



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE REDES CELULARES 4G
EN ENTORNOS DE ALTA MOVILIDAD”**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
PAÚL ANDRÉS BURBANO ABRIL

TUTOR:
DR. VÍCTOR RANGEL LICEA
FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D.F. JUNIO 2016

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. José María Matías Maruri

Secretario: Dr. Ramón Gutiérrez Castrejón

Vocal: Dr. Víctor Rangel Licea

1^{er}. Suplente: Dr. Oleksandr Martynyuk

2^{d o}. Suplente: Dr. José Ismael Martínez López

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: México, D.F.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Víctor Rangel Licea

FIRMA

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico primero a Dios, que me ha acompañado a lo largo de este trayecto, sin el nada de esto sería posible. Que esta meta cumplida sea el inicio de muchas otras más y que me siga llenando de bendiciones que me permitan seguir luchando para poder realizar todos mis sueños.

Así también, quiero dedicar la realización este trabajo a todas las personas que han estado a mi lado durante todos estos años, en especial mi dedicatoria va dirigida a mi futura esposa, a mis padres, mi hermano y mis abuelitos, quienes siempre me han otorgado su apoyo y me han horado con su cariño y aprecio incondicional a lo largo de toda mi vida, a todos ustedes muchísimas gracias.

Agradecimientos

Al Dr. Víctor Rangel Licea

Por ofrecerme su amistad y apoyo incondicional a lo largo de todos estos años, los cuales han sido fundamentales para la exitosa realización de trabajo.

A los profesores del Posgrado de Ingeniería Eléctrica

Cuyas enseñanzas durante la maestría, me han permitido crecer tanto profesional como personalmente.

Al CONACYT

Por el apoyo económico que se me fue otorgado, el cual ha sido fundamental para poder finalizar exitosamente mis estudios de maestría.

A la DGAPA-UNAM

Por el apoyo otorgado para la realización de este trabajo, como parte de los proyectos *PAPIT IN 116316: “Diseño y evaluación de técnicas de calendarización aplicadas a los Sistemas de Transporte Inteligente”* y *PAPIT IN 114713: “Diseño y análisis de algoritmos de calendarización de redes LTE y Wimax”*.

Al Dr. Raúl Aquino Santos

Por su apoyo para la realización de la estancia de investigación en la Universidad de Loughborough – Reino Unido.

Al Dr. Robert Edwards

Cuyo apoyo durante la estancia de investigación realizada en la Universidad de Loughborough – Reino Unido me permitió obtener de manera exitosa los resultados presentados en este trabajo.

Resumen

En este trabajo de investigación se realizó el análisis del funcionamiento del sistema LTE bajo condiciones de alta movilidad. Para este análisis se obtuvieron muestras en escenarios de tipo carretera, de los valores correspondientes a los indicadores de potencia, calidad y relación señal a ruido de las señales de referencia de LTE, las cuales son utilizadas para la ejecución de procedimientos de movilidad y estimación de la calidad del canal percibida por el terminal de usuario del sistema.

El estudio se encuentra orientado a la caracterización de los parámetros mencionados a través del análisis estocástico de un conjunto de mediciones recolectadas en entornos de alta movilidad, el objetivo del análisis realizado es obtener funciones de probabilidad estándar las cuales presenten características estadísticas similares a las de las mediciones utilizadas, que permitirán modelar el comportamiento del sistema LTE de manera práctica.

El análisis además presenta el dimensionamiento de la capacidad de transmisión del enlace descendente del sistema LTE en entornos de alta movilidad, a través del cálculo del throughput máximo que puede ser alcanzado. Para el cálculo del throughput se plantea un modelo matemático que considera exclusivamente los recursos dispuestos por el sistema para la transmisión de la información del usuario y además combina el uso de un conjunto de parámetros como el Channel Quality Indicator (CQI) utilizado para estimar la calidad del canal y el Modulation Coding Scheme (MCS), el cual determina el tipo de modulación y tasa de codificación a ser utilizada para la transmisión de los canales físicos correspondientes al enlace descendente.

Índice General

Índice General	
Índice de Figuras	
Índice de Tablas	
Capítulo 1. Introducción y Estado del Arte	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Definición del Problema	2
1.3. Objetivos y Metas	4
1.4. Metodología	4
1.5. Estado del Arte.....	5
1.6. Estructura de la Tesis	8
Capítulo 2. Conceptos Generales de LTE	10
2.1. Introducción	10
2.2. Evolución de las Comunicaciones Móviles	10
2.3. Requerimientos del Sistema LTE	15
2.4. Arquitectura del Sistema LTE	19
Capítulo 3. Interfaz de Radio del Sistema LTE	34
3.1. Introducción	34
3.2. Técnicas de Acceso de las Interfaces de Radio	35
3.3. Modos de Transmisión en LTE.....	36
3.4. Principios de OFDM.....	37
3.5. Canales en LTE.....	42
3.6. Estructura de las Tramas en LTE.....	47
3.7. Estructuración de la Capa Física de LTE.....	50
3.8. Señales de Referencia en el Enlace Descendente	56
3.9. Estimación de Canal	58
3.10. Adaptación Dinámica del Enlace.....	61
3.11. Multiple Input Multiple Output (MIMO)	63
3.12. Malla de Recursos en LTE.....	65

Capítulo 4. Análisis y Modelado Estocástico de Datos	67
4.1. Introducción	67
4.2. Recolección de Información	68
4.3. Filtrado de la Información	71
4.4. Análisis Estocástico de Datos	73
4.5. Modelos Estocásticos Propuestos	79
4.6. Resultados Obtenidos.....	84
Capítulo 5. Dimensionamiento de la Capacidad del Sistema.....	87
5.1. Introducción	87
5.2. Principios de Adaptación Dinámica del Enlace en LTE.....	88
5.3. Análisis de Resultados de Adaptación del Enlace	95
5.4. Dimensionamiento de la Capacidad del Sistema	99
5.5. Procedimiento para el Cálculo de Throughput	107
5.6. Resultados Obtenidos.....	109
Conclusiones y Trabajo a Futuro	117
Conclusiones	117
Trabajo a futuro.....	119
Referencias y Bibliografía	120
Glosario de Términos	123
Apéndice.....	128
Código de Matlab.....	128

Índice de Figuras

Figura 2.1. Línea temporal de la evolución de las comunicaciones móviles [8].	11
Figura 2.2. Arquitectura general del sistema LTE [18].	19
Figura 2.3. Interconexión entre el eNodeB y las entidades del sistema LTE [18].	22
Figura 2.4. Interfaces de la E-UTRAN [21].	23
Figura 2.5. Protocolos para el plano de control de la interfaz Uu [18].	24
Figura 2.6. Protocolos para el plano de usuario de la interfaz Uu [18].	26
Figura 2.7. Protocolos para plano de control (X2-C) y usuario (X2-U) de la interfaz X2 [18].	27
Figura 2.8. Protocolos para plano de control (S1-MME) y usuario (S1-U) de la interfaz S1 [18].	29
Figura 2.9. Principales entidades e interfaces de la EPC [21].	30
Figura 2.10. Protocolos para el plano de control de la interfaz S11 [18].	33
Figura 2.11. Protocolos para el plano de control y de usuario de la interfaz S5-S8 [18].	33
Figura 3.1. Técnicas de acceso FDMA, TDMA, CDMA y OFDMA.	36
Figura 3.2. Estructura del canal FDD [23].	37
Figura 3.3. Estructura del canal TDD [23].	37
Figura 3.4. Transformada Rápida de Fourier en el Transmisor y Receptor LTE [22].	39
Figura 3.5. Símbolos OFDM y Subportadoras Moduladas [25].	40
Figura 3.6. Inserción del Cycle Prefix en un símbolo OFDM [21].	41
Figura 3.7. Mapeo de canales para el enlace descendente del sistema LTE [23].	46
Figura 3.8. Mapeo de canales del sistema LTE para el enlace ascendente [23].	47
Figura 3.9. Estructura de trama tipo FDD [21].	48
Figura 3.10. Estructura de trama tipo TDD [21].	49
Figura 3.11. Diagrama de Bloques de Procesamiento de la Capa Física de LTE [23].	51
Figura 3.12. Segmentación de los Bloques de Transporte [23].	52
Figura 3.13. Diagrama de bloques de un turbo codificador con tasa de codificación de 1/3 [23].	53
Figura 3.14. Distribución de símbolo para cada tipo de modulación del sistema LTE [26].	54
Figura 3.15. Resource Elements y Resource Block [2].	55
Figura 3.16. Ubicación de las señales de referencia CSRS en un Resource Block [23].	56
Figura 3.17. Ubicación de las señales de referencia CSRS para diferentes Cell ID [23].	57
Figura 3.18. Señales de referencia para dos y cuatro puertos de antena [23].	57
Figura 3.19. Esquema general para estimación de canal y adaptación del enlace [21].	59
Figura 3.20. Esquema SU-MIMO [25].	63
Figura 3.21. Esquema MU-MIMO [25].	63
Figura 3.22. Multiplexación Espacial [22].	64
Figura 3.23. Diversidad [22].	64

Figura 3.24. Malla de recursos en LTE para canal de 3MHz [30].....	66
Figura 4.1. Mapa de ubicación geográfica de la de autopista “Motorway 1” [33].....	69
Figura 4.2. Distribución geográfica final de las muestras obtenidas [34].	73
Figura 4.3. Distribución de los valores del parámetro RSRP.	74
Figura 4.4. Función de Densidad de Probabilidad empírica para los valores del parámetro RSRP.....	75
Figura 4.5. Distribución de los valores del parámetro RSRQ.....	76
Figura 4.6. Función de Densidad de Probabilidad empírica para los valores del parámetro RSRQ.	76
Figura 4.7. Distribución de los valores del parámetro RS SNR.	77
Figura 4.8. Función de Densidad de Probabilidad empírica para los valores del parámetro RS SNR.	78
Figura 4.9. PDF empírica y modelos seleccionados a través de BIC para los valores de RSRP.....	84
Figura 4.10. CDF empírica, CDF de los modelos obtenidos y error estimado entre CDF.	85
Figura 5.1. Distribución de RS SNR sin promedio y con promedio de 10 últimos valores.	92
Figura 5.2. Curva correspondiente al esquema de modulación y codificación N° 10 [41].....	93
Figura 5.3. Curvas correspondientes a todos los esquemas de modulación y codificación [41].	93
Figura 5.4. Diagrama de flujo para selección de MCS.	94
Figura 5.5. Distribución de los valores del parámetro MCS.....	95
Figura 5.6. Función de Densidad de Probabilidad empírica para los valores del parámetro MCS.	96
Figura 5.7. Distribución de los valores del parámetro BLER.....	96
Figura 5.8. Función de Densidad de Probabilidad empírica para los valores del parámetro BLER.	97
Figura 5.9. Distribución de los valores del parámetro CQI.	98
Figura 5.10. Función de Densidad de Probabilidad empírica para los valores del parámetro CQI.....	99
Figura 5.11. Esquemas de Modulación y Codificación vs Throughput.....	110
Figura 5.12. Throughput para el enlace descendente.....	111
Figura 5.13. PDF y CDF empíricas del throughput para un canal descendente de 1.4MHz.	112
Figura 5.14. PDF y CDF empíricas del throughput para un canal descendente de 10MHz.	113
Figura 5.15. PDF y CDF empíricas del throughput para un canal descendente de 20MHz.	114
Figura 5.16. Throughput acumulado para el enlace descendente.	116

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Requerimientos de Eficiencia Espectral por celda [8].....	16
Tabla 2.2. Categorías de UE para LTE Release 8 [18].....	21
Tabla 3.1. Anchos de banda, Numero de Subportadoras y Resource Blocks en LTE [22].	40
Tabla 3.2. Configuraciones de la Trama TDD [21].....	49
Tabla 3.3. Configuraciones de la Subtrama Especial [21].....	50
Tabla 3.4. Métodos de codificación y canales en LTE [23].	52
Tabla 3.5. Modulaciones, bits por símbolo modulado y canales en LTE [23].	54
Tabla 3.6. Valores de RSRP definidos por el estándar [28].	60
Tabla 3.7. Valores de RSRQ definidos por el estándar [28].....	60
Tabla 3.8. Valores de CQI definidos por el estándar LTE [26].....	61
Tabla 3.9. Valores de MCS definidos por el estándar LTE [29].	62
Tabla 3.10. Parámetros de configuración.	65
Tabla 3.11. Código de colores para canales físicos.	65
Tabla 4.1. Modelos seleccionados a través del método BIC.	85
Tabla 4.2. PDF seleccionadas a través del método AIC.	86
Tabla 4.3. Funciones, ecuaciones, parámetros y valores obtenidos por los métodos BIC y AIC.	86
Tabla 5.1. Configuraciones de Anchos de Banda y Numero de Resource Blocks en LTE [22].	101
Tabla 5.2. Configuraciones de la Trama TDD [21].	101
Tabla 5.3. Configuraciones de la Subtrama Especial [21].....	102
Tabla 5.4. Valores de MCS utilizados para el cálculo del throughput [29].....	109
Tabla 5.5. Throughput mínimo, máximo y promedio para todas las configuración de ancho banda.....	115

Capítulo 1. Introducción y Estado del Arte

1.1. Antecedentes

El área de Sistemas de Transporte Inteligente es una de las áreas de investigación de las tecnologías de la información y comunicación que más relevancia a tomado en los últimos años. El crecimiento de la industria automovilística y la constante demanda de vehículos a nivel mundial hacen que éste sistema de transporte se convierta en un amplio campo para la implementación de tecnologías de comunicación que permitan el intercambio de información entre vehículos con la finalidad de aumentar la seguridad, eficiencia en el manejo del tráfico, el control de emisión de gases de efecto invernadero, entre muchas otras aplicaciones.

Estas aplicaciones serán viables una vez que las redes de comunicación entre vehículos sean implementadas, ya sea que estas sean desplegadas entre vehículos a través de Redes Ad-Hoc o a través del uso de infraestructura fija de telecomunicaciones. Cuando se hace referencia a el uso de infraestructura de telecomunicaciones como parte central de los sistemas de comunicación entre vehículos se debe otorgar especial importancia a las tecnologías que se encuentran desplegadas en la actualidad como Long Term Evolution (LTE).

Considerando la penetración actual del sistema de comunicación celular LTE y su tendencia de crecimiento exponencial en un futuro próximo, la probabilidad de que vehículos u otros sistemas de transporte se puedan encontrar dentro del área de cobertura de éste tipo de tecnología incrementa considerablemente. Esto conlleva a que se plantee el uso de esta infraestructura para la implementación de comunicaciones vehiculares.

LTE [1] es un acrónimo para Long Term Evolution, comúnmente conocido también como 4G, es un estándar para comunicaciones inalámbricas desarrollado y estandarizado por el 3rd Generation Partnership Project (3GPP) que permite la transmisión de datos a alta velocidad para dispositivos móviles, las tasas de transmisión máximas que define el estándar son 100 Mbps para el enlace descendente y 50 Mbps en el enlace ascendente, aunque se debe mencionar que estos valores no consideran la sobrecarga generada por los canales de control.

Además, LTE permite el uso de tecnologías como MIMO (Multiple Input Multiple Output) que incrementa estas tasas de transmisión hasta un máximo teórico de 400 Mbps en el enlace descendente usando MIMO 4X4 (4 Antenas para transmisión y 4 para recepción ubicadas en la estación base o eNodeB) y 100 Mbps en el enlace ascendente usando MIMO 2X2 (2 Antenas para transmisión y 2 para recepción ubicadas en el terminal de usuario).

LTE es la evolución de tecnologías como GSM/EDGE y UTMS, la principal diferencia radica en el núcleo de la red, donde LTE está basado completamente en conmutación de paquetes IP. Otro aspecto a considerar es que, debido a la necesidad de compatibilidad con el uso del espectro utilizado por tecnologías anteriores los anchos de banda definidos para los canales descendentes en el sistema LTE son de 1.4,3,5,10,15 y 20 MHz los cuales pueden estar ubicados de manera contigua o en diferentes espacios del espectro radioeléctrico.

A nivel de la capa física, LTE usa un nuevo esquema de acceso múltiple conocido como Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) para el enlace descendente y Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) para el enlace ascendente, así como los modos de transmisión Frequency Division Duplex (FDD) y Time Division Duplex (TDD).

Otra de las características importantes del sistema LTE es la implementación de métodos de modulación y codificación adaptativa, dependientes de las condiciones del canal, en conjunto con el uso de algoritmos de calendarización que permiten que los recursos se administren de manera eficiente en condiciones de propagación adversas y tráfico de datos elevado.

1.2. Definición del Problema

Dada la relevancia que representa la implementación de sistemas de comunicaciones vehiculares eficientes y confiables, se hace imperativo el análisis de factibilidad para el despliegue de éste tipo de tecnologías en combinación con infraestructura existente de telecomunicaciones como LTE. Éste análisis permitirá determinar las limitaciones y capacidades de éste sistema en entornos vehiculares de alta velocidad.

LTE fue diseñado originalmente como un sistema de comunicaciones en el que los usuarios pueden moverse con relativa facilidad dentro de un área de cobertura determinada. El estándar define velocidades máximas de alrededor de 300 Km/h en las que se puede garantizar conectividad con un determinado grado de confiabilidad a los usuarios. Sin embargo estas estimaciones teóricas no consideran un gran conjunto de inconvenientes ligados a escenarios que cambian constantemente como producto de la alta movilidad de los usuarios. Esto, por supuesto provoca que funcionamiento del sistema LTE no se encuentre totalmente optimizado para éste tipo de entornos.

Entre los principales inconvenientes se encuentran el deterioro constante en la calidad de la señal derivado de efectos como desvanecimientos lentos y desvanecimientos rápidos también conocidos como efectos multi trayectoria, los cuales pueden llegar a producir pérdidas abruptas en la potencia de la señal de hasta 20 dB. Esto en combinación con el efecto Doppler en el cual la frecuencia o frecuencias portadoras del sistema se desplazan con respecto al movimiento relativo de los receptores ubicados en los terminales de usuario.

Sumado a éste tipo de inconvenientes se deben considerar los procesos definidos por el estándar LTE que se encuentran relacionados a la movilidad de los usuarios, como son los procedimientos de sincronización, selección/reelección de celda y en especial el procedimiento de Handover, en el que se debe mantener un enlace de comunicación activo entre el sistema y el usuario durante el proceso de transición de una estación base a otra, de tal manera que la calidad del servicio se mantenga estable mientras que los procesos de sincronización y señalización se realizan de manera “transparente” para el usuario final.

Todo éste tipo de complicaciones relacionadas a entornos de alta movilidad derivan en la disminución de la calidad del servicio para el usuario, el aumento considerable de retardos, que afectan principalmente a aplicaciones que requieren la transmisión de datos en tiempo real como voz o video llamadas y finalmente en una reducción considerable de la capacidad general del sistema, lo cual limita el potencial de las servicios y recursos que pueden ser gestionados de manera apropiada y eficiente por el sistema LTE.

Como se puede observar, existe una gran cantidad de retos de orden técnico que deben ser abordados previo a que la implementación de los sistemas de comunicación vehicular en combinación con la tecnología LTE sea viable. Esto abre la posibilidad para que se pueda realizar el análisis de la capacidad y eficiencia de este sistema con el objetivo de determinar si el mismo cumple con los requerimientos técnicos que el gran conjunto de aplicaciones de los Sistemas de Transporte Inteligente requiere.

1.3. Objetivos y Metas

El objetivo principal de éste trabajo es el de analizar el comportamiento dinámico de las redes celulares 4G en entornos de alta movilidad, para esto, el estudio se encuentra separado en dos secciones principales. La primera sección presenta el modelado estocástico de los principales indicadores de calidad de la señal recibida por los terminales de usuario.

Mientras que la segunda sección presenta un estudio del comportamiento de LTE en términos de su capacidad para adaptarse a condiciones adversas de propagación en el canal de comunicación en entornos de alta movilidad y sus consecuencias en la eficiencia en la administración de recursos de red medida a través del análisis del “throughput” del sistema.

1.4. Metodología

La metodología a utilizar en el presente trabajo considera el uso de modelos estocásticos basados en el análisis de los parámetros de la señal recibida por los terminales de usuario del sistema LTE en entornos de tipo carretera. Los datos recolectados serán obtenidos a través del uso de herramientas de “crowdsourcing” como Open Signal [3], para luego ser filtrados apropiadamente con el objetivo obtener los parámetros a ser utilizados en el presente estudio.

Además se propone el uso modelos matemáticos, que permitirán dimensionar el sistema en términos de su capacidad para adaptarse a las condiciones adversas de canal presentadas en entornos de alta movilidad, así como sus efectos en la eficiencia en la administración de recursos y la capacidad de transmisión del sistema en términos de “Throughput”.

1.5. Estado del Arte

Ante la importancia que representan pruebas realizadas en condiciones similares a las que en teoría se desplegarían las redes vehiculares en combinación con infraestructura de LTE, el trabajo desarrollado en [4] muestra mediciones de los principales parámetros de calidad de la señal, recibida por un terminal de usuario del sistema LTE en condiciones de movilidad media (40Mph), en un ambiente suburbano, por un determinado periodo de tiempo. Con el objetivo de analizar el comportamiento del sistema LTE en este tipo de entornos, el análisis es replicado en un escenario sin movilidad tomando en cuenta los mismos parámetros de calidad de la señal.

Los resultados muestran claramente que los valores de fuerza y calidad de las señales de referencia, utilizadas por el sistema LTE para la estimación de la calidad del canal de comunicación y procedimientos de movilidad, así como los valores de Signal to Noise Ratio (SNR) de la señal recibida por el terminal de usuario, en el escenario móvil, son significativamente menores y muestran variaciones más abruptas cuando son contrastados con los valores obtenidos en el escenario sin movilidad.

Esto disminuye significativamente la capacidad del sistema en términos de Throughput (17 Mbps en el escenario fijo y 10 Mbps en el escenario móvil) y Block Error Rate (BLER), sin contar con la sobrecarga de trabajo a nivel de la capa MAC, en donde el sistema LTE aumenta considerablemente el número de retransmisiones con el objetivo de mantener la tasa de transmisión del sistema, disminuyendo su eficiencia considerablemente.

Sin embargo, se debe mencionar que el estudio realizado no efectúa ningún análisis de los datos obtenidos, limitándose solamente a comparar cuantitativamente indicadores como Throughput y Block Error Rate, ignorando otros parámetros como el del indicador de calidad de la señal (CQI), utilizado por el sistema LTE para determinar el modo en el que se asignan los recursos, así como los valores de fuerza (RSRP) y calidad (RSRQ) de la señal, que sirven de apoyo para la ejecución de los procedimientos de movilidad del sistema LTE como Handover y Selección/Reelección de celdas.

En principio los sistemas de comunicación vehiculares, ya sea desplegados entre vehículos (V2V) o entre vehículos e infraestructura de telecomunicaciones (V2I), estarían diseñados para la transmisión de mensajes de longitud pequeña en el orden de los 120 bytes de longitud, como los definidos por el comité técnico del Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeo ETSI [5] para los Sistemas de Transporte Inteligente.

Estos mensajes pueden ser transmitidos de manera periódica o por avisos de eventos que hayan ocurrido en una determinada localización en la carretera. En [6] se presenta un análisis del funcionamiento de las redes LTE cuando se plantea la transmisión de mensajes de esta longitud, de manera periódica y en función de eventos, a través del uso del modo de transmisión Unicast, es decir sin implementar el modo de transmisión Broadcast que ofrece el sistema LTE.

Además, el estudio considera entornos de movilidad (50Km/h para entornos urbanos y 80Km/h para entornos rurales) en combinación con diferentes configuraciones frecuencia y separación entre estaciones base en función del escenario en el que se encuentra desplegada la red LTE (2GHz y 500m de separación para entornos urbanos, 800MHz y 6Km de separación para entornos rurales).

En el caso en el que se consideran los mensajes que son transmitidos de manera periódica, los resultados muestran que el canal descendente destinado para la transmisión de datos se convierte en un cuello de botella, ya que éste se encuentra constantemente saturado debido a la transmisión constante de información, además de esto, el canal disminuye su capacidad de manera considerable cuando aumenta el número de vehículos que se encuentran en una celda determinada.

En lo que hace referencia a la complejidad del sistema, el análisis muestra que ésta también se ve incrementada, debido a la necesidad de coordinación requerida en la estación base cuando ésta debe enviar los mensajes de manera ordenada a un determinado grupo de vehículos.

Por otra parte, cuando los mensajes son enviados en caso de que un evento a ocurrido, la disminución en la capacidad del enlace descendente es menos notable, esto se debe a que el impacto sobre el canal es mucho menor que en el caso de las transmisiones periódicas, ya que el intervalo de tiempo de estos mensajes no es constante y por lo tanto el canal se ve saturado solo por determinados intervalos de tiempo.

Un aspecto importante a considerar es que los mensajes generados debido a la ocurrencia de eventos, normalmente tienen mayor importancia que los mensajes que se envían de manera periódica y que comúnmente son utilizados con el propósito de mantener información actualizada de la red vehicular en el sistema.

Otro punto interesante del análisis hace referencia al estudio del canal de control utilizado por el enlace descendente, ya que éste también se convierte en un cuello de botella debido a que no se encuentra optimizado para la transmisión periódica de pequeñas porciones de información, esto es un inconveniente tanto para los mensajes que se envían de manera periódica como para los mensajes generados por eventos.

Sin embargo, a pesar de que el estudio considera escenarios muy similares al del despliegue de las redes vehiculares, omite aspectos importantes del funcionamiento de LTE, como el tiempo requerido por los terminales desde que se realizan procesos de acceso aleatorio hasta que los recursos son asignados, esto agrega retardos considerables que no son analizados.

Otra omisión importante es la falta de análisis referente a los procedimientos de Handover que ocurren cuando existe un cambio de celda debido a la movilidad de los vehículos, esto incrementa los tiempos de retardo debido a la cantidad de información de señalización requerida para efectuar éste tipo de procedimientos.

Debido a que uno de los aspectos más importantes al considerar el despliegue de las redes vehiculares es la alta movilidad de los terminales de usuario, la cual produce la ejecución de procedimientos de handover como consecuencia del cambio entre celdas, la omisión del análisis sobre el efecto de este procedimiento, disminuye la relevancia del estudio.

Finalmente, el análisis realizado en [7] lleva a cabo un estudio muy detallado del procedimiento de Handover, con especial énfasis en usuarios que se desplazan a altas velocidades, en combinación con la dirección de movimiento de los usuarios y las condiciones de propagación del escenario.

La solución propuesta por éste estudio es un algoritmo ubicado en la sección central del sistema, el objetivo de éste algoritmo es el de promediar los valores recibidos de fuerza y calidad de las señales de referencia a través del uso de una ventana de tiempo deslizante, cuyo intervalo de tiempo se encuentra en función de la velocidad del usuario y de los valores previos de fuerza y calidad de la señal recibidos por el sistema.

El método propuesto tiene como objetivo evitar la ocurrencia innecesaria de procedimientos de Handover producidos por cambios abruptos en las señales de referencia medidas, estos cambios son producto de la alta movilidad de los usuarios en combinación con el escenario en el que los mismos se encuentran ubicados.

Los resultados del uso de éste algoritmo muestran que el número de ocasiones en la que la conexión entre el terminal de usuario y la estación base presenta desconexiones disminuye considerablemente, sin embargo el número de desconexiones aumenta especialmente en el borde de las celdas y en áreas de mayor densidad urbana.

1.6. Estructura de la Tesis

Este trabajo de tesis se encuentra dividido en un total de 5 capítulos, a continuación se muestra una breve descripción correspondiente al contenido que será presentado y analizado en cada uno de ellos.

El capítulo 1 presenta una breve introducción a los Sistemas de Transporte Inteligente, los sistemas de comunicación vehicular y una descripción general de los sistemas celulares LTE, adicionalmente se muestra la metodología de análisis a ser implementada en este trabajo así como un análisis del estado del arte.

El capítulo 2 describe los conceptos generales del sistema LTE, en este capítulo se presenta la evolución de los sistemas de comunicación celular hasta llegar a los sistemas de cuarta generación, los requerimientos técnicos definidos por el estándar para el sistema LTE así como la arquitectura y principales elementos que forman parte del mismo.

El capítulo 3 presenta una descripción detallada de los principales conceptos, métodos y tecnologías que forman parte de la estructura de la capa física del sistema LTE, así también se presenta una breve descripción de los conceptos de capa de control de acceso al medio que serán utilizados durante este estudio.

El capítulo 4 describe la metodología utilizada para el análisis de los datos recolectados en entornos vehiculares de alta movilidad, así como el modelado estocástico de los principales indicadores de la calidad de la señal recibida por los terminales de usuario, los cuales son utilizados por el sistema LTE para caracterizar el enlace de comunicaciones.

Finalmente, en el capítulo 5 se exponen los modelos matemáticos utilizados para realizar el dimensionamiento de la capacidad de transmisión del enlace descendente del sistema LTE en modo Single Input Single Output (SISO), además se presentan los resultados obtenidos en términos de “throughput”, los cuales permitirán establecer la capacidad real del sistema en entornos vehiculares de alta movilidad.

Capítulo 2. Conceptos Generales de LTE

2.1. Introducción

El desarrollo de las comunicaciones móviles en los últimos años y la constante demanda de mayores tasas de transmisión que puedan cumplir con los requerimientos de nuevos servicios multimedia, han hecho que los sistemas de comunicación móvil deban evolucionar constantemente hasta convertirse en un servicio indispensable para la sociedad actual.

Para poder entender cómo funcionan los sistemas de comunicación de la actualidad, es importante entender como estos sistemas han cambiado y evolucionado a lo largo del tiempo con el objetivo de adaptarse a las necesidades del mundo moderno, buscando al mismo tiempo mantener elevados niveles de eficiencia y rentabilidad.

Este capítulo proporciona una breve reseña de la evolución de las comunicaciones móviles de tipo celular hasta llegar al sistema LTE de cuarta generación desplegado en la actualidad. Presenta también, la arquitectura del sistema LTE, sus requerimientos técnicos, y las principales entidades, interfaces y protocolos que hacen posible el funcionamiento de LTE en general.

2.2. Evolución de las Comunicaciones Móviles

Cuando se describe el proceso de evolución de los sistemas de comunicaciones móviles, normalmente se utiliza el término “generaciones” para describir a las etapas de éste proceso [2] y [8], donde cada generación se encuentra relacionada a un conjunto de estándares y protocolos desarrollados por parte de diferentes entidades encargadas del desarrollo de tecnologías de telecomunicaciones. La figura 2.1 muestra la línea temporal de la evolución de las comunicaciones móviles, donde se pueden observar estos protocolos y las entidades encargadas de su desarrollo.

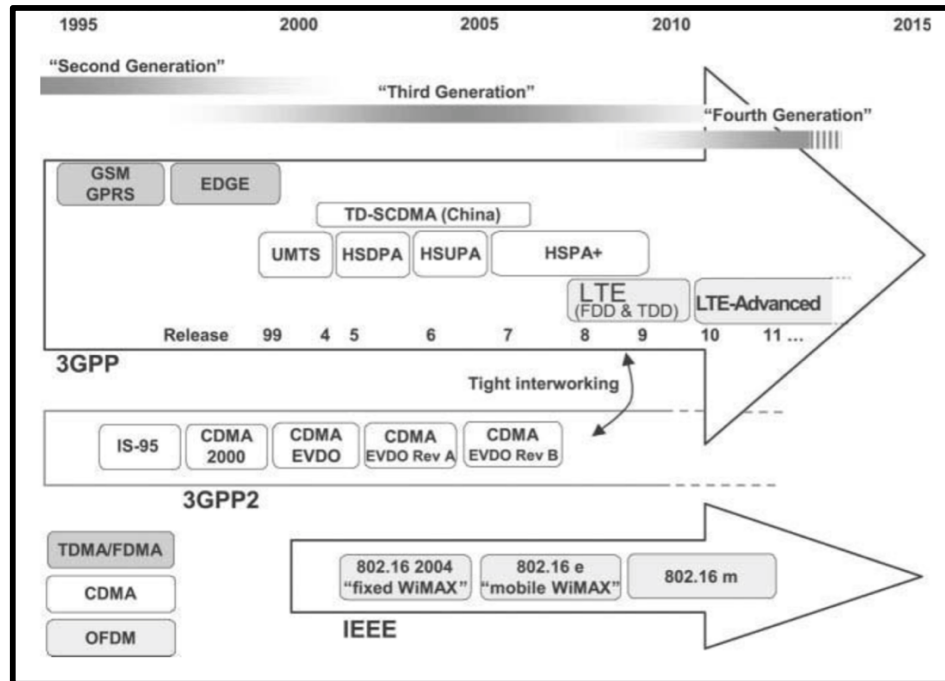


Figura 2.1. Línea temporal de la evolución de las comunicaciones móviles [8].

2.2.1. Sistemas Móviles de Primera Generación (1G)

La primera generación de los sistemas de comunicación móviles surgieron al inicio de los años 80. Estos sistemas basaban su funcionamiento en tecnologías analógicas de conmutación de circuitos, que permitían la transmisión de información de voz con una calidad aceptable a través del uso de canales con un ancho de banda entre 15KHz y 30KHz dependiendo del tipo de sistema. Cada canal podía ser utilizado por un solo usuario a la vez, lo que aumentaba el consumo del ancho de banda disponible, limitaba el número máximo de usuarios que podían estar conectados de manera simultánea y consecuentemente disminuía la eficiencia espectral del sistema de manera considerable.

Es importante mencionar a los principales sistemas de comunicación móvil considerados como tecnologías de primera generación. Entre ellos se encuentran el sistema de telefonía americano Advanced Mobile Phone System (AMPS), Normadic Telephone System (NMT) y Total Access Communications System (TACS).

2.2.2. Sistemas Móviles de Segunda Generación (2G)

La segunda generación introdujo un conjunto de modificaciones con el objetivo de mejorar el rendimiento de sus antecesores. Estas mejoras permitían a estos sistemas la transmisión de información de voz con una mejor calidad, el envío y recepción de mensajes cortos de texto de tipo SMS y la transferencia de datos con tasas de transmisión de hasta 9.6Kbps.

Entre los principales sistemas de segunda generación se encuentran Global System for Mobile Communications (GSM) [9], desarrollado por el 3GPP y Code Division Multiple Access (CDMA) [10] desarrollado por el 3GPP2. Estos sistemas posibilitaron el uso de canales de 200KHz con un máximo de hasta 8 usuarios utilizando el canal al mismo tiempo, mejorando así su capacidad y eficiencia espectral.

Durante la transición entre los sistemas de segunda y tercera generación, surgieron tecnologías como General Packet Radio Service (GPRS) [11] y Enhanced Data Rates for Global Evolution (EDGE) [12] que permitían alcanzar tasas de transmisión de hasta 140Kbps y 384Kbps respectivamente. Sin embargo, estas no son consideradas como tecnologías de tercera generación ya que no cumplen con los requerimientos técnicos de esa generación y debido a esto son conocidas comúnmente como tecnologías 2.5G.

2.2.3. Sistemas Móviles de Tercera Generación (3G)

Continuado con la evolución de los sistemas de comunicación móvil, aparecen los sistemas de tercera generación. Estos sistemas introdujeron nuevas tecnologías y conceptos en comparación con las generaciones anteriores, entre estos se encuentran los conceptos de Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) [13] y Universal Terrestrial Radio Access Networks (UTRAN) que definen la estructura general de los sistemas 3G.

Estos nuevos conceptos basan su funcionamiento en el uso tecnologías de acceso como Wide Division Code Multiple Access (WCDMA) [14] y CDMA-2000 [10], desarrollados por el 3GPP y 3GPP2 respectivamente. En el caso de WCDMA se definió el uso de canales de 5MHz en contraste con CDMA-2000 que propuso canales de 1.25MHz.

Los cambios introducidos permitían a los sistemas de tercera generación contar con hasta un máximo de 128 canales para la transmisión de información de voz, aunque solo la mitad de estos canales en realidad podían ser utilizados para éste propósito, quedando el restante para la transmisión de información de señalización. Adicionalmente la capacidad de transmisión del sistema también se vio incrementada, alcanzando tasas de transmisión de hasta 2.3Mbps.

De manera similar a lo ocurrido en la transición de 2G a 3G, posterior a la aparición de los sistemas de tercera generación surgieron tecnologías implementadas por el 3GPP como High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) [15], High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) [15] y High Speed Packet Access Plus (HSPA+) [15] que a pesar de no cumplir con los requerimientos de los sistemas de cuarta generación, alcanzaban tasas transmisión de hasta 5.6 Mbps, 14.4Mbps y 42 Mbps respectivamente. Así también 3GPP2 introdujo CDMA 1xEV-DO [16] que permitía alcanzar tasas de transmisión de hasta 2.4Mbps.

2.2.4. Sistemas Móviles de Cuarta Generación (4G)

El continuo incremento en la demanda de sistemas de comunicación móviles que ofrezcan altas tasas de transmisión, llevo al 3GPP al desarrollo de Long Term Evolution (LTE) [1], también conocido como Release 8. LTE representa un gran salto en la evolución de los sistemas de comunicación móviles ya que es el primer sistema que a diferencia de todos sus antecesores se encuentra totalmente basado en la conmutación de paquetes IP.

Es así que, en LTE aparecen nuevos conceptos como el de E-UTRAN (Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access Network) que hace referencia a la sección del sistema encargada de la administración de la interfaz radioeléctrica y la EPC (Evolved Packet Core) que engloba todos los elementos que forman parte del núcleo de la red.

Al ser un sistema basado en conmutación de paquetes IP, presenta ventajas con respecto a las altas tasas de transmisión, eficiencia espectral y baja latencia que pueden ser obtenidas, siendo éste último aspecto especialmente importante para aplicaciones sensibles a retardos como la voz, que en generaciones anteriores era transmitida a través de sistemas que utilizaban conmutación de circuitos y que presentaban niveles mínimos de retardo.

Una de las principales características de LTE es la compatibilidad que ofrece con sistemas anteriores 3GPP como UMTS y GSM, así como la compatibilidad con sistemas 3GPP2 de tipo CDMA. Esta compatibilidad permite al sistema LTE adaptarse a la transición generacional de los sistemas de comunicación móvil de manera práctica y eficiente.

LTE soporta FDD y TDD como modos de transmisión, el uso de TDD por ejemplo, representan una ventaja con respecto a la versatilidad que presenta el sistema para poder utilizar porciones del espectro no contiguas así como flexibilidad para escoger la relación entre la capacidad de transmisión a ser asignada tanto para el enlace descendente como para el enlace ascendente.

El uso de canales de frecuencia con anchos de banda variables de 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20MHz, permite al sistema LTE la utilización de porciones contiguas y no contiguas del espectro radioeléctrico, así como la interoperabilidad y “roaming” entre diferentes operadoras celulares cuyas asignaciones de frecuencia y anchos de banda normalmente son distintas.

La baja latencia que es característica del sistema LTE, es producto del rediseño en la arquitectura del núcleo de la red del sistema, en el que a diferencia de la arquitectura de generaciones anteriores, separa totalmente el plano de datos de usuario del plano de control, llegando a obtener niveles de latencia en el orden de los 5ms y 50ms en cada plano respectivamente, en condiciones ideales.

La alta eficiencia espectral que puede ser obtenida por el sistema LTE es el resultado del uso de tecnologías como Single Carrier–Frequency Division Multiplexing (SC-FDM) en el enlace ascendente y Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) en el enlace descendente, que permiten al sistema combatir de manera eficiente los efectos multi trayectoria y que en combinación con tecnologías como Multiple Input Multiple Output (MIMO) y algoritmos de calendarización para la asignación dinámica de recursos en tiempo y en frecuencia, incrementan el rendimiento del sistema de manera considerable.

2.2.5. Otros sistemas móviles de comunicación

Existen otras tecnologías que fueron desarrolladas con el objetivo de cumplir con los requerimientos de los sistemas de cuarta generación. Éste es el caso del protocolo IEEE 802.16 [17] que en su versión móvil presenta características similares a la tecnología LTE, pero cuya penetración en el mercado es considerablemente baja.

2.3. Requerimientos del Sistema LTE

Con la objetivo de cumplir con todas las mejoras en el rendimiento del sistema LTE y asegurar su competitividad en el mercado por un periodo aproximado de 10 años, un conjunto de requerimientos técnicos establecidos por el 3GPP [8,18] deben ser cumplidos. A continuación se presentan los requerimientos de LTE para la transmisión de información en el plano de usuario y plano de control, para el enlace descendente y el enlace ascendente.

2.3.1. Tasas de transmisión y eficiencia espectral máximas

La tasa de transmisión máxima se define como el “throughput” máximo que cada usuario puede obtener cuando a este se le han otorgado todos los recursos disponibles en el sistema, es decir, se le ha sido asignado todo el ancho de banda disponible, el mejor tipo de modulación, la tasa de codificación más alta y además utiliza el máximo número de antenas disponibles para la recepción de la señal. La tasa de transmisión se define en términos de bits por segundo (bps).

Por otro lado, la eficiencia espectral máxima del sistema se define como el cociente que resulta cuando se divide la tasa de tasa de transmisión máxima entre el ancho de banda total utilizado por el sistema. La eficiencia espectral se define en términos de bps/Hz.

En el caso del sistema LTE, las tasa de transmisión máxima para el enlace descendente es de 100Mbps con una eficiencia espectral aproximada de 5bps/Hz, mientras que para el enlace ascendente estos valores son de 50Mbps y 2.5bps/Hz respectivamente. Estos valores son obtenidos bajo la consideración de que el terminal del usuario cuenta con dos antenas para la recepción, una antena para la transmisión y no considera la sobrecarga del plano de control.

2.3.2. Tasas de transmisión y eficiencia espectral por celda

Si bien tanto el valores máximos de la tasa de transmisión y la eficiencia espectral del sistema son parámetros importantes a ser considerados, también los son estos parámetros a nivel de cada una de las celdas, sobre todo si tomamos en cuenta que el área de cobertura del sistema LTE se encuentra precisamente segmentado de acuerdo a este tipo de estructuras.

El dimensionamiento de estos parámetros se realiza bajo dos consideraciones principales. La primera es que siempre existen datos para transmitir, es decir el sistema siempre se encuentra asignando recursos para la transmisión de información. La segunda consideración es que en general, cada celda está sujeta a altos niveles de carga, es decir existe siempre un mínimo de usuarios por celda.

Una vez tomadas en cuenta estas consideraciones, la tasa de transmisión y la eficiencia espectral por celda deben cumplir ciertos requerimientos mínimos. En la tabla 2.1 se muestran los valores correspondientes solo para la eficiencia espectral, debido a que los valores de throughput dependen de la configuración del sistema.

Enlace	Medido en	Métrica	Valor	Unidad
Enlace Descendente	Célula	Throughput Promedio	Dependiente de la configuración del sistema	bps/celda
		Eficiencia Espectral	1.6 - 2.1	bps/Hz/celda
	Borde de la Célula	Throughput Promedio	Dependiente de la configuración del sistema	bps
		Eficiencia Espectral	0.04 - 0.06	bps/Hz
Enlace Ascendente	Célula	Throughput Promedio	Dependiente de la configuración del sistema	bps/celda
		Eficiencia Espectral	0.66 - 1	bps/Hz/celda
	Borde de la Célula	Throughput Promedio	Dependiente de la configuración del sistema	bps
		Eficiencia Espectral	0.02 - 0.03	bps/Hz

Tabla 2.1. Requerimientos de Eficiencia Espectral por celda [8].

2.3.3. Capacidades en la transmisión de voz

La transmisión de paquetes de datos que contienen información de voz, también conocida como Voice Over IP (VoIP) es de especial importancia en el sistema LTE. Esto debido a que los servicios en tiempo real como la transmisión de voz son sensibles a retardos, los cuales representan un reto técnico importante para redes que basan su funcionamiento en la conmutación de paquetes IP como LTE.

En términos de la transmisión de voz, los requerimientos en la capacidad del sistema LTE se deben dimensionar en función del número máximo de usuarios a los cuales se les puede garantizar este servicio de manera simultánea manteniendo niveles máximos tolerables de retardo y determinado nivel en la calidad del servicio.

La calidad de servicio en la transmisión de voz define ciertos parámetros y límites que deben ser respetados. Por ejemplo, si más del 2% de paquetes de voz no arriban correctamente dentro de un margen de tiempo de 50ms, los paquetes deben ser inmediatamente descartados, esto asumiendo un retardo máximo de 200ms en el sistema. Por lo tanto, la capacidad del sistema en términos del máximo número de usuarios se define como el 95% de usuarios a los que se les puede garantizar una calidad de servicio con las características mencionadas.

2.3.4. Movilidad

LTE se encuentra diseñado para funcionar en entornos en los que los terminales de usuario se desplazan a velocidades entre 350Km/h y hasta un máximo de 500Km/h dependiendo de la banda de frecuencias utilizada. La idea es permitir que usuarios ubicados en medios de transporte terrestre, puedan contar con conectividad a la red de datos que les permita desarrollar sus actividades durante periodos tiempo en el que se encuentran movilizándose.

Sin embargo, la complejidad técnica que representa mantener la conectividad en escenarios de éste tipo es extremadamente grande. Esto, debido a que procedimientos de movilidad como el de handover, en los que la comunicación se mantiene durante el cambio de servicio de una celda a otra, se debe realizar de manera transparente al usuario, manteniendo al mismo tiempo niveles aceptables de retardo y pérdidas de paquetes.

2.3.5. Modo de transmisión Broadcast

Otro de los requerimientos de LTE es la implementación del modo de transmisión tipo “Broadcast”, especialmente orientado a aplicaciones de tipo Multimedia Broadcast/Multicast Services (MBMS) que garanticen un rendimiento apropiado del sistema en términos de throughput y eficiencia espectral.

En lo que se refiere al throughput en este modo modo, se utiliza como referencia la máxima tasa de transmisión alcanzada por los terminales de usuario con la peor calidad de servicio, mientras que el valor definido de eficiencia espectral es de 1bps/Hz. Además se define una cobertura mínima del 98% lo que significa que la probabilidad de desconexión de la red es de apenas del 2% con una tasa de error de paquetes no mayor al 1%.

2.3.6. Retardos en el plano de usuario y plano de control

En el plano de usuario, el retardo se define como el tiempo transcurrido entre que el paquete es transmitido y se recibe un acuse de recibo. Como se mencionó anteriormente, el retardo en la transmisión de paquetes es considerado especialmente importante para aplicaciones que requieren que las transmisiones se realicen en tiempo real, como es el caso de la voz.

En el caso de LTE, el retardo estimado por el sistema para el plano de usuario es de 5ms en condiciones óptimas, es decir que éste valor podría verse incrementado debido a la carga que pueda estar manejando el sistema en el momento de la transmisión del paquete, así como a condiciones de propagación adversas.

En el plano de control, LTE disminuye significativamente el retardo con respecto a tecnologías anteriores, permitiendo mejorar la calidad de servicio para el usuario y también el rendimiento de la batería del terminal, debido a que los procesos de control y sincronización requieren de menos tiempo y recursos para ser ejecutados.

El retardo en el plano de control se define como el tiempo requerido para realizar la transición entre el estado en el que el terminal se encuentra en espera hacia el estado en el que terminal se encuentra totalmente conectado al sistema LTE. Este retardo puede a ser de 50ms en condiciones ideales y llegar hasta 100ms en condiciones de alta carga en el sistema.

Por último otro requerimiento importante, tiene que ver con el número máximo de usuarios que pueden estar conectados al mismo tiempo. Se define que LTE debe soportar hasta 200 usuarios con anchos de banda de hasta 5MHz y hasta 400 usuarios con anchos de banda mayores, considerando que no todos los usuarios transmiten información simultáneamente.

2.4. Arquitectura del Sistema LTE

Con el objetivo de cumplir con los requerimientos de altas tasas de transmisión, elevada eficiencia espectral y la optimización del sistema para la conmutación de paquetes IP, la arquitectura de LTE debió ser totalmente rediseñada en comparación con los sistemas de generaciones anteriores, tanto a nivel de su interfaz radioeléctrica como a nivel del núcleo de la red [18, 19, 20].

La arquitectura de LTE está conformada de tres secciones principales. El Terminal de Usuario o User Equipment (UE), la interfaz radioeléctrica conocida como Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) y el núcleo de la red o Evolved Packet Core (EPC). La figura 2.2 muestra la arquitectura general del sistema LTE y las principales entidades que conforman cada sección.

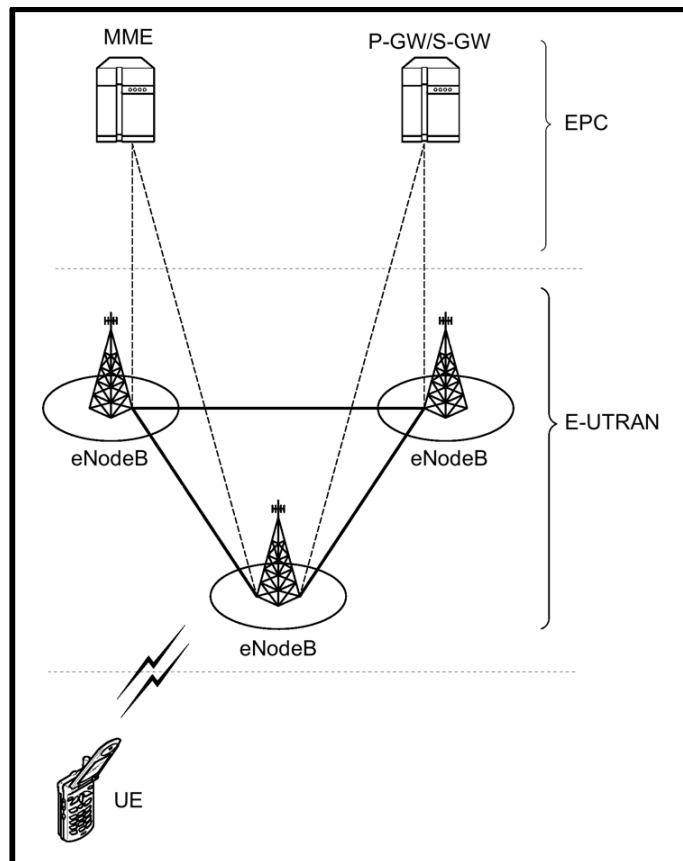


Figura 2.2. Arquitectura general del sistema LTE [18].

2.4.1. Terminal de Usuario (UE)

El terminal de usuario es conocido como User Equipment (UE) en el contexto del sistema LTE. Este cumple funciones tanto en el plano de control para el establecimiento de la comunicación con el sistema así como en el plano de usuario para las transmisión de los paquetes de datos que transportan información de este plano.

En el plano de control, las funciones del UE están relacionadas a la administración de determinados procesos que forman parte de procedimientos de movilidad, como selección / relección de celda y handover. Además el UE se encarga de la gestión de los “estados” en los que se pueda encontrar dentro del sistema LTE, estos estados pueden ser conectado, en reposo o desconectado.

Continuando con el plano de control, el UE está encargado de ciertos procedimientos relacionados a la gestión de servicios. Estos procedimientos hacen referencia a la activación modificación y desactivación de los denominados “servicios portadores de información” que se clasifican en servicios portadores por defecto y dedicados.

Por otra parte, en el plano de usuario, las funciones del UE se encuentran principalmente relacionadas con procesos a nivel de la capa de red, como solicitudes o cambios en las direcciones IP asignadas al terminal de usuario por el sistema debido a la ocurrencia de procedimientos de movilidad.

Finalmente, el UE está encargado de la iniciación de ciertos procedimientos para la asignación de recursos de radio utilizados por protocolos principalmente a nivel de la capa física. Estos procedimientos son comunes tanto para el plano de control como para el plano de usuario.

Otro de los aspectos importantes a ser considerados cuando se analizan los terminales de usuario, son las características de los mismos en cuanto a sus capacidades y limitaciones para la gestión de los recursos que pueden ser asignados por la red, el uso de ciertas tecnologías de acceso de radio y bandas de frecuencias utilizadas por el sistema LTE.

En el sistema LTE, el terminal de usuario debe reportar sus características con el objetivo de que se puedan gestionar los recursos de manera adecuada. Estas características definen finalmente las capacidades del terminal de usuario en términos de la máxima tasa de transmisión que puede ser garantizada por el sistema. El standard LTE categoriza a los terminales de usuario en función de sus capacidades de transmisión en el enlace de descendente y ascendente, La tabla 2.2 muestra las categorías de los terminales de usuario para LTE Release 8.

Categoría	Máxima Tasa de Transmisión para el Enlace Descendente (Mbps)	Máximo número de flujo de datos simultáneos	Máxima Tasa de Transmisión para el Enlace Ascendente (Mbps)	Soporte de 64 QAM para el Enlace Ascendente
1	10.3	1	5.2	No
2	51	2	25.5	No
3	102	2	51	No
4	150.8	2	51	No
5	302.8	4	75.4	Si

Tabla 2.2. Categorías de UE para LTE Release 8 [18].

2.4.2. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)

La Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) hace referencia a los elementos que componen el sistema de administración de la interfaz radioeléctrica del sistema LTE y que tienen como elemento principal al eNodeB. El eNodeB es la estación celular base de LTE que está relacionada con todas las funciones de administración de la interfaz de radio y normalmente se encuentra distribuido de manera uniforme a lo largo de toda el área de cobertura del operador celular.

El eNodeB funciona como el enlace principal entre el UE y el núcleo de la red, siendo el punto de terminación de todos los protocolos de la interfaz de radio implementados por el UE y al mismo tiempo el encargado de la transmisión de información del terminal de usuario desde y hacia la red de datos IP del lado del núcleo de la red.

En el plano de control, las funciones del eNodeB son administrar los recursos de radio, el control del uso de la interfaz radioeléctrica, la asignación de recursos a los terminales de usuario a través del uso de algoritmos de calendarización y en general todo aspecto relacionado al control y monitoreo de la interfaz de radio del sistema LTE.

En el plano de usuario las funciones principales del eNodeB son la protección de los paquetes de datos que transportan información del usuario a través de la implementación de métodos de protección de integridad y cifrado de datos. Adicionalmente se encarga de la realización del proceso de compresión de encabezados IP, con el objetivo de optimizar el uso de recursos de red a través de la eliminación de redundancia utilizada por el protocolo IP.

Una de las funciones más importantes que realiza el eNodeB, es la administración de los procesos de movilidad a nivel de la interfaz radioeléctrica. Para esto, se encarga de recolectar la información de las mediciones realizadas por el UE, que en combinación con las mediciones que realiza el eNodeB y la coordinación con otros eNodeB permite la ejecución de procesos de movilidad. La figura 2.3 muestra como el eNodeB se encuentra interconectado con las entidades del sistema, las cuales serán analizadas con detalle en secciones posteriores.

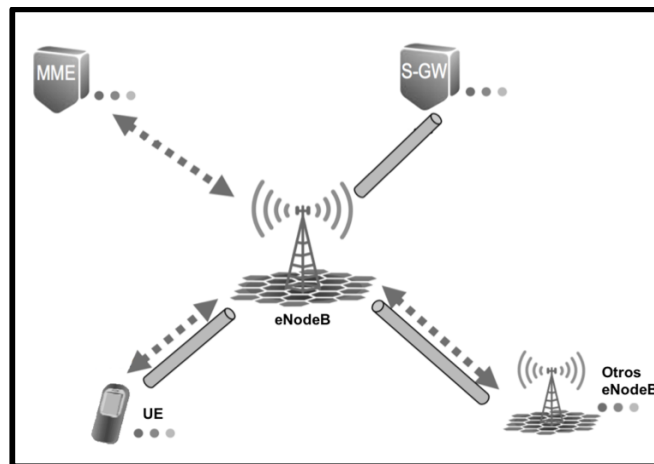


Figura 2.3. Interconexión entre el eNodeB y las entidades del sistema LTE [18].

2.4.3. Interfaces y Protocolos de la E-UTRAN

LTE está compuesto de un conjunto de protocolos que definen el funcionamiento de cada una de sus entidades, así como la manera en la que estas se comunican entre sí. Los protocolos están definidos a nivel de cada interfaz, en donde el termino interfaz representa el medio físico, lógico o ambos, encargado de interconectar las diferentes entidades.

Cada interfaz cuenta con una pila de protocolos que establecen los mensajes de señalización necesarios para la adecuada transmisión de tráfico a través de ella. A continuación se listan las interfaces en la E-UTRAN y las entidades entre las que se encuentran establecidas.

- Interfaz: Uu – Entre: Terminal de Usuario y eNodeB.
- Interfaz: X2 – Entre: eNodeB y eNodeB.
- Interfaz: S1-U – Entre: eNodeB y S-GW.
- Interfaz: S1-MME – Entre: eNodeB y MME.

La figura 2.4 muestra como estas interfaces se encuentran desplegadas entre las entidades que pertenecen a las diferentes secciones del sistema. Como se puede observar, las interfaces a nivel de la E-UTRAN son las encargadas de interconectar al UE con el núcleo de red.

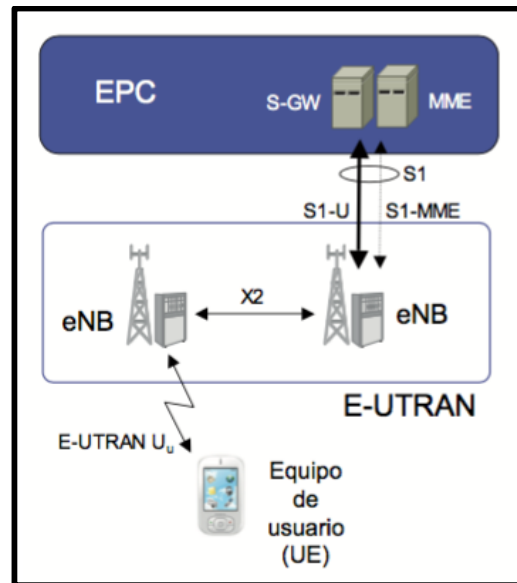


Figura 2.4. Interfaces de la E-UTRAN [21].

2.4.3.1. Interfaz Uu

La interfaz Uu está diseñada para soportar el transporte de información tanto del plano de usuario como del plano de control y es la encargada de interconectar el terminal de usuario (UE) con la E-UTRAN, o más precisamente con el eNodeB. A continuación se describen los protocolos correspondientes a esta interfaz para el plano de control y plano de usuario, algunos de ellos son independientes para cada plano y otros son comunes para ambos.

Plano de Control

A continuación se presentan las principales funciones de los protocolos implementados en la interfaz Uu del sistema LTE para el plano de control y señalización. La figura 2.5 muestra estos protocolos así como también las entidades del sistema en las que se encuentran implementados.

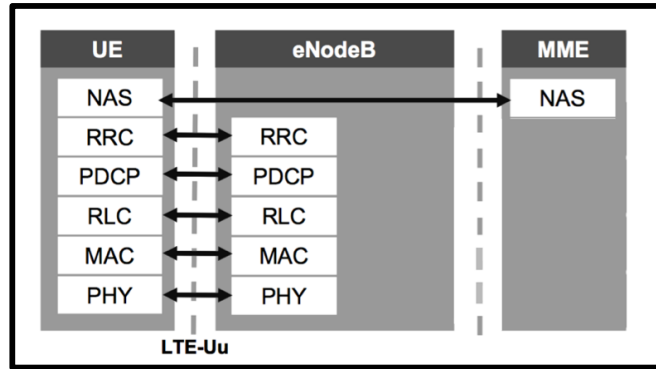


Figura 2.5. Protocolos para el plano de control de la interfaz Uu [18].

Capa Física (PHY)

La capa física de esta interfaz está encargada de otorgar canales de transporte a la capa MAC para transmitir sus PDUs (Packet Data Unit), a continuación se listan las funciones más importante de esta capa.

- Procesamiento de la señal de radiofrecuencia.
- Sincronización en tiempo y frecuencia.
- Mediciones de los parámetros del canal de radio.
- Modulación y demodulación.
- Codificación y decodificación.
- Procesamiento MIMO.
- Detección de errores.

Capa de Control de Acceso al Medio (MAC)

La capa de control de acceso al medio está encargada de la administración de la interfaz radioeléctrica y la comunicación con las capas superiores, a continuación se listan las funciones más importante de esta capa.

- Mapeo entre los canales lógicos y los canales de transporte.
- Multiplexación de diferentes servicios portadores en bloques de transporte.
- Corrección de errores a través del uso de la técnica de Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) para la retransmisión de paquetes.
- Asignación dinámica de recursos de red en base a parámetros de calidad de servicio a través de la implementación de algoritmos de calendarización.

Capa de Control del Enlace de Radio (RLC)

Esta capa se encarga del control del enlace de radio entre el UE y el eNodeB, sus funciones principales están orientadas a la entrega de servicios a capas superiores en tres modos diferentes.

- **Transparent Mode (TM):** Este modo no requiere que el UE esté conectado al sistema LTE, por lo que es utilizado para procedimientos de voiceo y transmisiones de tipo Broadcast.
- **Unacknowledged Mode (UM):** Tampoco requiere conexión del UE al sistema, adicionalmente ofrece servicios de segmentación, concatenación y control de secuencia de paquetes.
- **Acknowledged Mode (AM):** Requiere conexión del UE al sistema y utiliza la técnica Automatic Repeat Request (ARQ) para la retransmisión de paquetes.

Capa Packet Data Convergence Protocol (PDCP)

Esta capa realiza funciones comunes para el plano de usuario y para el plano de control, así como funciones específicas para cada plano. A continuación se describen las funciones de éste protocolo.

Plano de usuario:

- Encriptación y seguridad.
- Compresión de encabezados de paquetes IP.
- Control de secuencia y control de paquetes IP duplicados.

Plano de control:

- Encriptación y seguridad.
- Control de integridad de paquetes.

Capa Radio Resource Control (RRC)

Esta capa está encargada de la administración de toda la información de señalización y control para la comunicación entre el UE y la E-UTRAN. Así como el transporte de información de señalización entre el UE y el Mobility Management Entity (MME). Sus principales funciones se listan a continuación.

- Control de admisión del UE.
- Administración de los recursos de radio.
- Administración de los mecanismos de seguridad.
- Selección / Reelección de celda y Handover.
- Información del sistema y reporte de mediciones.

Capa Non Access Stratum (NAS)

Esta capa no pertenece estrictamente a la interfaz Uu, sin embargo hace uso de esta interfaz para la transmisión de mensajes de señalización, control, autenticación y en general todo intercambio de información de autenticación entre el UE y el MME.

Plano de Usuario

En el plano de usuario de la interfaz Uu, los protocolos de capa PHY, MAC, RLC y PDCP cumplen las mismas funciones que en el plano de control. Además, el UE también cuenta con el protocolo IP, para la comunicación con el Packet Gateway (P-GW), encargado de la administración de paquetes de datos. La figura 2.6 muestra los protocolos para el plano de usuario de la interfaz Uu y las entidades del sistema en las que se encuentran implementados.

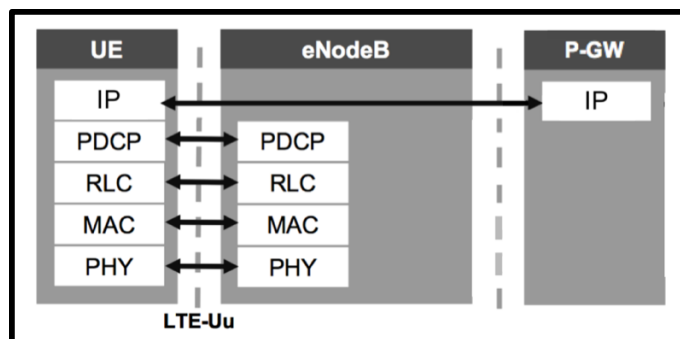


Figura 2.6. Protocolos para el plano de usuario de la interfaz Uu [18].

2.4.3.2. Interfaz X2

La interfaz X2 es la encargada de interconectar a los eNodeBs entre si y es utilizada para transmitir tanto paquetes de datos en el plano de usuario e información de control y sincronización en el plano de control. Esta interfaz basa su funcionamiento principalmente en los protocolos Stream Control Transmission Protocol (SCTP) y X2 Application Protocol (X2AP) en su plano de control y User Datagram Protocol (UDP) y GPRS Tunneling Protocol-User (GTP-U) en su plano de usuario.

En la figura 2.7 se pueden observar los protocolos mencionados. Los protocolos L1 y L2 representan a la capa física y capa MAC respectivamente. A continuación se describen las características de cada uno de los protocolos utilizados por la interfaz X2.

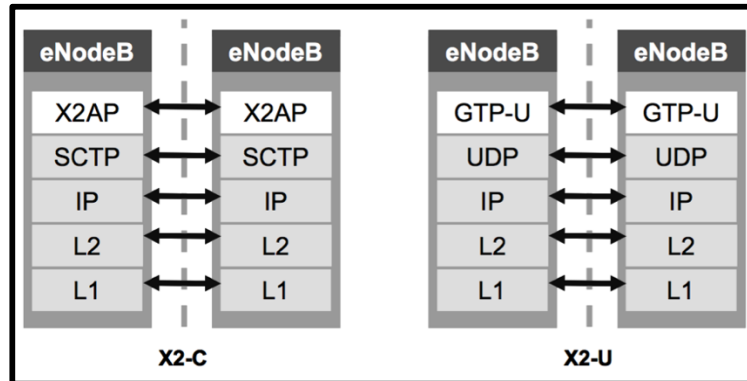


Figura 2.7. Protocolos para plano de control (X2-C) y usuario (X2-U) de la interfaz X2 [18].

Plano de Control

Stream Control Transmission Protocol (SCTP)

Es el protocolo de transporte utilizado por la interfaz X2 y fue desarrollado con el objetivo de corregir las deficiencias de otros protocolos de transporte como el Transport Control Protocol (TCP) y el User Datagram Protocol (UDP). Las principales características de SCTP se describen a continuación.

- Entrega confiable de paquetes a capas superiores.
- Entrega de paquetes en forma secuencial a capa superiores.
- Detección temprana de paquetes perdidos y pérdida del enlace.
- Seguridad mejorada.

X2 Application Protocol (X2AP)

Es el protocolo de aplicación de la interfaz X2, a continuación se presentan sus principales funciones y características.

- Administración de movilidad entre eNodeBs.
- Administración del enlace de comunicación entre eNodeBs.
- Reporte de mensajes de error.
- Transmisión de información del UE para procedimientos de movilidad.

Plano de Usuario

User Datagram Protocol (UDP)

UDP es uno de los protocolos de transporte más utilizados en la actualidad. Este protocolo no está orientado a la conexión, por lo que no requiere de procedimientos de establecimiento de conexión previa, garantía de entrega de paquetes, control de paquetes perdidos o duplicados, por lo que UDP es considerado como un protocolo de transporte no confiable. Sin embargo estas características lo hacen favorable para aplicaciones sensibles a retardos que pueden tolerar la pérdida de un determinado porcentaje de paquetes. Los paquetes de datos transmitidos por este protocolo de transporte se denominan datagramas.

GPRS Tunneling Protocol-User (GTP-U)

GTP-U es el protocolo de aplicación de la interfaz X2 y está encargado de la encapsulación de paquetes de datos provenientes de la capa de transporte y la transmisión de información del plano de usuario a través de la interfaz X2. El canal de comunicación establecido por éste protocolo se denomina “túnel”. Diferentes túneles pueden estar establecidos a través de la misma interfaz para la transmisión de diferentes servicios portadores y cada túnel esta diferenciado a través de identificadores únicos conocidos como Tunnel Endpoint Identifier (TEID).

Internet Protocol (IP)

El protocolo de internet es el protocolo de red implementado en prácticamente todas las redes de datos en la actualidad, por lo tanto es el protocolo de red utilizado por LTE, cuyo sistema está basado en la conmutación de paquetes IP. La función principal de éste protocolo es la transmisión de datagramas entre la fuente y el destino a través del uso de encabezados que llevan direcciones lógicas denominadas direcciones IP, estos encabezados son agregados a través de un proceso conocido como encapsulación.

Actualmente la versión más utilizada de éste protocolo es la versión 4 (IPV4), sin embargo el creciente número de dispositivos de red a impulsado el desarrollo de versiones como IPV6 que permite el uso de un número mucho mayor de dispositivos de red. LTE soporta ambas versiones de éste protocolo.

2.4.3.3. Interfaz S1

La interfaz S1 está compuesta de dos diferentes pilas de protocolos. Los protocolos definidos para la comunicación en el plano de control de la interfaz S1-MME, entre el eNodeB y el MME y los protocolos en el plano de usuario de la interfaz S1-U, entre el eNodeB y el Serving Gateway (S-GW).

En la figura 2.8 se pueden observar los protocolos mencionados. La mayoría de los protocolos y sus funciones fueron descritos en secciones anteriores, sin embargo los protocolos específicos utilizados por la interfaz S1 son descritos a continuación.

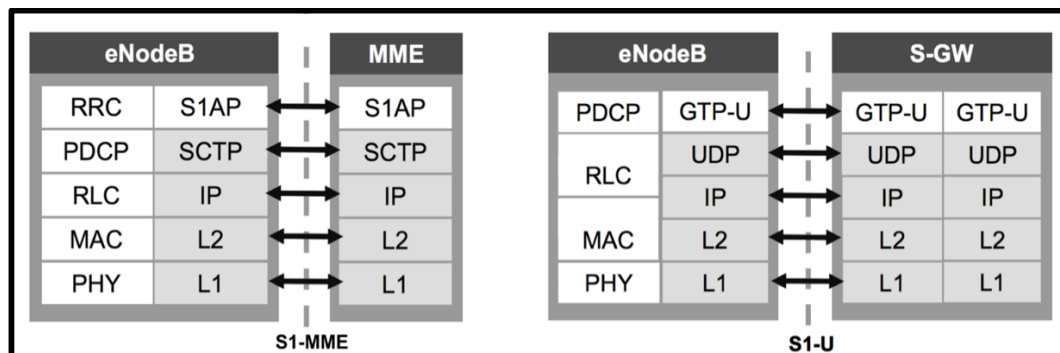


Figura 2.8. Protocolos para plano de control (S1-MME) y usuario (S1-U) de la interfaz S1[18].

Plano de control

S1 Application Protocol (S1AP)

Es el protocolo de aplicación de la interfaz que interconecta el eNodeB con el MME, utilizado para la transmisión de información en el plano de control, sus principales funciones se listan a continuación.

- Administración de servicios portadores de información.
- Transferencia inicial de contexto de configuración entre el eNodeB y el MME.
- Transferencia de información relacionada a las capacidades del UE.
- Administración de información de movilidad para handover entre eNodeB y entre diferentes tecnologías de radio.
- Administración de la interfaz S1.
- Transporte de señalización de la capa NAS.
- Reportes de la ubicación del UE.

2.4.4. Evolved Packet Core (EPC)

El elemento principal de la arquitectura LTE es núcleo de la red, denominado Evolved Packet Core (EPC). El EPC fue introducido en el Release 8 y representa un gran salto en la evolución de la arquitectura de red con respecto a las versiones anteriores de los sistemas de comunicación móvil. El objetivo principal del EPC es garantizar un rendimiento idóneo en el manejo de paquete de datos. Para esto su estructura se basa en la separación completa entre los planos de control y de usuario, esta separación permite al sistema adaptarse a condiciones de tráfico elevadas, manteniendo altos niveles de rendimiento y eficiencia.

El EPC está compuesto de tres entidades principales, el Mobility Management Entity (MME), el Serving Gateway (S-GW) y el Packet Gateway (P-GW), además de otras entidades complementarias como el Home Subscriber Server (HSS) y el Policy and Charging Rules Function (PCRF) que en conjunto conforman el núcleo de la red. La figura 2.9 muestra las principales entidades que forma parte del EPC así como las interfaces que las interconectan. A continuación se presenta una descripción de las principales características de cada entidad así como la pila de protocolos implementada por cada interfaz, que hacen posible el adecuado funcionamiento del núcleo del sistema LTE.

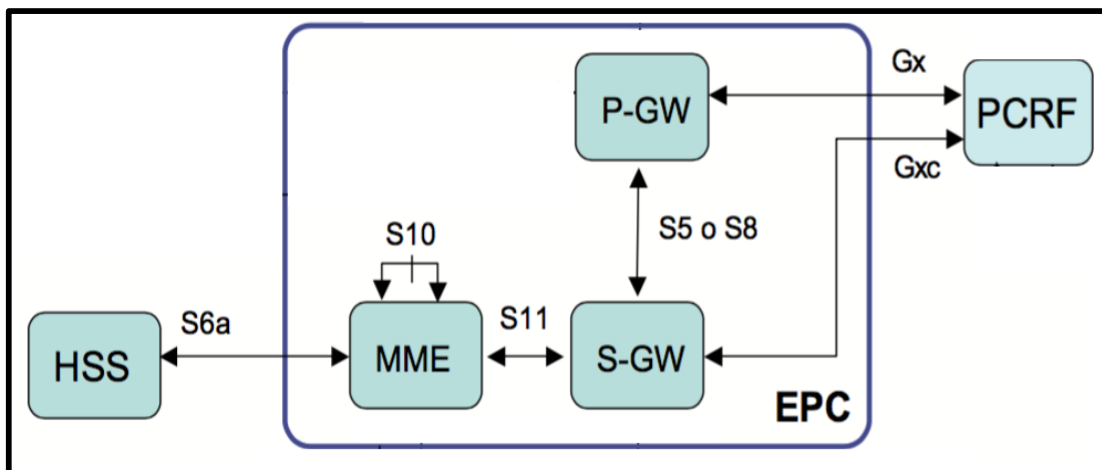


Figura 2.9. Principales entidades e interfaces de la EPC [21].

2.4.4.1. Mobility Management Entity (MME)

El Mobility Management Entity (MME) está encargado de un conjunto de funciones únicamente orientadas a la transmisión de información en el plano de control del sistema LTE. A continuación se presentan las principales funciones desempeñadas por esta entidad.

- Administración de los procedimientos de movilidad y procesos de manejo de los servicios portadores de información.
- Transmisión de información de señalización y seguridad de la capa NAS.
- Selección del S-GW y P-GW basado en la ubicación del UE y condiciones de tráfico.
- Rastreo del UE y manejo del procedimiento de voceo.
- Handover entre entidades MME producidos por procedimientos de movilidad del UE.
- Procedimientos de autenticación y obtención de información del usuario.

2.4.4.2. Serving Gateway (SGW)

El Serving Gateway (S-GW) proporciona funcionalidades importantes a nivel del plano de usuario en la interfaz S1-U. A continuación se presentan las principales funciones desempeñadas por esta entidad.

- Enrutamiento y transmisión de paquetes de datos del usuario.
- Administración de servicios portadores de información.
- Funciones de “ancla” durante la ejecución de procedimientos de handover dentro del sistema LTE y entre el sistema LTE y otras tecnologías 3GPP como GPRS y UMTS.
- Almacenamiento temporal de paquetes cuando el UE se encuentra en reposo.
- Intercepción legal de paquetes de datos.

2.4.4.3. Packet Gateway (P-GW)

El Packet Gateway (P-GW) es la entidad del EPC que se encuentra en la frontera entre el núcleo del sistema LTE y las redes de paquetes de datos exteriores, por lo que en situaciones en las que el UE se encuentra en comunicación con diferentes redes de datos externas, es posible que el sistema gestione el uso de más de un P-GW de manera simultánea. A continuación se presentan las principales funciones desempeñadas por esta entidad.

- Asignación de direcciones IP al UE de manera estática y dinámica.
- Intercepción legal de paquetes.
- Filtrado de paquetes para la administración del flujo de datos.
- Etiquetado de paquetes para la administración de políticas de calidad de servicio.
- Implementación de políticas para el cobro de servicios, en conjunto con el PCRF.

2.4.4.4. Entidades Complementarias

Home Subscriber Server (HSS)

Es la base de datos del EPC y contiene toda la información requerida para la administración de servicios de voz y servicios de transmisión de información para los usuarios del sistema LTE. Se interconecta con el MME a través de la interfaz S6a y el uso del protocolo Diameter.

Policy and Charging Rule Function (PCRF)

Esta entidad sirve de apoyo para la aplicación y administración de políticas de calidad de servicio y políticas de cobro por estos servicios en conjunto con en S-GW y P-GW. Para la conexión con el S-GW y P-GW hace uso de la interfaz Gx y del protocolo Diameter.

2.4.5. Interfaces y Protocolos del EPC

El EPC además se compone de un conjunto de interfaces y protocolos que permiten la comunicación entre estas entidades. A continuación se listan las interfaces y entidades entre las que se encuentran establecidas así como sus principales características.

- Interfaz: S11 – Entre: MME y S-GW.
- Interfaz: S5-S8 – Entre: S-GW y P-GW.
- Interfaz: S10 – Entre: MME y MME.
- Interfaz: S6a – Entre: MME y HSS.
- Interfaz: Gx – Entre: PCRF y S-GW / P-GW.

2.4.5.1. Interfaz S11

Se encarga de enlazar al MME con el S-GW. La mayoría de protocolos que fueron descritos en secciones anteriores son utilizados por esta interfaz para la transferencia de información entre sus entidades. Esta información está relacionada solamente al plano de control del sistema, por lo que paquetes de datos del usuario no son procesados en esta interfaz.

En la figura 2.10 se pueden observar los protocolos utilizados por la interfaz S11, en esta figura se puede notar sin embargo un nuevo protocolo, éste protocolo es denominado GPRS Tunneling Protocol – Control (GTP-C), el cual presenta ciertas particularidades con respecto a su par GTP-U. A continuación se describen las características de éste protocolo.

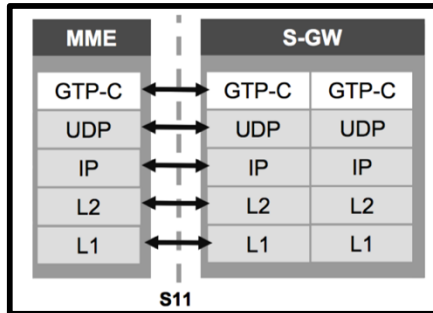


Figura 2.10. Protocolos para el plano de control de la interfaz S11 [18].

GPRS Tunneling Protocol – Control (GTP-C)

Protocolo encargado de la transmisión de información de señalización y control entre el MME y el S-GW. Las funciones más relevantes del protocolo son descritas a continuación.

- Administración del enlace.
- Administración de los servicios portadores.
- Administración de movilidad.
- Administración de túneles para la interconexión con otras tecnologías 3GPP/3GPP2.

2.4.5.2. Interfaz S5-S8

Interfaz encargada de conectar al S-GW y P-GW en el plano de control y de usuario. Para esto hace uso de protocolos ya descritos anteriormente, especialmente el protocolo GTP en sus versiones de control y usuario. La figura 2.11 muestra los protocolos utilizados por esta interfaz.

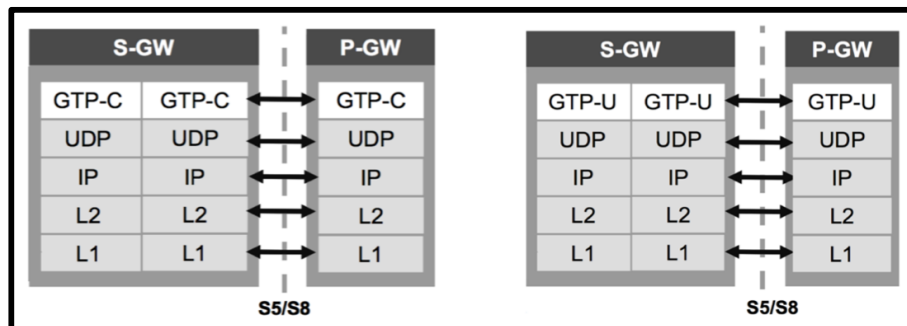


Figura 2.11. Protocolos para el plano de control y de usuario de la interfaz S5-S8 [18].

Es importante el estudio de la evolución de los sistemas de comunicación celular, ya que permitió realizar el análisis de las tecnologías que se han desarrollado con el objetivo de cumplir con los requerimientos técnicos actuales y que forman parte de los principales elementos que conforman la arquitectura de los sistemas de cuarta generación como LTE.

Capítulo 3. Interfaz de Radio del Sistema LTE

3.1. Introducción

La estructura de la capa física y la capa de control de acceso al medio adoptadas por un sistema de comunicación, representan la parte más importante de su estructura y definen en gran parte el funcionamiento del sistema en términos tanto del rendimiento que puede obtener así como de las limitaciones que pueda presentar.

En el caso de LTE, un conjunto de métodos y tecnologías tanto a nivel de la capa física como a nivel de la capa de acceso al medio han sido implementadas con el objetivo de cumplir con los requerimientos de altas tasas de transmisión y elevada eficiencia espectral requeridas, que fueron descritas en secciones anteriores.

La estructura de la capa física del enlace radioeléctrico del sistema LTE se encuentra en directa relación con el rendimiento general del sistema. Su funcionamiento se basa en el principio de que los recursos son asignados dinámicamente y no de manera dedicada a los usuarios del sistema.

Además, la capa física de LTE fundamenta su funcionamiento en el uso de la técnica de acceso conocida como Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access (OFDMA) la cual permite a LTE alcanzar altas tasas de transmisión en el enlace descendente en entornos sin línea de vista (N-LOS) que normalmente están caracterizados por la existencia de efectos multi trayectoria.

Este capítulo aborda las principales tecnologías utilizadas a nivel de la capa física y algunos principios básicos de la capa de acceso al medio del sistema LTE. Los conceptos y características de tecnologías como Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), Multiple Input Multiple Output (MIMO), Modulación y Codificación Adaptativa así como la estructura de las tramas y canales del sistema LTE son abordados en detalle.

3.2. Técnicas de Acceso de las Interfaces de Radio

En los sistemas de comunicación inalámbricos, los terminales de usuario requieren el uso de un medio compartido para transmitir su información. Debido a esto, un conjunto de técnicas de acceso al medio han sido desarrolladas con el objetivo de permitir el uso compartido del espectro radioeléctrico disponible de manera eficiente [2, 22].

A continuación se presentan las principales técnicas de acceso utilizadas por los sistemas de comunicación inalámbricos en general, así como sus principales características y limitaciones hasta llegar a la técnica OFDMA, la cual es implementada por el sistema LTE a nivel de su capa física.

3.2.1. Frequency Division Multiple Access (FDMA)

FDMA se basa en la división del espectro radioeléctrico en diferentes canales de frecuencia que posteriormente son asignados a cada usuario de manera independiente. Sin embargo, este método requiere de un espacio de separación entre cada canal para evitar interferencias, que hace que la eficiencia en el uso del ancho de banda disponible se reduzca considerablemente.

3.2.2. Time Division Multiple Access (TDMA)

TDMA divide el ancho de banda disponible en función del tiempo, por lo tanto el canal se comparte por los usuarios y canales de control en diferentes momentos o “slots” de tiempo. TDMA además implementa técnicas de cifrado, integridad y corrección de errores, que le permiten ser más resistente a la interferencia y obtener una mejor eficiencia espectral comparado con FDMA.

3.2.3. Code Division Multiple Access (CDMA)

CDMA permite el uso compartido de las frecuencias del canal de comunicación de manera simultánea por los usuarios del sistema a diferencia de FDMA y TDMA, lo que le permite obtener una eficiencia espectral mucho mayor a la de estos sistemas. Esto es posible debido a que cada transmisión utiliza una codificación diferente.

3.2.4. Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)

OFDMA es una de las técnicas de acceso más avanzadas que existen en la actualidad y es implementada por un conjunto de sistemas de comunicación, entre ellos LTE. OFDMA basa su funcionamiento el método en Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM).

El método OFDM divide el ancho de banda del sistema en unidades de frecuencia más pequeñas conocidas como subportadoras. Estas subportadoras son posteriormente agrupadas de manera ortogonal en bloques y asignadas como recursos para el usuario. Esta característica le permite a OFDMA asignar recursos de manera dinámica en función del tiempo y la frecuencia, lo que se traduce en un uso eficiente de los recursos y una eficiencia espectral mayor comparada con sistemas anteriores. La figura 3.1 muestra el principio básico de funcionamiento de las técnicas de acceso FDMA, TDMA, CDMA y OFDMA.

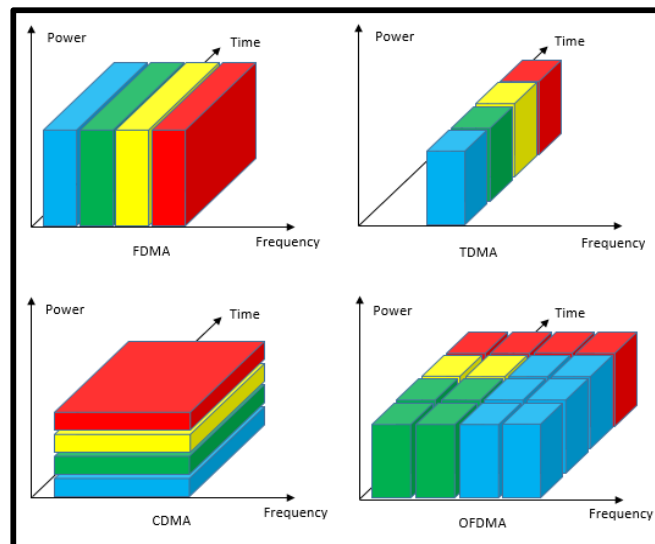


Figura 3.1. Técnicas de acceso FDMA, TDMA, CDMA y OFDMA.

3.3. Modos de Transmisión en LTE

3.3.1 Frequency Division Duplex (FDD)

En FDD, dos canales diferentes son utilizados por el enlace descendente y ascendente respectivamente, con un espacio de separación entre ambos, lo que permite una transmisión “Full-Duplex”. En FDD el canal de frecuencia más baja es utilizada para el enlace ascendente, debido a que frecuencias altas son más susceptibles a interferencias, lo que reduce la capacidad del enlace. La figura 3.2 muestra la estructura del canal FDD.

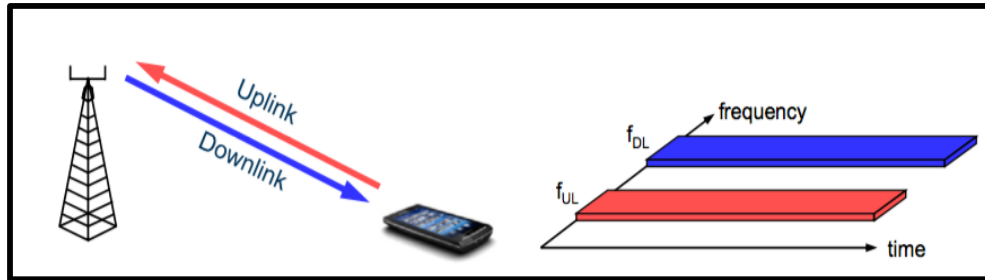


Figura 3.2. Estructura del canal FDD [23].

3.3.2. Time Division Duplex (TDD)

TDD permite el uso del mismo canal de manera alternada entre el enlace descendente y el enlace ascendente. Esto ofrece ventajas como asignación asimétrica de recursos además del incremento en la eficiencia espectral y mejoras en el uso de técnicas de formación de haz, ya que ambos enlaces utilizan las misma frecuencia. La figura 3.3 muestra la estructura del canal TDD.

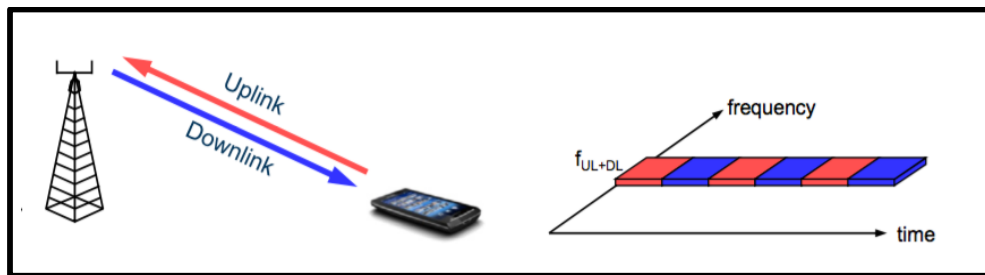


Figura 3.3. Estructura del canal TDD [23].

3.4. Principios de OFDM

La capa física LTE utiliza dos métodos diferentes de acceso, uno para el enlace descendente y otro para el enlace ascendente. En el caso del enlace descendente el sistema utiliza Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) y en el caso del enlace ascendente, Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA).

Técnicas como OFDM son utilizadas además por otras tecnologías de comunicación como el IEEE 802.11 [24]. Sin embargo el uso de OFDM es relativamente nuevo en comunicaciones celulares ya que las mejoras en cuanto a la capacidad de procesamiento y capacidad de la batería de los terminales móviles es reciente [8]. A continuación se presentan las principales características de OFDM en LTE.

3.4.1. FDM vs OFDM

OFDM se basa en el método Frequency Division Multiplexing (FDM). FDM separa el espectro de frecuencias en múltiples grupos de frecuencias denominados subportadoras, donde cada subportadora permite la transmisión de información. Adicionalmente, para evitar la interferencia entre subportadoras, FDM utiliza un espacio de separación denominado banda de guardia el cual disminuye considerablemente la eficiencia espectral de FDM.

Por otro lado, OFDM reduce considerablemente el espacio entre subportadoras, gracias a la implementación de métodos de ortogonalidad [8], que permiten que las subportadoras estén sobrepuestas sin producir interferencia entre ellas, lo cual incrementa la eficiencia espectral de OFDM en comparación con FDM. A pesar de esto, OFDM requiere también de bandas de guardia, pero estas están ubicadas a los extremos del canal y su objetivo es evitar la interferencia con otros canales.

3.4.2. Transformada Rápida de Fourier Inversa y Directa (IFFT y FFT)

En OFDM, la señal a transmitir en la interfaz radioeléctrica es generada a través de subportadoras combinadas mediante la implementación de una transformada rápida inversa de Fourier (IFFT) en el transmisor, mientras que el receptor utiliza una transformada directa rápida de Fourier (FFT) para recuperar las subportadoras transmitidas originalmente [18].

El proceso inicia con la conversión de bits codificados en el transmisor que se encuentran en una serie a una secuencia de bits en paralelo, a continuación estos bits son mapeados a subportadoras, en donde el número de bits que pueden ser transportados por cada subportadora depende del tipo de modulación utilizada.

Posterior al proceso de modulación, las subportadoras que se encuentran moduladas se denominan símbolos OFDM, estos símbolos son convertidos a través de una transformada inversa rápida de Fourier dando como resultado a la salida del transmisor una forma de onda compleja y ortogonal que será transmitida hacia el receptor a través de la interfaz radioeléctrica del sistema LTE.

Del lado de receptor se realiza el proceso inverso, se recibe la forma de onda compleja, esta es procesada por una transformada directa rápida de Fourier para obtener las subportadoras, que posteriormente son demoduladas para obtener los bits que transportan. Finalmente los bits son convertidos de paralelo a una secuencia en serie para ser analizados por el receptor. La figura 3.4 muestra todo el proceso descrito tanto del lado del transmisor como del receptor.

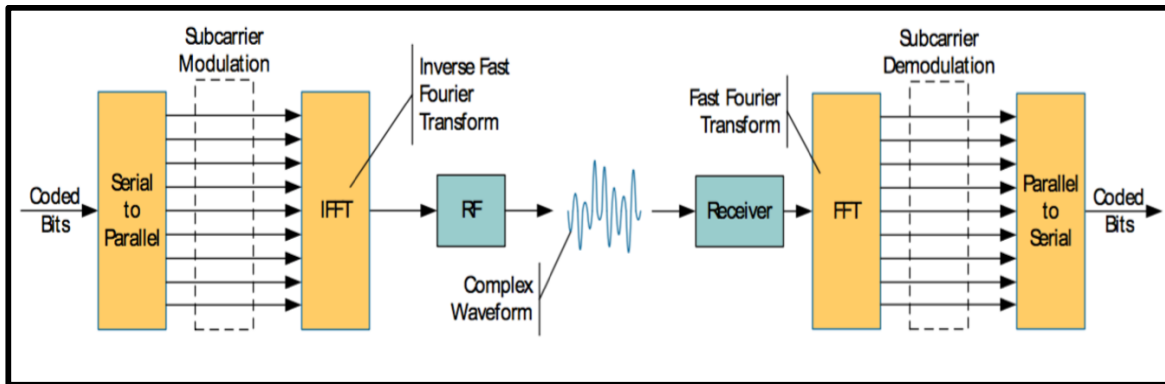


Figura 3.4. Transformada Rápida de Fourier en el Transmisor y Receptor LTE [22].

3.4.3. Anchos de Banda y Subportadoras en el Sistema LTE

Una vez que se ha implementado la transformada directa rápida de Fourier en el receptor, se obtienen las subportadoras que conforman la señal ortogonal compleja y que fueron transmitidas originalmente. Cada una de las subportadoras en el sistema LTE tiene un ancho de banda fijo de 15KHz y el número de subportadoras que pueden ser transmitidas están en función del ancho de banda que fue utilizado por el transmisor, lo que además determina en gran medida la capacidad de transmisión de información del sistema.

Sin embargo, no todas las subportadoras pueden ser usadas para la transmisión de información, debido a que LTE utiliza bandas de guardia para disminuir la interferencia provocada por canales adyacentes. La tabla 3.1 muestra el número de subportadoras totales “NFFT”, subportadoras eficientes “NFFTD” y el número de “Resource Blocks” en función del ancho de banda utilizado. El termino Resource Block hace referencia a la unidad mínima de recursos en tiempo y frecuencia que puede ser asignada por LTE y que será analizado con detalle posteriormente.

La tabla presenta también la frecuencia de muestreo, la cual es equivalente al ancho de banda total utilizado, incluyendo la porción útil y las bandas de guardia. Este valor es el resultado del producto del número total de subportadoras “NFFT” y el ancho de banda de cada subportadora, que en el sistema LTE es equivalente a 15KHz.

Ancho de Banda (MHz)	Frecuencia de Muestreo (MHz)	Número Total de Subportadoras (NFFT)	Numero de Subportadoras Útiles (NFFT _D)	Numero de Resource Blocks
1.4	1.92	128	72	6
3	3.84	256	180	15
5	7.68	512	300	25
10	15.36	1024	600	50
15	23.04	1536	900	75
20	30.72	2048	1200	100

Tabla 3.1. Anchos de banda, Numero de Subportadoras y Resource Blocks en LTE [22].

3.4.4. Mapeo de los símbolos OFDM

Una vez que los bits son modulados, estos son asignados a un símbolo OFDM. En LTE, 12 de estos símbolos son mapeados a 12 subportadoras de manera simultánea y éste proceso se repite de manera continua incluyendo un periodo de guarda denominado “Cycle Prefix” o CP entre cada símbolo. La figura 3.5 presenta una ilustración de este proceso.

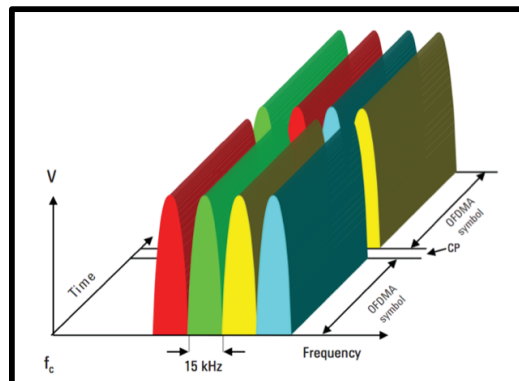


Figura 3.5. Símbolos OFDM y Subportadoras Moduladas [25].

3.4.5. Cycle Prefix (CP)

Uno de los principales inconvenientes que se presentan en LTE es la interferencia inter simbólica (ISI) [26] provocada por el retardo en la propagación de la señal y efectos multi trayectoria. Estos efectos provocan que el receptor reciba copias atenuadas y desfasadas de la señal original producto de la colisión de la señal original con objetos en la trayectoria de propagación. Las señales atenuadas y con retardo producen interferencia entre símbolos consecutivos, lo que afecta la calidad de la señal en el receptor.

Para combatir los problemas producidos por la interferencia inter simbólica, LTE hace uso de un periodo de repetición denominado “Cycle Prefix” [26]. El Cycle Prefix corresponde a una copia de la porción inicial del símbolo OFDM, la cual es agregada al final de mismo previo a la transmisión de la señal, esto se realiza con el objetivo de generar redundancia de la porción del símbolo afectada por la interferencia inter simbólica.

Existen dos tipos de Cycle Prefix en LTE, el normal y el extendido, la diferencia radica en que en el caso normal, la porción repetida del símbolo OFDM es de menor longitud que en el caso extendido, lo cual afecta directamente el área de cobertura máxima de la celda LTE. La figura 3.6 muestra la inserción del Cycle Prefix en un símbolo OFDM.

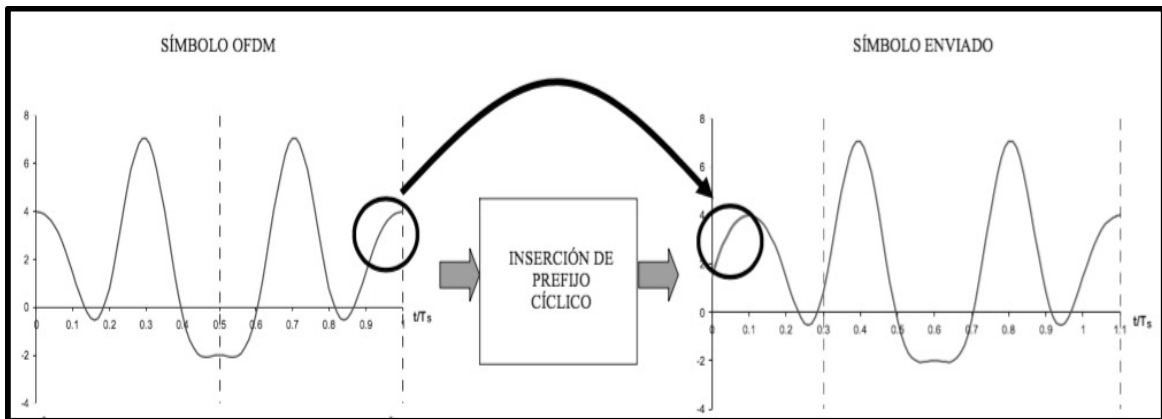


Figura 3.6. Inserción del Cycle Prefix en un símbolo OFDM [21].

3.4.6. Ventajas y Desventajas de OFDM

Ventajas

- Alta resistencia a efectos multi trayectoria.
- Alta eficiencia espectral.
- Permite el uso flexible del espectro radioeléctrico.

Desventajas

- Baja resistencia a efectos de desplazamiento de frecuencia (Efecto Doppler).
- Requiere alta precisión en los procesos de sincronización.
- Algunos sistemas OFDM generan altos consumos de potencia.

3.5. Canales en LTE

LTE está conformado de 4 categorías de canales, canales lógicos, canales de transporte, canales físicos y canales de radio [23, 27]. A continuación se presenta una descripción de las principales características de cada canal así como el mapeo entre las diferentes categorías de canales, tanto para el enlace descendente como para el enlace ascendente.

3.5.1. Enlace Descendente

3.5.1.1. Canales Lógicos

Los canales lógicos son otorgados por la capa MAC a las capas superiores para la transmisión de sus unidades de paquetes de datos (PDUs). Existen dos categorías, los canales lógicos de control que transmiten información del plano de control y los canales lógicos de usuario que transmiten información del plano de usuario. A su vez los canales lógicos se clasifican de acuerdo a la función específica que realizan en el sistema, a continuación se presentan los canales lógicos y sus características.

Broadcast Control Channel (BCCH)

Este canal se encarga de la transmisión de la información del sistema a todos los terminales de usuario ubicados dentro del área de cobertura de una celda LTE. El objetivo de éste canal es el de entregar la información relacionada a como se encuentra configurado el sistema, que permita al terminal de usuario tener conocimiento de los procedimientos que debe realizar dentro de la celda LTE.

Paging Control Channel (PCCH)

Este canal se encarga de la transmisión de información para la localización de terminales de usuario que se encuentran en estado de reposo y cuya ubicación es desconocida por el sistema, por lo que esta información puede ser transmitida en varias celdas simultáneamente.

Common Control Channel (CCCH)

Este canal es utilizado para establecer comunicación de tipo Radio Resource Control (RRC), para el establecimiento y restablecimiento de servicios portadores de señalización del sistema.

Dedicated Control Channel (DCCH)

Este canal es utilizado para la transmisión de información de señalización y control desde y hacia una terminal de usuario en particular. Esta información de control incluye mensajes de configuración y señalización para procedimientos de movilidad.

Dedicated Traffic Channel (DTCH)

Siguiendo el mismo concepto que el canal DCCH, éste canal es utilizado para la transmisión de información en el plano de usuario desde y hacia un terminal de usuario en particular.

Multicast Control Channel (MCCH) y Multicast Traffic Channel (MTCH)

Los canales MCCH y MTCH son utilizados para transmitir información de control y usuario respectivamente, para tráfico tipo Multimedia Broadcast Multicast Services (MBMS).

3.5.1.2. Canales de Transporte

Los canales de transporte son otorgados por la capa física a la capa MAC para la transmisión de sus tramas. Los canales de transporte se encargan de definir la manera en la que la información es transmitida a través de la interfaz radioeléctrica. A su vez, estos canales encapsulan la información en bloques, denominados bloques de transporte, que son transmitidos en intervalos de tiempo de 1ms, que es el mínimo intervalo de tiempo de transmisión definido en el sistema LTE.

Asociado a cada bloque de transporte se define un formato de transporte, el cual contiene información relacionada al tamaño del bloque, la modulación y codificación a ser utilizada y el mapeo de antena. Por lo que éste formato define en gran medida la cantidad de datos que pueden ser transmitidos por cada bloque y consecuentemente la tasa de transmisión final. A continuación se presentan los tipos de canales de transporte y sus funciones principales.

Paging Channel (PCH)

Canal es utilizado para la transmisión de información del Paging Control Channel (PCCH). Soporta el uso de la tecnología conocida como Discontinuous Reception (DRX) que permite el ahorro de energía de la batería del terminal cuando éste se encuentra en estado de reposo.

Broadcast Channel (BCH)

Este canal es utilizado para la transmisión de la información de configuración principal del sistema, que es conocida como Master Information Block (MIB). Debido a esto, el canal BCH implementa un bloque de transporte cuyo formato de transporte es fijo.

Downlink Shared Channel (DL-SCH)

Es el canal principal del enlace descendente del sistema LTE, soporta un conjunto de funcionalidades como tasas de transmisión dinámica, asignación de recursos adaptativa en función de las condiciones del canal, corrección de errores y métodos de multiplexación espacial y diversidad gracias a la implementación de MIMO.

El DL-SCH es utilizado principalmente para la transmisión de información en el plano de usuario, por lo que más de un canal de éste tipo puede ser asignado por el sistema a uno o varios usuarios de manera simultánea. Adicionalmente, una porción de éste canal es también utilizada para la transmisión de información de control.

Multicast Channel (MCH)

Este canal es utilizado para la transmisión de información del plano de control y del plano de usuario para servicios de tipo Multimedia Broadcast Multicast Services (MBMS).

3.5.1.3. Canales Físicos

Hacen referencia al conjunto de recursos en tiempo y frecuencia que están disponibles para la transmisión de los canales de transporte, por lo que LTE establece que por cada canal de transporte debe existir un canal físico. Sin embargo, existen canales físicos utilizados para la transmisión de información de control que no tienen canales de transporte equivalentes.

Estos canales de control son denominados Downlink Control Information (DCI) y su función principal es la de proporcionar la información necesaria al terminal de usuario para que éste pueda recibir, demodular y decodificar correctamente la información transmitida. A continuación se presentan los tipos de canales físicos y sus características.

Physical Broadcast Channel (PBCH)

Canal utilizado para la transmisión de la información correspondiente al Broadcast Control Channel.

Physical Multicast Channel (PMCH)

Canal utilizado para la transmisión de la información del plano de control y del plano de usuario correspondiente al Multicast Channel.

Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)

Canal físico principal del enlace descendente del sistema LTE, utilizado para la transmisión de información del plano de usuario correspondiente al Downlink Shared Channel además de una parte de la información transmitida por el Paging Channel.

Physical Downlink Control Channel (PDCCH)

Canal utilizado para la transmisión de información de control correspondiente al enlace descendente, principalmente decisiones relacionadas a la asignación de recursos a los terminales de usuario y reservación de recursos para el enlace ascendente. La cantidad de recursos utilizados por éste canal se encuentra en función del parámetro Control Format Indicator (CFI) y del ancho de banda del sistema.

Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH)

Canal físico de control utilizado para la transmisión de mensajes de reconocimiento (acknowledgments) utilizados por la técnica HARQ para indicar al terminal de usuario si un bloque de transporte debe ser retransmitido debido a que la recepción del bloque no fue exitosa.

Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)

Canal físico de control utilizado para la transmisión del Control Format Indicator (CFI), el cual determina el número de símbolos OFDM utilizados para transmisión del PDCCH. El CFI define el uso de 1, 2 y 3 símbolos OFDM para canales con anchos de banda mayores a 1.4MHz y 2, 3 y 4 símbolos OFDM para canales con anchos de banda de 1.4MHz.

La figura 3.7 muestra el mapeo entre los diferentes canales tanto para el plano de usuario como para el plano de control del sistema LTE, para el enlace descendente.

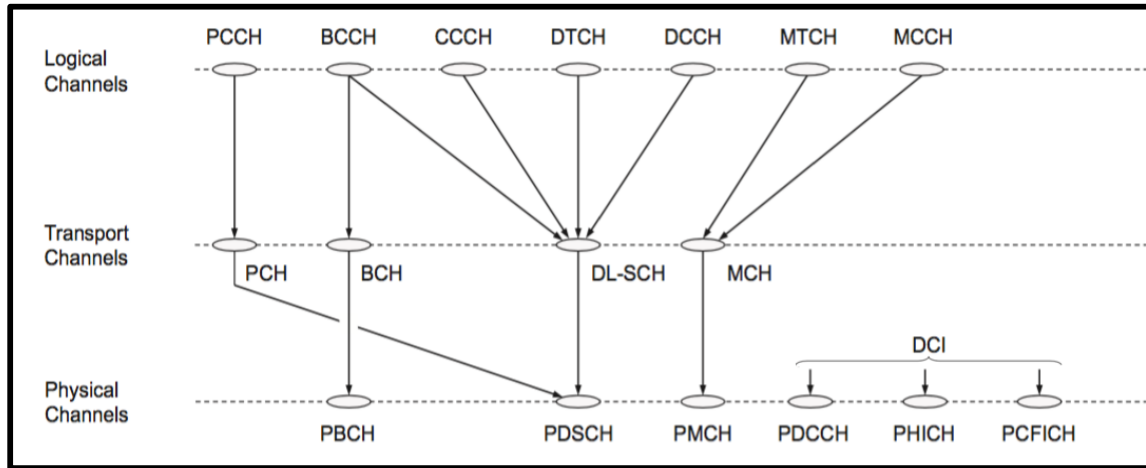


Figura 3.7. Mapeo de canales para el enlace descendente del sistema LTE [23].

3.5.2. Enlace Ascendente

De manera similar al enlace descendente, el enlace ascendente cuenta con un conjunto de canales lógicos, de transporte y físicos, que son utilizados para la transmisión de información correspondiente tanto al plano de usuario como al plano de control.

Muchos de los canales utilizados en el enlace ascendente cumplen las mismas funciones ya descritas para los canales en el enlace descendente, sin embargo los canales que son únicamente utilizados por enlace ascendente son detallados a continuación.

Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)

Este canal físico es el principal del enlace ascendente y es utilizado para la transmisión de información en el plano de usuario y una parte de la información de control y señalización. Sus características son equivalentes a las del canal PDSCH que ya fueron descritas en secciones anteriores.

Physical Uplink Control Channel (PUCCH)

Canal de control del enlace ascendente, encargado de la transmisión de los mensajes de reconocimiento (acknowledgments) utilizados por HARQ para indicar al eNodeB si el bloque de transporte ha sido recibido de manera correcta por parte del terminal de usuario.

Otras de sus funciones incluyen la transmisión de solicitudes de asignación de recursos y la transmisión del Channel Quality Indicator (CQI), utilizado como indicador de la calidad del canal percibida por el terminal de usuario.

Physical Random Access Channel (PRACH)

Canal de transporte encargado de la transmisión de los denominados preámbulos de acceso aleatorio, que hacen referencia a un conjunto de subportadoras especiales utilizadas por LTE para el acceso y sincronización inicial del terminal de usuario al sistema.

A continuación, la figura 3.8 muestra el mapeo entre los diferentes canales del sistema LTE correspondientes al enlace ascendente.

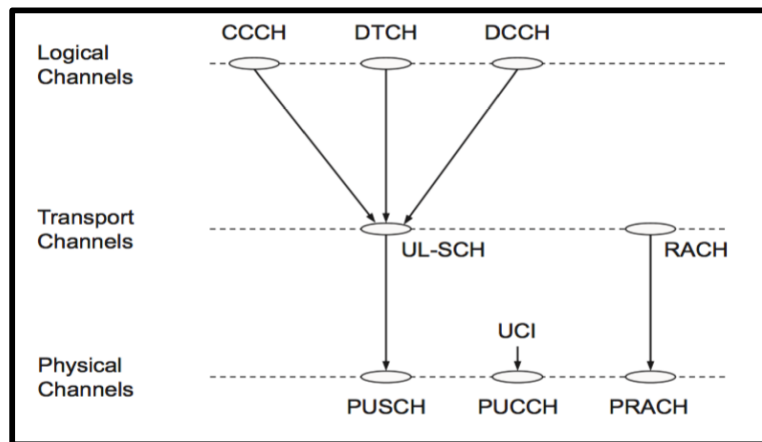


Figura 3.8. Mapeo de canales del sistema LTE para el enlace ascendente [23].

3.6. Estructura de las Tramas en LTE

En LTE, la unidad mínima de asignación de recursos es conocida como Resource Block [21], el Resource Block está compuesto de 12 subportadoras en el dominio de la frecuencia y 6 o 7 símbolos OFDM en el dominio del tiempo. El Resource Block está contenido en “tramas” cuya estructura está en función del modo de transmisión, que en LTE puede ser FDD o TDD.

3.6.1. Estructura Tipo 1 (FDD)

La primera estructura de trama utilizada por LTE es la estructura tipo 1, utilizada por el modo de transmisión FDD. La duración de la trama es de 10ms y esta se divide en “subtramas” de 1ms, que a su vez también se subdividen en “slots” de 0.5ms de duración.

Ya que la trama es implementada en modo FDD, cada trama es utilizada de manera independiente por el enlace descendente y ascendente en diferentes canales de frecuencia. La figura 3.9 muestra la estructura de la trama tipo FDD.

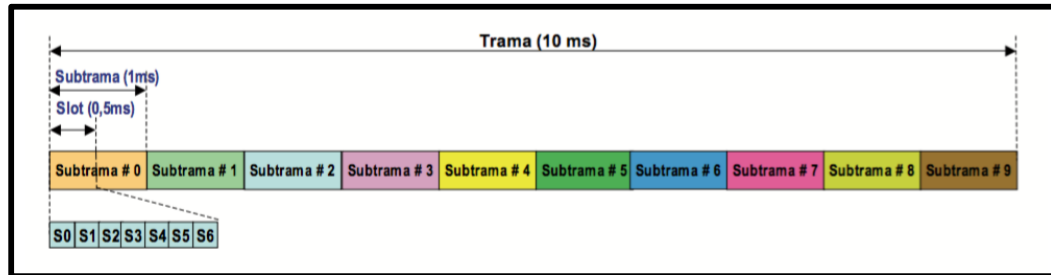


Figura 3.9. Estructura de trama tipo FDD [21].

3.6.2. Estructura Tipo 2 (TDD)

Este tipo de trama es implementada cuando el modo de transmisión utilizado es TDD y presenta diferentes características que la trama utilizada por el modo de transmisión FDD. La principal diferencia es la existencia de una “subtrama especial”, que es utilizada por el modo TDD para la transición entre la transmisión del enlace descendente y el enlace ascendente, debido a que TDD comparte el mismo canal para ambas direcciones del enlace.

Adicionalmente, cada subtrama especial está compuesta de un conjunto de símbolos OFDM que cumplen funciones específicas dentro de la subtrama, estas funciones están asociadas al modo de operación TDD y son descritas a continuación.

- Downlink Pilot Time Slot (DwPTS): Símbolos utilizados para la transmisión de información de usuario y control para el enlace descendente en la subtrama especial.
- Uplink Pilot Time Slot (UpPTS): Símbolos utilizados para la transmisión de información de usuario y control para el enlace ascendente en la subtrama especial.
- Guard Period (GP): Espacio de tiempo dentro de la subtrama especial utilizado para la transición entre la transmisión del enlace descendente y ascendente. Este periodo de tiempo debe ser lo suficientemente grande para considerar los retardos de propagación, por lo que éste periodo define el área máxima de cobertura de una celda que utiliza el modo de transmisión TDD.

A continuación, la figura 3.10 muestra la estructura de la trama TDD y los elementos que la componen.

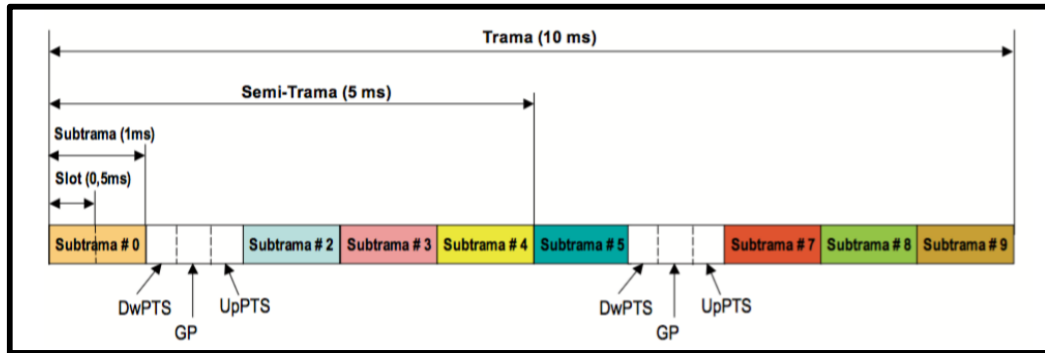


Figura 3.10. Estructura de trama tipo TDD [21].

Adicionalmente, LTE define un conjunto de configuraciones para la trama tipo TDD y para la subtrama especial. En el caso de la trama TDD, las configuraciones están en función del número de subtramas asignadas para el enlace ascendente, descendente y la subtrama especial. En el caso de la subtrama especial las configuraciones dependen del número de símbolos OFDM asignados a cada una de sus funciones.

A continuación la tabla 3.2 muestra las configuraciones de la trama TDD, en donde la letra ‘D’ hace referencia al uso de la subtrama para la transmisión de información en el enlace descendente, la ‘U’ para la transmisión en el enlace ascendente y la ‘S’ para la subtrama especial.

Configuración	Periodicidad (ms)	Numero de Subtrama									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5	D	S	U	D	D	S	U	D	D	
3	10	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Tabla 3.2. Configuraciones de la Trama TDD [21].

De la misma manera, en la tabla 3.3 se muestran las configuraciones disponibles para la subtrama especial, definidas en el estándar en función del número de símbolos OFDM disponibles para la transmisión del DwPTS, UpPTS y el periodo de guardia. Además, se considera el criterio del uso del Cycle Prefix en sus versiones normal y extendida.

Configuración	Cycle Prefix Normal			Cycle Prefix Extendido			
	DwPTS (N° Símbolos OFDM)	GP (N° Símbolos OFDM)	UpPTS (N° Símbolos OFDM)	DwPTS (N° Símbolos OFDM)	GP (N° Símbolos OFDM)	UpPTS (N° Símbolos OFDM)	
0	3	10	1	3	8	1	
1	9	4		8	3		
2	10	3		9	2		
3	11	2		10	1		
4	12	1		3	7		
5	3	9	2	8	2	2	
6	9	3		9	1		
7	10	2		5	5		
8	11	1		-	-		-
9	6	6		-	-		-

Tabla 3.3. Configuraciones de la Subtrama Especial [21].

Adicionalmente, como se mencionó en secciones anteriores, el Cycle Prefix en LTE presenta dos versiones, la versión normal y extendida. La diferencia en su duración provoca que en el caso de la versión normal, 14 símbolos OFDM puedan ser transmitidos por subtrama y en el caso extendido 12 símbolos OFDM puedan ser transmitidos. Esto puede ser visto en la tabla 3.3, en donde el número de símbolos OFDM disponibles para la transmisión de la subtrama especial dependen del tipo de Cycle Prefix utilizado.

3.7. Estructuración de la Capa Física de LTE

Como fue descrito en secciones anteriores, la capa física otorga canales de transporte para la transmisión de los bloques de transporte provenientes de la capa MAC para posteriormente mapear estos canales de transporte a canales físicos para su transmisión a través de la interfaz radioeléctrica del sistema LTE.

De todos los canales de transporte, el canal más importante en LTE es el Downlink Shared Channel (DL-SCH), el cual es utilizado principalmente para la transmisión de información de usuario además de una pequeña porción de información de señalización y control.

Para la estructuración del Downlink Shared Channel, el sistema LTE debe realizar un conjunto de procedimientos que inician desde que se recibe un bloque de transporte de la capa MAC, hasta que la información es transmitida a la interfaz radioeléctrica por el sistema de antenas [23]. A continuación se presentan todos los procedimientos, los cuales pueden ser observados en una representación de tipo diagrama de bloques en la figura 3.11.

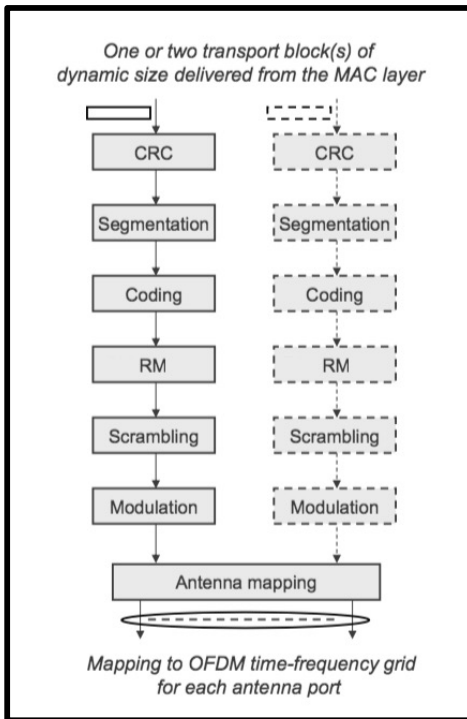


Figura 3.11. Diagrama de Bloques de Procesamiento de la Capa Física de LTE [23].

3.7.1. Control de Redundancia Cíclica (CRC)

En esta etapa se calcula una secuencia de Control de Redundancia Cíclica (CRC) con un longitud de 24 bits, la cual es agregada al bloque de transporte recibido de la capa MAC y que será transmitido a través de la interfaz radioeléctrica.

El método de CRC es utilizado por LTE para la detección de errores posterior al proceso de decodificación del bloque de transporte en el receptor. Para esto el receptor recibe el bloque de transporte y calcula su propio CRC, posteriormente compara el CRC calculado con el recibido y determina la existencia de errores.

3.7.2. Segmentación

Durante este procedimiento los bloques de transporte recibidos de la etapa anterior son medidos para calcular su tamaño en bits, si éste tamaño excede un valor predeterminado, el bloque debe ser dividido o segmentado en bloques más pequeños denominados “bloques de código”. El tamaño máximo de estos bloques de código está definido por el proceso de codificación de la siguiente etapa.

Adicionalmente, si en esta etapa el tamaño máximo es excedido, a cada bloque de código se le agrega su propio CRC para el control de errores en el receptor. La figura 3.12 ilustra el procedimiento de segmentación.

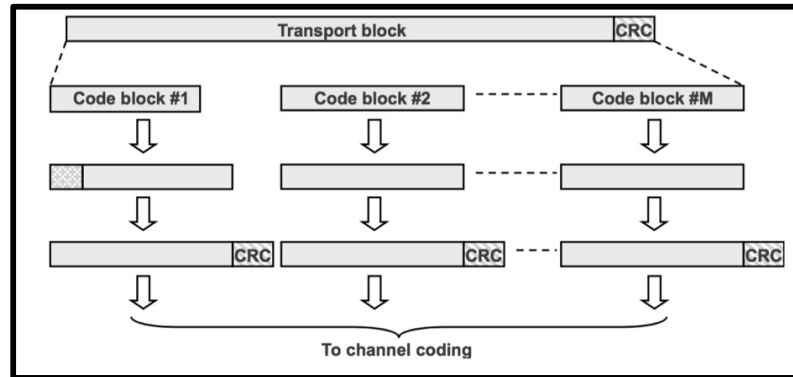


Figura 3.12. Segmentación de los Bloques de Transporte [23].

3.7.3. Codificación

Uno de los conceptos más importantes en la capa física es la codificación, esta técnica es usada por LTE para la corrección de errores producidos durante la transmisión de la señal a través de la interfaz radioeléctrica. La tabla 3.4 muestra los tipos de codificación utilizados en LTE para sus diferentes canales de transporte.

Canal de Transporte	Método de Codificación	Tasa de Codificación
DL-SCH	Turbo Codificación	1/3
UL-SCH		
PCH		
MCH		
BCH	Codificación Convolutional	1/3

Tabla 3.4. Métodos de codificación y canales en LTE [23].

La tabla 3.4 muestra que el método de codificación utilizado por el canal DL-SCH es el método de Turbo Codificación. Este método se compone de un “interleaver” interno y de dos codificadores concatenados compuestos de 8 etapas con una tasa de repetición de 1/2 cada una, lo que da como resultado un solo codificador con una tasa de repetición total de 1/3.

La tasa de repetición hace referencia a la relación entre el número de bits que componen un código de bloques que ingresan al codificador (numerador) y el número de bits a la salida del codificador (denominador). La figura 3.13 muestra el diagrama de bloques del turbo codificador implementado por LTE.

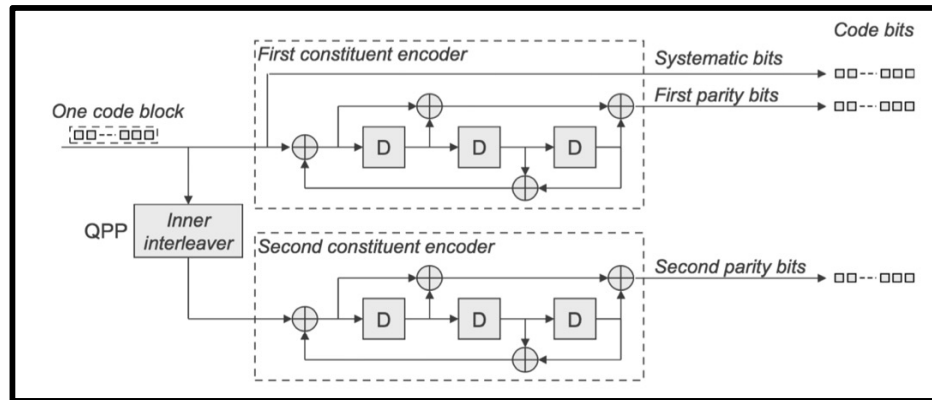


Figura 3.13. Diagrama de bloques de un turbo codificador con tasa de codificación de 1/3 [23].

3.7.4. Adaptación de tasa de transmisión (RM)

Esta etapa tiene el objetivo de extraer los bits de los bloques de transporte a la salida de la etapa de codificación para determinar el número exacto de bits que serán transmitidos durante el intervalo de tiempo de transmisión mínimo de 1ms definido por el estándar LTE.

3.7.5. Mezclado (Scrambling)

Esta etapa tiene como objetivo “mezclar” los bits obtenidos de la etapa anterior. Para esto, los bits son multiplicados bit a bit con una secuencia de mezclado con el objetivo de evitar que el decodificador en el receptor coincida exactamente con una señal de interferencia, lo que haría imposible eliminarla de la señal recibida.

El método de mezclado es implementado al nivel de los bits del canal DL-SCH y disminuye la probabilidad de error en el receptor a través del mezclado de las subportadoras y símbolos OFDM encargados de transportar la información contenida en éste canal.

3.7.6. Modulación

En esta etapa, una vez que los bits “mezclados” provenientes del proceso anterior son recibidos, el modulador del sistema se encarga de mapear los bits recibidos en un conjunto de símbolos modulados, cuya distribución depende del tipo de modulación utilizada. LTE soporta diferentes tipos de modulación para sus diferentes canales, en donde cada modulación permite mapear un determinado número de bits a cada símbolo modulado.

El número de bits que puede ser asignado a cada símbolo depende de la modulación utilizada y es uno de los parámetros más importantes para determinar la tasa de transmisión del sistema. La tabla 3.5 muestra las modulaciones utilizadas por cada canal físico en el sistema LTE, así como el número de bits que puede ser transportado por cada símbolo modulado.

Modulación	Bits por Símbolo Modulado	Canales que utilizan esta modulación
Binary Phase Shift Keying (BPSK)	1	PHICH
Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)	2	PCFICH,PBCHC,PD-SCH
Quadrature Amplitude Modulation de 16 Bits (16QAM)	4	PDL-SCH
Quadrature Amplitude Modulation de 64 Bits (64QAM)	6	PDL-SCH

Tabla 3.5. Modulaciones, bits por símbolo modulado y canales en LTE [23].

Como se mencionó anteriormente, cada bit a la salida de la etapa de mezclado es mapeado a un símbolo modulado. El mapeo de estos bits depende de la modulación utilizada y es particular a cada tipo de modulación. La figura 3.14 muestra la distribución de los símbolos para las modulaciones BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM respectivamente.

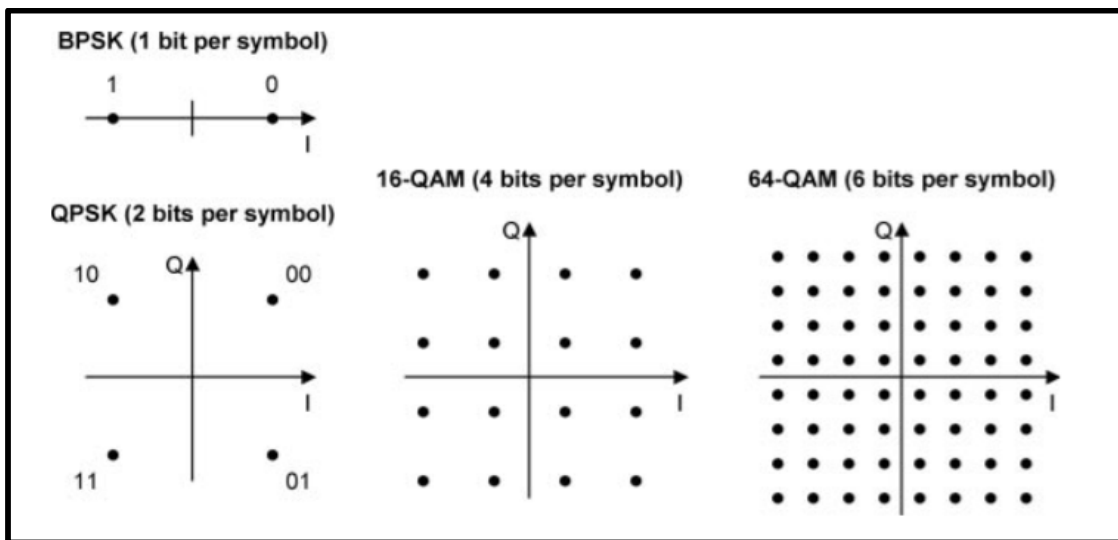


Figura 3.14. Distribución de símbolo para cada tipo de modulación del sistema LTE [26].

3.7.7. Mapeo de antena

La última etapa del proceso de estructuración de la capa física es el mapeo de antena. En esta etapa los símbolos modulados obtenidos de la etapa anterior son mapeados a los puertos de antena correspondientes, para su transmisión a través de la interfaz radioeléctrica. El mapeo de los símbolos se encuentra en función del número de antenas utilizado, que puede ser una sola antena de transmisión en el caso del modo Single Input Single Output (SISO) o múltiples antenas de transmisión en caso del modo Multiple Input Multiple Output (MIMO).

3.7.8. Resource Blocks

El Resource Block es la unidad mínima de asignación en LTE y está compuesto de 12 subportadoras y 7 o 6 símbolos OFDM si se usa un Cycle Prefix normal o extendido respectivamente. A su vez cada Resource Block se encuentra dividido en elementos más pequeños denominados Resource Elements, en donde cada Resource Element tiene asociado un símbolo modulado y por lo tanto transporta un número de bits determinado en función de la modulación utilizada. A continuación la figura 3.15 muestra la distribución de los Resource Elements y Resource Block dentro de un slot de tiempo de 0.5ms.

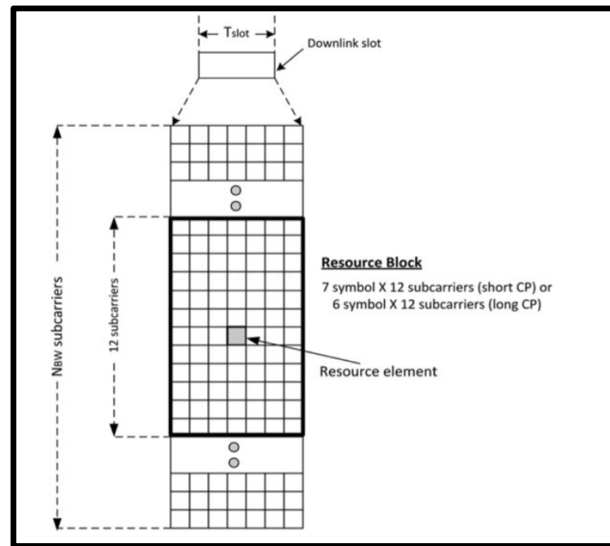


Figura 3.15. Resource Elements y Resource Block [2].

3.7.9. Señales de sincronización primaria (PSS) y secundaria (SSS)

Las señales de sincronización primaria (PSS) y secundaria (SSS) son utilizadas durante el proceso de sincronización entre el UE y el sistema LTE. Además, proveen información relacionada a la identificación de la celda en la que se encuentra el UE (Cell ID), el tamaño del Cycle Prefix utilizado (Normal o Extendido) y el tipo de trama LTE (FDD o TDD).

Los valores de Cell ID que pueden ser utilizados dependen de los valores del PSS y SSS. En el caso del PSS los valores van de 0 a 167 y del SSS de 0 a 3. La ecuación 3.1 permite realizar el cálculo del Cell ID, el cual puede tomar valores entre 0 y 503.

$$Cell\ ID = 3 * PSS * SSS \quad (3.1)$$

3.8. Señales de Referencia en el Enlace Descendente

Las señales de referencia en el enlace descendente son un grupo de señales que ocupan Resource Elements específicos dentro del canal de comunicaciones LTE. El propósito de estas señales es ayudar al terminal de usuario en el proceso de demodulación, estimación de canal, mediciones de calidad de la señal y procedimientos de sincronización [23]. A continuación se listan las principales señales de referencia en LTE y se presentan las características de cada una de ellas.

3.8.1. Cell Specific Reference Signals (CSRS)

Estas señales son transmitidas en cada subtrama y son utilizadas por el terminal de usuario para demodulación coherente, estimación de canal y mediciones específicas en las celdas para la ejecución de procesos de movilidad como selección de celda y handover. La figura 3.16 muestra la distribución de las CSRS en un Resource Block para el caso en que únicamente un puerto de antena es utilizado.

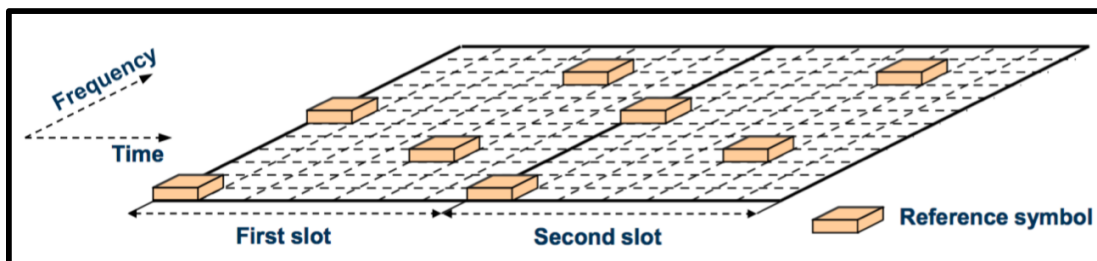


Figura 3.16. Ubicación de las señales de referencia CSRS en un Resource Block [23].

La ubicación de estas señales de referencia es específica para cada celda y varía de una celda a otra. Existen 504 secuencias de ubicación para las Cell Specific Reference Signals, debido a que estas secuencias se encuentran en relación con el valor del Cell ID.

Cabe mencionar que el hecho de que cada secuencia sea particular para cada celda es importante para evitar la interferencia entre señales de referencia, lo cual debe ser considerado al momento de la planificación de la red LTE. A continuación la figura 3.17 muestra la distribución de las señales de referencia para diferentes celdas. Como se puede observar en la figura, las señales de referencia se encuentran desplazadas una respecto a la otra debido al uso de diferentes valores de Cell ID.

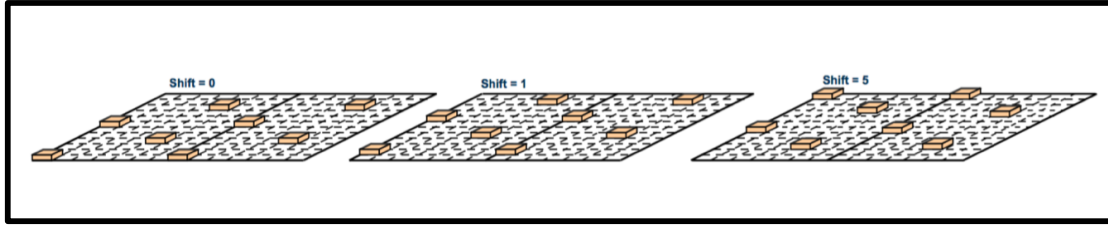


Figura 3.17. Ubicación de las señales de referencia CSRS para diferentes Cell ID [23].

Adicionalmente, la posición de las CSRS depende también del número de puertos de antena utilizados por el sistema en caso de que MIMO esté en funcionamiento. La figura 3.18 muestra la distribución de las señales de referencia para el caso en el que se encuentran en uso dos (parte izquierda) y cuatro (parte derecha) puertos de antena. En la figura también se puede observar que el número de Resource Elements utilizados para las señales de referencia se incrementa en función del número de puertos de antena, lo cual debe ser considerado al momento del dimensionamiento de la capacidad de transmisión del sistema.

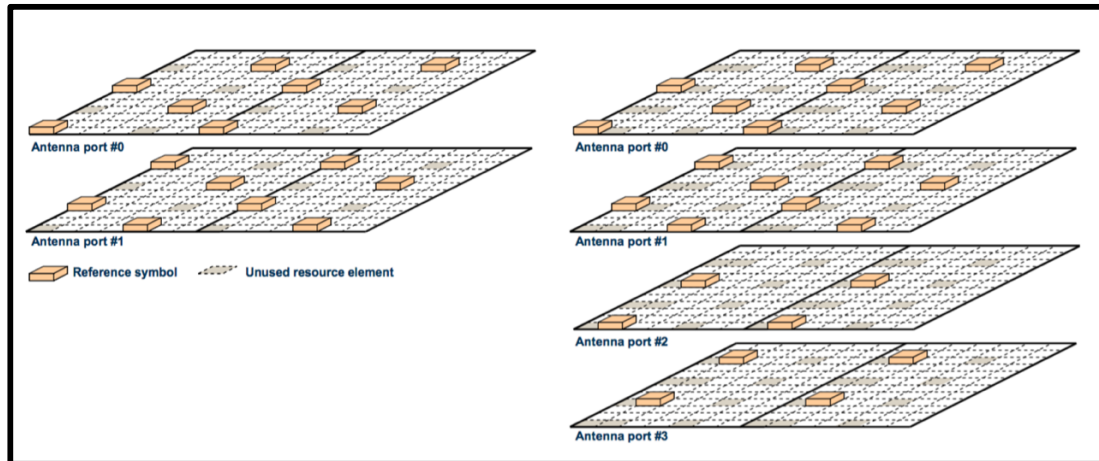


Figura 3.18. Señales de referencia para dos y cuatro puertos de antena [23].

3.8.2. Demodulation Reference Signals (DRS)

También denominadas UE Specific Reference Signals, son utilizadas por el terminal para estimación de canal y demodulación coherente de la señal. Este tipo de señales de referencia es utilizado únicamente para determinados modos de transmisión del PDSCH y al ser particulares por cada terminal de usuario, ocupan una ubicación específica en función de dicho terminal.

3.8.3. Multimedia Broadcast/Multicast Single Frequency Network Reference Signals.

El sistema LTE también define el uso de señales de referencia específicas para transmisiones del tipo Multimedia Broadcast Multicast Single Frequency Network (MBSFN). Este tipo de señales de referencia presentan dos configuraciones diferentes. La configuración uno utiliza señales de referencia de 15KHz, que es el ancho de banda de una subportadora en LTE y la configuración dos utiliza señales de referencia con un ancho de banda de 7.5KHz.

3.9. Estimación de Canal

Una de las características más importantes del sistema LTE es su capacidad de adaptarse de manera dinámica a las condiciones del canal de comunicación a través de la selección del tipo de modulación y la tasa de codificación más adecuada en función de la calidad de canal experimentado por cada terminal de usuario [20].

La modificación de la modulación y de la tasa de codificación permite al sistema LTE asignar recursos de manera dinámica a través del uso de algoritmos de calendarización programados a nivel de la capa de acceso al medio (MAC). Estos algoritmos se encargan de asignar los recursos en tiempo y frecuencia a los terminales en base a la estimación de canal reportada por cada uno, permitiendo así optimizar el uso de los recursos obteniendo al mismo tiempo la máxima tasa de transmisión y eficiencia espectral.

El procedimiento para la estimación de la calidad del canal se realiza a través de reportes enviados por el terminal de usuario al eNodeB. Para el enlace descendente la estimación se realiza en función de mediciones realizadas en las Cell Specific Reference Signals [21]. En base a esta estimación, el esquema de modulación y codificación es escogido con el objetivo de obtener la mayor tasa de transmisión sin exceder el máximo porcentaje de bloques de transporte recibidos con errores, que según el estándar LTE no puede sobrepasar el 10% [20].

A continuación en la figura 3.19 se puede observar el principio general en el que se basa el procedimiento de estimación de canal y de adaptación dinámica del enlace descendente en el sistema LTE.

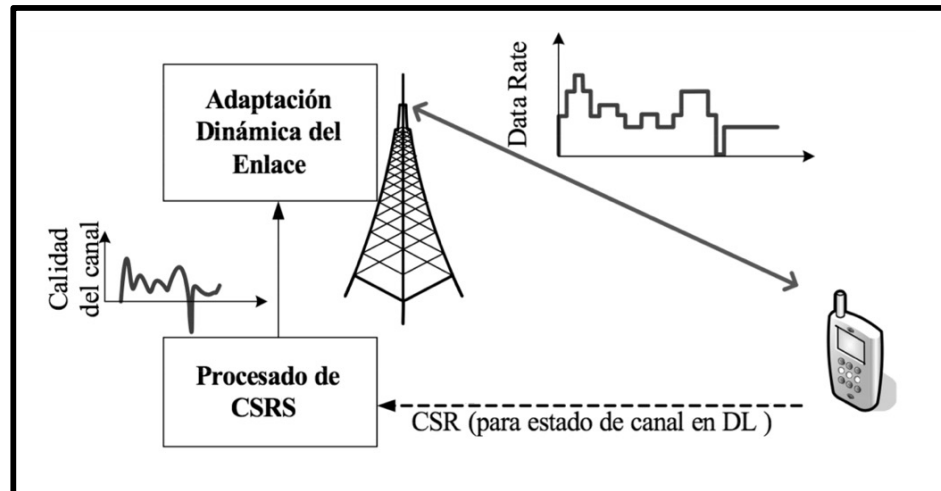


Figura 3.19. Esquema general para estimación de canal y adaptación del enlace [21].

Las mediciones realizadas sobre las Cell Specific Reference Signals permiten obtener un conjunto de parámetros, que combinados permiten estimar la calidad del canal de manera más precisa y consecuentemente optimizar el uso de los recursos del sistema. A continuación se presentan los parámetros obtenidos en base a estas señales de referencia y sus funciones específicas en el sistema LTE.

3.9.1. Reference Signal Received Power (RSRP)

Este parámetro se define como el promedio lineal de potencia de los Resource Elements que transportan Cell Specific Reference Signals dentro de un ancho de banda establecido [4]. Este valor de potencia es obtenido en el puerto de antena 0 en el terminal de usuario.

Los valores de potencia obtenidos a través del parámetro RSRP son utilizados por el sistema principalmente para funciones de estimación de la calidad del canal experimentada por el terminal de usuario y para el apoyo en la ejecución de procedimientos de movilidad en LTE, como selección / reelección de celda y procedimientos de handover.

El 3GPP define dentro del estándar LTE un rango determinado de valores de RSRP que pueden ser reportados por el terminal de usuario. Un total de 98 valores de RSRP pueden ser reportados, en donde cada valores representa un rango de potencia medido en dBm. La tabla 3.6 muestra los valores definidos por el estándar para el parámetro RSRP.

Valor de RSRP reportado	Intervalo de la Medición Realizada	Unidad
RSRP 00	RSRP < -140	dBm
RSRP 01	-140 <= RSRP <= -139	dBm
RSRP 02	-139 <= RSRP <= -138	dBm
...
RSRP 95	-46 <= RSRP <= -45	dBm
RSRP 96	-45 <= RSRP <= -44	dBm
RSRP 97	-44 < RSRP	dBm

Tabla 3.6. Valores de RSRP definidos por el estándar [28].

3.9.2. Received Signal Strength Indicator (RSSI)

El parámetro Received Signal Strength Indicator (RSSI) se define como el promedio lineal de potencia medido únicamente en los símbolos OFDM que transportan Cell Specific Reference Signals para el puerto de antena 0 del terminal de usuario [4]. Es medido sobre el ancho de banda asignado al UE y contiene los valores de potencia de la señal transmitida por la celda en la que se encuentra el terminal así como el valor de la interferencia producido por las celdas adyacentes y el ruido térmico.

3.9.3. Reference Signal Received Quality (RSRQ)

Otro parámetro utilizado para la estimación de canal es el Reference Signal Received Quality (RSRQ) [4]. El RSRQ mide la calidad de las señales de referencia en el receptor y es utilizado en conjunto con el RSRP para estimación de canal y procedimientos de movilidad. El estándar define el RSRQ a través de la siguiente relación.

$$RSRQ = NRB \times \frac{RSRP}{RSSI} \quad (3.2)$$

En la ecuación 3.2, el término “NRB” hace referencia al número de resource blocks, es decir el ancho de banda sobre el cual se realizaron las mediciones del RSRP y RSSI. A continuación la tabla 3.7 muestra el rango de valores para el RSRQ expresado en dB.

Valor de RSRQ reportado	Intervalo de la Medición Realizada	Unidad
RSRQ 00	RSRQ < -19.5	dB
RSRQ 01	-19.5 <= RSRQ <= -19	dB
RSRQ 02	-19 <= RSRQ <= -18.5	dB
...
RSRQ 32	-4 <= RSRQ <= -3.5	dB
RSRQ 33	-3.5 <= RSRQ <= -3	dB
RSRQ 34	-3 < RSRQ	dB

Tabla 3.7. Valores de RSRQ definidos por el estándar [28].

3.9.4. Signal to Noise Ratio (SNR)

El Signal to Noise Ratio (SNR) es uno de los parámetros más importantes utilizados por el sistema LTE para caracterizar la calidad de la señal en el canal de comunicación, éste parámetro se obtiene al medir la relación que existe entre la potencia de la señal y la potencia del ruido medido del lado del receptor, generalmente esta expresado en dB.

3.10. Adaptación Dinámica del Enlace

El proceso de adaptación del canal es realizado por los algoritmos de calendarización a nivel de la capa MAC [21]. El parámetro principal para la realización de este proceso son los valores de estimación de la calidad del canal realizados por el usuario. LTE define un conjunto de parámetros que pueden ser utilizados para realizar éste proceso, sin embargo el parámetro más utilizado es el denominado Channel Quality Indicator (CQI).

3.10.1. Channel Quality Indicator (CQI)

El parámetro principal utilizado para la estimación de canal se conoce como Channel Quality Indicator (CQI). El CQI es un indicador de la calidad de canal que experimenta el UE y permite al eNodeB obtener información sobre la configuración que puede ser soportada por el UE, el número de antenas que utiliza y el nivel de interferencia existente al momento de la estimación del CQI. La tabla 3.8 muestra los valores definidos para el CQI, así como el tipo de modulación, tasa de codificación y número de bits por Resource Element.

CQI	Modulación	Tasa de Codificación x 1024	Bits por Resource Element
0	Fuera de Rango	-	-
1	QPSK	78	2
2	QPSK	120	2
3	QPSK	193	2
4	QPSK	308	2
5	QPSK	449	2
6	QPSK	602	2
7	16QAM	378	4
8	16QAM	490	4
9	16QAM	616	4
10	64QAM	466	6
11	64QAM	567	6
12	64QAM	666	6
13	64QAM	772	6
14	64QAM	873	6
15	64QAM	948	6

Tabla 3.8. Valores de CQI definidos por el estándar LTE [26].

El CQI puede ser clasificado en tres categorías dependiendo de su granularidad, es así que el estándar define tres tipos distintos de CQI, el Wideband, Subband y Higher Layer Subband, siendo el tipo Wideband el más utilizado ya que mide la calidad del canal para todo el ancho de banda, mientras que las otras categorías miden solamente la calidad en canales específicos.

Cabe mencionar que el cálculo del CQI no está definido en el estándar y está abierto a los fabricantes de los elementos de radio del UE. Sin embargo de manera general se utiliza el valor del SNR de la señal recibida por el UE y se realiza una conversión a valores de CQI.

3.10.2. Modulation and Coding Scheme (MCS)

Como ya se mencionó, el método de codificación utilizado por el LTE para el canal DL-SCH, es el método de turbo codificación. LTE define 28 esquemas que combinan los métodos de modulación y tasas de codificación, estos esquemas son equivalentes a los valores de CQI y son utilizados por el eNodeB para determinar la modulación y tasa de codificación a utilizar para la transmisión de un bloque de transporte. La tabla 3.9 muestra un ejemplo de valores para los esquemas MCS cuando existen 12 símbolos OFDM disponibles para la transmisión.

MCS	Modulación	Tasa de codificación aproximada	Bits por Resource Element
1	QPSK	0.14	2
2	QPSK	0.17	2
3	QPSK	0.22	2
4	QPSK	0.28	2
5	QPSK	0.34	2
6	QPSK	0.40	2
7	QPSK	0.47	2
8	QPSK	0.54	2
9	QPSK	0.61	2
10	16QAM	0.30	4
11	16QAM	0.34	4
12	16QAM	0.39	4
13	16QAM	0.44	4
14	16QAM	0.50	4
15	16QAM	0.55	4
16	16QAM	0.59	4
17	64QAM	0.39	16
18	64QAM	0.42	16
19	64QAM	0.46	16
20	64QAM	0.51	16
21	64QAM	0.55	16
22	64QAM	0.60	16
23	64QAM	0.64	16
24	64QAM	0.69	16
25	64QAM	0.74	16
26	64QAM	0.78	16
27	64QAM	0.81	16
28	64QAM	0.95	16

Tabla 3.9. Valores de MCS definidos por el estándar LTE [29].

3.11. Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Multiple Input Multiple Output (MIMO) es una de las tecnologías claves utilizadas en el sistema LTE. De manera básica, MIMO hace referencia al uso de múltiples antenas tanto para la transmisión como para la recepción de la señal. En general MIMO puede clasificarse en dos esquemas principales los cuales son presentados a continuación.

3.11.1. Esquemas MIMO

Single User MIMO (SU-MIMO)

En este esquema, MIMO es utilizado para mejorar la capacidad del enlace descendente de un terminal de usuario en particular, esto se logra a partir del uso de múltiples antenas transmisoras en el eNodeB y receptoras del lado del terminal de usuario. La figura 3.20 muestra una representación del esquema SU-MIMO.

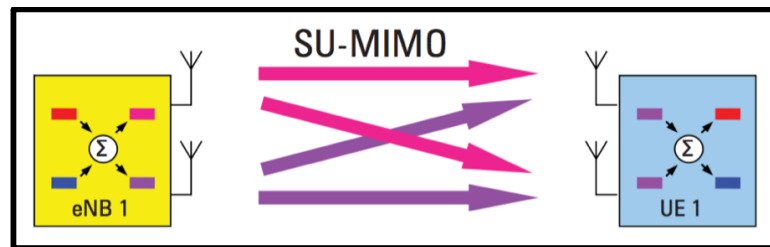


Figura 3.20. Esquema SU-MIMO [25].

Multiple User MIMO (MU-MIMO)

En este esquema, el eNodeB y el UE cuentan con un sistema múltiple de antenas. La mejora en la capacidad del enlace descendente se mantiene en comparación al caso anterior, sin embargo la existencia de más de un UE permite al sistema mejorar su rendimiento a nivel del enlace ascendente, ya que el eNodeB puede recibir la señal de más de un UE de manera simultánea. La figura 3.21 muestra una representación del esquema MU-MIMO.

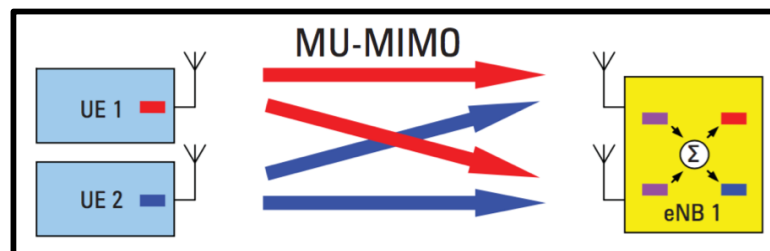


Figura 3.21. Esquema MU-MIMO [25].

3.11.2. Modos de transmisión MIMO

El sistema LTE soporta además diferentes modos de transmisión para el enlace descendente cuando la tecnología MIMO se encuentra en uso. Estos modos de transmisión se conocen como multiplexación espacial y diversidad y su funcionamiento es descrito a continuación.

Multiplexación Espacial

El objetivo principal de la implementación de este modo es incrementar la capacidad de transmisión del sistema. Esto se logra a través de la transmisión de dos flujos de datos diferentes, uno a través de cada puerto de antena disponible. La figura 3.22 muestra el principio básico del modo multiplexación espacial.

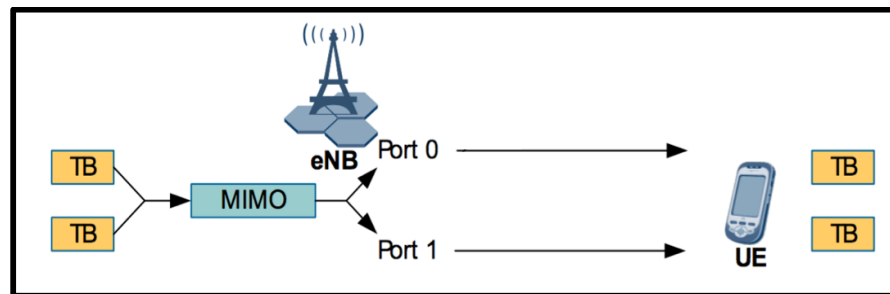


Figura 3.22. Multiplexación Espacial [22].

Diversidad

En el modo de diversidad, el objetivo es aumentar la robustez de la señal transmitida. Esto se logra a través del envío del mismo flujo de datos de manera repetida a través de los puertos de antena disponibles. Esto permite que las señales transmitidas experimenten diferentes condiciones de propagación lo que provoca que la interferencia del canal afecte de manera distinta a las señales, disminuyendo la probabilidad de error cuando estas son combinadas nuevamente en el receptor. La figura 3.23 muestra el principio básico del modo diversidad.

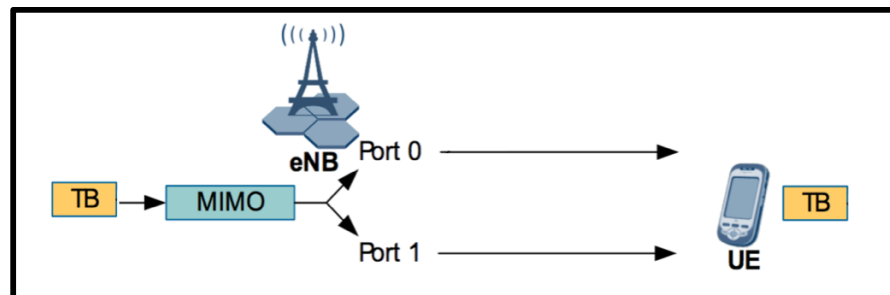


Figura 3.23. Diversidad [22].

3.12. Malla de Recursos en LTE

A partir de los conceptos presentados en las secciones anteriores de este capítulo, se puede definir el termino “Malla de Recursos” como el conjunto de recursos en tiempo y frecuencia disponibles para la transmisión de información en el sistema LTE. La unidad mínima de la malla de recursos son los Resource Elements y su tamaño está en función de los parámetros de configuración del sistema. Esta malla incluye tanto los canales físicos de control como los canales físicos utilizados para la transmisión de información del usuario.

A continuación en la tabla 3.10 se presenta la configuración para la obtención de una malla de recursos correspondiente a un canal de 3MHz, mientras que el código de colores utilizado para identificar a los canales físicos de control y usuario se presenta en la tabla 3.11.

Parámetro	Valor
Ancho de Banda del Canal	3 MHz
Estructura de la trama	TDD
Tipo de Cycle Prefix	Normal
Numero de símbolos por PDCCH	1
Numero de puertos de antena	1

Tabla 3.10. Parámetros de configuración.










Canal Físico	Código de Color
PDCCH	
PBCH	
PSS	
SSS	
PDSCH	
Reservado	
Señales de Referencia CSRS	
PCFICH	
PHICH	

Tabla 3.11. Código de colores para canales físicos.

A continuación la figura 3.24 muestra la malla de recursos obtenida con los parámetros de configuración descritos en las tabla 3.10. Esta configuración permite observar la distribución de los canales físicos de control, los canales físicos para la transmisión de información del usuario y permite determinar de forma práctica y precisa la distribución de los recursos en el sistema LTE.

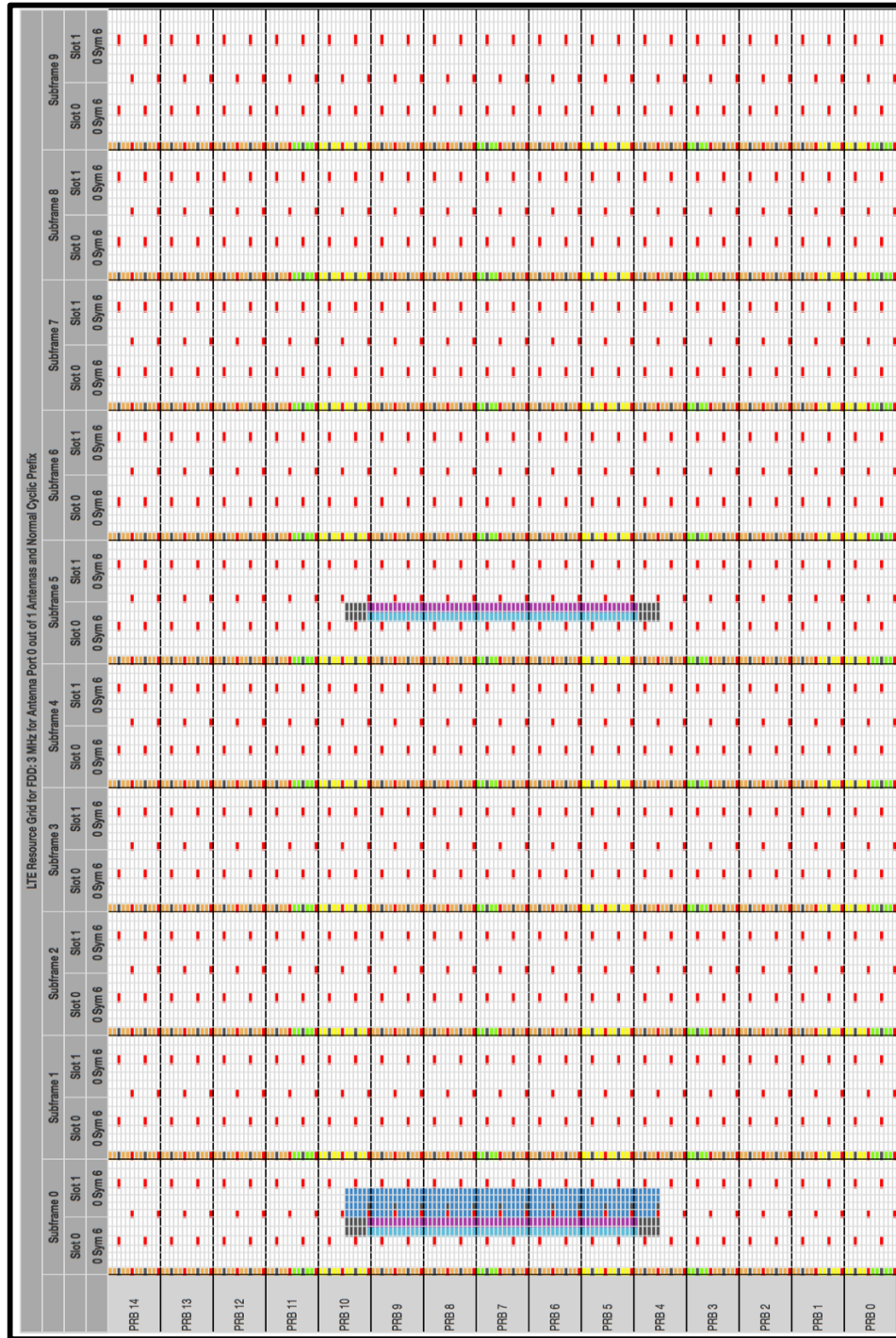


Figura 3.24. Malla de recursos en LTE para canal de 3MHz [30].

El estudio de los métodos, las tecnologías y de los principales parámetros que forman parte de la estructura de la capa física del sistema LTE, permitieron determinar las características del sistema en lo referente a su capacidad de asignar recursos de manera dinámica a los terminal de usuario y de adaptarse a las características cambiantes del enlace radioeléctrico.

Capítulo 4. Análisis y Modelado Estocástico de Datos

4.1. Introducción

Cuando se analiza el funcionamiento de LTE, uno de los aspectos que más llama la atención, es el comportamiento del sistema en entornos de alta movilidad, en donde las condiciones de propagación de la señal cambian abruptamente, generando que el sistema deba adaptarse a estas condiciones, buscando mantener niveles de calidad de servicio aceptables para el terminal de usuario.

La importancia del análisis del comportamiento de LTE en condiciones de alta movilidad se debe en gran parte al surgimiento de nuevas tecnologías de comunicación como los denominados Sistemas de Transporte Inteligente (ITS) [5] cuyo principal objetivo es el ofrecer servicios de seguridad, información y aplicaciones multimedia a sistemas de transporte terrestre como vehículos, trenes y otros a través de la implementación de sistemas de comunicación y redes vehiculares.

Los ITS establecen dos tipos de arquitectura de comunicación principales, la primera plantea la comunicación directa entre vehículos (V2V) a través del despliegue de redes Ad-Hoc implementando el protocolo 802.11p [31], mientras la segunda arquitectura plantea el uso combinado de los sistemas de comunicación entre vehículos e infraestructura de comunicaciones (V2I), en este contexto, la tecnología LTE aparece como la principal alternativa al ser el sistema de comunicaciones celular con mayor penetración y despliegue en la actualidad.

Este capítulo presenta un análisis del sistema LTE en entornos de alta movilidad a través del estudio de los parámetros más relevantes involucrados en el funcionamiento del sistema en este tipo de entornos. Para esto, se plantea el análisis y modelado estocástico de los principales parámetros recolectados por los terminales de usuario de un operador LTE, en una carretera de alta velocidad a través del uso de una aplicación de “crowdsourcing”.

4.2. Recolección de Información

Debido a la complejidad técnica que representa la realización de mediciones en entornos de alta movilidad, además del equipamiento especializado requerido para el análisis de las señales utilizadas por el sistema LTE, se planteó el uso de aplicaciones desarrolladas para terminales móviles que realizan la recolección, almacenamiento y análisis de esta información de manera más práctica y eficiente.

Entre las aplicaciones desarrolladas con este objetivo, una de las de mayor relevancia es la aplicación de “crowdsourcing” denominada Open Signal [3]. Open Signal es una de las plataformas de recolección de información sobre el rendimiento de operadores celulares de mayor penetración en el mundo, desplegada en más de 200 países y con más de 15 millones de descargas. Su funcionamiento se basa en la recolección de datos obtenidos por millones de usuarios comunes que tienen la aplicación descargada en sus terminales y que permiten medir la confiabilidad y disponibilidad de los diferentes operadores celulares.

El continuo flujo de información recolectado en diferentes entornos y condiciones de propagación por la plataforma de Open Signal, permiten determinar tanto la calidad de servicio experimentado por los terminales de usuario así como como la manera en que la señal de los sistemas de comunicación celular cambia sus propiedades en función de determinados periodos de tiempo y ubicaciones geográficas.

Para cumplir con los objetivos del análisis presentado en este trabajo, se obtuvo una base de datos de los principales parámetros recolectados por los terminales de usuario del sistema LTE en entornos de alta movilidad y que fueron facilitados por el equipo de desarrolladores de la plataforma Open Signal a través de convenios con con objetivos académicos no comerciales.

A continuación se presentan las características y propiedades de la información recolectada, que será utilizada a lo largo del desarrollo de este trabajo para el análisis y modelado del comportamiento del sistema LTE en entornos de alta movilidad.

4.2.1. Características de la información recolectada

Los datos facilitados por el equipo de desarrollo de Open Signal corresponden a la información recolectada por miles de terminales de usuario de un operador celular LTE durante un periodo de tiempo de 6 meses (Junio a Noviembre del 2015) en una autopista con una longitud aproximada de 311Km.

El total de tráfico en la autopista, analizado durante el periodo de tiempo indicado, está compuesto por un 78.2% de vehículos pequeños, 15% de vehículos livianos y 5.1% de vehículos pesados aproximadamente [32]. A continuación se puede observar en la figura 4.1 el mapa con la extensión y ubicación geográfica de la autopista “Motorway 1” ubicada en el Reino Unido, la cual fue seleccionada para el proceso de recolección de información.



Figura 4.1. Mapa de ubicación geográfica de la de autopista “Motorway 1” [33].

Cabe mencionar además que los datos recolectados corresponden a una sección con un radio de 100m tomados a partir el eje longitudinal de la autopista, esto con el objetivo de disminuir la probabilidad de que las muestras tomadas puedan pertenecer a terminales de usuario localizados fuera del área de interés del estudio, además este valor corresponde a la resolución máxima que puede ser garantizada por la plataforma de Open Signal. A continuación se presentan los parámetros que fueron filtrados de la base de datos proporcionada y que fueron tomados en cuenta para el análisis realizado.

4.2.2. Parámetros seleccionados para el análisis

Debido a que la información corresponde a las mediciones realizadas por los terminales de usuario del operador celular en el área de interés, las mediciones incluyen también a tecnologías de comunicación celular 2G, 3G y 4G. Por lo que para el análisis, solamente las mediciones correspondientes a redes celulares 4G fueron tomadas en cuenta. A continuación se presenta el conjunto de parámetros y sus características, que fueron extraídos de la base de datos original y que se consideraron para el análisis.

- **“Reading Timestamp”**: Instante de tiempo en el que fue realizada la medición por el terminal de usuario y registrada en la base de datos, con una precisión aproximada de 1 minuto.
- **“Network Name”**: Nombre comercial registrado por parte del operador celular en el sistema. Debido a que el objetivo de este trabajo es académico y no comercial, el nombre de la operador ha sido omitido.
- **“Cell Type”**: Tipo de celda celular correspondiente a las tecnologías de comunicación celular 2G, 3G y 4G.
- **“Sample Location”**: Localización de la muestra recolectada en el área de interés por el terminal de usuario del sistema LTE, representado a través del uso de coordenadas geográficas.
- **“Sample Precision”**: Radio de precisión con respecto a la ubicación de la muestra (Sample Location) capturada por el terminal de usuario, expresada en metros.
- **“RSRP”**: Campo correspondiente al parámetro Reference Signal Received Power (RSRP), encargado de medir el promedio lineal de potencia de las señales de referencia en el puerto de antena del terminal de usuario, expresado en dBm.
- **“RSRQ”**: Campo correspondiente al parámetro Reference Signal Received Quality (RSRQ), encargado de medir la calidad promedio de las señales de referencia en el puerto de antena del terminal de usuario, expresado en dB.
- **“RS SNR”**: Campo correspondiente al valor de la relación señal a ruido (SNR) de las señales de referencia (CSRS), medida en el puerto de antena del terminal de usuario, expresado en dB.

4.3. Filtrado de la Información

Una vez que se determinaron y extrajeron todos los parámetros a ser utilizados para el análisis, se procedió a realizar el proceso de filtrado de los valores correspondientes a la muestra obtenida, esto con el objetivo de disminuir la probabilidad de error al momento de utilizar estos valores para la obtención de los resultados a ser presentados en este trabajo. A continuación se muestran los pasos implementados durante el proceso de filtrado.

4.3.1. Pasos para el proceso de filtrado

1. Para el análisis se decidió utilizar las muestras correspondientes a un solo operador celular. El operador celular con mayor cobertura, índice de penetración y número de muestras reportadas correspondientes a la tecnología LTE fue seleccionado.
2. Las muestras con valores correspondientes al parámetro “Sample Precision” que presentaran inconsistencias fueron descartados. El promedio final de este parámetro en la muestra utilizada es de aproximadamente 200m.
3. Se descartaron las muestras que no presentaran valores de medición para todos los parámetros RSRP, RSRQ y RS SNR. Esto debido a que el análisis se realizara en base a conjuntos de muestras de tamaño uniforme para estos 3 parámetros.
4. Se descartaron los valores correspondientes a los parámetros RSRP y RSRQ que se encontraran fuera de los límites establecidos por el estándar LTE y que fueron definidos en la sección 3.9.
5. Finalmente se descartaron los valores correspondientes al parámetro RS SNR que presentaron inconsistencias, especialmente valores extremadamente bajos o altos que se encontraran fuera de niveles lógicos de potencia.

Cabe mencionar que los valores corruptos para los parámetros RSRP, RSRQ y RS SNR que fueron descartados se deben probablemente a limitaciones de los terminales de usuario en términos de la capacidad de procesamiento de sus módulos de radio así como incompatibilidad de ciertos modelos de terminales con la aplicación utilizada para la recolección de las muestras.

4.3.2. Proceso de organización de muestras

Ya que el conjunto de mediciones recolectado, corresponde a un periodo de tiempo de 6 meses transcurridos entre los meses de Junio y Noviembre del 2015, el análisis se realizó en base a las muestras correspondientes a todo este periodo de tiempo, debido a que un estudio previo de las muestras de cada uno de los meses, mostro que las mismas presentaban características estadísticas similares entre sí, por lo que el uso de todas las muestras para el análisis, permitirá caracterizar de manera correcta su comportamiento en general.

Sin embargo, debido a que el periodo de tiempo en el que las muestras fueron capturadas es relativamente extenso, se encontraron muestras cuyas coordenadas geográficas coincidían con otras capturadas en diferentes periodos de tiempo, lo que significa que en algunos casos existía más de un valor medido para muestras ubicadas en la misma localización geográfica.

Con el objetivo de obtener homogeneidad en los valores de las muestras utilizadas, se procedió a realizar el cálculo del promedio de los valores correspondientes a los parámetros RSRP, RSRQ y RS SNR para muestras cuyas coordenadas geográficas fuesen las mismas. El resultado de este procedimiento permitió obtener una un conjunto de valores con un único valor de medición para cada coordenada geográfica dentro del área de interés analizada.

Una vez obtenidas las muestras posterior a los procesos descritos anteriormente, se procedió a la organización de las muestras en función de las coordenadas geográficas correspondientes a cada muestra. Para esto se utilizó como referencia el punto de origen oficial para la autopista analizada y se organizaron las muestras en función de la distancia a este punto de referencia. El resultado de este proceso permitió ordenar y distribuir las muestras de manera uniforme en el área de interés tomando como referencia la dirección sur a norte.

Finalmente, el conjunto de valores obtenido, presenta características homogéneas tanto cuantitativa como geográficamente. El número de muestras a utilizar en el análisis es de aproximadamente 16000, las cuales corresponden a un total 51 muestras por kilómetro o 1 muestra cada 200 metros. A continuación la figura 4.2 muestra la ubicación geográfica final de las muestras obtenidas, distribuidas a lo largo de la autopista “Motorway 1”.



Figura 4.2. Distribución geográfica final de las muestras obtenidas [34].

4.4. Análisis Estocástico de Datos

Una vez que las muestras fueron correctamente filtradas y organizadas, se procedió al análisis de los datos obtenidos para los parámetros RSRP, RSRQ y RS SNR. Este análisis permitirá determinar las principales características de las señales medidas por los terminales de usuario del sistema LTE en entornos de alta movilidad.

A continuación se presenta el análisis estocástico de los valores obtenidos para las muestras de los parámetros mencionados, este análisis permitirá determinar las principales propiedades estadísticas de la señal con el objetivo de caracterizar su comportamiento.

4.4.1. Reference Signal Received Power (RSRP)

Como se mencionó en secciones anteriores, el parámetro RSRP se define como el promedio lineal de potencia expresado en dBm de los Resource Elements que transportan Cell Specific Reference Signals dentro de un ancho de banda determinado y es medido en el puerto de antena número 0 del terminal de usuario.

Los valores de RSRP reportados por el terminal de usuario se encuentran en un rango entre -140dBm y -44dBm con una resolución de 1dBm. El rango completo de valores puede ser observado en la tabla 3.6. A continuación, en la figura 4.3 se puede observar la distribución de los valores de RSRP para las muestras recolectadas en la autopista mencionada.

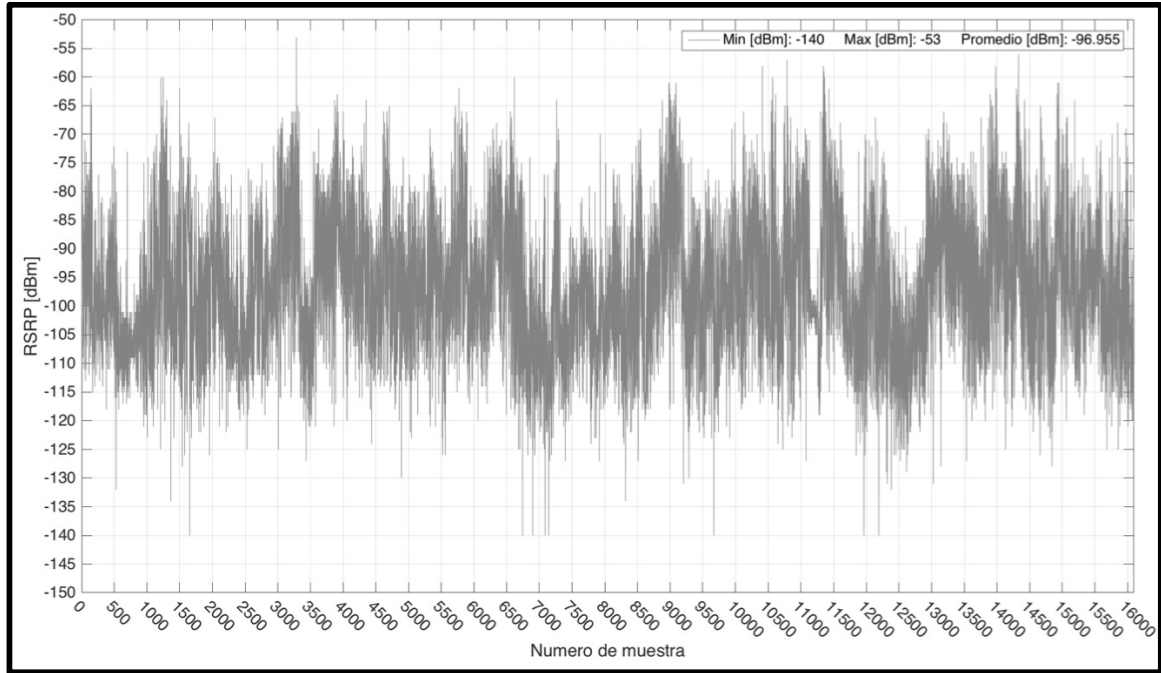


Figura 4.3. Distribución de los valores del parámetro RSRP.

Como puede ser observado en la figura 4.3, el rango en el que se encuentran los valores reportados de RSRP, corresponde efectivamente al rango definido por el estándar LTE para este parámetro, siendo el valor reportado mínimo de -140dBm, el máximo de -53dBm y el valor promedio aproximadamente -97dBm.

En la figura también se puede observar cambios abruptos en los niveles de RSRP, los cuales pueden ser atribuidos a la existencia de efectos multi trayectoria provocados por elementos que provocan interferencia y dispersión de la señal transmitida en el entorno en el que la señal fue medida. Sin embargo la tendencia del nivel de potencia de la señal muestra un patrón relativamente estable con un valor promedio ubicado en aproximadamente la mitad del rango definido por el estándar para el parámetro RSRP.

Adicionalmente, la figura 4.4 presenta un análisis estadístico de los valores recolectados para este parámetro. En la figura se puede observar la función de densidad de probabilidad empírica, en donde se presentan el valor promedio, el cual lógicamente coincide con el valor mostrado en la figura anterior, la desviación estándar y la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los valores reportados de RSRP.

La figura además, permite analizar cómo se encuentran distribuidos los valores de RSRP con respecto a su valor promedio, la distribución muestra claramente que los valores se encuentran concentrados en su mayoría con respecto a la media, con una desviación estándar de aproximadamente 11.5dBm. Mientras que la probabilidad de ocurrencia de valores ubicados en los extremos de la función es prácticamente nula.

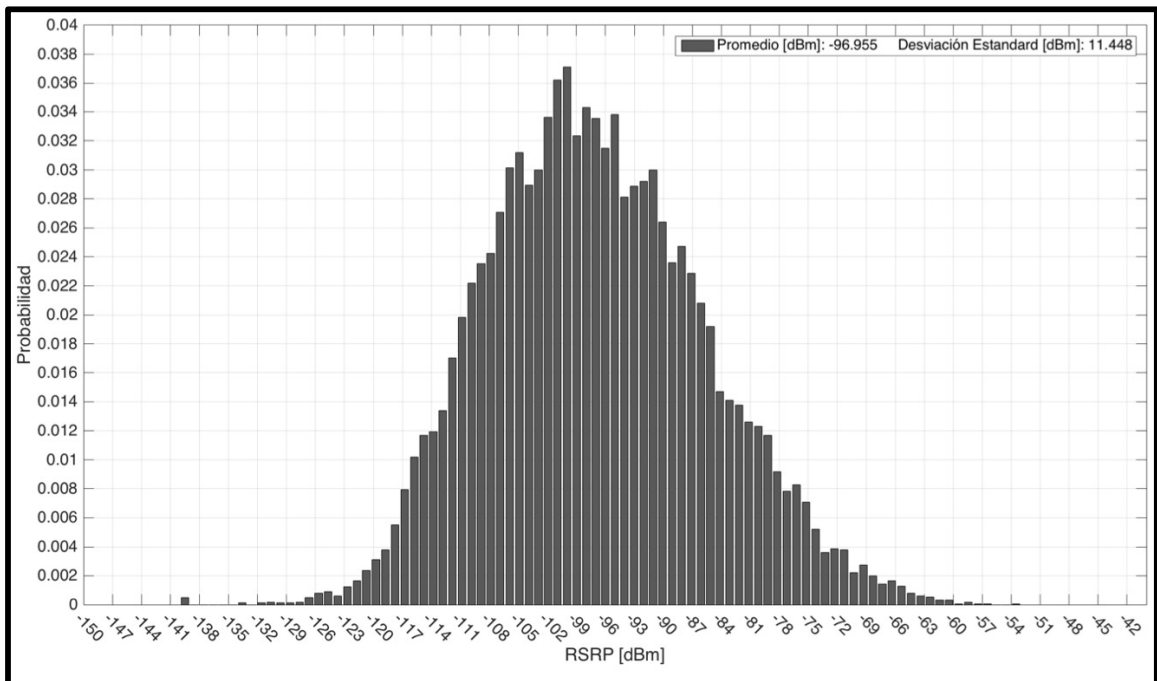


Figura 4.4. Función de Densidad de Probabilidad empírica para los valores del parámetro RSRP.

4.4.2. Reference Signal Received Quality (RSRQ)

De manera similar al proceso realizado anteriormente, la figura 4.5 muestra los valores recolectados para el parámetro RSRQ, utilizado por LTE como una medida de calidad de la señal recibida por el terminal de usuario. Se puede observar que los valores obtenidos se encuentran dentro del rango definido por el estándar en la tabla 3.7, con valores mínimos de -19dB, máximos de -3dB y un valor promedio de aproximadamente -8.6dB.

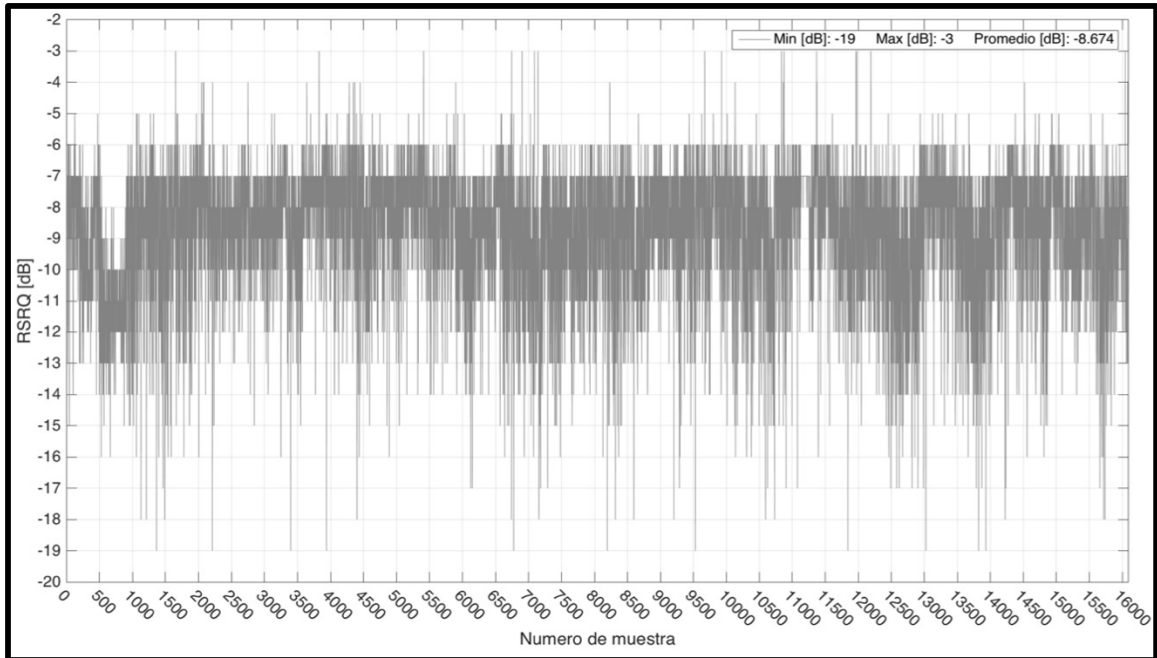


Figura 4.5. Distribución de los valores del parámetro RSRQ.

A continuación, la figura 4.6 muestra la función de densidad de probabilidad empírica para el parámetro RSRQ, la cual muestra una tendencia claramente creciente a obtener valores cercanos a la media calculada y una probabilidad muy baja de ocurrencia especialmente para los valores ubicados en los extremos superior e inferior de la distribución.

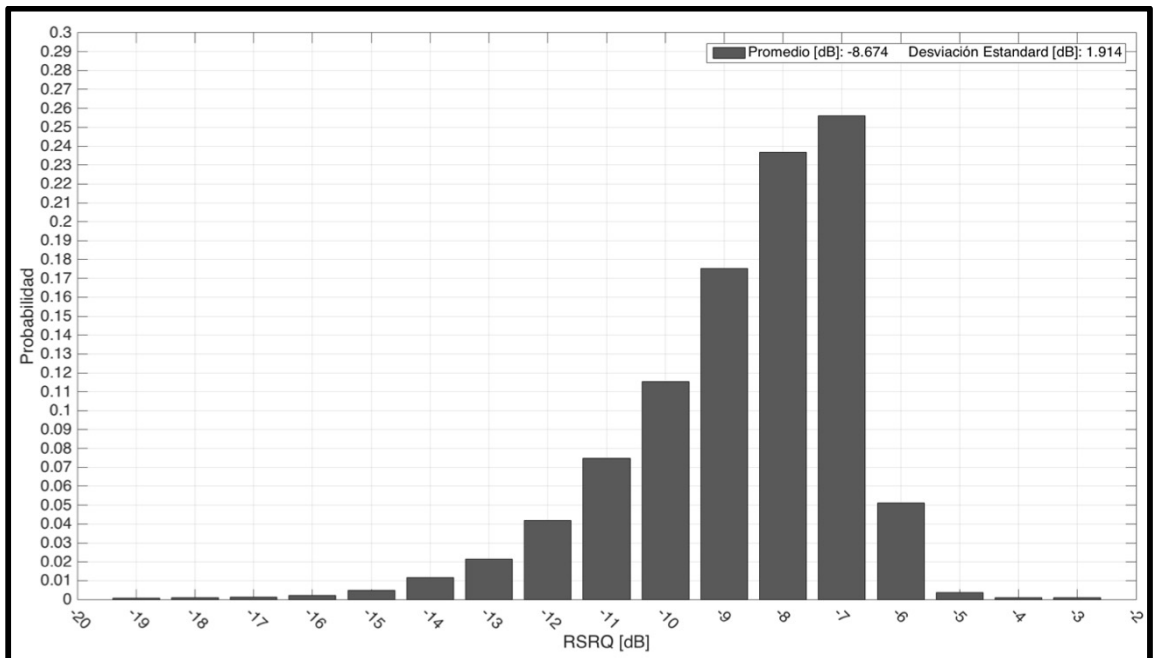


Figura 4.6. Función de Densidad de Probabilidad empírica para los valores del parámetro RSRQ.

4.4.3. Reference Signal Signal to Noise Ratio (RS SNR)

El parámetro Reference Signal Signal to Noise Ratio o RS SNR, hace referencia a la relación que existe entre la potencia promedio de las señales de referencia Cell Specific Reference Signals (CSRS) que fueron definidas en secciones anteriores y el ruido presente en el canal de comunicaciones, este parámetro se encuentra expresado en dB.

Se debe mencionar que a pesar de que este parámetro no se encuentra definido en el estándar LTE, puede ser utilizado para la caracterización del canal de comunicaciones, ya que permite cuantificar la calidad de las señales de referencia CSRS recibidas por el terminal de usuario con respecto a la cantidad de ruido presente al momento de realizar la medición.

La relación señal a ruido de las señales de referencia es proporcional a la relación existente para todo el canal de comunicaciones, independientemente de la configuración del canal, ya que tanto la potencia de la señal como la potencia del ruido escala de manera proporcional a la ancho de banda utilizado. La figura 4.7 muestra la distribución del parámetro RS SNR para las muestras recolectadas. El rango de valores para este parámetro no se encuentra definidos por el estándar, sin embargo análisis presentados en [35, 36] y muestran que los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos normales de operación de LTE.

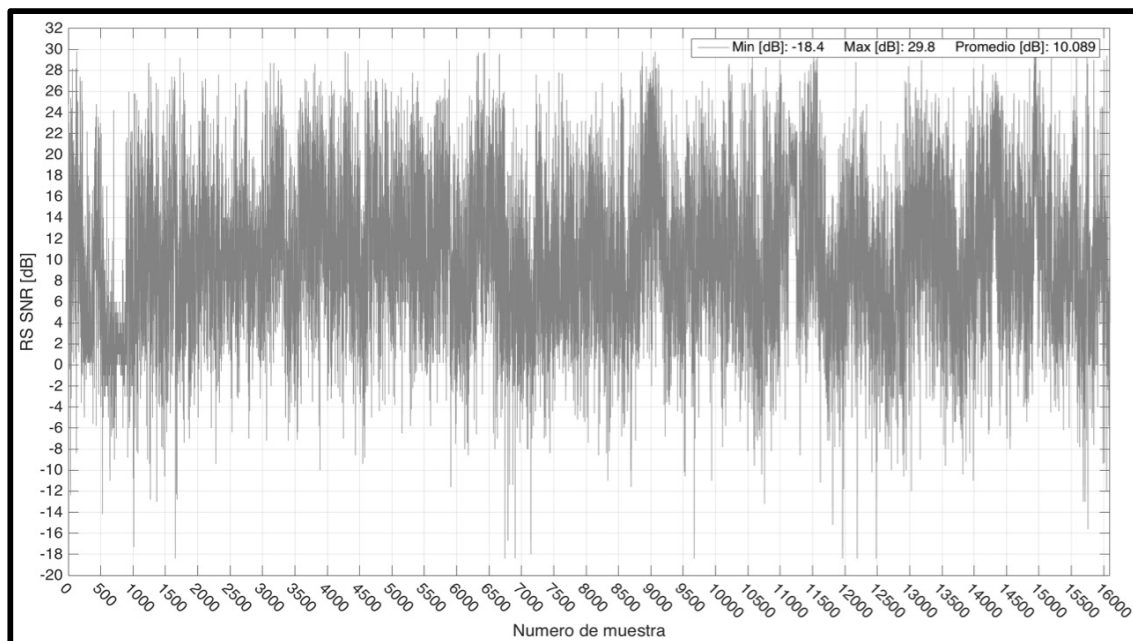


Figura 4.7. Distribución de los valores del parámetro RS SNR.

Adicionalmente la figura 4.8 muestra la función de densidad de probabilidad empírica para la relación señal a ruido de las señales de referencia. Se puede observar en la figura que la probabilidad de obtener valores cercanos a la media de 10dB con una desviación estándar de 7.1dB es mucho mayor comparada con la probabilidad de los valores ubicados en los extremos de la distribución.

Cabe mencionar que, debido a que las características del parámetro RS SNR en comparación con el RSRP y RSRQ permiten caracterizar de mejor manera el canal de comunicación, este será utilizado como base para el análisis del dimensionamiento de la capacidad del sistema LTE que será presentado en secciones posteriores de este trabajo.

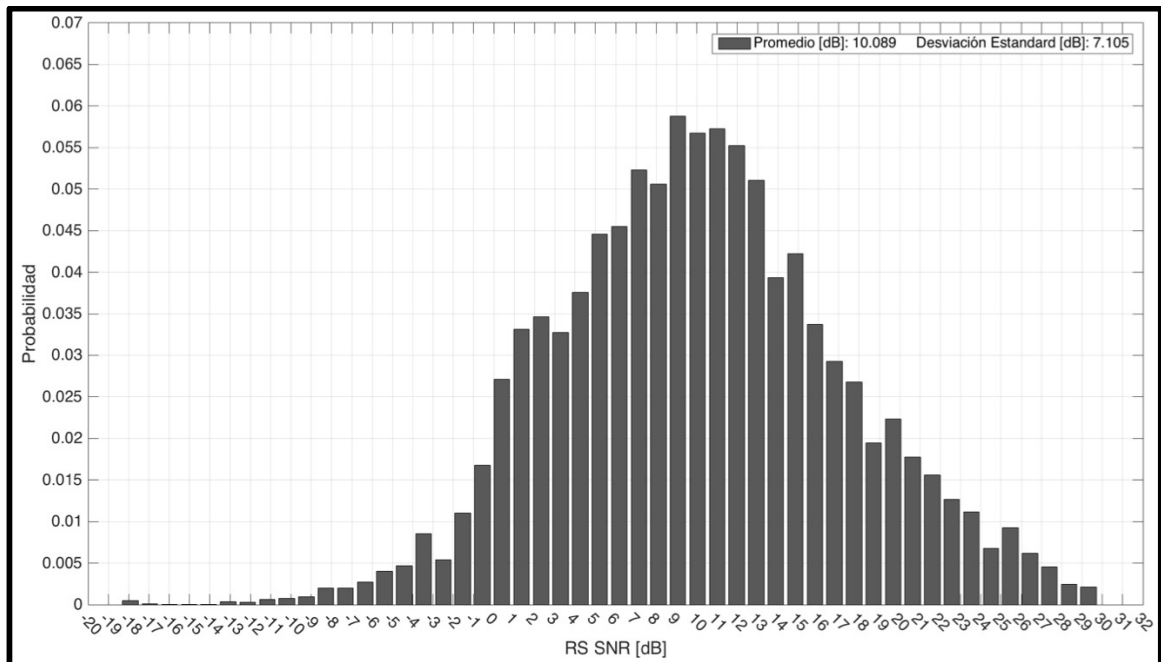


Figura 4.8. Función de Densidad de Probabilidad empírica para los valores del parámetro RS SNR.

4.4.4. Reference Signal Strength Indicator (RSSI)

Como fue definido anteriormente, el parámetro Received Signal Strength Indicator (RSSI) se define como el promedio lineal de potencia medido únicamente en los símbolos OFDM que transportan Cell Specific Reference Signals para el puerto de antena 0, es medido sobre el ancho de banda asignado al UE y contiene los valores de potencia de la señal transmitida por la celda en la que se encuentra el UE, el valor de la interferencia producido por las celdas adyacentes y el ruido térmico.

La relación mostrada en la ecuación 4.1 permite calcular el valor correspondiente al RSSI, sin embargo, como se puede observar, se requiere conocimiento del número de Resource Blocks y por lo tanto el ancho de banda asignado al terminal de usuario al momento en el que la medición de los parámetros RSRP y RSRQ fue realizada.

$$RSSI = NRB \times \frac{RSRP}{RSRQ} \quad (4.1)$$

Debido a que las muestras recolectadas no presentan información relacionada al ancho de banda asignado al terminal de usuario, no es posible determinar con exactitud el valor de RSSI. Sin embargo en el análisis de dimensionamiento a ser presentado, el conocimiento de este valor no es imprescindible y por lo tanto su cálculo no es presentado.

No obstante, como se definió en secciones anteriores, el número de Resource Blocks que pueden ser asignados a un terminal de usuario van desde 1 hasta 100, dependiendo del ancho de banda utilizado por el sistema, por lo que la relación propuesta puede ser utilizada para el cálculo teórico de este valor siempre que se establezca un ancho de banda de manera arbitraria.

4.5. Modelos Estocásticos Propuestos

Una vez que se ha analizado estadísticamente de manera preliminar a los parámetros obtenidos, correspondientes a las muestras recolectadas y que fueron descritos anteriormente, es importante desarrollar un análisis más detallado, especialmente de los parámetros más utilizados por LTE para la realización de los diferentes procedimientos ejecutados por el sistema.

El análisis a ser presentado tiene como objetivo caracterizar de manera estadística el parámetro Reference Signal Received Power (RSRP), el cual es utilizado por el sistema LTE principalmente para el soporte en la realización de procedimientos de movilidad como selección / reelección de celda y especialmente procedimientos de handover.

La selección del RSRP como parámetro a caracterizar se sustenta en el hecho de que su resolución, en comparación con la presentada por el parámetro RSRQ, es mucho mayor, lo que permite cuantificar de manera más precisa la calidad de la señal recibida por el terminal de usuario y posibilita al sistema LTE realizar procedimientos de movilidad de manera más apropiada.

Para la caracterización del parámetro RSRP, se plantea el uso de modelos estocásticos que permitan simular el comportamiento de la señal de manera estadística a través del uso de funciones de densidad de probabilidad con características lo más similares posibles a la distribución empírica obtenida para este parámetro.

El modelo obtenido es de gran interés ya que permitirá analizar el comportamiento dinámico de la señal de manera relativamente sencilla a través del uso de funciones probabilísticas conocidas, las cuales son obtenidas en base a mediciones realizadas en entornos en donde obtener información relacionada a la calidad de la señal resulta complejo.

4.5.1. Metodología de análisis

La primera parte del proceso de modelado estadístico de la señal corresponde a la obtención de la función de densidad de probabilidad empírica, a través del uso del histograma de la señal y la frecuencia de ocurrencia de cada uno de los valores obtenidos. Este proceso fue ya realizado en secciones anteriores de este trabajo y la PDF empírica para el parámetro RSRP puede ser observada en la figura 4.4.

Una vez obtenida la PDF empírica, el siguiente paso del proceso es determinar la función o funciones de densidad de probabilidad estándar cuyas propiedades estadísticas se asemejen a las de la función empírica obtenida. La obtención de una PDF estándar cuyas propiedades sean extensamente conocidas permitirá que esta función sea implementada en modelos de simulación orientados al modelado y análisis del sistema LTE en entornos de alta movilidad, en donde los Sistemas de Transporte Inteligente serían potencialmente desplegados. A continuación se presentan los criterios de selección para estas funciones de densidad de probabilidad estándar.

4.5.2. Criterios de selección de modelos estadísticos

El proceso de comparación entre diferentes modelos estadísticos permite determinar el más apropiado dentro de un conjunto finito de modelos, para esto, se deben utilizar criterios que permitan obtener un balance entre que tan bien se ajustan estos modelos a las propiedades estadísticas de un conjunto de muestras y la complejidad del modelo a utilizar [37].

Con el objetivo de determinar el modelo que caracterice de mejor manera una muestra de datos determinada, un conjunto de métodos son ampliamente descritos en la literatura. Entre los más utilizados para este propósito, se encuentran los métodos basados en la medición de los criterios de información [37].

Básicamente, las mediciones de los criterios de información, cuantifican la probabilidad de que un modelo se ajuste correctamente a una muestra de datos. Este tipo de métodos además, incluye un factor de penalización por el número de parámetros requerido por el modelo, considerando un mayor número de parámetros como una medida de mayor complejidad.

Entre los métodos de criterio de información más utilizados, se encuentran los métodos “Bayesian Information Criterion” o BIC y “Akaike Information Criterion” o AIC. A continuación se presentan las particularidades en la implementación de cada método, así como el criterio de selección utilizado por cada uno y su aplicabilidad en función del tipo de análisis a realizar.

4.5.3. Bayesian Information Criterion

En análisis estadístico, el método denominado Bayesian Information Criterion (BIC) es uno de los más utilizados para la selección del conjunto de modelos que pueden ser considerados como idóneos para caracterizar una muestra de datos [38]. La ventaja en el uso de este método se debe en su baja complejidad computacional así como su aplicabilidad a un gran número de campos de investigación.

El método BIC fue introducido por Shwartz [39] y permite determinar el modelo más apropiado, a través de un criterio de selección, el cual le asigna una calificación basado en un criterio estadístico. El modelo seleccionado bajo los criterios de BIC corresponde al modelo cuyas características representan con mayor probabilidad el conjunto de muestras analizado.

A continuación, la ecuación 4.2 es aplicada a todos los modelos estadísticos a ser analizados. Se debe considerar que estos están estructurados de manera distinta, basados en variables con diferentes características y presentan valores diferentes de medias y varianzas e incluso diferentes respuestas con respecto a la misma variable de entrada.

El modelo estadístico seleccionado a través del método BIC, está definido por el resultado numérico más bajo de la ecuación 4.2. En la ecuación, el término $L(\hat{\theta})$ representa la probabilidad máxima de que un modelo con una función de densidad de probabilidad determinada y con un número de parámetros específicos " k " presente las propiedades estadísticas definidas para un número finito de muestras de dimensión " n ".

$$BIC = -2 \ln[L(\hat{\theta})] + k \ln[n] \quad (4.2)$$

4.5.4. Akaike Information Criterion

Otro de los métodos más conocidos y utilizados en análisis estadístico para la selección de modelos, se denomina Akaike Information Criterion (AIC). Este método al igual que el método BIC se basa en la medición de criterios de información para determinar la idoneidad con la que un modelo estadístico estándar se ajusta a las características estadísticas de una muestra [36].

Este método fue introducido por Akaike [40] y aplica una versión ampliada del paradigma de máxima probabilidad al modelado estadístico para estimar los parámetros desconocidos de un modelo con una estructura conocida, cuya dimensión no está especificada y debe ser determinada en función de la muestra analizada.

El método de selección utilizado por AIC, determina la probabilidad de que un modelo, que forma parte de un conjunto estándar de modelos estadísticos, se ajuste a una muestra. La probabilidad es cuantificada a través de la medida de “disparidad” que existe entre el modelo generador real de la muestra y el modelo estadístico aproximado.

La medida de disparidad utilizada por AIC, es obtenida a través de la información proporcionada por el método Kullback-Leiber [36], el cual estima el valor esperado de la disparidad, también denominada “entropía relativa”, existente entre la función de densidad de probabilidad del modelo generador real y el modelo aproximado.

De manera similar al método BIC, el modelo seleccionado a través del método AIC está definido por el resultado numérico más bajo de la ecuación 4.3. En esta ecuación, el término $L(\hat{\theta})$ representa la probabilidad máxima de que un modelo con una función de densidad de probabilidad específica con un número de parámetros específicos " k " presente las propiedades de una muestra determinada.

$$AIC = -2 \ln[L(\hat{\theta})] + 2k \quad (4.3)$$

A pesar de que BIC y AIC tienen características similares, ambos modelos fueron obtenidos bajo asunciones diferentes. AIC se derivó bajo la suposición de que el modelo real requiere un número infinito de parámetros y busca minimizar la pérdida de información a través de la aproximación con modelos estándar que cuentan con un número finito de parámetros.

El método BIC, por su parte se derivó como una aproximación estadística a muestras de gran tamaño, a través del uso de criterios de Bayes y asume que entre los modelos estándar analizados se encuentra un modelo que caracteriza de manera correcta a la muestra.

La diferencia en la estructura de ambos métodos lleva a que tengan propiedades diferentes, por lo que generalmente BIC es más consistente cuando se analiza un conjunto definido de modelos estadísticos, mientras AIC favorece la selección de modelos más complejos que no necesariamente forman parte de los modelos estándar utilizados en análisis estadístico.

4.6. Resultados Obtenidos

A pesar de las diferencias que existen entre los métodos descritos, ambos son ampliamente utilizados en el análisis de muestras con características similares a las que se presenta en este trabajo. A continuación se presentan los resultados del análisis realizado, utilizando los métodos BIC y AIC para determinar el modelo estadístico que caracteriza de mejor manera la muestra de valores para el parámetro Reference Signal Received Power (RSRP).

En la figura 4.9, se puede observar la PDF empírica para los valores de RSRP (Igual a la obtenida en la figura 4.4) así como los nombres de los cuatro modelos estándar con características estadísticas aproximadas a las de la muestra. Los modelos se encuentran ordenados en función del análisis realizado a través del método de selección BIC.

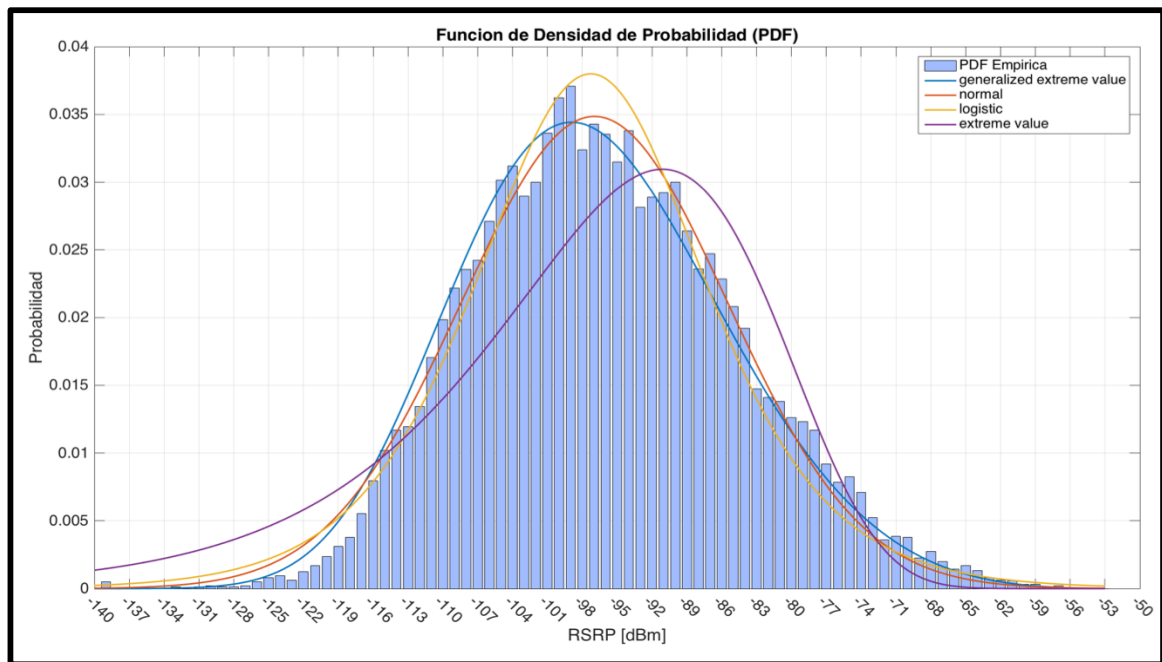


Figura 4.9. PDF empírica y modelos seleccionados a través de BIC para los valores de RSRP.

A continuación, los resultados obtenidos por el método BIC son mostrados en la tabla 4.1. En esta tabla se puede observar que los modelos seleccionados se encuentran ordenados en función de los valores obtenidos por el método BIC, en donde el valor más bajo representa al modelo estadístico que se ajusta de mejor manera a las características de la muestra.

Función de Densidad de Probabilidad	Resultado de método BIC
Generalized Extreme Value	123970.170
Normal	124175.408
Logistic	124577.860
Extreme Value	127737.574

Tabla 4.1. Modelos seleccionados a través del método BIC.

De manera complementaria, se realizó la comparación entre las funciones de distribución acumulada (CDF) empírica y las CDF correspondientes a los modelos estadísticos obtenidos.

En la parte superior de la figura 4.10, se pueden observar las gráficas respectivas a las CDF mencionadas, mientras que en la parte inferior se muestra el error o diferencia existente entre los valores de la CDF empírica y los valores de las CDF correspondientes a cada modelo. Los resultados obtenidos a través de esta comparación coinciden con los obtenidos anteriormente y son utilizados para corroborar la correcta aplicación del método BIC.

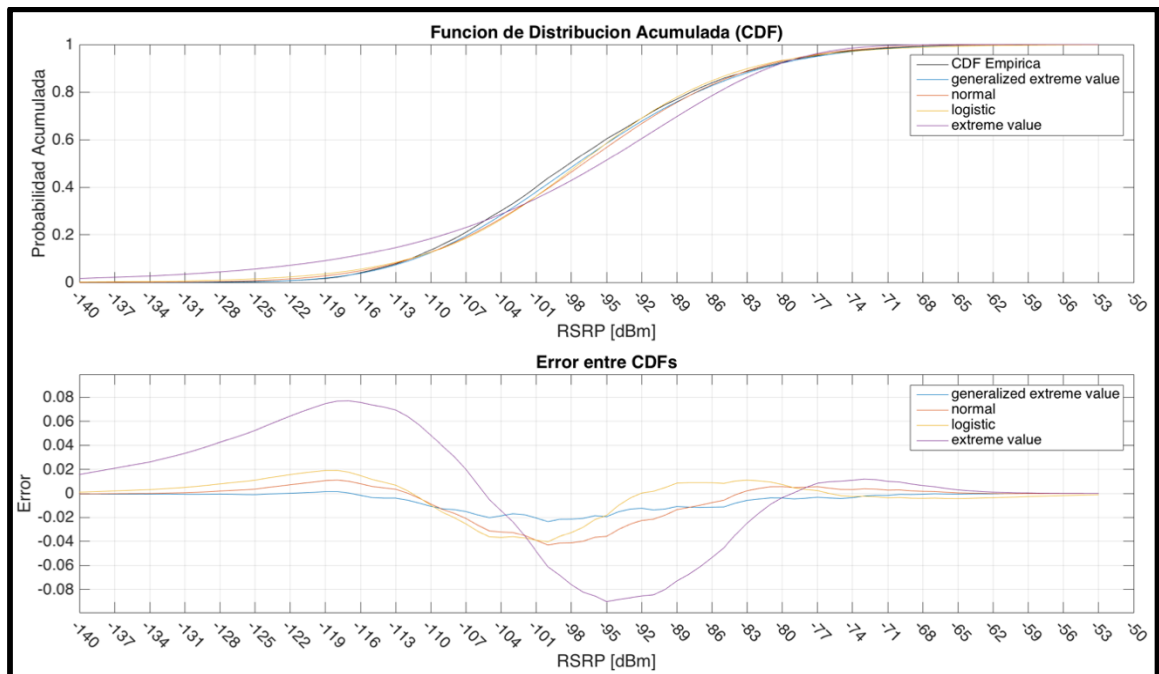


Figura 4.10. CDF empírica, CDF de los modelos obtenidos y error estimado entre CDF.

De la misma manera, a través del método AIC, se clasificaron los modelos estadísticos de acuerdo a que tan bien se ajustan a la muestra. En la tabla 4.2 se pueden observar que los modelos obtenidos por AIC son los mismos que los obtenidos previamente por BIC con resultados distintitos, debido a diferencia en la estructura de cada uno de los métodos.

Función de Densidad de Probabilidad	Resultado de método AIC
Generalized Extreme Value	123947.111
Normal	124160.035
Logistic	124562.488
Extreme Value	127722.202

Tabla 4.2. PDF seleccionadas a través del método AIC.

Finalmente, una vez que los modelos han sido seleccionados por ambos métodos, se deben obtener las ecuaciones y parámetros correspondientes a cada modelo, que caracteriza estadísticamente la muestra analizada. A continuación la tabla 4.3 muestra las distribuciones que definen los modelos obtenidos así como sus ecuaciones, el nombre de los parámetros que las componen y los valores correspondientes a cada parámetro, para los métodos BIC y AIC.

Función	Ecuación	Parámetros	Valores BIC	Valores AIC
Generalized Extreme Value	$y = f(x k, \mu, \sigma) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \exp\left(-\left(1 + k \frac{(x - \mu)}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}\right) \left(1 + k \frac{(x - \mu)}{\sigma}\right)^{-1 - \frac{1}{k}}$ <p style="text-align: center;">Para: $1 + k \frac{(x - \mu)}{\sigma} > 0$</p>	k μ σ	$k = -0.206$ $\mu = -101.38$ $\sigma = 10.935$	$k = -0.206$ $\mu = -101.38$ $\sigma = 10.935$
Normal	$y = f(x \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	μ σ	$\mu = -96.955$ $\sigma = 11.448$	$\mu = -96.955$ $\sigma = 11.448$
Logistic	$y = f(x \mu, \sigma) = \frac{\exp\left\{\frac{x - \mu}{\sigma}\right\}}{\sigma \left(1 + \exp\left\{\frac{x - \mu}{\sigma}\right\}\right)^2}$ <p style="text-align: center;">Para: $-\infty < x < \infty$</p>	μ σ	$\mu = -97.272$ $\sigma = 6.580$	$\mu = -97.272$ $\sigma = 6.580$
Extreme Value	$y = f(x \mu, \sigma) = \sigma^{-1} \exp\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) \exp\left(-\exp\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right)$	μ σ	$\mu = -91.107$ $\sigma = 11.886$	$\mu = -91.107$ $\sigma = 11.886$

Tabla 4.3. Funciones, ecuaciones, parámetros y valores obtenidos por los métodos BIC y AIC.

El análisis de los parámetros de medición, utilizados por el sistema LTE para la ejecución de procedimientos de movilidad y estimación de la calidad del canal de comunicación, permitió caracterizar estos parámetros a través del uso de modelos estocásticos conocidos, con el objetivo de obtener funciones de probabilidad relativamente sencillas, que permitan modelar el sistema LTE cuando este se encuentra desplegado en escenarios de alta movilidad.

Capítulo 5. Dimensionamiento de la Capacidad del Sistema

5.1. Introducción

Uno de los aspectos más importantes, relacionado al análisis del funcionamiento de un sistema de comunicación, tiene que ver con la tasa de transmisión máxima que el mismo puede alcanzar. La tasa de transmisión máxima hace referencia a la máxima cantidad de información que puede ser transmitida, especialmente la información de usuario, que en la literatura se conoce como “payload” o carga útil.

La capacidad de transmisión de un sistema, depende de diferentes factores, como la cantidad de recursos disponibles, la configuración del sistema, las condiciones de propagación en el canal de radio, el número de usuarios que buscan tener acceso a los recursos de manera simultánea y las capacidades del terminal de usuario entre otras.

Una de las principales características del sistema LTE, hace referencia justamente a las altas tasas de transmisión que pueden ser alcanzadas. De manera teórica, las tasas de transmisión máximas se encuentran en el orden de los 100Mbps para el enlace descendente y 50Mbps para el enlace ascendente, estos valores sin embargo son aproximaciones realizadas en condiciones óptimas, en las que no se considera la sobrecarga generada por la información de control y señalización, la cual reduce la capacidad del sistema aproximadamente un 25%.

En este capítulo se presenta el dimensionamiento de la capacidad de transmisión del enlace descendente de LTE en modo Single Input Single Output (SISO), en entornos en donde el canal de comunicación se encuentra sujeto a condiciones adversas de propagación como consecuencia de la alta movilidad de los terminales de usuario. El objetivo de este análisis es determinar la capacidad real de transmisión de la tecnología LTE en entornos de alta movilidad, la cual permitirá analizar la factibilidad de su implementación como sistema de comunicación para el despliegue de los Sistemas de Transporte Inteligente [5].

5.2. Principios de Adaptación Dinámica del Enlace en LTE

En el capítulo anterior se presentaron los parámetros más importantes reportados por el terminal de usuario que tienen el objetivo de apoyar al sistema LTE en la realización de procesos de movilidad como selección / relección de celda y procedimientos de handover, así como en la administración de los recursos en función de la estimación de la calidad del canal de comunicación.

Entre estos parámetros, se encuentran el RSRP, RSRQ y RS SNR, todos ellos utilizados para caracterizar el canal de comunicación a través de mediciones realizadas a las señales de referencia Cell Specific Reference Signals [23]. Por un lado, los parámetros RSRP y RSRQ se utilizan para la ejecución de procesos de movilidad, mientras que la relación señal a ruido de las señales de referencia o RS SNR es utilizada para estimación de la calidad del canal.

Una de las cualidades más importantes del sistema LTE es su capacidad de adaptarse dinámicamente a las características del enlace en función de la calidad de canal experimentada por el usuario. Esto le permite al sistema asignar recursos de manera dinámica con el objetivo de maximizar la eficiencia del sistema, especialmente en situaciones en las que el canal de comunicación se encuentra sujeto a condiciones adversas de propagación.

Esta capacidad de adaptación del sistema LTE, se sustenta principalmente en la implementación de mecanismos como esquemas de modulación adaptativa a nivel de la capa física y algoritmos de calendarización en la capa MAC. Estos mecanismos basan su funcionamiento en la retroalimentación de los terminales de usuario, los cuales constantemente envían información relativa a las características del canal de comunicación.

Para implementar estos mecanismos, LTE necesita convertir la información enviada por el terminal de usuario, para que pueda ser interpretada de manera adecuada por el sistema. A continuación se presentan los procedimientos a través de los cuales LTE interpreta la información recibida, la cual es utilizada para caracterizar el canal de comunicación y le permite al sistema realizar la asignación dinámica de los recursos disponibles.

5.2.1. Estimación de Canal

Como se describió en secciones anteriores, el sistema LTE requiere de información relacionada a la calidad de canal para poder tomar decisiones sobre la manera en que los recursos son asignados a los terminales de usuario. Para esto, el estándar LTE define principalmente el uso del parámetro Channel Quality Indicator (CQI), el cual permite cuantificar la calidad de canal experimentada desde el punto de vista del terminal.

El parámetro CQI cuantifica la calidad del canal en 15 niveles diferentes, el nivel 1 corresponde a la calidad más baja, el nivel 15 a la calidad más alta y el nivel 0 está relacionado al estado en el que el terminal de usuario se encuentra fuera de rango. Adicionalmente, cada uno de los niveles define una combinación específica entre el método de modulación y la tasa de codificación utilizada para la asignación de los recursos. La tabla 3.8 muestra con exactitud estos valores.

Uno de los aspectos más importantes con respecto al CQI es que su cálculo no se encuentra definido por el estándar LTE, por lo que su estimación se encuentra totalmente a cargo de los fabricantes de los sistemas de radio de los terminales de usuario. Sin embargo, de manera general, el valor de SNR de la señal recibida por el terminal de usuario es el factor más influyente en el cálculo de este parámetro.

Adicional al parámetro CQI, también se encuentran los denominados Modulation and Coding Schemes (MCS) o esquemas de modulación y codificación. El parámetro MCS a diferencia del CQI cuenta con un total de 28 niveles que definen una combinación entre un método de codificación y tasa de codificación.

A pesar de las similitudes que existen entre los parámetros CQI y MCS, es importante destacar las diferencias entre ambos. En el caso del parámetro CQI, éste es enviado por el terminal de usuario y transporta tanto información relacionada a la calidad del canal así como información relacionada a las características del método de modulación y tasa de codificación con las que el terminal de usuario estima deberían ser transmitidos sus bloques de transporte.

Por otra parte, el parámetro MCS es determinado por el algoritmo de calendarización a nivel de la capa MAC del lado del eNodeB, para esto, el algoritmo considera el valor del CQI enviado por el terminal de usuario como uno de los parámetros para el cálculo del MCS, por lo que adicionalmente debe considerar otros factores como los recursos disponibles en el sistema al momento de la solicitud realizada por el usuario, la tasa de pérdida de paquetes de ese usuario en particular y la categoría del terminal entre otros.

Debido a las diferencias que existe entre la manera en que cada uno de estos parámetros es estimado por el sistema LTE, se requiere realizar un proceso que permita mapear cada uno de los valores correspondientes al parámetro CQI a los valores correspondientes al parámetro MCS y viceversa.

En el caso del análisis presentado en este trabajo, se plantea primero la estimación del parámetro MCS, el cual es utilizado finalmente por el sistema para establecer la modulación y tasa de codificación utilizada para los bloques de transporte que serán asignados al terminal de usuario. Una vez que este parámetro ha sido determinado, se realiza una conversión a valores de CQI con el objetivo de presentar un análisis de los dos parámetros, dada su relevancia en el funcionamiento del sistema LTE.

5.2.2. Selección del Esquema de Modulación y Codificación (MCS)

A continuación se presenta el procedimiento a través del cual se realiza el proceso de estimación del parámetro MCS, el cual define el tipo de modulación y codificación que será utilizado para los bloques de transporte asignados al terminal de usuario.

El primer paso de este procedimiento es establecer un valor para la calidad esperada del enlace. Para esto, la calidad del enlace se define en términos del porcentaje máximo de bloques de transporte erróneos permitidos con respecto al total de bloques de transporte transmitidos al terminal de usuario, este parámetro se define también como Block Error Rate (BLER). Con el objetivo de obtener el mayor rendimiento posible, el valor definido para la calidad del enlace en términos de BLER, es el correspondiente al porcentaje máximo de bloques erróneos permitido por el estándar LTE, el cual es igual al 10% [20].

Una vez que se ha definido la calidad del enlace en términos del porcentaje máximo de BLER permitido, se debe implementar un procedimiento de conversión que permita determinar la equivalencia entre la calidad de la señal percibida por el terminal de usuario y el tipo de modulación y tasa de codificación con el que se transmitirá los bloques de transporte.

Para esto, se define el uso de “curvas de modulación”, las cuales fueron obtenidas del software de simulación de redes Riverbed Modeler [41]. Estas curvas de modulación corresponden a un conjunto de tablas, las cuales básicamente determinan la relación que existe entre el valor la relación señal a ruido (SNR) medida por el terminal de usuario y el porcentaje de bloques erróneos para un esquema de modulación y codificación determinado.

Para determinar la equivalencia entre los valores de SNR y los esquemas de modulación y codificación, se plantea el uso de la relación señal a ruido (SNR) correspondiente a las señales de referencia Cell Specific Reference Signals (CSRS), representada a través del parámetro RS SNR, la cual fue discutida con detalle en secciones anteriores.

Sin embargo, previo al procedimiento de conversión, se deben tomar en cuenta algunas consideraciones. Como se pudo observar en el figura 4.7, la distribución de los valores correspondientes al parámetro RS SNR muestran en elevado grado de variabilidad, especialmente entre mediciones sucesivas, esto se debe al entorno de alta movilidad en el cual se realizaron las mediciones de las señales recibidas por los terminales de usuario.

Para solucionar esto, se plantea el uso una ventana deslizante, que promedie los 10 últimos valores de RS SNR previo a la conversión entre los valores de SNR y los MCS, con el objetivo de evitar asignaciones erróneas del tipo de modulación y la tasa de codificación a los bloques de transporte, como consecuencia de cambios abruptos del SNR de la señal.

Estas asignaciones erróneas, derivarían en un aumento en la tasa de errores de los bloques recibidos por el terminal y una subsecuente disminución en la eficiencia del sistema, ya que estos bloques deberán ser retransmitidos por la capa MAC hasta que finalmente sean recibidos de manera correcta.

El uso de la ventana deslizante, permitirá que los valores de SNR utilizados para la conversión, cambien de manera más estable, lo que provocara que la probabilidad de asignaciones erróneas correspondientes a los esquemas de modulación y codificación disminuya de manera considerable.

A continuación la figura 5.1 muestra la distribución original de los valores de RS SNR sin promediar, en comparación con la distribución resultante posterior al promedio de los últimos 10 valores. Como se puede observar en la figura, el resultado del promedio es una señal mucho más estable que sin embargo, presenta características de variación similares a las de la señal original.

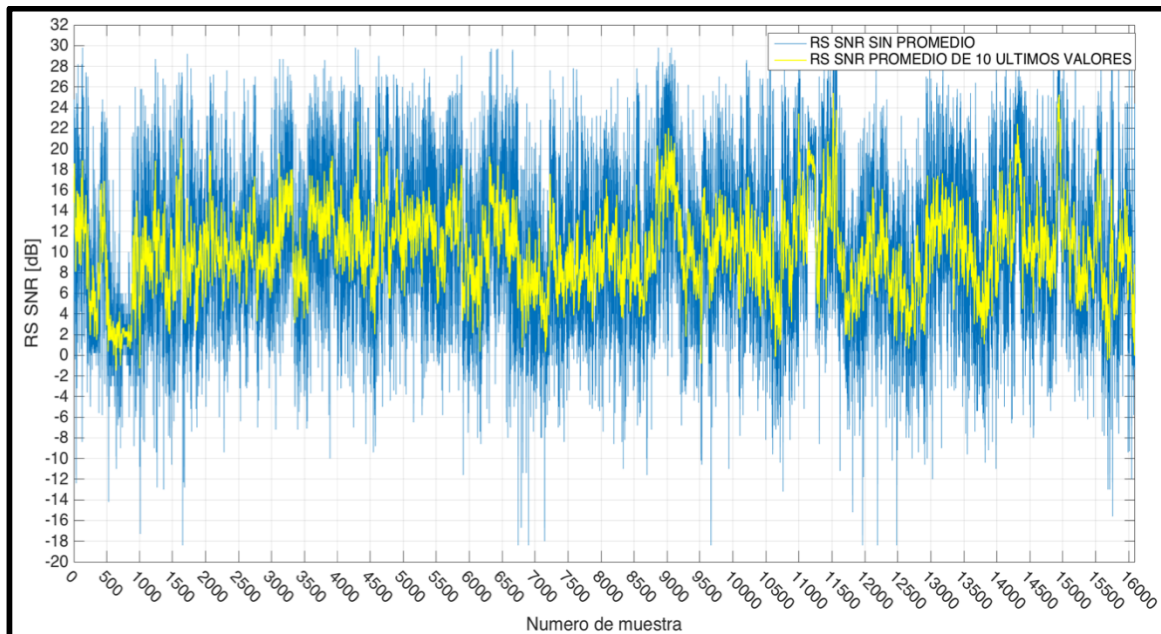


Figura 5.1. Distribución de RS SNR sin promedio y con promedio de 10 últimos valores.

Una vez que los valores promediados del parámetro RS SNR son obtenidos, se procede a determinar los esquemas de modulación y codificación que corresponden a estos valores de SNR a través del uso de las curvas de modulación mencionadas.

A continuación, en la figura 5.2 se muestra como ejemplo una de estas curvas, en este caso la curva presentada corresponde al esquema de modulación y codificación número 10. En la figura se puede observar que esta curva se encuentra definida para la relación existente entre la relación señal a ruido (SNR) expresada en dB (Eje X) y el porcentaje de BLER (Eje Y).

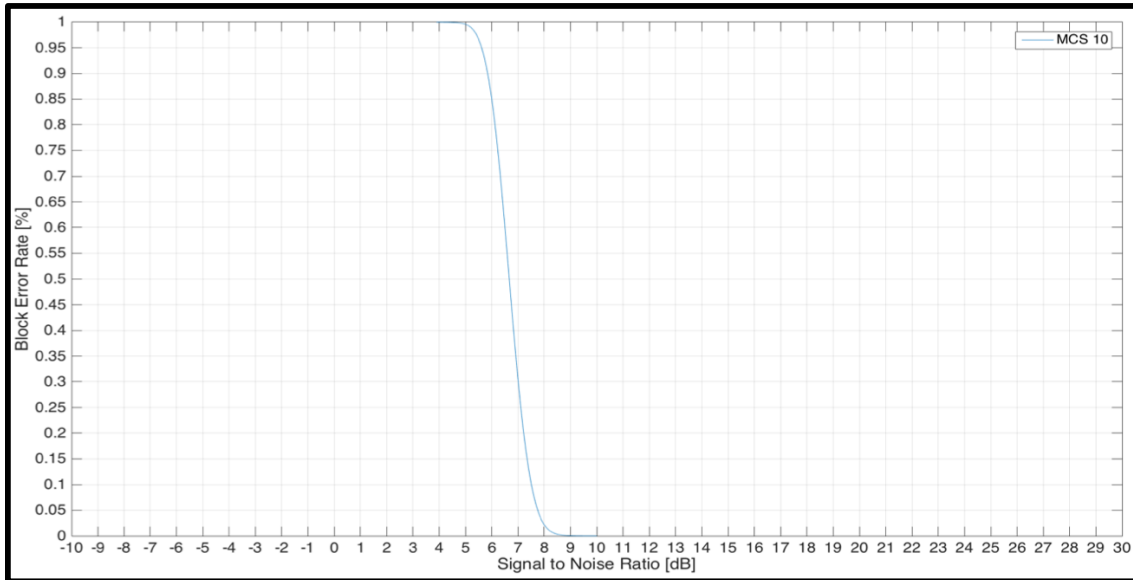


Figura 5.2. Curva correspondiente al esquema de modulación y codificación N° 10 [41].

Debido a que el estándar LTE define un total de 28 esquemas de modulación y codificación, existe una curva correspondiente a cada esquema. En la figura 5.3 se muestran las curvas para todos los esquemas de modulación y codificación disponibles, en esta figura se puede observar que el esquema número 0 también se encuentra definido, sin embargo, este valor corresponde al estado en que el terminal de usuario se encuentra desconectado o fuera de rango del área de cobertura del sistema LTE y es equivalente al valor 0 del parámetro CQI.

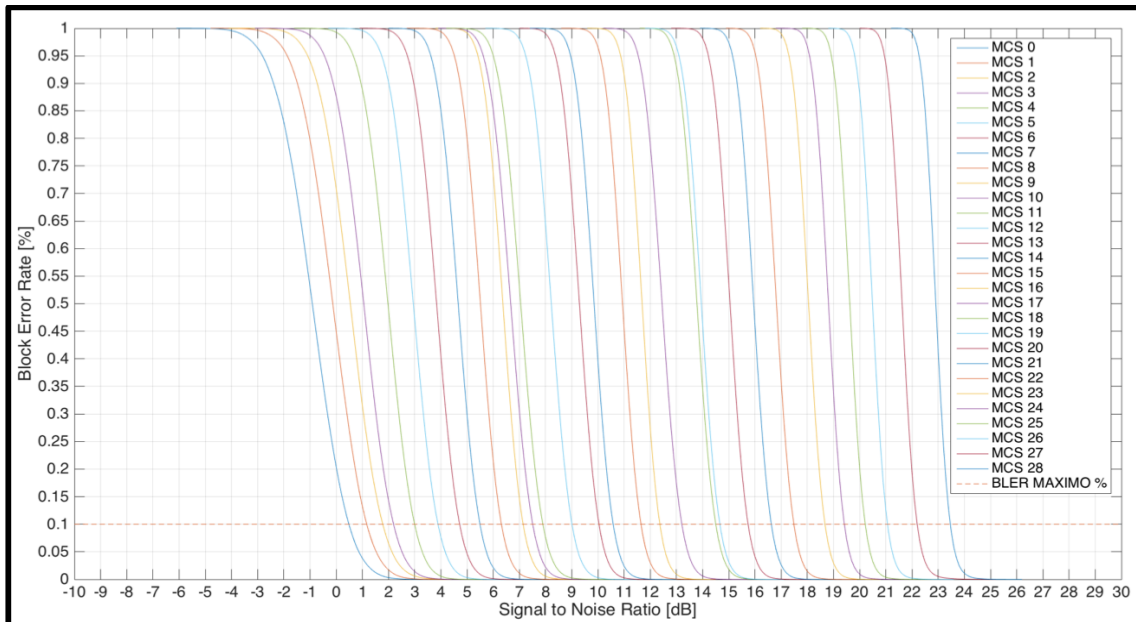


Figura 5.3. Curvas correspondientes a todos los esquemas de modulación y codificación [41].

En la figura también se puede observar el máximo BLER permitido por LTE, correspondiente al 10%, este valor está representado por la línea punteada horizontal, la cual define el límite dentro del rango en el que se realizara la selección del esquema de modulación y codificación.

Se debe tener en cuenta que durante el proceso de selección del esquema de modulación y codificación realizado por el algoritmo de calendarización, es posible que uno o más esquemas permitan obtener un porcentaje de BLER por debajo del límite máximo de BLER permitido para el mismo valor de SNR, lo que permitiría que puedan ser seleccionados por el sistema para la transmisión de los bloques de transporte del usuario.

Sin embargo, ya que el objetivo es obtener el mayor rendimiento del sistema, el esquema seleccionado debe corresponder al tipo de modulación y tasa de codificación que obtengan el mayor rendimiento, dentro de los esquemas que cumplen con los requerimientos establecidos. A continuación, la figura 5.4 describe el diagrama de flujo utilizado para la selección del esquema de modulación y codificación utilizando el procedimiento descrito.

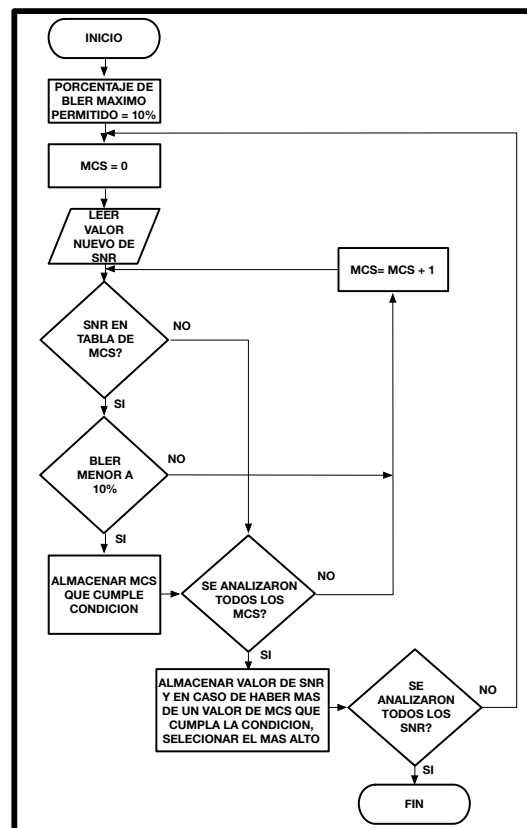


Figura 5.4. Diagrama de flujo para selección de MCS.

5.3. Análisis de Resultados de Adaptación del Enlace

5.3.1. Resultados de selección del MCS

Una vez que la equivalencia entre los valores de SNR, correspondientes a las señales de referencia y los esquemas de modulación y codificación ha sido determinada, LTE utilizará estos esquemas para establecer el tipo de modulación y codificación de los bloques de transporte que serán asignados. A continuación la figura 5.5 muestra la distribución de los valores de MCS obtenidos para todas las muestras recolectadas.

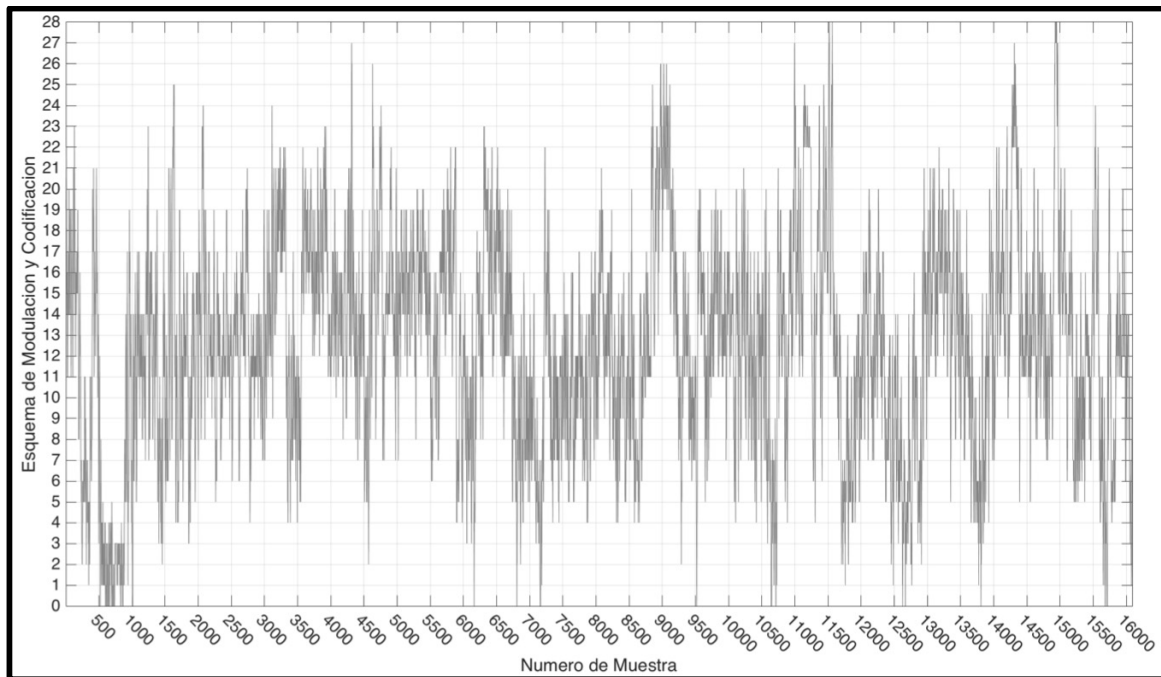


Figura 5.5. Distribución de los valores del parámetro MCS.

Por otra parte, la figura 5.6 muestra la función de densidad de probabilidad empírica para los esquemas de modulación y codificación. En la figura se observa que la probabilidad de obtener valores cercanos a la media, correspondiente al MCS número 13 es mayor a la probabilidad de obtener valores en los extremos superior e inferior de la distribución.

Así también se puede observar que existe un valor de probabilidad correspondiente al esquema número 0, el cual corresponde a un estado de desconexión del sistema LTE debido a que los valores de SNR correspondientes no cumplen con los requerimientos mínimos para que el terminal pueda considerarse como conectado al sistema.

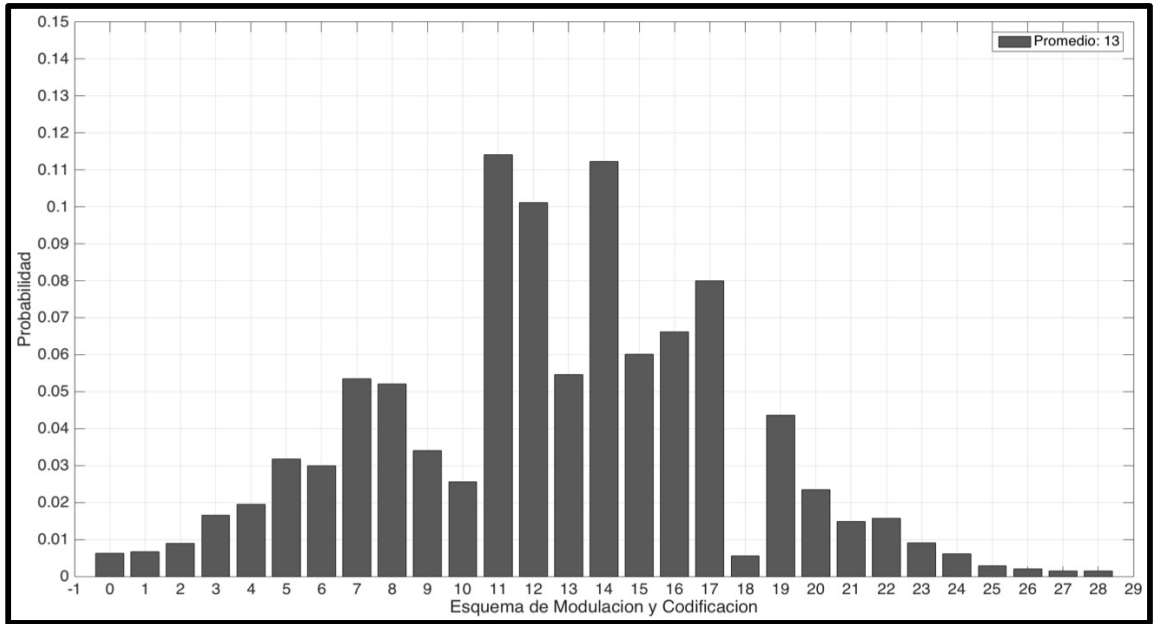


Figura 5.6. Función de Densidad de Probabilidad empírica para los valores del parámetro MCS.

5.3.2. Resultados de Tasa de Bloques Erróneos (BLER)

El procedimiento realizado para la selección de los esquemas de modulación y codificación permite también obtener el porcentaje de la tasa de bloques erróneos (BLER) correspondientes a cada valor de SNR y esquema seleccionado. La figura 5.7 muestra los porcentajes de BLER obtenidos para todas las muestras recolectadas.

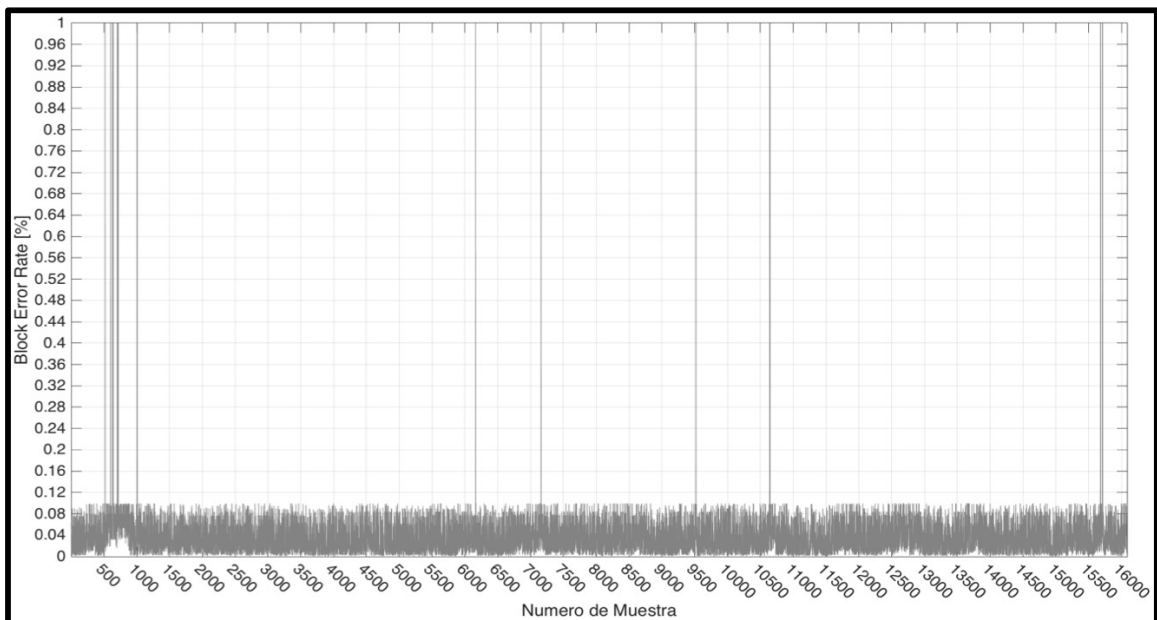


Figura 5.7. Distribución de los valores del parámetro BLER.

En la figura se puede observar que la mayoría de los valores correspondientes al parámetro BLER se encuentran en un rango por debajo del 10%, los valores de BLER que se muestran con un valor del 100% hacen referencia a bloques descartados por el sistema, debido a que los valores de SNR no cumplen con los requerimientos establecidos.

La figura 5.8 muestra la función de densidad de probabilidad empírica para los valores de BLER, en esta figura se puede observar que un alto porcentaje de valores se encuentra por debajo del límite establecido del 10%, con una media aproximada de 3.7%. Así también se puede observar que existe un determinado porcentaje de bloques descartados, con una probabilidad de ocurrencia mucho menor.

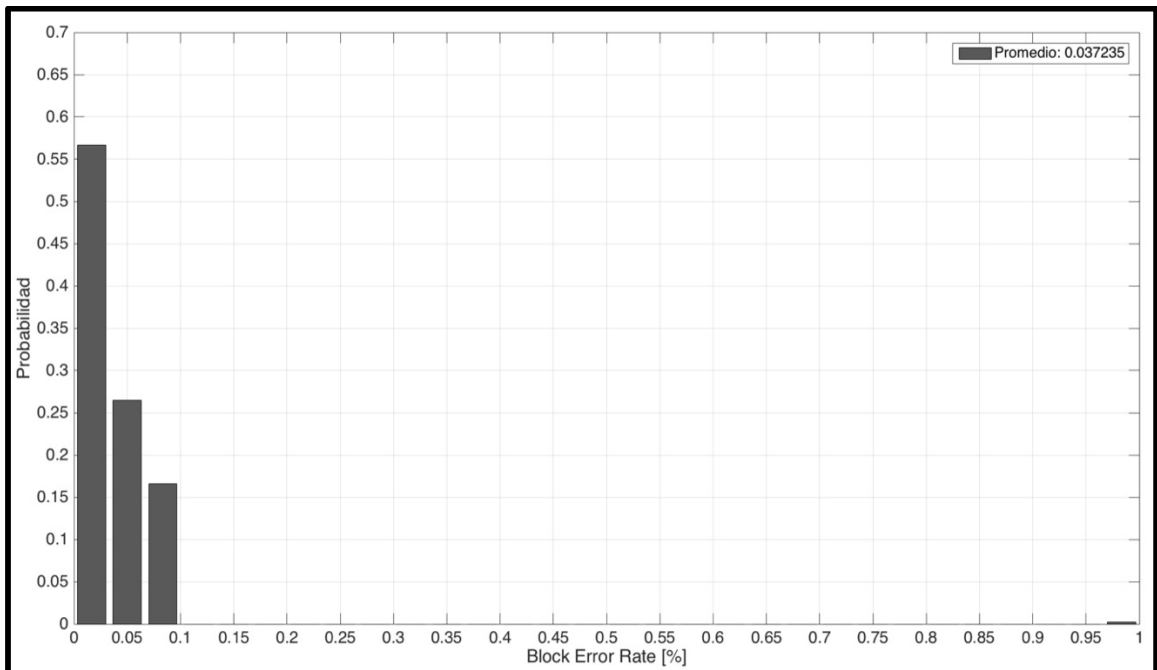


Figura 5.8. Función de Densidad de Probabilidad empírica para los valores del parámetro BLER.

5.3.3. Resultados de selección del Channel Quality Index (CQI)

Como fue presentado en secciones anteriores, en LTE, el parámetro conocido como Channel Quality Index (CQI) es reportado por el terminal de usuario al eNodeB con el objetivo de cuantificar la calidad del enlace de comunicación experimentada por el terminal en 15 niveles diferentes, además del nivel 0 utilizado para definir el estado de desconexión del terminal del sistema LTE.

El parámetro CQI guarda una estrecha relación con el parámetro MCS ya que cada uno de los valores correspondientes para estos parámetros determina un esquema de modulación y tasa de codificación para los bloques de transporte, sin embargo la diferencia radica en el hecho de que el valor de CQI corresponde al esquema solicitado por el terminal, mientras que el valor de MCS corresponde al esquema finalmente asignado por el sistema.

Para realizar la conversión del parámetro MCS al parámetro CQI, se requiere determinar una equivalencia entre sus 28 y 15 valores respectivamente. Esta equivalencia no se encuentra definida en el estándar LTE, por lo que queda a entera disposición del eNodeB establecerla. A continuación en la figura 5.9 se muestra la distribución del parámetro CQI para todas las muestras recolectadas, el proceso de conversión fue realizado tomando como referencia la equivalencia entre los valores de MCS y CQI definida por Riverbed Modeler [41].

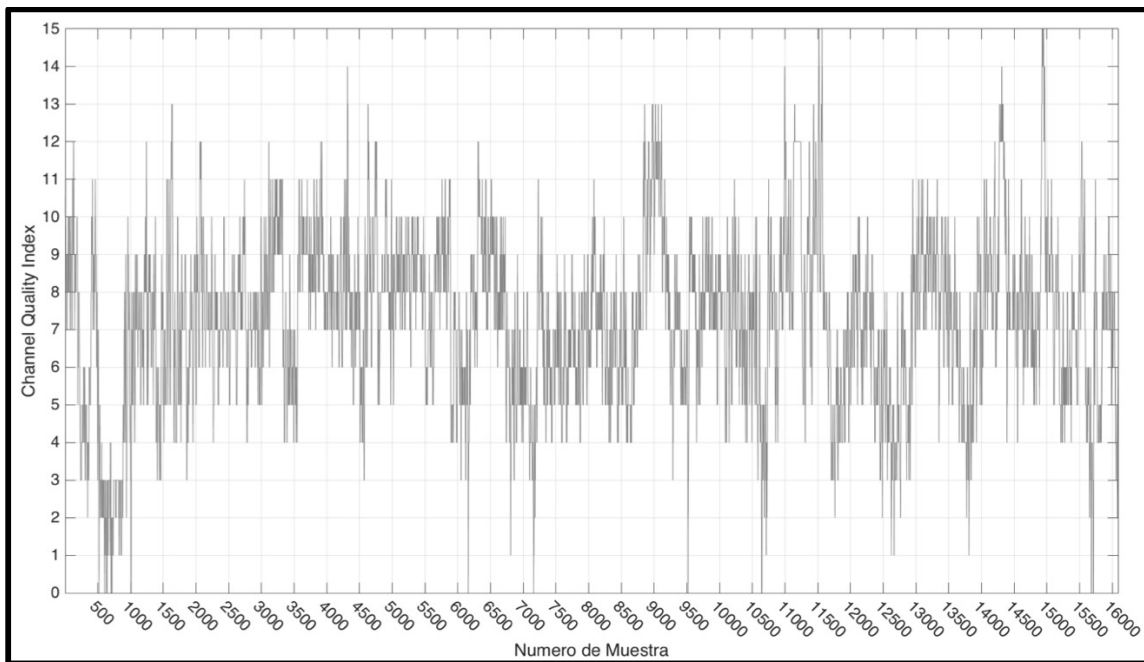


Figura 5.9. Distribución de los valores del parámetro CQI.

Adicionalmente, en la figura 5.10 se presenta la función de densidad de probabilidad empírica para los valores de CQI, en la distribución se puede observar que la probabilidad de obtener valores cercanos a la media de 7 es mayor a la de obtener valores en los extremos de la distribución, además se puede observar un valor de probabilidad para el nivel 0, el cual representa la probabilidad de desconexión de manera similar al valor 0 de MCS.

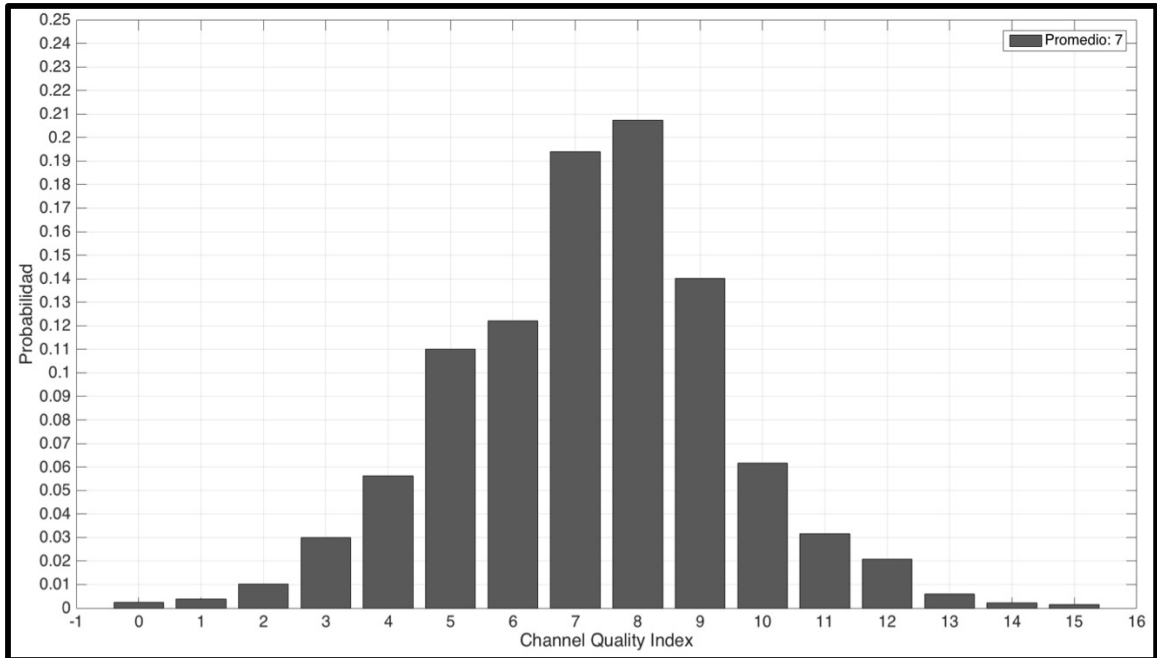


Figura 5.10. Función de Densidad de Probabilidad empírica para los valores del parámetro CQI.

5.4. Dimensionamiento de la Capacidad del Sistema

Una vez que se ha establecido el tipo de codificación y la tasa de codificación correspondiente a los bloques de transporte que serán asignados al terminal de usuario, se puede proceder a determinar la tasa de transmisión máxima del sistema en términos del “throughput” del enlace descendente.

El termino “throughput” en el contexto de los sistemas de comunicación, se define como la tasa de entrega exitosa de mensajes a través del canal de comunicación, se representa en términos de bits por segundo (bps) o paquetes por segundo (pps) y usualmente es considerado como una medida del consumo de ancho de banda de un sistema.

Cuando se realiza el cálculo del throughput, se debe tener en cuenta, principalmente la cantidad de sobrecarga producida por los recursos utilizados por el sistema de comunicación para la transmisión de información de señalización y control, la cual no debe ser considerada dentro del cálculo de la tasa de transmisión eficiente, ya que estos recursos no son destinados por el sistema para la transmisión de información del usuario, también conocida como “payload” o carga útil.

Debido a esto, para poder determinar el throughput del sistema LTE, se deben considerar todos los recursos utilizados por el conjunto de canales físicos de señalización y control que fueron descritos detalladamente en el capítulo 3. Esto permitirá determinar los recursos que podrán ser destinados para la transmisión de información del usuario con el objetivo de obtener la tasa de transmisión real del sistema, bajo las condiciones de alta movilidad descritas en este estudio.

A continuación se presenta el modelo teórico para el dimensionamiento del enlace descendente del sistema LTE, el cual permitirá determinar su capacidad de transmisión real, con el objetivo de establecer la factibilidad de la implementación de LTE como tecnología de comunicación para los Sistemas de Transporte Inteligente.

5.4.1. Modelo teórico para el dimensionamiento del sistema

Con el objetivo de determinar los recursos disponibles para la transmisión de información del usuario, se debe considerar por una parte la cantidad de recursos totales asignados por el sistema LTE y por otra, la cantidad de recursos utilizados por los canales físicos de señalización y control.

A continuación, la ecuación 5.1 establece que la diferencia existente entre los recursos totales asignados al enlace descendente (E.D.) y los recursos utilizados por los canales de control y señalización del enlace descendente, permitirá determinar los recursos disponibles para la transmisión de información de usuario en términos de Resource Elements (RE).

$$RE \text{ Disponibles E.D.} = RE \text{ Totales E.D.} - RE \text{ Canales de Control y Señalización E.D.} \quad (5.1)$$

Con el objetivo de definir los términos presentados en la ecuación 5.1, el modelo requiere establecer ciertas consideraciones con respecto a la configuración implementada por el sistema, estas permitirán determinar de manera precisa la cantidad de recursos totales y los recursos utilizados por los canales de control. A continuación se presenta las consideraciones realizadas para el modelo de dimensionamiento planteado.

5.4.2. Consideraciones del modelo

Consideraciones para el Enlace Descendente

Para definir el total de recursos asignados al enlace descendente, primero se debe definir el ancho de banda que será utilizado por el sistema para la transmisión de información. A continuación la tabla 5.1 muestra las configuraciones de ancho de banda disponibles en LTE, así como el número de Resource Blocks disponibles para cada configuración.

Ancho de Banda Utilizado (MHz)	Numero de Resource Blocks
1.4	6
3	15
5	25
10	50
15	75
20	100

Tabla 5.1. Configuraciones de Anchos de Banda y Numero de Resource Blocks en LTE [22].

Una vez que se ha definido la configuración de ancho de banda, se debe establecer el modo de transmisión a utilizar. LTE permite el uso de dos modos de transmisión, FDD y TDD. En el caso del modelo presentado el tipo de transmisión seleccionado es TDD, debido a que es el modo de transmisión utilizado por el operador cuyas muestras fueron analizadas durante este estudio.

La selección de TDD como modo de transmisión, define a su vez el uso del tipo de trama que lleva el mismo nombre. En LTE, la trama tipo TDD presenta un conjunto de configuraciones en función del tipo de información que transmite cada una de las subtramas que la compone.

A continuación la tabla 5.2 muestra las configuraciones para la trama TDD, en la tabla el termino “D” hace referencia a una subtrama utilizada para la transmisión en el enlace descendente, el termino “U” a una subtrama utilizada para la transmisión en el enlace ascendente y el termino “S” a una subtrama especial.

Configuración	Numero de Subtrama									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Tabla 5.2. Configuraciones de la Trama TDD [21].

De manera similar, la subtrama especial presenta un conjunto de configuraciones en función del tipo de información que transmite. La tabla 5.3 define las configuraciones de la subtrama especial, en función de los símbolos OFDM disponibles para la transmisión en el enlace descendente (DwPTS), ascendente (UpPTS) y periodo de guardia (GP) para las configuraciones de Cycle Prefix normal y extendido.

Configuración	Cycle Prefix Normal			Cycle Prefix Extendido		
	DwPTS (N° Símbolos OFDM)	GP (N° Símbolos OFDM)	UpPTS (N° Símbolos OFDM)	DwPTS (N° Símbolos OFDM)	GP (N° Símbolos OFDM)	UpPTS (N° Símbolos OFDM)
0	3	10	1	3	8	1
1	9	4		8	3	
2	10	3		9	2	
3	11	2		10	1	
4	12	1		3	7	
5	3	9	2	8	2	2
6	9	3		9	1	
7	10	2		5	5	
8	11	1				
9	6	6				

Tabla 5.3. Configuraciones de la Subtrama Especial [21].

A continuación, la ecuación 5.2 permite determinar el número total de Resource Elements totales disponibles únicamente para la transmisión en el enlace descendente (E.D.), por lo tanto todos los recursos destinados a la transmisión del enlace ascendente y al periodo de guardia requerido por el modo TDD no son considerados. Esta ecuación se encuentra definida para un periodo de tiempo de 10ms, correspondiente a la duración de una trama en LTE.

$$RE \text{ Totales E.D.} = NRB * ((\text{Subtramas E.D.} * \text{Símbolos OFDM}) + Dw_{PTS}) * 12 \quad (5.2)$$

Donde,

- NRB = Numero de Resource Blocks en función del ancho de banda utilizado.
- Subtramas E.D. = Numero de subtramas asignadas para la transmisión en el enlace descendente, en función del tipo de configuración de la trama TDD (Tabla 5.2).
- Símbolos OFDM = Numero de Símbolos OFDM por subtrama en función del Cycle Prefix utilizado. Si el Cycle Prefix es normal, la subtrama se compone de 14 símbolos OFDM, si el Cycle Prefix es extendido se compone de 12 símbolos OFDM.
- DW_{PTS} = Numero de Símbolos OFDM asignados para la transmisión en el enlace descendente en función del tipo de configuración de la subtrama especial (Tabla 5.3).
- 12 = Numero de subportadoras por Resource Block.

Una vez que se ha definido la cantidad total de recursos disponibles para la transmisión del enlace descendente en términos del número total de Resource Elements, el siguiente paso es determinar la cantidad de recursos a ser utilizados para la transmisión de los canales físicos de control y señalización.

Para esto, se requiere establecer la configuración correspondiente a cada uno de los canales de control, esta configuración, define finalmente la cantidad de recursos que utilizara el sistema para su transmisión. A continuación se presentan las consideraciones realizadas para el dimensionamiento de estos canales.

Consideraciones para los Canales de Control y Señalización

Para establecer el total de recursos requeridos por los canales físicos de control y señalización del enlace descendente (E.D.), se debe inicialmente definir cada uno de los canales a utilizar. A continuación la ecuación 5.3 define el total de recursos utilizados por estos canales en términos de Resource Elements (RE), así como todo el conjunto de canales utilizados con este propósito.

$$RE_{Control\ E.D.} = RE_{PDCCH} + RE_{PBCH} + RE_{RS} + RE_{PSS} + RE_{SSS} + RE_{PCFICH}^* + RE_{PHICH}^* \quad (5.3)$$

Donde,

- RE PDCCH = RE utilizados por el Physical Downlink Control Channel (PDCCH).
- RE PBCH = RE utilizados por el Physical Broadcast Channel (PBCH).
- RE RS = RE utilizados por las Señales de Referencia (RS).
- RE PSS = RE utilizados por las Primary Synchronization Signals (PSS).
- RE SSS = RE utilizados por el Secondary Synchronization Signals (PSS).
- RE PCFICH = RE utilizados por el Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH).
- RE PHICH = RE utilizados por el Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PCFICH).
- Los canales marcados con * representan un caso especial y su dimensionamiento será detallado en la sección correspondiente a cada canal.

Con el objetivo de definir de manera precisa la ecuación 5.3, se debe establecer la cantidad de recursos totales en términos de Resource Elements requeridos por los canales de control. A continuación se presenta el cálculo para determinar el número de Resource Elements correspondiente a cada uno de los canales de control presentados.

Dimensionamiento del Physical Downlink Control Channel (PDCCH)

El tamaño de este canal se encuentra definido por la configuración del parámetro Control Format Indicator (CFI), cuyo valor a su vez depende del ancho de banda utilizado. A continuación la ecuación 5.4 define el tamaño en número de Resource Elements del canal PDCCH, definido para un periodo de 10ms, correspondiente a la duración de una trama.

$$RE_{PDCCH} = NRB * (CFI * (Subtramas E.D. + Subtramas Especiales)) * 12 \quad (5.4)$$

Donde,

- NRB = Numero de Resource Blocks en función del ancho de banda utilizado.
- CFI = Numero de símbolos OFDM utilizados para la transmisión del PDCCH en función del parámetro CFI, el cual, de acuerdo a su configuración, puede definir el uso de 1, 2 y 3 símbolos OFDM para canales con anchos de banda mayores a 1.4MHz o 2, 3 y 4 símbolos OFDM para canales con anchos de banda de 1.4MHz.
- Subtramas E.D. = Numero de subtramas asignadas para la transmisión en el enlace descendente, en función del tipo de configuración de la trama TDD (Tabla 5.2).
- Subtramas Especiales = Numero de subtramas especiales, en función del tipo de configuración de la trama TDD (Tabla 5.2).
- 12 = Numero de subportadoras por Resource Block.

Dimensionamiento del Physical Broadcast Channel (PBCH)

El tamaño de este canal es independiente de la configuración del ancho de banda y tipo de trama utilizada, sin embargo su tamaño si varía en función del número de antenas utilizadas, el cual determina el número de señales de referencia requeridas por el sistema. Cabe mencionar que la variación en el tamaño de este canal será considerada de manera general cuando se analicen los recursos utilizados por las señales de referencia.

Para realizar el dimensionamiento de este canal, se debe considerar que su transmisión se realiza de manera periódica en intervalos de 40ms, es decir cada 4 tramas. A continuación la ecuación 5.5 define el tamaño en número de Resource Elements del canal PBCH, definido para un periodo de 10ms, correspondiente a la duración de una trama.

$$RE_{PBCH} = \frac{6 * 4 * 12}{4} \quad (5.5)$$

Donde,

- 6 = Numero de Resource Blocks utilizados para la transmisión del PBCH.
- 4 (Numerador) = Numero de Símbolos OFDM utilizados para la transmisión del PBCH.
- 12 = Numero de subportadoras por Resource Block.
- 4 (Denominador) = Debido a que este canal se transmite cada 4 tramas, se requiere un factor de 4 para obtener su tamaño correspondiente a la duración de una trama.

Dimensionamiento de las Señales de Referencia (RS)

El número de Resource Elements utilizado por las señales de referencia se encuentra en función del ancho de banda utilizado y el uso de múltiples antenas de transmisión debido a la implementación de la tecnología MIMO. A continuación la ecuación 5.6 define el tamaño en número de Resource Elements de las señales de referencia.

$$RE_{RS} = (NRB * (Subtramas E.D. + Subtramas Especiales) * 8 * Numero de Antenas) * 3/4 \quad (5.6)$$

Donde,

- NRB = Numero de Resource Blocks en función del ancho de banda utilizado.
- Subtramas E.D. = Numero de subtramas asignadas para la transmisión en el enlace descendente, en función del tipo de configuración de la trama TDD (Tabla 5.2).
- Subtramas Especiales = Numero de subtramas especiales en función del tipo de configuración de la trama TDD (Tabla 5.2).
- 8 = Numero de Resource Elements utilizados por las señales de Referencia.
- Numero de Antenas = Numero de antenas utilizado, este valor puede ser 1, 2 o 4.

El uso del factor de $3/4$, expresado en la ecuación 5.6, se debe a que la cuarta parte de las señales de referencia comparten el espacio utilizado por los recursos del canal PDCCH, por lo que este factor es implementado para evitar el uso de recursos ya considerados anteriormente, con el objetivo de que el modelo sea lo más preciso posible.

Dimensionamiento de las Primary Synchronization Signals (PSS)

Estas señales son utilizadas para procesos de sincronización y utilizan un número fijo de Resource Elements independientemente del ancho de banda utilizado. El número de Resource Elements transmitidos en cada trama es igual a 128.

Dimensionamiento de las Secondary Synchronization Signals (SSS)

Estas señales también son utilizadas para procesos de sincronización y utilizan un número fijo de Resource Elements independientemente del ancho de banda utilizado. El número de Resource Elements transmitidos en cada trama, al igual que en el caso anterior es de 128.

Dimensionamiento del Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH*)

Este canal tiene un tamaño fijo por cada subtrama utilizada para la transmisión en el enlace descendente y subtrama especial. Sin embargo el espacio ocupado por este canal se traslapa con el espacio utilizado por el PDCCH, por lo que al considerar los recursos utilizados por este último, implícitamente se consideran los recursos utilizados por el canal PCFICH.

Dimensión del Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH*)

Al igual que en el caso anterior, el espacio ocupado por este canal se traslapa con el espacio utilizado por el PDCCH, por lo que al considerar los recursos utilizados por este último, implícitamente se consideran los recursos utilizados por el canal PHICH.

Finalmente, una vez que han sido considerados todos los recursos utilizados por los canales de control, se pueden determinar los recursos disponibles en términos de Resource Elements para el enlace descendente, que permitirán realizar el cálculo del throughput. A continuación se presenta el modelo para el cálculo del throughput correspondiente al enlace descendente.

5.4.3. Modelo para el cálculo del Throughput del Enlace Descendente

Una vez que se han definido los términos en la ecuación 5.2 correspondientes a los recursos disponibles totales y los términos en la ecuación 5.3 correspondientes a los recursos utilizados por los canales físicos de control y señalización, los recursos disponibles para la transmisión de información del usuario, obtenidos como resultado de la ecuación 5.1 serán utilizados para determinar el throughput del enlace descendente.

A continuación, la expresión definida a través de la ecuación 5.7 permite determinar el throughput, es decir, la capacidad de transmisión por cada bloque de transporte, el cual está expresado en bits por segundo (bps), y corresponde al enlace descendente del sistema LTE en modo de transmisión TDD.

$$\text{Throughput}(\text{bps}) = \text{RE Disponibles E.D.} * \text{Bits por Resource Element} * \text{Tasa de Codificación} * 100 \quad (5.7)$$

Donde,

- RE Disponibles E.D. = Numero de Resource Elements disponibles para el enlace descendente, obtenidos a través de la ecuación 5.1.
- Bits por Resource Element: Numero de Bits que pueden ser transmitidos por Resource Element en función del tipo de modulación utilizada.
- Tasa de Codificación = Tasa de codificación, definido para cada valor de MCS.
- 100 = El cálculo del número de Resource Elements disponibles para la transmisión en el enlace descendente fue realizado para una trama con una duración de 10ms, por lo que para obtener el resultado en segundos, se requiere multiplicar el resultado obtenido por un factor de 100.

5.5. Procedimiento para el Cálculo de Throughput

Una vez obtenida la relación definida en la ecuación 5.7, se puede determinar la capacidad real de transmisión del enlace descendente del sistema LTE, a continuación se presenta el procedimiento utilizado para la obtención del throughput, así como el análisis de los resultados obtenidos.

Para poder obtener el throughput del enlace descendente, se requiere primero definir los valores de ciertos parámetros de configuración del sistema, los cuales determinaran la capacidad de transmisión del sistema. A continuación se listan los parámetros a ser definidos así como las consideraciones tomadas en cuenta para cada parámetro.

- Ancho de Banda.
- Cycle Prefix.
- Configuración de la trama TDD.
- Configuración de la subtrama especial.
- Tamaño del PDCCH.

5.5.1. Consideraciones para el cálculo de Throughput

Con el objetivo de maximizar la capacidad de transmisión del enlace descendente y considerando que el modo de transmisión utilizado es el modo TDD, las consideraciones realizadas corresponden a las configuraciones más favorables para el enlace descendente en términos de la cantidad de recursos asignados para el mismo. A continuación se muestran las consideraciones realizadas para cada uno de los parámetros de configuración.

- Ancho de Banda: Este parámetro es el único que presenta tres configuraciones diferentes en el análisis, los valores escogidos corresponden a los valores de ancho de banda mínimo de 1.4MHz, medio de 10MHz y máximo de 20MHz de LTE.
- Cycle Prefix: El Cycle Prefix seleccionado corresponde a la versión normal, la cual permite el uso de 14 símbolos OFDM por cada subtrama.
- Configuración de la Trama TDD: La configuración seleccionada es la numero 5, mostrada a la tabla 5.2, en la que 8 de cada 10 subtramas que conforman la trama TDD están destinadas a la transmisión del enlace descendente.
- Configuración de la Subtrama Especial: La configuración seleccionada es la numero 4, mostrada en la tabla 5.3, en la que 12 de cada 14 símbolos OFDM están destinados a la transmisión del enlace descendente.
- Tamaño del PDCCH: El tamaño escogido para este canal es de 2 símbolos OFDM para todas las configuraciones de ancho de banda seleccionadas.

Tipo de Modulación y Tasa de Codificación

El throughput del sistema se determina a partir de la relación definida en el ecuación 5.7. En esta ecuación, una vez que se obtiene el total de recursos disponibles para la transmisión en el enlace descendente, se requiere definir el número de bits que pueden ser transmitidos por Resource Element así como la tasa de codificación correspondiente a cada esquema de modulación y codificación. La tabla 5.4 presenta los esquemas cuando se consideran 2 símbolos OFDM para la transmisión del canal PDCCH. Estos valores serán utilizados para determinar el throughput por cada esquema de modulación y codificación así como el throughput del sistema, en base a los valores de MCS obtenidos en la sección 5.3.1.

MCS	Modulación	Bits por Resource Element	Tasa de Codificación aproximada
1	QPSK	2	0.14
2	QPSK	2	0.17
3	QPSK	2	0.22
4	QPSK	2	0.28
5	QPSK	2	0.34
6	QPSK	2	0.40
7	QPSK	2	0.47
8	QPSK	2	0.54
9	QPSK	2	0.61
10	16QAM	4	0.30
11	16QAM	4	0.34
12	16QAM	4	0.39
13	16QAM	4	0.44
14	16QAM	4	0.50
15	16QAM	4	0.55
16	16QAM	4	0.59
17	64QAM	16	0.39
18	64QAM	16	0.42
19	64QAM	16	0.46
20	64QAM	16	0.51
21	64QAM	16	0.55
22	64QAM	16	0.60
23	64QAM	16	0.64
24	64QAM	16	0.69
25	64QAM	16	0.74
26	64QAM	16	0.78
27	64QAM	16	0.81
28	64QAM	16	0.95

Tabla 5.4. Valores de MCS utilizados para el cálculo del throughput [29].

5.6. Resultados Obtenidos

Bajo las consideraciones realizadas, a continuación se presentan los resultados de throughput obtenidos para las tres configuraciones de ancho de banda seleccionadas. Los resultados incluyen el throughput correspondiente a cada esquema de modulación y codificación, el throughput del enlace descendente, la función de densidad de probabilidad, la función de densidad acumulativa del throughput para cada configuración y el throughput acumulado del enlace descendente del sistema LTE.

5.6.1. Esquemas de Modulación y Codificación vs Throughput

A continuación, la figura 5.11 presenta los resultados correspondientes al throughput máximo que puede ser alcanzado por cada uno de los 28 esquemas de modulación y codificación definidos en el estándar LTE. El valor de throughput es obtenido bajo las consideraciones de configuración presentadas para los tres valores de ancho de banda.

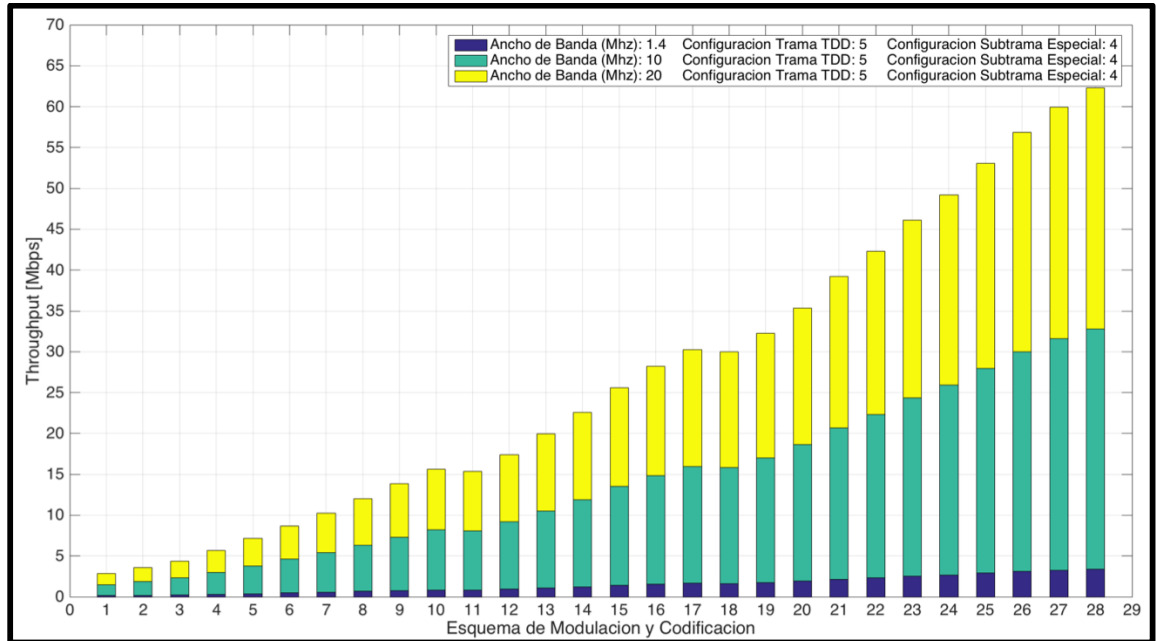


Figura 5.11. Esquemas de Modulación y Codificación vs Throughput.

Como se puede observar en la figura, el throughput aumenta en función del incremento de cada valor correspondiente a los esquemas de modulación y codificación, esto se debe a dos razones principales, la primera es que al incrementarse el valor de cada esquema, el tipo de modulación utilizada mejora, lo que permite transmitir más bits por Resource Element y la segunda es que la tasa de codificación también se ve incrementada, lo que finalmente se traduce en un aumento en la capacidad total de transmisión.

Además, en la misma figura se puede observar que el throughput alcanzado por cada esquema de modulación y codificación también aumenta considerablemente de manera proporcional al incremento del ancho de banda, manteniendo la misma configuración tanto para la trama TDD como para la subtrama especial. Lo cual es un resultado lógico, considerando que el ancho de banda define en gran medida la capacidad de transmisión del enlace descendente.

5.6.2. Throughput del Enlace Descendente

El throughput del enlace descendente del sistema LTE fue determinado a partir de los resultados de la ecuación 5.7 y de los valores correspondientes a los esquemas de modulación y codificación obtenidos a través del proceso de conversión a partir de los valores de las muestras correspondientes al parámetro Signal to Noise Ratio de las señales de referencia (RS SNR), presentados en la sección 3.1.

A continuación la figura 5.12 muestra los resultados de throughput del enlace descendente, obtenidos para las muestras recolectadas en el entorno de alta movilidad analizado en este estudio para valores de configuraciones de ancho de banda de 1.4, 10 y 20MHz.

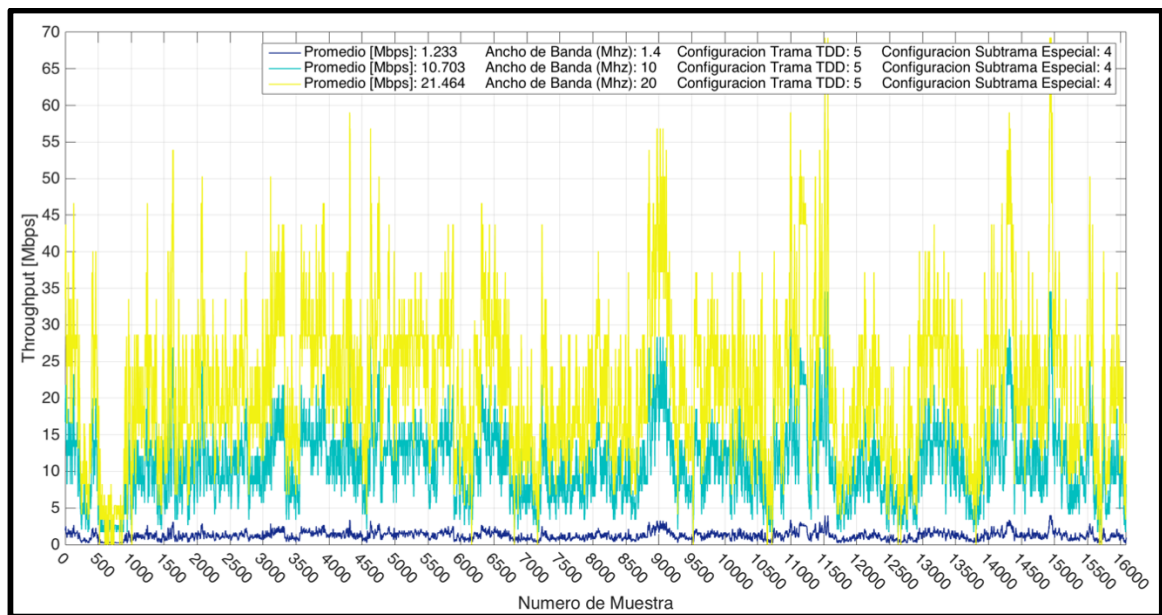


Figura 5.12. Throughput para el enlace descendente.

En la figura se puede observar claramente que la capacidad de transmisión del sistema es directamente proporcional al ancho de banda utilizado para las mismas configuraciones de trama TDD y subtrama especial. Es así que los valores promedio de throughput obtenidos para los anchos de banda de 1.4, 10 y 20MHz son 1.23, 10.70 y 21.46Mbps respectivamente.

Adicionalmente, se presenta el análisis estadístico para los valores de throughput, en este análisis se muestra la función de densidad de probabilidad (PDF) y la función de densidad acumulativa (CDF) empíricas para las configuraciones de ancho de banda utilizadas.

5.6.3. Funciones de Probabilidad Empírica del Throughput

A continuación se presentan los resultados para las funciones de densidad de distribución y acumulativa para cada configuración de ancho de banda de manera separada, ya que por motivos de escala, los resultados no pueden ser observados de manera apropiada en una sola figura. Las configuraciones de la trama TDD y subtrama especial se mantienen iguales.

PDF y CDF correspondientes a un canal de 1.4MHz

A continuación en la figura 5.13 se puede observar las funciones de densidad de probabilidad (Parte superior de la figura) y acumulativa (Parte Inferior de la figura) empíricas, correspondientes a los valores de throughput obtenidos para un canal descendente, con un ancho de banda de 1.4MHz. Los valores obtenidos de throughput en esta configuración muestran que la tasa de transmisión promedio es de aproximadamente 1.23Mbps.

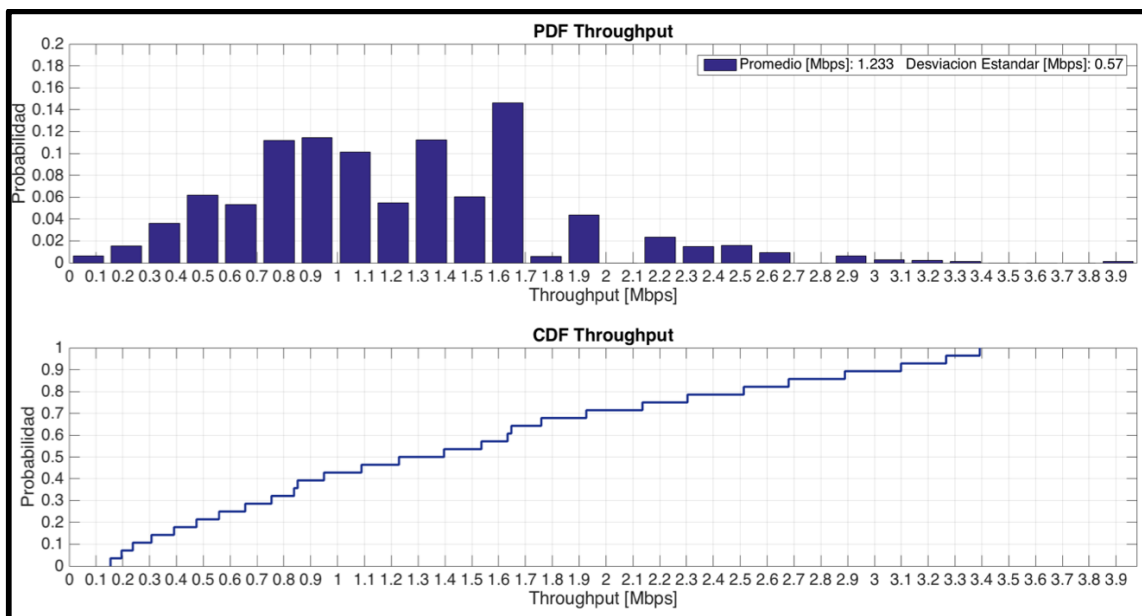


Figura 5.13. PDF y CDF empíricas del throughput para un canal descendente de 1.4MHz.

Como se puede observar en la figura, la función de distribución de probabilidad muestra que los valores menores, cercanos a la media de 1.23Mbps, muestran una probabilidad de ocurrencia mayor, con una desviación estándar de 0.57Mbps, a la probabilidad de los valores mayores a la media. Así también se observa que, el valor máximo de throughput obtenido en esta configuración es de aproximadamente 4Mbps, sin embargo su probabilidad indica que son pocas las ocasiones en las que el sistema alcanza esta capacidad de transmisión.

PDF y CDF correspondientes a un canal de 10MHz

En la figura 5.14 se pueden observar la función de densidad de probabilidad y función de densidad acumulativa para el throughput correspondiente a un canal descendente con un ancho de banda de 10MHz. En la figura se puede observar que el throughput del canal, en comparación con la configuración anterior, es considerablemente mayor.

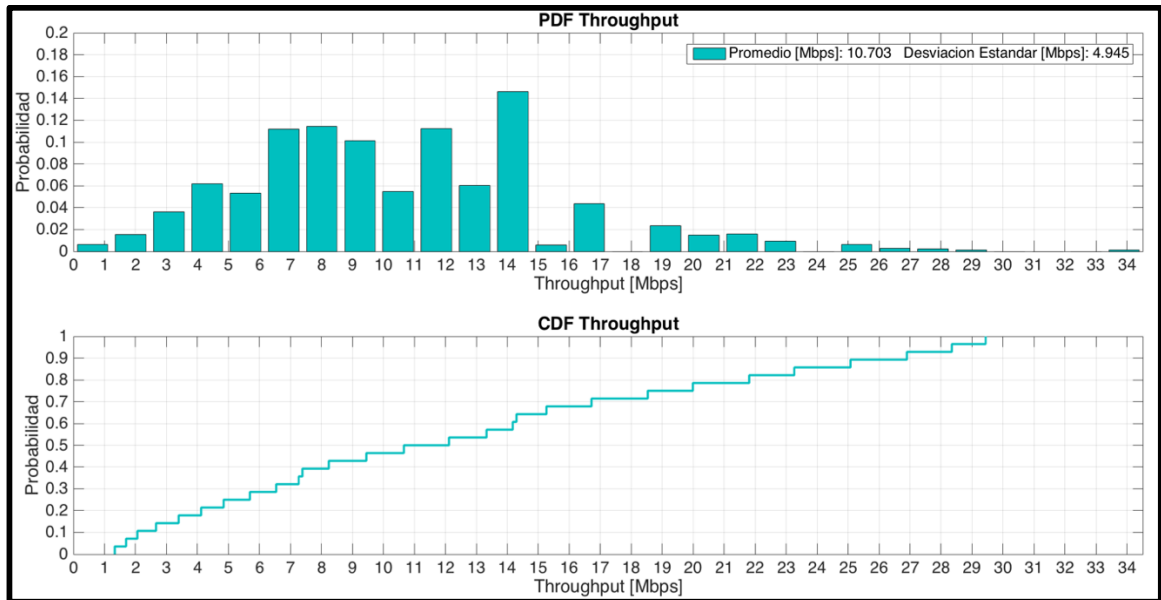


Figura 5.14. PDF y CDF empíricas del throughput para un canal descendente de 10MHz.

La figura muestra que esta distribución de probabilidad, comparada con la anterior es igual en forma, sin embargo su media y desviación estándar son completamente diferentes, con valores de 10.70Mbps y 4.94Mbps respectivamente. Los valores presentados, muestran que la capacidad del canal se incrementa de manera considerable con respecto a la primera configuración, sin embargo, la probabilidad correspondiente a la tasa de transmisión máxima de 34Mbps, sigue siendo considerablemente baja.

PDF y CDF correspondientes a un canal de 20MHz

Finalmente, la figura 5.15 muestra las funciones de densidad de probabilidad y acumulativa, correspondientes a la configuración de canal con un ancho de banda de 20MHz. Esta configuración para el enlace descendente muestra la máxima capacidad posible que puede ser alcanzada, ya que utiliza el máximo ancho de banda definido para el sistema LTE.

En la figura se puede observar que el throughput alcanzado en esta configuración es considerablemente mayor tanto a la configuración de 1.4MHz como a la de 10MHz. La tasa de transmisión promedio alcanza una media de 21.46Mbps, una desviación estándar de 9.91Mbps y al igual que los casos anteriores muestra la misma distribución de probabilidad.

Es importante resaltar que la tasa máxima de transmisión alcanzada en esta configuración, de aproximadamente 68Mbps, se encuentra distante de la máxima tasa teórica correspondiente al enlace descendente de LTE, esto se debe a que las características del entorno de alta movilidad, en el que la señal del sistema fue recolectada, presenta un conjunto de condiciones adversas para la apropiada propagación de la señal, las cuales fueron analizadas a detalle en secciones anteriores de este trabajo.

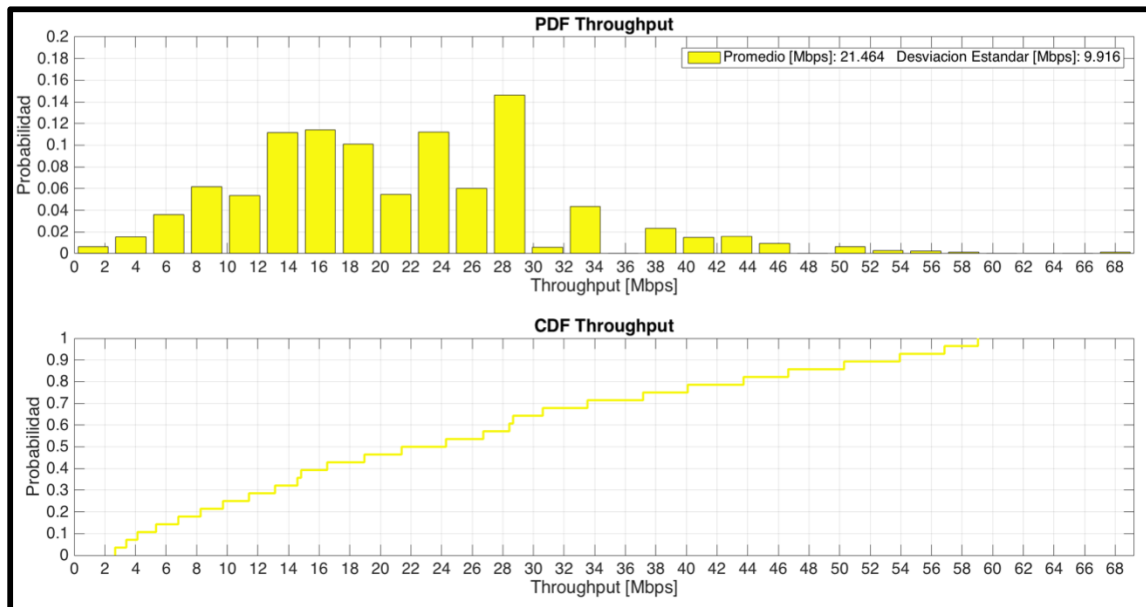


Figura 5.15. PDF y CDF empíricas del throughput para un canal descendente de 20MHz.

Adicionalmente en la tabla 5.5, se presentan los valores mínimo, máximo y promedio del throughput obtenido para todas las configuraciones de ancho de banda así como las configuración número 3, 4 y 5 para la trama TDD y 2, 3 y 4 para la subtrama especial. Las configuraciones fueron seleccionadas en base al mayor número de recursos disponibles para la transmisión en el enlace descendente. Estas configuraciones pueden ser verificadas en la tabla 5.2 para la trama TDD y 5.3 para la subtrama especial.

Parámetros de Configuración			Throughput (Mbps)			Parámetros de Configuración			Throughput (Mbps)		
Ancho de Banda MHz	Trama TDD	Subtrama Especial	Min	Max	Promedio	Ancho de Banda MHz	Trama TDD	Subtrama Especial	Min	Max	Promedio
1.4	3	2	0.145	2.953	0.915	10	3	2	1.276	25.976	8.053
		3	0.147	2.994	0.928			3	1.293	26.318	8.159
		4	0.149	3.035	0.941			4	1.310	26.660	8.265
	4	2	0.168	3.425	1.062		4	2	1.469	29.909	9.272
		3	0.170	3.466	1.074			3	1.486	30.251	9.378
		4	0.172	3.507	1.087			4	1.503	30.593	9.484
	5	2	0.191	3.897	1.208		5	2	1.662	33.842	10.491
		3	0.193	3.938	1.221			3	1.679	34.184	10.597
		4	0.195	3.979	1.233			4	1.696	34.526	10.703
3	3	2	0.376	7.662	2.375	15	3	2	1.919	39.058	12.108
		3	0.381	7.765	2.407			3	1.944	39.571	12.267
		4	0.386	7.867	2.439			4	1.969	40.084	12.426
	4	2	0.434	8.842	2.741		4	2	2.208	44.957	13.937
		3	0.439	8.944	2.773			3	2.234	45.470	14.096
		4	0.444	9.047	2.805			4	2.259	45.983	14.255
	5	2	0.492	10.022	3.107		5	2	2.498	50.857	15.765
		3	0.497	10.124	3.139			3	2.523	51.370	15.924
		4	0.502	10.227	3.170			4	2.549	51.883	16.083
5	3	2	0.633	12.895	3.997	20	3	2	2.561	52.139	16.163
		3	0.642	13.066	4.050			3	2.595	52.823	16.375
		4	0.650	13.237	4.103			4	2.628	53.507	16.587
	4	2	0.730	14.861	4.607		4	2	2.948	60.005	18.601
		3	0.738	15.032	4.660			3	2.981	60.689	18.813
		4	0.747	15.203	4.713			4	3.015	61.373	19.026
	5	2	0.827	16.828	5.216		5	2	3.334	67.871	21.040
		3	0.835	16.999	5.270			3	3.368	68.555	21.252
		4	0.845	17.232	5.312			4	3.401	69.239	21.464

Tabla 5.5. Throughput mínimo, máximo y promedio para todas las configuración de ancho banda.

5.6.4. Throughput Acumulado

A partir de la ecuación 5.7 se obtiene el valor del throughput para cada uno de los esquemas de modulación y codificación correspondientes a cada una de las muestras presentadas en los resultados de la sección 5.3.1. El throughput obtenido, a su vez es calculado de manera acumulada para las tres configuraciones de ancho de banda, trama TDD y subtrama especial.

A continuación, en la figura 5.16 se muestran los resultados obtenidos, correspondientes al throughput acumulado para las tres configuraciones utilizadas. El objetivo de mostrar el throughput de manera acumulada, es el de poder determinar la capacidad del enlace descendente del sistema LTE en términos de la cantidad total de información que puede ser transmitida.

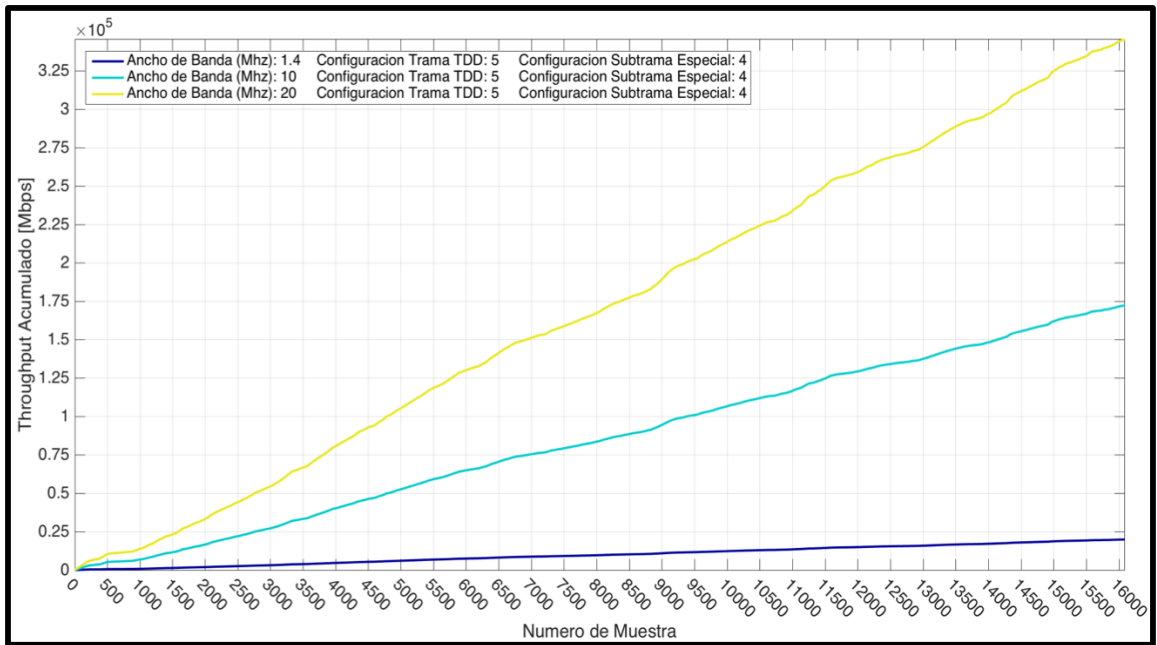


Figura 5.16. Throughput acumulado para el enlace descendente.

En esta figura se puede observar que la capacidad de transmisión del sistema, en términos del máximo throughput acumulado aumenta de manera considerable cuando el ancho de banda asignado por el sistema se ve incrementado. Este resultado nuevamente puede ser considerado lógico, ya que la capacidad del sistema es directamente proporcional al ancho de banda utilizado.

El dimensionamiento de la capacidad de transmisión del enlace descendente en las condiciones de propagación adversas, generadas por entornos de alta movilidad, permite determinar el throughput máximo que puede ser alcanzado por el sistema en escenarios con estas características. El valor de throughput obtenido permitirá establecer la cantidad de recursos disponibles para la transmisión de información relacionada a las redes vehiculares y las aplicaciones de los sistemas de transporte inteligente.

Cabe mencionar que el análisis del dimensionamiento de la capacidad del sistema se realizó bajo la consideración de que el sistema funciona en modo Single Input Single Output (SISO), es decir se considera solamente una antena de transmisión y recepción tanto del lado de la estación base (eNodeB) como del terminal de usuario.

Conclusiones y Trabajo a Futuro

Conclusiones

En este trabajo, se realizó un análisis del funcionamiento del sistema de comunicación celular LTE en entornos de alta movilidad a través del estudio del comportamiento de los principales parámetros utilizados por LTE para caracterizar el canal de comunicaciones.

Los parámetros analizados fueron recolectados en un escenario tipo carretera en el que los terminales de usuario se encuentran en movimiento, esto se realizó con el objetivo de simular el escenario en el que se desplegarían redes de tipo vehicular, las cuales forman parte central de la estructura de los Sistemas de Transporte Inteligente.

Los parámetros recolectados, los cuales son utilizados para cuantificar la potencia, calidad y la relación señal a ruido de la señal recibida por el terminal de usuario, fueron modelados a través de un análisis estocástico, esto permitió caracterizar estadísticamente estos parámetros a través de funciones de probabilidad estándar los cuales pueden ser utilizadas para modelar el sistema LTE en entornos de alta movilidad de manera práctica.

Los resultados obtenidos del análisis estocástico permitieron comprender el comportamiento de estos parámetros en escenarios de tipo carretera, en los que los terminales de usuario presentan una alta dinámica producto de la movilidad a la que se encuentran sujetos. En estos resultados se pudieron observar las características de potencia y calidad de la señal recibida así como los efectos de desvanecimientos en la señal, provocados principalmente por los efectos multi trayectoria, los cuales provocan cambios abruptos en la potencia de la señal y como consecuencia afectan directamente a la relación señal a ruido.

Posterior a la caracterización de la señal, los parámetros analizados fueron utilizados para estimar la capacidad de transmisión del sistema en términos del máximo throughput que puede ser alcanzado por el canal descendente, esto se realizó con el objetivo de determinar la tasa de transmisión y la cantidad máxima de información que puede ser transmitida por LTE en escenarios de tipo carretera.

Para el cálculo del throughput de enlace descendente, se seleccionaron parámetros de configuración con características similares a las del operador celular del cual se obtuvieron las muestras de potencia y calidad de la señal. Esto se realizó con el objetivo de simular las condiciones más realistas posibles que permitieran obtener resultados finales confiables. Además se debe mencionar que el análisis considera que el sistema funciona en modo SISO, es decir se cuenta con una sola antena para la transmisión y la recepción de la señal.

Durante el procedimiento utilizado para dimensionar la capacidad de transmisión del sistema, se obtuvieron además parámetros considerados de gran importancia en el sistema LTE. Los parámetros obtenidos fueron los esquemas de modulación y codificación (MCS), el indicador de calidad de canal (CQI) y el porcentaje de bloques erróneos (BLER) los cuales fueron caracterizados estadísticamente como parte del análisis del comportamiento del sistema en entornos de alta movilidad.

Los resultados de throughput fueron obtenidos a través de un modelo matemático, implementado con el objetivo de considerar únicamente los recursos disponibles para la transmisión de información del usuario, por lo que todos los recursos requeridos para la transmisión de información de control del sistema no fueron tomados en cuenta.

El throughput final del enlace descendente fue obtenido para un determinado número de configuraciones de ancho de banda, trama TDD y subtrama especial. Como era de esperarse, los resultados permitieron observar que existe una estrecha relación entre la cantidad de recursos asignados al enlace descendente y la capacidad final de transmisión.

De manera general se puede concluir que las condiciones adversas de propagación presentes en entornos de alta movilidad afectan considerablemente la calidad y estabilidad de la señal recibida por los terminales de usuario, esto impacta de manera directa a la capacidad de transmisión del enlace descendente, el cual incluso al tener asignado la máxima cantidad de recursos del sistema, obtiene una tasa de transmisión promedio de 21Mbps, la cual es mucho menor a los aproximadamente 75Mbps que pueden ser alcanzados por el enlace descendente del sistema LTE en modo SISO.

Trabajo a futuro

Como trabajo a realizar a futuro se plantea el análisis del sistema cuando se implementa la tecnología MIMO. Esta modificación produciría teóricamente un incremento considerable en la capacidad de transmisión del sistema. Sin embargo el análisis debe considerar que el uso de múltiples antenas de transmisión y recepción también produciría inconvenientes en el tratamiento de la señal, ya que esta tecnología requiere de la implementación de procesos de sincronización más complejos, los cuales pueden verse afectados debido a la movilidad de los terminales de usuario y las condiciones adversas de propagación de canal.

Otro campo importante a tener en cuenta es el referente a las potenciales aplicaciones que podrían ser implementadas si se considera a la tecnología LTE como parte del sistema de comunicación de los Sistemas de Transporte Inteligente. Para esto se debería realizar un análisis detallado de los requerimientos técnicos de las aplicaciones mencionadas, con el objetivo de determinar la factibilidad de su uso bajo las condiciones establecidas en este estudio.

Finalmente, otro de los aspectos a considerar en estudios posteriores es el análisis de los procedimientos de movilidad de sistema LTE, en especial el procedimiento de Handover, el cual debe garantizar la comunicación entre el terminal de usuario y el sistema LTE de manera confiable mientras el terminal se encuentra en movimiento. Este análisis permitiría determinar de manera precisa la probabilidad de que los procesos de sincronización y señalización se realicen de manera exitosa así como establecer que los retardos que son requeridos por aplicaciones que requieren la transmisión de información en tiempo real pueden ser garantizados por el sistema LTE.

Referencias y Bibliografía

- [1] “LTE.” [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>. [Accessed: 22-Mar-2016].
- [2] Tara Ali-yahiya, *Understanding LTE and its Performance*. Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2011.
- [3] “3G and 4G LTE Cell Coverage Map - OpenSignal.” [Online]. Available: <http://opensignal.com/>. [Accessed: 30-Mar-2016].
- [4] V. Sevindik, J. Wang, O. Bayat, J. Weitzen, V. Sevindik, J. Weitzen, J. Wang, and O. Bayat, “Performance evaluation of a real long term evolution (LTE) network,” in *2012 IEEE 37th Conference on Local Computer Networks Workshops (LCN Workshops)*, 2012, pp. 679–685.
- [5] M. Arndt, “ETSI - Intelligent Transport,” *ETSI*. [Online]. Available: <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/intelligent-transport>. [Accessed: 21-Mar-2016].
- [6] M.-A. Phan, R. Rembarz, and S. Sories, “A Capacity Analysis for the Transmission of Event and Cooperative Awareness Messages in LTE Networks,” presented at the 18th ITS World Congress, 2011.
- [7] S. U. R. Qureshi, S. J. Nawaz, M. Patwary, M. Abdel-Maguid, and A. Kamar, “The impact of propagation environment and velocity on the handover performance of LTE systems,” in *2010 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, 2010, pp. 1–5.
- [8] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons, 2011.
- [9] “ETSI - GSM,” *ETSI*. [Online]. Available: <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/mobile/gsm>. [Accessed: 18-Apr-2016].
- [10] “3GPP2 Completes cdma2000 Specification.” [Online]. Available: http://www.3gpp2.org/Public_html/News/2000418_NewsRelease.cfm. [Accessed: 18-Apr-2016].
- [11] “ETSI - GPRS,” *ETSI*. [Online]. Available: <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/mobile/gprs>. [Accessed: 18-Apr-2016].
- [12] “ETSI - EDGE,” *ETSI*. [Online]. Available: <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/mobile/edge>. [Accessed: 18-Apr-2016].
- [13] “UMTS.” [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/103-umts>. [Accessed: 18-Apr-2016].
- [14] “W-CDMA.” [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/104-w-cdma>. [Accessed: 18-Apr-2016].
- [15] “HSPA.” [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/99-hspa>. [Accessed: 18-Apr-2016].
- [16] G. Mandyam and J. Lai, *Third-generation CDMA Systems for Enhanced Data Services*. Academic Press, 2002.
- [17] “IEEE-SA -IEEE Get 802 Program - 802.16: Broadband Wireless MANs.” [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/about/get/802/802.16.html>. [Accessed: 18-Apr-2016].
- [18] H. Holma and A. Toskala, *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. John Wiley & Sons, 2009.

- [19] “The Evolved Packet Core.” [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core>. [Accessed: 09-Apr-2016].
- [20] “TS 136 201 - V8.3.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Long Term Evolution (LTE) physical layer; General description (3GPP TS 36.201 version 8.3.0 Release 8) - ts_136201v080300p.pdf.” .
- [21] *LTE: nuevas tendencias en comunicaciones móviles*. Fundación Vodafone España, 2010.
- [22] “LTE Air Interface Training Manual Figuras Figuras.” [Online]. Available: https://www.academia.edu/6125761/LTE_Air_Interface_Training_Manual_Figuras_Figuras. [Accessed: 14-Apr-2016].
- [23] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Academic Press, 2011.
- [24] “IEEE 802.11, The Working Group Setting the Standards for Wireless LANs.” [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/11/>. [Accessed: 20-Apr-2016].
- [25] “Agilent: Application Note for 3GPP Long Term Ev..., en Test & Measurement Documentos | element14 Community.” [Online]. Available: <https://www.element14.com/community/docs/DOC-35667/1/agilent-application-note-for-3gpp-long-term-evolution-system-overview-product-development-and-test-challenges>. [Accessed: 19-Apr-2016].
- [26] “Wiley: An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications - Christopher Cox.” [Online]. Available: <http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-1119943531.html>. [Accessed: 19-Apr-2016].
- [27] “Wiley: LTE Signaling: Troubleshooting and Optimization - Ralf Kreher, Karsten Gaenger.” [Online]. Available: <http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0470689005.html>. [Accessed: 20-Apr-2016].
- [28] “TS 136 133 - V8.2.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for support of radio resource management (3GPP TS 36.133 version 8.2.0 Release 8) - ts_136133v080200p.pdf.” .
- [29] J.-F. Cheng and Y. Hu, “System and method of modulation and coding scheme adjustment for a lte shared data channel,” US20120177137 A1, 12-Jul-2012.
- [30] “LTE Resources by Sandesh Dhagle.” [Online]. Available: <http://dhagle.in/LTE>. [Accessed: 20-Apr-2016].
- [31] D. Jiang and L. Delgrossi, “IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments,” in *IEEE Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008*, 2008, pp. 2036–2040.
- [32] “Provisional road traffic estimates Great Britain: January to December 2015 - prov-road-traffic-estimates-jan-to-dec-2015.pdf.” .
- [33] “M1.” [Online]. Available: <http://motorwayarchive.ihtservices.co.uk/en/motorways/motorway-listing/m1/index.cfm>. [Accessed: 20-Apr-2016].
- [34] “Google Earth.” [Online]. Available: <https://www.google.com/earth/explore/products/plugin.html>. [Accessed: 26-Apr-2016].

-
- [35] C. Mehlführer, M. Wrulich, J. C. Ikuno, D. Bosanska, and M. Rupp, “Simulating the Long Term Evolution physical layer,” in *Signal Processing Conference, 2009 17th European*, 2009, pp. 1471–1478.
- [36] X. Chen, H. Yi, H. Luo, H. Yu, and H. Wang, “A novel CQI calculation scheme in LTE-A systems,” in *2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, 2011, pp. 1–5.
- [37] K. P. Burnham and D. R. Anderson, Eds., *Model Selection and Multimodel Inference*. New York, NY: Springer New York, 2004.
- [38] A. A. Neath and J. E. Cavanaugh, “The Bayesian information criterion: background, derivation, and applications,” *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.*, vol. 4, no. 2, pp. 199–203, Mar. 2012.
- [39] G. Schwarz, “Estimating the Dimension of a Model,” *Ann. Stat.*, vol. 6, no. 2, pp. 461–464, 1978.
- [40] *Akaike Information Criterion Statistics* | Y. Sakamoto | Springer. .
- [41] “SteelCentral Network Performance Management | Riverbed Modeler | Riverbed.” [Online]. Available: <http://es.riverbed.com/products/performance-management-control/network-performance-management/network-simulation.html>. [Accessed: 27-Apr-2016].

Glosario de Términos

16QAM	16-Quadrature Amplitude Modulation
3GPP	3rd Generation Partnership Project
3GPP2	3rd Generation Partnership Project 2
64QAM	64-Quadrature Amplitude Modulation

A

AIC	Akaike Information Criterion
AMPS	Advanced Mobile Phone System

B

BCCH	Broadcast Control Channel
BCH	Broadcast Channel
BIC	Bayesian Information Criterion
BLER	Block Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying

C

CCCH	Common Control Channel
CDF	Cumulative Distribution Function
CDMA	Code Division Multiple Access
CP	Cycle Prefix
CQI	Channel Quality Indicator
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSRS	Cell Specific Reference Signals

D

DCCH	Dedicated Control Channel
DL-SCH	Downlink Shared Channel
DRS	Demodulation Reference Signals
DTCH	Dedicated Traffic Channel

DwPTS	Downlink Pilot Time Slot
E	
E-UTRAN	Evolved–UMTS Terrestrial Radio Access Network
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution
eNodeB	E-UTRAN Node B
EPC	Evolved Packet Core
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
F	
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFT	Fast Fourier Transform
G	
GP	Guard Period
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
GTP-C	GPRS Tunneling Protocol – Control
GTP-U	GPRS Tunneling Protocol – User
H	
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA+	High Speed Packet Access Plus
HSS	Home Subscriber Server
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
I	
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IP	Internet Protocol

ISI	Inter Symbol Interference
ITS	Intelligent Transportantion Systems
L	
LTE	Long Term Evolution
M	
MAC	Medium Access Control
MBMS	Multimedia Broadcast/Multicast Services
MCCH	Multicast Control Channel
MCH	Multicast Channel
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
MTCH	Multicast Traffic Channel
MU-MIMO	Multiple User MIMO
N	
NAS	Non Access Stratum
NMT	Normadic Telephone System
N-LOS	Non Line of Sight
O	
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
P	
P-GW	Packet Gateway
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCCH	Paging Control Channel
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel

PCH	Paging Channel
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDF	Probability Density Function
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PDU	Packet Data Unit
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
PHY	Physical
PMCH	Physical Multicast Channel
PRACH	Physical Random Access Channel
PSS	Primary Synchronization Signals
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel

Q

QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
------	-------------------------------

R

RLC	Radio Link Control
RRC	Radio Resource Control
RS SNR	Reference Signal Signal to Noise Ratio
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RSSI	Received Signal Strength Indicator

S

S-GW	Serving Gateway
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
SISO	Single Input Single Output

SNR	Signal to Noise Ratio
SSS	Secondary Synchronization Signals
SU-MIMO	Single User MIMO
T	
TACS	Total Access Communications System
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TEID	Tunnel Endpoint Identifier
U	
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UpPTS	Uplink Pilot Time Slot
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Networks
V	
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2V	Vehicle to Vehicle
VoIP	Voice Over IP
W	
WCDMA	Wide Division Code Multiple Access
X	
X2AP	X2 Application Protocol

Apéndice

Código de Matlab

```

% Modelo para la estimación de throughput del enlace descendente

bandwidth = 20; % Ancho de banda en MHz (Valores permitidos = 1.4,3,5,10,15,20)
tdt_frame_structure = 5; % Estructura Trama TDD (Valores permitidos =
0,1,2,3,4,5,6)
special_sf_conf = 4; % Configuración Subtrama Especial(Valores permitidos =
0,1,2,3,4,5,6,7,8)
cycle_prefix = 0; % 0 = Normal CP ; 1 = Extendido CP
control_fi = 2; % Tamaño del PDCCH en símbolos OFDM (Valores permitidos = 1,2,3)
antenas = 1; % Numero de Antenas utilizado por el sistema
pbch = 288; % Tamaño del PBCH medido en Resource Elements transmitido cada 4
frames
pss = 64; % Tamaño del PSS medido en Resource Elements transmitido cada medio
subframe
sss = 64; % Tamaño del PSS medido en Resource Elements transmitido cada medio
subframe
pcfich = 16; % Tamaño del PDCFICH medido en Resource Elements transmitido cada
downlink subframe
phich = 12; % Tamaño del PHICH medido en Resource Elements transmitido cada
downlink subframe
reference_signals = 8; %Tamaño de las Señales de Referencia medido en Resource
Elements transmitido cada downlink subframe

% Configuraciones de Ancho de Banda

switch (bandwidth)
    case 1.4
        resource_blocks = 6;
    case 3
        resource_blocks = 15;
    case 5
        resource_blocks = 25;
    case 10
        resource_blocks = 50;
    case 15
        resource_blocks = 75;
    case 20
        resource_blocks = 100;
end

% Numero de Símbolos OFDM por subtrama

switch (cycle_prefix)
    case 0
        simbolos = 14;
    case 1
        simbolos = 12;
end

% Selección de la configuración de la trama TDD

switch (tdt_frame_structure)
    case 0
        downlink_sf = 2;
        uplink_sf = 6;
        s_sf = 2;

```

```

case 1
    downlink_sf = 4;
    uplink_sf = 4;
    s_sf = 2;
case 2
    downlink_sf = 6;
    uplink_sf = 2;
    s_sf = 2;
case 3
    downlink_sf = 6;
    uplink_sf = 3;
    s_sf = 1;
case 4
    downlink_sf = 7;
    uplink_sf = 2;
    s_sf = 1;
case 5
    downlink_sf = 8;
    uplink_sf = 1;
    s_sf = 1;
case 6
    downlink_sf = 3;
    uplink_sf = 5;
    s_sf = 2;
end

% Selección de la configuración de la subtrama especial

switch (special_sf_conf)
case 0
    if cycle_prefix == 0
        dw_pts = 3;           %No hay aportación de RE
        g_p = 10;
        up_pts = 1;
    else
        dw_pts = 3;           %No hay aportación de RE
        g_p = 8;
        up_pts = 1;
    end
case 1
    if cycle_prefix == 0
        dw_pts = 9;
        g_p = 4;
        up_pts = 1;
    else
        dw_pts = 8;
        g_p = 3;
        up_pts = 1;
    end
case 2
    if cycle_prefix == 0
        dw_pts = 10;
        g_p = 3;
        up_pts = 1;
    else
        dw_pts = 9;
        g_p = 2;
        up_pts = 1;
    end
case 3
    if cycle_prefix == 0
        dw_pts = 11;
        g_p = 2;
        up_pts = 1;

```

```

        else
            dw_pts = 10;
            g_p = 1;
            up_pts = 1;
        end
    case 4
        if cycle_prefix == 0
            dw_pts = 12;
            g_p = 1;
            up_pts = 1;
        else
            dw_pts = 3;           %No hay aportación de RE
            g_p = 7;
            up_pts = 2;
        end
    case 5
        if cycle_prefix == 0
            dw_pts = 3;           %No hay aportación de RE
            g_p = 9;
            up_pts = 2;
        else
            dw_pts = 8;
            g_p = 2;
            up_pts = 2;
        end
    case 6
        if cycle_prefix == 0
            dw_pts = 9;
            g_p = 3;
            up_pts = 2;
        else
            dw_pts = 9;
            g_p = 1;
            up_pts = 2;
        end
    case 7
        dw_pts = 10;
        g_p = 2;
        up_pts = 2;
    case 8
        dw_pts = 11;
        g_p = 1;
        up_pts = 2;
end

% Selección del tamaño del PDCCH en simbolos OFDM

if bandwidth == 1.4
    switch (control_fi)
        case 1
            pdcch_size = 2;
        case 2
            pdcch_size = 3;
        case 3
            pdcch_size = 4;
    end
end

if bandwidth > 1.4
    switch (control_fi)
        case 1
            pdcch_size = 1;
        case 2

```

```
        pdcch_size = 2;
    case 3
        pdcch_size = 3;
    end
end
end

% Análisis de los valores para los esquemas de modulación y codificación

mcs_values = 'EE_MCS.csv';
data{1} = importdata(mcs_values);
mcs_mat = cell2mat(data(1,1));

mcs_disconnection = 0;
mcs_0 = 0;
mcs_1 = 0;
mcs_2 = 0;
mcs_3 = 0;
mcs_4 = 0;
mcs_5 = 0;
mcs_6 = 0;
mcs_7 = 0;
mcs_8 = 0;
mcs_9 = 0;
mcs_10 = 0;
mcs_11 = 0;
mcs_12 = 0;
mcs_13 = 0;
mcs_14 = 0;
mcs_15 = 0;
mcs_16 = 0;
mcs_17 = 0;
mcs_18 = 0;
mcs_19 = 0;
mcs_20 = 0;
mcs_21 = 0;
mcs_22 = 0;
mcs_23 = 0;
mcs_24 = 0;
mcs_25 = 0;
mcs_26 = 0;
mcs_27 = 0;
mcs_28 = 0;

for i = 1 : length(mcs_mat)

mcs = mcs_mat(i,1);

    switch (mcs)
        case -1
            mcs_disconnection = mcs_disconnection + 1;
        case 0
            mcs_0 = mcs_0 + 1;
        case 1
            mcs_1 = mcs_1 + 1;
        case 2
            mcs_2 = mcs_2 + 1;
        case 3
            mcs_3 = mcs_3 + 1;
        case 4
            mcs_4 = mcs_4 + 1;
        case 5
            mcs_5 = mcs_5 + 1;
        case 6
```

```

        mcs_6 = mcs_6 + 1;
    case 7
        mcs_7 = mcs_7 + 1;
    case 8
        mcs_8 = mcs_8 + 1;
    case 9
        mcs_9 = mcs_9 + 1;
    case 10
        mcs_10 = mcs_10 + 1;
    case 11
        mcs_11 = mcs_11 + 1;
    case 12
        mcs_12 = mcs_12 + 1;
    case 13
        mcs_13 = mcs_13 + 1;
    case 14
        mcs_14 = mcs_14 + 1;
    case 15
        mcs_15 = mcs_15 + 1;
    case 16
        mcs_16 = mcs_16 + 1;
    case 17
        mcs_17 = mcs_17 + 1;
    case 18
        mcs_18 = mcs_18 + 1;
    case 19
        mcs_19 = mcs_19 + 1;
    case 20
        mcs_20 = mcs_20 + 1;
    case 21
        mcs_21 = mcs_21 + 1;
    case 22
        mcs_22 = mcs_22 + 1;
    case 23
        mcs_23 = mcs_23 + 1;
    case 24
        mcs_24 = mcs_24 + 1;
    case 25
        mcs_25 = mcs_25 + 1;
    case 26
        mcs_26 = mcs_26 + 1;
    case 27
        mcs_27 = mcs_27 + 1;
    case 28
        mcs_28 = mcs_28 + 1;
    end
end

freq_mcs = zeros (30,1);

freq_mcs(1,1) = mcs_disconnection / length(mcs_mat);
freq_mcs(2,1) = mcs_0 / length(mcs_mat);
freq_mcs(3,1) = mcs_1 / length(mcs_mat);
freq_mcs(4,1) = mcs_2 / length(mcs_mat);
freq_mcs(5,1) = mcs_3 / length(mcs_mat);
freq_mcs(6,1) = mcs_4 / length(mcs_mat);
freq_mcs(7,1) = mcs_5 / length(mcs_mat);
freq_mcs(8,1) = mcs_6 / length(mcs_mat);
freq_mcs(9,1) = mcs_7 / length(mcs_mat);
freq_mcs(10,1) = mcs_8 / length(mcs_mat);
freq_mcs(11,1) = mcs_9 / length(mcs_mat);
freq_mcs(12,1) = mcs_10 / length(mcs_mat);
freq_mcs(13,1) = mcs_11 / length(mcs_mat);
freq_mcs(14,1) = mcs_12 / length(mcs_mat);

```

```

freq_mcs(15,1) = mcs_13 / length(mcs_mat);
freq_mcs(16,1) = mcs_14 / length(mcs_mat);
freq_mcs(17,1) = mcs_15 / length(mcs_mat);
freq_mcs(18,1) = mcs_16 / length(mcs_mat);
freq_mcs(19,1) = mcs_17 / length(mcs_mat);
freq_mcs(20,1) = mcs_18 / length(mcs_mat);
freq_mcs(21,1) = mcs_19 / length(mcs_mat);
freq_mcs(22,1) = mcs_20 / length(mcs_mat);
freq_mcs(23,1) = mcs_21 / length(mcs_mat);
freq_mcs(24,1) = mcs_22 / length(mcs_mat);
freq_mcs(25,1) = mcs_23 / length(mcs_mat);
freq_mcs(26,1) = mcs_24 / length(mcs_mat);
freq_mcs(27,1) = mcs_25 / length(mcs_mat);
freq_mcs(28,1) = mcs_26 / length(mcs_mat);
freq_mcs(29,1) = mcs_27 / length(mcs_mat);
freq_mcs(30,1) = mcs_28 / length(mcs_mat);

% Número total de Resource Elements para el Enlace Descendente

if dw_pts > 3
    total_downlink = resource_blocks * ((downlink_sf * simbolos) + (dw_pts)) * 12
    * 100;
end

if dw_pts <= 3
    total_downlink = resource_blocks * (downlink_sf * simbolos) * 12 * 100;
end

% Número total de Resource Elements para los canales de control

total_pdcch = resource_blocks * (pdcch_size * (downlink_sf + s_sf)) * 12 * 100;
total_pbch = (pbch/4) * 100;
total_rs = (resource_blocks * (downlink_sf + s_sf) * 8 * antenas) * 3/4 * 100;
total_pss = pss * 2 * 100;
total_sss = pss * 2 * 100;

total_control_downlink = total_pdcch + total_pbch + total_rs + total_pss +
total_sss;

% Número total de Resource Elements disponibles

re_useful = total_downlink - total_control_downlink;

% Tablas de numero de bits por modulación y tasas de codificación

coding_rate = [0.11; 0.14; 0.17; 0.22; 0.28; 0.34; 0.40; 0.47; 0.54;
0.61; 0.30; 0.34; 0.39; 0.44; 0.50; 0.55; 0.59; 0.39;
0.42; 0.46; 0.51; 0.55; 0.60; 0.64; 0.69; 0.74; 0.78;
0.81; 0.95];

modulation = [2;2;2;2;2;2;2;2;2;2;4;4;4;4;4;4;4;6;6;6;6;6;6;6;6;6;6;6;6;6;6;6];

%Calculo del Throughput del enlace descendente

throughput = zeros (28,1);
throughput(1,1) = 0;

for i = 2 : 29
    throughput(i-1,1) = (re_useful * coding_rate(i-1,1) * modulation(i-1,1)) /
1000000;

```

```
end

throughput_per_mcs = zeros(length(mcs_mat),1);

for i = 1 : length (mcs_mat)

    mcs = mcs_mat(i,1);

    switch (mcs)
        case 1
            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(2,1) *
modulation(2,1)) / 1000000;
        case 2
            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(3,1) *
modulation(3,1)) / 1000000;
        case 3
            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(4,1) *
modulation(4,1)) / 1000000;
        case 4
            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(5,1) *
modulation(5,1)) / 1000000;
        case 5
            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(6,1) *
modulation(6,1)) / 1000000;
        case 6
            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(7,1) *
modulation(7,1)) / 1000000;
        case 7
            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(8,1) *
modulation(8,1)) / 1000000;
        case 8
            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(9,1) *
modulation(9,1)) / 1000000;
        case 9
            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(10,1) *
modulation(10,1)) / 1000000;
        case 10
            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(11,1) *
modulation(11,1)) / 1000000;
        case 11
            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(12,1) *
modulation(12,1)) / 1000000;
        case 12
            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(13,1) *
modulation(13,1)) / 1000000;
        case 13
            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(14,1) *
modulation(14,1)) / 1000000;
        case 14
            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(15,1) *
modulation(15,1)) / 1000000;
        case 15
            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(16,1) *
modulation(16,1)) / 1000000;
        case 16
            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(17,1) *
modulation(17,1)) / 1000000;
        case 17
            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(18,1) *
modulation(18,1)) / 1000000;
        case 18
            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(19,1) *
modulation(19,1)) / 1000000;
        case 19
```

```
        throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(20,1) *
modulation(20,1)) / 1000000;
        case 20
            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(21,1) *
modulation(21,1)) / 1000000;
            case 21
                throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(22,1) *
modulation(22,1)) / 1000000;
                case 22
                    throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(23,1) *
modulation(23,1)) / 1000000;
                    case 23
                        throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(24,1) *
modulation(24,1)) / 1000000;
                        case 24
                            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(25,1) *
modulation(25,1)) / 1000000;
                            case 25
                                throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(26,1) *
modulation(26,1)) / 1000000;
                                case 26
                                    throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(27,1) *
modulation(27,1)) / 1000000;
                                    case 27
                                        throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(28,1) *
modulation(28,1)) / 1000000;
                                        case 28
                                            throughput_per_mcs(i,1) = (re_useful * coding_rate(29,1) *
modulation(29,1)) / 1000000;
                                            end
                                        end
                                    end
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
end
```