración solo se establece en el caso en que la frecuencia de la señal a la que va a realizarse la medición no coincide con la banda de la celda a la que pertenece el terminal. En los escenarios de *handover* intra-frecuencia no se necesita de este parámetro.

### 1.4.1.3 Eventos iniciadores de *handover*

Con la configuración recibida del eNB el UE implementa las mediciones requeridas y realiza un procesamiento de las mismas con el objetivo de detectar cuando estas medidas se encuentran en los rangos establecidos por el eNB para que le sea enviado un reporte que indique la ocurrencia de una situación de *handover*. Los eventos establecidos por el eNB para que le sea enviado un reporte y las condiciones para que estos se produzcan se encuentran explicados en el Anexo 1.

En la configuración del reporte también se define el valor del margen de histéresis denominado también margen de *handover* (MHO), este margen es el parámetro fundamental que gobierna el proceso de *handover* entre dos eNB, estableciendo el inicio de una situación de este tipo si la calidad del enlace de otra celda es mejor que la calidad de la celda que ofrece el servicio, por un valor igual al establecido en la histéresis, éste margen se utiliza sobre todo para evitar el efecto ping-pong. En la configuración también se define el valor TTT (*Time To Trigger*) el cual indica que solo se generará un reporte de decisión de *handover* cuando los requerimientos para el inicio del mismo son mantenidos por un intervalo de tiempo igual al valor establecido en TTT. Este parámetro puede disminuir el número de *handovers* innecesarios y evitar el efecto ping-pong, aunque a la vez un valor muy elevado del mismo provocará una decisión *handover* demorada que también posee características negativas. La figura 1.10 muestra el procedimiento de *handover* atendiendo a los parámetros establecidos.

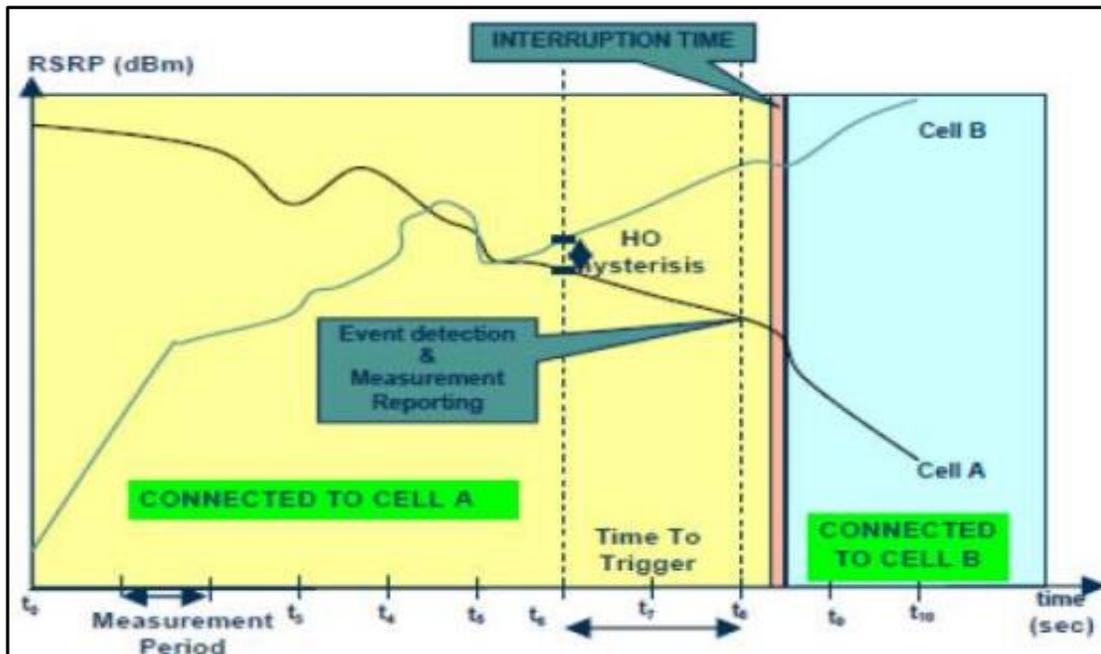


Figura 1.10: Utilización de los parámetros de *handover* [24]

En resumen, el punto de partida del procedimiento de activación de *handover* son las mediciones realizadas por el UE. Estas se realizan periódicamente de acuerdo con la configuración establecida por el eNB en el mensaje “RRC *Connection Reconfiguration*”. Cuando una condición, según el evento configurado, se alcanza, por ejemplo cuando la RSRP de la celda de servicio cae una cantidad MHO debajo del de la celda vecina, se inicia un temporizador que evalúa la condición por un intervalo igual a TTT. Si la condición se mantiene durante este período, se envía al eNB de la celda de servicio un reporte, indicando que se ha alcanzado una condición de *handover* la cual debe ser manejada por el eNB.

#### 1.4.1.4 Técnicas de *handover*

Existen dos tipos de *handover*: *hard-handover*, conocido como *Break Before Connect (BBC)* y *soft-handover* o *Connect Before Break (CBB)*.

El *soft-handover* es una categoría de mecanismo donde los radio enlaces son añadidos y eliminados de manera tal que el UE siempre mantiene por lo menos un radio enlace activo con la red durante el proceso de *handover*.

El *hard-handover* requiere que el UE rompa una conexión existente con la celda fuente, antes de establecer una nueva con la celda destino. Éste es el mecanismo adoptado en el sistema LTE por el 3GPP, atendiendo a la arquitectura IP plana y la característica de poseer un control centralizado que ostenta esta red. El uso de este mecanismo reduce la complejidad del proceso de *handover* y su demora, aunque evidentemente causará escenarios negativos, como la pérdida de llamadas, debido al intervalo de interrupción.

#### 1.4.2 Procedimientos de *handover*

Existen dos tipos de procedimientos de *handover* intra LTE u horizontales: *handover* basado en la interfaz X2 y *handover* basado en la interfaz S1.

##### 1.4.2.1 *Handover X2*

El proceso de *handover* basado en la interfaz X2 está compuesto por tres etapas: preparación, ejecución y completamiento, indicadas en la figura 1.11. El proceso se inicia cuando el terminal envía al eNB el reporte de medición correspondiente a la ocurrencia de un evento preconfigurado. A partir de aquí el eNB fuente adopta la decisión de *handover* y se inicia la etapa de preparación, donde este se comunicará con el eNB destino para realizar la solicitud de *handover*, si el eNB destino posee facilidades para aceptar al nuevo terminal responderá con un mensaje de reconocimiento de la petición que incluirá información que debe utilizar el UE para realizar de manera exitosa el proceso de sincronización con la celda que él atiende, una vez recibido este mensaje, el eNB fuente enviará al UE el comando de *handover* culminado la etapa de preparación, hasta este momento el UE continuaba recibiendo los paquetes de información a través del eNB fuente.

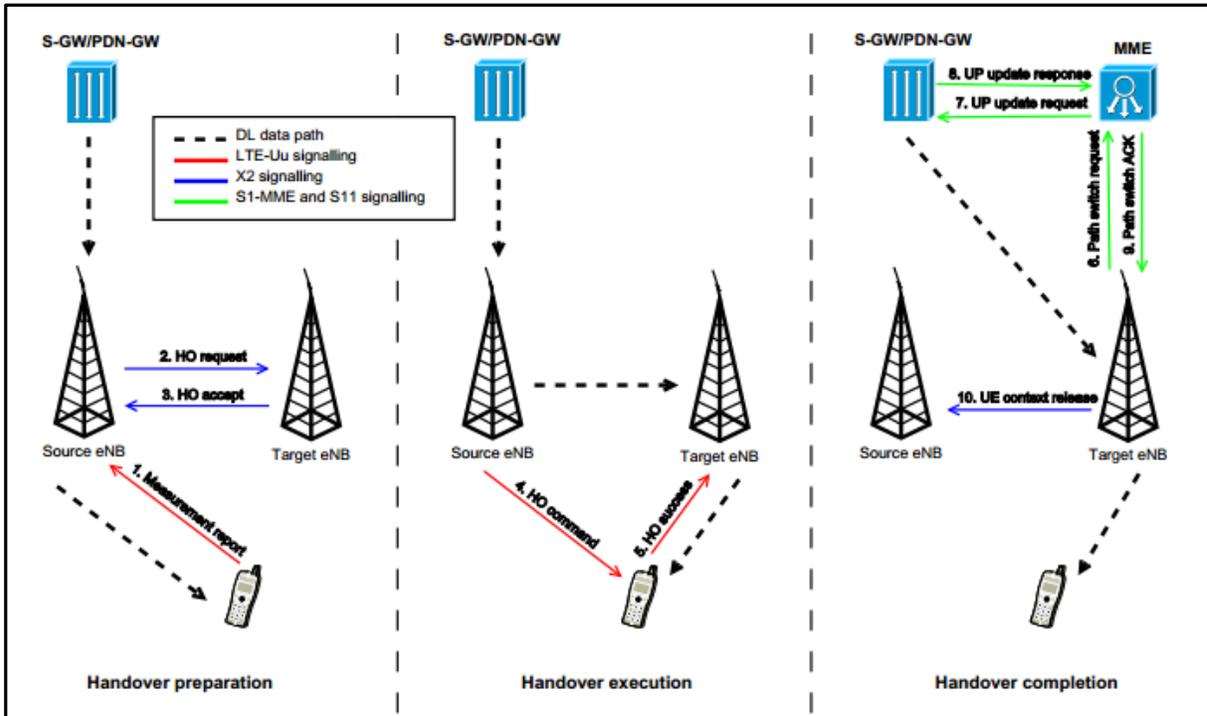


Figura 1.11: Proceso de *handover* basado en la interfaz X2 [23]

Cuando el UE recibe el comando de *handover* se inicia la etapa de ejecución, caracterizada por encontrarse el terminal durante toda su duración desconectado de la celda de servicio. Como el procedimiento está basado en un *hard-handover* se hace necesario que el eNB de la celda fuente, envíe los paquetes de información una vez el terminal recibe el comando de *handover* al eNB destino debido a que a partir de este momento el UE no poseerá comunicación con ninguna estación base hasta que se sincronice a la celda de destino, este proceso se implementa ya que los paquetes de información destinados al usuario continuarán arribando al eNB fuente. Este proceso se lleva a cabo a través de la interfaz X2 y continúa efectuándose hasta que el eNB de destino solicita a la entidad MME un cambio de trayectoria para los mensajes destinados al UE, lo cual se implementa en la etapa de completamiento. La etapa de ejecución concluye cuando el UE envía al eNB destino la confirmación del *handover* una vez restablecida su comunicación tras haber concluido con éxito su conexión a la celda de destino. En este punto se le envía al terminal todos los paquetes que fueron almacenados en el eNB de destino producto de la transmisión realizada por el eNB fuente a través de la interfaz X2, iniciándose la etapa de completamiento donde la entidad MME solicitará al S-GW el cambio de eNB como destino de los paquetes de información del UE, esta solicitud es necesaria pues hasta que no se haga efectiva el UE continuará recibiendo la información a través del enlace entre los eNBs. Una vez concluida esta etapa satisfactoriamente y restablecida la trayectoria de los paquetes, el eNB destino informa al eNB fuente y éste desechará cualquier contexto relacionado con el UE involucrado en el proceso.

Observando el proceso desde el punto de vista del plano de usuario, éste sufre una interrupción durante toda la etapa de ejecución, además desde que termina la etapa de ejecución hasta que finaliza la de completamiento el UE recibirá los datos desde el eNB destino que a su vez los recibirá a través de la interfaz X2. La señalización del procedimiento y el envío

de los datos se muestran de manera más detallada en la figura 1.12. En ella se observan los mensajes involucrados en cada una de las etapas del proceso, una explicación de estos mensajes se encuentra en el Anexo 1.

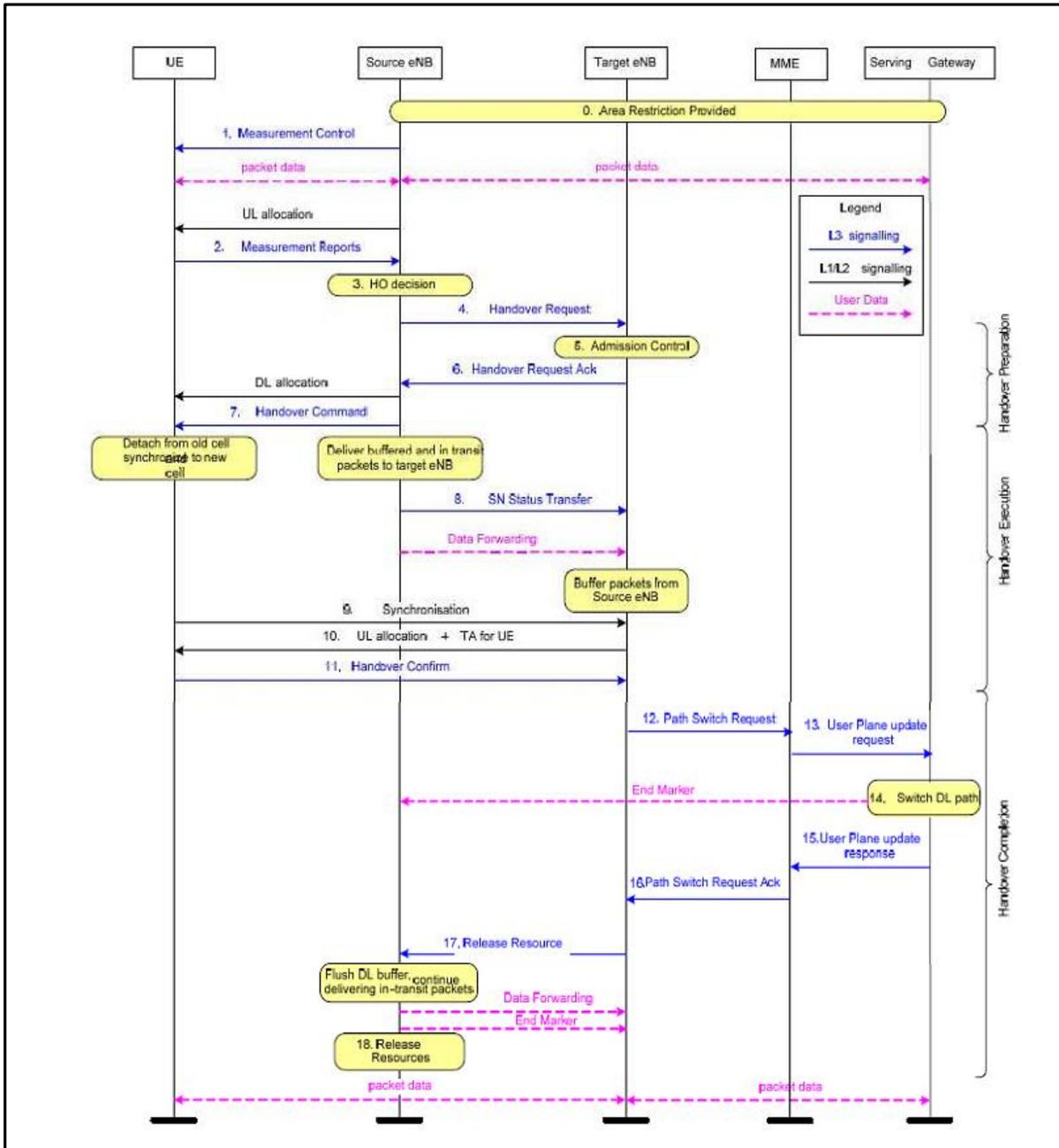


Figura 1.12: Señalización utilizada en el *handover* X2 [14]

### 1.4.2.2 Handover S1

El *handover* a través de la interfaz S1 es necesario en el caso de que se necesite cambiar de entidad MME debido al proceso de *handover* en sí, lo cual sucede generalmente solo en los límites de áreas de operación entre los MME, o también puede ser implementado en el caso

de que, por alguna razón, la interfaz X2 no esté disponible. Este es un mecanismo de *handover* menos frecuentemente utilizado que el realizado a través de la interfaz X2, siendo a su vez un poco más complicado. Esta cualidad se debe a que la entidad MME debe actuar como coordinadora intermedia y repetidora de mensajes entre el eNB fuente y el de destino, y a su vez debe configurar el proceso de reenvío de los datos.

Por su parte el UE es incapaz de saber cuándo se está efectuando el *handover* a través de la interfaz X2 o cuando a través de la S1, el único cambio que es capaz de percibir el UE es el que ocurre en la pausa de transmisión de los datos, esto se debe a que la trayectoria de reenvío de datos en el *handover* S1 es considerablemente mayor que en el caso X2.

La figura 1.13 muestra de forma esquemática el procedimiento ejecutado en un *handover* S1.

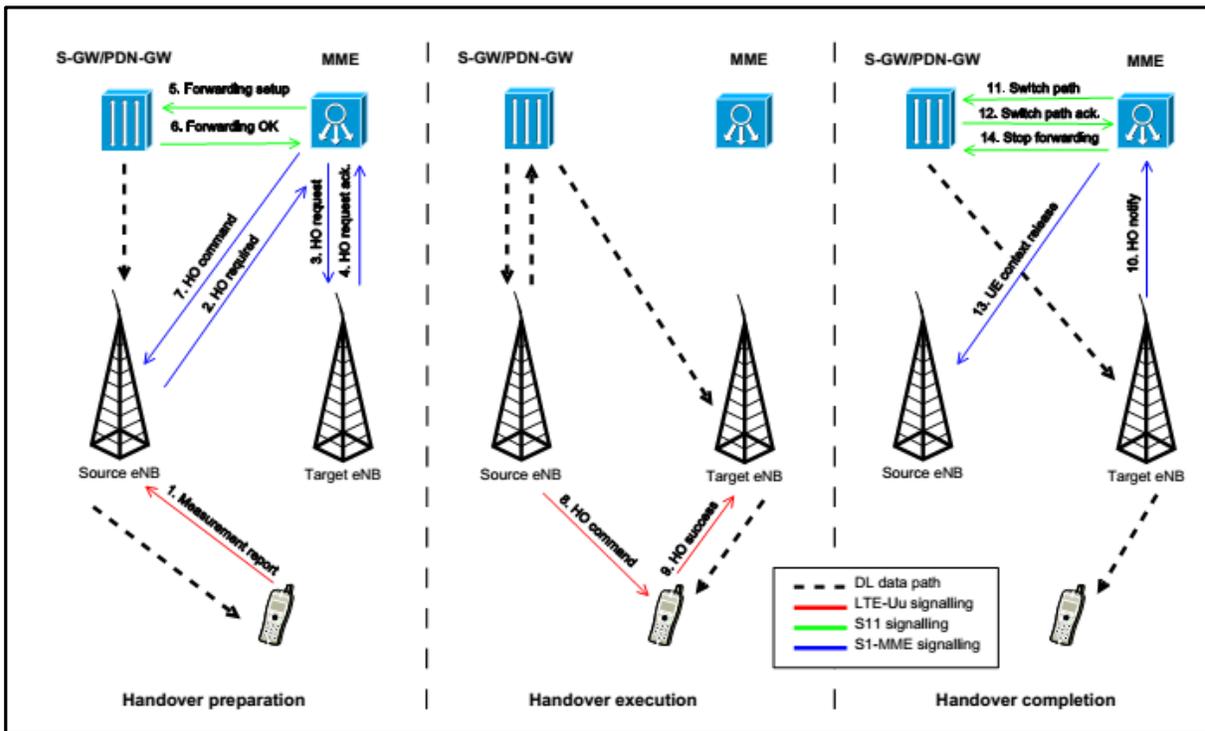


Figura 1.13: Mecanismo de *handover* a través de la interfaz S1 [11]

En este esquema se encuentra contemplado el proceso en general que al igual que en el caso anterior se encuentra dividido en tres etapas: preparación, ejecución y completamiento. De manera análoga también en este procedimiento de *handover* el inicio ocurre con el reporte de medición enviado por el UE al eNodeB de la celda que le brinda servicio, a partir de este momento es que comienzan las diferencias con respecto al método anterior ya que la entidad MME es la que recibe en este caso la solicitud de *handover* y la reenvía hacia el eNodeB destino actuando como punto intermedio y retransmisor entre ambas estaciones estableciendo un proceso que según la variante anterior ocurría de forma directa. Este mecanismo de retransmisión es muy favorable pues permite la realización del procedimiento aun cuando no existe interfaz X2 configurada entre las estaciones, pero introduce como es de esperar, una demora. Las etapas posteriores y los otros procedimientos de señalización de manera general no distan mucho de la variante anteriormente expuesta, siempre teniendo en cuenta que la entidad MME asumirá ahora el rol de mediadora en todo el proceso de *handover*.

La figura 1.14 muestra un esquema donde se detallan los mensajes de señalización utilizados en el proceso.

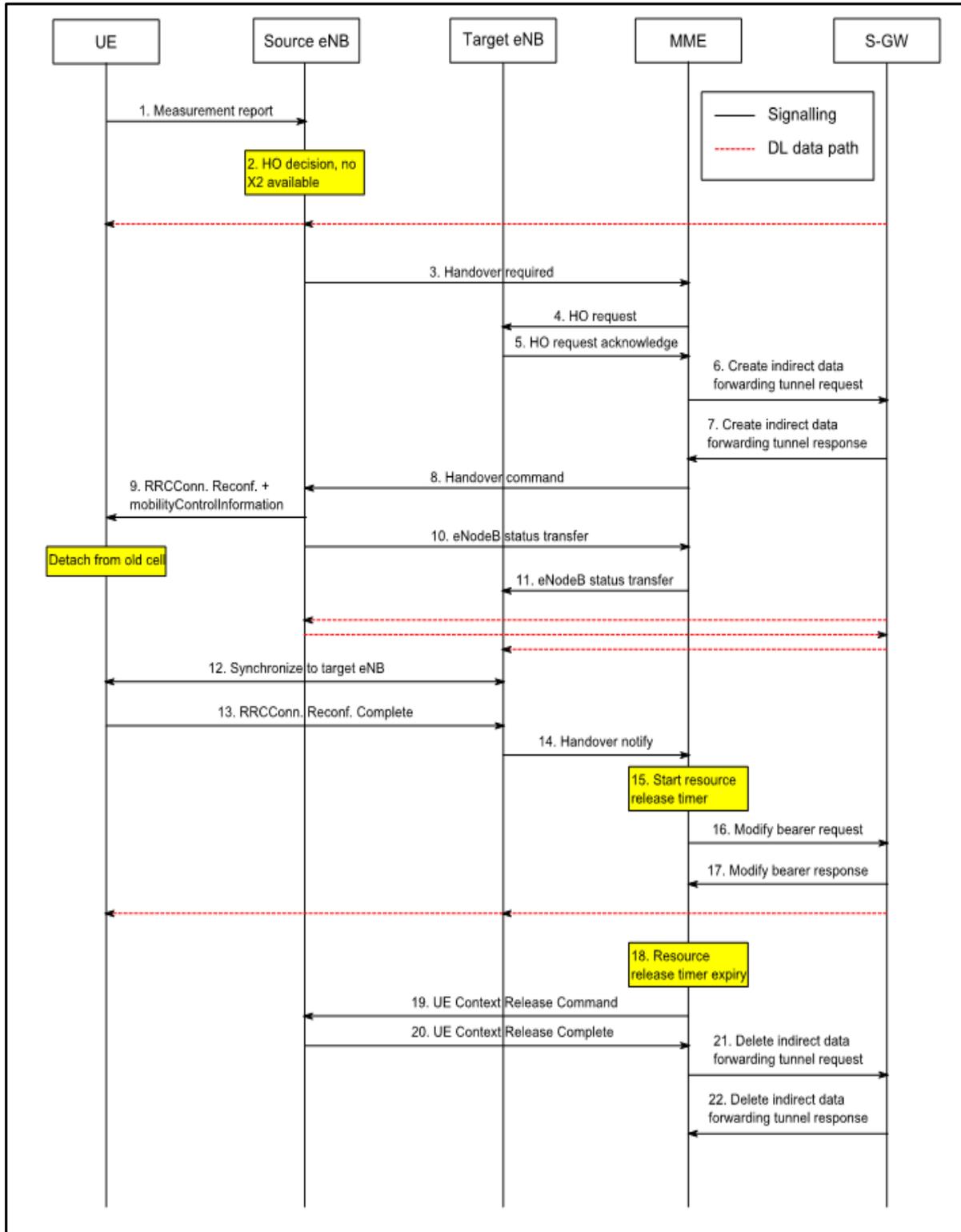


Figura 1.14: Señalización implementada en el *handover* S1 [11]

A pesar de que el *handover* S1 posee a grandes rasgos características similares al HO X2 es necesario destacar ciertas diferencias que lo hacen más complejo. Una de estas diferencias se manifiesta a través de los pasos 3, 4 y 5 donde el eNB fuente solicita el *handover* al eNB destino través del MME, proceso que en la variante anterior ocurría de forma directa a través de la interface X2. Los comandos 6 y 7 evidencian también un proceso que no existía en el caso anterior y es el de la creación de un túnel para el envío de la información entre los eNBs con el S-GW, como después se ilustra con líneas rojas, este túnel no se elimina hasta los comandos 21 y 22, aunque el flujo de la información se modifica antes a través de los comandos 16 y 17.

De esta manera el UE cuando culmina la desconexión propia de la etapa de ejecución, y se sincroniza a la celda de destino va a recibir los datos a través de este túnel hasta que se solicite la modificación, a partir de entonces obtendrá sus datos desde una trayectoria directa entre el eNB destino y el S-GW.

### 1.4.3 Caracterización del *handover*

Como fue establecido anteriormente el proceso de *handover* está dividido en tres etapas: preparación, ejecución y completamiento. La fase de ejecución es la más crítica ya que el UE se encuentra totalmente desconectado de la red, el tiempo que ocupa esta etapa se define como tiempo de interrupción. El 3GPP ha establecido un valor máximo para este tiempo con el objetivo de garantizar un desempeño adecuado para el proceso, este valor se establece mediante la ecuación (3.1)

$$T_{\text{detach}} = T_{\text{search}} + T_{\text{IU}} + 20 \text{ ms} + T_{\text{processing RRC}} \quad (3.1)$$

Donde  $T_{\text{detach}}$  corresponde al tiempo de desconexión,  $T_{\text{search}}$  al tiempo requerido para identificar la celda en el caso de que sea desconocida, la celda es desconocida cuando el *handover* no se realiza en base a los reportes de medición del UE, de otra manera su valor es 0,  $T_{\text{IU}}$  representa la incertidumbre de adquirir la primera ocasión de acceso aleatorio disponible, esta variable puede ser establecida en 30 ms según [11], los 20 ms corresponden a un margen de implementación establecido y el  $T_{\text{processing RRC}}$  corresponde al tiempo que el UE debe tomar para procesar un mensaje recibido y generar una respuesta, para el caso de los mensaje RRC este valor se establece en 15 ms [11]. De esta manera el tiempo máximo de interrupción indicado por al 3GPP para un desempeño adecuado es de 65 ms.

Por otro lado también se encuentra establecida la duración o demora del *handover*, que comprende el tiempo desde que el UE envía el reporte de medición al eNodeB de la celda de servicio, hasta la recepción del mensaje "*RRCConnectionReconfigurationComplete*" en el eNodeB de la celda de destino, incluyendo de esta manera tanto la etapa de preparación como la de ejecución.

Según las investigaciones [25] y [11], el tiempo de interrupción se comporta según la tendencia ilustrada en la figura 1.15.

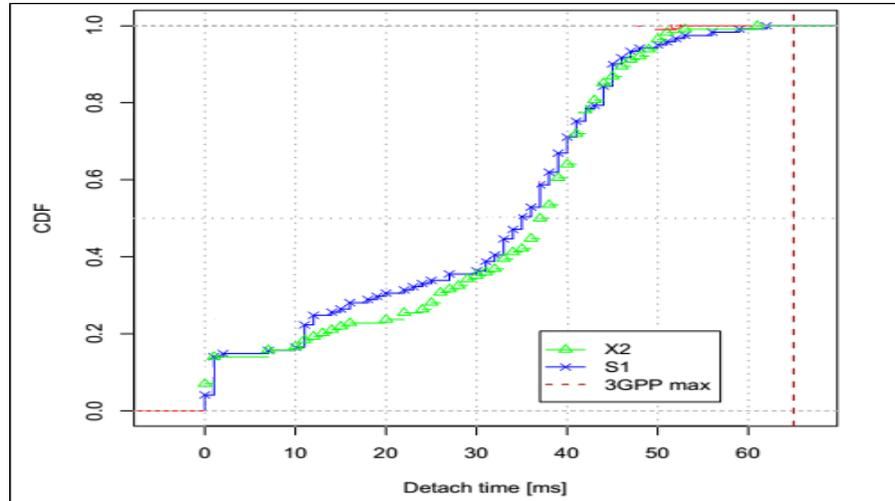


Figura 1.15: Tiempo de interrupción [11]

De acuerdo con la gráfica el UE experimenta tiempos de interrupción similares en ambos casos de *handover* (X2 o S1), esta cualidad se debe a que el UE no tiene conocimiento sobre el tipo de *handover* que se está efectuando, siendo el proceso de ejecución igual en ambos casos desde el punto de vista del UE. De la gráfica se observa que el 95% del tiempo de interrupción se encuentra por debajo de los 50 ms, teniendo como valor promedio 30 ms cumpliéndose para todos los casos la condición de 65 ms establecida por el 3GPP.

La figura 1.16 muestra la demora de *handover* para ambos escenarios como en el caso anterior. Las demoras adicionales con respecto al tiempo de interrupción corresponden a la etapa de preparación. En el caso del *handover* X2 estas demoras adicionales son de aproximadamente 40 ms, teniendo el valor máximo alrededor de los 100 ms. En el caso del *handover* S1 la demora se incrementa considerablemente con respecto al tiempo de interrupción y si se analiza comparativamente con la demora del *handover* para el caso X2 anteriormente explicado, se observa esta misma cualidad, esto se debe a que la señalización entre los dos eNodeBs debe ser dirigida a través del MME. Los resultados en este último caso pueden variar entre 60 y 240 ms, promediando alrededor de los 150 ms.

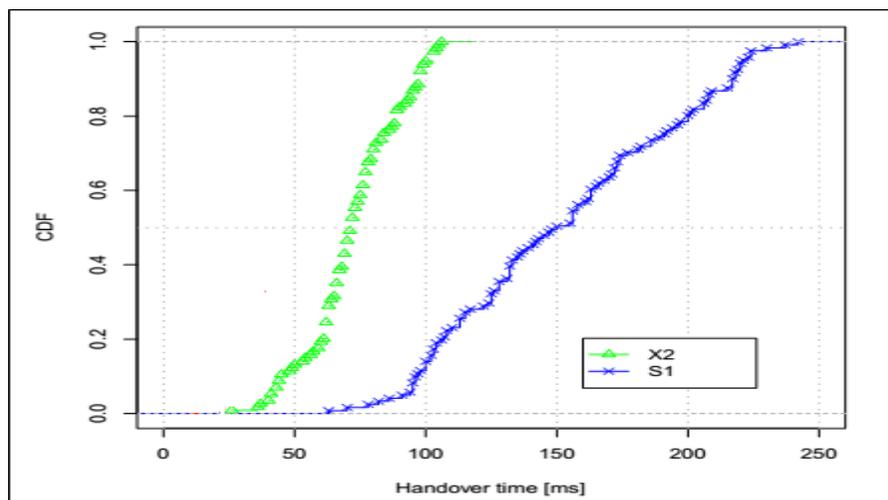


Figura 1.16: Tiempo de *handover* [11]

A modo de resumen la tabla 1.1 muestra los resultados promedios del comportamiento de ambos tipos de *handover* para el tiempo de interrupción, el tiempo de preparación y la demora de *handover*, siendo el tiempo de preparación la diferencia de los otros dos valores.

Tabla 1.1: Tiempos promedios de interrupción y *handover* para HO S1 y HO X2

	X2	S1
<b>Tiempo de interrupción</b>	31,12 ms	29,14 ms
<b>Demora de <i>handover</i></b>	72,54 ms	152,60 ms
<b>Tiempo de preparación</b>	41,42 ms	123,10 ms

Las demoras estudiadas anteriormente analizan el *handover* desde el punto de vista del plano de señalización, midiendo el tiempo de interrupción desde que se recibe el comando de *handover* en el UE hasta que este emite la confirmación al eNB de la celda de destino, y como el tiempo de demora aquel que transcurre desde que el UE envía en reporte de medición hasta que comienza el tiempo de interrupción. Viendo el efecto del *handover* desde la perspectiva del plano de usuario y para el caso de la aplicación de voz implementada, como es el caso el LTE, sobre IP se constata que efectivamente existe una pausa en el flujo de los datos producto de la ocurrencia de un *handover*. La métrica pausa UDP es definida como el tiempo entre el último datagrama recibido por el UE proveniente del eNodeB fuente y el primero recibido del eNodeB de la celda de destino. La figura 1.17 muestra una gráfica que posee los valores de pausa UDP generada como resultado de la ocurrencia de ambos casos de *handover*.

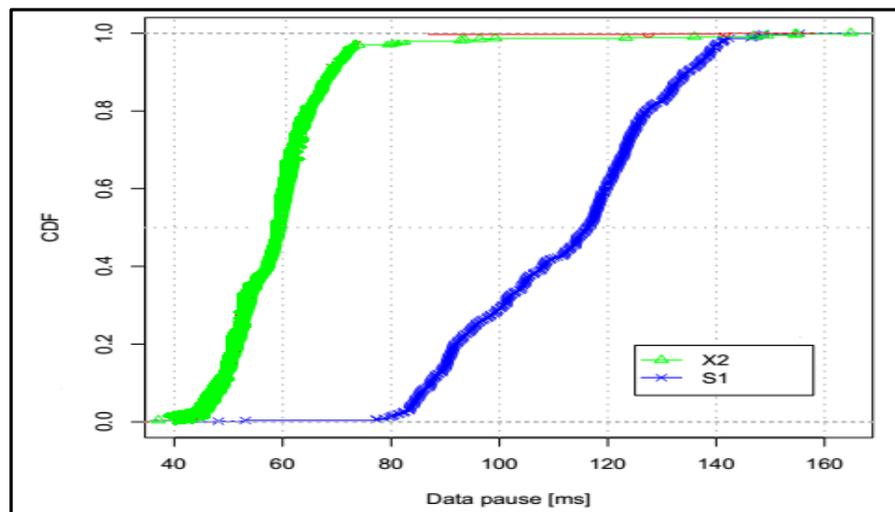


Figura 1.17: Pausa UDP [11]

Para el caso del *handover* X2 los resultados de la pausa UDP como promedio están alrededor de 57 ms, si se compara este valor con el del tiempo de interrupción de 30 ms, la pausa de los datos es un poco superior, esto se debe a que la demora UDP incluye los tiempos de *round trip* de los mensajes comando de *handover* y confirmación de *handover*, así como el tiempo de procesamiento de los eNB fuente y destino. En el caso del *handover* S1 ocurre un comportamiento diferente, la distribución de las muestras es amplia y el valor máximo de la

pausa puede ser considerado como alto. Según lo visto anteriormente la diferencia con respecto al X2 debería estar restringida a la etapa de preparación que no influye en la demora pues no interrumpe la conexión de datos en curso, además el eNodeB de la celda fuente debe iniciar el proceso de reenvío a través del MME de la información que llega con destino al UE proveniente del S-GW una vez le sea enviado al UE el comando de *handover*, creando así un mecanismo que permita entregar al UE la información que le fue enviada durante la ejecución del *handover* y que se encuentra almacenada en el *buffer* del eNB de la celda de destino. Según los resultados este mecanismo de re-direccionamiento de la información a través del MME hacia el eNodeB de la celda de destino no funciona de la forma esperada y la pausa UDP en este caso se extiende hasta que se establece la nueva trayectoria para los datos en el S-GW. Entonces la pausa UDP para el caso del *handover* X2 posee como valor promedio 58,70 ms, relacionado directamente con el tiempo de interrupción y con los tiempos de transmisión de los mensajes que indican el principio y en fin de este período, por su parte el *handover* S1 posee una demora UDP de 116,7 ms como promedio, relacionados con el tiempo de interrupción del UE y con el mecanismo de re-direccionamiento de los datos desde el eNB fuente al eNB destino a través del MME.

#### 1.4.4 Retransmisiones en el enlace ascendente

Para implementar las retransmisiones, ante la incapacidad de decodificar un bloque de información determinado, en LTE se aplica a nivel físico y controlado por la capa MAC, el mecanismo HARQ. Según [6] las retransmisiones en el enlace ascendente constituyen un evento de radio que posee un impacto considerable cuando se trata del desempeño de la aplicación VoLTE.

En el mecanismo SAW de HARQ en LTE necesita 8 ms para realizar un ciclo completo [26], el cual se ilustra en la figura 1.18.

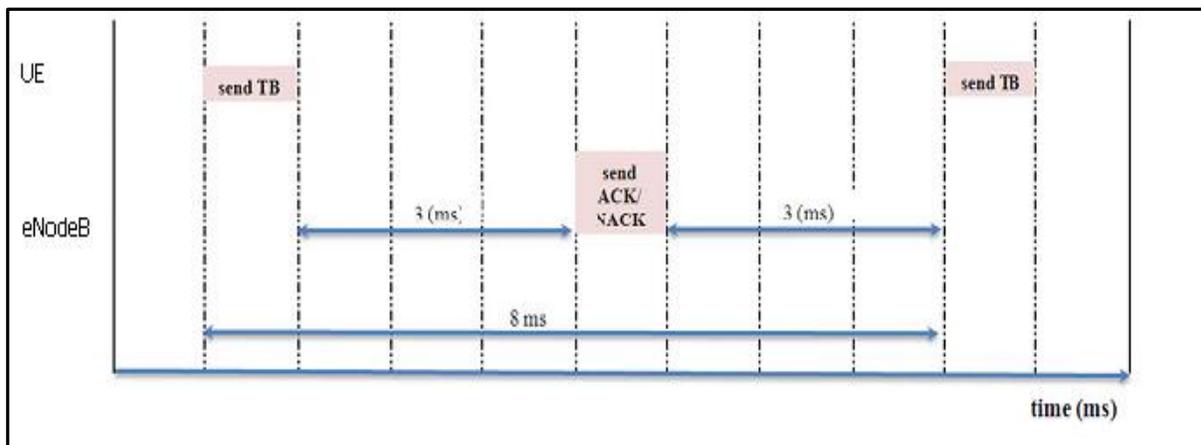


Figura 1.18: Ciclo SAW en LTE [23]

Cada intervalo de tiempo en la figura representa 1 ms, el primer milisegundo se emplea en la transmisión del Bloque de Transporte (*Transport Block, TB*), los siguientes 3 ms se emplean en decodificar la transmisión y ejecutar la comprobación CRC (*Cyclic Redundancy Code*), a continuación se envía en el próximo intervalo de 1 ms, un mensaje de reconocimiento (ACK) en caso de haber sido satisfactorio el proceso o de no reconocimiento (NACK) en caso

contrario (este procedimiento se denomina *HARQ Feedback*). Por último el UE decodifica el mensaje ACK/NACK y construye un nuevo Bloque de Transporte, consumiendo otros 3 ms. Basándose en la información recibida en este mensaje, ejecutará una retransmisión en el caso de haber recibido un NACK o transmitirá un nuevo bloque en el caso de haber recibido un ACK.

La figura 1.19 muestra de manera esquemática el proceso de retransmisión HARQ para el UL atendiendo a que el mismo se realiza con el modo de operación Adaptativo. En ella se ilustra el proceso de SAW característico del mecanismo HARQ empleado en LTE y la temporización explicada con anterioridad, teniendo entonces entre cada mensaje ya sea del canal de transmisión o del canal inverso 4 subtramas correspondientes a los 3ms sumados al 1ms de transmisión (duración de subtrama = 1ms). La figura 1.19 muestra además el mecanismo de retransmisión HARQ basado en el modo de transmisión no Adaptativo. Este proceso posee a grandes rasgos las mismas características que el anterior, la principal diferencia radica en que en éste aunque se utilizan también diferentes RV en cada retransmisión el valor es establecido a través de una secuencia definida en [27].

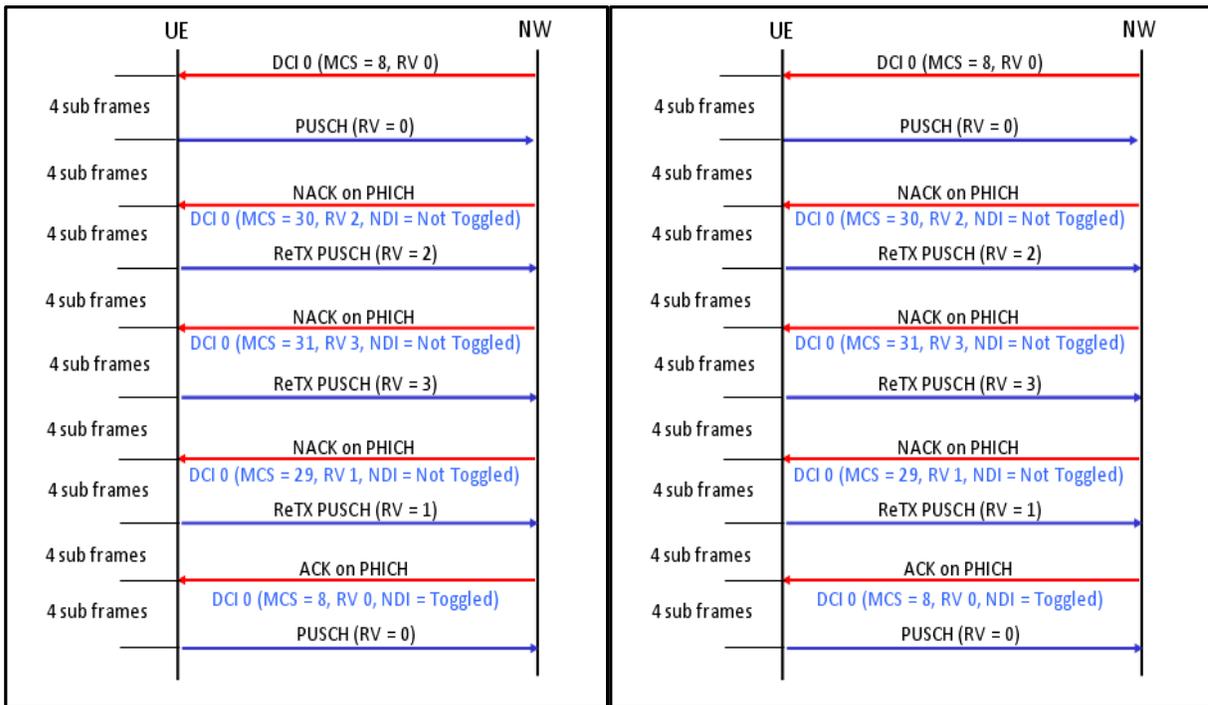


Figura 1.19: Mecanismo HARQ en modo Adaptativo (izquierda), en modo No Adaptativo (derecha) [28]

De esta manera por su característica síncrona y por implementar el mecanismo SAW, está establecido que cada retransmisión de un mismo proceso correspondiente a una transmisión que no fue decodificada se realice cada 8 ms en el UL. En LTE como típicamente se realizan 4 transmisiones referentes a un mismo bloque de datos de un proceso antes de que este sea descartado, el mecanismo puede llegar a introducir una demora máxima de 24 ms en la transmisión de un bloque en caso de que inicialmente no haya sido exitosa su recepción y esta situación no pueda ser solucionada antes de la tercera retransmisión.

### 1.4.5 Single Radio Voice Call Continuity (SRVCC)

Según [29] se entiende por *Single Radio Voice Call Continuity (SRVCC)* a la continuidad de la aplicación de voz en el sistema IMS sobre el dominio PS y posteriormente sobre el dominio CS, para llamadas que se encuentran establecidas en el sistema IMS cuando el UE es capaz de transmitir o recibir solamente en una red de acceso en un tiempo determinado. En LTE el SRVCC se utiliza principalmente en etapas iniciales del despliegue de la tecnología, donde todavía existe una amplia infraestructura de redes 3G/2G habilitadas, para afrontar el inconveniente que se sucede cuando se tiene una cobertura parcial brindada por la red de acceso E-UTRAN y las celdas con niveles fuertes de señal disponibles pertenecen a tecnologías anteriores.

Una manera de tratar la problemática de la existencia de redes de tecnologías anteriores coexistiendo con LTE para las llamadas de voz fue CSFB, que permite continuar la llamada en el dominio CS aún ante la pérdida de cobertura de la red LTE. La principal dificultad que afronta CSFB es que necesariamente los dispositivos terminales de los usuarios tienen que poseer capacidades duales, para poder operar con la red de acceso de ambas tecnologías, lo que tiene el inconveniente de impactar negativamente en el consumo de potencia de los terminales, acortando por lo tanto la vida útil de la carga de las baterías, además éste constituye un procedimiento costoso que posee un tiempo de establecimiento de la llamada considerablemente alto debido a que necesita establecer la sesión cada vez que se está en presencia de una nueva llamada. El SRVCC no requiere que los dispositivos terminales de los usuarios posean características duales que les permitan la operación en ambas redes, es menos costoso y el tiempo de establecimiento de la llamada es menor ya que solamente se requiere cuando el terminal pierde la cobertura LTE. De esta manera es el SRVCC el procedimiento más frecuentemente utilizado para garantizar la continuidad de la aplicación de voz ante la pérdida de la cobertura LTE para evitar la pérdida de la comunicación entre los usuarios [30].

El SRVCC puede ser implementado desde la red LTE (o generaciones que le preceden) hacia redes de generaciones anteriores ya sean estas de la familia 3GPP o 3GPP2. En esta tesis se tratará el procedimiento que tiene su origen en la red LTE teniendo como destino generaciones anteriores de la familia 3GPP (UTRAN/GERAN).

#### 1.4.5.1 Arquitectura de referencia

La figura 1.20 muestra un esquema que indica la arquitectura general del proceso SRVCC y la idea que este persigue.

La idea de este proceso puede ser resumida de la siguiente manera: cada vez que el suscriptor VoIP se mueve fuera de la cobertura LTE, SRVCC asegura una entrega de la aplicación de voz hacia la red CS, manteniendo las actualizaciones en la red de destino en un nivel mínimo, la red IMS que almacena la información del enlace correspondiente al servicio de voz, guía el establecimiento del enlace en la red de destino, reemplazando de esta manera el canal VoIP original [30].

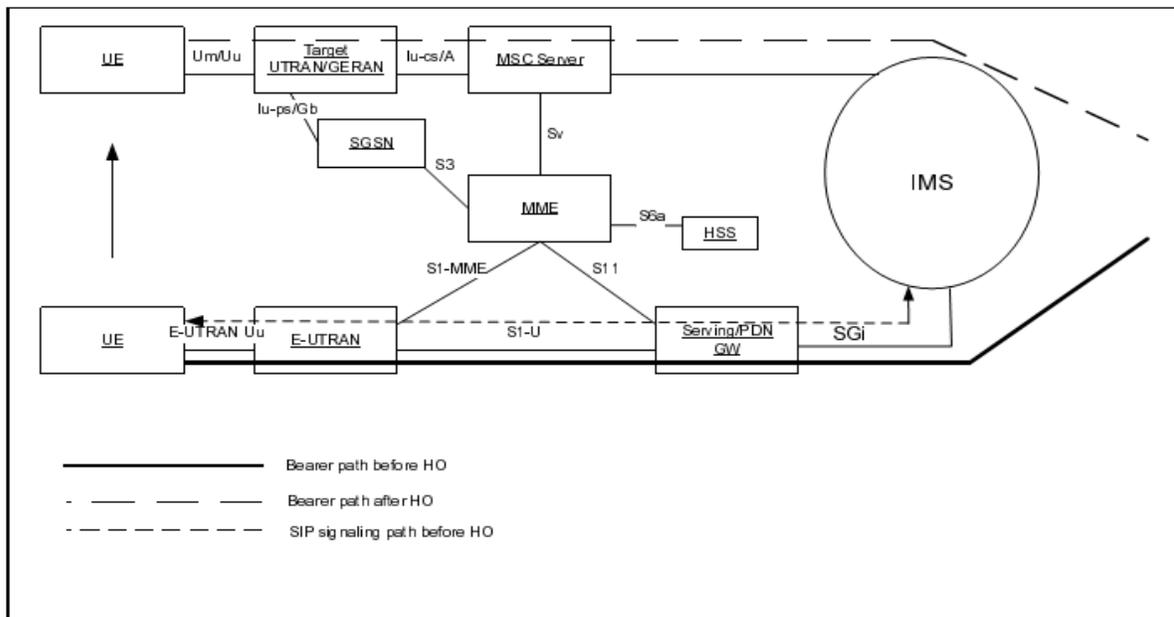


Figura 1.20: Arquitectura general SRVCC (E-UTRAN hacia UTRAN/GERAN) [29]

#### 1.4.5.2 Señalización del proceso

La figura 1.21 muestra un esquema que ilustra todo la señalización que se lleva a cabo durante el proceso SRVCC entre E-UTRAN y UTRAN/GERAN. En el Anexo 1 se amplía este tema.

#### 1.4.6 Caracterización del SRVCC

El SRVCC de una llamada LTE desarrollada en el dominio de la conmutación de paquetes hacia el dominio de la conmutación de circuitos en una red GSM/WCDMA es llevado a cabo en dos partes: el *handover* IRAT para mover al UE hacia la celda GSM/WCDMA cuando este se mueva fuera de la cobertura LTE, y la transferencia de sesión donde el control de acceso y la aplicación de voz son movidas desde el EPC hacia el dominio MSS. Estas etapas y el consecuente número de subsistemas que se necesitan actualizar son las fuentes primarias que introducen demora en el proceso.

En SRVCC tanto el *handover* IRAT que se efectúa, como la transferencia de sesión contribuyen al tiempo de interrupción debido a que con ellos se rompe y restablece la conexión en el proceso. Como se muestra en la figura 1.22, SRVCC minimiza el tiempo de interrupción mediante la iniciación de ambos procesos en paralelo.

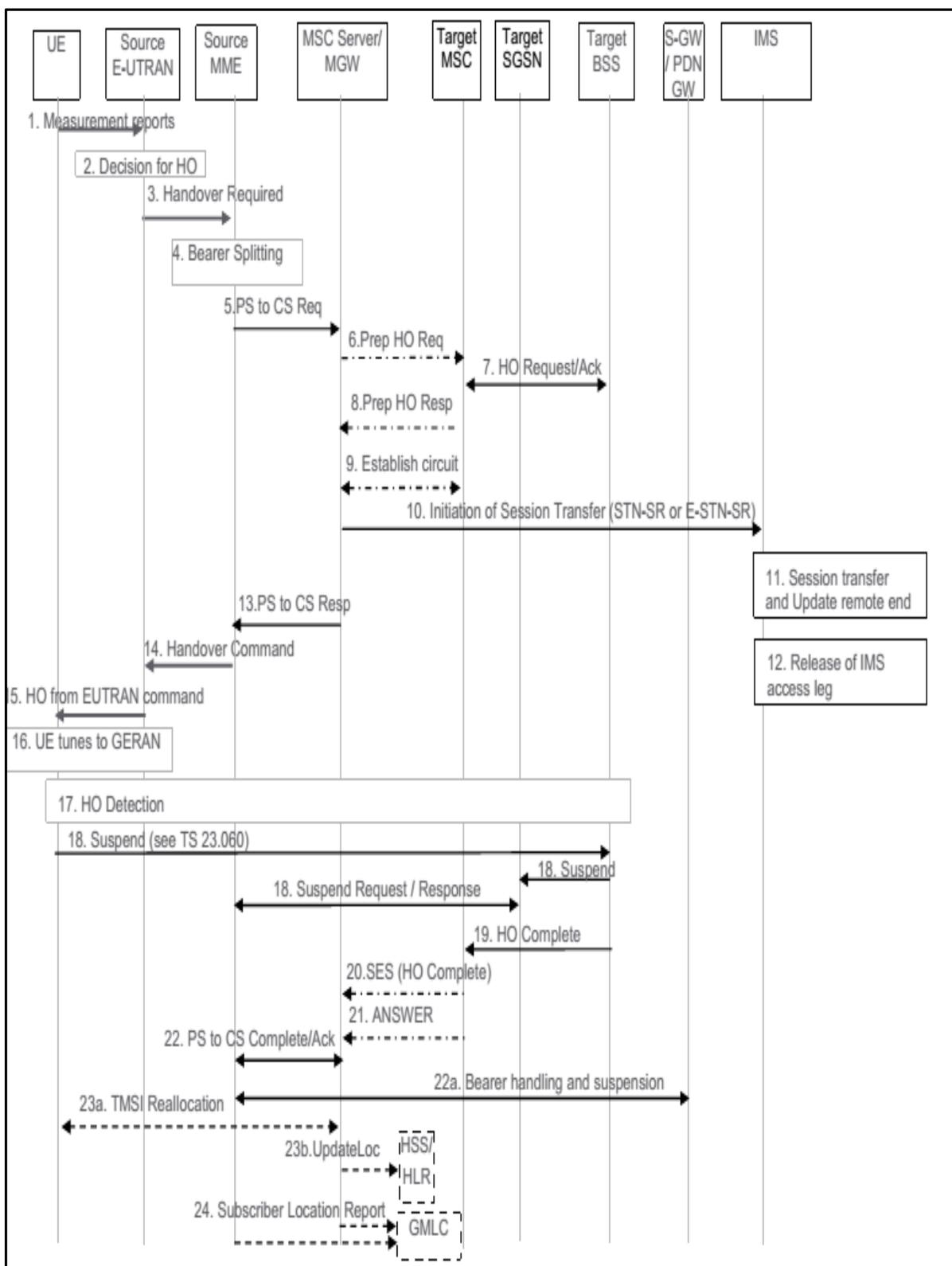


Figura 1.21: Señalización del proceso SRVCC desde E-UTRAN hacia UTRAN/GERAN [31]

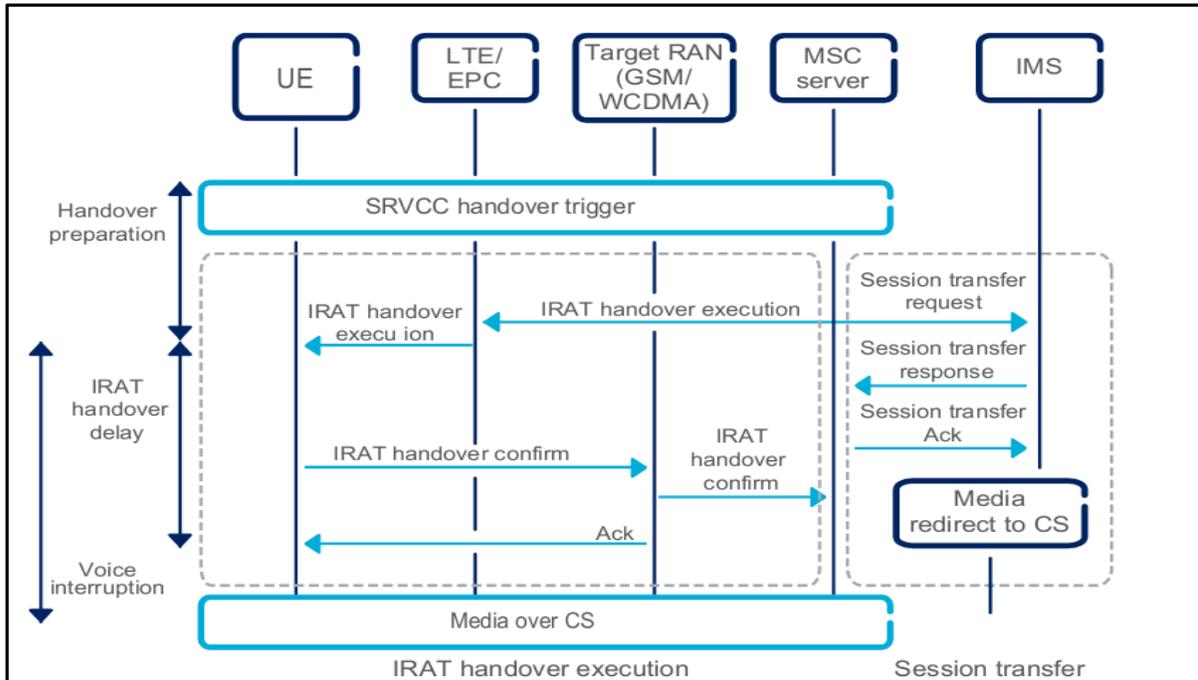


Figura 1.22: Proceso SRVCC [32]

Según mediciones realizadas el proceso de transferencia de sesión es rápido, aconteciendo en el orden de los 0.01 s [32]. Debido entonces a que el tiempo de ejecución del procedimiento de redirección de media es relativamente corto [32], la interrupción de la voz es dominada predominantemente por la demora del *Handover* IRAT.

Por su parte la interrupción de la voz aunque dominada por la demora del HO IRAT, es medida desde que es enviado el último paquete sobre la red LTE hasta que se envía el primer mensaje de voz sobre el acceso CS [30].

Otra métrica de desempeño importante es el tiempo que le toma a la red preparar el HO SRVCC, denominada tiempo de preparación. Este tiempo se encuentra definido desde que el terminal realiza la medición y envía el reporte correspondiente a una mala recepción LTE hasta que el terminal recibe y ejecuta el comando de HO [33], de manera similar a como fue analizado para un caso tradicional de HO X2 o S1. La demora de preparación del HO no impacta directamente en la cadena de voz que es reproducida para el usuario, pero debe ser corta pues de otra manera el HO puede fallar debido a una pobre recepción LTE en su ejecución, provocando entonces que largos tiempos de preparación provoquen bajas probabilidades de retención de llamadas.

En pruebas de desempeño llevadas a cabo por la compañía Ericsson y Qualcomm [32], se obtuvieron los resultados para las métricas analizadas mostrados en la tabla 1.2, estos resultados evidencian que el tiempo de interrupción para el SRVCC se encuentra a la par de HO típicos CS (entre WCDMA y GSM) y *handovers* inter-frecuencias dentro de una misma RAT [34].

Tabla 1.2: Resultados de desempeño de SRVCC

Indicador de desempeño	Resultados promedios
Tiempo de interrupción	190 ms
Demora de <i>handover</i>	180 ms
Tiempo de preparación	520 ms

## 1.5 Consideraciones finales del capítulo

Las redes LTE constituyen una área importante de desarrollo de los sistemas celulares actuales, sus características novedosas y orientadas a disminuir la demora, su estructura simplificada y su arquitectura dividida en un plano de usuario y un plano de control para una mejor gestión, la hacen la alternativa por excelencia para la migración e implementación como paso evolutivo de los sistemas celulares.

La aplicación de VoLTE hace que esta red cuente con un mecanismo de implementación de voz que satisface las demandas de los usuarios, funcionando bajo el principio de una red totalmente IP que brinda su servicio a través del subsistema IMS. Esta aplicación requiere una demora extremo a extremo total por debajo de 200 ms para mantener una buena percepción por parte del usuario.

Debido a las particularidades en las que se desenvuelve la red LTE existen eventos de radio que van a afectar la calidad de esta aplicación los cuales son: el *handover*, la retransmisión en el enlace ascendente y el mecanismo SRVCC. Estos eventos de radio afectan la calidad de servicio de la aplicación de voz al introducir demoras en el flujo de media, que en el caso del *handover* y el SRVCC se encuentran relacionadas con interrupciones en la conexión del terminal con la red, y cuyos valores al ser adicionados a la demora de la red exceden el límite de un buen desempeño establecido en 200 ms para VoLTE.

Entre los eventos de radio se destaca el *handover* por su fuerte impacto en la aplicación de voz y su frecuente ejecución en la interfaz de radio al constituir la base de la movilidad en las redes LTE. A través del conocimiento detallado del funcionamiento de este evento de radio es posible advertir con antelación su ocurrencia. Esta información puede ser utilizada para minimizar la influencia negativa que tiene en el desempeño de la aplicación de voz.

## **CAPÍTULO 2. Escenario de aplicación y mecanismo de detección de *handovers* en aplicaciones de voz en LTE**

Dentro del marco general de la investigación en este capítulo se profundiza en el *handover*, como un ejemplo dentro de la gama de eventos de radio que tienen lugar en LTE y efectúan un impacto degradante en la calidad de servicio de la aplicación de voz. Este evento posee mecanismos de funcionamiento bien estructurados a través de mensaje de señalización, de manera tal que es posible conocer cuándo va a ocurrir con cierta anticipación. En las aplicaciones de voz en LTE, que se ven afectadas severamente por la ocurrencia del *handover*, sería muy beneficioso utilizar esta información para realizar procedimientos encaminados a limitar el impacto negativo. Este capítulo está orientado a la implementación de un mecanismo como caso de estudio que permita evaluar la incidencia de las acciones preventivas al evento de radio *handover* en la calidad de servicio de la aplicación VoLTE. Para ello inicialmente se describe el procedimiento necesario para obtener una traza de VoLTE afectada por la ocurrencia de *handovers*. Posteriormente se caracterizan algoritmos de *buffer* de reproducción, y se selecciona un modelo adecuado para evaluar la calidad de la aplicación de voz con el objetivo de definir un escenario de aplicación. Finalmente se maneja una propuesta de mecanismo de tratamiento del evento de radio *handover* en el *buffer* de reproducción del receptor.

### **2.1 Generación de la traza VoLTE**

Para realizar comprobaciones sobre la validez del funcionamiento de determinado mecanismo es necesario contar con una presentación del comportamiento del objeto estudio, con este fin en este trabajo se enfocó la labor científica en obtener una traza de la aplicación VoLTE. Para alcanzar este fin se realizaron los pasos que se describen a continuación.

#### **2.1.1 Definición del simulador**

En la investigación se utilizó el simulador de eventos discretos NS-3, este cuenta con un módulo para redes LTE llamado LTE – EPC Network Simulator (LENA). EL simulador posee la ventaja de estar implementado en código abierto, permitiendo realizar modificaciones y adaptaciones al código en caso de ser necesarias [35].

NS-3 es un simulador de eventos discretos, escrito completamente en C++, con licencia GNU GPLv2. Tiene un núcleo organizado en librerías, cada una de ellas contiene las clases necesarias para simular un protocolo u objeto particular dentro de un sistema. Para simular una red se crea un script en C++ que define todos los objetos a utilizar, las vinculaciones entre estos y los parámetros asociados. También especifica la duración de la simulación y brinda los parámetros de entrada para la generación de números aleatorios [35].

Existen distintos niveles de Interfaz de Programa de Aplicación (*Application Program Interface*, API) en NS-3, se puede programar a bajo nivel con un manejo fino de todos los objetos y parámetros del sistema, como también a más alto nivel con una API conformada por *Helpers* [35]. Estos *Helpers* son objetos que manejan la configuración de otros objetos, ofreciendo de esta forma una interfaz más amigable a la hora de programar.

LENA está actualmente en etapa de desarrollo por el Centre Tecnologic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC) y está basado en el simulador de redes NS-3. El módulo LTE de LENA fue incorporado al *release* NS3.15 del simulador NS-3, agregando, entre otras capacidades, la posibilidad de poder simular un escenario LTE+EPC.

## 2.1.2 Descripción del escenario

### 2.1.2.1 Topología

Se utilizó una red compuesta por 7 emplazamientos de eNodeBs, cada uno formado a su vez por tres celdas. Estos emplazamientos están distribuidos en forma de rejillas hexagonales, en una formación 2-3-2 como se muestra en la figura 2.1. Los emplazamientos están distanciados 500 m uno de otro.

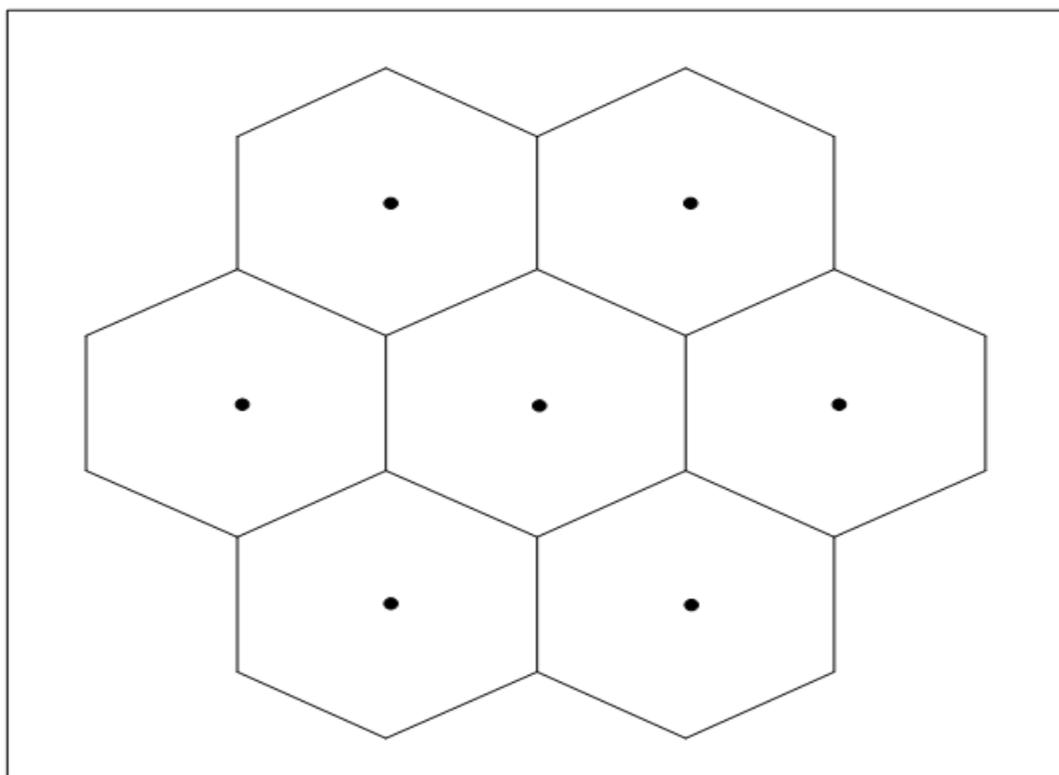


Figura 2.1: Emplazamientos de los eNodeB

El escenario responde a un UE que intercambia información con un cliente remoto (*Remote Host*, RH). Como NS-3 no soporta dos EPC, se define un enlace punto a punto entre la pasarela de datos/servicios y el RH para simular el *core*. Este enlace tiene una demora de 10 ms.

### 2.1.2.2 Modelo de movilidad

En el proceso de simulación de redes inalámbricas la movilidad es un componente fundamental. Para obtener resultados de simulación precisos es un prerequisite poseer un buen entendimiento de las propiedades fundamentales de la movilidad de los nodos. La caracterización de las propiedades del modelo de movilidad es el punto de partida para la derivación de resultados analíticos concernientes a redes móviles [36].

Un ejemplo notable del impacto del modelado de movilidad en el proceso de simulación y análisis de redes inalámbricas, es el modelo de movilidad de vector aleatorio (*Random Waypoint Mobility Model*, RWPM) [36]. En este modelo, un nodo móvil se mueve en un dominio convexo a través de una trayectoria en zigzag, en la que cada segmento de línea recta es llamado tramo. En cada punto de giro el nodo escoge un nuevo destino aleatoriamente y se mueve hacia ese destino a una velocidad constante, la cual se obtiene independientemente de una distribución de velocidad dada en cada punto de desviación. El nodo puede también permanecer estacionario por un tiempo de pausa aleatorio antes de comenzar su movimiento hacia el próximo destino. Una explicación más detallada de este modelo puede ser encontrada en [37]. En la figura 2.2 se muestra el comportamiento del modelo RWPM.

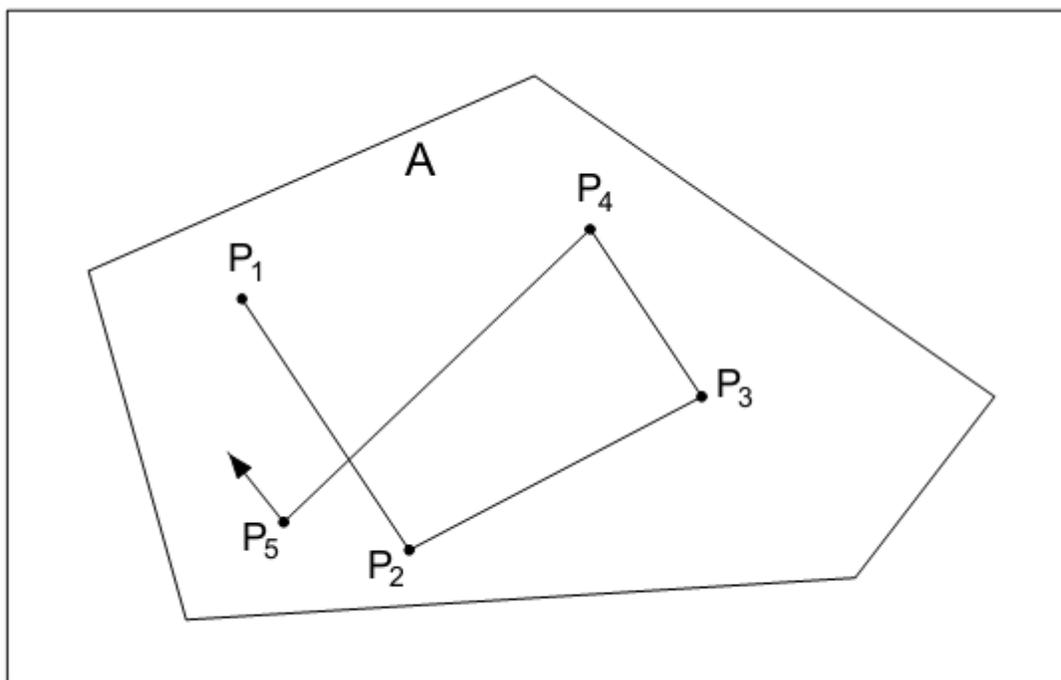


Figura 2.2: Modelo RWPM [37]

En las simulaciones desarrolladas durante la investigación se utilizó el modelo de movilidad de vector aleatorio de estado estable (*Steady-State Random Waypoint Mobility Model*, SSRWPM). Este modelo está basado en el RWMM, para el caso cuando la velocidad, la pausa y la posición son variables aleatorias uniformemente distribuidas. La diferencia reside en que los valores iniciales de estos parámetros no provienen de una distribución uniforme, sino de una distribución estacionaria del RWMM. La implementación de este modelo es

específica de 2D y está creada para nodos no estacionarios, su implementación en el simulador puede ser consultada en [38].

La implementación de este modelo en NS-3 cuenta con los siguientes atributos:

- MinSpeed: Valor mínimo de velocidad en m/s.
- MaxSpeed: Valor máximo de velocidad en m/s.
- MinPause: Valor mínimo de pausa en s.
- MaxPause: Valor máximo de pausa en s.
- MinX: Valor X mínimo de la región de recorrido en m.
- MaxX: Valor X máximo de la región de recorrido en m.
- MinY: Valor Y mínimo de la región de recorrido en m.
- MaxY: Valor Y máximo de la región de recorrido en m.
- Z: Valor Z de la región de recorrido (constante) en m.

En las simulaciones realizadas se definió una "caja" cuyas dimensiones son pasadas a los atributos anteriores para definir la región de recorrido dentro de la cual se mueven los UEs. Las dimensiones de esta caja dependen de la distribución y cantidad de emplazamientos utilizados. En el escenario implementado se utiliza una velocidad constante y un movimiento continuo. En la tabla 2.1 se resumen los valores asignados a cada atributo

Tabla 2.1: Valores asignados a los atributos del modelo SSRWPMM

Parámetro	Valor
<b>MinSpeed</b>	8.3333 m/s
<b>MaxSpeed</b>	8.3333 m/s
<b>MinPause</b>	0
<b>MaxPause</b>	0
<b>MinX</b>	-250 m
<b>MaxX</b>	1250 m
<b>MinY</b>	-250 m
<b>MaxY</b>	1116.03 m
<b>Z</b>	1.5 m

### 2.1.2.3 Modelo de pérdida de trayectos

En las simulaciones se utilizó el modelo de pérdidas de propagación de Friis. Según [38] la expresión 2.1 se utiliza para calcular el valor de la potencia recibida:

$$Pr = \frac{PtGtGr\lambda^2}{L*(4\pi d)^2} \quad (2.1)$$

donde:

Pr: Potencia de recepción (W)

PT: Potencia de transmisión (W)

GT: Ganancia de la antena transmisora (adimensional)

GR: Ganancia de la antena receptora (adimensional)

$\lambda$ : Longitud de onda (m)

d: Distancia (m)

L: Pérdidas del sistema (adimensional)

El modelo de Friis es válido solo para propagación en el espacio libre dentro de la llamada región de campo lejano, la cual puede ser considerada aproximadamente como la región en la que se cumple  $d > 3\lambda$ . Sin embargo el modelo retorna un valor para  $d < 3\lambda$ , ya que este, en lugar de considerarse un error fatal, es práctico para muchos escenarios de simulación [38].

### 2.1.2.4 Modelo de Desvanecimiento

En los radioenlaces es inevitable que la señal sufra de algunas fluctuaciones, las cuales se denominan desvanecimiento de la señal. Estas son producto de aspectos tales como las precipitaciones, refracción o propagación multitrayecto y dependen del tipo de fenómeno atmosférico, así como de la frecuencia de operación del enlace.

El módulo LTE incluye un modelo de desvanecimiento basado en trazas. La principal característica de este modelo es el hecho de que la evaluación de desvanecimiento durante el tiempo de simulación está basada en trazas pre-calculadas. Esto se hace para limitar la complejidad computacional del simulador [38].

En la simulación implementada en la presente tesis se utilizó la traza de desvanecimiento fadingtraceEVA60kmph.fad provista por NS-3, la misma se ajusta a un escenario vehicular según se define en [39]. A continuación se muestra en la figura 2.3 un sumario de la traza en cuestión.

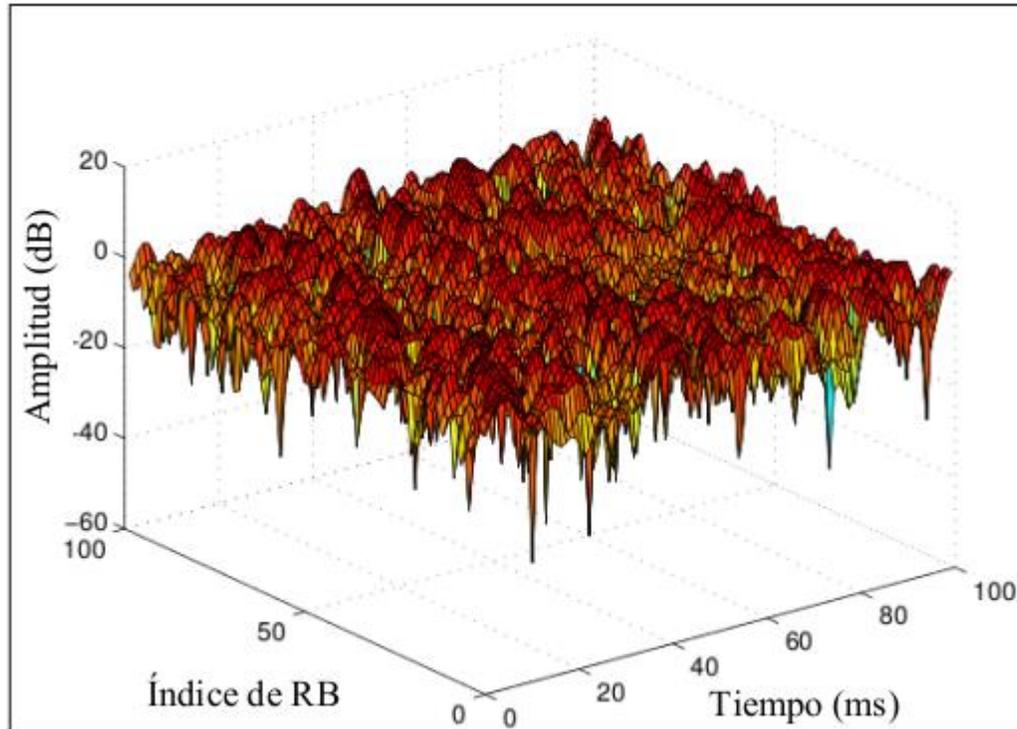


Figura 2.3: Porción de la traza fadingtraceEVA60kmph.fad [38]

### 2.1.2.5 Configuración del protocolo RLC

El protocolo RLC se especifica en [27]. La implementación del protocolo RRC en el proyecto LENA tiene dos vertientes: RRC ideal y RRC real. De acuerdo al modelo RRC ideal, todos los mensajes RRC y elementos de información son transmitidos entre la eNodeB y el UE de una manera ideal, sin consumir recursos de radio y sin errores. Teniendo en cuenta esta cuestión, se eligió el modelo RRC real donde para cada mensaje RRC enviado, se crea una PDU real siguiendo la codificación ASN.1 cómo se especifica en [40]. Además, las PDUs RRC son enviadas sobre las SRB y están sujetas al mismo modelado de transmisión utilizado para comunicaciones de datos, incluyendo planificación, consumo de recursos de radio, errores del canal, demoras, retransmisiones, entre otros [38].

### 2.1.2.6 Planificador

En la simulación se utilizó el planificador de justicia proporcional (*Proportional Fair*, PF). En esta estrategia, los recursos compartidos son asignados al usuario con las condiciones de radio relativamente mejores, o sea, en cada instante de tiempo, el usuario  $k$  es seleccionado para transmitir de acuerdo a la expresión 2.2 [41]

$$k = \arg \left( \max \frac{R_i}{R_i \text{ prom}} \right) \quad (2.2)$$

donde:

$R_i$ : Razón de datos instantánea para el usuario  $i$ .

$R_i$  prom: Razón de datos promedio para el usuario  $i$ .

El promedio es calculado sobre un cierto periodo  $T_{pf}$ . Para asegurar un uso eficiente de las variaciones a corto plazo del canal y, al mismo tiempo, limitar las diferencias a largo plazo en la calidad de servicio a un nivel aceptable, se debe establecer la constante de tiempo  $T_{pf}$  a largo plazo mayor que la constante de tiempo para las variaciones a corto plazo. A la vez,  $T_{pf}$  debe ser suficientemente pequeño para que las variaciones de calidad dentro del intervalo  $T_{pf}$  no sean notadas fuertemente por el usuario [41]. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de planificación utilizando justicia proporcional, el usuario planificado se muestra con líneas discontinuas.

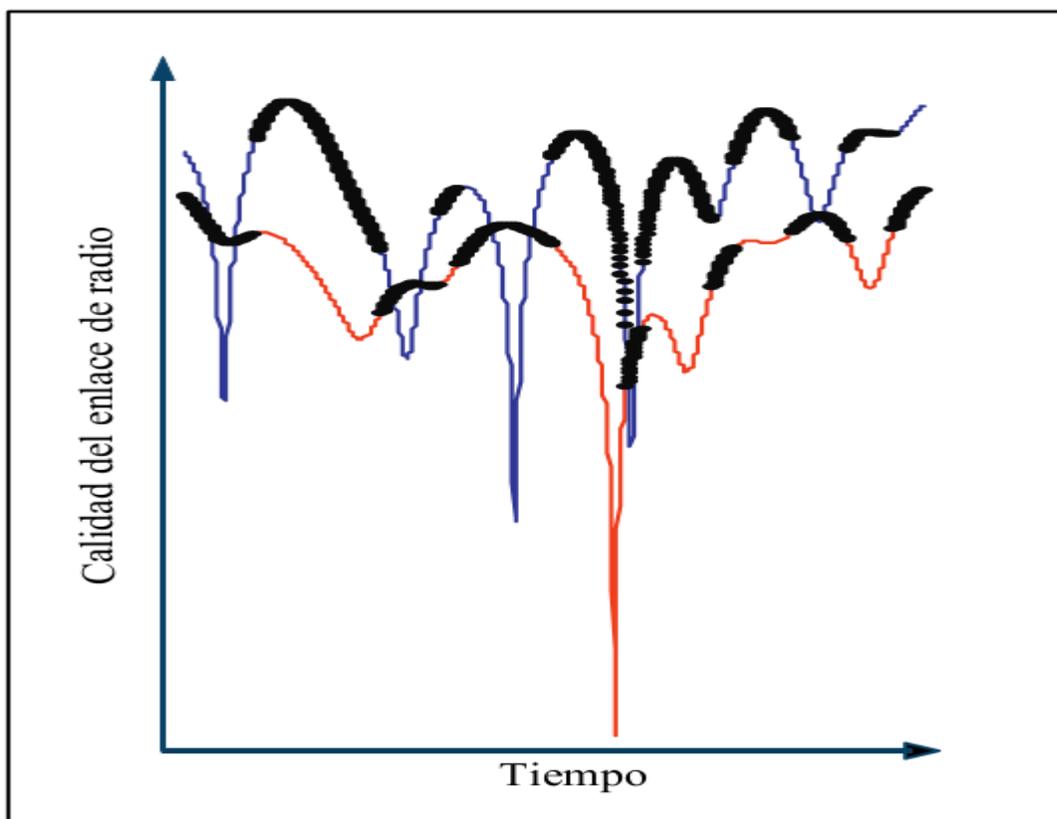


Figura 2.4: Comportamiento de planificación para dos usuarios con calidades promedio de canal diferentes utilizando el planificador de justicia proporcional [41]

### 2.1.2.7 Algoritmo de *handover*

En NS-3 existen dos formas de disparar un *handover*: manual y automática. La primera se logra planificando en el código del programa la ejecución del método *SendHandover-Request*, especificando tiempo de simulación, eNodeB de servicio y eNodeB objetivo [38].

En la opción automática, la entidad RRC de la eNodeB ejecuta el *handover* basado en mediciones del UE y de acuerdo al algoritmo de *handover* seleccionado [38].

En las simulaciones realizadas se utilizó la forma automática, así como el algoritmo de *handover* *A3RsrpHandoverAlgorithm*, también conocido como algoritmo de *handover* de la

mejor celda. Como indica el nombre, la idea detrás del mismo es proveer al UE de la mejor Señal de Referencia de Potencia Recibida [38].

Para realizar este concepto se escogió el evento A3 (la RSRP de la celda vecina supera a la RSRP de la celda de servicio) ejecutándose el *handover* hacia la mejor celda en el reporte de medición cuando se satisface dicho evento. Una simulación que utilice este algoritmo es usualmente más vulnerable a *handovers* ping-pong, especialmente cuando se habilita el modelo de desvanecimiento. Para contrarrestar esta situación se incluye en el algoritmo los parámetros histéresis y tiempo de disparo a la configuración de mediciones.

La histéresis demora el *handover* en relación a la RSRP. El valor es expresado en dB, está en un rango entre 0 y 15 dB, y tiene una precisión de 0.5 dB. El TTT demora el *handover* en relación al tiempo. 3GPP define 16 valores válidos para el TTT: 0, 40, 64, 80, 100, 128, 160, 256, 320, 480, 512, 640, 1024, 1280, 2560, y 5120; todos expresados en milisegundos [40].

Para las simulaciones realizadas se estableció un valor de 0.0 dB para la histéresis y de 40 ms para el TTT.

### 2.1.2.8 Potencia de transmisión, modelo de antena y ancho de banda

En la simulación el UE transmite con una potencia de 10 dBm y la eNodeB irradia 46 dBm. Se utilizó el modelo de antena parabólica con un ancho de haz de 70 grados y una atenuación máxima de 20 dB. Para ambos, DL y UL, se asigna un ancho de banda de 5 Mhz.

### 2.1.2.9 Modelo de aplicación

El códec de voz adaptativo multi-razón (*Adaptive Multirate*, AMR) es uno de los códec de voz más populares utilizados en LTE [42]. Para tráfico de VoLTE, generalmente se emplean códec AMR con una razón fuente de 12.2 kbps para codificar señales de voz [15]. Este códec tiene una duración de paquete de 20 ms, generando un tamaño de paquete típico de 31 bytes. Sin embargo, el encabezado normalmente contiene 40 o 60 bytes, que comprenden 12 bytes del protocolo de tiempo real (*Real Time Protocol*, RTP), 8 bytes del protocolo UDP y 20 bytes para IPv4 o 40 bytes para IPv6. Tales encabezados son inapropiados para pasar a través del cuello de botella provocado por la interfaz aérea [43].

Para resolver este problema, PDCP incluye un protocolo de la IETF conocido como compresión robusta de encabezado (*Robust Header Compression*, ROHC). El principio es que el transmisor envía el encabezado completo en el primer paquete, y solo envía las diferencias en paquetes subsiguientes. La mayoría del encabezado permanece constante de un paquete al siguiente, por lo que los campos con diferencias son considerablemente más pequeños. El protocolo puede comprimir los encabezados originales de 40 y 60 bytes a 1 y 3 bytes respectivamente, lo cual evidencia la efectiva reducción del encabezado [43]. Además es necesario puntualizar que en las simulaciones se implementó IPv4.

Con el objetivo de establecer un tráfico de VoIP, se utilizó la aplicación UDPClientServer, provista por NS-3. Para emular el códec anteriormente descrito se utilizan los siguientes atributos de la aplicación:

- *Interval*: Tiempo a esperar entre paquetes. Se le asigna un valor de 20 ms.
- *PacketSize*: Tamaño de los paquetes generados. Se asigna un valor de 20 bytes teniendo en cuenta la compresión de cabecera y que la aplicación por defecto adiciona un encabezado de 12 bytes.

Además de todo lo mencionado anteriormente, se estableció una portadora dedicada por UE, con un valor de QCI igual 1, definido por la clasificación NGBRIMS, como se especifica en [44]. Se estableció el tiempo de inicio de la aplicación utilizando una variable aleatoria uniforme, cuyo valor mínimo es 500 ms y valor máximo es 510 ms, para evitar comportamientos de simulación indeseados y dar tiempo suficiente para que se creen todos los objetos definidos y se establezcan las conexiones entre ellos. El tiempo final de la aplicación es 230 s, mientras que el tiempo total de la simulación es de 240 s.

### 2.1.3 Recolección de las trazas

Los valores de demora se capturaron utilizando la clase *FlowMonitor*. El módulo *FlowMonitor* tiene como objetivo proveer un sistema flexible para medir el desempeño de protocolos de red. Este utiliza "sondas", instaladas en los nodos de red, para rastrear los paquetes intercambiados por los nodos, y medir un conjunto de parámetros. Los paquetes son divididos de acuerdo al flujo que pertenecen, donde cada uno es definido de acuerdo a las características de las sondas, por ejemplo, para IP se define un flujo para paquetes con el mismo protocolo, dirección IP/puerto fuente y dirección IP/puerto de destino [45].

Las estadísticas que son recolectadas para cada flujo pueden ser exportadas en formato XML. Además, el usuario puede acceder a las sondas directamente para solicitar estadísticas específicas de cada flujo [45].

Por defecto, *FlowMonitor* muestra solamente la demora total de todos los paquetes en un flujo. Debido a la necesidad de conocer la demora de cada paquete individual, se modificó el código fuente de la clase mencionada, en particular el método *ReportLastRx*, imprimiendo la salida la variable *delay* para cada flujo, cada vez que dicho método es llamado.

Dado que NS-3 no soporta la utilización de dos EPC, se realizaron dos simulaciones: una para el DL y otra para el UL. En estas se asignaron diferentes valores al generador de números aleatorios (*Random Number Generator*, RNG) con el objetivo de garantizar la no correlación entre ambas corridas, siendo las distribuciones de los eventos (y de *handovers*), por tanto, diferentes.

Con el objetivo de añadir la demora del core de redes reales que utilizan servicios de VoIP, se le agregó a la suma de las demoras del UL y el DL 81.27 ms, los cuales se obtiene de descontarle a los 101.27 ms especificados en [46] para la demora del core, 20 ms procedentes de la demora del enlace punto a punto entre la P-GW y el RH en el UL y el DL.

Como el flujo de media en la simulación es un flujo continuo y los algoritmos de reproducción del *buffer* utilizados ajustan solamente en intervalos de silencio, es necesario agregar silencios a la traza de salida. Esto se hace de acuerdo a [47].

Dado que NS-3 no siempre tiene en cuenta la contribución del tiempo de desconexión provocado por el *handover*, a la demora obtenida mediante *FlowMonitor* se le realizó una inserción de 120 ms ante la ocurrencia de este evento de radio, esta adición se le hizo a los paquetes que se reciben luego del HO teniendo en cuenta la caracterización realizada en el capítulo 1 y lo propuesto en [48]. Esta adición equivale a una transmisión de 6 paquetes, los cuales se considera que se transmiten a la misma vez una vez reestablecida la comunicación entre el eNB y el UE, lo que queda manifestado como una diferencia de 20 ms entre uno y otro y un descenso en rampa en los valores de la demora de extremo a extremo tras la ocurrencia de un *handover*.

En el trabajo con el NS-3 no se implementó otro evento de radio diferente al *handover*, por lo que los resultados obtenidos solo se van a aplicar a este en particular, quedando entonces la implementación de los otros eventos de radio para futuras investigaciones.

## 2.2 Algoritmos del *buffer* de reproducción

El problema del *jitter* se ha enfrentado mediante diferentes alternativas presentadas desde la década del 80. Los estudios en [49] y [50] marcan la génesis de estos trabajos.

El primer paso en la clasificación, define dos grandes grupos, atendiendo a si el *buffer* es fijo o adaptativo. Para la técnica de *buffer* fijo, la demora de extremo a extremo se mantiene constante durante toda la comunicación. Esta solución no es consistente con la variabilidad de la demora en las redes de paquetes. Por el contrario, con la técnica de *buffer* adaptativo, es posible ajustar la demora a las condiciones de la red. Esto evita que se introduzca una demora excesiva cuando las condiciones son favorables y viceversa. Para lograrlo, es necesario monitorear la conversación y adecuar el tamaño del *buffer* de reproducción.

El segundo paso de la clasificación se aplica a las técnicas adaptativas solamente y tiene que ver con el momento en que se ajusta el *buffer* de reproducción. La variante intrarráfagas modifica la demora de extremo a extremo en cualquier momento de la conversación. Por el contrario, cuando el ajuste se realiza interráfagas, el cambio del tamaño del *buffer* se produce solo durante los intervalos de silencio, adaptando el valor de la demora mediante la extensión o el acortamiento de los intervalos de silencio, esta variante resulta más factible a la hora de ser implementada. La variante interráfagas puede materializarse siguiendo un modelo tolerante a pérdidas, intolerante a pérdidas o basado en calidad. En los intolerantes a pérdidas, no se tiene en cuenta la posibilidad que aparece con las técnicas de ocultamiento de paquetes perdidos, en lugar de esto se trabaja según el principio de minimizar las pérdidas de paquetes.

Evidentemente, tal modelo acarrea una sobrestimación de la demora requerida, lo que puede llegar a afectar la interactividad de la conversación. En el caso de los algoritmos tolerantes de pérdidas, se trata de alcanzar un compromiso entre la cantidad de paquetes que se pierden y la demora introducida. Por último, los algoritmos basados en calidad, tratan de maximizar la calidad percibida por el usuario.

Dado que no es posible encontrar un tamaño fijo óptimo para el *buffer* de reproducción en aplicaciones de voz sobre IP, las soluciones se mueven en torno al uso de un *buffer* adaptativo. La mayoría de los algoritmos de *buffer* de reproducción adaptativo descritos en la literatura dependen de anticipar, con la mayor exactitud posible, la demora en la red para calcular el instante de reproducción. A estos algoritmos les es imprescindible reaccionar rápidamente a cambios persistentes en el rendimiento de la red (ágil) pero ignorar los transientes en condiciones de ruido (estable). En resumen, deben establecer un compromiso entre la demora y la compensación de la variación de la demora, basando su funcionamiento en el historial del retraso de los paquetes.

Los algoritmos utilizados en esta tesis para el trabajo con el *buffer* de reproducción son seis, cuyas principales características se exponen a continuación.

### 2.2.1 Algoritmos de Ramjee

Aunque se han propuesto muchas formas para el cálculo del instante de reproducción, el trabajo presentado en [51] es uno de los más explorados. Para este algoritmo el ajuste de parámetros se realiza entre ráfagas de audio. Para el primer paquete de cada ráfaga la demora de extremo a extremo se obtiene a partir de 2.3.

$$D_o = d_i + \beta v_i \quad (2.3)$$

Donde  $d_i$  es la demora estimada para el siguiente paquete,  $v_i$  es la variación de la demora y  $\beta$  es el factor de seguridad usado para definir la relación de compromiso entre la latencia de extremo a extremo y la pérdida de paquetes. Su valor fue fijado originalmente a 4.

Para los demás paquetes de esa misma ráfaga la demora de extremo a extremo se obtiene por medio de 2.4, donde  $t_i$  es una marca de tiempo colocada por el transmisor al paquete.

$$D_i = t_i + D_o \quad (2.4)$$

Para obtener el estimado del retardo, Ramjee propuso cuatro predictores. Después de obtener el estimado de la demora empleando uno de los cuatro algoritmos de Ramjee, la variación de la latencia para cualquiera de ellos se calcula según la expresión 2.5, en la que  $n_i$  es la demora de red experimentada por el paquete  $i$ , y el factor de peso es seleccionado de acuerdo al método que se emplee.

$$v_i = \alpha v_{i-1} + (1-\alpha) |d_i - n_i| \quad (2.5)$$

En el primero de los algoritmos de Ramjee (algoritmo 1) la demora para el paquete  $i$  es calculada usando un mecanismo propuesto por [52] para estimar el tiempo RTT (*Round-Trip-Time*) en conexiones TCP. Este algoritmo es básicamente un filtro recursivo lineal que se caracteriza por el factor  $\alpha$ , que pondera las observaciones pasadas o las recientes.

El segundo algoritmo (algoritmo 2) es una pequeña modificación del primero que tiene como objetivo lograr que el mecanismo reaccione más rápidamente cuando la latencia en la red se incrementa. La idea es usar diferentes valores de  $\alpha$ , uno para la tendencia hacia el incremento del retardo, y el otro para la tendencia a la disminución del retardo.

El tercer algoritmo (algoritmo 3) tiene un enfoque un poco diferente. Se fundamenta en utilizar la demora mínima de todos los paquetes recibidos en la ráfaga de audio anterior (k-1) como la demora medio.

El cuarto algoritmo (algoritmo 4) incluye la detección de picos de latencia. Un pico constituye un aumento repentino y elevado del retraso de red de extremo a extremo y está seguido de una serie de paquetes que llegan casi simultáneamente, conduciendo a la finalización del pico. Los primeros algoritmos no se adaptan lo suficientemente rápido en el caso de los picos, tomando mucho tiempo para aumentar sus estimaciones del retardo y para decrementarlas cuando el pico se acaba. Sin embargo el algoritmo 4, funciona según dos modos de operación, dependiendo de si se ha detectado un pico. Para cada paquete que llega al receptor, el algoritmo comprueba el modo actual y en caso necesario, cambia su modo.

Si un paquete llega con un retardo mayor que el umbral dado (por ejemplo un cierto múltiplo del actual retardo), el algoritmo cambia al modo de pico. La detección de la terminación del pico hace uso de una variable "var" para ajustar la pendiente del pico. Cuando su valor es bastante pequeño, el algoritmo regresa al modo normal.

En la figura 2.5 se muestran los pseudocódigos para los cuatro algoritmos de Ramjee tratados anteriormente.

<p><math>n_i</math> : demora de red para el paquete <math>i</math>.  <math>\alpha = 0,998002</math>.  <math>\beta = 0,75</math>.</p> <p><b>Algoritmo 1</b>  <math>\hat{d}_i = \alpha \hat{d}_i + (1 - \alpha)n_i</math></p> <p><b>Algoritmo 2</b>          if <math>n_i &gt; \hat{d}_i</math>  <math>\hat{d}_i = \beta \hat{d}_i + (1 - \beta)n_i</math>          else  <math>\hat{d}_i = \alpha \hat{d}_i + (1 - \alpha)n_i</math>          end</p> <p><b>Algoritmo 3</b>          Para el primer paquete de una ráfaga  <math>\hat{d}_i = n_i</math>          Para todo paquete recibido          if <math>n_i &lt; \hat{d}_i</math>  <math>\hat{d}_i = n_i</math>          end</p>	<p><math>n_i</math> : demora de red para el paquete <math>i</math>.  <math>\alpha = 0,785</math>.</p> <p><b>Algoritmo 4</b>          if <i>normal_mode</i>          if <math> (n_i - n_{i-1})  &gt; 2\hat{v}_i + 800</math>  <math>var = 0</math>  <math>normal\_mode = false</math>          end  <math>\hat{d}_i = \alpha \hat{d}_i + (1 - \alpha)n_i</math>          else  <math>var = \frac{var}{2} + \frac{ 2n_i - n_{i-1} - n_{i-2} }{8}</math>          if <math>var \leq 63</math>  <math>normal\_mode = true</math>          else  <math>\hat{d}_i = \hat{d}_i + n_i - n_{i-1}</math>          end          end</p>
---	--

Figura 2.5: Pseudocódigos para los algoritmos 1, 2, 3 y 4 de Ramjee [53]

El algoritmo 5, presentado en [53] adapta dinámicamente  $\beta$  para lograr una mejor calidad. El valor de  $\beta$  es calculado para el primer paquete de una ráfaga como:

$$\beta = \min\left(\max\left(\frac{a}{\hat{d}_i}, 1\right), 10\right) \quad (2.6)$$

donde  $a$  es una constante.

La idea es reducir los valores de  $\beta$  con el incremento de la demora estimada de la red. La estimación de la demora de la red es la misma que la utilizada en el algoritmo 2. Los valores del coeficiente son acotados entre 1 y 10 [53].

En la figura 2.6 se muestra el pseudocódigo del algoritmo 5.

**Algoritmo 5**

$n_i$ : demora de la red para el paquete  $i$ .  
 $t_i$ : estampa de tiempo de transmisión del paquete  $i$ .

Para el primer paquete de una ráfaga  
 $\Omega = \min\left(\max\left(\frac{a}{\hat{d}_i}, 1\right), 10\right)$   
 $p_o = \hat{d}_i + \Omega \hat{v}_i$

Para todo paquete recibido  
 if  $n_i > \hat{d}_i$   
 $\hat{d}_i = \beta \hat{d}_i + (1 - \beta)n_i$   
 else  
 $\hat{d}_i = \alpha \hat{d}_i + (1 - \alpha)n_i$   
 end  
 $\hat{v}_i = \alpha \hat{v}_i + (1 - \alpha)|(\hat{d}_i - n_i)|$   
 $p_i = p_o + t_i$

Figura 2.6: Pseudocódigo del algoritmo 5 [53]

El algoritmo eEM opera al igual que los algoritmos anteriormente descritos entre ráfagas, o sea, el *buffer* de reproducción es ajustado durante los periodos de silencio maximizando el Factor R esperado para la siguiente ráfaga [54].

La figura 2.7 muestra los bloques principales involucrados en este algoritmo: las estadísticas relevantes para las pérdidas y la demora son predichas por medio de los paquetes anteriormente enviados, basado en esta información, el ajuste del *buffer* de reproducción se realiza de tal manera que se maximice la calidad conversacional esperada durante unidades conversacionales futuras [54].

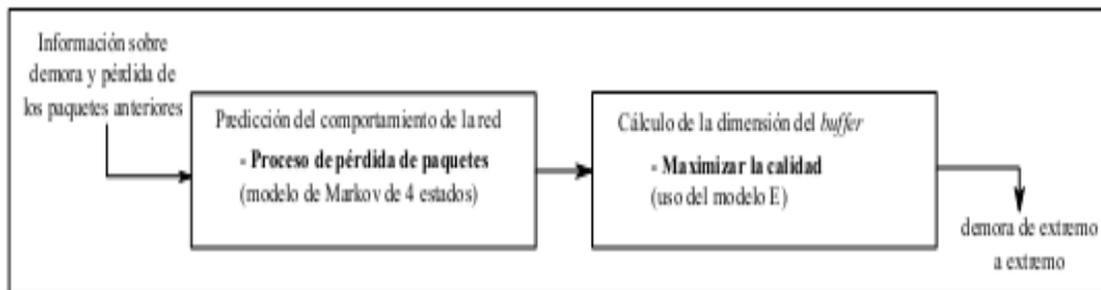


Figura 2.7: Muestra de la estrategia de reproducción del algoritmo 6 [54]

### 2.3 Algoritmos de estimación de calidad de voz para redes que soportan VoIP

Debido a la importancia que tiene tanto la aplicación de voz dentro de las preferencias de los suscriptores, como el compromiso de brindar el servicio con una calidad percibida por el usuario satisfactoria, resulta conveniente poder realizar mediciones de la calidad de voz de la red que la ofrece de manera que esta se corresponda con la percibida por el usuario final.

Para medir la calidad de voz percibida por el usuario, existen dos tipos de métodos utilizados: los métodos subjetivos y objetivos. Según los métodos objetivos la calidad de la voz se establece a través de la opinión del usuario. La calidad de audio puede ser evaluada directamente (*Absolute Category Rating, ACR*), o en forma comparativa contra un audio de referencia (*Degradation Category Rating, DCR*). El MOS (*Mean Opinión Score*) es el promedio de los ACR medidos entre un gran número de usuarios. La metodología de evaluación subjetiva más ampliamente usada es la del MOS estandarizada en la recomendación ITU-T P.800 [55]. Los métodos subjetivos representan la medida más fiable y respetada para medir la calidad percibida de la voz, pero resultan ser costosos y difíciles de implementar de forma permanente, en este sentido los métodos objetivos resultan ser los más apropiados [56]. Existen dos tipos de métodos de medición objetiva de calidad de voz propuestos por la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones): los que utilizan métodos intrusivos, que basan su estimación en la comparación de señales y los métodos no intrusivos, que basan su estimación en los parámetros funcionales de red [17]. El principal inconveniente de los métodos objetivos es que estos no dan como resultado una representación directa de la calidad percibida por el usuario, por tanto se hace necesaria su calibración en base a los resultados obtenidos de los métodos subjetivos, fundamentalmente del MOS [56].

#### 2.3.1 Métodos de medición intrusivos

Los métodos intrusivos típicamente utilizan dos señales de entrada, una de referencia que constituye la señal original y una señal degradada tomada de la red que está siendo tomada para la evaluación de calidad. Los algoritmos intrusivos determinan cuantas muestras de audio

recibidas son percibidas similarmente a la muestra original, esta determinación se basa en características de percepción humanas y son predichas de manera confiable mediante resultados de pruebas subjetivas, particularmente en el MOS [57].

Existen varios métodos objetivos de medición de calidad intrusivos entre los que se destacan los basados en el Dominio perceptual que funcionan en base a la percepción de audio humana y son considerados los mejores métodos de evaluación de calidad de voz dentro de esta gama. *Perceptual Speech Quality Measure* (PSQM), *Perceptual Analysis Measurement System* (PAMS), *Measuring Normalizing Block* (MNB), *Enhanced Modified Bark Spectral Distortion* (EMBSD) y *Perceptual Evaluation of Speech Quality* (PESQ), representan algunas de las variantes típicas de este método [57].

### 2.3.1.1 PESQ

PESQ es el último de los estándares intrusivos desarrollados por la UIT [57]. La idea que maneja este estándar es la de estimar la degradación de una muestra de voz usando un modelo del sistema auditivo humano [11]. La figura 2.8 muestra un esquema del sistema PESQ.

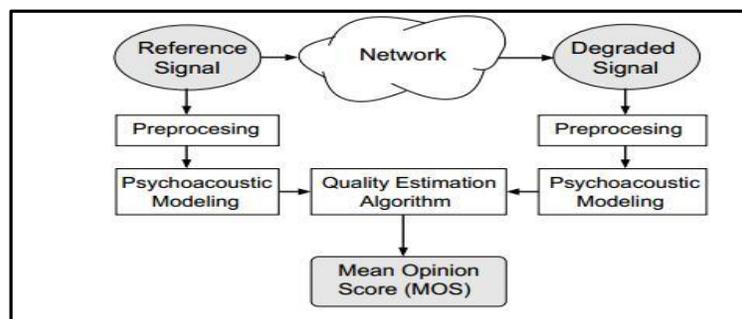


Figura 2.8: Estructura del proceso PESQ [5]

En el PESQ se analizan ambas señales y se calcula su representación en el dominio perceptual basado en un modelo psicoacústico. Las diferencias entre la señal original y la degradada son calculadas mediante un algoritmo de estimación del que se deriva un valor de MOS subjetivo [17]. Lo esencial en este proceso es la transformación de la señal inicial y la degradada, en una representación interna que intenta reproducir la representación psicoacústica de señales de audio en el sistema auditivo humano, teniendo en cuenta la frecuencia por percepción y la sonoridad.

El modelo cognitivo de PESQ termina brindando una distancia entre la señal vocal inicial y la señal vocal degradada (“nota PESQ”), la que corresponde a su vez con una predicción de la MOS subjetiva. La nota PESQ se hace corresponder a una escala similar a la de MOS, un número único en una escala de  $-0,5$  a  $4,5$ , aunque en la mayoría de los casos la gama de las salidas estará entre  $1,0$  y  $4,5$ , que es la gama normal de valores de MOS que suelen darse en un experimento sobre la calidad de voz [55].

La evaluación de la calidad de la conversación usada en PESQ es desarrollada *off-line* debido a su complejidad computacional. La validez de PESQ está suficientemente correlacionada con calificaciones subjetivas de la red [17].

### 2.3.2 Métodos de medición no intrusivos

Los métodos no intrusivos, también conocidos como pasivos son desarrollados para ejecutar mediciones de tráfico de aplicaciones en tiempo real. A diferencia de los métodos intrusivos, estas mediciones son ejecutadas sin conocer la señal original. Los métodos tradicionales no intrusivos realizan su predicción directamente de diferentes parámetros de deterioro de la red IP, por ejemplo *jitter*, retardo y pérdida de paquetes [57]. La figura 2.9 muestra un esquema de esta técnica.

Los métodos no intrusivos estiman la calidad percibida utilizando directamente los parámetros funcionales de la red, en donde estos y la calidad percibida por el usuario están directamente relacionados y forman junto a otras medidas, la calidad de servicio entregada al usuario [56].

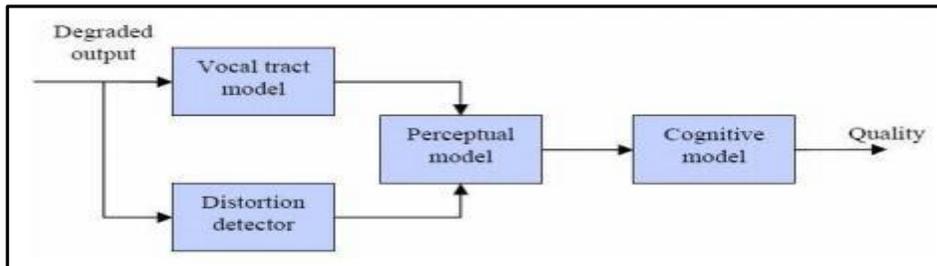


Figura 2.9: Técnica no intrusiva [56]

#### 2.3.2.1 Modelo E

El método de medición objetiva más popular es el denominado Modelo E perteneciente a los métodos no intrusivos. Modelo E o *E-Model*, es una abreviatura de “*European Telecommunications Standards Institute (ETSI) Computation Model*”, el cual fue desarrollado por un grupo de la ETSI seleccionado por la UIT. El modelo E se diferencia de otros métodos debido a que él representa a la misma vez una herramienta de simulación de la red [57]. La figura 2.10 muestra un esquema funcional del Modelo E.

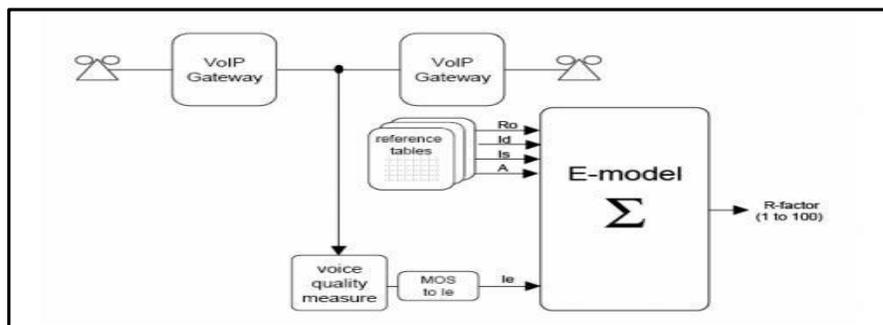


Figura 2.10: Esquema funcional del Modelo E [57]

Este modelo funciona en base a asumir que cada tipo de degradación de la calidad está asociado con cierto tipo de factor de daño. El resultado primario del modelo es una cuantificación escalar de la calidad de audio que se estima percibirá un usuario. Una característica fundamental de este modelo es la utilización de factores de degradación de la transmisión que reflejen los efectos de los modernos dispositivos de procesamiento de señales. El modelo E calcula, en base a varios parámetros medibles de la red, el parámetro R

(Rating Factor) que puede relacionarse con una escala de MOS como muestra la tabla 2.2 [15].

Tabla 2.2: Relación del parámetro R con el MOS

Satisfacción de los usuarios	Parámetro R	Valor MOS
<b>Muy Satisfechos</b>	90	4.3
<b>Satisfechos</b>	80	4.0
<b>Algunos usuarios no satisfecho</b>	70	3.6
<b>Muchos usuarios no satisfechos</b>	60	3.1
<b>Casi todos los usuarios no satisfechos</b>	50	2.6

R se obtiene según la ecuación 2.7:

$$R = (R_o - I_s) - I_d - I_{e-eff} + A \tag{2.7}$$

El Modelo E calcula los sumandos  $R_o$ ,  $I_s$ ,  $I_d$ ,  $I_{e-eff}$  a partir de los parámetros de transmisión que se observan en el modelo de referencia de la figura 2.11.  $R_o$  (efecto del ruido o relación señal a ruido) e  $I_s$  (relacionado con el volumen de la conexión y con la cuantificación) son intrínsecos a la señal de voz en la entrada de la red y no dependen de ésta, son irrelevantes en el caso de análisis de VoIP.  $I_d$  modela las degradaciones producidas por los retardos y el eco, mientras que  $I_{e-eff}$  representa las degradaciones producidas por los códec y por las pérdidas de paquetes de distribución aleatoria.  $A$  representa el factor de ventaja que significa que el usuario aceptaría una degradación en la calidad a cambio de facilidad de acceso [55].

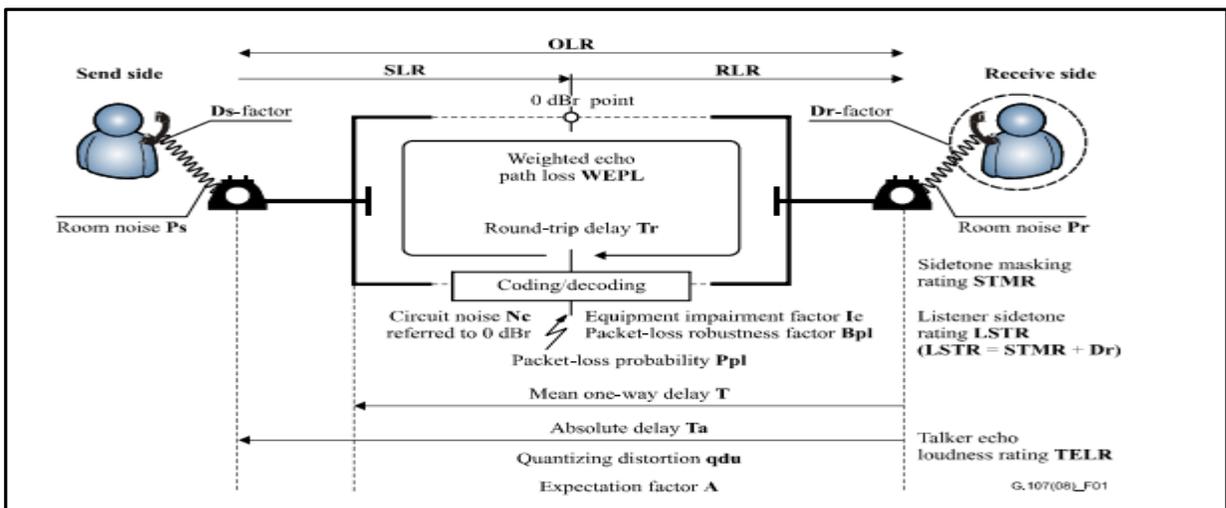


Figura 2.11: Factores para el cálculo de R [58]

### 2.3.3 Comparación de los métodos objetivos

Si se comparan los métodos objetivos, los métodos intrusivos presentan un mejor desempeño en la correlación con respecto a los métodos subjetivos, PESQ por ejemplo presenta un grado de correlación con el método DMOS cercano a 0,95 comparado con un 0,7 del Modelo E [56]. Sin embargo los métodos intrusivos para estimar la calidad percibida hacen uso completo del canal de transmisión haciendo inviable su implementación como sistema de medición en línea, y su desempeño está sujeto a la correcta alineación de la señal comparada con la señal patrón, además, para estimar la calidad hacen uso de una señal de referencia, con la que es difícil contar cuando se quiere hacer valoraciones de la calidad a partir de una traza obtenida del desempeño de una red cuyas características son conocidas. Los métodos no intrusivos no tienen estos inconvenientes, y principalmente no requieren de señales sin afectaciones para estimar la calidad percibida, lo que los hace candidatos potentes para monitorear la calidad percibida de la voz en redes LTE. Entre los métodos no intrusivos se destaca el modelo E analizado anteriormente. Por las razones comentadas entonces es considerado al Modelo E como el método de medición de calidad a ser utilizado en esta investigación para evaluar calidad de servicio de aplicaciones de voz en entornos LTE.

## 2.4 Mecanismo basado en RLF para el *buffer* de reproducción

Como ya ha sido mencionado con anterioridad la información obtenida de la caracterización de los eventos de radio, puede ser utilizada para implementar un mecanismo en el *buffer* de reproducción que anticipándose a la ocurrencia del evento de radio posibilite establecer un valor de demora tal que impida la pérdida excesiva de paquetes. En [6] se trata una idea referente a esta temática. En esta patente se establece que un *buffer de jitter* en un receptor de voz sobre LTE puede ser influenciado por realimentación a nivel de radio (*Radio Link Feedback*, RLF) desde el extremo local y remoto para ajustar preventivamente la demora del *buffer de jitter* en anticipación a pérdidas futuras predichas que tienen una alta probabilidad de ocurrencia. Los eventos de radio de la RLF y los escenarios que disparan los ajustes preventivos pueden ser identificados, y sus usos pueden ser expresados en términos de fórmulas matemáticas. En diseños anteriores, el *jitter* instantáneo es derivado de una historia ponderada del flujo de media, y consecuentemente solo los paquetes que ya han llegado se utilizan para calcular el *jitter* instantáneo para ajustar el tamaño del *buffer*. Proveyendo y usando RLF desde los extremos local y remoto, la demora anticipada (para paquetes que aún no han arribado) puede ser utilizada para preventivamente ajustar el *buffer*, minimizando la pérdida de paquetes sin introducir demora innecesaria [6].

Un elemento de procesamiento acoplado al radio y al *buffer de jitter* en el dispositivo UE puede operar para identificar eventos de radio que afectan el tiempo de futuros paquetes que serán recibidos por el radio enlace, calcular una demora proyectada asociada con los eventos de radio, y determinar una demora efectiva de acuerdo a la demora proyectada. La demora efectiva puede entonces ser utilizada para controlar cuando los paquetes entrantes que ya están en cola, son liberados del *buffer de jitter* [6].

El elemento de procesamiento en el UE también puede operar para estimar dos factores empíricos para cada tipo de evento de radio, y calcular la demora proyectada asociada a cada

uno de ellos de acuerdo a estos dos factores. Un primer factor empírico puede ser correspondiente a una demora esperada causada por el tipo de evento de radio en específico, y un segundo factor empírico correspondiente a la duración de este. Al calcular la demora proyectada, el elemento de procesamiento puede aplicar una función de ponderación al segundo factor empírico [6].

Una vez que se han identificado los eventos locales y remotos que probablemente contribuirán a picos en el *jitter*, se pueden estimar un número específico de factores empíricos para cada tipo de evento  $e$ . Como se mencionó anteriormente se pueden estimar dos factores empíricos. Estos son  $D_e$  y  $T_e$ , los que corresponden a la demora adicional esperada causada por el evento y la duración del mismo, respectivamente [6]. La demora adicional total que se espera del enlace de radio local puede ser definida mediante la ecuación 2.8:

$$D_{radio}(t) = \sum_e D_e W(t - t_e, T_e) \quad (2.8)$$

donde:

$D_e$ : demora asociada al evento  $e$ .

$t - t_e$ : tiempo actual menos el tiempo en el cual el evento ocurrió.

$T_e$ : duración del deterioro.

$W(t; T)$ : función de ponderación de tiempo adecuada.

De esta manera la demora total óptima del *buffer* de *jitter* puede ser calculada a partir de la ecuación 2.9:

$$D_{defectiva} = D_{radio}(t) + D_{cola} \quad (2.9)$$

donde  $D_{cola}$  es la demora calculada para todos los paquetes que ya han sido puestos en cola en el *buffer* de *jitter*.

Los beneficios de integrar la información descrita anteriormente en la implementación del *buffer* de *jitter* incluyen la capacidad de hacer el algoritmo usado para  $D_{cola}$  más agresivo (resultando en demoras más cortas) sin incrementar el riesgo de comprometer el flujo de media debido a deterioros de radio. También permite insertar demora preventivamente en el sistema para compensar el *jitter* inducido por el deterioro provocado por un futuro evento de radio, sin esperar que el *buffer* de *jitter* pierda un paquete, y luego adaptarse al evento después del hecho. Finalmente, hace posible que el *buffer* de *jitter* no tenga que adaptarse innecesariamente a una mayor latencia debido a eventos con degradación de condiciones de radio de una única vez donde la degradación es solo momentánea [6].

Toda la información descrita anteriormente como ya había sido mencionado se encuentra referida a una propuesta de algoritmo para el *buffer* de reproducción realizada en [6], donde se maneja la idea de ajustar la demora establecida por el *buffer* de reproducción utilizando RLF con el fin de reaccionar ante la ocurrencia de un evento de radio de manera anticipada, evitando así el impacto negativo que su influencia implica.

### 2.4.1 Propuesta del mecanismo para el evento de radio *handover*

Utilizando como base la idea manejada en la patente analizada con anterioridad se procedió a crear una propuesta de implementación de un mecanismo que ajuste la demora del *buffer* de reproducción ante la ocurrencia de un *handover*. La selección de implementar el mecanismo en el *buffer* de reproducción estuvo sujeta a la condición de que es en éste donde único se le puede realizar un tratamiento a los paquetes recibidos, encaminado a contrarrestar los efectos negativos de la transmisión en la demora de los mismos. Por lo tanto constituye el único medio a través del cual se puede mejorar la calidad percibida por los usuarios y contrarrestar las afectaciones a la aplicación antes de que sea reproducida la cadena de voz recibida en el terminal.

Para la detección del *handover* en una primera variante se trabajó con la señalización propia del evento de radio, de manera que identificando la etapa de preparación del *handover*, iniciada con el envío desde el UE hacia el eNB del reporte de condición de HO y concluida con el envío por parte del eNB fuente del comando de HO al UE, era posible contar con un espacio de tiempo para establecer en el *buffer* una demora adecuada para asumir el evento venidero. Trabajando con esta variante se detectó que debido a que los algoritmos de *buffer* utilizados ajustan la demora de la ráfaga siguiente en los intervalos de silencio, y atendiendo al comportamiento de la aparición de estos intervalos y la duración de las ráfagas de actividad, el tiempo con que se cuenta en la etapa de preparación del *handover* es insuficiente para hacer un ajuste efectivo, pues existe una gran probabilidad de que esta etapa no coincida con un período de silencio y fuera por lo tanto imposible adaptar la demora del *buffer* de reproducción.

En [6] se hacía alusión a la utilización en el terminal de RLF para anticipar la ocurrencia de eventos de radio. Este RLF puede ser implementado con base en la señal RSRP. Con esta señal el UE informa al eNB sobre la potencia de la señal del canal descendente de la celda de servicio y las celdas vecinas para las que fue configurada la medición.

Por las razones que fueron analizadas sobre la no viabilidad de la utilización de la etapa de preparación en la detección se consideró más apropiada la variante de trabajar con los valores de RSRP e ir monitoreándolos de manera que analizando su tendencia se previera la ocurrencia de un *handover*. De esta manera, cuando el nivel de RSRP de la celda de servicio mantiene una tendencia decreciente y el de la celda candidata creciente, al punto de estar muy cercanos a la condición de un evento de *handover*, el eNB advertiría la probable ocurrencia y entonces podría alertar a los UEs (el perteneciente a su celda de servicio y el RH), a través de una señal destinada para este fin, para que adaptasen el valor de la demora del *buffer* de reproducción en el intervalo de silencio inmediato.

Este mecanismo permitiría entonces conocer por parte del receptor la ocurrencia de un *handover* y consecuentemente preparar con antelación la reacción por parte del *buffer* de reproducción, con el fin de disminuir el impacto negativo de la acción del evento de radio y mejorar por lo tanto la calidad percibida por el usuario de la aplicación de voz.

En este trabajo se realizó un experimento en el *buffer* de reproducción de un receptor VoLTE que puede implementar los seis algoritmos tratados anteriormente en este capítulo con vistas a analizar la calidad percibida por los usuarios. Esta prueba se basó en la detección de picos de *handovers* y su correspondiente tratamiento a la hora de establecer el valor de demora para

el instante de reproducción de los paquetes, de aquí su denominación como mecanismo de detección de *handovers*. El valor al que se adaptó la demora efectiva del *buffer* de reproducción en caso de *handover* fue de 250 ms, el cual fue establecido en base al análisis del conocimiento de la demora que introduce la red en la conexión de extremo a extremo y la caracterización del evento de radio realizada en el capítulo 1. El valor es asumido para la demora del *buffer* de reproducción durante todo el período de actividad en el que acontece el evento de radio, en el intervalo de silencio posterior a esta etapa de actividad la demora será estimada nuevamente de acuerdo al funcionamiento tradicional del algoritmo de predicción con que opere el *buffer* de reproducción.

## 2.5 Consideraciones finales del capítulo

Con el simulador de eventos discretos NS-3 se puede simular una red LTE con un alto grado de detalle, pudiendo modelar tanto la interfaz de radio como el EPC mediante el proyecto LENA, permitiendo una correcta evaluación de los protocolos, interfaces y señalización de interés para el trabajo.

Como el código fuente de NS-3 es completamente accesible, se puede modificar para obtener la demora de cada paquete en el flujo de media, posibilitando la obtención de una traza correspondiente a la conexión punto a punto de dos UEs que establecen una llamada VoLTE.

El Modelo E constituye un algoritmo adecuado de evaluación de la percepción de calidad para la aplicación de voz en LTE, en base a la consideración de su capacidad de valoración del desempeño atendiendo a parámetros de la red sin necesidad de una señal de referencia con la cual establecer una comparación.

Para realizar acciones preventivas al *handover*, traducidas en la capacidad de conocer la ocurrencia del evento de radio con anticipación y efectuar ajustes acordes a la situación, es posible trabajar con un mecanismo para el *buffer* de reproducción que adapta la demora del instante de reproducción en un período de actividad donde ocurre al menos un *handover* al valor de 250 ms, valiéndose para ello de la realimentación provista por el eNB para detectar la ocurrencia del evento de radio.

## **CAPÍTULO 3. Evaluación del funcionamiento de la detección de *handovers* en el *buffer* de reproducción**

En este capítulo se presenta la traza de VoLTE obtenida utilizando el simulador de eventos discretos NS-3, así como la resultante de la inserción de intervalos de silencio a la traza inicial. En esta traza se observa la ocurrencia de *handovers*, eventos de radio característicos y fundamentales en la movilidad de la red LTE. Estos *handovers* introdujeron picos de demora asociados a la interrupción del flujo de datos durante la etapa de ejecución, como resultado de la característica de implementar la técnica *Break Before Connect* o *handover* duro, que provoca variaciones en el tiempo de llegada de los paquetes al UE. Estas variaciones normalmente son tratadas a través del *buffer* de reproducción que implementa determinados algoritmos de predicción para estimar la demora que debe aplicar en cada ráfaga. Bajo este principio en este capítulo se realizó un análisis del desempeño de seis algoritmos de reproducción en términos de calidad en el tratamiento de la traza VoLTE obtenida en la simulación. Posteriormente se procedió a evaluar el comportamiento de dichos algoritmos teniendo en cuenta la detección de picos que provee la implementación del mecanismo descrito en el capítulo anterior, basado en la anticipación a la ocurrencia del *handover*, con el objetivo final de valorar el comportamiento de la calidad percibida por el usuario, sobre la base de un estudio comparativo para ambos casos.

La evaluación se realizó usando el Modelo E a partir de los parámetros demora y pérdida de paquetes. En el trabajo se utilizó la forma de evaluar la calidad a través del cálculo del factor R a partir de los parámetros promedios para el tiempo de conversación. Sin embargo, este valor promedio no arroja claridad en cuanto al comportamiento durante toda la conversación. Por esta razón se calculó además el factor R instantáneo dividiendo el tiempo de conversación en segmentos de 10s (corresponden a 500 paquetes con 20ms cada uno) y calculando el factor R a partir de los parámetros medios de cada segmento. Este factor R se hizo coincidir con un valor de MOS según la correspondencia descrita en el capítulo 2, de modo que se obtienen valores de MOS instantáneos que describen la precepción del usuario en situaciones particulares de la traza.

### **3.1 Traza VoLTE**

La traza que se obtuvo como resultado de la implementación del escenario creado para LTE en el simulador NS-3 se muestra en la figura 3.1, que contiene las demoras de los enlaces de bajada y subida, la demora del *core* y los picos de *handover*. La traza correspondiente a la figura 3.1, contiene 38 *handovers*, distribuidos 19 en el UL y 19 en el DL.

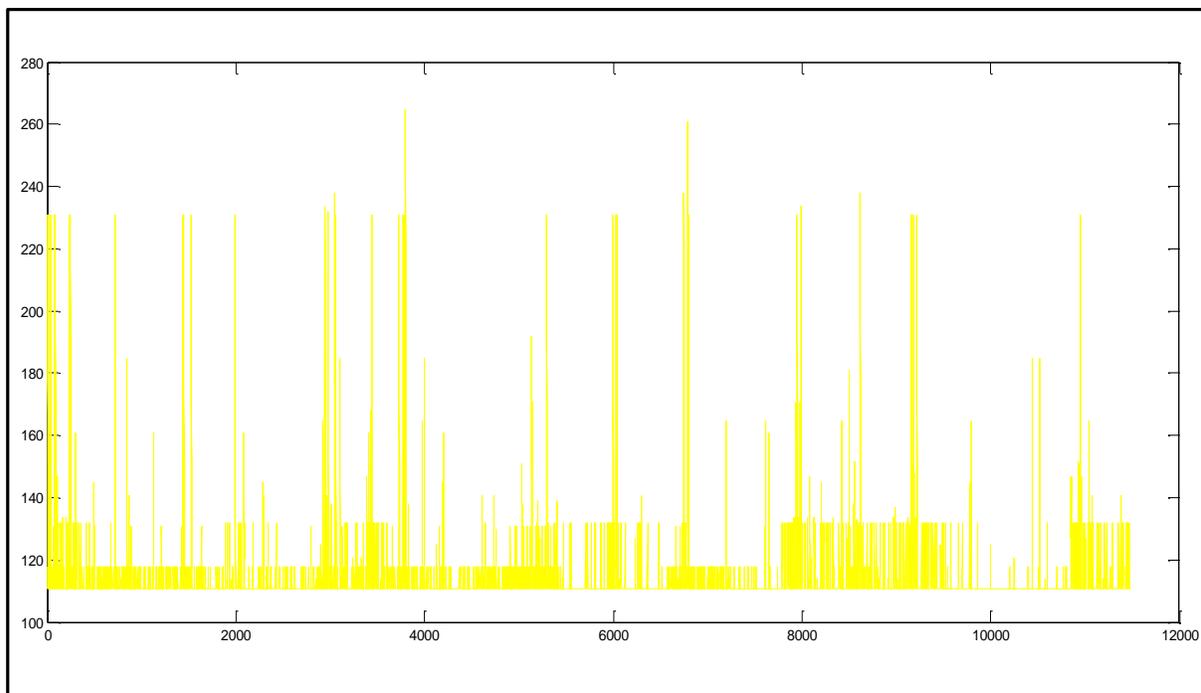


Figura 3.1: Traza de VoLTE obtenida mediante simulación

Como se puede apreciar la demora de extremo a extremo introducida por el *core* y ambos enlaces no rebasa normalmente los 200 ms, por lo que la calidad de servicio se estima que sea muy buena. Este patrón se rompe cuando ocurren los *handovers* ya que, según se observa, se superan los 200 ms de demora de extremo a extremo, por lo que se anticipa una caída de la calidad producto de su ocurrencia, que se corresponde con los análisis realizados en los capítulos anteriores.

### 3.1.1 Inserción de silencios

Los *buffer* de reproducción pueden adaptar su demora de dos maneras: intra-ráfagas, donde se modifica la demora de extremo a extremo durante la conversación, ya sea dentro del período de actividad o durante el de silencio, y por otro lado se encuentra la vertiente inter-ráfaga donde el cambio del tamaño del *buffer* se produce solo durante los intervalos de silencio. Los algoritmos para el *buffer* de reproducción seleccionados ajustan la demora de acuerdo a la variante inter-ráfaga, como fue discutido en el capítulo anterior, por lo que resulta necesario añadir de manera artificial intervalos de silencio propios de una conversación a la traza obtenida de la simulación cuyo flujo es continuo. Esta inserción se realizó de acuerdo a la recomendación de la UIT [47], obteniéndose producto de la inserción la pérdida de algunos *handovers* al coincidir con la posición preestablecida por la recomendación para los intervalos de silencios. En la figura 3.2 se muestra la traza anteriormente expuesta con los intervalos de silencios insertados.

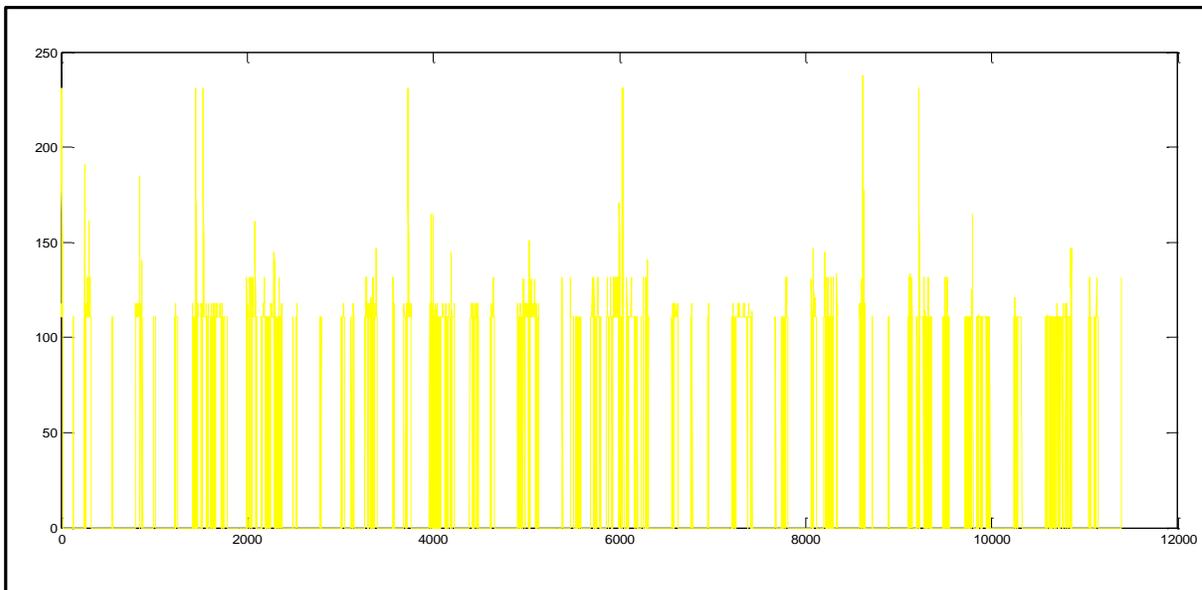


Figura 3.2: Traza con períodos de silencio insertados

### 3.2 Evaluación de los algoritmos de predicción del *buffer* de reproducción

A continuación se muestra en la figura 3.3, la actuación de los seis algoritmos de reproducción del *buffer* mencionados en el capítulo anterior sobre la traza de voz. Estos algoritmos mantienen constante la demora durante los períodos de actividad ajustando el valor que ésta tendrá en cada ráfaga durante los intervalos de silencio, para lo cual realizan una estimación de la demora basándose en la que tuvieron los paquetes recibidos y posteriormente aplicando criterios sobre el peso de las demoras más recientes o más antiguas en dependencia de las particularidades de cada algoritmo.

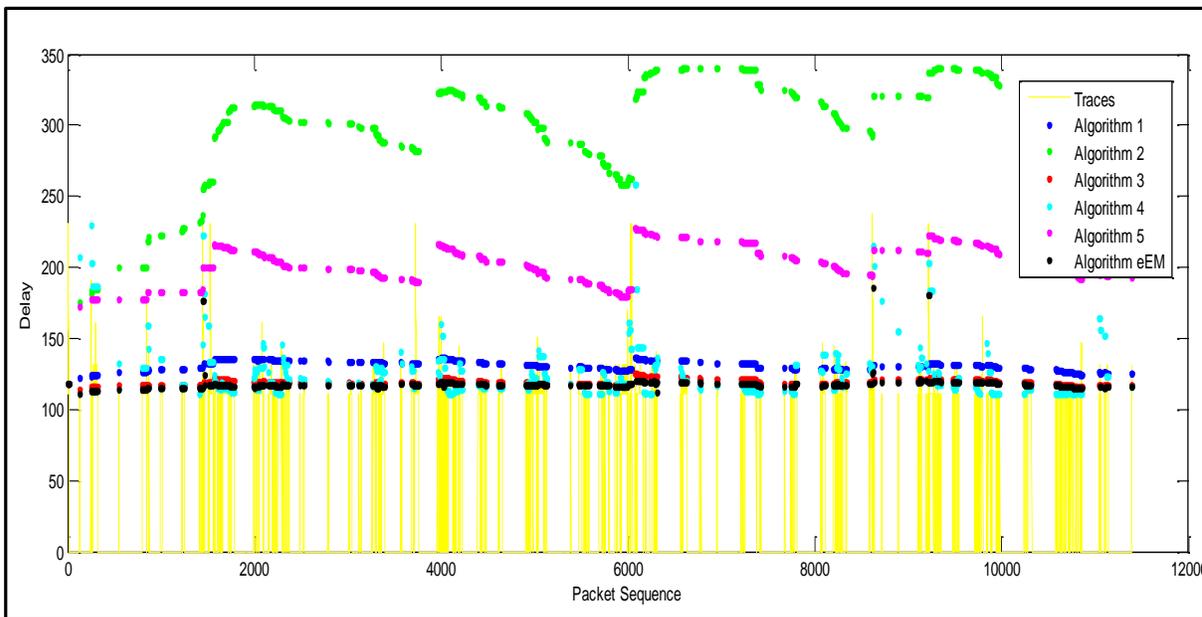


Figura 3.3: Comportamiento de los 6 algoritmos de reproducción evaluados

De las figuras 3.4 a la 3.9 se muestran los comportamientos del algoritmo 1 de Ramjee, el algoritmo 3 de Ramjee y el algoritmo eEM respectivamente.

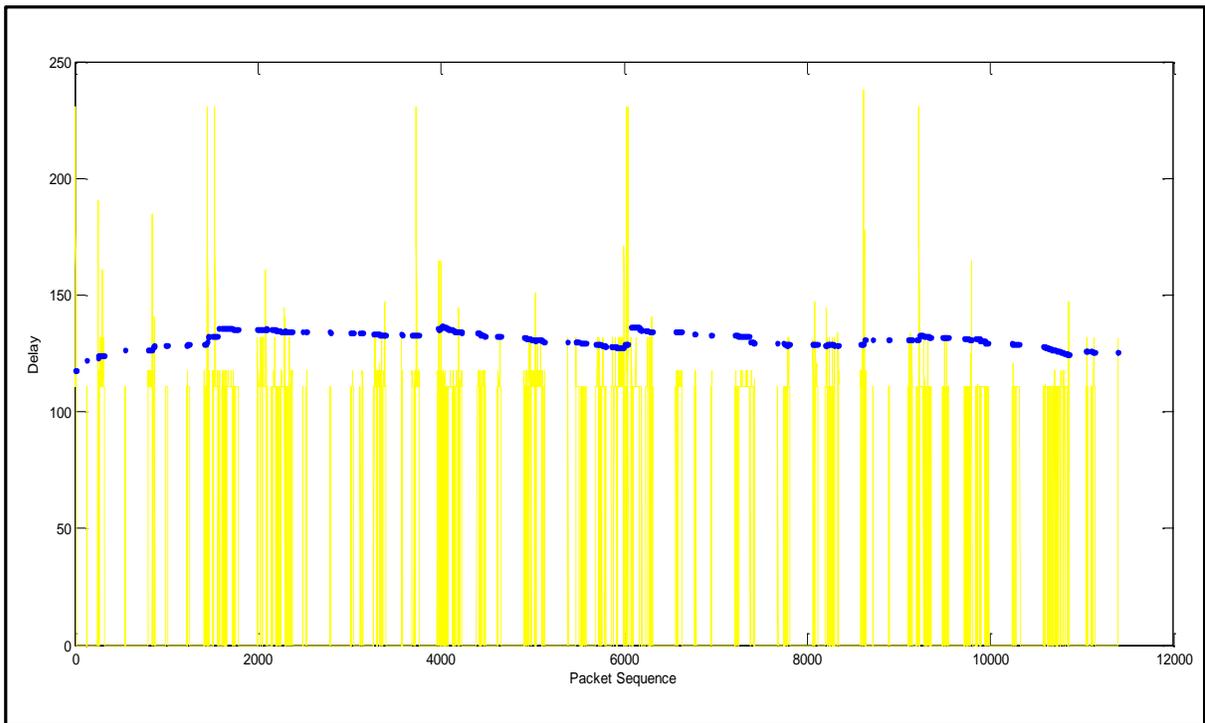


Figura 3.4: Comportamiento del algoritmo 1 de Ramjee

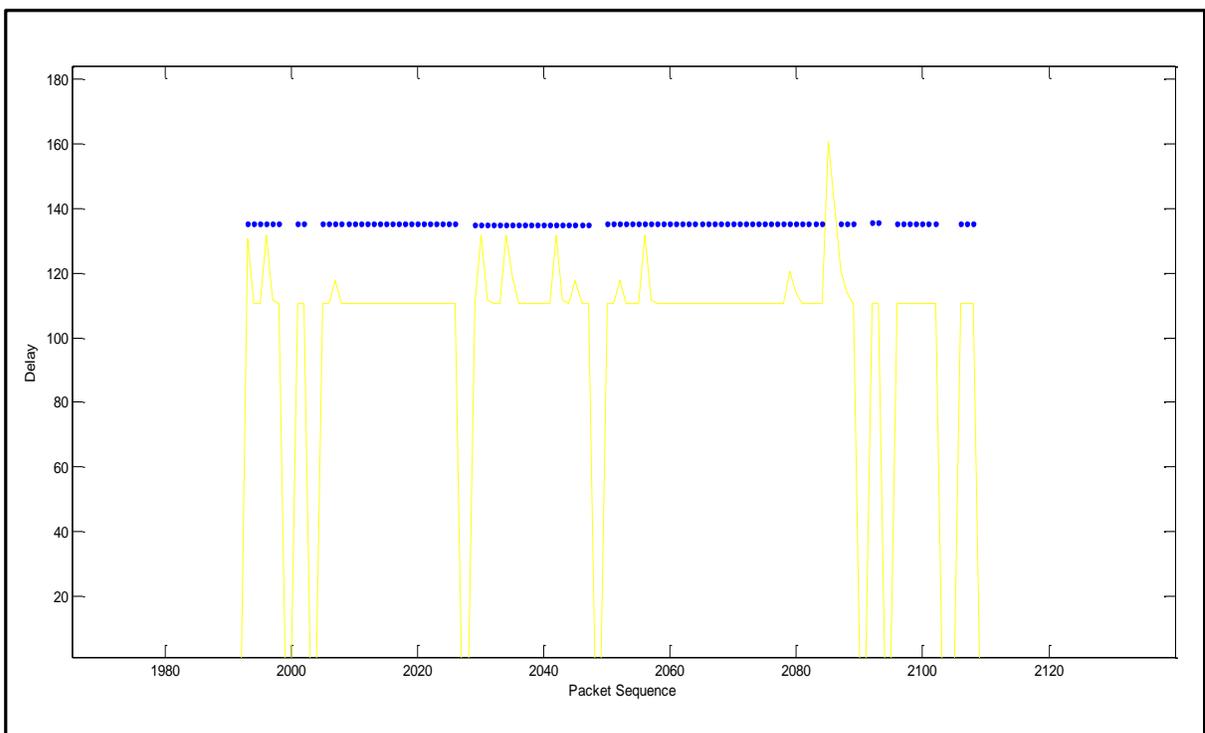


Figura 3.5: Particularización del comportamiento ante variaciones de la demora

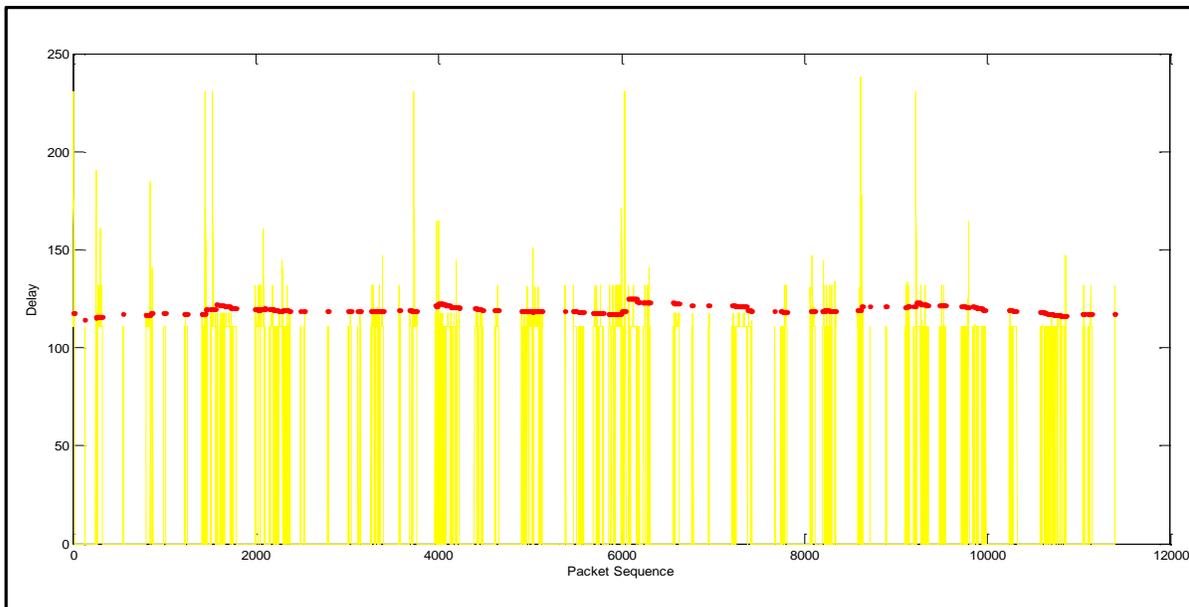


Figura 3.6: Comportamiento del algoritmo 3 de Ramjee

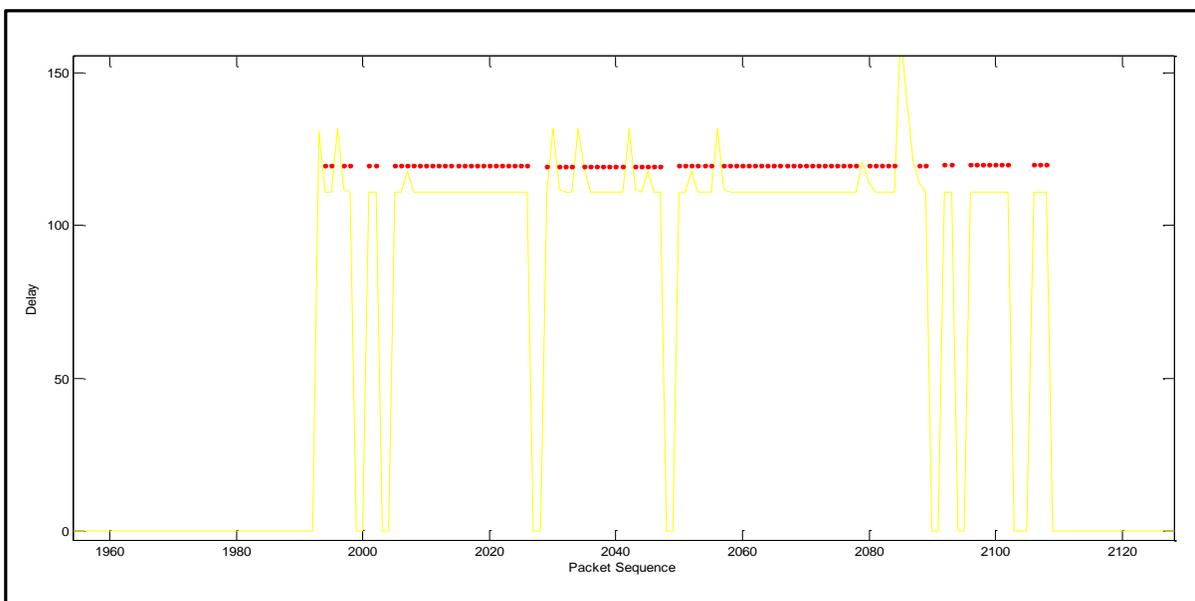


Figura 3.7: Particularización del comportamiento ante variaciones de la demora

Tras el análisis de los algoritmos representado en las figuras se comprobó que los tres tienen un comportamiento lento y estable. Estos son algoritmos muy ajustados a la hora de establecer el tamaño del *buffer* con la idea de incorporar la menor cantidad de demora posible. Para el caso del algoritmo eEM se comprueba que es el más estricto a la hora de ajustar el tamaño del *buffer*, permaneciendo muy cercano a los valores de la demora real de los paquetes cuando no ocurren variaciones, manifestando su cualidad de conferir mucho peso a observaciones anteriores de la demora, esta característica provoca que ante fluctuaciones pequeñas de la demora de la red ocurran pérdidas de paquetes como se ilustra en la figura 3.9.

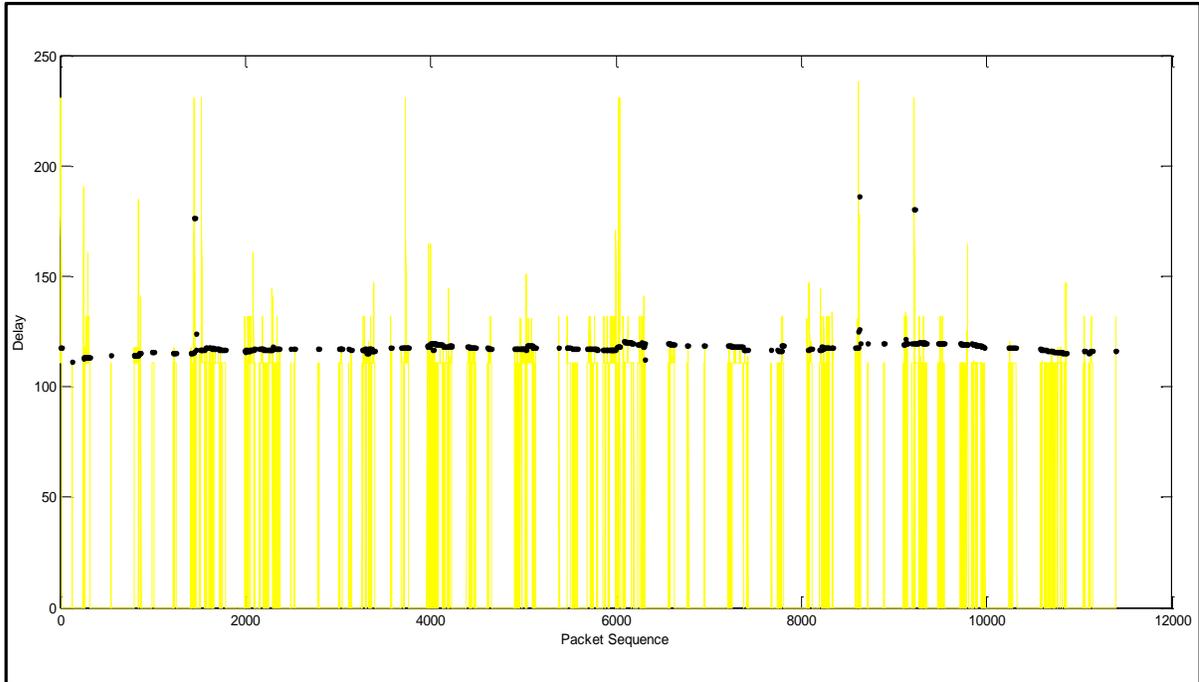


Figura 3.8: Comportamiento del algoritmo eEM

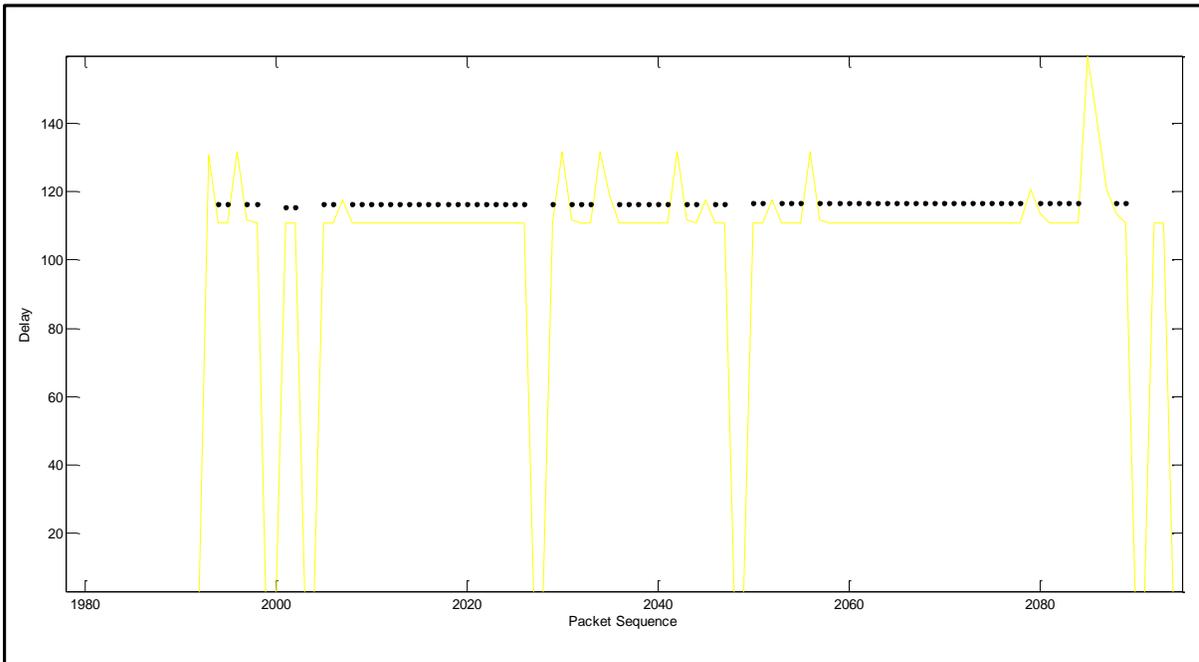


Figura 3.9: Particularización del comportamiento ante variaciones de la demora

Por su parte los algoritmos 3 y 1 realizan un ajuste menos estricto de la demora del *buffer* de reproducción que el implementado por el algoritmo eEM. Estos algoritmos se diferencian entre sí en que el 1 establece el valor de la demora de una forma menos cercana al valor real que el 3, o sea es el que menos ajustado lo realiza de los tres, lo cual le permite perder menor cantidad de paquetes cuando ocurren fluctuaciones pequeñas o medianas de la demora, como

se ilustra en la figura 3.5, a diferencia del algoritmo 3 que aunque no pierde paquetes ante pequeñas fluctuaciones de la demora, cuando estas son de valores un poco más considerables va a resultar imposible su correcto tratamiento por parte del mecanismo de reproducción del *buffer*; como se ilustra en la figura 3.7, sin embargo ambos algoritmos comparten la cualidad de no responder con agilidad ante los aumentos de demora, al igual que el algoritmo eEM. Esta característica hace que ante fluctuaciones o picos en la demora mayores, como puede ser la ocurrencia de un *handover*, no sean efectivos en el tratamiento y pierdan paquetes, cuestión quedó reflejada en las figuras 3.4, 3.6 y 3.8, donde se comprueba cómo efectivamente para el momento de un *handover* se pierden todos los paquetes asociados al pico de demora, provocando de esta manera un impacto negativo en la calidad percibida por el usuario.

En la figura 3.10 se refleja el desempeño del algoritmo 2 de Ramjee. Este algoritmo no desecha paquetes incluso cuando ocurren los *handovers*, sin embargo, la mayoría del tiempo hace una sobreestimación de la demora, introduciendo valores de la misma en ocasiones superior a los 300 ms, lo cual provoca una caída en la calidad de servicio en la aplicación de VoIP.

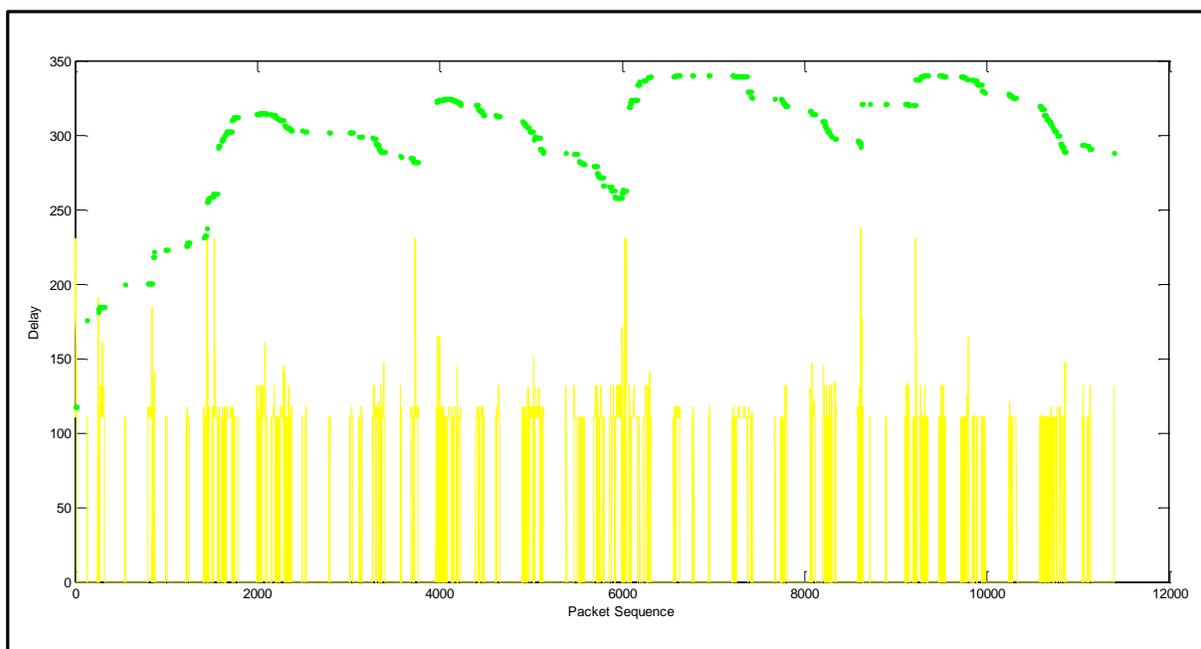


Figura 3.10: Comportamiento del algoritmo 2 de Ramjee

Este comportamiento viene dado por las características propias del Algoritmo 2. Este algoritmo usa un filtro con características de estabilidad siempre que sea posible, pero si se detecta incrementos significativos de la demora (presencia de un pico) el algoritmo conmuta a un filtro ágil que le permite seguir el pico, una vez que este ha terminado regresa al filtro estable, con lo que se comienza a sobreestimar durante mucho tiempo la demora hasta que se logra descender del pico. Esta sobreestimación de la demora se refleja en una caída del MOS.

Como en las características de la traza de demora de la aplicación de voz en LTE objeto de estudio se encuentra que los *handovers* ocurren espaciados con intervalos de tiempo cortos el Algoritmo 2 no contará con el tiempo necesario para retomar valores inferiores de demora, por lo tanto estará sobrestimando durante toda la conversación, esta particularidad por supuesto afecta la calidad percibida por el usuario.

El comportamiento del algoritmo 4 de Ramjee para la traza de VoLTE es mostrado en las figuras 3.11 y 3.12.

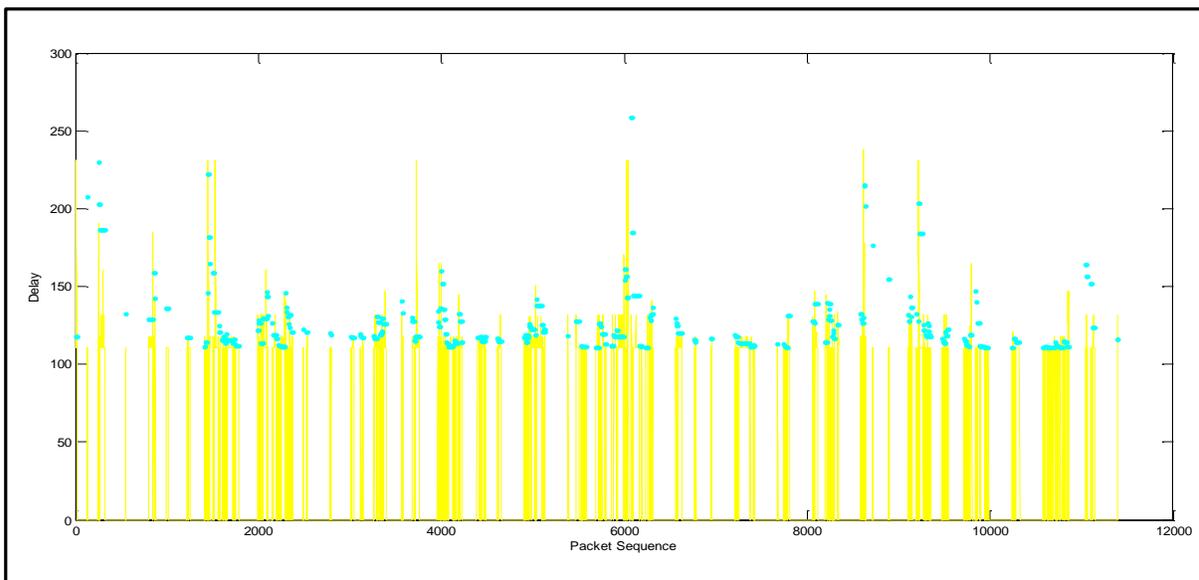


Figura 3.11: Comportamiento del algoritmo 4 de Ramjee

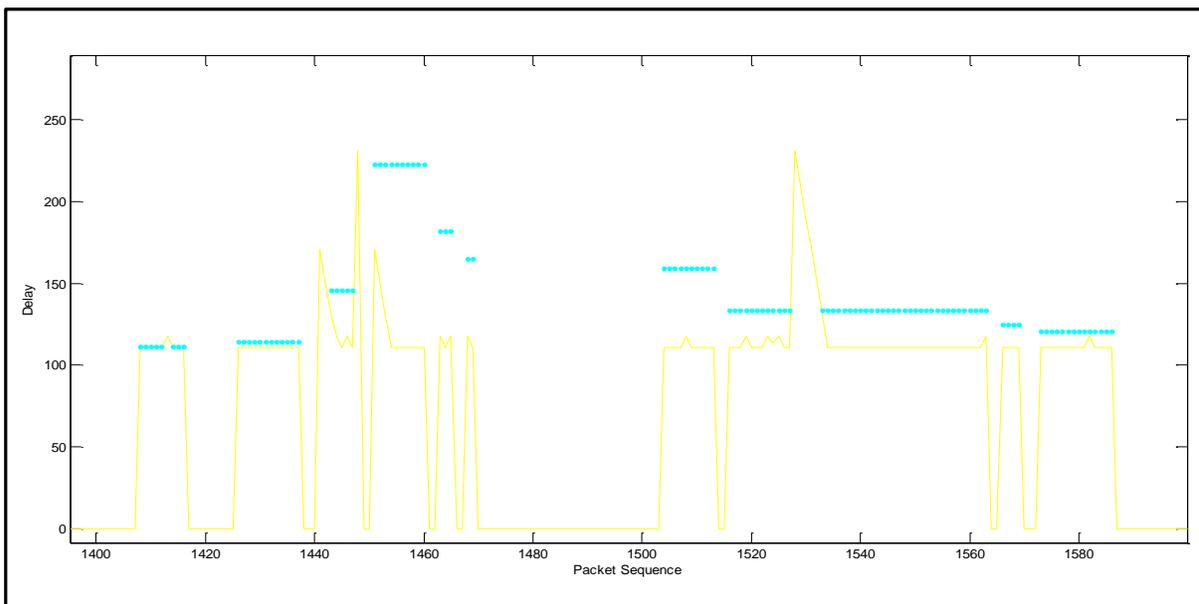


Figura 3.12: Particularización del comportamiento ante variaciones de la demora

Si bien este algoritmo tiene un desempeño ágil e inestable pues le confiere gran peso a la hora de estimar la demora del *buffer* a los valores recientes de esta, siendo capaz de responder a cambios repentinos de una forma aceptable, tampoco es capaz de seguir los picos de *handover* propios de la traza que se analiza, como lo muestra la figura 3.12 que amplía el comportamiento ante casos de *handover*, causando por consiguiente pérdida de paquetes que se traducen en una disminución de la calidad percibida.

Por último, se muestra el comportamiento del algoritmo 5 en las figuras 3.13 y 3.14.

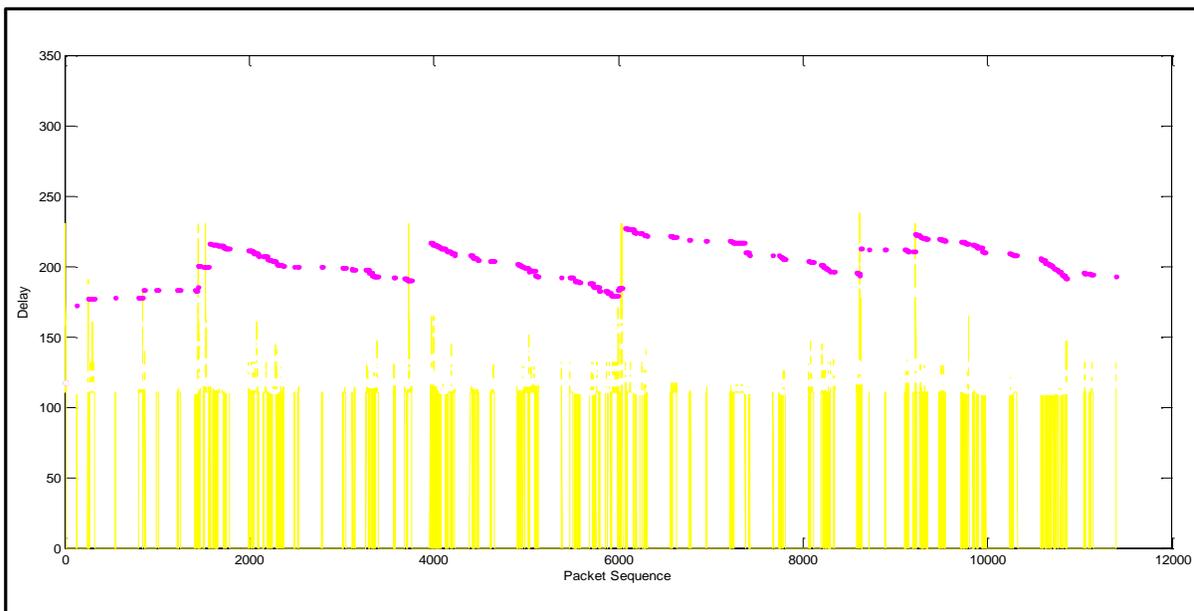


Figura 3.13: Comportamiento del algoritmo 5

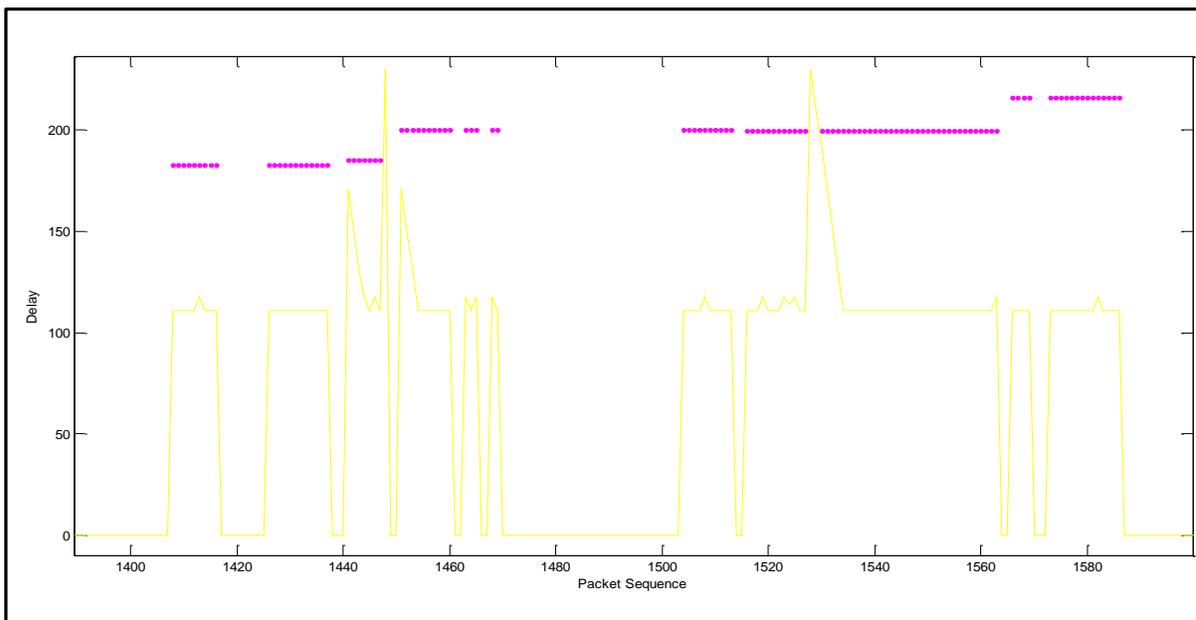


Figura 3.14: Particularización del comportamiento ante variaciones de la demora

Del análisis del comportamiento se concluyó que este algoritmo tiene un desempeño capaz de responder con rapidez a los picos de demora, sin embargo la precisión del ajuste es limitada resultando insuficiente para evitar las pérdidas de paquetes provocadas por el *handover*. Luego de que ocurre un pico de demora relacionado con la presencia del *handover* su recuperación es lenta pero en menor medida con respecto al 2. Además sus estimaciones de demora en aquellos momentos donde no ocurren picos elevados relacionados con *handovers*

no superan en muchos casos los 200 ms, por lo que no tendrá un impacto significativo en la calidad de la aplicación y evitará además la pérdida de paquetes ante fluctuaciones moderadas de la demora, estas consideraciones permiten estimar un desempeño favorable con respecto al tratamiento de la traza analizada.

Los algoritmos anteriores demostraron que incluso para aquellos que poseen un comportamiento ágil en el tratamiento de picos de la demora, siempre van a existir pérdidas de paquetes considerables en relación a la ocurrencia de *handovers*, que a la postre repercuten negativamente en la calidad percibida por el usuario. Obviamente este comportamiento se debe a que a los algoritmos les resulta imposible, debido a la naturaleza de su funcionamiento, estimar con antelación la ocurrencia de un pico de demora tan elevado e inesperado como el provocado por un *handover* cuyo impacto en la demora de extremo a extremo se manifiesta como un pico de corta duración y de amplitud muy por encima de los valores medios.

En la figura 3.15 se muestra el MOS instantáneo que fue obtenido para cada algoritmo de *buffer* de reproducción representado en 23 muestras de MOS medidas cada una en intervalos de 10 s sobre segmentos de 500 paquetes de 20 ms de duración.

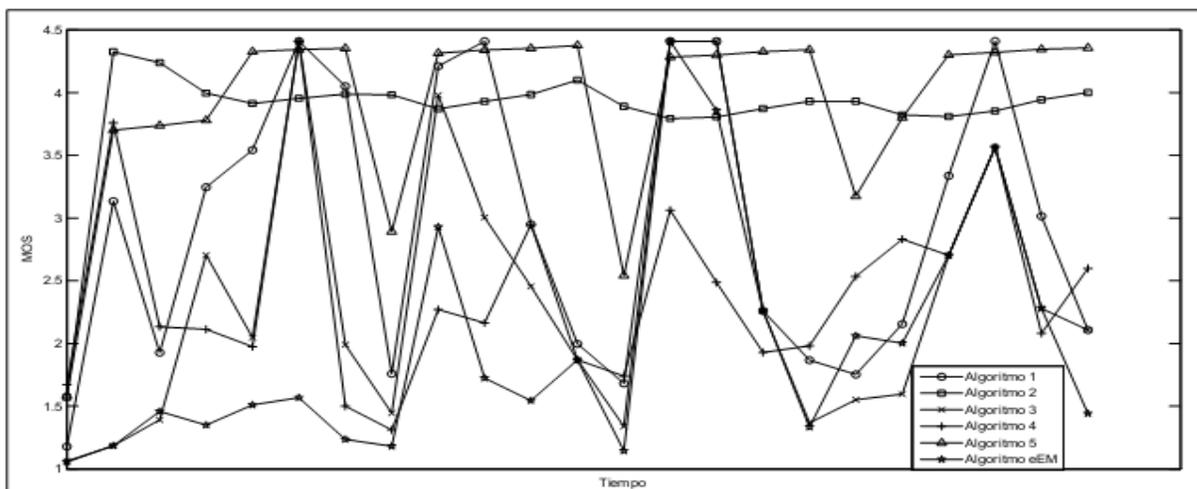


Figura 3.15: MOS instantáneo para los 6 algoritmos evaluados

Al principio de la conversación los predictores comienzan subestimando la demora, debido a que este parámetro es fijado inicialmente al valor que posee la demora del primer paquete recibido, añadido a esto la variación de la demora se fija inicialmente en cero, estas estimaciones hacen que el *buffer* pierda muchos paquetes y por tanto los valores del MOS se vean muy afectados hasta que se alcanza el período de estabilidad, siendo esta la causa por la que todos los algoritmos inician con valores modestos de MOS.

Es necesario destacar que, independientemente del desempeño de los algoritmos para la traza analizada, en todos los casos existieron caídas de la calidad correspondiente a la ocurrencia de los *handovers*. En la figura 3.16 se encuentra señalado a modo de ejemplo una de las caídas correspondiente a la muestra 8 de MOS instantáneo aplicada a los paquetes del 3501 al 4000 destacados en la figura en el intervalo encerrado entre líneas rojas. Los valores de MOS se muestran en la tabla 3.1 para las muestras 7, 8 y 9 de todos los algoritmos.

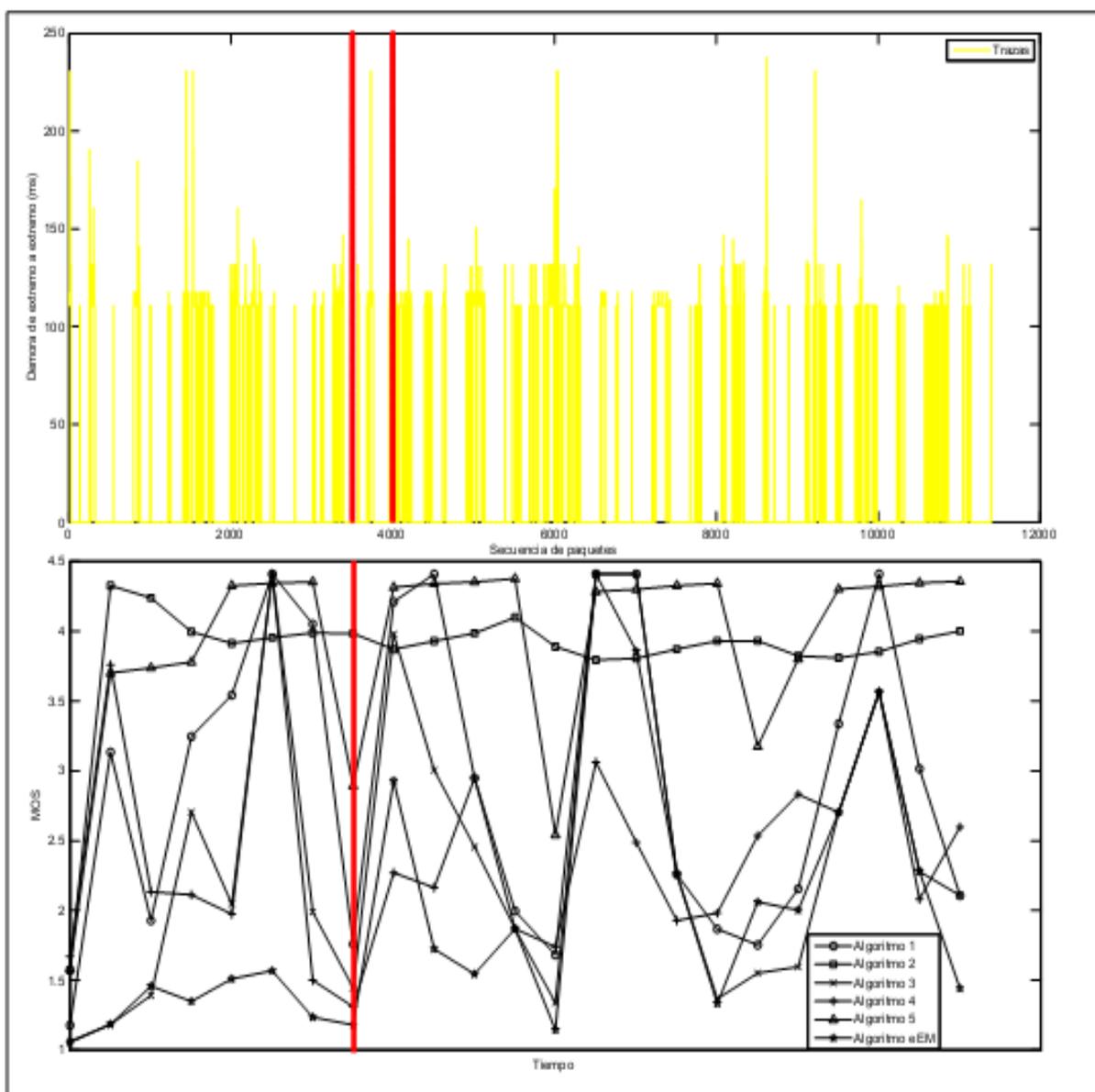


Figura 3.16: Muestra 8 de MOS instantáneo y su correspondiente intervalo en la traza

Tabla 3.1: Valores instantáneos de MOS para las muestras 7, 8 y 9

Algoritmo	MOS instantáneo muestra 7	MOS instantáneo muestra 8	MOS instantáneo muestra 9
1	4.0508	1.7595	4.2109
2	3.9879	3.9825	3.8702
3	1.9900	1.4453	3.9794
4	1.5011	1.3112	2.2706
5	4.3528	2.8926	4.3146
6	1.2358	1.1811	2.9291

Como se puede observar en la muestra 8 ocurrió una caída del valor del MOS instantáneo con respecto a las muestras adyacentes 7 y 9. La caída en la muestra 8 aconteció debido a la pérdida de paquetes provocada por el ajuste incorrecto realizado por los algoritmos ante la ocurrencia de un *handover*. En el caso del algoritmo 2 no se manifiesta una caída debido a que este sobrestima la demora del *buffer* de reproducción e impide que ante la ocurrencia de picos los paquetes se pierdan, por supuesto esta sobrestimación influye negativamente en la calidad percibida.

Por lo tanto se confirma el principio del impacto negativo que posee la ocurrencia del evento de radio *handover* en la calidad de la aplicación de voz y la incapacidad de los algoritmos del *buffer* de reproducción para tratarlo con eficiencia.

En la tabla 3.2 se exponen los valores MOS promedio correspondientes a cada algoritmo. Aunque este valor no provee de una caracterización pormenorizada de la calidad, si resulta útil a la hora de tener un criterio sobre el comportamiento general del desempeño del algoritmo con la traza en cuestión.

Tabla 3.2: Valores MOS promedio correspondientes a los seis algoritmos

Algoritmo	MOS promedio	Percepción
Y1	2.9659	Casi todos los usuarios insatisfechos
Y2	3.8478	Algunos usuarios insatisfechos
Y3	2.3970	Casi todos los usuarios insatisfechos
Y4	2.4190	Casi todos los usuarios insatisfechos
Y5	3.9213	Algunos usuarios insatisfechos
Y6	1.9856	No recomendado

Tras el análisis de los resultados se concluyó que prácticamente todos los algoritmos tratados tuvieron un desempeño modesto, con calificaciones de percepción de calidad de los usuarios bajas, con excepción de los algoritmos 2 y 5. Como dato adicional se concluyó además que el mejor desempeño, utilizando el criterio del MOS promedio, corresponde al algoritmo 5, esta conclusión se respalda en el comportamiento del MOS instantáneo que mantiene sus valores, con excepción de los casos de *handover*, en valores de calidad elevados, lo que se corresponde con el análisis realizado con anterioridad con respecto a su comportamiento.

### 3.3 Evaluación de los algoritmos de reproducción con detección de picos

Para implementar la antelación a la ocurrencia del evento de radio se realizó un análisis de la señal de referencia de potencia recibida de la celda de servicio y la celda candidata, utilizando

los reportes periódicos de mediciones enviados por el UE a la eNodeB. Tras el análisis se observó una tendencia al incremento antes de los *handovers* de la diferencia de la RSRP de ambas celdas, hasta que se cumple el criterio de histéresis y TTT y se declara el evento. Por lo tanto utilizando esta tendencia, se pudo anticipar la ocurrencia de un *handover*, y por consiguiente preparar a los algoritmos del *buffer* de reproducción para enfrentar el consecuente incremento de la demora, implementándose así la propuesta de mecanismo tratada en el capítulo anterior. En la figura 3.17 se muestra un ejemplo de la tendencia mencionada.

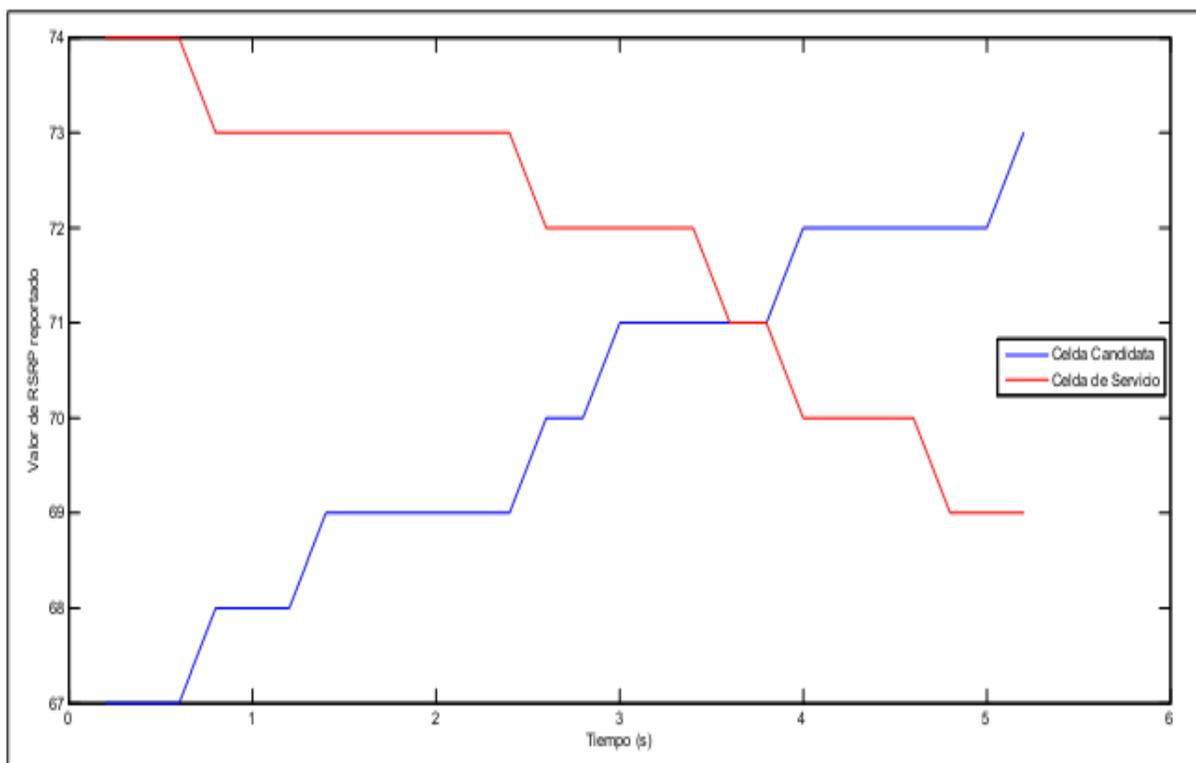


Figura 3.17. Valor reportado de RSRP para celda de servicio y objetivo antes de un *handover*

Haciendo un estudio de las simulaciones realizadas y de la caracterización del evento de radio tratada en el capítulo 1 se determinó adecuado utilizar el valor de 250 ms, como fue definido en el capítulo anterior, como tamaño máximo que el *buffer* de reproducción debe adquirir ante la ejecución de un *handover* y la correspondiente afectación relacionada con el período de interrupción que sufre el terminal cuando realiza el traspaso de un celda a la otra, ya que este es un valor que impide que se pierdan paquetes durante un *handover* sin exagerar la demora del *buffer* de reproducción que a la larga se traduciría en una caída de la calidad.

En la figura 3.18 se muestra el desempeño de los algoritmos de reproducción una vez implementado el procedimiento de anticipación a la ocurrencia de los *handovers*.

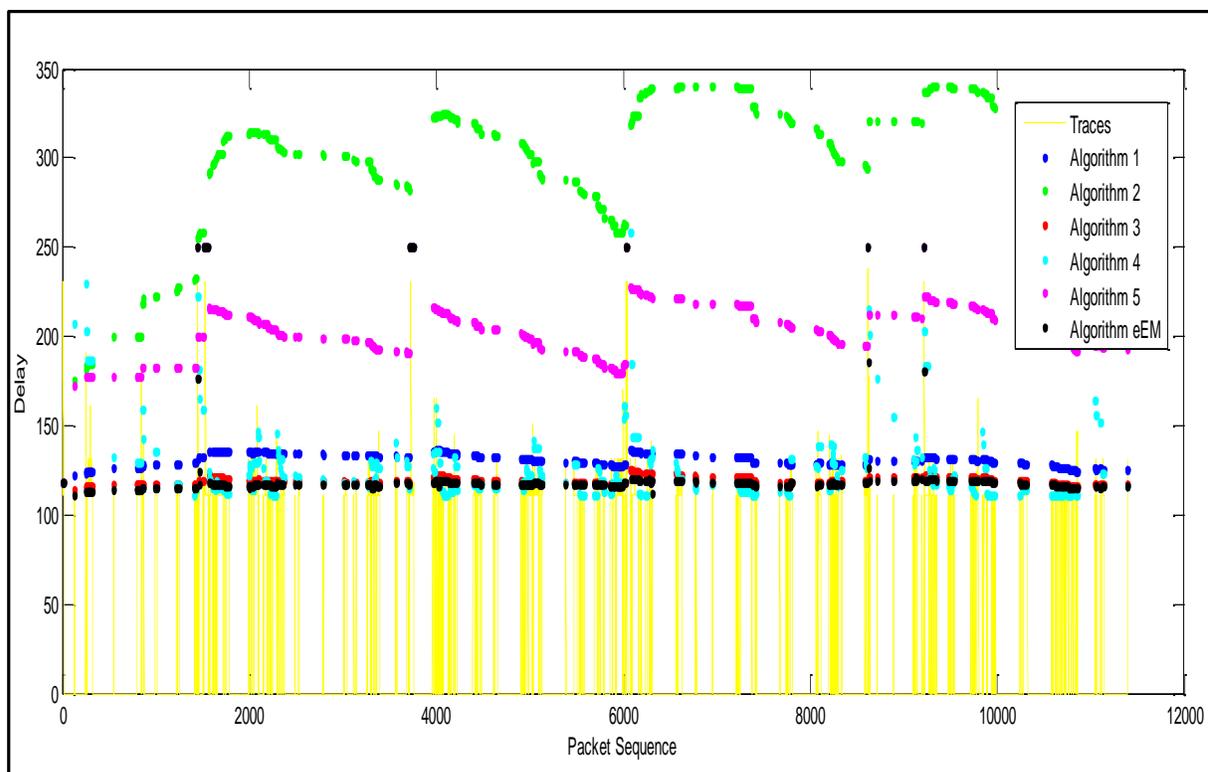


Figura 3.18: Desempeño de los algoritmos de reproducción teniendo en cuenta

Dado que el comportamiento de los algoritmos cuando se utiliza detección de picos es igual a cuando no se utiliza la misma (excepto cuando ocurren *handovers*), se muestra en las figuras de la 3.19 a 3.24 solamente el desempeño en la vecindad de un *handover*.

Como se puede apreciar todos los algoritmos mediante la capacidad de anticipar el momento en el que ocurrirá un *handover* y teniendo establecido el valor que en esta situación debe adoptar el *buffer* de reproducción, fueron capaces de adaptarse al valor del pico en la demora, de manera que no ocurrieron pérdidas de paquetes en estos casos lo cual tiene un impacto positivo en la calidad percibida por los usuarios.

Para valorar el impacto de la detección de picos de *handover* se procedió a realizar una comparación entre el desempeño de estos algoritmos con la implementación de la detección de picos y sin ella analizada anteriormente.

En la figura 3.25 se observan simultáneamente las gráficas de MOS instantáneo para ambos procedimientos. En ella se destacan las muestras 8 y 10 correspondientes a los paquetes del 3501 al 4000 para la muestra 8 y los paquetes del 4501 al 5000 para la muestra 10. En el intervalo correspondiente a la medición del MOS de la muestra 8 ocurre un *handover*, mientras que el intervalo relacionado con la medición de la muestra 10 no.

Ambos intervalos se encuentran señalados en la figura por líneas rojas para el caso de la muestra 8 y por líneas azules para el caso de la muestra 10, reflejados tanto en la traza donde se destaca el intervalo de paquetes objeto de análisis, como en la gráfica de MOS instantáneo donde se señalan los valores relativos a cada muestra para cada algoritmo.

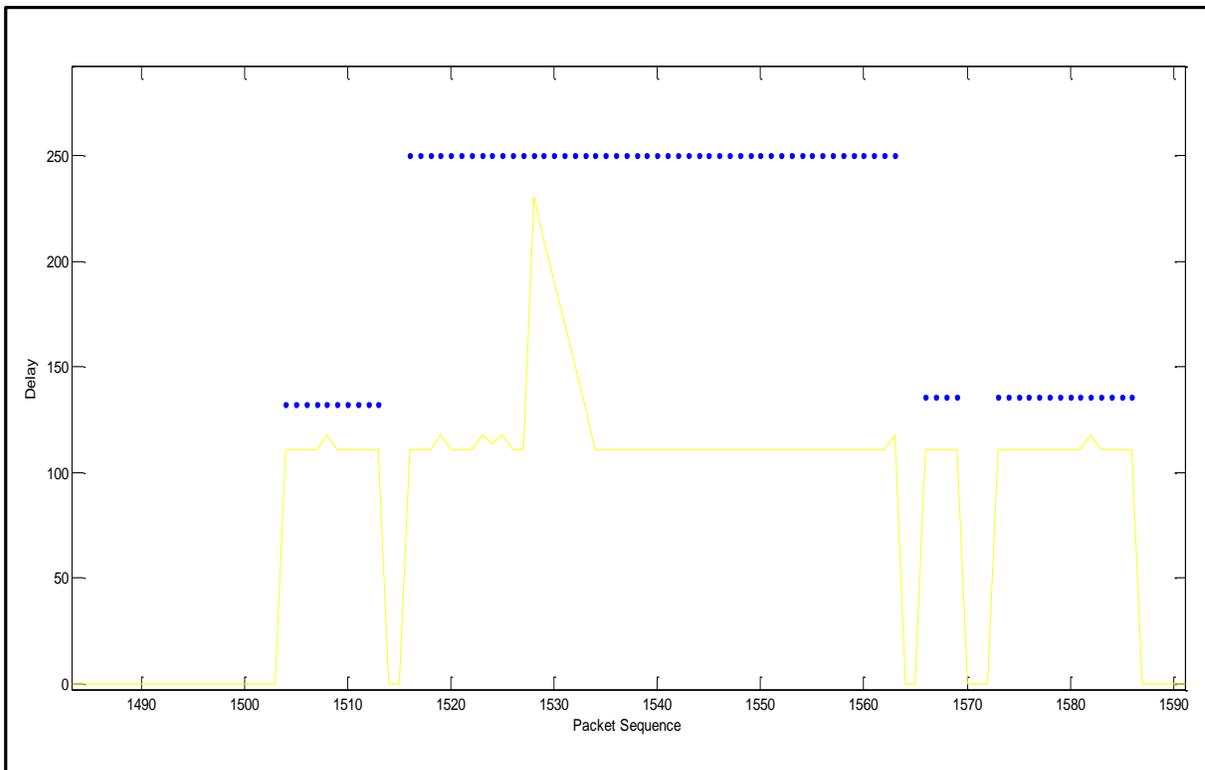


Figura 3.19: Comportamiento del algoritmo 1 utilizando detección de picos de *handover*

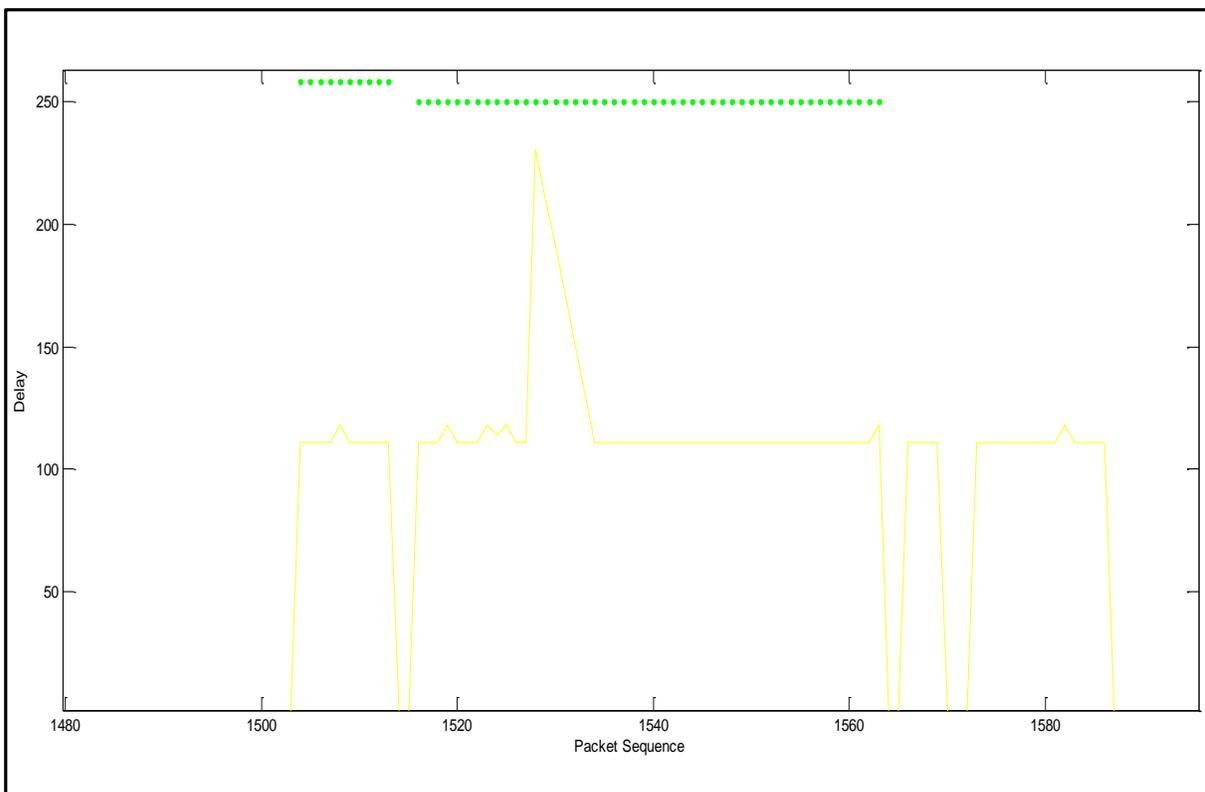


Figura 3.20: Comportamiento del algoritmo 2 utilizando detección de picos de *handover*

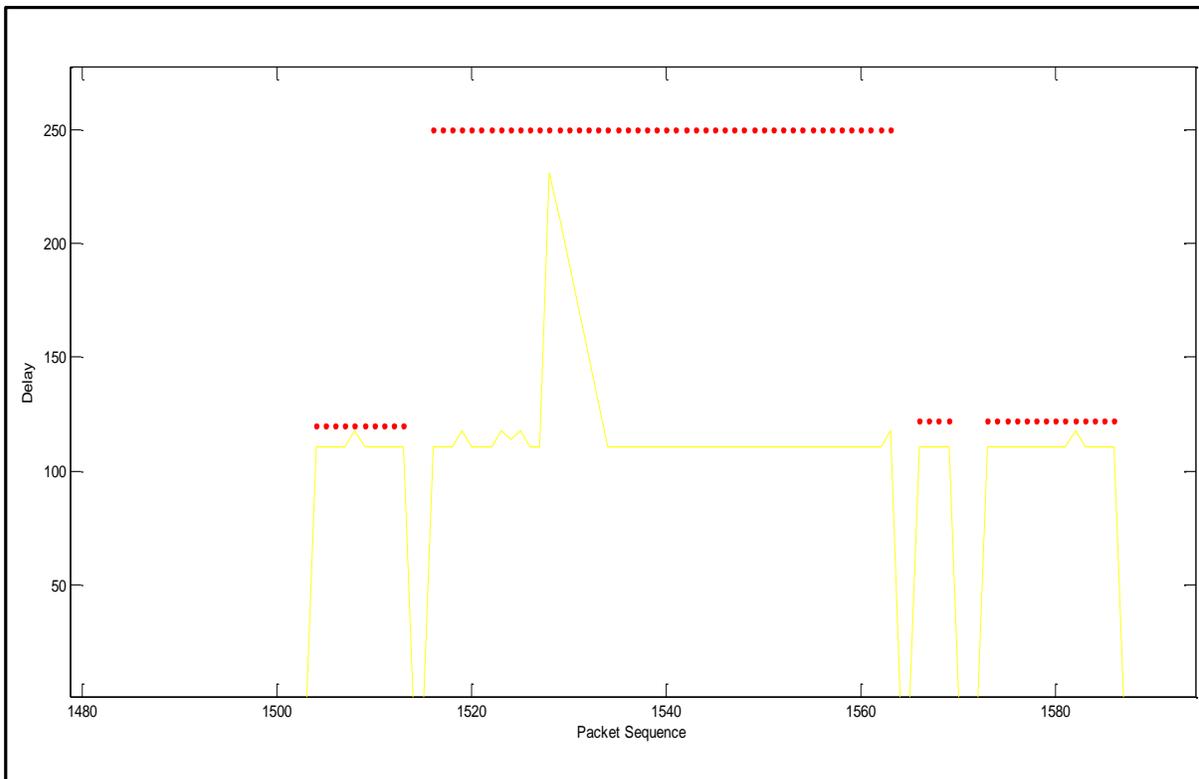


Figura 3.21: Comportamiento del algoritmo 3 utilizando detección de picos de *handover*

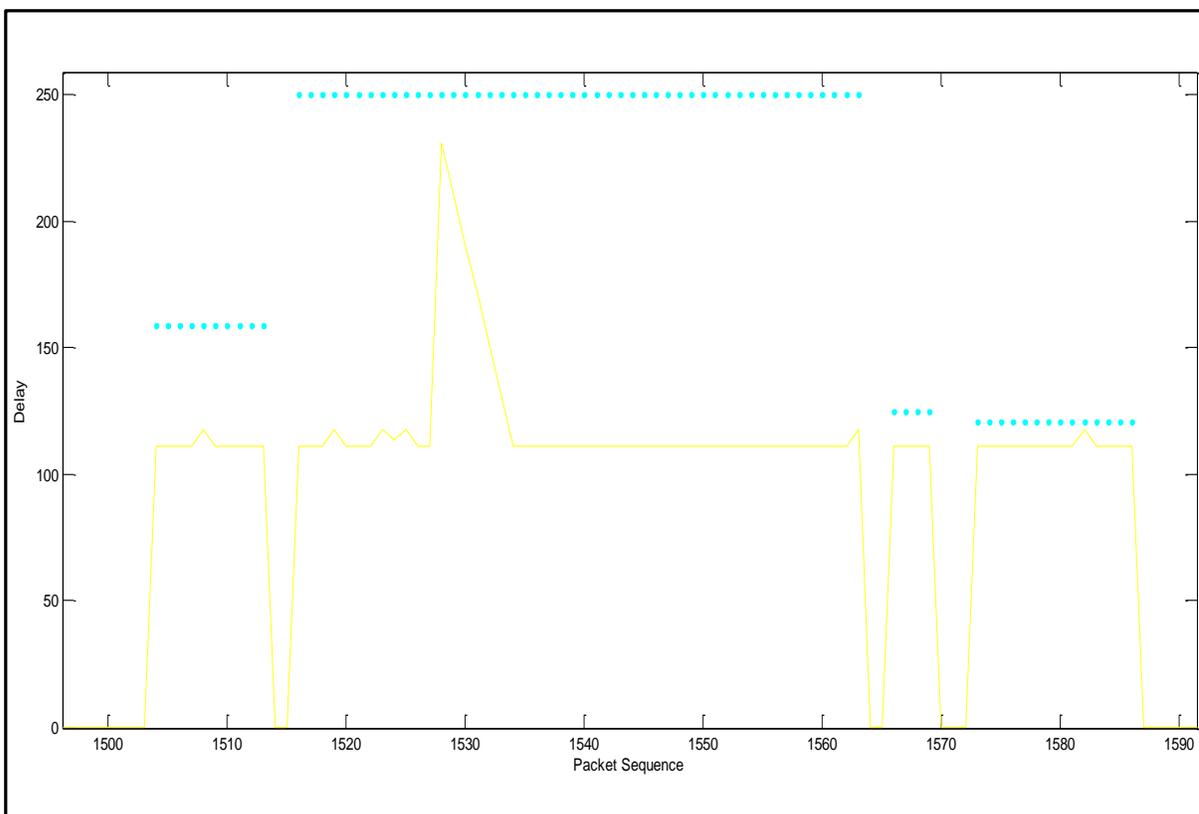


Figura 3.22: Comportamiento del algoritmo 4 utilizando detección de picos de *handover*

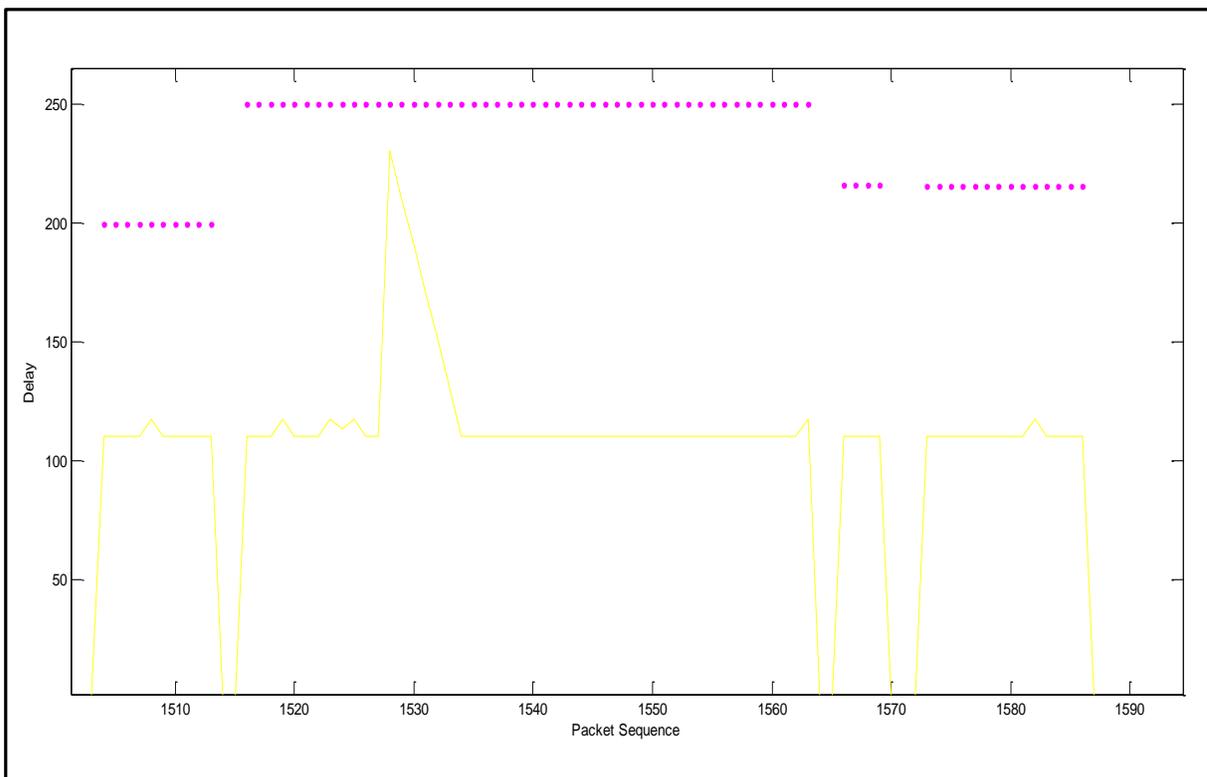


Figura 3.23: Comportamiento del algoritmo 5 utilizando detección de picos de *handover*

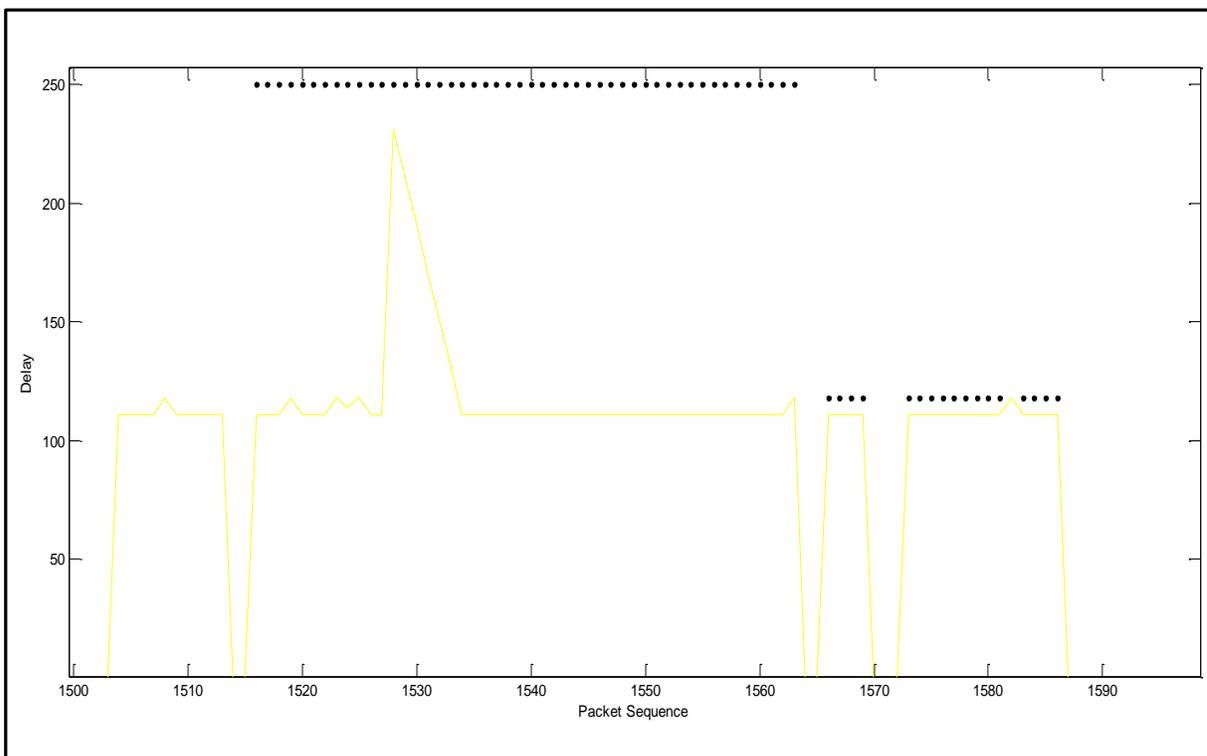


Figura 3.24: Comportamiento del algoritmo eEM utilizando detección de picos de *handover*

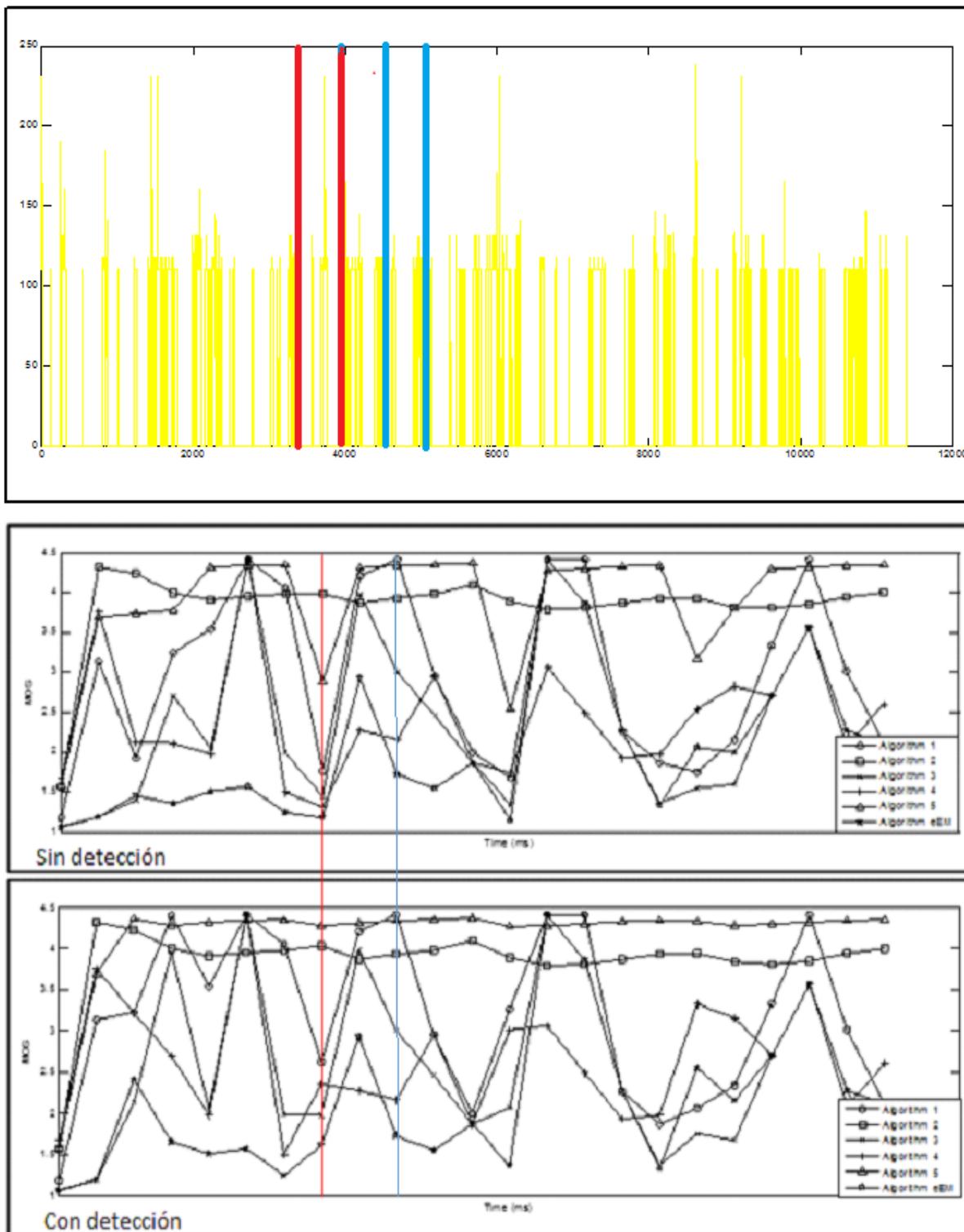


Figura 3.25: Comparación del valor instantáneo de la octava muestra del MOS

En la tabla 3.3 se muestra la comparación de las muestras del MOS instantáneo 8 y 10 de los algoritmos cuando utilizan detección de picos y cuando no anticipan la ocurrencia de los *handovers*, así como el MOS promedio.

Tabla 3.3: Calidad instantánea para las muestras 8 y 10 y MOS promedio

Algoritmo	MOS instantáneo muestra 8		MOS instantáneo muestra 10		MOS promedio	
	sin detección	con detección	sin detección	con detección	sin detección	con detección
<b>Y1</b>	1.7595	2.6228	4.4089	4.4089	2.9659	3.2002
<b>Y2</b>	3.9825	4.0385	3.9289	3.9289	3.8478	3.8520
<b>Y3</b>	1.4453	1.9741	3.0047	3.0047	2.3970	2,5504
<b>Y4</b>	1.3112	2.3537	2.1637	2.1637	2.4190	2.6407
<b>Y5</b>	2.8926	4.2754	4.3394	4.3394	3.9213	4.1765
<b>Y6</b>	1.1810	1.6121	1.7246	1.7246	1.9856	2.0960

Del análisis de la información se aprecia que efectivamente existió un incremento del valor del MOS instantáneo para la muestra 8 cuando se aplica la detección de picos de demora causados por eventos de *handovers*, provocando que para algunos algoritmos el incremento en la clasificación de precepción de calidad haya subido en la escala de niveles, como se muestra en la tabla 3.4, destacándose entre todos el algoritmo 5 cuyo ascenso se produjo de la escala de: “casi todos los usuarios insatisfechos” a “satisfechos” y comprobándose que incluso para aquellos que su escala de satisfacción no ascendió si ocurrió un incremento en el valor del MOS promedio.

Tabla 3.4 Nivel de satisfacción de los usuarios para la muestra 8

Algoritmo	MOS instantáneo muestra 8	
	sin detección	con detección
<b>Y1</b>	1.7595 (no recomendado)	2.6228 (casi todos insatisfechos)
<b>Y2</b>	3.9825 (algunos insatisfechos)	4.0385 (satisfechos)
<b>Y3</b>	1.4453 (no recomendado)	1.9741(no recomendado)
<b>Y4</b>	1.3112 (no recomendado)	2.3537 (no recomendado)
<b>Y5</b>	2.8926 (casi todos insatisfechos)	4.2754 (satisfechos)
<b>Y6</b>	1.1810 (no recomendado)	1.6121 (no recomendado)

El resto de los *handovers* ocurridos en la simulación afectan a las muestras: 3, 4, 13, 18 y 19, cuyos intervalos en la secuencia de paquetes se encuentran del paquete 1001 al 1500, del

1501, al 2000, del 6001, al 6500, del 8501, al 9000 y del 9001 al 9500 respectivamente. Para todos los casos se comprobó que ocurrió un incremento del MOS instantáneo de la misma forma que fue analizado para la muestra 8, estos resultados se encuentran resumidos en la tabla 3.5.

Tabla 3.5: MOS instantáneo para muestras afectadas con HO

Algoritmo	Muestra	MOS instantáneo sin detección	MOS instantáneo con detección
Y1	3	1.9279	3.2222
Y2	3	4.2380	4.2337
Y3	3	1.3922	2.1341
Y4	3	2.1330	3.2190
Y5	3	3.7366	4.3605
Y6	3	1.4588	2.4023
Y1	4	3.2454	4.4015
Y2	4	3.9955	4.0054
Y3	4	2.7045	3.9477
Y4	4	2.1128	2.6975
Y5	4	3.7794	4.2811
Y6	4	1.3496	1.6540
Y1	13	1.6816	3.2660
Y2	13	3.8892	3.8948
Y3	13	1.3395	2.0743
Y4	13	1.7402	3.0135
Y5	13	2.5417	4.2693
Y6	13	1.1450	1.3639
Y1	18	1.7532	2.0601
Y2	18	3.9308	3.9382
Y3	18	1.5517	1.7535
Y4	18	2.5352	3.3263
Y5	18	3.1743	4.3280
Y6	18	2.0613	2.5505

Tabla 3.5: MOS instantáneo para muestras afectadas con HO (continuación)

Algoritmo	Muestra	MOS instantáneo sin detección	MOS instantáneo con detección
Y1	19	2.1550	2.3380
Y2	19	3.8225	3.8441
Y3	19	1.5964	1.6736
Y4	19	2.8317	3.1539
Y5	19	3.8003	4.2824
Y6	19	2.0019	2.1548

Como fue comentado anteriormente el valor del MOS instantáneo aumentó para todos los algoritmos cuando se aplica la detección de picos ante la ocurrencia de un *handover* caracterizado en el caso de la muestra 8, sin embargo para el caso de la muestra 10, en cuyo intervalo no acontecen *handovers*, se comprobó que no ocurren variaciones en el MOS instantáneo, esta situación se debe a que la detección de picos basada en la anticipación a la ocurrencia de un *handover* solamente afecta el comportamiento normal de los algoritmos del *buffer* de reproducción cuando se está en presencia de este evento de radio, cuando no se advierte la ocurrencia de alguno el funcionamiento se corresponde con el tradicional, por esta razón es de esperar el resultado anterior. De aquí que al analizar el valor del MOS promedio y comprobar que ocurre un aumento para todos los casos de los algoritmos, éste se deba únicamente a la cualidad de anticipación ante un evento de *handover* y su correspondiente implementación en los algoritmos de *buffer* de reproducción, comprobándose de esta manera su eficacia.

Particularizando en el caso del algoritmo 5 que como se comentó en el epígrafe anterior es el que presenta un mejor desempeño en el tratamiento de la demora de la traza estudiada, a continuación, en la figura 3.26, se muestra una gráfica que representa la distribución de la percepción de los usuarios de la calidad de la aplicación de voz en relación con los valores del MOS instantáneo para cada una de las 23 muestras, cuando se implementa un *buffer* de reproducción que tiene como algoritmo predictor al 5, a la izquierda se ilustra el caso que funciona de la manera tradicional y a la derecha utilizando la detección de picos de demora provocados por *handover*.

Del análisis de la figura se constató la mejora al introducir la detección de picos con respecto a cuándo no se implementa este mecanismo, al crecer significativamente las calificaciones correspondientes a buenos desempeños y decrecer las relacionadas con insatisfacciones de los usuarios para las muestras tomadas, de manera que el 92% de las clasificaciones de los usuarios se encuentran en rangos de calidad elevada (usuarios muy satisfechos y satisfechos), contra un 65% que se ostentaba según la variante anterior, el 4% que representa una calificación de no recomendado en el caso de utilizar detección de picos está relacionado con la subestimación de la demora realizada al inicio de la conversación por los algoritmos como

fue explicado con anterioridad , lo que hace que el *buffer* pierda muchos paquetes y por tanto los valores del MOS se vean muy afectados hasta que se alcanza el período de estabilidad.

Los valores obtenidos en la comparación se muestran detallados en la tabla 3.6.

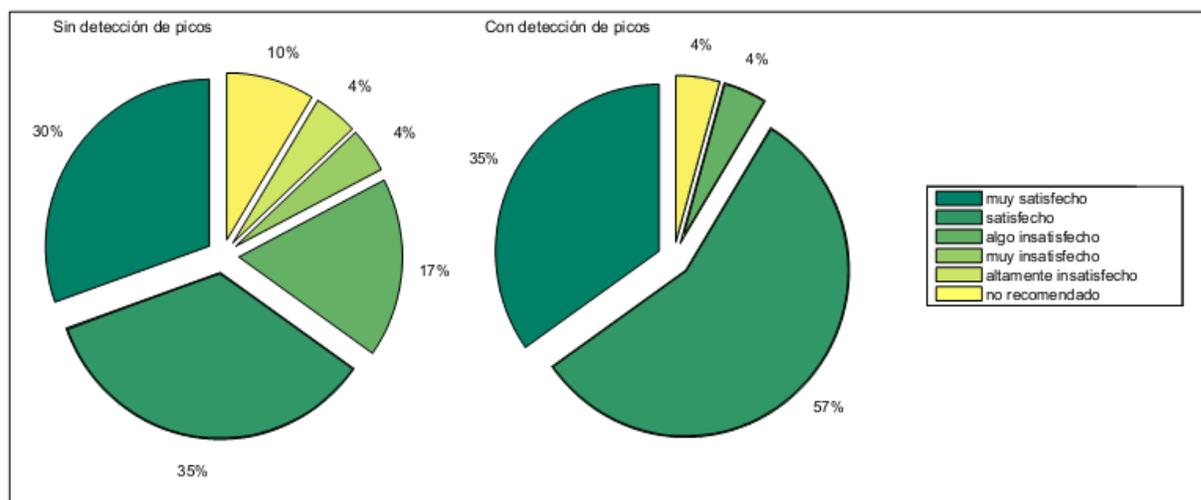


Figura 3.26: Distribución de la calidad percibida por el usuario para el algoritmo 5

Tabla 3.6 Comparación del porcentaje de percepción de los usuarios para el algoritmo 5

Clasificación	Sin detección	Con detección
<b>Usuarios muy satisfechos</b>	30%	35%
<b>Usuarios satisfecho</b>	35%	57%
<b>Algunos usuarios no satisfechos</b>	17%	4%
<b>Muchos usuarios no satisfechos</b>	4%	-
<b>Casi todos los usuarios no satisfechos</b>	4%	-
<b>No recomendado</b>	9%	4%

También se analizó el impacto en el valor de MOS promedio que brinda una idea sobre la clasificación general que se le daría al desempeño del algoritmo como predictor del *buffer* de reproducción, el cual es mostrado en la tabla 3.7, donde además se presenta el cambio de categoría con respecto al nivel de calidad promedio percibida por el usuario que se obtuvo para el algoritmo 5, mostrándose como esta subió de: “algunos usuario no satisfechos” a “satisfechos” cuando se aplica la anticipación al *handover*. El análisis realizado para el algoritmo 5 fue aplicado a todos los algoritmos obteniéndose incrementos del MOS promedio, estos valore se encuentran resumidos en la tabla 3.3.

Tabla 3.7: Nivel de satisfacción de los usuarios para el algoritmo 5

Algoritmo	MOS promedio sin detección	MOS promedio con detección
Y5	3.9213 (algunos usuarios no satisfechos)	4.1765 (satisfechos)

Del análisis de la información obtenida se concluyó que la detección de picos de *handover* mediante la previsión de su ocurrencia de manera que pueda ser conocida y tratada con antelación por el receptor, incrementa la calidad percibida por el usuario de una aplicación de voz para un entorno LTE.

### 3.4 Consideraciones finales del capítulo

Los algoritmos de reproducción, al no poder prever la ocurrencia de picos de demora asociados a *handovers* en LTE, no son capaces de ajustar el tamaño del *buffer* de reproducción a valores adecuados, lo que provoca la pérdida de paquetes, resultándole imposible al *buffer* de reproducción mantener un desempeño favorable durante la ocurrencia de *handovers*, siendo afectada la calidad de servicio en el desempeño de la aplicación de voz.

Es posible utilizar una tendencia al incremento antes de los *handovers*, de la diferencia de la RSRP de las celdas de servicio y candidata, para lograr que los algoritmos sean capaces de anticipar la ocurrencia al evento de radio *handover*.

Utilizando este procedimiento los algoritmos predictivos del *buffer* de reproducción tienen un desempeño más favorable reflejado en la calidad percibida por el usuario, siendo posible mejorar la calidad de servicio de la aplicación de voz afectada por la ocurrencia de *handovers* con la implementación de la detección de su ocurrencia y el ajuste oportuno de la demora del *buffer* de reproducción.

## CONCLUSIONES

Después de concluida la investigación y analizados los resultados se arribaron a las siguientes conclusiones:

1. LTE posee una arquitectura plana y simple orientada a la flexibilidad y la disminución de latencias convirtiéndola en una red de amplias prestaciones para sus usuarios.
2. La implementación de VoLTE como técnica estandarizada para brindar los servicios referentes a la aplicación de voz, posee limitantes con respecto a los parámetros de calidad de servicio: demora, pérdidas de paquetes y variación de la demora, presentándose afectaciones perceptibles para valores de demora superiores a 200 ms y para pérdidas de paquetes superiores al 2% de los paquetes transmitidos.
3. Los eventos de radio asociados a condiciones de deterioro del radio enlace que influyen negativamente en la aplicación de voz en la red LTE son: el *handover*, las retransmisiones en el enlace ascendente y el SRVCC, debido a que introducen señalización adicional, mayor carga de la red e interrupción o demora del enlace.
4. El impacto en la demora provocado por los eventos de radio tiene una influencia negativa considerable, los valores de tiempo de interrupción relacionados a los eventos de radio *handover* y SRVCC al ser adicionados a la demora de la red provocan afectaciones en el desempeño de la aplicación de voz al superar los 200 ms establecidos como límite para una calidad satisfactoria.
5. El proyecto LENA, perteneciente al simulador NS-3, posibilita la obtención de trazas de la aplicación VoLTE que incluyen la acción del evento de radio *handover*, a través de configuraciones del escenario de simulación deseado, haciendo posible la evaluación de procedimientos relacionados con el accionar de este evento de radio.
6. La tendencia del valor de la señal RSRP y la caracterización del *handover*, pueden ser utilizados para advertir la ocurrencia de este evento de radio y ajustar la demora del *buffer* de reproducción con el fin de disminuir el impacto negativo del evento de radio en el desempeño de la aplicación de voz.
7. La implementación de la detección de *handovers* para ajustar la demora del *buffer* de reproducción logra mejorar el desempeño de los algoritmos predictivos al impedir la pérdida de paquetes asociada a un ajuste incorrecto del tiempo de reproducción, incrementando de esta manera la calidad de servicio de la aplicación de voz.

8. Las acciones preventivas a los eventos de radio en LTE, basadas en la identificación y caracterización de los mismos, mejoran la calidad percibida por los usuarios de la aplicación de voz cuando son incorporadas como procedimientos en elementos para el tratamiento de calidad de servicio, como el *buffer* de reproducción.

## RECOMENDACIONES

Como recomendaciones para la ampliación de este trabajo y la continuidad en este tema de investigación se propone:

1. Realizar un estudio de los eventos de radio SRVCC y retransmisiones en el enlace ascendente para implementar un mecanismo basado en la anticipación que permita contrarrestar los efectos negativos provocados en la calidad de servicio de la aplicación VoLTE como consecuencia de la ocurrencia de alguno de ellos.
2. Profundizar en la creación de técnicas preventivas a eventos de radio para tratar la calidad de servicio, para ser implementadas en el *buffer* de reproducción.
3. Modificar el código del simulador NS-3 para que el cálculo de la demora siempre incluya el tiempo de interrupción causado por los *handovers* u otros eventos de radio.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. G. H. Atty, "Estudio de factibilidad para la implementación de LTE en el Ecuador," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2011.
- [2] A. Ahmad, *Wireless and mobile data networks*. New Jersey: Jhon Wiley & Sons Ltd. , 2010.
- [3] S. Mahmud, "QoS Performance Analysis: Design and Development of Voice and video Mobility over Long term Evolution (LTE) Model," Master, Department of Eectrical Engeneering Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, 2013.
- [4] M. Poikselka, H. Holma, Jukka Hongisto, J. Kallio, and A. Toskala, *Voice over LTE*: John Wiley & Sons Ltd, 2012.
- [5] I. Siomina and S. Wanstedt, "The Impact of QoS Support on the End User Satisfaction in LTE Networks with Mixed Traffic," *IEEE Comunication Magazine*, 2010.
- [6] L. M. Verger, M. Chaudhary, O. E. Tackin, O. M. Elrad, S. Vasudevan, T. Elangovan, *et al.*, "Enhasing Jitter Buffer Performance Through Radio Level Feedback," USA Patent, 2014.
- [7] A. M. López, "LTE/SAE, una apuesta segura en la evolución de las redes móviles," *Antena de Telecomunicación*, junio 2009 2009.
- [8] Per BemingLars Frid, G. Hall, P. Malm, T. Noren, M. Olsson, and G. Rune, "LTE-SAE architecture and performance," *Ericsson Reviewww*, 2010.
- [9] R. Agusti, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Perez-Romero, and O. Sallent, *LTE: nuevas tendencias en comunicaciones móviles* Fundacionn Vodafone España, 2010.
- [10] S. H. Chowdhury and S. Mahmud, "QoS Performance Analysis: Design and Development of Voice and Video Mobility over Long Term Evolution (LTE) Model," Master, Department of Electrical Engineering emphasis on Telecommunication Blekinge Institute of Technology Karlsrona 2013.

- 
- [11] A. Helenius, "Performance of Handover in Long Term Evolution," Master Department of Communications and Networking, Aalto University, 2011.
- [12] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE – The UMTS Long Term Evolution. From Theory to Practice* John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [13] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Sköld, *4G LTE/LTE-Advanced for mobile broadband*, 1 ed.: Elsevier Ltd., 2011.
- [14] J. B. I. Chavarría, "LTE Handover Performance Evaluation Based on Power Budget Handover Algorithm " Master, Department of Signal Theory and Communications UPC, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2014.
- [15] H. Jin, C. Cho, N.-O. Song, and D. K. Sung, "Optimal Rate Selection for Persistent Scheduling with HARQ in Time-Correlated Nakagami-m Fading Channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. Vol. 2, February 2011 2011.
- [16] J. C. Ikuno, M. Wrulich, and M. Rupp, "Performance and modeling of LTE H-ARQ," Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering, Vienna University of Technology, Vienna, Austria, 2009.
- [17] V. T. Veettil, "Voice over LTE study and test strategy definition," Master, Arizona State University, Arizona, 2014.
- [18] M. Sauter, "Voice over LTE via Generic Access (VoLGA)-A Whitepaper," ed. <http://www.wirelessmoves.com>, 2009.
- [19] O. I. Adu, B. O. Oshin, and A. A. Alatishe, "VoIP on 3GPP LTE Network: A Survey " *Journal of Information Engineering and Applications*, vol. Vol.3, 2013.
- [20] J. Namakoye, "Performance Evaluation of Voice Handover Between LTE and UMTS," master, Faculty of Engineering, University of the Witwatersrand, Johannesburg, 2011.
- [21] Y. Sun, G. Fang, and J. Shi, "Research on the Implementation of VoIP Service," Chinese Academy of Sciences, Beijing, 2010.
- [22] Orange, C. Mobile, N. KPN, and S. DoCoMo, "r1-070674: Lte physical layer framework for performance verification; 3gpp tsg ran wg1."

- 
- [23] C.-C. Lin, "Handover Mechanisms in 3GPP Long Term Evolution (LTE) " Doctor of Philosophy University of Technology, Sydney, Australia, 2013.
- [24] K. Dimou, M. Wang, Y. Yang, M. Kazmi, A. Larmo, J. Pettersson, *et al.*, "Handover within 3GPP LTE: Design Principles and Performance," *IEEE Ericsson Research*, 2009.
- [25] M. W. Green and T. Svensson, "Throughput, Capacity, Handover and Latency Performance in a 3GPP LTE FDD Field Trial " presented at the Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), Miami, FL, 2010.
- [26] T. V. K. Chaitanya, "HARQ Systems: Resource Allocation, Feedback Error Protection, and Bits-to-Symbol Mappings," Division of Communication Systems, Department of Electrical Engineering (ISY), Linköping University, Linköping, Sweden, 2013.
- [27] 3GPP, "TS36.321 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA)," in *5.4.2.2 HARQ process*, ed, 2007.
- [28] S. Kangude, "MAC – HARQ & Scheduling," ed, 2013.
- [29] ETSI, "ETSI TS 123 216 V10.1.0 (2011-06)," in *Single Radio Voice Call Continuity (SRVCC)*, ed, 2011.
- [30] S. Vittal, "Single Radio Voice Call Continuity (SRVCC) with LTE," *Radisys white paper*, 2011.
- [31] 3GPP, "3GPP TR 23.856 V10.0.0 (2010-09)," in *Single Radio Voice Call Continuity (SRVCC) enhancements*, ed, 2010.
- [32] Ericsson, "Voice handover in LTE networks," p. 10, October 2012.
- [33] J. Vehanen, "Handover between LTE and 3G Radio Access Technologies: Test measurement challenges and field environment test planning," Master, School of Electrical Engineering, Aalto University, 2011.
- [34] M. R. Tabany and C. G. Guy, "Performance Analysis and Deployment of VoLTE Mechanisms over 3GPP LTE-based Networks," *International Journal of Computer Science and Telecommunications*, vol. vol. 4, October, 2013 2013.
- [35] Fontán, N. Pignataro-Fernando, G. Bounous, and L. S. M. Rodriguez, "Modelado y planificación de redes lte," 2012.

- [36] D. Mitsche, G. Resta, and P. Santi, "The random waypoint mobility model with uniform node spatial distribution," *Wireless networks*, vol. 20, pp. 1053-1066, 2014.
- [37] E. Hyytiä, P. Lassila, and J. Virtamo, "Spatial node distribution of the random waypoint mobility model with applications," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 5, pp. 680-694, 2006.
- [38] N.-. Project, "Friis Propagation Loss Model," 2015.
- [39] 3GPP, "3GPP TS 36.104 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA)," in *Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 12)*, ed, 2014.
- [40] 3GPP, "3GPP TS 36.331 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA)," in *Radio Resource Control (RRC) Protocol specification (Release 12)*, ed, 2014.
- [41] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, "4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband," *Academic press*, 2013.
- [42] R. Musable, "Hadilarijani and glasgow, evaluation of new scheduling scheme for voip with mobility in 3g lte," presented at the The Fifth International Conference on Commu-nication Theory, Reliability, and Quality of Service, 2012.
- [43] C. Cox, *An introduction to LTE: LTE, LTE-advanced, SAE and 4G mobile communications*: John Wiley & Sons, 2012.
- [44] 3GPP, "3GPP TS 23.203 Technical Specification Group Services and System Aspects Policy and charging control architecture (Release 11)," 2012.
- [45] N.-. Project, "NS-3 Network Simulator Model Library Release ns-3-dev," 2014.
- [46] U.-T. G.1050, "Series G: Transmission Systems and Media, Digital Systems and Networks," ed, 2007.
- [47] UIT-T, "Calidad de transmision telefonica. Aparatos para mediciones objetivas. Habla conversacional artificial.," ed, 1993.
- [48] H.-J. Lee and J.-H. Kim, "A Handover Mechanism Considering the Abstracted R-Factor," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. vol.63, pp. 2687-2696, julio, 2014 2014.

- 
- [49] J. G. Gruber, "Delay related issues in integrated voice and data networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 6, pp. 786-800, 1981.
- [50] W. Montgomery, "Techniques for packet voice synchronization," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 6, pp. 1022-1028, 1983.
- [51] R. Ramjee, J. Kurose, D. Towsley, and H. Schulzrinne, "Adaptive playout mechanisms for packetized audio applications in wide-area networks," presented at the INFOCOM'94. Networking for Global Communications. 13th Proceedings IEEE, 1994.
- [52] V. Jacobson, "Congestion avoidance and control," *ACM SIGCOMM computer communication review*, vol. 18, pp. 314-329, 1988.
- [53] C. A. R. López, V. A. Reguera, E. M. Fernández, and W. G. Jr, "Classical playout buffer algorithm revisited," presented at the XXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2010.
- [54] M. L. Lobina, "Voip streaming over packet-based networks," 2009.
- [55] J. Joskowicz and R. Sotelo, "Medida de la calidad de voz en redes IP," *Revista de Comunicaciones* 2010.
- [56] L. F. P. MARTÍNEZ, "Gráficos de control multivariable aplicados a la estimación de la calidad percibida de la voz sobre IP," *Revista Ingeniería Industrial*, 2007.
- [57] F. D. Rango, M. Tropea, P. Fazio, and S. Marano, "Overview on VoIP: Subjective and Objective Measurement Methods " *International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. vol.6, January, 2006 2006.
- [58] ITU-T, "Wideband E-model ", ed, 2011.

# ANEXOS

## Anexo 1 *Handover*

### Eventos de *Handover*

Evento	Condición
A1	El nivel de señal de la celda de servicio llega a ser mejor que un valor umbral.
A2	El nivel de señal de la celda de servicio llega a ser peor que un valor umbral.
A3	El nivel de señal de la celda vecino llega a ser mejor que un valor <i>offset</i> mejor que el nivel de la señal de la celda de servicio.
A4	El nivel de señal de la celda vecina llega a ser mejor que un valor umbral.
A5	El nivel de señal de la celda de servicio llega a ser peor que un valor umbral 1 y el de la celda vecina mejor que un valor umbral 2.
B1	El nivel de señal de la celda vecina con tecnología de acceso diferente a la de servicio, llega a tener un valor mejor que un valor umbral.
B2	El nivel de señal de la celda de servicio llega a ser peor que un valor umbral 1, y el de la celda vecina, con tecnología de acceso diferente, mejor que un valor umbral 2.

### Señalización en el *Handover X2*

El mensaje identificado con el número 1 referido como “*Mesured Control*”, configura al UE desde el punto de vista de la medición que debe realizar. Producto de las mediciones del UE y el cumplimiento de la condición de un evento desencadenador de *handover* previamente configurado, se envía el reporte de medición (mensaje 2), donde se informa al eNB de la ocurrencia de esta situación. Basándose en este mensaje el eNB toma la decisión de *handover* (3), iniciándose la etapa de preparación. Después de tomada la decisión el eNB fuente envía el mensaje “*HANDOVER REQUEST*” (4) que contiene la solicitud y toda la información para que el eNB destino prepare las condiciones necesarias para recibir al UE.

Una vez que el eNB destino recibe la solicitud de *handover* inicia un proceso de evaluación de admisión (5) donde se define si pueden ser garantizados los recursos para efectuar un *handover* exitoso o no. En el caso de que los recursos existan estos son configurados de acuerdo a la calidad de servicio solicitada, además se crea un identificador temporal en la celda y un preámbulo RACH para que sean utilizados por el UE cuando realice su sincronización inicial con la celda destino. Si el proceso de evaluación de admisión resulta favorable, el eNB manda un mensaje de “*HANDOVER REQUEST ACKNOWLEDGE*” (6) al

eNB fuente, enviando toda la información que previamente fue resuelta en el proceso de admisión para que le sea entregada al UE.

A partir de este punto se termina la etapa de preparación del *handover* y comienza la etapa de ejecución.

Para efectuar el *handover* el eNB envía al UE el comando de ejecución a través del mensaje “*RRC Connection Reconfiguration*” (7) que contiene la información generada en el eNB destino para la sincronización con la celda. Cuando el UE recibe este mensaje entra en el período de interrupción ya que el flujo de datos que hasta este punto se mantuvo activo es cortado. Posteriormente el mensaje “*SN STATUS TRANSFER*” (8) es enviado por el eNB fuente al eNB destino. Este mensaje se utiliza para transportar el número de secuencia PDCP al eNB destino y de esta manera comenzar la transmisión de los paquetes destinados al UE para que sean almacenados en el eNB destino y le sean entregados al terminal una vez que logre completar el *handover*. Paralelamente el UE comienza el proceso de sincronización con el eNB destino utilizando la información en el comando de *handover*.

Una vez que el UE se sincroniza exitosamente con la celda destino envía el mensaje “*RRC Connection Reconfiguration Complete*” (11) que indica la confirmación del *handover* y concluye la etapa de ejecución. Cuando el eNodeB destino recibe este mensaje comienza a enviar al UE la información que recibió durante la etapa de ejecución a través de la interfaz X2 desde el eNodeB fuente y que tenía almacenada, así como toda aquella que va a continuar llegando por esta vía hasta que sea reconfigurada la trayectoria del plano de usuario en el S-GW.

Después de alcanzado este punto el eNB destino envía a la entidad MME el mensaje “*PATH SWITCH REQUEST*” (12) para informar a éste el cambio de celda efectuado por el UE. Una vez recibido este mensaje la entidad MME envía el mensaje “*User Plane Update Request*” (13) hacia el S-GW, el que cambia la ruta desde el eNB fuente hacia el destino. Después de llevar a cabo esta función el S-GW envía un paquete especial “*end marker*” hacia el eNB fuente, usado para señalar el final de la transmisión de datos al eNB destino y para el reordenamiento de paquetes que este implementará. Una vez en este punto el S-GW envía hacia el MME el mensaje “*UPDATE USER PLANE RESPONSE*” (15), al que el MME genera el “*PATH SWITCH ACKNOWLEDGE*” (16) a modo de confirmación enviándolo hacia el eNB destino.

A continuación el eNB destino envía el mensaje “*UE CONTEXT RELEASE*” (17) al eNB fuente con el objetivo de informar de la realización exitosa del *handover*. Finalmente cuando el eNB fuente recibe este mensaje libera los recursos destinados a la antigua conexión.

### Señalización en el *Handover* S1

A continuación de acuerdo al número con que son mostrados en la figura, los mensajes que coinciden con los explicados anteriormente no serán tratados con profundidad:

1. *Measurement Report*: mensaje que contiene el reporte de medición que indica el cumplimiento de las condiciones para un evento de *handover*.
2. El eNB fuente que recibe la medición decide que el *handover* debe ser realizado, y detecta la ausencia de la interfaz X2, iniciando el *handover* asistido por el MME.

3. *Handover Required*: en este mensaje el eNB fuente indica al MME la necesidad del *handover*. Éste contiene información que debe ser reenviada al eNB destino, además incluye conocimientos sobre si la interfaz X2 está disponible para el reenvío de datos, y la identidad del eNB de destino y el área de seguimiento de destino (TAI), la que es utilizada por el MME para determinar si va a existir una relocalización de la entidad MME.
4. *HO Request*: este mensaje enviado por el MME a el eNB destino contiene la información enviada por el eNB fuente en el paso anterior al MME junto con información sobre los portadores necesarios para los datos y la señalización y algunas posibles restricciones de *handover*.
5. *HO Request acknowledge*: si el *eNodeB* de destino considera que tiene recursos necesarios para el *handover*, se establece un contexto para recibir al UE y a continuación, envía un acuse de recibo a la MME que lo constituye el mensaje 5. El reconocimiento incluye información sobre la instalación con éxito de los portadores y los posibles parámetros de reenvío. El mensaje también incluye información de control de la movilidad, que se envía al UE en una etapa posterior.
6. *Create Indirect Data Forwarding Tunnel Request*: el MME establece la función de reenvío de datos con una petición de un túnel indirecto para transmisión de datos al S-GW que contiene los identificadores de capa de transporte necesarios.
7. *Create Indirect Data Forwarding Tunnel Response*: con este mensaje el S-GW reconoce la transmisión y envía su identificador al MME.
8. *Handover Command*: mensaje enviado por el MME al eNB fuente que contiene información acerca de los portadores que han de ser remitidos durante el *handover*, y la información enviada por el eNB destino que incluye información que el UE debe utilizar para sincronizarse con la celda de destino.
9. En este mensaje, con las mismas implicaciones que en el *handover* anteriormente explicado, se le envía al UE el comando de *handover*.
10. Después de haber sido enviado el comando al UE, el eNB fuente envía al MME su estado, incluyendo la misma información que fue descrita en el procedimiento con el *handover* X2.
11. Cuando el MME recibe el estado del eNB fuente lo retransmite al eNB destino, actuando como un simple repetidor entre ellos.
12. En este punto se encuentran todas las condiciones creadas para que el UE comience el proceso de sincronización con la celda destino. Paralelamente el eNB destino recibe, proveniente del eNB fuente y a través de la entidad MME, los datos destinados al UE que se encuentra desconectado, los cuales son almacenados para ser entregados una vez el UE culmine exitosamente el *handover*.
13. *RRC Connection Reconfiguration Complete*: con este mensaje el UE le indica al eNB destino que el *handover* ha sido completado.
14. *Handover Notify*: Cuando el eNB destino recibe el mensaje 13 del UE realiza la notificación al MME.
15. Una vez recibida la notificación de *handover* el MME inicia un temporizador para la liberación de recursos, cuando el temporizador expira el MME libera el contexto del

eNB fuente así como desmantelará la configuración de transmisión del S-GW. Este mecanismo se ilustra de los pasos 19 al 22 y no será tratado aquí.

16. *Modify Bearer Request*: este mensaje enviado por el MME al S-GW tiene como propósito intercambiar la trayectoria de los datos hacia el eNB destino.
17. *Modify Bearer Response*: con este mensaje el S-GW cambia las trayectorias y reconoce las modificaciones de los portadores, estableciéndose el flujo de datos desde el eNB destino al UE.

### Señalización en SRVCC

1. *Measurement Report*: éste mensaje posee las características explicadas en los casos anteriores de *handover* y consiste en la notificación que ejecuta el UE hacia el eNB ante una situación de *handover*.
2. Basado en el mensaje 1 (*Measurement Reports*) la red E-UTRAN fuente decide iniciar el SRVCC *handover* hacia la red GERAN de destino.
3. En este mensaje la red E-UTRAN fuente envía el mensaje *Handover Required* (que incluye: *Target ID*, *generic Source to Target Transparent Container* y *SRVCC HO Indication*) hacia la entidad MME fuente. La red E-UTRAN ubica la información "*old BSS to new BSS information IE*" para el dominio CS en el *generic Source to Target Transparent Container*. La indicación del *handover* SRVCC HO instruye al MME sobre el destino orientado solo sobre el dominio CS, especificando de esta manera que la operación de *handover* SRVCC ocurre hacia éste dominio. El mensaje incluye un indicador que especifica que el UE no se encuentra disponible para el servicio PS en la celda de destino.
4. Basado en el indicador de calidad de servicio asociado al portador de voz (QCI 1) y la indicación de SRVCC HO, el MME fuente divide el portador de voz del resto de los portadores e inicia el procedimiento de *PS-CS handover* para éstos solamente hacia el *MSC Server*
5. El MME envía un mensaje de petición SRVCC PS hacia CS (que incluye: *IMSI*, *Target ID*, *STN-SR*, *C-MSISDN*, *generic Source to Target Transparent Container*, *MM Context*) hacia el *MSC Server*. El *IMSI* autenticado y el *C-MSISDN* se incluyen si se encuentran disponibles. El *STN-SR* recibido del MME y el *C-MSISDN* recibido del HSS como parte del perfil de suscripción descargado del procedimiento *E-UTRAN attach* son los que se incluyen en este mensaje. El contexto MME (*MME Context*) contiene información relacionada con la seguridad. La llave de seguridad del dominio CS es entregada por el MME del dominio E-UTRAN/EPS como se define en la especificación TS 33.401 y enviada en el contexto MME.
6. *Prepare Handover Request*: a través de éste mensaje el *MSC Server* interopera la solicitud de *PS-CS handover* con la de *CS inter-MSC handover* mediante el envío de éste mensaje hacia el MSC destino. El *MSC Server* asigna un SAI (definido en [31]) por defecto como *Source ID* en la interfaz con el BSS destino y usa el encapsulamiento BSSMAP para el mensaje "*Prepare Handover Request*".
7. En este punto el MSC de destino ejecuta la locación de recursos con el BSS de destino mediante el intercambio de mensajes *Handover Request/ Acknowledge*.
8. El MSC destino envía un mensaje de "*Prepare Handover Response*" al *MSC Server*.

9. En este punto ocurre el establecimiento de la conexión de circuitos entre el MSC destino y el MGW asociado con el MSC Server utilizando ISUP IAM y ACM.
10. El MSC Server inicia la Transferencia de Sesión (*Session Transfer*) mediante el envío del mensaje ISUP IAM (STN-SR) hacia la red IMS.
11. Durante la ejecución del procedimiento de Transferencia de Sesión el extremo remoto se actualiza con el SDP de la conexión CS. El flujo de enlace descendente de paquetes de VoIP se conmuta hacia el acceso CS en este punto.
12. El acceso al IMS fuente se libera según la especificación TS 23.237.
13. En este punto el MSC Server envía el mensaje “*SRVCC PS to CS Response*” al MME fuente. Este paso se realiza con independencia de los pasos 11 y 12.
14. EL MME fuente envía el comando de *handover (Handover Command)* a la red E-UTRAN fuente. Este mensaje incluye información sobre el componente de voz solamente.
15. La red E-UTRAN fuente envía el comando de *handover* al UE con la información del mensaje 14.
16. En esta etapa el UE inicia el sincronismo con la red GERAN.
17. Ocurre la detección del *handover* en el BSS destino. El UE envía el mensaje “*Handover Complete*” a través del BSS destino hacia el MSC destino. Si el MSC destino no es el MSC Server, entonces el MSC destino enviará un mensaje SES (*Handover Complete*) al MSC Server.
18. El UE inicia el procedimiento de suspensión (*Suspend Procedure*) especificado en TS 23.060, clausula 16.2.1.1.2. Este provoca que el SGSN destino envíe un mensaje de Notificación de Suspensión al MME fuente, el que responde con el mensaje de reconocimiento “*Suspend Acknowledge*” al SGSN.
19. El BSS destino envía el mensaje “*Handover Complete*” al MSC destino.
20. El MSC destino envía un mensaje SES (*Handover Complete*) hacia el MSC Server. El circuito de llamada es conectado a través del MSC Server/MGW de acuerdo con lo especificado en TS 23.009.
21. En esta etapa se realiza el completamiento del establecimiento del procedimiento con el mensaje “*ISUP Answer*” hacia el MSC Server de acuerdo con la especificación TS 23.009.
22. El MSC Server envía un mensaje de notificación que indica el completamiento del SRVCC PS hacia el CS (*SRVCC PS to CS Complete Notification*) al MME fuente, informando que el UE ha arribado a la celda destino. El MME fuente realiza un reconocimiento de la información a través del mensaje “*SRVCC PS to CS Complete Acknowledge*” hacia el MSC Server.
- 22a. El MME desactiva los portadores usados para voz así como los portadores GBR. Todos los portadores GBR son desactivados mediante el procedimiento “*Dedicated Bearer Deactivation*” establecido en la especificación TS 23.401. El MME no envía la petición de desactivación hacia el eNodeB en el mensaje del paso anterior (22). La indicación del *handover* “PS-to-CS” es notificada al P-GW para los portadores de voz durante el procedimiento de desactivación de portadores. Para interfaces S5/S8 basadas en GTP, el S-GW solicita al P-GW la eliminación de todos los contextos de los portadores GBR mediante el envío del mensaje “*Delete Bearer Command*”. Si se

emplea el PCC dinámico el P-GW puede interactuar con el PCRF como se define en TS 23.203. Para las interfaces S5/S8 basadas en PMIP el S-GW interactúa con el PCRF el cual a su vez actualiza sus políticas para tráfico GBR en el P-GW.

El MME inicia la preservación y suspensión de portadores no GBR mediante el envío de mensajes "*Suspend Notification*" hacia el S-GW. Para estos portadores no GBR, el S-GW libera los portadores S1-U para el UE y envía el mensaje "*Suspend Notification*" al P-GW. El MME almacena en el contexto del UE que está en el estado suspendido. Todos los portadores no GBR preservados son marcados como estado suspendido en el S-GW y el P-GW. El P-GW debe descartar aquellos paquetes que reciba de UE que se encuentren en este estado.

23. Si el HLR debe ser actualizado el *MSC Server* ejecuta una re localización TMSI hacia el UE utilizando su propio LAI (*non-broadcast*). La re localización TMSI es ejecutada por el *MSC Server* hacia el UE a través el MSC destino.
  - 23b. Si el *MSC Server* ejecuta una re localización TMSI en el paso 23, y ésta resulta exitosa, el *MSC Server* ejecuta una actualización de localización MAP con el HSS/HLR (*Map Update Location*).
24. Para sesiones de servicios de emergencia después del completamiento del *handover*, el MME fuente o el *MSC Server* pueden enviar un reporte "*Subscriber Location Report*" que contiene la identidad del *MSC Server* hacia el GMLC asociado con el lado fuente o destino respectivamente, como se encuentra definido en TS 23.271 para brindar continuidad del soporte de localización.