



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INTRODUCCIÓN DE REDES LTE CON  
AGREGACIÓN DE PORTADORAS**

TESIS

Que para obtener el título de

**INGENIERO EN  
TELECOMUNICACIONES**

PRESENTA:

HUGO MIGUEL ESCALONA RÍOS

DIRECTOR DE TESIS:

CARLOS GABRIEL GIRÓN GARCÍA



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## ***Introducción***

Hace una década las llamadas telefónicas, mensajes de texto, así como mensajes multimedia era el modo como interactuaban las personas entre sí, uno de los factores que limitaban el uso de nuevas aplicaciones eran las características técnicas de las terminales o dispositivos móviles. Además, los estándares como GSM y WCDMA estaban siendo implementados por los operadores de redes móviles en distintas partes del mundo con pocas funcionalidades.

Sin embargo, con la evolución de los procesadores, memorias de almacenamiento, y las mejoras desplegadas en los equipos de radio permitieron desarrollar un nuevo estándar en el enlace de radio con servicios dirigidos completamente a IP, lo cual conllevó a la modificación de la red troncal. Esto a su vez ayudó a la introducción de teléfonos inteligentes y al desarrollo de aplicaciones dedicadas que son utilizadas casi en tiempo real, explotando al máximo el uso de datos móviles con la carga/descarga de información.

Debido la demanda de datos móviles el estándar de LTE fue desarrollado por la 3GPP, y comenzó a desplegarse en 2009 para disminuir la congestión de tráfico de datos que los operadores móviles experimentaban en la red. Después de la convergencia de LTE en diferentes países, ahora se busca contar con una infraestructura capaz de satisfacer la demanda de datos tanto en la parte de radio como la red troncal, para esto la 3GPP ha desarrollado nuevas propuestas para mejorar las redes móviles existentes.

Con la introducción de LTE en las redes móviles se pretende reemplazar los estándares anteriores, por lo tanto, en este trabajo se abordarán las características de este nuevo estándar y las mejoras que son incluidas en la versión 10, donde LTE con Agregación de Portadoras es añadida para obtener una mayor eficiencia del espectro radioeléctrico, altas tasas de transmisión de datos y aumento de capacidad en LTE.

Por otro lado, se abordarán los factores primordiales que limitan la tasa de transmisión de datos y los requerimientos para implementar LTE a nivel de hardware. Además, se realizarán mediciones de potencia y pruebas del desempeño del estándar en una red LTE comercial. Finalmente, como parte aplicativa del presente trabajo se hará una estimación de la cantidad de llamadas de VoLTE que puede soportar una celda de LTE con diferentes parámetros de configuración para conocer las ventajas de este nuevo estándar.

# Índice

<b>1. Capítulo I Fundamentos de LTE</b>	<b>1</b>
1.1. Arquitectura EPS	1
1.1.1. EUTRAN.	3
1.1.2. Evolved Packet Core	6
1.2. Protocolos de radio LTE.	8
1.2.1. Plano de usuario	8
1.2.2. Plano de control	9
1.3. MAC Medium-Access Control	10
1.3.1. Canales de transporte	12
1.3.2. Hybrid ARQ	13
1.3.3. LTE Scheduling.	15
1.3.3.1. Best CQI Scheduling	15
1.3.3.2. Round Robin Scheduling	16
1.4. Capa física.	17
<b>2. Capítulo II Asignación del espectro y operación de LTE.</b>	<b>20</b>
2.1. Espectro radioeléctrico y asignación de frecuencias en LTE	20
2.1.1. Bandas de frecuencia utilizadas en LTE.	22
2.1.2. Modo de operación FDD.	24
2.1.2.1. Separación dúplex en FDD.	24
2.1.2.2. Asimetría del tráfico.	26
2.1.2.3. Bandas de frecuencia en FDD	26
2.1.3. Modo de operación TDD.	29
2.1.3.1. Bandas de frecuencia de LTE en TDD.	29
2.2. Esquema de transmisión y recepción LTE (DL/UL).	30
2.2.1. Efecto multitrayectoria en el canal inalámbrico.	30
2.2.2. Técnica de acceso al medio OFDM.	31
2.2.3. OFDMA/SC-FDMA en el dominio del tiempo.	33
2.3. Tasa de transmisión alcanzadas en LTE.	36
2.3.1. Modulaciones utilizadas en LTE.	36
2.3.2. Antenas MIMO.	38
2.3.3. Categorías de los dispositivos móviles	41
2.3.4. Ancho de banda.	42
2.3.5. Calculo de tasa de transmisión en LTE.	42

<b>3. Capítulo III Redes LTE con agregación de portadoras.</b>	46
3.1. Crecimiento del tráfico de datos móviles en los últimos años.	46
3.2. Requerimientos de LTE-Advanced.	48
3.3. Configuración LTE con agregación de portadoras	49
3.3.1. Limitaciones del ancho de banda en E-UTRAN.	51
3.3.2. Terminología utilizada en la configuración de CA.	52
3.4. Modos en LTE.	54
3.4.1. Activación de LTE con agregación de portadoras.	56
3.5. Scheduling cruzado en Carrier Aggregation.	58
3.6. Categorías de los Ues en LTE CA.	59
3.7. Throughput en LTE Carrier Aggregation.	62
<b>4. Capítulo IV Equipos y Mediciones utilizadas en LTE.</b>	66
4.1. Hardware utilizado en el ENodeB.	66
4.2. Tipo de torres utilizadas en comunicaciones móviles.	71
4.3. Identificación de la celda en LTE.	73
4.3.1. Señales de Referencia PSS y SSS.	73
4.3.2. PCI	74
4.4. Mediciones de potencia en el Ue.	77
4.5. Identificación de banda de frecuencia en LTE.	80
4.6. Medición de parámetros en el Ue para LTE.	81
4.7. Mapeo de elementos de recurso y desempeño en LTE.	87
4.7.1. Throughput en el enlace descendente LTE.	89
4.8. Codecs AMR utilizados en VoIP	95
4.8.1. Cálculo de llamadas VoIP en LTE	97
<b>Conclusiones</b>	107
<b>Abreviaciones y acrónimos</b>	109
<b>Apéndice A. Código Matlab</b>	114

## ***Índice de figuras***

### **Capítulo I**

Figura	1.1	Esquema del Evolved Packet System.	3
Figura	1.2	Arquitectura de EUTRAN (LTE).	5
Figura	1.3	Arquitectura de Evolved Packet Core (SAE).	7
Figura	1.4	Pila de protocolos de RAN.	9
Figura	1.5	Mapeo de canales lógicos, transporte y físicos en el enlace descendente.	12
Figura	1.6	Mapeo de canales lógicos, transporte y físicos en el enlace ascendente.	13
Figura	1.7	Best CQI scheduling con usuarios en el borde de la celda.	16
Figura	1.8	Representación gráfica Round Robin Scheduling.	17

### **Capítulo II**

Figura	2.1	Esquema de transmisión FDD	24
Figura	2.2	Separación dúplex FDD.	25
Figura	2.3	Separación dual dúplex en FDD.	25
Figura	2.4	Esquema de transmisión TDD.	29
Figura	2.5	(a) Representación de una subportadora en el dominio del tiempo. (b) Representación el espectro de una subportadora OFDM en el dominio de la frecuencia.	32
Figura	2.6	Representación de las subportadoras LTE.	32
Figura	2.7	Distribución de los bloques de recurso en el enlace descendente y ascendente	33
Figura	2.8	Esquema de tramas, subtramas y símbolos de LTE en el dominio del tiempo.	34
Figura	2.9	Prefijo cíclico dentro de un símbolo OFDM.	35
Figura	2.10	Representación de un bloque de recurso.	36
Figura	2.11	Representación de la modulación adaptativa.	37

### **Capítulo III**

Figura	3.1	Crecimiento de datos móviles en 2015.	46
Figura	3.2	Pronóstico del tráfico de datos móviles en 2020 (30.6 exabytes por mes).	47
Figura	3.3	Tráfico móvil global por tipo de conexión.	48
Figura	3.4	Configuración Carrier Aggregation intra-band continua.	50
Figura	3.5	Configuración Carrier Aggregation intra-band discontinua.	50

Figura 3.6	Configuración Carrier Aggregation inter-band.	51
Figura 3.7	Acrónimos utilizados en las configuraciones LTE CA.	53
Figura 3.8	Tracking Area.	55
Figura 3.9	Representación de Agregación de Portadoras simétrica en enlace descendente y ascendente.	56
Figura 3.10	Arquitectura de los algoritmos utilizados en la administración de recursos de radio y estructura de los protocolos de radio.	57
Figura 3.11	LTE CA Scheduling y Cross Carrier scheduling.	59
Figura 3.12	Throughput en LTE CA utilizando CCs de 20 MHz y modulación 64 QAM.	64

## Capítulo IV

Figura 4.1	RRU y sus funciones.	67
Figura 4.2	Unidad digital de LTE y sus características.	68
Figura 4.3	Unidades de radio al nivel del piso.	68
Figura 4.4	CPRI utilizando fibra óptica	69
Figura 4.5	RET.	69
Figura 4.6	CSR (Cell Site Router).	70
Figura 4.7	Gabinete Ericsson RBS 6102.	71
Figura 4.8	Torre tipo monoplo.	72
Figura 4.9	Torre autosoportada.	72
Figura 4.10	Torre arriostrada.	72
Figura 4.11	Ubicación de la PSS en la trama de LTE.	73
Figura 4.12	PCIs en un ENodeB con tres celdas.	75
Figura 4.13	Mapeo de señales de referencia en el bloque de recurso.	76
Figura 4.14	Mapeo de señales de referencia MIMO 4x4.	77
Figura 4.15	Código acceso a Field Test mode LG G3- D852	82
Figura 4.16	Modo de acceso al "Field Test" LG G3-D852.	83
Figura 4.17	Resultados en LTE en modo "Field Test"	83
Figura 4.18	Mediciones de LTE usando la aplicación NetMonster.	85
Figura 4.19	Prueba de throughput del enlace descendente y ascendente en LTE.	86
Figura 4.20	Mapeo de canales de LTE en los elementos de recurso para el enlace descendente.	91
Figura 4.21	Gráfica throughput LTE enlace descendente 20 MHz MIMO 2x2	95
Figura 4.22	Llamadas VoLTE enlace descendente 20 MHz MIMO 2x2	100
Figura 4.23	Gráfica de llamadas VoLTE enlace descendente 20 MHz MIMO 2x2.	101
Figura 4.24	Throughput enlace descendente LTE FDD 5 MHz MIMO 2x2	102
Figura 4.25	Llamadas VoLTE enlace descendente 5 [MHz] y MIMO 2x2	103
Figura 4.26	Gráfica de llamadas en VoLTE enlace descendente 5 [MHz] y MIMO 2x2.	104

## ***Índice de tablas***

### **Capítulo II**

Tabla 2.1	Rango de frecuencias definido por la UIT para las ondas radioeléctricas.	21
Tabla 2.2	Clasificación del Espectro Radioeléctrico en México de acuerdo LFTR Art. 55.	22
Tabla 2.3	Bandas de frecuencia utilizadas en IMT.	22
Tabla 2.4	Bandas de frecuencia utilizadas en FDD.	28
Tabla 2.5	Bandas de frecuencia utilizadas en TDD.	30
Tabla 2.6	Modulaciones utilizadas en LTE.	36
Tabla 2.7	Tabla de esquemas de modulación y tasa de código	38
Tabla 2.8	Categorías del Ue.	41
Tabla 2.9	Número de bloques de recurso de acuerdo al ancho de banda.	42

### **Capítulo III**

Tabla 3.1	Características de LTE, LTE Advanced y IMT-Advanced.	49
Tabla 3.2	Bandas de frecuencia en LTE y anchos de banda.	52
Tabla 3.3	Bandas de frecuencia en LTE y anchos de banda.	54
Tabla 3.4	Parámetros establecidos de la capa física en el enlace descendente por categoría de Ue.	60
Tabla 3.5	Parámetros establecidos de la capa física en el enlace ascendente por categoría de Ue.	61
Tabla 3.6	Asociación de categorías del Ue y el número de CCs en LTE CA.	62
Tabla 3.7	Throughput LTE CA con diferentes CCs y configuraciones MIMO.	63

### **Capítulo IV**

Tabla 4.1	Valores de RSRP.	78
Tabla 4.2	Valores de RSRQ.	79
Tabla 4.3	Rango de EARFCNs por banda de frecuencia.	81
Tabla 4.4	Especificaciones de LTE del procesador Qualcomm MSM8974AC Snapdragon 801.	82
Tabla 4.5	Elementos de recurso Subtramas 1,2,3,4,6,7,8,9.	92
Tabla 4.6	Elementos de recurso Subtramas 0 y 5.	92
Tabla 4.7	Codecs AMR y AMR-WB en VoIP.	96
Tabla 4.8	Estructura del paquete de VoIP en LTE.	97

# Capítulo I

## Fundamentos de LTE.

### 1.1. Arquitectura EPS (Evolved Packet System).

A finales de 1998 la asociación 3GPP (Third Generation Partnership Project) fue formada con el propósito de homogenizar los estándares y especificaciones de las comunicaciones móviles de la tercera generación. Distintas organizaciones del mundo desarrolladoras de estándares formaron esta asociación para evitar que se trabajara en paralelo en la investigación e implementación de las comunicaciones móviles y a su vez que éstas fueran estandarizadas.

Esta entidad es integrada por las siguientes organizaciones ARIB, CCSA, ETSI, ATIS, TTA y TTC. A partir de ese momento la 3GPP comenzó a trabajar en las especificaciones para la tercera generación 3G de los sistemas móviles que aún estaba en desarrollo para poder ser implementada.

Desde el año 2004 la 3GPP trabajó en la evolución de la red de acceso 3G en conjunto con diversas organizaciones, operadores e institutos de investigación para proponer una modificación a la UTRAN (Universal Terrestrial Radio Acces Network) donde ciertos requerimientos fueron identificados por este grupo de trabajo y de esta manera formarían parte del nuevo estándar LTE. Los requisitos u objetivos que se pretendían alcanzar con la integración de un nuevo estándar fueron los siguientes:

- Reducir el costo por bit.
- Incrementar el número de servicios al menor costo.
- Flexibilidad del uso de las bandas de frecuencia.
- Simplificar arquitectura de interfaces.
- Considerar el consumo de potencia de la terminal.

Así que se decidió modificar la parte de la interfaz de radio y de la arquitectura de la red de acceso radio de 3G para cumplir con ciertos requerimientos [1]:

- Incrementar la tasa pico de datos hasta 100 Mbps en el enlace descendente y 50 Mbps en el enlace ascendente.
- Incrementar la tasa de transmisión de bits en el borde de la celda manteniendo la localización de los sitios instalados hasta hoy.
- Mejorar la eficiencia del espectro.
- Disminuir la latencia en la red de acceso radio por debajo 10 ms.
- Ancho de banda escalable 5, 10, y posiblemente 15 MHz.

En Septiembre del 2007 la familia de 3GPP se extendió con la introducción de EUTRAN (Evolved UTRAN) donde en el artículo de trabajo fue “3G Long Term Evolution-Evolved Packet System RAN”, participaron 50 compañías en el desarrollo del estándar de LTE [2]. La 3GPP desde que trabajó en las especificaciones para los diferentes sistemas de las redes móviles ha dividido la arquitectura de estos estándares en dos, que son denominados como la red de acceso radio o conocida como RAN (Radio Access Network) y la red troncal que soporta el tráfico de la red identificada como el Core.

El estándar LTE fue dividido en dos elementos de trabajo los cuales fueron LTE (Long Term Evolution) como el nombre del estándar y SAE (System Architecture Evolution), el primero tenía como objetivo cubrir la parte de la red de acceso radio mientras que el último la evolución de la red del núcleo de paquetes o red troncal. El resultado del trabajo de estos grupos fue desarrollar las especificaciones con una nueva arquitectura denominada EPS (Evolved Packet System) que estaría conformada por Evolved UTRAN y Evolved Packet Core que es así como se identificaron a la red de acceso radio y la red troncal respectivamente.

El nuevo sistema EPS fue diseñado para la transmisión de paquetes de datos mediante el acceso a la banda ancha móvil de una manera más eficiente a comparación de lo que se lograba con los sistemas anteriores de 3G, así que la estandarización de este sistema como tal fue incluida por la 3GPP en la versión 8 con el fin de mejorar la parte de RAN con el uso de un eficiente espectro radioeléctrico y una red conmutada de paquetes en la parte del Core.

En la Fig. 1.1 se muestra un esquema general del sistema EPS donde EUTRAN y EPC están separados uno del otro pues cada arquitectura se compone de nodos con funciones completamente diferentes dentro de la parte de acceso y la red troncal, sin embargo, en conjunto completan todo el sistema Evolved Packet System para poder establecer conexiones exitosas entre los dispositivos móviles.

También es importante tomar en cuenta que este nuevo sistema está basado en un núcleo completamente IP lo cual implica que todos los dispositivos móviles siempre deberán estar conectados a internet. Con esta nueva evolución las llamadas serán realizadas sobre IP (VoIP), tomando ventaja sobre las tecnologías anteriores donde la red troncal era diseñada utilizando la conmutación de circuitos de voz para realizar llamadas de voz entonces, la idea es omitir esta parte y utilizar solamente un núcleo puramente de paquetes.

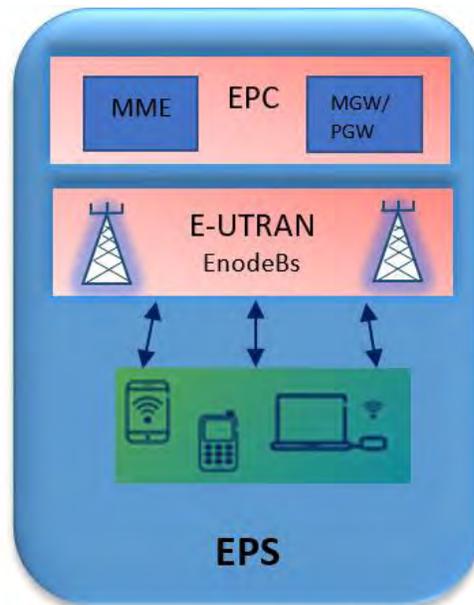


Figura 1.1 Esquema del Evolved Packet System.

### 1.1.1. EUTRAN

Una vez concluida la investigación de la 3GPP se llegó a la conclusión que se desarrollaría un procedimiento el cual se centraría en la tecnología de acceso radio llevando una alta tasa de transmisión de datos, menor latencia y optimización de los paquetes de la red de acceso radio asegurando la compatibilidad con las anteriores tecnologías de acceso como GSM, WCDMA/HSPA modificando 3G UTRAN de la siguiente manera:

- Interfaz de radio de la capa física (enlace descendente/enlace ascendente)
  - Flexibilidad en el ancho de banda con hasta 20 MHz con la introducción de nuevos esquemas de transmisión y tecnología de arreglos de antenas.
- Interfaz de radio de capa 2 y 3
  - Optimización de la señalización.
- Arquitectura UTRAN:
  - Rediseñar la arquitectura de red UTRAN enfocándose en los nodos e interfaces.
- Problemas del enlace de radiofrecuencia:
  - Análisis de los parámetros de potencia e interferencias en el enlace de radio.

El diseño de la arquitectura de EUTRAN que es la parte de radio en LTE está conformada por distintos nodos e interfaces y estos cuentan a su vez con funciones específicas para lograr comunicaciones entre los nodos y las terminales móviles.

Sin embargo, antes de comenzar a definir las funciones de estos elementos, es necesario conocer la función de la red de acceso radio.

En las radiocomunicaciones móviles la parte de RAN (Radio Access Network) se define como el enlace de radio desde la estación base hasta las terminales móviles por lo tanto abarca especificaciones relacionadas a; protocolos, esquemas de transmisión y recepción, codificación, arreglos de antenas etc., con el fin de hacer más eficiente el acceso a los recursos de la red. Por otra parte, RAN ayuda al establecimiento de conexiones con las terminales móviles además de asignar principalmente los recursos de radio disponibles para los usuarios que lo soliciten.

Es importante considerar que cuando se estén trabajando con redes móviles la parte de la red troncal no influye directamente en el enlace de radio que existe entre la estación base y la terminal móvil pues el núcleo opera de diferente manera, más adelante se abordarán las condiciones para tener un buen enlace de radio.

E-UTRAN está compuesto por diferentes nodos e interfaces a continuación se muestran los componentes básicos de la red de acceso radio:

Ue (User Equipment): La abreviatura de Ue se identifica en LTE como el nodo o dispositivo que utilizan los usuarios para comunicarse con la red también conocido como terminal móvil. Hoy en día existen diferentes dispositivos móviles, sin embargo, de acuerdo a las especificaciones que contengan es como se conectan a determinada tecnología de acceso (GSM, WCDMA o LTE).

EnodeB: Este es un nodo lógico que se encarga de todas las funciones contenidas dentro del enlace de radio administrando el acceso a la red de los usuarios dentro de una celda. Generalmente la implementación de un EnodeB consta con más de una celda consta tres sectores cada una y en diferentes bandas de frecuencia limitando la cobertura a cierta zona geográfica.

LTE Uu: Esta es la interfaz lógica entre el Ue y el EnodeB, por lo que es parte del acceso de radio a todos los usuarios de la red.

X2: Interfaz lógica utilizada para el establecimiento de la comunicación entre EnodeBs. A diferencia de la arquitectura de la red de acceso radio de las tecnologías anteriores, en LTE los nodos se pueden comunicar entre sí, haciendo más eficiente el handover<sup>1</sup> entre los EnodeBs. Mientras lógicamente representan un enlace punto a punto entre EnodeBs, la conexión física no necesariamente tiene que ser un enlace punto a punto.

---

<sup>1</sup> Handover o handoff se define como la transferencia de la conexión de un usuario a otro canal de radio debido a que la calidad de servicio es mejor en dicho canal. Existen diferentes tipos de handover que en los siguientes capítulos se presentarán.

S1: Interfaz lógica entre el EnodeB y el EPC, provee una interconexión apuntando entre EUTRAN y el EPC.

EUTRAN consiste de EnodeBs que proveen un plano de usuario (PDCP/RLC/PHY) y un plano de control (RRC) que son protocolos utilizados entre el Ue y el EnodeB para comunicarse con los demás elementos de la red.

El plano de usuario contiene protocolos encargados de transportar solamente datos del usuario a través de la red, utilizando un servicio denominado como ERAB (EUTRAN Radio Access Bearer) que es un túnel lógico establecido para transportar el tráfico del usuario entre el EnodeB y el Ue. Por otro lado, el plano de control gestiona las conexiones a la red, control de seguridad, autenticación, configuración de bearers, además de la administración de los recursos de radio y la movilidad.

En la figura 1.2 se muestra la arquitectura de EUTRAN con los nodos e interfaces que lo componen. Comenzando desde la parte inferior se encuentran los Ues que se conectan a los EnodeBs y la interfaz lógica es identificada como LTE Uu. Posteriormente se aprecia que los EnodeBs son conectados uno a otro por medio de la interfaz X2. Finalmente, la interfaz S1 conecta cada EnodeB con la red troncal. El MME (Mobility Management Entity) es el nodo dentro de la red troncal EPC que recibe información de señalización de control además de permitir la comunicación entre EnodeBs, mientras que el S-GW maneja la información de tráfico del usuario. Como se ve en la figura 1.2, la línea continua representa que la comunicación que es establecida utilizando el protocolo de plano de usuario y la línea punteada representa el plano de control.

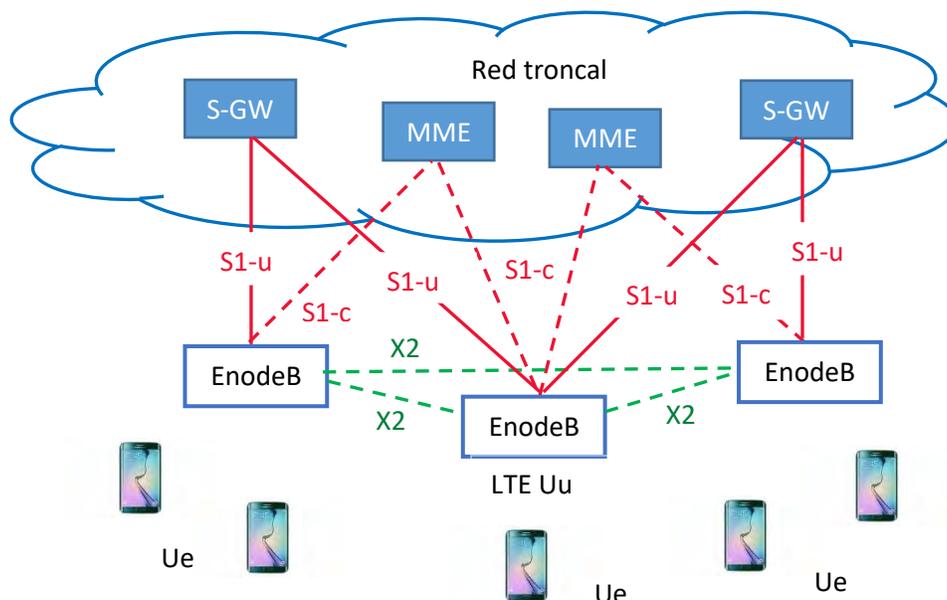


Figura 1.2 Arquitectura de EUTRAN (LTE).

### 1.1.2. Evolved Packet Core (EPC)

El EPC se encarga de proporcionar los recursos necesarios para establecer una conexión de extremo a extremo, este sistema permite comunicarse con redes externas para consultar privilegios del usuario móvil, así como la tarificación o control de pagos, por lo tanto, la red troncal también se encarga de proveer diversos servicios a la red de acceso EUTRAN.

Una de las ventajas de que la red troncal no esté integrada dentro de la parte de RAN es que se pueden manejar múltiples tecnologías compartiendo el mismo núcleo, además permite que la red tenga escalabilidad y flexibilidad cuando se requiera realizar una optimización en RAN porque la mayor parte de las optimizaciones se realizan dentro de esta división.

El EPC es una evolución de la red troncal del servicio datos GPRS (General Packet Radio Service) que es utilizado tanto en GSM y WCDMA/HSPA. Esta nueva red troncal fue diseñada para tener acceso al dominio de paquetes sin acceder al dominio de conmutación de circuitos ya que LTE es un entorno completamente IP. Por consiguiente, la conmutación de circuitos es omitida para esta tecnología añadido nodos que componen la red troncal también son distintos en comparación con las tecnologías anteriores.

La figura 1.3 presenta los nodos que componen a la arquitectura EPC, a continuación, se describen cada uno de estos elementos con sus funciones principales:

**MME (Mobility Management Entity):** Este nodo tiene como función la administración del plano de control del EPC siendo el responsable de administrar las conexiones de los beares hacia la terminal, maneja las claves de seguridad y los estados de transición del Ue, así como la administración de la movilidad.

**S-GW (Serving Gateway):** Este nodo es el encargado de conectar los datos del usuario entre el EPC con LTE RAN. El S-GW proporciona al usuario movilidad cuando el Ue está en movimiento entre diferentes ENodeBs, cabe mencionar que este nodo también funciona de la misma manera para otras tecnologías de la 3GPP (GSM/GPRS y HSPA).

**PDN-GW (Packet Data Network Gateway):** Este nodo es el encargado de conectar a redes externas como lo es internet o redes privadas, también asigna direcciones IP a cada Ue y provee calidad de servicio (QoS) basándose en las políticas de tarificación y control del nodo PCRF (Policy and Charging Rules Function). Además de esto se encarga de proveer movilidad para las tecnologías de acceso radio que no pertenecen a la 3GPP como lo es CDMA2000, permitiendo conectarse al EPC.

**PCRF (Policy and Charging Rules Function):** Como su nombre lo indica este nodo es el responsable del manejo de la QoS y tarificación del servicio.

HSS (Home Subscriber Service): Es un nodo que contiene una base de datos con información de los suscriptores y es utilizado para establecer llamadas o sesiones.

S3: Interfaz lógica que permite al usuario intercambiar de información conectándose a otras tecnologías de acceso de la 3GPP.

S4: Interfaz lógica utilizada para el control y movilidad entre la red troncal GPRS (2G y 3G) para anclarse al S-GW.

S5: Interfaz lógica definida entre el S-GW y el P-GW, ésta es utilizada dentro del plano de usuario estableciendo un túnel y a su vez permitiendo la movilidad del Ue en caso de que se quisiera conectar a otro P-GW.

S6a: Interfaz lógica que define la conexión entre MME y el nodo HSS donde se lleva a cabo la transferencia de suscripción, autenticación y autorización para que el usuario tenga acceso al EPC.

Gx: Interfaz lógica que se encarga de la transferencia de la QoS en base a las políticas y cargos del PCRF dentro del PDN GW.

S10: Interfaz lógica para las interconexiones entre MMEs para permitir el handover del Ue entre MMEs.

S11: Interfaz lógica entre el MME y el Serving GW usada para intercambiar mensajes de señalización con información del usuario cuando hace una solicitud para conectarse a la red o en el procedimiento de handover.

S12: Interfaz lógica que es utilizada entre UTRAN y el Serving GW para soportar el plano de usuario estableciendo un túnel entre el Ue.

SGi: Es la interfaz lógica que conecta al P-GW y con la red de paquetes de datos. La red de paquete de datos puede ser un operador externo o una red de datos privada.

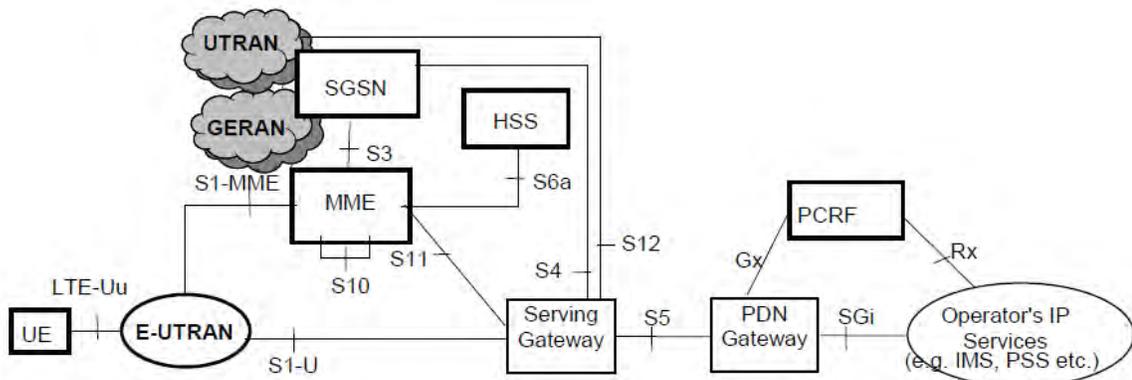


Figura 1.3 Arquitectura de Evolved Packet Core (SAE) [3].

## **1.2. Protocolos de radio LTE.**

En todo sistema de comunicación antes de establecer una conexión entre los elementos de la red se necesita tener un conjunto de reglas para transmitir y recibir información, la comunicación debe ser sincronizada para evitar colisiones o pérdida de datos, es por esto que se deben implementar protocolos de comunicación en cada uno de los sistemas de comunicación. El modelo OSI (Open System Interconnection) es utilizado como referencia para las arquitecturas de la interconexión de los sistemas de comunicación por lo similar a este se usa un conjunto de protocolos definidos en LTE donde la arquitectura se encuentra dividida en capas encargadas de funciones específicas para la interconexión de diferentes nodos en la red.

En la sección anterior se describieron dos tipos de protocolos utilizados en LTE que son; el plano de usuario y el plano de control los cuales son implementados para establecer la comunicación entre cada uno de los nodos de la arquitectura EPS. Como se mostró diferentes nodos componen la arquitectura EPS y a su vez varios protocolos de comunicación son definidos para que exista una comunicación entre estos. Por el momento se describirán los protocolos utilizados en EUTRAN, donde se realizan las solicitudes de acceso al ENodeB con el fin de mantener activos los servicios para múltiples usuarios.

### **1.2.1. Plano de usuario**

En la figura 1.4 se muestra la pila de protocolos para la comunicación del Ue y el ENodeB en la parte de EUTRAN, la cual permite transportar el plano de usuario y de control entre ambos nodos estableciendo reglas específicas para transmitir/recibir la información. Un conjunto de subcapas que son definidas de la siguiente manera:

- **PDCP (Packet Data Convergence Protocol):** Este protocolo se encarga de comprimir el encabezado de IP para reducir el número de bits que serán transmitidos sobre la interfaz de radio utilizando un algoritmo de compresión llamado ROHC (Robust Header Compression) mismo que fue utilizado para las tecnologías de comunicación móvil anteriores. Además, PDCP ofrece seguridad a la información transmitida, cifrando los datos enviados tanto en el receptor como en el transmisor y a su vez lleva una secuencia de entrega y eliminación de datos duplicados para el handover. A cada radio bearer configurado en la terminal se le asocia una entidad PDCP.
- **RLC (Radio Link Control):** Esta subcapa tiene como funciones principales la segmentación y concatenación, retransmisión, detección de datos duplicados y secuencia de la entrega para capas superiores. La capa de desempeña funciones similares a la capa de transporte del modelo OSI. La capa RLC provee servicio a PDCP por lo tanto también existe una entidad RLC por cada radio bearer configurado en la terminal.

- MAC (Medium Access Control): Esta capa se encarga del manejo de la multiplexación de canales lógicos, hybrid-ARQ y scheduling para el enlace ascendente y el enlace descendente. El protocolo hybrid-ARQ está presente en las terminales transmisoras y receptoras del protocolo de MAC además de que corrige los datos erróneos transmitidos que pueden presentarse debido a la calidad del enlace de radio. MAC provee servicios a la capa RLC en forma de canales lógicos.
- PHY (Physical Layer): Esta capa se encarga del manejo de codificación/decodificación, modulación/demodulación, arreglos de antenas y entre otras funciones de la capa física que ofrecen servicio a la capa MAC para el transporte de los canales.

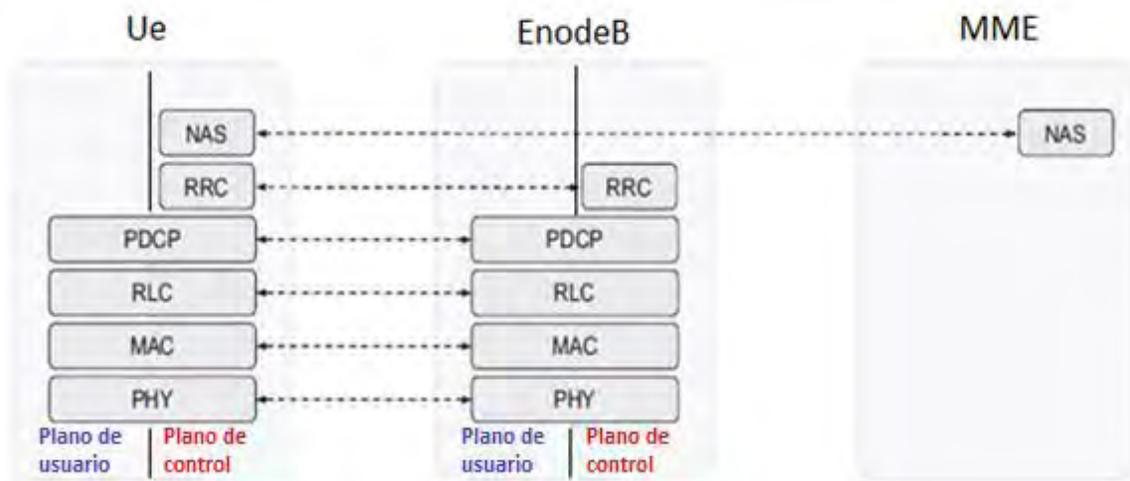


Figura 1.4 Pila de protocolos de RAN. [4]

### 1.2.2. Plano de control

El plano de control es un protocolo de transporte utilizado para establecer el formato de los mensajes de señalización que existen entre los nodos y la terminal móvil. Particularmente en EUTRAN su función es la de controlar los mensajes para movilidad y seguridad de la información enviada por el Ue. En la figura 1.4 se aprecia que los protocolos incluidos dentro del plano de control son añadidos; el protocolo de RRC (Radio Resource Control) y el NAS (Non-Access Startum) además de contar con los mismos protocolos del plano de usuario.

El protocolo de RRC se encarga de transmitir los mensajes de señalización por lo tanto está orientado a la administración de las conexiones de los Ue que intentan conectarse o que se encuentran conectados a la red, ya que como su nombre lo indica controla los recursos de radio. Básicamente entre las principales funciones del protocolo RRC se encuentran las siguientes:

- Envío de mensajes de broadcast<sup>2</sup> de información del sistema para comunicarse con una celda.
- Transmisión de mensajes de paging<sup>3</sup> originados desde el MME para notificar a la terminal acerca de solicitudes de conexión entrantes.
- Funciones de movilidad como lo es reelección de celdas.
- Reportes y configuración de las medidas de radiofrecuencia.
- Administración de las conexiones incluyendo los beares y movilidad entre LTE. Configuración de los parámetros necesarios para comunicación entre la terminal y la RAN.
- Manejo de las capacidades del Ue. Cuando una conexión es establecida el Ue anuncia sus capacidades para operar dentro las especificaciones de LTE.

El protocolo de NAS (Non Access Stratum) brinda soporte para poder establecer comunicación del Ue y el EPC, a diferencia del AS (Access Stratum) el cual es utilizado entre la terminal y la parte de RAN. NAS es una de las entidades más importantes dentro de los protocolos ya que permite comunicar al Ue con el MME para la autenticación, así como la seguridad de cada uno de los usuarios que pretenden acceder a los servicios de la red. A su vez este ayuda a las terminales a la creación de sesiones y a mantener la conectividad a internet [5].

Cabe mencionar que para que los diferentes procedimientos de NAS sean utilizados el MME necesita conocer la información del Ue es por esto que existe un procedimiento para conectarse a la red una vez que el Ue es encendido y durante el acceso a la red.

### **1.3. MAC Medium-Access Control**

Todo sistema de comunicación se compone de un transmisor, receptor y un canal por donde viaja la información hasta llegar a su destino, para las comunicaciones móviles se cuenta con miles de usuarios buscando acceder a la red al mismo tiempo mientras que los ENodeBs tratan de asignar los recursos disponibles para el establecimiento de una conexión entre la terminal y las demás estaciones base o simplemente para transmitir o recibir datos de usuario.

En particular el protocolo de MAC (Medium Access Control) se encarga de la administración y control del canal de radio utilizando canales lógicos para brindar a su vez servicio a la capa RLC. Estos canales lógicos son clasificados en dos dependiendo del tipo de información que transporten; si se transmite información de control y configuración para operar dentro del sistema de LTE el canal será definido como canal de control, por el contrario, si transporta datos de usuario se conoce

---

<sup>2</sup> Broadcast: Es una forma de transmisión de información donde un transmisor envía los mismos datos a todos los usuarios que se encuentran dentro de la red.

<sup>3</sup> Los mensajes de paging son utilizados en las comunicaciones móviles para localizar a un solo usuario dentro de la red y de esta manera recibir información de la estación base.

como canal de tráfico. A continuación, se describirán los canales lógicos más importantes de la capa MAC.

### **Canales lógicos de control.**

BCCH (Broadcast Control Channel): Canal utilizado para la transmisión de información del sistema desde la red hacia todas las terminales de una celda, ya que las terminales necesitan conocer los parámetros configurados dentro del sistema antes de acceder a la red logrando que la terminal se comporte adecuadamente en la celda.

PCCH (Paging Control Channel): Este canal es utilizado para localizar a las terminales dentro de una celda cuya localización es desconocida. Un mensaje de paging es transmitido en múltiples celdas para conocer la ubicación de la terminal y enviar mensajes o si el Ue tiene una llamada entrante.

CCCH (Common Control Channel): Canal usado para la transmisión de información de control.

DCCH (Dedicated Control Channel): Este canal como su nombre lo indica es utilizado para transmitir información de control a una sola terminal o viceversa desde la terminal hacia la estación es decir establece una configuración individual para las terminales.

### **Canales lógicos de tráfico.**

DTCH (Dedicated Traffic Channel): Es utilizado para la transmisión de datos de usuario ya sea desde la terminal o la estación base.

Una vez que los canales lógicos fueron identificados ahora se definirán los servicios que la capa MAC utiliza durante el establecimiento de comunicación con la capa física. Estos servicios se conocen como canales de transporte y son definidos por cómo y con qué características los datos son transmitidos sobre la interfaz de radio. Los datos dentro de un canal de transporte son organizados en bloques de transporte. Y a su vez es definido un intervalo de transmisión de tiempo (TTI por sus siglas en ingles), que soporta como máximo transmitir un bloque de transporte sobre la interfaz de radio en el enlace ascendente o en el enlace descendente. Sin embargo, si son implementadas antenas MIMO (Multiple Input-Multiple Output) puede haber hasta dos bloques de transporte dentro del mismo intervalo de transmisión de tiempo.

### 1.3.1. Canales de transporte

Existe un formato de transporte que se asocia a cada bloque de transporte el cual especifica cómo serán transmitidos los datos sobre la interfaz de radio. Entre la información que ayuda a esta transmisión se encuentran; el tamaño de bloque de transporte, la modulación, codificación y el mapeo de antenas. Considerando los parámetros que componen el formato de transporte, la tasa de transmisión de datos variará de acuerdo al formato de transporte que sea seleccionado.

#### Canales de transporte en el enlace descendente.

Broadcast Channel (BCH): Este canal tiene un formato de transporte fijo dado por las especificaciones. Es utilizado para la transmisión de partes de la información de sistema del BCCH también es conocido como maestro del bloque de información (MIB por sus siglas en inglés).

Paging Channel (PCH): Este canal es utilizado para la transmisión de la información de paging desde el canal lógico PCCH. Además de soportar un método de recepción discontinua (DRX por sus siglas en inglés) el cual permite que la terminal ahorre batería despertando sólo para recibir los PCH en determinados instantes de tiempo.

Downlink Shared Channel (DL-SCH): Es el canal principal de transporte para la transmisión de los datos en el enlace descendente para LTE. Tiene características claves en LTE como la adaptación dinámica de la tasa de transmisión, programación del canal dependiente en el dominio del tiempo y frecuencia, hybrid ARQ con combinaciones suaves y multiplexación espacial, al igual que el BCH soporta la función de DRX.

DL-SCH es también usado para la transmisión de las partes de información del sistema del BCCH que no es mapeado con el BCH. Puede haber múltiples DL-SCHs dentro de una celda, uno por terminal programado en un TTI y en algunas subtramas, un DL-SCH transporta información de control.

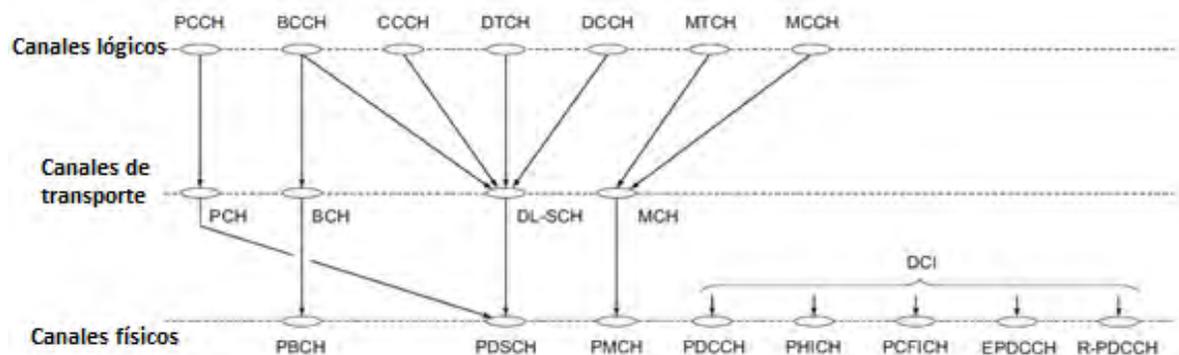


Figura 1.5 Mapeo de canales lógicos, transporte y físicos en el enlace descendente. [4]

## Canales de transporte en el enlace ascendente.

Uplink Shared Channel (UL-SCH): Este canal es la contraparte del DL-SCH, es decir que contiene las mismas funciones con la única diferencia que es utilizado para la transmisión de datos en el enlace ascendente.

Radio Access Channel (RACH): Es definido como un canal de transporte, aunque no transporta bloques de transporte ya que es utilizado para la sincronización del Ue con el ENodeB en el enlace ascendente además de controlar las contenciones de las solicitudes de conexiones RRC.

Una vez que se describieron los canales y las funciones de cada uno de estos es necesario conocer el mapeo de los canales lógicos con los canales de transporte, y a su vez los canales de transporte hacen un mapeo con los canales físicos como se puede apreciar en la figura 1.5 y 1.6 que muestran que existen diferentes canales dependiendo si es en el enlace descendente o en el enlace ascendente. Hasta ahora no se han definido los canales físicos, pero más adelante se abordarán al definir la capa física.

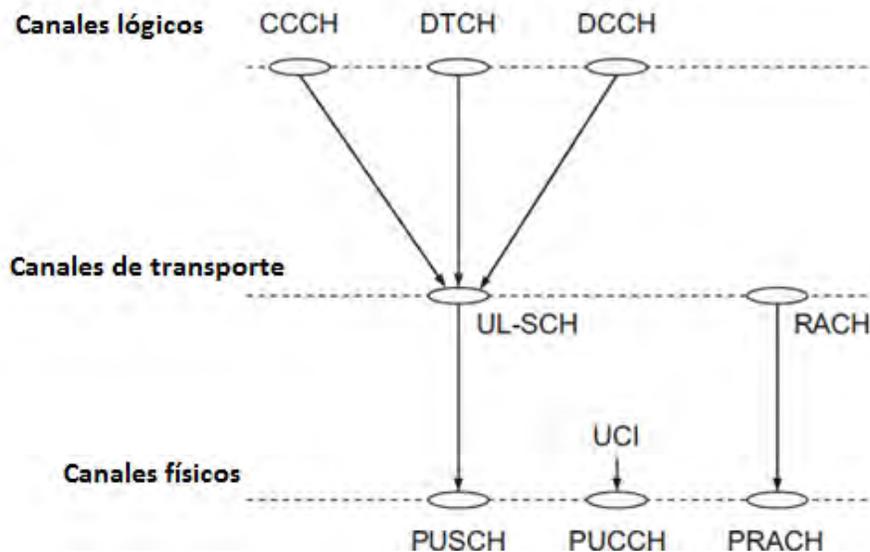


Figura 1.6 Mapeo de canales lógicos, transporte y físicos en el enlace ascendente. [6]

### 1.3.2. Hybrid ARQ.

En la mayoría de las comunicaciones debe de haber confiabilidad de los datos, es decir, asegurar que el receptor ha recibido la información y que fue exitosa la comunicación, pues las transmisiones sobre canales inalámbricos están sujetas a errores o variaciones del canal que afectan a la señal recibida. Por ello todo sistema de comunicación inalámbrica emplea una forma de corrección de errores llamada FEC (Forward Error Correction) la cual utiliza códigos correctores de errores donde el principio básico se encuentra enviando redundancia en la señal transmitida

agregando bits de paridad a la información antes de ser transmitida. Los bits de paridad son calculados basándose en los bits de información usando un método de codificación que permite corregir los errores de la información dentro del receptor.

Otra forma de manejar los errores de transmisión es usando ARQ (Automatic Repeat Request). En este esquema el receptor usa un código de detección de errores llamado CRC (Cyclic Redundancy Check), para detectar si el paquete recibido contiene errores o no. En caso de que no existan errores en el paquete recibido, los datos recibidos son declarados sin errores y un mensaje de ACK (Acknowledgement) es enviado al receptor. De otra forma, si un error es detectado, el receptor descarta los datos recibidos y enviando mensaje negativo de NACK (No Acknowledgement) al transmisor se solicita que la misma información sea retransmitida [8].

LTE emplea una combinación de codificación de FEC y ARQ, por lo cual es conocido como hybrid ARQ usando códigos FEC para corregir un subconjunto de errores mientras que la detección de errores ayuda a detectar los errores que no pueden ser corregidos. Los paquetes que no se pueden corregir son descartados y el receptor solicita retransmisiones solo de los paquetes corruptos. Los esquemas de ARQ son incorporados alrededor de un código CRC para la detección de errores y utiliza códigos convulsionales o turbo códigos para la corrección de errores.

El protocolo Hybrid-ARQ funciona en forma similar al TCP ya que provee confiabilidad contra los errores de transmisión que pueden presentarse dentro del enlace inalámbrico. Una de las ventajas de este protocolo es que las retransmisiones son rápidas, además utiliza muchos servicios permitiendo una o múltiples retransmisiones a la vez. Las retransmisiones Hybrid-ARQ son soportadas solo en los canales de transporte utilizados para el tráfico de usuario que son DL-SCH y UL-SCH por lo tanto proporciona confiabilidad de los datos de usuario en forma bidireccional.

Básicamente como ya se explicó anteriormente el receptor hace un intento para decodificar el bloque de transporte e informa al transmisor acerca del resultado de la operación de decodificación enviando un bit de acknowledgement el cual indica si la decodificación fue exitosa o si el bloque de transporte necesita ser retransmitido.

Para la operación de hybrid-ARQ existe varios procesos trabajando en paralelo por lo cual el receptor debe conocer a que proceso está asociado el mensaje de acknowledgement, esto se logra sincronizando el proceso con cada mensaje de acknowledgement.

El uso de múltiples procesos de Hybrid-ARQ en paralelo, para cada usuario puede ocasionar que los datos pierdan la secuencia de la información sin embargo existe un mecanismo de reordenamiento que es manejado por la capa RLC a través de

cada portadora [9]. Es decir, las retransmisiones de hybrid-ARQ son independientes de acuerdo a cada componente de la portadora.

El scheduler que se encuentra en el ENodeB conoce la entidad Hybrid-ARQ de manera que determinará si una terminal necesita una retransmisión o no.

El RLC es también capaz de solicitar retransmisiones al igual que el mecanismo de hybrid-ARQ. La razón de tener dos mecanismos de retransmisión es para proveer redundancia. Estos mecanismos se encuentran en el ENodeB con el fin de obtener un tiempo de entrega de datos menor además de brindar confiabilidad en los datos.

Entre las principales funciones que son de interés de hybrid-ARQ es que corrige errores de transmisión que son asociados al ruido o variaciones del canal, pues hay que tomar en cuenta los obstáculos, la velocidad de la terminal y las señales externas presentes en los enlaces inalámbricos, ocasionando que la terminal tenga dificultades para recibir los datos, por lo que este protocolo ayuda a reducir los errores debidos al entorno del enlace de radiofrecuencia que existe entre la terminal y el ENodeB.

### **1.3.3. LTE Scheduling.**

El scheduler de LTE es el encargado de asignar los recursos de tiempo y frecuencia a los usuarios en cada instante de tiempo, el scheduler se encuentra en el ENodeB asignando estos recursos para el enlace descendente como para el enlace ascendente el cual es parte de la capa MAC. Una de las funciones principales de éste es que determina a que usuarios se asignan los recursos en cada TTI (1 ms) para la recepción de los datos sobre el DL-SCH o UL-SCH basándose en las condiciones de radio instantáneas.

#### **1.3.3.1. Best CQI scheduling.**

Existen diferentes formas de hacer la asignación de los recursos de LTE y dependiendo del diseño de la red es seleccionado el método que se adecue a las necesidades de los usuarios y del operador, el más conocido es el CQI Scheduling. En LTE constantemente el ENodeB envía señales de referencia a las terminales que son usadas por cada Ue para reportar las condiciones del enlace de radio por medio del CQI. Entre mayor sea el CQI mejor es la calidad del canal, de esta forma el ENodeB determina como serán distribuidos los recursos de radio en este método.

Ya que las condiciones de radio son diferentes e independientes en los enlaces de radio dentro de la celda, en cierto instante la calidad del enlace de radio será buena y alcanzará un determinado nivel pico en el cual el esquema de modulación adaptativa beneficiará al Ue proporcionando una modulación de alto orden, así como una alta tasa de código por consiguiente las tasas de transmisión de datos también serán altas en determinados instantes de tiempo. Este método ayuda a

tomar ventaja sobre las variaciones rápidas de la calidad del canal de radio ya que la distribución de los recursos se realiza en función de la calidad del enlace de radio de cada Ue.

Como ya se explicó el entorno de radio varia de diferente manera, por lo que si todas las terminales experimentan similares condiciones en el canal y si existen grandes variaciones de las condiciones del canal instantáneas debidas al efecto multipath causarían que los usuarios tuvieran la misma tasa de transmisión de datos.

Cualquier variación instantánea de la tasa de datos es rápida y no es notable para el usuario. Sin embargo, en la practica la distancia entre el ENodeB y el Ue es un factor importante que se debe considerar ya que el desvanecimiento de la señal será diferente dependiendo de la ubicación por ende, una terminal podría estar un largo periodo de tiempo con una buena señal y alta tasa de datos mientras que, las terminales que se encuentra en el borde de la celda (una calidad de la señal baja) difícilmente se hará el scheduling o asignación de recursos, lo cual es una desventaja con el resto de las terminales que tienen buenas condiciones de radio.

En la figura 1.8 se muestra un ejemplo donde el scheduler es utilizado para planificar a dos diferentes usuarios con diferente calidad de canal promedio. El mismo usuario es planificado virtualmente todo el tiempo. Aunque resulta en un sistema con alta capacidad, esta situación no es frecuentemente aceptable desde el punto de vista de calidad de servicio ya que se pretende que todos los usuarios accedan a los recursos de LTE de manera uniforme, es por esto que se han diseñado otros métodos de scheduling que serán explicados a continuación.

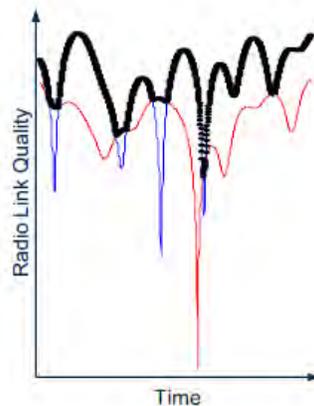


Figura 1.7 Best CQI scheduling con usuarios en el borde de la celda. [4]

### 1.3.3.2. Round Robin Scheduling.

Otro método de scheduling es el de Round Robin el cual no toma en cuenta el CQI así que se podría decir que la distribución de recursos es uniforme, donde cada terminal toma un turno para acceder a los recursos sin importar la calidad del canal. Este método es justo porque las terminales tienen acceso a los recursos de radio la misma cantidad de tiempo, mientras que, los usuarios que se encuentran en el borde de la celda ofrecen una mejor calidad de servicio. Sin embargo, las conexiones podrían ser intermitentes y el ENodeB podría seguir distribuyendo recursos a los usuarios que no tienen una buena señal por lo que la celda procesa más tráfico, esto conlleva tener problemas de capacidad dentro de la celda afectando el desempeño del enlace de radio y la tasa de transmisión (figura 1.9).

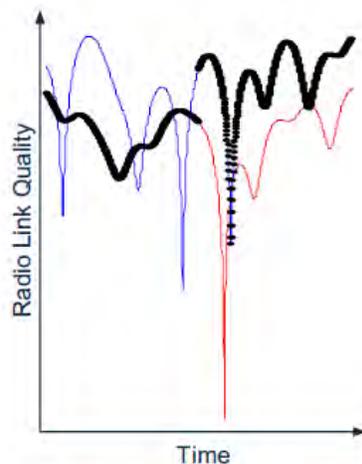


Figura 1.8 Representación gráfica Round Robin Scheduling. [4]

#### 1.4. Capa física.

La capa física provee servicios a la capa MAC mediante los canales de transporte donde se realiza un mapeo con los canales físicos. También se encarga de la codificación, procesamiento de hybrid-ARQ, modulaciones, MIMO y del mapeo de la señal con los recursos en tiempo y frecuencia. Más adelante se abordarán detalladamente las funciones de esta capa ya que son fundamentales para la operación de LTE, por el momento se presentarán los canales físicos.

Un canal físico corresponde a un conjunto de recursos en tiempo y frecuencia utilizados para la transmisión de un canal de transporte realizando un mapeo entre el canal de transporte con su correspondiente canal físico. Cabe mencionar que también hay canales físicos que no tienen relación con los canales de transporte, sin embargo, son utilizados para procesar información de control.

En el enlace descendente DCI (Downlink Control Information) transmiten a la terminal la información necesaria para una apropiada recepción y decodificación de la transmisión de datos. Mientras que el enlace ascendente UCI (Uplink Control Information) se usa en el scheduler y el protocolo hybrid-ARQ junto con la información acerca de la terminal.

### **Canales físicos en el enlace descendente.**

**PDSCH (Physical Downlink Shared Channel):** Este es el canal principal utilizado para la transmisión de datos unicast, además de la transmisión de información de paging.

**PBCH (Physical Broadcast Channel):** Canal encargado de transportar parte de la información del sistema, cuando la terminal requiere acceder a la red.

**PDCCH (Physical Downlink Control Channel):** Como su nombre lo indica este canal es utilizado para transmitir información de control en el enlace descendente, principalmente para decisiones de scheduling, requeridas para la recepción de PDSCH, y para otorgar scheduling habilitando la transmisión en el PUSCH.

**PHICH (Physical Hybrid-ARQ Indicator Channel):** Canal que transporta el mensaje de acknowledge del hybrid-ARQ para indicar a la terminal si un bloque de transporte debe ser retransmitido o no.

**PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel):** Es un canal que provee a las terminales la información necesaria para decodificar el conjunto de PDCCHs. Hay que considerar que sólo hay un PCFICH por portadora.

### **Canales físicos en uplink.**

**PUSCH (Physical Uplink Shared Channel):** Este canal es utilizado en el enlace ascendente, siendo la contraparte del PDSCH. Existe como máximo un PUSCH por portadora, así como por terminal.

**PUCCH (Physical Uplink Control Channel):** Canal utilizado por la terminal para enviar mensajes de acknowledge de hybrid-ARQ, indicando al ENodeB si el bloque de transporte del enlace descendente fue recibido exitosamente o no, para enviar reportes del estado del canal ayudando al scheduling del canal dependiente en el enlace descendente, y para solicitar recursos para transmitir datos del enlace ascendente. Existe a lo máximo un PUCCH por terminal.

**PRACH (Physical Random-Access Channel):** Este canal es usado para el acceso aleatorio cuando las terminales hacen una solicitud para poder acceder a los recursos de la red.

La importancia de presentar los canales de lógicos, transporte y físicos se basa en que cada uno de estos son mapeados unos a otros ayudando a transportar información de tráfico o de señalización en la parte de LTE. Hay que recordar que los canales manejan información como; corrección de errores, adaptación del enlace de radio, localización de las terminales, bandas de frecuencia, parámetros de la celda, información de tráfico de los usuarios etc., por lo que es necesario conocer su desempeño dentro de EUTRAN de tal forma de entender cómo se lleva a cabo la comunicación entre los nodos (1.5 y 1.6).

## REFERENCIAS CAPITULO I:

- [1] 3GPP, Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN), Technical Report 25.913, version 8.0.0, Release 8, Enero, 2009.
- [2] Ericsson, LTE/SAE System Overview, Release 9, 2014.
- [3] 3GPP, LTE; General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access, Technical Specification 23.401, version 8.14.0, Release 8, Figure 4.2.1-1 Non-roaming architecture for 3GPP accesses, Junio 2011.
- [4] Dahlman, E., Parkvall, S., Sköld, J., *4G: LTE/LTE-Advanced for MobileBroadband*, 2a ed., Oxford, Elsevier, 2014.
- [5] 3GPP, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2, Technical Specification 36.300, version 12.3.0, Release 12, Septiembre 2014.
- [6] Remy, Jean-Gabriel, LTE Standards, Wiley, 2014.

## Capítulo II

# Asignación del espectro y operación de LTE.

### 2.1. Espectro radioeléctrico y asignación de frecuencias en LTE.

El canal de comunicación es el medio que se encarga de proporcionar la conexión entre el transmisor y el receptor. Existen diferentes tipos medios de comunicación, pero en particular dentro de las comunicaciones inalámbricas el espacio libre es utilizado para la propagación de las ondas electromagnéticas, las cuales son radiadas por antenas. La característica ondulatoria de la radiación electromagnética se muestra en la ecuación 2.1 la velocidad de propagación de la onda en el vacío es igual a la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ), por lo cual la latencia es imperceptible por los usuarios de las redes móviles.

$$c = f * \lambda \quad (2.1)$$

*f* : Frecuencia de oscilación

*λ*: Longitud de onda

*c*: Velocidad de propagación de la onda en el vacío.

Existe una gama de frecuencias y longitudes de onda clasificadas de acuerdo al tipo de radiación electromagnética, por ejemplo; los rayos gamma, rayos X, la luz visible, infrarroja, las ondas radioeléctricas etc. Los distintos tipos de radiación y sus características se encuentran en el espectro electromagnético. Para las radiocomunicaciones es definido un rango de frecuencias de todo el espectro electromagnético el cual es establecido por la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) en el Reglamento de Radiocomunicaciones, esta división de la parte del espectro radioeléctrico se encuentra de los 3 kHz y los 3000 GHz con una subdivisión de nueve bandas de frecuencias, cada una de las bandas se designa por un número entero en orden creciente empezando del número 4 hasta el 12 (tabla 2.1), esta tabla muestra el rango de frecuencias utilizado en las radiocomunicaciones [1].

Número de la banda	Símbolos (en inglés)	Gama de frecuencias (excluido el límite inferior, pero incluido el superior)	Subdivisión métrica correspondiente	Abreviaturas métricas para las bandas
4	VLF	3 a 30 kHz	Ondas miriamétricas	B.Mam
5	LF	30 a 300 kHz	Ondas kilométricas	B.km
6	MF	300 a 3 000 kHz	Ondas hectométricas	B.hm
7	HF	3 a 30 MHz	Ondas decamétricas	B.dam
8	VHF	30 a 300 MHz	Ondas métricas	B.m
9	UHF	300 a 3 000 MHz	Ondas decimétricas	B.dm
10	SHF	3 a 30 GHz	Ondas centimétricas	B.cm
11	EHF	30 a 300 GHz	Ondas milimétricas	B.mm
12		300 a 3 000 GHz	Ondas decimilimétricas	

NOTA 1: La «banda N» (N = número de la banda) se extiende de  $0,3 \times 10^N$  Hz a  $3 \times 10^N$  Hz.

NOTA 2: Prefijos: k = kilo ( $10^3$ ), M = mega ( $10^6$ ), G = giga ( $10^9$ ).

Tabla 2.1 Rango de frecuencias definido por la UIT para las ondas radioeléctricas. [1]

La UIT actualmente está conformada por 193 países y casi 800 entidades del sector privado e instituciones académicas funcionando como regulador internacional de las telecomunicaciones entre las distintas empresas y administraciones. En la parte de las radiocomunicaciones se encarga de la atribución del espectro radioeléctrico, orbitas satelitales, además de que los servicios de telecomunicaciones no generen emisiones no deseadas o interferencias unos a otros. Para esto, la UIT en el Artículo 5.S. del Volumen I del Reglamento de Radiocomunicaciones establece el CIAF (Cuadro Internacional de Atribución de Frecuencias) donde son definidos las condiciones y criterios para la identificación de bandas de frecuencias del espectro utilizadas en determinados servicios.

En las CMR (Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones) se toman las resoluciones y recomendaciones para actualizar el Reglamento de Radiocomunicaciones. Sin embargo, debido a que cada país cuenta con diferentes servicios y bandas de frecuencias. Para el caso de México se tiene publicado el CNAF (Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias) donde se encuentran las bandas de frecuencia disponibles con las especificaciones necesarias para operar diferentes servicios de radiocomunicaciones.

En términos de la LFTR (Ley Federal de Telecomunicaciones y Radiodifusión) publicada el 14 de julio de 2014, el Instituto Federal de Telecomunicaciones el cual se encarga de administrar y planificar el espectro radioeléctrico, así como los recursos orbitales que son dominio público de la Nación. En el artículo 55 de la LFTR se han clasificado las bandas de frecuencia del espectro radioeléctrico de la siguiente manera:

Clasificación de bandas de frecuencia del Espectro Radioeléctrico en México (LFTR)	
Espectro	Descripción
Uso Libre	Son aquellas bandas de frecuencia de acceso libre, que pueden ser utilizadas por el público en general, bajo los lineamientos o especificaciones que establezca el Instituto, sin necesidad de concesión o autorización
Usos determinados	Son aquellas bandas de frecuencia que pueden ser utilizadas para los servicios atribuidos en el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias; a través de concesiones para uso comercial, social, privado y público, definidas en el artículo 67.
Protegido	Aquellas bandas de frecuencia atribuidas a nivel mundial y regional a los servicios de radionavegación y de aquellos relacionados con la seguridad de la vida humana, así como cualquier otro que deba ser protegido conforme a los tratados y acuerdos internacionales. El Instituto llevará a cabo las acciones necesarias para garantizar la operación de dichas bandas de frecuencia en condiciones de seguridad y libre de interferencias perjudiciales.
Reservado	Es aquel cuyo uso se encuentre en proceso de planeación y, por tanto, es distinto al determinado, libre o protegido.

Tabla 2.2 Clasificación del Espectro Radioeléctrico en México de acuerdo LFTR Art. 55.

### 2.1.1. Bandas de frecuencia utilizadas en IMT.

Existe un rango de frecuencias que es asignado para recibir y transmitir dentro de los sistemas IMT (International Mobile Telecommunications). Los arreglos de frecuencia son recomendados por la UIT con el fin de tener un uso eficiente del espectro para la entrega de los servicios IMT. Esto permite minimizar el impacto con otros sistemas o servicios en estas bandas y mejorar el crecimiento de estos sistemas.

Las bandas de frecuencia que se muestran en la tabla 2.3 son identificadas para ser utilizadas en sistemas IMT en el Reglamento de Radiocomunicaciones. De acuerdo a las regiones puede haber ciertas desviaciones o variaciones basándose en las políticas regulatorias de cada país. Sin embargo, este plan de frecuencias es utilizado en la mayor parte del mundo para los servicios de redes móviles.

Band (MHz)
450-470
698-960
1 710-2 025
2 110-2 200
2 300-2 400
2 500-2 690
3 400-3 600

Tabla 2.3 Bandas de frecuencia utilizadas en IMT. [2]

Retomando la ecuación 2.1 se aprecia que la longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia entonces, entre mayor sea la frecuencia la longitud de onda será mucho menor. El hecho de que se utilicen bandas de frecuencias altas es debido a que el tamaño de la antena es proporcional a la longitud de onda. Por ejemplo, si se quisiera transmitir/recibir una señal de 100 [kHz] se necesitaría una antena de dimensiones en el orden de 3 km (ver ecuación 2.2) lo cual no es factible y sería ineficiente implementar este tipo de antena en las redes móviles.

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \left[ \frac{m}{s} \right]}{100 [kHz]} \rightarrow \lambda = 3 [km]$$

A pesar de que hay diversos tipos de antenas para operar a frecuencias bajas, estos arreglos aún son considerablemente grandes (en el orden de los metros). Durante el desarrollo de las redes móviles la idea principal era disminuir las dimensiones del dispositivo móvil a fin de obtener mayor practicidad, operatividad y movilidad. Por lo tanto, dentro de los sistemas IMT las bandas de frecuencia utilizadas son altas. Aunque habría que considerar que el uso de altas de frecuencias implica mayor potencia de transmisión y la cobertura se ve afectada debido a que la señal se atenúa más rápido en comparación con las frecuencias bajas.

Dentro de las comunicaciones móviles el dispositivo móvil y la estación base transmiten utilizando diferentes frecuencias para evitar interferencia dentro del canal de comunicación. Es por esto que son definidos dos términos utilizados cuando se lleva la comunicación entre la estación base y el dispositivo móvil y viceversa.

Enlace descendente (downlink): Enlace de comunicación definido para la conexión desde la estación base hacia el dispositivo móvil.

Enlace ascendente (uplink): Enlace de comunicación definido para la conexión desde el dispositivo móvil a la estación base.

A partir de este momento se hará referencia al enlace descendente como downlink y al enlace ascendente como uplink, debido a que la documentación y especificaciones fueron definidas utilizando ambos términos.

Las antenas pueden recibir y transmitir ondas radioeléctricas en un rango de frecuencia utilizando la misma antena. Es decir, mientras la antena recibe una onda radioeléctrica a su vez es capaz de radiar la misma debido al ancho de banda que permite operar en una gama de frecuencias. Esto ayuda a que tanto del dispositivo móvil como de la estación base puedan utilizar una única antena y si se quisiera aumentar la tasa de transmisión de datos, otra antena puede ser utilizada aumentando el ancho de banda del canal.

### 2.1.2. Modo de operación FDD.

En los sistemas de radiocomunicación se necesita que los elementos de la red se comuniquen uno a otro en forma bidireccional, por ejemplo, al realizar una llamada telefónica se escucha la voz de la persona a la que se llama y al mismo tiempo es transmitida nuestra señal de voz sobre el canal inalámbrico. Cuando el sistema es capaz de establecer una comunicación bidireccional es denominado como un esquema dúplex ya que tanto el transmisor como el receptor son capaces de transmitir y recibir información simultáneamente.

El modo de operación FDD (Frequency Division Duplex) es un esquema dúplex y tiene una atribución de espectro apareado esto implica que el canal del enlace descendente y ascendente están separados en frecuencia con canales independientes; uno para la transmisión y otro utilizado en la recepción de la información.

#### FDD

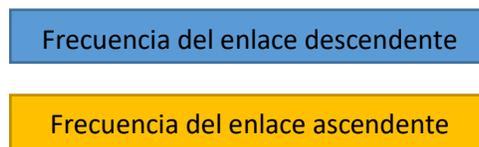


Figura 2.1 Esquema de transmisión FDD.

#### 2.1.2.1. Separación dúplex en FDD.

Las bandas de frecuencia utilizadas en los sistemas IMT en modo FDD deben de mantener una separación en frecuencia para evitar interferencias entre las transmisiones del enlace ascendente y el enlace descendente; a esta separación se le conoce como distancia duplex. Esta distancia se encuentra desde la frecuencia central del enlace ascendente al enlace descendente. Generalmente cuando se realiza la asignación de frecuencias o canalización en LTE es conveniente que la frecuencia más baja del espectro disponible sea asignada al dispositivo móvil para que se lleve a cabo la comunicación en el enlace ascendente. Por otro lado, en la estación base son asignadas las frecuencias más altas en el enlace descendente.

Estas recomendaciones se realizan debido a que el dispositivo móvil está limitado en la potencia de transmisión. Además, el entorno del enlace de radio puede ser afectado por obstáculos e interferencias que degradan la señal cuando es transmitida a través del canal y usualmente el dispositivo móvil tiene que volver a transmitir la señal a mayor potencia. Para generar señales de alta frecuencia los equipos necesitan más potencia, por lo que afectaría el rendimiento de la batería del dispositivo móvil el uso de altas frecuencias. Entonces, es conveniente asignar

bloques de frecuencias altas a las estaciones base ya que los equipos transmisores están diseñados para operar con altas potencias de transmisión.

En la figura 2.2 se muestra el esquema de la distancia dúplex entre dos bloques de frecuencia uno utilizado en el enlace ascendente y otro para el enlace descendente, tomando en cuenta la frecuencia central de cada uno. La separación entre los bloques de frecuencia se debe considerar como banda de guarda, su función es evitar interferencias. Cada bloque representa el ancho banda disponible que es repartido entre los dispositivos móviles y las estaciones base.

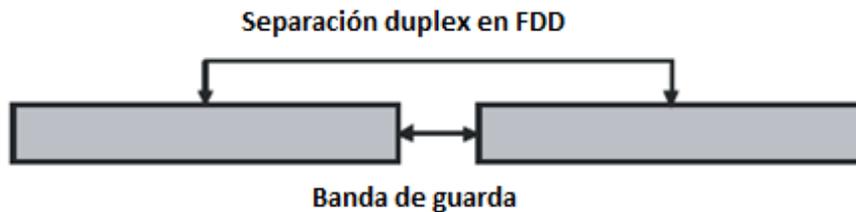


Figura 2.2 Separación dúplex FDD. [2]

Un ancho de banda muy amplio de frecuencias puede ocasionar altas interferencias de dispositivo móvil a dispositivo móvil o entre estaciones bases ya que es mayor la cantidad de elementos que pueden estar dentro del arreglo de frecuencia causando uno a otro ruido dentro del canal inalámbrico. Una manera de reducir el ancho de banda es utilizar arreglos "dual duplexer" donde dos arreglos duplex adyacentes pueden ser implementados dentro del mismo espectro disponible que son traslapados en el enlace descendente y el enlace ascendente, sin embargo, no se genera interferencia entre los dispositivos o estaciones base ya que son añadidos filtros a los equipos con el fin de que las bandas de frecuencia que no pertenezcan a su bloque de frecuencia sean descartadas.



Figura 2.3 Separación dual dúplex en FDD. [2]

### **2.1.2.2. Asimetría del tráfico.**

La UIT en su recomendación M.1036 menciona que “los operadores deben de considerar los requerimientos de tráfico en la asignación del espectro cuando se implementen los sistemas de IMT” que a su vez está incluido LTE. En las redes de datos la mayor cantidad de tráfico es demandada por los usuarios para descargar (download) información como; páginas web, videos, música, correos, etc. Mientras la carga de archivos (upload) dentro de la red es menor, por ejemplo; las videollamadas, transferencia de archivos, videoconferencias, etc. [2].

Como consecuencia de la variación de la cantidad de tráfico es necesario considerar las técnicas de tráfico asimétrico que pueden ser mejoradas optimizando la cantidad de tráfico modificando la asignación de timeslots, esquemas de modulación, esquemas de codificación tanto del enlace ascendente como el enlace descendente.

Con el surgimiento de las aplicaciones y las redes sociales la cantidad de tráfico en el enlace ascendente ha aumentado notoriamente pues hoy los usuarios de los datos móviles interactúan intercambiando todo tipo de información. Quizás en algún momento dado con todo el uso de las aplicaciones el concepto del tráfico asimétrico podría llegar a pasar a ser un tráfico simétrico, pero hasta ahora la única limitante es el consumo de la batería del dispositivo móvil.

### **2.1.2.3. Bandas de frecuencia en FDD**

LTE puede ser implementado en las bandas existentes de IMT y en bandas futuras que puedan ser identificadas útiles en diferentes regiones del mundo para proveer roaming global. Al operar en diferentes bandas de frecuencia es importante tomar en cuenta la potencia de transmisión, límites fuera de banda, interferencias y principalmente la asignación de bandas de frecuencia del espectro ya que este último, es un factor que ocasiona que las bandas de frecuencia difieran en cada país.

En la versión 11 que la 3GPP presentó para LTE están incluidas 27 bandas de frecuencias en FDD. Las bandas apareadas son identificadas numéricamente de la 1 a la 29 que como ya se explicó corresponden al modo de operación FDD. La tabla 2.4 muestra el número identificador de la banda de frecuencia y se observa que cada banda se compone de dos bloques de frecuencia asignados en el enlace descendente y el enlace ascendente respectivamente. En la parte superior derecha son incluidas las regiones en donde son utilizadas las bandas de frecuencia. Además, se nota que algunas regiones comparten la misma banda de frecuencia,

sin embargo, no generan interferencia debido a la distancia en frecuencia que existe de una de otra.

La primera banda de frecuencia (banda 1) abarca en el enlace ascendente de 1920-1980 MHz, correspondiendo 60 MHz disponibles en este bloque. Mientras que, en el enlace descendente, es de 2110-2170 MHz al igual que el primero ya que el espectro es apareado, utilizando la notación de la UIT con el fin de simplificar e identificar el ancho de cada bloque se expresaría como 2 x 60MHz.

En algunos casos los bloques de frecuencia son ampliados con el fin de obtener mayor ancho de banda dentro de una misma región, por ejemplo; la banda 4 cuenta con un arreglo de 2x45MHz. Por otro lado, el arreglo dentro de la banda 10 es de 2x60MHz que inicia en la misma frecuencia de la banda 4 y este es implementado para obtener mayor ancho de banda.

Las bandas 12, 13, 14 y 17 (atribuidas en EUA) incorporan el primer conjunto de bandas definidas para lo que es denominado como dividendo digital. El dividendo digital es identificado como el espectro radioeléctrico que será liberado de la transición de la televisión analógica a digital, el cual abarca la liberación de la banda de 700 MHz con el fin de integrar nuevos servicios del sistema IMT brindando mayor cobertura debido a sus características de propagación de las señales en esta banda. Esta banda fue definida por la UIT y comprende desde 698 MHz - 806 MHz.

También existe una propuesta llamada APT 700 (Asia-Pacific Telecommunications) en la cual existe un plan de frecuencias en la banda 700 MHz inicialmente en Región 3 (Asia-Pacífico), sin embargo, de igual forma se ha agregado a la región 2 (América). Dentro de la región de América algunos países como lo son; México, Brasil, Colombia, Ecuador etc. ya están adoptando este plan de frecuencias.

El plan APT 700 es un arreglo de 2x45MHz en FDD, que podría ser ocupado por tres operadores de servicios de LTE cada uno con segmentos de 2x15 MHz considerablemente eficiente ofreciendo un mayor rendimiento en la transmisión de datos. La asociación 3GPP uso este plan con el fin de definir dos bandas de frecuencia; la banda 28 en FDD y la Banda 44 en TDD.

Finalmente, en la tabla 2.4 se muestra que la banda 29 en la región de América es la única banda "apareada" que consiste solo de un bloque para el enlace descendente. Esta banda es parte de la banda de 700 MHz que será designada para la Agregación de Portadoras inicialmente en el enlace descendente dentro de esta región una vez que la migración de la televisión analógica esté finalizada [6].

Es importante conocer las bandas de frecuencias que existen en cada región y cada país, las cuales ocupan los operadores en las redes móviles ya que las especificaciones de los dispositivos móviles varían de acuerdo a la región, operador, así como el fabricante del equipo móvil. La mayoría de las veces el área de roaming dentro de una región está limitada solo para servicio de voz o datos debido a que el

dispositivo móvil no soporta todas las bandas de frecuencia del operador visitante entonces, el dispositivo móvil permanece en una sola tecnología y con servicios limitados.

Bandas de frecuencia para LTE en modo de operación FDD									
Banda	Rango enlace ascendente (MHz)		Rango enlace descendente (MHz)		Ancho banda de frecuencia [MHz]	Separación Duplex [MHz]	Región		
1	1920	–	1980	2110	–	2170	60	190	Europa, Asia
2	1850	–	1910	1930	–	1990	60	80	America (Asia)
3	1710	–	1785	1805	–	1880	75	95	Europa, Asia (America)
4	1710	–	1755	2110	–	2155	45	400	America
5	824	–	849	869	–	894	25	45	America, Asia
6	830	–	840	875	–	885	10	45	Japón (Solo UTRA)
7	2500	–	2570	2620	–	2690	70	120	Europa, Asia
8	880	–	915	925	–	960	35	45	Europa, Asia
9	1749.9	–	1784.9	1844.9	–	1879.9	35	95	Japón
10	1710	–	1770	2110	–	2170	60	400	America
11	1427.9	–	1447.9	1475.9	–	1495.9	20	48	Japón
12	698	–	716	728	–	746	18	30	EUA
13	777	–	787	746	–	756	10	-31	EUA
14	788	–	798	758	–	768	10	-30	EUA
17	704	–	716	734	–	746	12	30	EUA
18	815	–	830	860	–	875	15	45	Japón
19	830	–	845	875	–	890	15	45	Japón
20	832	–	862	791	–	821	30	-41	Europa
21	1447.9	–	1462.9	1495.9	–	1510.9	15	48	Japón
22	3410	–	3490	3510	–	3590	80	100	Europa
23	2000	–	2020	2180	–	2200	20	180	America
24	1626.5	–	1660.5	1525	–	1559	34	-101.5	America
25	1850	–	1915	1930	–	1995	65	80	America
26	814	–	849	859	–	894	35	45	America
27	807	–	824	852	–	869	17	45	America
28	703	–	748	758	–	803	45	55	Asia/Pacifico /America
29		N/A		717	–	728	11	-	America

Tabla 2.4 Bandas de frecuencia utilizadas en FDD.

### 2.1.3. Modo de operación TDD.

En el modo de operación TDD el espectro comparte el mismo canal de frecuencia para la transmisión/recepción de datos esto se logra utilizando ranuras de tiempo (timeslots en inglés) donde en cada división de tiempo se llevan a cabo las transmisiones en el enlace descendente y el enlace ascendente compartiendo el canal de frecuencia. Como se muestra en la figura 2.4 se representa el esquema TDD donde el enlace ascendente (uplink) está representado en color azul mientras que, el enlace descendente (downlink) en color verde la transmisión/recepción es alternada cada determinado tiempo.

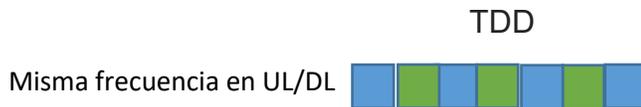


Figura 2.4 Esquema de transmisión TDD.

#### 2.1.3.1. Bandas de frecuencia de LTE en TDD.

Por otro lado, en la versión 11 de LTE la 3GPP incluyó 12 bandas en TDD desde la 33 hasta la 44. Algunas bandas de frecuencia son parcialmente o completamente sobrepuestas debido a que varían de acuerdo a la región en las que fueron definidas por la UIT. En la tabla 2.5 están incluidos los bloques de frecuencias, una sola frecuencia es asignada para la transmisión en ambos sentidos y cada cierto tiempo se realiza la transmisión/recepción, tomando ventaja sobre FDD ya que puede ser ocupado todo el bloque de frecuencia asignado con el fin de obtener mayor rendimiento dentro de LTE. Las bandas de frecuencia en TDD tienen un ancho de banda más grande que en FDD. Por ejemplo, la banda 42 con un rango de frecuencia de 3400-3600 se compone por un ancho de banda de 200 MHz el cual puede ser compartido con diferentes operadores y aprovechar el amplio rango de frecuencia ofreciendo mayor capacidad de usuarios, así como calidad de servicio en la transmisión de datos.

Bandas de frecuencia para LTE en modo de operación TDD					
Banda	Rango de frecuencia (MHz)			Ancho de banda de frecuencia	Región
33	1900	–	1920	20	Europa, Asia (No incluye Japón)
34	2010	–	2025	15	Europa, Asia
35	1850	–	1910	60	América
36	1930	–	1990	60	América
37	1910	–	1930	20	-
38	2570	–	2620	50	Europa
39	1880	–	1920	40	China
40	2300	–	2400	100	Europa, Asia
41	2496	–	2690	194	EUA
42	3400	–	3600	200	Europa
43	3600	–	3800	200	Europa
44	703	–	803	100	Asia/Pacífico

Tabla 2.5 Bandas de frecuencia utilizadas en TDD.

## 2.2. Esquema de transmisión y recepción LTE (DL/UL).

### 2.2.1. Efecto multitrayectoria dentro del canal inalámbrico.

Cualquier canal inalámbrico es caracterizado porque está presente el efecto de multitrayectoria. Este fenómeno principalmente se genera debido a que la señal que llega al receptor no se encuentra en línea de vista, existen más señales radioeléctricas reflejadas que son recibidas en diferentes instantes tiempo. Las señales retrasadas son el resultado de las reflexiones debidas a las condiciones del terreno como lo son; arboles, montañas, colinas, vehículos o edificios. Estas ondas reflejadas llegan con un retraso e interfieren con la onda directa en forma constructiva o destructiva en el receptor. Cuando son destructivas causan ISI (Inter-Symbol Interference) afectando la señal original y el desempeño de la red. En transmisiones en el orden de los Mbps, si la duración del símbolo es menor al tiempo por dispersión de retardos se generará ISI.

Si el ancho de banda es suficientemente grande, el tiempo de retardo para cada símbolo transmitido será mucho mayor que el tiempo de dispersión por retardo entonces, es posible recuperar individualmente las señales que llegan en diferente tiempo originadas por el efecto multitrayectoria y evitar ISI. Tanto en CDMA como WCDMA es utilizado un receptor llamado "receptor rake" este tipo de receptor recolecta algunas copias de las señales que llegan retrasadas y después realiza

una suma de estas con el fin de reconstruir la señal original en el receptor, sin embargo, la complejidad de los componentes de este receptor depende principalmente de la cantidad de señales [3].

Las señales con anchos de banda estrechos son afectadas de diferente manera en el canal por lo que la ISI es mucho menor, a esto se conoce como “flat fading” y a la vez una ventaja en el receptor para poder recuperar la señal original sin necesidad de utilizar complejos receptores por lo cual, LTE es diseñado para utilizar múltiples portadoras y el esquema de una sola portadora de un ancho de banda grande es sustituido por el uso de subportadoras.

### **2.2.2. Técnica de acceso al medio OFDM.**

En el capítulo anterior se explicó que una de las principales razones de la implementación de LTE es la demanda de datos móviles y las altas tasas de transmisión en el canal de radio. La técnica de acceso utilizada en el enlace descendente para LTE es OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) esta técnica realiza una multiplexación en tiempo y frecuencia.

OFDM permite transmitir/recibir información aprovechando al máximo el espectro radioeléctrico ya que el canal de radio es subdividido en subcanales de ancho de banda estrecho y estos son afectados de manera independiente por la selectividad en frecuencia, ocasionando que haya menor distorsión e ISI dentro de todo el canal de radio. A su vez múltiples símbolos son transmitidos en paralelo utilizando los subcanales que son ortogonales entre sí por lo que se mantiene una alta eficiencia espectral.

Un subcanal es representado con una subportadora que puede entregar información para diferentes usuarios ya sea video, imágenes, voz sobre IP, texto, o cualquier tipo de datos todos transmitidos sobre el mismo canal de radio dependiendo de la QoS (Quality of Service) y el tipo de servicio que cada usuario este manejando. Hay que tomar en cuenta que cada subportadora en el dominio del tiempo es representada con un pulso rectangular el cual tiene un periodo  $T_u$ , que es la duración del símbolo en el dominio del tiempo. Mientras que, en el dominio de la frecuencia es una función sinc con armónicos de la señal la cual tendrá una desviación en frecuencia igual a  $1/T_u$  (ver figura 2.5).

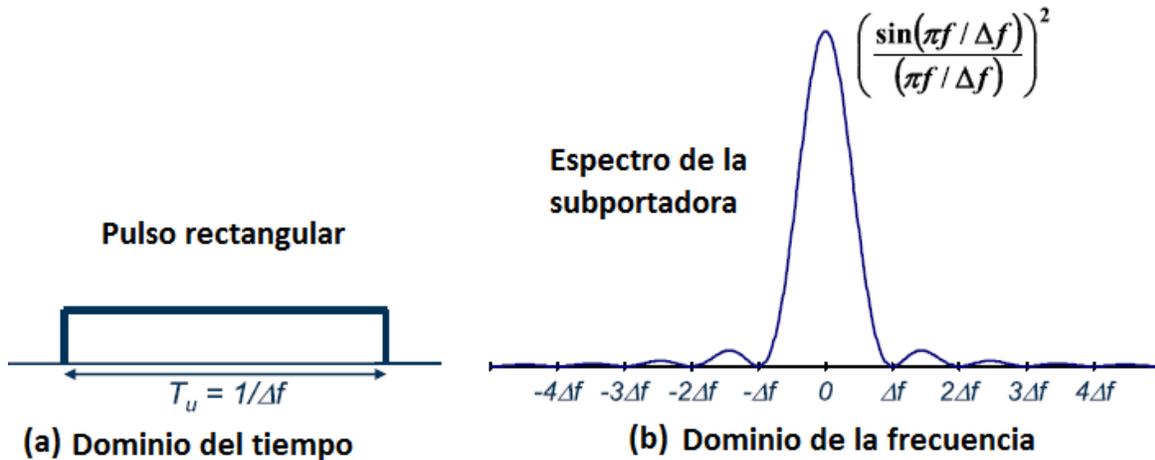


Figura 2.5 (a) Representación de una subportadora en el dominio del tiempo. (b) Representación el espectro de una subportadora OFDM en el dominio de la frecuencia. [4]

Una vez que ya se ha definido el espectro de cada subportadora la figura 2.6 muestra el espectro de todas las subportadoras en OFDM, pues como ya se mencionó una de las particularidades de esta técnica de acceso es que las señales son ortogonales entre sí en un intervalo de tiempo, por lo que no hay interferencia entre ellas y es aprovechado al máximo el espectro. Cuando una subportadora se encuentra en el máximo de su frecuencia central, el espectro de las subportadoras adyacentes es cero por lo cual no existe interferencia una con otra ya que OFDM está basada en el bloqueo, durante el intervalo de cada símbolo OFDM, N símbolos de modulación son transmitidos en paralelo cada uno tiene su propia modulación con una frecuencia  $f_k = k * \Delta f$ , donde k indica el número de la subportadora y  $\Delta f$  el espacio en frecuencia entre las subportadoras [9].

En LTE la separación en frecuencia de las subportadoras es de 15 kHz por lo cual el número de subportadoras en el sistema dependerá directamente del ancho de banda utilizado, es decir si se requiere aumentar el número de subportadoras el ancho de banda tendrá que ser más grande y viceversa.

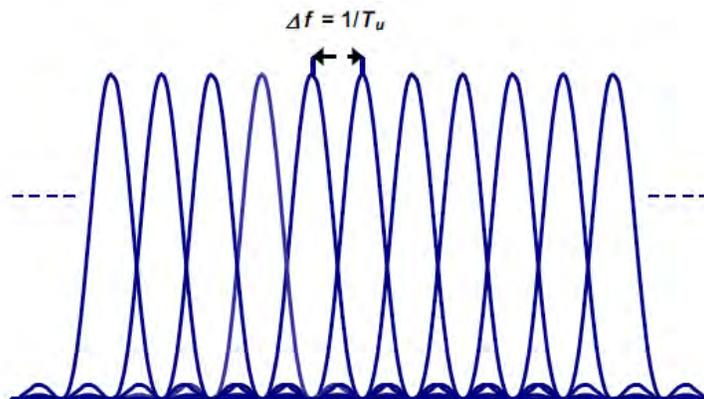


Figura 2.6 Representación de las subportadoras LTE. [4]

Los sistemas OFDM pueden tener valores pico de potencia altos en el dominio del tiempo ya que muchas componentes de las subportadoras son agregadas utilizando la IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) como consecuencia de estos picos la eficiencia de la potencia del amplificador del transmisor o receptor se degrada.

Principalmente por la limitación de potencia del  $U_e$  se requiere optimizar las variaciones de potencia en el enlace ascendente es por esto que se utiliza otra técnica de acceso llamada SC-FDMA (Single Carrier- Frecuency Division Multiple Access) la cual permite reducir la PAPR (Peak to Average Power Ratio) o variaciones de potencia.

SC-FDMA es similar a OFDM antes de realizar el mapeo de símbolos de modulación con las subportadoras se aplica la transformada discreta de Fourier para manejar los símbolos en el dominio de la frecuencia [11]. A diferencia de OFDMA en SC-FDMA cada símbolo de modulación es transmitido utilizando diferentes subportadoras manteniendo la ortogonalidad entre ellas, por consiguiente, se realiza como si fuera una sola portadora. La entidad 3GPP recomienda que el mapeo entre las subportadoras y los símbolos sea consecutivo solamente utilizando una fracción de todo el ancho de banda disponible (ver figura 2.7).

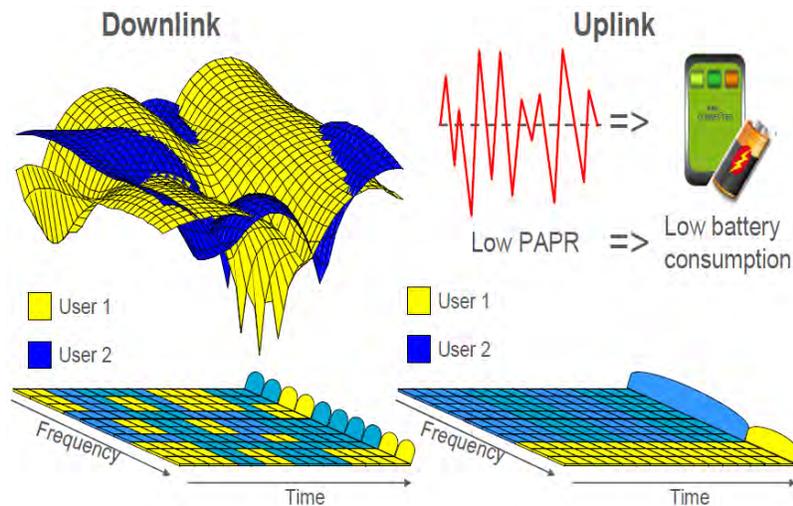


Figura 2.7 Distribución de los bloques de recurso en el enlace descendente y ascendente [5]

### 2.2.3. OFDMA/SC-FDMA en el dominio del tiempo.

En el dominio del tiempo, las transmisiones de LTE son organizadas en tramas. Una trama tiene una duración de 10 [ms], ésta a su vez es dividida en subtramas de 1 [ms] cada una. Finalmente, cada subtrama consta de dos ranuras de tiempo de 0.5 [ms]. Es importante saber que la duración de cada ranura de tiempo representa a un bloque de recurso, el cual es asignado por el ENodeB a los usuarios para la transmisión de datos. Como se puede apreciar en la figura 2.8, una ranura de tiempo de 0.5 [ms] contiene 7 símbolos OFDM.

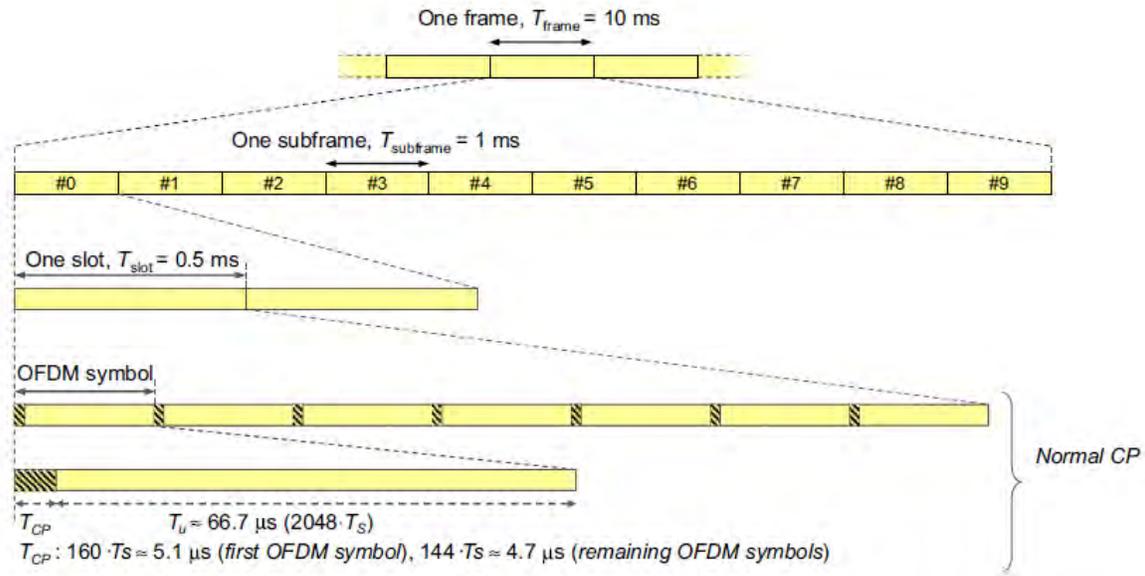


Figura 2.8 Esquema de tramas, subtramas y símbolos de LTE en el dominio del tiempo. [3]

Como ya se mencionó en los canales inalámbricos está presente el efecto multitrayectoria que genera dispersión de retardos en la señal transmitida. Para reducir la interferencia entre símbolos en LTE se agrega una copia de la última parte del símbolo OFDM y es añadido al inicio de símbolo OFDM antes de ser transmitido. A esta copia de la señal se le conoce como prefijo cíclico y ayuda a que la duración del símbolo sea mayor que la duración por dispersión por retardos reduciendo así la ISI.

Un símbolo OFDM tiene una duración  $T_U=66.7\ [\mu\text{s}]$  y el prefijo cíclico de  $T_{cp}=4.7\ [\mu\text{s}]$  sumando estos dos valores la duración del símbolo es de  $71.4\ [\mu\text{s}]$  (ver figura 2.9). Es importante señalar que la duración del prefijo cíclico tiene que ser mayor que la de dispersión de retardos para evitar ISI, de esta forma el receptor elimina el prefijo cíclico y los símbolos pueden ser recuperados exitosamente [14].

El prefijo cíclico eliminará ISI en entornos urbanos y suburbanos ( $1\text{-}2\ [\mu\text{s}]$  por dispersión de retardos). Además de que la 3GPP ha especificado que el prefijo cíclico puede ser extendido hasta  $16.7\ [\mu\text{s}]$  y  $33.3\ [\mu\text{s}]$  para hacer frente a entornos con mayor dispersión de retardos como zonas urbanas donde la dispersión por retardos es de hasta  $20\ [\mu\text{s}]$ .

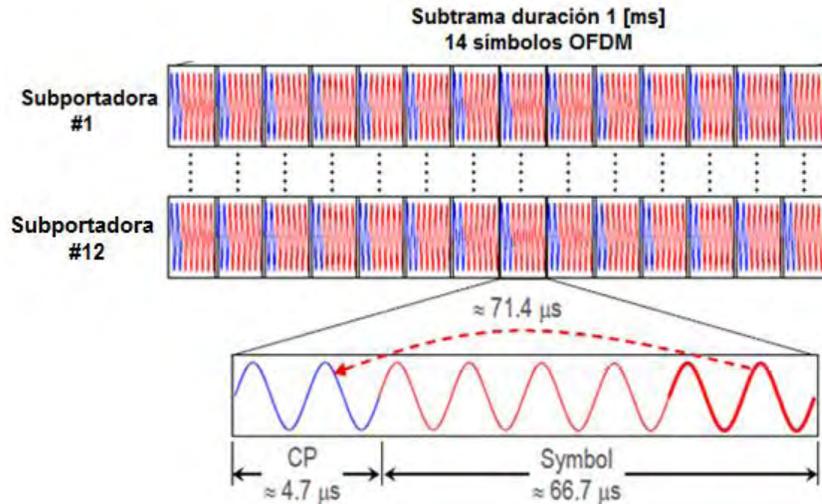


Figura 2.9 Prefijo cíclico dentro de un símbolo OFDM. [5]

Un bloque de recurso (Resource Block) está compuesto de 12 subportadoras en el dominio de la frecuencia y 7 símbolos OFDM en el dominio del tiempo, lo cual resulta en un total de 84 elementos de recurso (símbolos OFDM) en tiempo y frecuencia. Tomando en cuenta el espaciamiento en frecuencia entre las subportadoras el ancho de banda por bloque de recurso es de 180 [kHz] ya que cada subportadora es de 15 [kHz]. Aunque los bloques de recurso son definidos en un slot, la asignación de los recursos se realiza en cada subtrama o dos slots de tiempo (1 [ms]), generalmente es definido como PRB (Physical Resource Block) que consta de 14 símbolos OFDM y 12 subportadoras.

En cada bloque de recurso el mapeo entre una subportadora y un símbolo OFDM es definido como un elemento de recurso (Resource Element) que transporta los bits de datos, señalización y control de acuerdo al mapeo de los canales físicos. En la figura 2.10 se presenta un elemento de recurso marcado en color rojo, como se aprecia es la unidad mínima de los recursos físicos

Cuando se mapean los canales físicos en los elementos de recurso algunos de estos canales transportan los datos en grupos de elementos de recurso REG (Resource Element Group), cada grupo de elemento de recursos, contiene 4 elementos de recurso consecutivos (o 4 elementos de recursos separados por una señal de referencia) dentro del mismo símbolo OFDM y el mismo bloque de recurso.

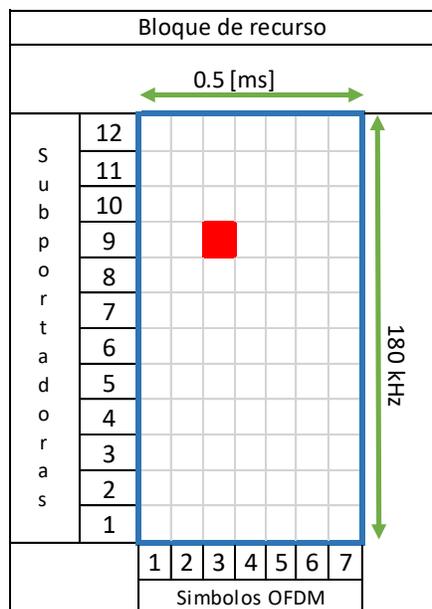


Figura 2.10 Representación de un bloque de recurso.

## 2.3. Tasa de transmisión alcanzadas en LTE.

### 2.3.1. Técnicas de modulación digital.

La modulación de símbolos que maneja LTE puede ser QPSK, 16QAM o 64 QAM (Tabla 2.6). Cada modulación es asignada dependiendo de la calidad del enlace de radio basado en la SINR (Signal to Interference Noise Ratio) que es una relación entre la potencia de la señal recibida de la celda y la potencia del ruido ocasionado por diferentes fuentes como lo son: Ues, EnodeBs vecinos y algunas otras fuentes externas de ruido.

Modulación	#Estados	Bits / símbolo
64QAM	$2^6$	6
16QAM	$2^4$	4
QPSK	$2^2$	2

Tabla 2.6 Modulaciones utilizadas en LTE.

El Ue maneja un indicador de la calidad del canal CQI (Channel Quality Indicator) con el cual evalúa la calidad del enlace de radio y de este modo el EnodeB selecciona el tipo de modulación para cada usuario en el enlace descendente y ascendente. En la figura 2.11 es añadido un esquema con las modulaciones; 64QAM es asignada con un buen valor de SINR, por lo tanto, la tasa de transmisión de datos es alta. Por el contrario, si se tiene una baja calidad del enlace de radio o

bajo SINR la modulación entregada es QPSK implicando una baja transmisión de datos.

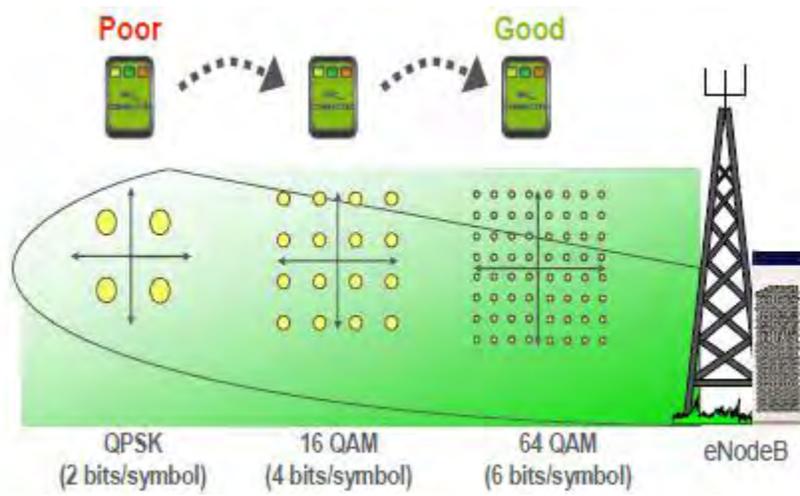


Figura 2.11 Representación de la modulación adaptativa. [5]

Además del tipo de modulación también el EnodeB tiene que seleccionar la codificación, de esta forma verifica que la información ha sido transmitida correctamente, para esto se agrega un CRC de 24 bits en cada bloque de datos de usuario antes de pasar al turbo código. El turbo código agrega bits de paridad extra a fin de que el receptor pueda recuperar los bits erróneos introducidos por la interfaz de radio. Entre mayor sea el número de bits de paridad la protección contra los bits erróneos aumenta a expensas de la tasa de datos de usuario.

El EnodeB adapta la modulación y la tasa de código para ofrecer al Ue la mejor tasa de datos posible en diferentes entornos de radio manteniendo una adecuada tasa de errores de bit BER (Bit Error Rate). El EnodeB envía los CQIs comprendidos del 0-15 que contienen el tipo de modulación, la eficiencia espectral y el número de bits por símbolo y la tasa de código utilizados en LTE. En base a este valor el EnodeB determina el esquema de modulación MCS (Modulation Code Scheme) que es asignado al Ue.

En la tabla 2.7 se muestran los esquemas de modulación MCS (Modulation Code Scheme) que el EnodeB puede asignar al Ue. Como se puede apreciar entre mayor sea el MCS la tasa de código también lo es. Cuando un MCS igual a 28 es asignado el enlace de radio es bueno y no es tan propenso a que haya errores, entonces la tasa de transmisión de datos mucho mayor ya que existen menos bits en la parte de la corrección de errores [6].

En conclusión, en entornos de radio pobres, la tasa de código contiene más bits de paridad que bits de datos ofreciendo mayor protección en contra de los bits erróneos, sin embargo, la tasa de transmisión de datos es mucho menor. La tasa de transmisión de datos varía de acuerdo a las condiciones del enlace de radio por

lo que los usuarios nunca tendrán las mismas velocidades de datos dentro de una celda, además, cuando el Ue está en movimiento esto genera algunas veces se pierda la conexión con el ENodeB.

MCS index ( $I_{MCS}$ )	Modulation	Available number of OFDM			
		13	12	11	10
0	QPSK	0.10	0.11	0.12	0.13
1	QPSK	0.13	0.14	0.16	0.17
2	QPSK	0.16	0.17	0.19	0.21
3	QPSK	0.21	0.22	0.25	0.27
4	QPSK	0.25	0.28	0.30	0.33
5	QPSK	0.31	0.34	0.37	0.41
6	QPSK	0.37	0.40	0.44	0.48
7	QPSK	0.44	0.47	0.52	0.57
8	QPSK	0.50	0.54	0.59	0.65
9	QPSK	0.56	0.61	0.67	0.73
10	16QAM	0.33	0.30	0.33	0.37
11	16QAM	0.33	0.34	0.37	0.41
12	16QAM	0.36	0.39	0.43	0.47
13	16QAM	0.40	0.44	0.48	0.53
14	16QAM	0.46	0.50	0.54	0.59
15	16QAM	0.51	0.55	0.60	0.66
16	16QAM	0.54	0.59	0.64	0.70
17	64QAM	0.36	0.39	0.43	0.47
18	64QAM	0.39	0.42	0.46	0.50
19	64QAM	0.43	0.46	0.51	0.56
20	64QAM	0.47	0.51	0.55	0.61
21	64QAM	0.51	0.55	0.60	0.66
22	64QAM	0.55	0.60	0.65	0.72
23	64QAM	0.59	0.64	0.70	0.77
24	64QAM	0.64	0.69	0.75	0.83
25	64QAM	0.68	0.74	0.80	0.88
26	64QAM	0.72	0.78	0.85	0.93
27	64QAM	0.75	0.81	0.89	0.97
28	64QAM	0.88	0.93	0.97	1.00

Tabla 2.7 Tabla de esquemas de modulación y tasa de código. [7]

### 2.3.2. Antenas MIMO.

Con la utilización de múltiples antenas en el transmisor/receptor es posible tener diferentes rutas al transportar los datos ya que estos son separados en cada una de las antenas y de esta manera se transmiten múltiples señales al mismo tiempo. MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) es una tecnología que se enfoca en reducir la degradación de la señal causada por el efecto multitrayectoria y aprovechar este fenómeno como ventaja para aumentar la capacidad y el rendimiento en LTE.

Algunas de las formas de utilizar MIMO son; incremento de la capacidad del sistema (mayor tráfico de usuarios por celda), ampliar la cobertura (celdas con mayor alcance) y principalmente aumentar la tasa de transmisión de datos distribuyendo el tráfico en diferentes antenas.

El uso de múltiples antenas en el transmisor y receptor ayuda a obtener una SINR robusta lo cual se traduce en una alta tasa de transmisión de datos pues además del ancho de banda es necesario tener una buena calidad del enlace de radio para alcanzar altas velocidades de datos, hay que recordar que LTE utiliza modulación adaptativa basándose en las mediciones de potencia de la señal recibida.

Por otro lado, la saturación del ancho de banda también causa que la tasa de transmisión de datos disminuya notablemente, el canal es compartido por todos los usuarios dentro de la celda por lo que se pueden presentar problemas de capacidad en el EnodeB si todos los recursos están siendo ocupados en su totalidad. Otros tipos de degradación de la señal pueden ser encontrados sobre el canal de radio, por ejemplo; atenuación, distorsión de fase y distorsión por multitrayectoria.

Los efectos del ruido e interferencias podrían ser minimizados incrementando la potencia de la señal transmitida, sin embargo, esto puede ocasionar mayor interferencia con las demás estaciones base e implicaría mayor costo del equipo. Es importante considerar que el ancho de banda es limitado por el espectro radioeléctrico disponible para cada operador entonces, tanto el ancho de banda como la potencia limitan la cantidad de información que puede ser transmitida sobre los canales de comunicación. Shannon definió una ecuación la cual estima a la capacidad de información de un canal de comunicación (ecuación 2.2) [8].

$$C = BW * \log_2 \left( 1 + \left( \frac{S}{N} \right) \right) \quad (2.2)$$

*C: Capacidad del canal*

*BW: Bandwidth (Ancho de banda)*

$\frac{S}{N}$  *Signal to noise ratio (Relación señal a ruido)*

A continuación, se describen como puede ser utilizados los arreglos de antenas MIMO y sus funciones en LTE:

**Diversity:** Es usado para transmitir y recibir diversidad con el fin de mejorar la SINR al igual que la confiabilidad del enlace de radio contra los desvanecimientos que pueden estar presentes dentro de este.

**Beam-forming:** Es comúnmente utilizado en el enlace descendente, el EnodeB cuenta con un arreglo de antenas que permiten concentrar la potencia en donde se encuentre el receptor (Ue), así las interferencias son reducidas y la SINR incrementa en un factor N de acuerdo al número de antenas transmisoras que se utilizan en la

configuración, al mismo tiempo que el radio de cobertura también aumenta intensificando la señal recibida por el receptor.

Spatial Multiplexing (MIMO): El uso de MIMO en LTE permite incrementar la capacidad del canal linealmente de acuerdo al número de antenas utilizadas en el transmisor y receptor, es decir, los canales son independientes de acuerdo al número de antenas en la configuración a esto se le conoce como multiplexación espacial (Spatial Multiplexing en inglés). Debido a que los canales son paralelos, la potencia de la señal se divide en cada uno de los canales dando como resultado que todo el ancho de banda incremente de acuerdo a la configuración de las antenas. Es importante saber que cada canal tendrá una capacidad dada por la ecuación 2.2.

Entre las configuraciones pueden ser 2x2, 3x3, o mxn donde m, es el número de antenas en el transmisor (ENodeB), mientras que n el número de antenas en el receptor (Ue). En la ecuación 2.3 se encuentra la ecuación que representa la capacidad total del canal donde son añadidos los parámetros de acuerdo al arreglo de antenas.  $N_L$  representa el número de canales paralelos o número de antenas.

$$C = N_L * BW * \log_2 \left( 1 + \left( \frac{S}{N} \right) \right) \quad (2.3)$$

El número de señales paralelas está limitado por la configuración de las antenas, como las señales transmitidas por las antenas causan interferencia una con otra en el receptor deben de discriminar la señal que le corresponde a cada una de ellas, cuando se detecta la señal transmitida de la primera antena este suprime la interferencia en la segunda antena y viceversa. Una de las limitaciones para la operación de MIMO es que se debe tener una buena señal a ruido dentro de la celda, de lo contrario no se podría aumentar la tasa de transmisión de datos utilizando el arreglo de antenas.

### 2.3.3. Categorías de los dispositivos móviles.

En un inicio la versión 8 de LTE son clasificados los dispositivos móviles capaces de operar este estándar y fueron divididos en cinco categorías, cada una de estas con ciertas características que permiten o limitan al dispositivo aprovechar al máximo los recursos de LTE, aunque posteriormente en la versión 12 fueron definidas hasta 10 categorías. Algunas de las características manejadas en estas categorías son; el ancho de banda, tipo de modulación, número de antenas para transmitir/recibir (MIMO) y el tamaño del bloque de transporte a transmitir en el TTI. Todas estas especificaciones del Ue en conjunto ayudan a conocer las capacidades, así como estimar la tasa máxima de transmisión de datos que puede alcanzar un usuario en LTE.

Dentro de la tabla 2.8 se muestra que la Categoría 1 solo soporta MIMO 2x2 y en el enlace descendente una modulación de hasta 16QAM lo cual limita a obtener una máxima tasa de transmisión de datos de 10 Mbps mientras que, los dispositivos de Categoría 5 podrían alcanzar hasta 300 Mbps con una modulación 64 QAM y una configuración MIMO de 4x4.

Pueden existir discrepancias entre las especificaciones de los dispositivos de acuerdo a la región (bandas de frecuencia asignadas por la UIT), a su vez los operadores algunas veces personalizan las especificaciones de los dispositivos para que sean compatibles con su infraestructura. Finalmente, los diseñadores o fabricantes de los dispositivos son los que intervienen directamente en las especificaciones de cada Ue por lo que los dispositivos pueden entrar en diferentes categorías de acuerdo al costo de la terminal móvil. Actualmente en el mercado las categorías predominantes en los smartphones son la 4 y 5.

Categoría		1	2	3	4	5
Mbps pico	DL	10	50	100	150	300
	UL	5	25	50	50	75
Ancho de Banda		20MHz				
Modulación	DL	QPSK, 16QAM, 64QAM				
	UL	QPSK, 16QAM				QPSK, 16QAM, 64QAM
2x2 MIMO		X	Soportado			
4x4 MIMO		X				Soportado

Tabla 2.8 Categorías del Ue. [9]

### 2.3.4. Ancho de banda en LTE.

En cualquier sistema de comunicación el ancho de banda del canal de comunicación es fundamental para llevar a cabo la transmisión/recepción de información. Una característica de LTE es la flexibilidad en el ancho de banda ya que utiliza las bandas de frecuencias existentes y disponibles de las tecnologías anteriores. Además de que los arreglos de frecuencia pueden ser FDD o TDD. En el estándar se han definido 6 anchos de banda en un rango de 1.4 a 20 MHz.

Los anchos de banda definidos en LTE son; 1.5, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz (tabla 2.9) debajo se encuentran la cantidad de bloques de recurso que son soportados para cada ancho de banda (un bloque de recurso tiene un ancho de banda de 180 [kHz] que corresponde a cada subportadora). Los bloques de recurso son asignados a los usuarios para la transmisión/recepción de datos en el ENodeB.

A comparación de las tecnologías móviles anteriores, LTE cuenta con una mejor distribución del espectro radioeléctrico, ya que la modulación adaptativa proporciona diversos tipos de modulación en enlace de radio sin desperdiciar ancho de banda. Hay que considerar que, un ancho de banda grande como el de 20 MHz permite alcanzar altas tasas de transmisión de datos ya que cuenta hasta con 100 bloques de recursos.

Ancho de Banda [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
Bloques de recurso	6	15	25	50	75	100

Tabla 2.9 Número de bloques de recurso de acuerdo al ancho de banda.

El hecho de que LTE cuente con diferentes anchos de banda, las limitaciones del espectro radioeléctrico no es un obstáculo para las redes comerciales ya que con la regulación del espectro en diferentes regiones y países se puede adaptar a la operación en distintas bandas de frecuencia. Es importante considerar que cuando se pretenda diseñar una red móvil analizar el entorno de radiofrecuencia donde se hará la implementación de las estaciones base ya que las frecuencias altas siempre se atenúan fácilmente comparadas, mientras que las señales de baja frecuencia se propagan y penetran mejor en interiores.

### 2.3.5. Calculo de tasas de transmisión de datos en LTE.

Los parámetros que nos permiten alcanzar altas tasas de transmisión ya han sido explicados. En primera instancia el ancho de banda; ya que de este dependen el número de subportadoras y número de bloques de recurso disponibles para los usuarios. Una buena señal a ruido dentro del enlace asegura una modulación de

alto orden (64QAM). También la configuración de las antenas MIMO tanto en el ENodeB como en el Ue es esencial para aumentar la capacidad del canal.

Otro de los factores que es importante y afecta a la tasa de transmisión de datos es la cantidad de usuarios dentro de una celda pues si existe una saturación de usuarios, la velocidad de los datos disminuirá a pesar de que los Ues tengan todos los parámetros especificados anteriormente. Por último, hay que remarcar que la tasa de transmisión de datos en LTE es pico (no es constante) pues más de un usuario está utilizando los bloques de recurso.

Cabe mencionar que la tasa de transmisión de datos también es denominada como el rendimiento en LTE (throughput en inglés), más adelante se hará referencia a la tasa de transmisión de esta manera. Como ejemplo para el cálculo de la tasa de transmisión de datos o throughput se utiliza el ancho de banda máximo en LTE de 20 MHz, hay que recordar que cada bloque de recurso se compone de 12 subportadoras y el ancho de banda del bloque de recurso es de 180 [kHz]. La ecuación 2.4 es utilizada para calcular la cantidad de bloques de recursos disponibles en LTE; debido a que el 10% del ancho de banda es utilizado como banda de guarda el ancho de banda disponible es de 18 [MHz], que es dividido entre el ancho de banda de cada bloque de recurso dando un total de 100 bloques de recurso [9].

$$\#RB = \frac{BW_{total}}{BW_{RB}} \quad (2.4)$$

*#RB: Número de bloques de recurso.*

*BW<sub>total</sub>: Ancho de banda total de LTE*

*BW<sub>RB</sub>: Ancho de banda del bloque de recurso*

$$\#RB = \frac{18 [MHz]}{180 [kHz]} \quad \#RB = 100$$

El tiempo de transmisión de los datos es de 1 [ms] el cual corresponde a la duración de una subtrama, en este intervalo los bloques de recursos son asignados a uno o más usuarios activos. Y en la siguiente subtrama los bloques de recurso son reasignados, por lo tanto, la tasa de transmisión es variable y los usuarios no recibirán los mismos bloques de recurso como la primera vez. Para obtener la tasa de transmisión es necesario considerar el número de símbolos OFDM que hay en una subtrama (ecuación 2.5). En cada subtrama hay 14 símbolos OFDM en 1 [ms] por subportadora, lo cual da como resultado 168 símbolos OFDM en una subtrama.

$$Simbolos\ OFDM_{subtrama} = \frac{\#Simbolos\ OFDM}{subtrama} * \frac{\# Subportadoras}{RB} \quad (2.5)$$

$$Simbolos\ OFDM_{subtrama} = 14 \left[ \frac{simbolos\ OFDM}{ms} \right] * 12 = 168 \left[ \frac{simbolos\ OFDM}{ms} \right]$$

La tasa de transmisión de los símbolos OFDM es identificada como  $R_{simbolos\ OFDM}$  la cual es de 168 [ksps]. Este valor obtenido es constante dentro del estándar ya que la duración de la subtrama, así como el ancho de banda de cada bloque de recurso también se encuentran predefinidos. El número de portadoras es el único valor que cambia, el cual depende directamente del ancho de banda total en LTE.

$$R_{simbolos\ OFDM} = 168 \left[ \frac{simbolos\ OFDM}{ms} \right] = 168\ kspS$$

De la ecuación 2.4 se determinó que hay 100 bloques de recurso en 20 MHz, si el Ue tiene una buena señal a ruido la modulación asignada será de 64QAM (6 bits/símbolo) por lo tanto la tasa de transmisión de datos cruda  $R_{cruda}$  es calculada multiplicando; la tasa de transmisión de los símbolos OFDM en una subtrama, la cantidad de bloques de recursos, y finalmente el número de bits/símbolo de la modulación asignada para el Ue (ver ecuación 2.6). Una vez que es hecho el cálculo se obtiene una  $R_{cruda}$  de 100.8 Mbps (se le denomina tasa de transmisión cruda ya que incluye la información de control del sistema).

$$R_{cruda} = R_{simbolos\ OFDM} * \#RB * \# \frac{Bits}{simbolo} \quad (2.6)$$

$$R_{cruda} = 168\ [kspS] * 100\ [RB] * 6 \left[ \frac{bits}{simbolo} \right] = 100.8\ Mbps$$

En la sección anterior se mencionó que LTE utiliza una configuración de antenas MIMO con multiplexación espacial que permite aumentar la capacidad del canal es linealmente de acuerdo al número de elementos de la antena. En este caso se considerará una configuración MIMO 2x2 ya que hasta ahora en el mercado no se ha desarrollado dispositivos capaces de operar en MIMO 4x4 ya que existiría un drenaje de batería considerable para el UE. Por lo tanto, la  $R_{cruda}$  es multiplicada por 2 que es el número de elementos que son utilizados en esta configuración.

$$R_{cruda} = 100.8\ Mbps * 2 = 201.6\ Mbps$$

Finalmente, la tasa de transmisión cruda alcanzada es de hasta 201.6 Mbps, sin embargo, como el 25% de los datos son utilizados para señalización entre el Ue y el ENodeB, el restante 75% son datos de usuarios. Por lo tanto, para determinar la tasa de transmisión de datos de usuario se utiliza la ecuación (2.7). La transmisión de datos pico que los usuarios en LTE pueden alcanzar con un ancho de banda de 20 MHz, modulación 64QAM y utilizando MIMO 2x2 es de hasta 201.6 Mbps en el enlace descendente.

$$R_{datos} = R_{cruda} * (.75) \quad (2.7)$$

$$R_{datos} = 201.6 \text{ Mbps} (.75) = 151.2 \text{ Mbps}$$

En el enlace ascendente el ENodeB es configurado para entregar una modulación de 16QAM (4 bits/símbolo) utilizando un esquema de tráfico asimétrico, otra de las limitaciones es que los Ues en el enlace ascendente no soportan MIMO, por consiguiente, aunque el mismo ancho de banda sea utilizado la tasa de transmisión es menor que en el enlace descendente. Como se muestra abajo el throughput en el enlace ascendente alcanza solamente hasta 50.4 Mbps.

$$R_{cruda} = 168 \text{ [ksps]} * 100 \text{ [RB]} * 4 \left[ \frac{\text{bits}}{\text{simbolo}} \right] = 67.2 \text{ Mbps}$$

$$R_{datos} = 100.8 \text{ Mbps} * (0.75)$$

$$R_{datos} = 50.4 \text{ Mbps}$$

## REFERENCIAS CAPITULO II:

- [1] ITU-R, *Reglamento de Radiocomunicaciones*, vol. I, ITU, 2012.
- [2] ITU-R, *Frequency arrangements for implementation of the terrestrial component of International Mobile Telecommunications (IMT) in the bands identified for IMT in the Radio Regulations (RR)*, Recommendation ITU-R M.1036-5, 2015.
- [3] Dahlman, E., Parkvall, S., Sköld, J. *4G: LTE/LTE-Advanced for MobileBroadband*, 2ª ed., Oxford, Elsevier, 2014.
- [4] Schwartz, Mischa, *Mobile Wireless Communications*, Cambridge University, United Kingdom, 2005.
- [5] Rumney, Moray, *3GPP LTE: Introducing Single-Carrier FDMA*, Agilent Technologies, Inc. USA, 2008.
- [6] Ericsson, *LTE/SAE System Overview*, Release 9, 2014.
- [7] Jun Fu-Cheng & Yang Hu, *System and method of modulation and coding scheme adjustment for a LTE shared channel*, 2010.
- [8] Proakis J., Salehi, M., *Digital Communications*, 5a ed., McGraw-Hill, 2008.
- [9] Matthew Baker, *LTE-Advanced Physical Layer*, Rev-090003r1 IMT-Advanced Evaluation Workshop, Beijing, 17 – 18 de Diciembre, 2009.

## Capítulo III

### Redes LTE con Agregación de Portadoras.

#### 3.1. Crecimiento del tráfico de datos móviles en los últimos años.

El uso de datos móviles ha incrementado en los últimos años ya que las aplicaciones multimedia han causado que la demanda de datos aumente día con día. Como se ha explicado LTE es un estándar que está enfocado en un entorno puramente IP donde las principales características de radio permiten alcanzar un mayor throughput y menor latencia en el uso de datos. Las compañías de telecomunicaciones y diversas organizaciones como la 3GPP tienen como objetivo cubrir esta demanda con el desarrollo de nuevas tecnologías y protocolos como lo es LTE-Advanced.

Para satisfacer la demanda de datos diversas compañías realizan estudios relacionados con el uso de datos móviles para hacer una estimación a futuro de la cantidad de dispositivos que serán fabricados, así como las condiciones de mercado de las telecomunicaciones. Un estudio global realizado por Cisco acerca del pronóstico de datos móviles y aplicaciones fue hecho durante el 2015, en el cual se estimó que el tráfico de datos móviles global creció en un 74% alcanzando 3.7 exabytes por mes a comparación del 2014 que era de 2.1 exabytes por mes. Considerando que un exabyte es equivalente a un billón de gigabytes el crecimiento de la cantidad de tráfico de datos es bastante alta.

De acuerdo con este estudio el crecimiento de datos móviles ha ido incrementando al menos 4000 veces más durante los últimos 10 años en las redes móviles (incluyendo Wi-Fi y telefonía móvil). En la imagen se muestra el crecimiento en porcentaje para distintas regiones del mundo (figura 3.1), como se muestra el tráfico de datos móviles aumentó más del 50% en todas las regiones, esta cifra es un indicador de que hay un crecimiento acelerado de datos móviles en tan solo un año y a este paso es necesario contar con las tecnologías adecuadas que soporten esta cantidad de datos.

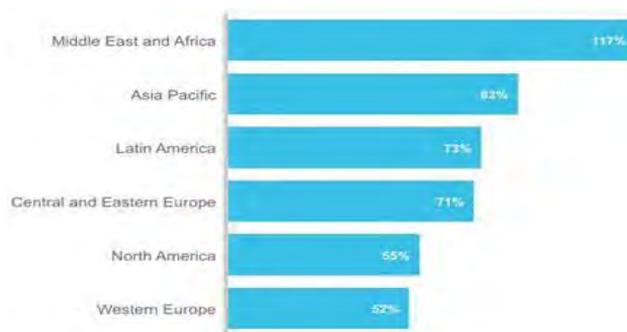


Figura 3.1 Crecimiento de datos móviles en 2015. [1]

Basándose en esta información Cisco estimó que el crecimiento de tráfico de datos móviles para 2020 será de 30.6 exabytes por mes, el cual es un valor 8 veces más grande comparado con los resultados del 2015 (figura 3.2). Una de las claves del crecimiento global de tráfico de datos móviles es el incremento del número de dispositivos inalámbricos, aplicaciones, usuarios, etc., que en conjunto demandan el acceso a internet a través de las redes móviles. En 2015 fueron agregados 563 millones de dispositivos móviles y conexiones (más de medio billón) dando como resultado un aumento de 7.3 billones a 7.9 billones de dispositivos con respecto al 2014.

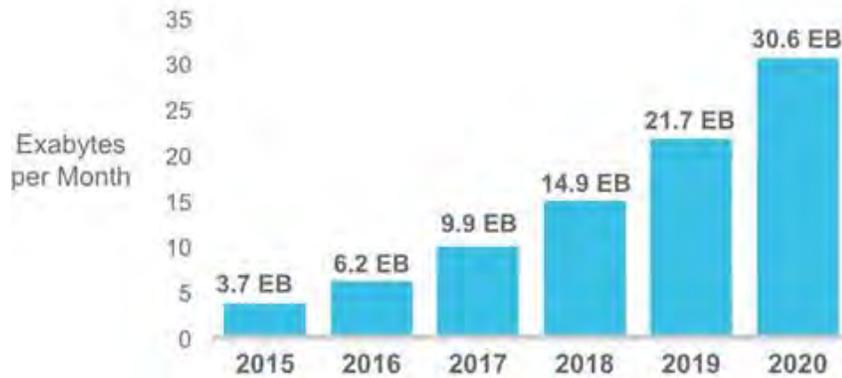


Figura 3.2 Pronóstico del tráfico de datos móviles en 2020 (30.6 exabytes por mes). [1]

En el año 2015 particularmente en 4G (LTE) por primera vez incrementó el tráfico con respecto a 3G (WCDMA). 4G contabilizó un 47% del tráfico comparado con el 43% de 3G (figura 3.3). Hay que tomar en cuenta que una conexión de 4G genera 6 veces más tráfico de datos que alguna otra generación ya que LTE ofrece altas tasas de transmisión de datos, agregado a que los dispositivos de gama alta soportan diversas aplicaciones con un alto consumo de datos.

Como el crecimiento de 4G es bastante acelerado comparado con otras generaciones se espera que en 2020 represente el 72% del tráfico móvil de datos. En cuestión de consumo de datos, en promedio la cantidad de tráfico por Smartphone durante 2014 fue de 648 MB mientras que, en el 2015 el tráfico incremento hasta 929 MB por mes. A su vez el pronóstico para 2020 es de 4.4 GB por mes lo cual es 8.8 veces más de lo que ahora se utiliza, sin embargo, debido a que se están utilizando muchas aplicaciones en tiempo real y streaming este número podría aumentar exponencialmente durante los próximos años.



Figura 3.3 Tráfico móvil global por tipo de conexión. [1]

### 3.2. Requerimientos de LTE-Advanced.

A continuación, se explicará cómo surgió LTE con Agregación de Portadoras y sus características principales. Posteriormente, se abordará la configuración de las bandas de frecuencia, protocolos, acrónimos utilizados, administración de los recursos de radio, así como las categorías de los dispositivos que soportan Agregación de Portadoras.

En Marzo del 2008 la 3GPP comenzó un nuevo objeto de estudio para adecuar LTE a LTE-Advanced, en la décima versión de LTE que incluye nuevas características para cumplir los requerimientos de la ITU para el sistema IMT-Advanced. Este nuevo sistema pretende hacer uso del espectro radioeléctrico de forma más eficiente además de incrementar la tasa de transferencia de datos con el mínimo ancho de banda para soportar la alta demanda de tráfico que es requerida por los usuarios. Además, proporcionar acceso a un rango de servicios de telecomunicaciones soportados por redes fijas y móviles basado en un entorno puramente IP [2].

Una forma de incrementar la capacidad de cualquier sistema inalámbrico es agregando más ancho de banda al canal de comunicación por esta razón, LTE-Advanced es compatible hacia atrás y hacia adelante con LTE, permitiendo incrementar el ancho de banda agregando portadoras de las versiones 8, 9 así como las posteriores redes de LTE-Advanced.

La Agregación de Portadoras (Carrier Aggregation en inglés) en LTE es una nueva característica que es incluida en LTE-Advanced y tiene como premisa utilizar múltiples portadoras para aprovechar eficientemente el espectro y así combinar diferentes bandas de frecuencia con el fin de aumentar el throughput ya sea para la transmisión hacia el Ue o desde el dispositivo al ENodeB.

Como ya se explicó en los capítulos anteriores, el ancho de banda máximo de LTE está limitado a 20 MHz con el cual se pueden alcanzar hasta 300 Mbps utilizando multiplexación espacial 4x4. Mientras que, en LTE-Advanced propone que hasta cinco portadoras de diferentes anchos de banda pueden ser añadidas. Por lo tanto, se podría transmitir con un ancho de banda de hasta 100 MHz. Con un ancho de banda de esta magnitud y utilizando técnicas de multiplexación espacial en el enlace descendente de MIMO 8x8 y en el enlace ascendente de 4x4 se logra una eficiencia espectral de 30 bps/ Hz por lo que es posible cumplir con los requerimientos de IMT-Advanced alcanzando una tasa de transmisión de datos pico en el enlace descendente de hasta 1 Gbps y en el enlace ascendente de hasta 500 Mbps.

Finalmente, otra de las ventajas de Agregación de Portadoras es que puede utilizar portadoras de FDD y TDD ofreciendo flexibilidad al utilizar diferentes bandas de frecuencia. En la tabla 3.1 se muestra una tabla comparativa entre LTE y LTE-Advanced, así como los requerimientos del sistema IMT-Advanced que en un inicio fueron alcanzar una tasa de transmisión de 1 Gbps con poca movilidad del Ue y 100 Mbps cuando el dispositivo se encuentra en alta movilidad.

		LTE versión 8	LTE-Advanced versión 10	IMT-Advanced
Tasa pico de datos.	DL	300 Mbps	1 Gbps	1 Gbps movilidad baja 100 Mbps alta movilidad
	UL	150 Mbps	500 Mbps	
Eficiencia espectral pico.	DL	15	30	15
	UL	3.5	15	6.75
Ancho de Banda	DL	20 MHz	100 MHz	100 MHz
	UL			

Tabla 3.1 Características de LTE, LTE Advanced y IMT-Advanced [3].

### 3.3. Configuración LTE con Agregación de Portadoras.

Como ya se mencionó el espectro radioeléctrico es uno de los recursos que limita alcanzar altas tasas de transmisión de datos así que entre los requerimientos de IMT-Advanced es incluida la optimización del espectro agregando portadoras. Es importante recordar que las bandas de frecuencia asignadas pueden ser distintas para cada operador dependiendo de la región en la que se encuentren.

En Carrier Aggregation cada portadora que es agregada es denominada como componente de la portadora CC (CC Carrier Component en inglés) las cuales serán agregadas para aumentar el ancho de banda de LTE. La agregación de CCs no necesita ser continua, pertenecer a la misma banda de frecuencia, o tener el mismo ancho de banda, por consiguiente, existen diferentes configuraciones al combinar cada una de estas portadoras.

La agregación de las CCs que se encuentran sobre la misma banda de frecuencia es definida como intra-band continua, ya que las portadoras son adyacentes y la señal es procesada como una si fuera una sola, además el Ue requiere un solo transceptor y es aprovechado al máximo el espectro asignado. Particularmente en intra-band continua, el espacio entre la frecuencia central de dos CC contiguas debe ser en múltiplos de 300 [kHz] [4]. Sin embargo, la mayoría de las veces los operadores se encuentran compartiendo segmentos de la misma banda de frecuencia dificultando usar este tipo de configuración.

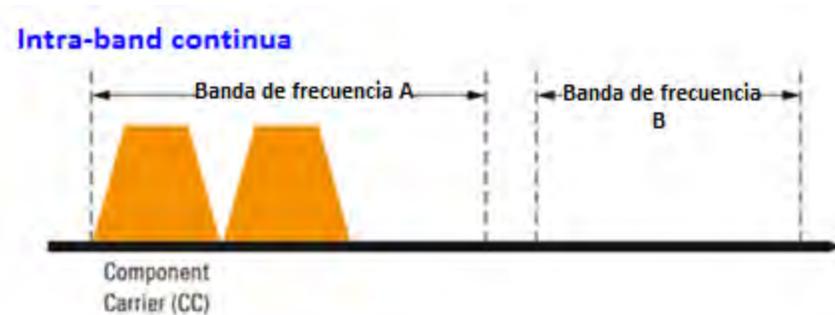


Figura 3.4 Configuración Carrier Aggregation intra-band continua.

Otra de las configuraciones definida es intra-band discontinua, en este caso las CCs pertenecen a la misma banda de frecuencia de operación, pero con una brecha o separación entre ellas mucho mayor que la banda de guarda de intra-band continua. Las portadoras que son agregadas no son adyacentes y la señal no puede ser tratada como una sola señal; por lo tanto, dos transceptores podrían ser requeridos añadiendo cierta complejidad al Ue incluso en el desempeño del consumo de potencia de cada terminal al procesar la señal.



Figura 3.5 Configuración Carrier Aggregation intra-band discontinua.

La configuración inter-band ofrece mayor flexibilidad en el espectro radioeléctrico y es más atractiva para los operadores móviles debido a que las CCs son agregadas usando diferentes bandas de frecuencia. En este caso el Ue podría tener que usar múltiples transceptores que impacta en el costo, desempeño y consumo de potencia pues tienen que ser procesadas las señales en paralelo que pertenecen a diferentes bandas de frecuencia.

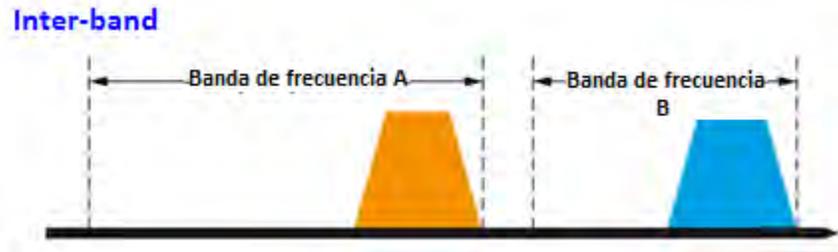


Figura 3.6 Configuración Carrier Aggregation inter-band.

### 3.3.1. Limitaciones del ancho de banda en E-UTRAN.

Como ya se explicó existen diferentes bandas de frecuencia en LTE y cada una de estas son segmentadas en bloques de frecuencia que son asignados a los operadores para la transmisión y/o recepción de señales. Cabe mencionar, que no todos los anchos de banda de LTE están disponibles en dichas bandas de frecuencia así que, en la especificación técnica TS 136.101 de la 3GPP se ha añadido una tabla donde se muestran los anchos de banda operables en cada una de las bandas de frecuencia (tabla 3.2).

Por ejemplo; si en alguna región LTE es implementada sobre la banda 23, solo sería posible el despliegue de las CCs con anchos de banda de 1.4, 3, 5 y hasta 10 MHz lo cual no es conveniente para los operadores si se pretende desplegar una red con CCs con el ancho de banda máximo (20 MHz).

La tabla 3.2 es útil en el diseño e implementación de LTE-Advanced ya que es importante conocer los anchos de banda que se pueden combinar en cada una de las bandas de frecuencia. En el caso de una configuración intra-band continua dentro de la banda 6 el máximo ancho de banda que se podría alcanzar sería de 15 MHz utilizando 2 CC una de 5 MHz y 10MHz.

Las bandas de frecuencia son segmentadas en bloques de frecuencia y estos segmentos son asignados a diferentes operadores lo cual limita el ancho de banda que pueden operar los distintos operadores, por consiguiente una configuración inter-band en Carrier Aggregation toma ventaja sobre las demás ya que, si algún operador cuenta con distintas bandas de frecuencia, existen más posibilidades de hacer una combinación CCs entre éstas con diferentes anchos de banda permitiendo mayor flexibilidad en la utilización del espectro radioeléctrico.

E-UTRA band / Channel bandwidth						
E-UTRA Band	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
1			Yes	Yes	Yes	Yes
2	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>1</sup>
3	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>1</sup>
4	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
5	Yes	Yes	Yes	Yes <sup>1</sup>		
6			Yes	Yes <sup>1</sup>		
7			Yes	Yes	Yes <sup>2</sup>	Yes <sup>1,2</sup>
8	Yes	Yes	Yes	Yes <sup>1</sup>		
9			Yes	Yes	Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>1</sup>
10			Yes	Yes	Yes	Yes
11			Yes	Yes <sup>1</sup>		
12	Yes	Yes	Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>1</sup>		
13			Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>1</sup>		
14			Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>1</sup>		
...						
17			Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>1</sup>		
18			Yes	Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>1</sup>	
19			Yes	Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>1</sup>	
20			Yes	Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>1</sup>
21			Yes	Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>1</sup>	
22			Yes	Yes	Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>1</sup>
23	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>1</sup>
24			Yes	Yes		
25	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>1</sup>
26	Yes	Yes	Yes	Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>1</sup>	
27	Yes	Yes	Yes	Yes <sup>1</sup>		
28		Yes	Yes	Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>1,2</sup>
30			Yes	Yes <sup>1</sup>		
31	Yes	Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>1</sup>			
...						
33			Yes	Yes	Yes	Yes
34			Yes	Yes	Yes	
35	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
36	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
37			Yes	Yes	Yes	Yes
38			Yes	Yes	Yes <sup>2</sup>	Yes <sup>2</sup>
39			Yes	Yes	Yes <sup>2</sup>	Yes <sup>2</sup>
40			Yes	Yes	Yes	Yes
41			Yes	Yes	Yes	Yes
42			Yes	Yes	Yes	Yes
43			Yes	Yes	Yes	Yes
44		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
45			Yes	Yes	Yes	Yes
46						Yes

Tabla 3.2 Bandas de frecuencia en LTE y anchos de banda [5].

### 3.3.2. Terminología utilizada en la configuración de CA.

La 3GPP en el reporte técnico TR 36.823 ha definido los acrónimos que permiten identificar el tipo de configuración de Agregación de Portadoras que el Ue es capaz de transmitir/recibir simultáneamente en términos de las bandas de frecuencia, anchos de banda y la agregación de cada uno de estos anchos de banda. Esta información es útil e importante ya que en la operación de LTE es necesario conocer las características de transmisión/recepción tanto del Ue como del ENodeB. Hay que considerar que la terminología es la misma tanto en el enlace descendente como para el ascendente, sin embargo, las capacidades del Ue pueden diferir ya que la transmisión de datos puede ser asimétrica.

En la figura 3.7 se muestran los tres acrónimos utilizados para cada configuración de CA; en intra-band continua se muestra que el primer número representa la banda de frecuencia mientras que la letra hace referencia a la clase de ancho de banda que soporta, en este caso solo una banda de frecuencia es utilizada la cual es la banda 1 clase C.

En el centro de la figura se encuentra la terminología de la configuración inter-band; como se puede observar las bandas de frecuencia son diferentes (banda 1 y banda 5) mientras que las clases de ancho de banda (clase A) para este ejemplo son las mismas, sin embargo, la clase del ancho de banda también puede ser distinta una de otra y las bandas de frecuencia siempre serán distintas.

Finalmente, para el caso de intra-band no continua (que por definición la banda de frecuencia siempre es la misma) la figura 3.7 muestra como ejemplo CA\_25A-25A donde las portadoras están separadas una de la otra sobre la misma banda de frecuencia cada una con un ancho de banda máximo de 20 MHz (100 bloques de recurso). A lado de cada banda de frecuencia como en los ejemplos anteriores es añadida la clase de ancho de banda. Cabe mencionar que en inter-band e intraband no continua cada portadora es separada por un guion (-), en el caso de intraband continua, el número de portadoras es definido con la clase del ancho de banda.

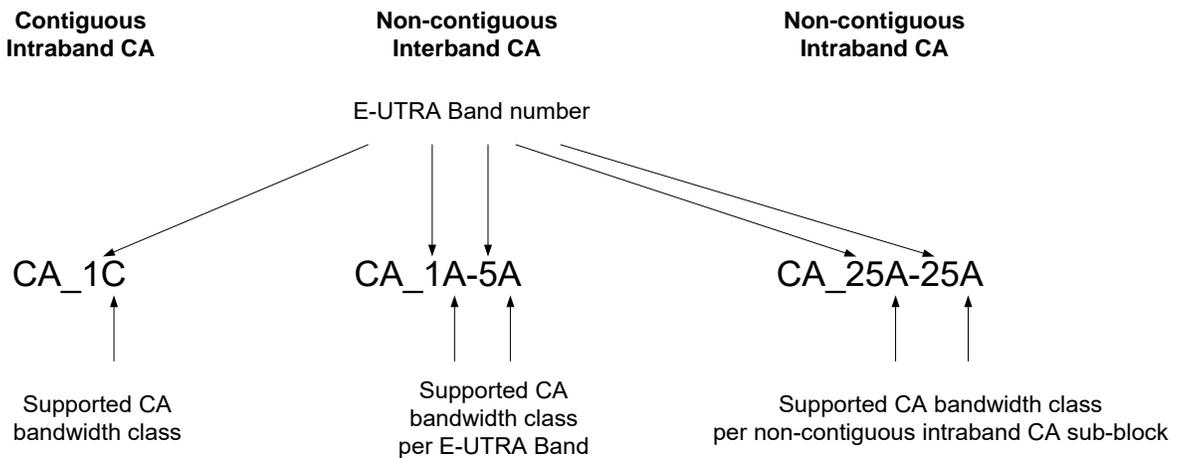


Figura 3.7 Acrónimos utilizados en las configuraciones LTE CA. [4]

La 3GPP en la especificación técnica TS 136.101 define 6 clases de anchos de banda (bandwidth class en inglés) que son utilizados en las configuraciones de Agregación de Portadoras. Cada clase de ancho de banda depende del número de bloques de recursos y el número de CCs. El hecho de clasificar los anchos de banda es debido a que cada uno de estos, indica el máximo ancho de banda de transmisión en la configuración de CA y de esta manera se obtiene la cantidad de bloques de recursos que son agregados en una determinada banda de frecuencia.

Durante el lanzamiento de CA se pretendía combinar hasta cinco portadoras, solo ha sido posible implementar la clase C en la cual es posible combinar hasta tres portadoras. Las clases de la E a la I están siendo desarrolladas por diferentes operadores de telefonía donde incluyen más de tres portadoras.

El máximo ancho de banda de transmisión en la configuración de CA es definido como ATBC (Aggregated Transmission Bandwidth Configuration), la tabla 3.3 muestra en este apartado la cantidad de bloques de recurso agregados ( $N_{RB,agg}$ ) que pueden ser utilizados en la combinación de las portadoras para cada clase. Por ejemplo, la clase de ancho de banda C es capaz de soportar dos CCs y si se utiliza el ancho de banda máximo de 40 MHz en cada portadora, se tendrían disponibles hasta 200 bloques de recurso, conforme aumenta el número de portadoras mayor es la cantidad de bloques de recurso disponibles en LTE.

CA BW Class	ATBC	Maximum aggregated BW [MHz]	Maximum number of CC
A	$N_{RB,agg} \leq 100$	20	1
B	$25 < N_{RB,agg} \leq 100$	20	2
C	$100 < N_{RB,agg} \leq 200$	40	2
D	$200 < N_{RB,agg} \leq 300$	60	3
E	$300 < N_{RB,agg} \leq 400$	80	4
F	$400 < N_{RB,agg} \leq 500$	100	5
I	$700 < N_{RB,agg} \leq 800$	160	8

Tabla 3.3 Bandas de frecuencia en LTE y anchos de banda. [4]

### 3.4. Modos en LTE

En el capítulo 1 se describieron algunas características del protocolo RRC (Radio Resource Control) entre ellas se encuentran; establecer las conexiones, selección de celdas, enviar mensajes de broadcast, paging etc. Este protocolo es utilizado entre el ENodeB y el Ue en la parte de radio. En LTE un Ue puede estar en dos estados diferentes; RRC modo conectado y RRC modo idle ambos cuentan funciones diferentes que permiten administrar y controlar los recursos en el enlace de radio para recibir mensajes de información de control.

#### RRC modo idle.

Cuando el Ue se encuentra en modo idle, no tiene asignados recursos de radio y ninguna conexión establecida ya sea en el plano de usuario o de control. Por lo cual, las mediciones de radio de celdas vecinas son monitoreadas para determinar si el dispositivo hace una reelección de celda en caso de que detecte un mejor canal de radio, esta selección puede ser dentro de la misma o diferente frecuencia e incluso hacia otra tecnología de acceso de radio (WCDMA, GSM o CDMA2000) con el fin de recibir servicio de la mejor celda que se encuentre disponible en ese

momento. Además, en modo idle el Ue monitorea el canal de paging para detectar; llamadas entrantes, cambios de la información del sistema y notificaciones de ciertas alertas [7]. Esta información de sistema se encuentra dividida en SIBs (System Information Blocks) particularmente el SIB 3 transporta parámetros de reelección de celda comunes para todos los vecinos.

Debido a que el Ue no está directamente conectado a la red, para realizar el paging al dispositivo es necesario conocer la ubicación del Ue, en este caso el MME es el encargado de seguir la localización de los Ues el cual recibe mensajes de actualización de áreas de seguimiento TAU (Tracking Area Updates) que son enviadas por los Ues. Un área de seguimiento (Tracking Area en inglés) consiste en un conjunto de ENodeBs o celdas que son definidos por el operador para segmentar la red en zonas geográficas y reducir la cantidad de información de sistema que es enviada a los dispositivos. El Ue envía un mensaje de actualización de área de seguimiento (Tracking Area Update) al MME cuando se encuentra en una celda que pertenece a una diferente Tracking Area por esta razón el MME contiene un número de tracking áreas que ayuda a conocer la segmentación de la red dentro de una zona geográfica.

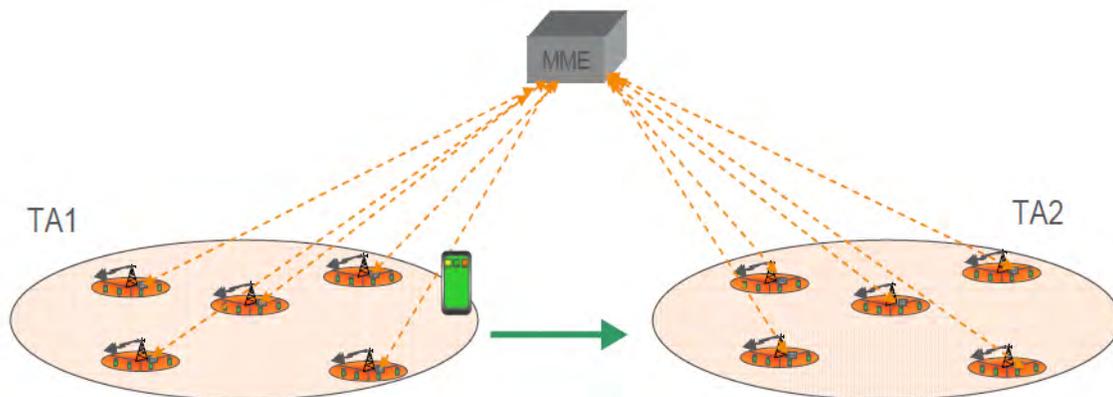


Figura 3.8 Tracking Area. [6]

### RRC modo conectado.

A diferencia del modo idle, cuando un Ue está en modo conectado la movilidad es controlada por la red, específicamente por el ENodeB que toma decisiones de handover. El Ue asiste al ENodeB enviando reportes de mediciones mientras que las transmisiones de datos son unicast hacia el Ue. En capas inferiores el Ue podría ser configurado con un específico DRX para el ahorro de batería. Además, los Ues que soportan Agregación de Portadoras pueden usar una o más celdas secundarias (SCells) que agregadas con la celda primaria (PCell) incrementan el ancho de banda y el rendimiento de la red.

El Ue monitorea el canal de paging además de los bloques de información de sistema de tipo 1 (SIB 1), estos últimos indican el identificador de la celda, código

de tracking área, así como el scheduling de otros SIBs. Al igual que en modo idle, en modo conectado el Ue puede recibir alertas de notificaciones, además el dispositivo necesita monitorear los canales de control asociados con el canal de datos para determinar si los datos son asignados para él. También el Ue proporciona información sobre la calidad del canal y reporta mediciones de las celdas vecinas con fines de realizar un handover a otra celda en caso de que sea necesario.

### 3.4.1. Activación de LTE con Agregación de Portadoras

En LTE Advanced, la CC que es usada para la transmisión de datos es también conocida como celda servidora y es tratada como tal por los procedimientos de capas superiores. En FDD la celda servidora está compuesta por un par de portadoras en diferente frecuencia para el enlace descendente y el ascendente respectivamente. La cantidad CCs puede ser asimétrica, sin embargo, cada componente puede ser señalada en el bloque de información de sistema de tipo 2 (SIB 2) el cual es común para todos los Ues.

El hecho de contar con una celda servidora ayuda a proporcionar control de la información y funciones como; información de movilidad, control de los recursos de radio y el mantenimiento de la conexión. La celda servidora es referida como la celda primaria (PCell en inglés). En el enlace descendente, la portadora que corresponde a la celda primaria es conocida como PCC (Primary Component Carrier) tanto para el enlace descendente y el ascendente, cabe mencionar que la celda primaria puede variar dependiendo de las condiciones de radio del enlace [7].

Como solo una CC es identificada como primaria, el resto de las componentes de las portadoras son identificadas como celdas secundarias (SCells en inglés), las cuales son usadas para aumentar el ancho de banda en los dispositivos de LTE. La clasificación de las portadoras se hace para dividir funciones de manera que toda la información de señalización y control no sea redundante en el Ue cuando se realiza la Agregación de Portadoras. En la figura 3.9 se muestra la representación de Agregación de Portadoras simétrica con cinco CCs en el enlace descendente y ascendente.

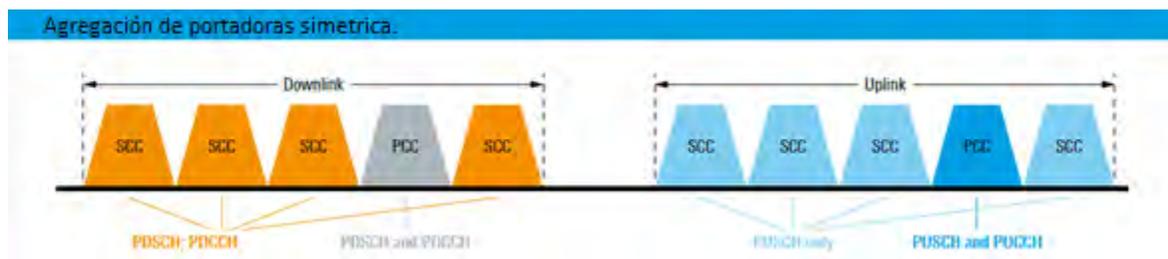


Figura 3.9 Representación de Agregación de Portadoras simétrica en enlace descendente y ascendente. [7]

Cuando el Ue accesa inicialmente a LTE en una celda, ésta es relacionada por la red como la celda primaria (PCell) ya que el dispositivo realiza la selección basada en la calidad del enlace de radio y las capacidades del Ue, por lo tanto, el dispositivo cambiará de celda primaria haciendo un handover. La red puede configurar el resto de las CCs como celdas secundarias siempre y cuando el dispositivo tenga una conexión (modo conectado) con una celda primaria (PCell), esta configuración es realizada a través de la señalización RRC hacia el Ue al igual que la agregación, reconfiguración o al remover las celdas secundarias.

CA utiliza un mecanismo de activación y desactivación de las celdas secundarias (SCells) para optimizar y reducir el consumo de potencia del Ue, este proceso es realizado por la red de manera independiente para cada una de las celdas secundarias que proporcionan servicio al Ue, utilizando algoritmos de la red que permiten cumplir con las demandas de tráfico. Las celdas secundarias son inicialmente desactivadas una vez que la adición se termina y después de un handover.

La activación es hecha mediante un elemento de control de señalización en la capa de MAC, por otro lado, la desactivación puede ser realizada dentro del mismo elemento de control de MAC o sincronizando determinado tiempo establecido por el Ue y la red para cada celda secundaria (este tiempo de desactivación es configurado por el RRC). La PCell está activa en el Ue en modo conectado y esta no puede ser desactivada.

En la figura 3.10 se muestra el esquema de cada CC es estructurada en cada protocolo en el plano de usuario donde los radio bearers son independientes, dentro de la capa MAC el proceso de HARQ es independiente para cada CC y a su vez la modulación y la codificación de las CC también será variable, sin embargo, es evidente que se tiene el doble de recursos disponibles con cada portadora que es agregada.

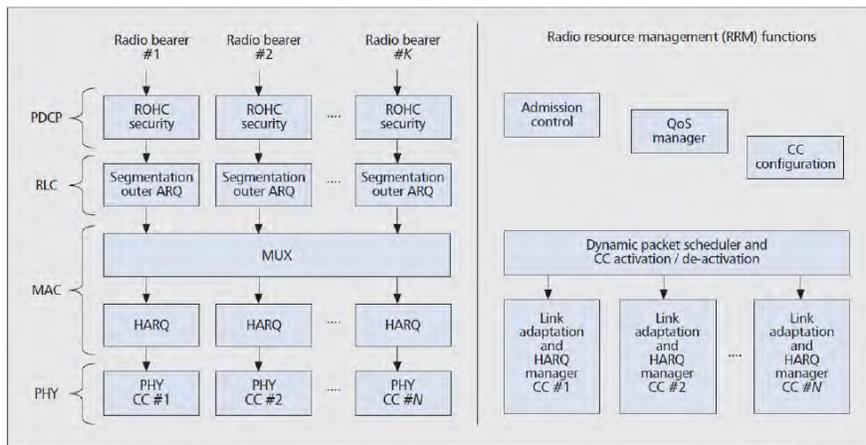


Figura 3.10 Arquitectura de los algoritmos utilizados en la administración de recursos de radio y estructura de los protocolos de radio. [8]

### **3.5. Scheduling cruzado en Agregación de Portadoras.**

La información de control en el enlace descendente (DCI) contiene la asignación de recursos, esquema de modulación, información de HARQ y la distribución de los símbolos utilizando MIMO. Como ya se mencionó, esta información es añadida en el canal de control PDCCH dentro de la capa física en el enlace descendente.

La introducción de LTE con Agregación de Portadoras principalmente se enfoca en la capa de MAC y los protocolos la capa física con algunas modificaciones de los mensajes del protocolo de RRC [9]. Cuando se utiliza LTE con Agregación de Portadoras, el scheduling de los datos ahora se hace a través de las portadoras informando a la terminal por medio del DCI el esquema de modulación para cada una de las CCs. Esta información puede ser implícita o explícita por lo cual la organización 3GPP definió dos alternativas para el scheduling de CA; ya sea que los recursos sean planificados sobre la misma portadora en la cual el scheduling fue proporcionado (sobre PDCCH) como en si fuera independiente, o los recursos son planificados sobre una portadora diferente a la cual el scheduling fue otorgado.

Para la primera alternativa, el PDCCH es codificado por separado para cada CC que sirve al Ue (PCell y SCells) y reusa la estructura del canal de control PDCCH al igual que en la versión 8 y 9. Incluyendo el formato DCI en este caso la asignación del scheduling en el enlace descendente se logra por cada CC.

Mientras que, en la segunda, un solo PDCCH es disponible en la Pcell asignando recursos para todas las CCs del Ue. La segunda opción es conocida como scheduling de portadora cruzado.

Por medio del scheduling de portadora cruzado, los usuarios pueden ser dinámicamente planificados sobre las diferentes component carriers. Esto significa que un Ue podría recibir información de control PDCCH sobre una portadora con la asignación de recursos para otra portadora. Para que esto se lleve a cabo, es necesario agregar un elemento dentro del campo de la información de control en el enlace descendente (DCI) que es llamado CIF (Carrier Indicator Field) compuesto de 3 bits, este campo puede proporcionar señalización hasta 5 portadoras en la versión 10 (figura 3.11). El indicador de la portadora (CIF) en el canal de control PDCCH provee la información acerca de la component carrier usada para el PDSCH o PUSCH.

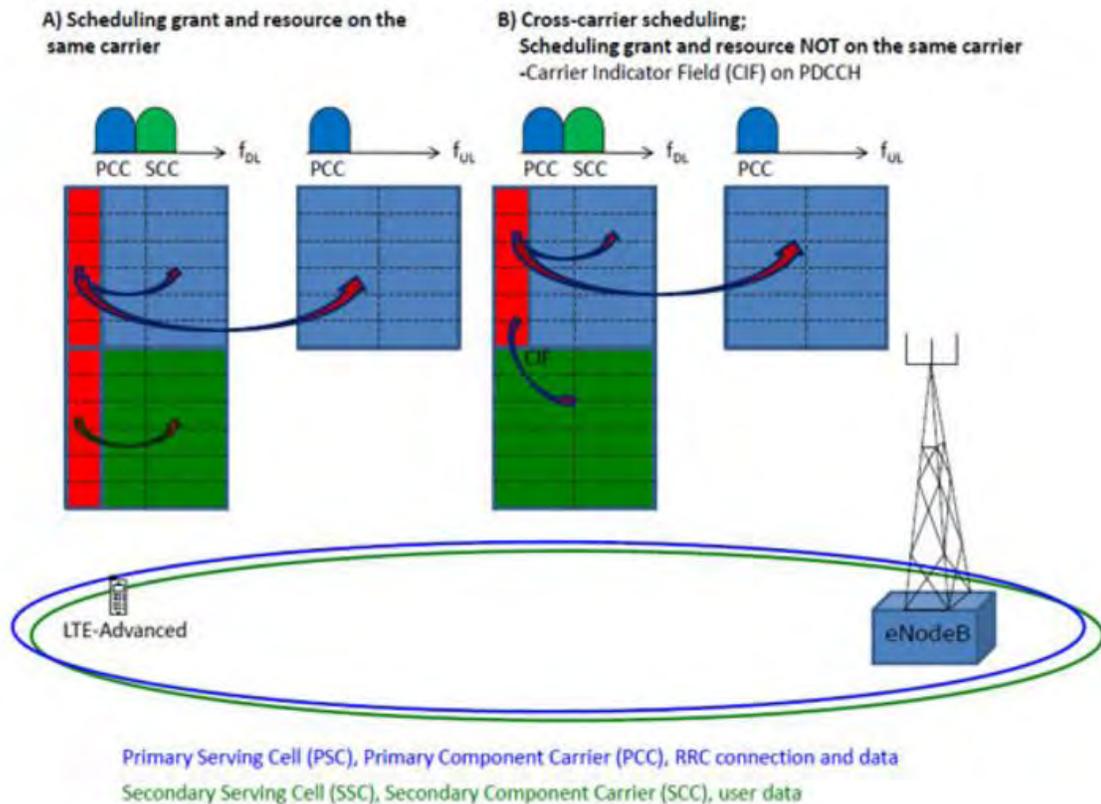


Figura 3.11 LTE CA Scheduling y Cross Carrier scheduling. [10]

### 3.6. Categorías de los Ues en LTE CA.

En el segundo capítulo se presentaron las categorías de los Ues las cuales son de suma importancia para conocer las características de los dispositivos puesto que estas impactan directamente en la tasa de transmisión de datos que pueden alcanzar los dispositivos en LTE. Además, proporcionan información específica que ayuda a comprender la compatibilidad existente entre el Ue y el EnodeB dependiendo de la versión que se esté utilizando, la 3GPP se encarga de definir estas categorías; en el caso de la versión 8, cinco categorías fueron definidas (categoría 1-5) las cuales fueron explicadas previamente.

Cuando LTE CA fue definido en la versión 10, se incluyeron tres categorías más (categoría 6, 7 y 8), las cuales cuentan con un sistema MIMO 8x8 en el enlace descendente y 4x4 para el enlace ascendente aumentando la tasa de transmisión considerablemente. Mientras que en la versión 11, dos categorías más fueron añadidas (categoría 9 y 10) que a continuación serán presentadas.

La definición para cada categoría del Ue es común tanto en FDD y TDD, sin embargo, es separada para el enlace descendente y ascendente. En la tabla 3.4 se muestran los parámetros de FDD en el enlace descendente que definen la tasa de

datos pico para cada categoría del Ue, basándose en el número máximo de bits de bloques de transporte del canal DL-SCH recibidos en un intervalo de transmisión TTI (en el capítulo anterior se explicó que este tiempo de transmisión de datos se realiza en 1 [ms]). Por lo tanto, la tasa de datos pico que puede alcanzar un dispositivo en condiciones ideales es mil veces el valor dado en la columna como “Maximum number of DL-SCH transport block bits received within a TTI” [14].

En la versión 10 de LTE los dispositivos clasificados dentro de la categoría 8 con las características de que alcanzar hasta 2998 Mbps lo cual supera las expectativas de IMT-Advanced gracias a que utilizan una multiplexación espacial de hasta 8 capas.

UE Category	3GPP release	Maximum number of DL-SCH transport block bits received within a TTI	Maximum number of bits of a DL-SCH transport block received within a TTI	Maximum number of supported layers for spatial multiplexing in DL	Theoretical Maximum downlink physical data rate [Mbps]
Category 1	8	10296	10296	1	10
Category 2	8	51024	51024	2	51
Category 3	8	102048	75376	2	102
Category 4	8	150752	75376	2	150
Category 5	8	299552	149776	4	299
Category 6	10	301504	149776 (4 layers)	2 or 4	301
			75376 (2 layers)		
Category 7	10	301504	149776 (4 layers)	2 or 4	301
			75376 (2 layers)		
Category 8	10	2998560	299856	8	2998
Category 9	11	452256	149776 (4 layers)	2 or 4	452
			75376 (2 layers)		
Category 10	11	452256	149776 (4 layers)	2 or 4	452
			75376 (2 layers)		

Tabla 3.4 Parámetros de la capa física en el enlace descendente por categoría de Ue. [9]

En el caso del enlace ascendente se presenta la tabla 3.5 en la cual la tasa de datos pico en FDD se puede calcular como mil veces el valor dado como “Maximum number of UL-SCH transport block bits transmitted within a TTI”. En el caso de la categoría 8 del enlace ascendente es posible alcanzar una tasa máxima de datos de hasta 1497 Mbps tomando ventaja sobre las tasas de transmisión de datos de las categorías anteriores debido a que es utilizada una modulación 64 QAM y un sistema MIMO 4x4.

<b>UE Category</b>	<b>3GPP category</b>	<b>Maximum number of UL-SCH transport block bits transmitted within a TTI</b>	<b>Maximum number of bits of an UL-SCH transport block transmitted within a TTI</b>	<b>Support for 64QAM in UL</b>	<b>Theoretical Maximum downlink physical data rate [Mbps]</b>
Category 1	8	5160	5160	No	5.1
Category 2	8	25456	25456	No	25.4
Category 3	8	51024	51024	No	51
Category 4	8	51024	51024	No	51
Category 5	8	75376	75376	Yes	75
Category 6	10	51024	51024	No	51
Category 7	10	102048	51024	No	102
Category 8	10	1497760	149776	Yes	1497
Category 9	11	51024	51024	No	51
Category 10	11	102048	51024	No	102

Tabla 3.5 Parámetros de la capa física en el enlace ascendente por categoría de Ue. [9]

Las tasas de transmisión de datos en las tablas anteriores fueron definidas para cada versión de LTE por lo que son ideales considerando condiciones ideales en el canal de comunicación, modulaciones de alto orden, el máximo ancho de banda, y particularmente en el caso de LTE CA versión 10 una agregación de cinco portadoras con un ancho de banda de 20 MHz cada una, con estas características es posible superar los requerimientos de IMT-Advanced. Por otro lado, en TDD la tasa de datos pico para las categorías de los dispositivos depende directamente de la configuración tanto del enlace descendente y ascendente.

Aunque existe una fuerte asociación entre las categorías del Ue y las capacidades de agregar cierto número de CCs, en la mayoría de las categorías presentadas no hay un estándar que tenga un vínculo entre la categoría del dispositivo y la cantidad de CCs que puedan ser agregadas.

En la tabla 3.6 se encuentra información relacionada con el número de CCs y las capacidades asociadas con cada una de las categorías del Ue. Como se puede apreciar, el número de CCs en el enlace descendente y ascendente no necesariamente son los mismos. Sin embargo, el número de CCs en el enlace ascendente para el Ue tiene que ser menor o igual al número de CCs para el enlace descendente. La categoría 8 de los Ues es la que cuenta con el mayor número de CCs en DL como en UL para alcanzar una máxima tasa de transmisión de datos en condiciones ideales.

UE Category	Possible number of aggregated DL CCs	Typical number of aggregated DL CCs	Possible number of aggregated UL CCs	Typical number of aggregated UL CCs
Category 1	1...5	1	1...5	1
Category 2	1...5	1	1...5	1
Category 3	1...5	1, 2	1...5	1
Category 4	1...5	1, 2	1...5	1
Category 5	1...5	1	1...5	1
Category 6	1...5	2	1...5	1
Category 7	1...5	2	1...5	2
Category 8	5	5	5	5
Category 9	1...5	3	1...5	1
Category 10	1...5	3	1...5	2

Tabla 3.6 Asociación de categorías del Ue y el número de CCs en LTE CA. [9]

### 3.7. Throughput en LTE con Agregación de Portadoras.

En el capítulo anterior se realizó el cálculo del throughput con el máximo ancho de banda que soporta LTE (20 MHz) así como con una modulación de alto orden (64QAM) donde se calculó una tasa de transmisión cruda  $R_{cruda}=100.8$  [Mbps]. Como LTE CA está diseñado para soportar un arreglo de antenas MIMO 8x8, esto permite aumentar ocho veces la tasa de transmisión, además con la combinación de hasta cinco portadoras incrementando el throughput hasta cinco veces más (ecuación 3.1).

$$R_{CAcruda} = R_{cruda} * MIMO_{CONF} * \#CC \quad (3.1)$$

$$R_{CAcruda} = 100.8 \text{ [Mbps]} * 8 * 5$$

$$R_{CAcruda} = 4\,0320 \text{ [Mbps]} = 4.032 \text{ [Gbps]}$$

La  $R_{CAcruda}$  incluye la información de señalización, por lo que hay que considerar que el 25% de los datos son utilizados para señalización, por lo tanto, el throughput de datos que los usuarios estarían experimentando en condiciones ideales en el mejor de los casos sería de hasta 3.024 [Gbps] en el enlace descendente. Mientras que, en el enlace ascendente, con una configuración de MIMO 4x4 un throughput de 1.512 [Gbps]. En la tabla 3.7 se muestran los valores de throughput de datos que un  $U_e$  puede alcanzar con Carrier Aggregation dependiendo del tipo de configuración MIMO, así como del número de carrier components que son agregadas.

Throughput LTE CA			
Rcruda	MIMO	#CCs	Throughput [Mbps]
201.6	2x2	1	151.2
403.2	2x2	2	302.4
604.8	2x2	3	453.6
806.4	2x2	4	604.8
1008	2x2	5	756
403.2	4x4	1	302.4
806.4	4x4	2	604.8
1209.6	4x4	3	907.2
1612.8	4x4	4	1209.6
2016	4x4	5	1512
806.4	8x8	1	604.8
1612.8	8x8	2	1209.6
2419.2	8x8	3	1814.4
3225.6	8x8	4	2419.2
4032	8x8	5	3024

Tabla 3.7 Throughput LTE CA con diferentes CCs y configuraciones MIMO.

En la figura 3.12 se encuentran graficados los valores de la tabla 3.7 los cuales representan el comportamiento del throughput en LTE con diferentes características de LTE CA. Sin embargo, se observa que la configuración de MIMO nos permite aumentar la tasa de transmisión de datos considerablemente sin importar el número de portadoras que son agregadas. Por ejemplo, utilizando cuatro component carriers con un sistema MIMO 2x2, el throughput es igual a 604.8 Mbps. Mientras que, utilizando una sola portadora con MIMO 8x8 es posible alcanzar ese mismo throughput lo cual es favorable para satisfacer la creciente demanda de datos móviles de la actualidad.

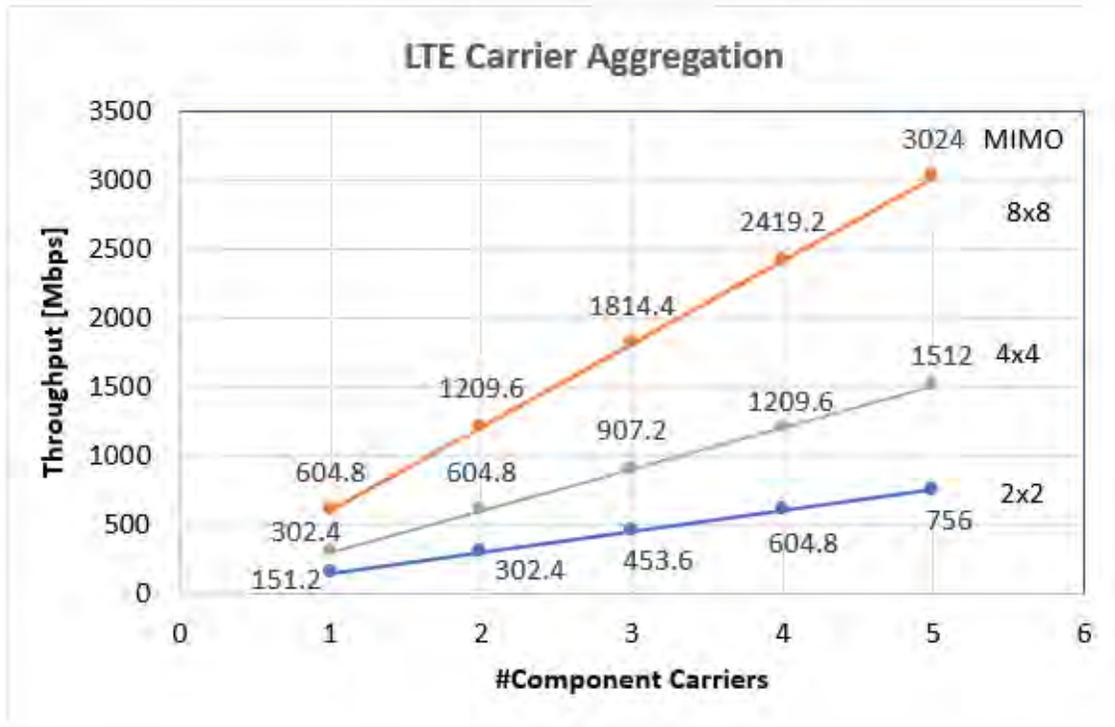


Figura 3.12 Throughput en LTE CA utilizando CCs de 20 MHz y modulación 64 QAM.

Los valores de la gráfica fueron calculados en condiciones ideales considerando el máximo ancho de banda de LTE, así como una modulación de alto orden. Comercialmente existen ciertas limitantes como lo son; el hardware para soportar la combinación de las component carriers, el espectro radioeléctrico disponible de cada operador, las condiciones de existentes del enlace de radio, así como las especificaciones del Ue, que en el siguiente capítulo serán abordadas en el despliegue de redes LTE CA.

### REFERENCIAS CAPITULO III:

- [1] Cisco, *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast*, Febrero 2016.  
<http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html> (Consultado: 9/9/2016).
- [2] ITU-R, *Detailed specifications of the terrestrial radio interfaces of International Mobile Telecommunications-Advanced (IMT-Advanced)*, Recommendation ITU-R M.2012-2, Septiembre, 2015.
- [3] Matthew Baker, *LTE-Advanced Physical Layer*, Rev-090003r1 IMT-Advanced Evaluation Workshop, Beijing, 17 – 18 de Diciembre, 2009.

- [4] 4G Americas, *LTE Carrier Aggregation Technology Development and Deployment Worldwide*, pág. 9, Octubre, 2014.
- [5] 3GPP, *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception*, TS 36.101 version 13.2.1, Release 13, Table 5.6.1-1, Mayo, 2016.
- [6] Ericsson, *LTE/SAE System Overview*, Release 9, 2014.
- [7] Rohde & Schwarz, *Carrier aggregation-(one) key enabler for LTE-Advanced*, Octubre 2012.
- [8] Jeanette Wannstrom, *Carrier Aggregation explained*, Junio 2013.  
<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/101-carrier-aggregation-explained> (Consultado: 20/10/2016).
- [9] 3GPP, *User Equipment (UE) radio access capabilities*, TS36.306 version 12.1.0, Release 12, Junio, 2014.

# Capítulo IV

## Equipos y Mediciones utilizadas en LTE.

### 4.1. Hardware utilizado en el ENodeB.

En este capítulo se describirán las funciones de los equipos que son implementados por los operadores en LTE. A pesar de que existen diferentes fabricantes de equipo de radio la estructura básica del ENodeB consta de diversos elementos que a continuación serán descritos, sin embargo, hay que tomar en cuenta que las características pueden cambiar dependiendo del modelo y fabricante el equipo.

El hardware que se utiliza en las redes móviles generalmente depende del diseño de la red lo cual involucra principalmente; la tecnología de radio a desplegar, disponibilidad del espectro radioeléctrico, zona geográfica (condiciones del terreno), cantidad de usuarios, así como las necesidades del operador. Actualmente la mayoría de los operadores manejan tres diferentes estándares que ha sido parte de la evolución de la tecnología de radio; GSM, WCDMA y LTE. Aunque en Norteamérica se sigue utilizando CDMA, con el despliegue de LTE los operadores están migrando sus redes a esta tecnología que permite hacer un uso eficiente de los recursos de radio.

A continuación, se definirán los elementos en la parte de radio que se encuentran en ENodeB:

**Antena:** Una antena dentro de los sistemas de comunicación móviles es esencial para llevar a cabo la comunicación inalámbrica, esta es denominada como un transductor ya que mediante la inducción de energía eléctrica es posible generar ondas electromagnéticas y viceversa. Además, es bidireccional puesto que la antena por la que se transmite, es la misma en la que se reciben ondas radioeléctricas. La función principal de la antena es añadir ganancia a la señal electromagnética incrementando la potencia al ser enviada o recibida.

Los modelos de las antenas pueden ser elegidos basados en la ganancia, banda de frecuencia de operación, tipo de configuración (MIMO 2x2, 4x4, hasta 8x8), ancho del haz, así como el patrón de radiación que entrega la antena.

**Unidad de radio (Remote Radio Unit en inglés):** Este elemento recibe datos digitales de la unidad digital y son convertidos en señales de radio para ser enviados a la antena. Y a su vez recibe señales del radio y las convierte en señales digitales para ser procesadas por la unidad digital. Particularmente RRU es el nombre en inglés que reciben los equipos de radio que son montados cerca de la antena para reducir la pérdida de potencia.

Una unidad de radio consiste principalmente de un filtro y un amplificador de potencia multi-portadora. Cada unidad puede ser implementada por estándar (GSM,

WCDMA y LTE) sin embargo, ya existen radios que son multi-estandar ofreciendo flexibilidad y espacio en donde son instalados. La potencia de transmisión de estos equipos puede ser de 20 [W], 60 [W], 80 [W] o hasta 100 [W] [1].

También, los radios son clasificados de acuerdo a la banda de frecuencia de operación y el ancho de banda que soporte cada una de éstas, por lo tanto, los radios pueden operar en modo FDD y TDD. Hay que considerar que el ancho de banda máximo que un radio multi-estandar soporta es de 20 MHz como LTE. Finalmente, una unidad de radio consta de diferentes puertos, y puede compartir antenas para ciertas tecnologías como LTE/WCDMA.

Procesamiento como transceptor.

Amplificador de potencia.

Filtrado de la señal del enlace descendente y ascendente.

Transmisión de diferentes portadoras del enlace descendente y ascendente.

Soportan RET (Remote Electrical Tilt).

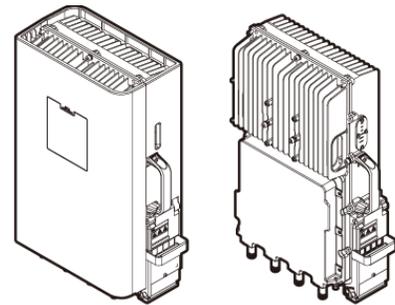


Figura 4.1 RRU y sus funciones. [1]

**Unidad digital (Digital Unit en inglés):** Como su nombre lo indica la unidad digital transmite y recibe señales digitales, este equipo es responsable de procesar las señales en banda base (sin modular) en el enlace descendente y ascendente para esto utiliza códigos de línea estableciendo comunicación con las unidades de radio, identificada en inglés como DU.

Al igual que los radios esta unidad puede ser multi-estandar o soportar una sola tecnología de radio. La unidad digital se encarga de controlar el clima, temperatura, energía, así como la sincronización de la conexión con la red de transporte o GPS externo. Cuenta con un controlador encargado de gestionar los procesos de protocolo de IP, traducción de direcciones IP, procesamiento de operación y mantenimiento, así como supervisión de la celda para no causar interferencia con algún otra.

Existe otra variación de la unidad digital conocida como banda base BBU (Base Band Unit) aunque usualmente esta unidad cuenta con mayor capacidad de ancho de banda y canales, su diferenciador es que es capaz de gestionar diferentes tecnologías de radio y múltiples celdas a la vez. La BBU es capaz incluso de tener la funcionalidad de router para agregar el tráfico IP del sitio hacia la red troncal.

El procesamiento de la señal digital de la banda base.  
Protocolos de la interfaz S1 que se usa para conectar a la red principal (red troncal).  
Protocolos de la interfaz X2 que se usa para comunicarse con el EnodeB vecino.  
Procesamiento de llamadas y a la vez monitorea el control de este procesamiento.  
Control del clima, temperatura y sincronización con la red troncal.

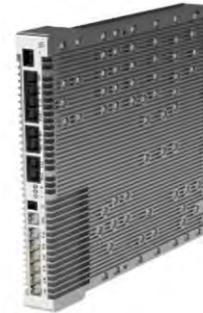


Figura 4.2 Unidad digital de LTE y sus características. [1]

**CPRI (Common Public Radio Interface):** Esta interfaz CPRI fue definida por un consorcio de cinco compañías (Ericsson, Huawei, Alcatel-Lucent, NEC, y Nokia) con el fin de estandarizar el protocolo de comunicación existente entre la unidad digital y la unidad de radio, esta interfaz es implementada utilizando cables ópticos o eléctricos dependiendo del diseño de la red [2].

Tradicionalmente los radios se ubicaban dentro del módulo de la radiobase la cual se encontraba al nivel del piso, en esta configuración el radio era conectado mediante un cable de RF o coaxial hacia a la antena. Este tipo de implementación generaba mayor pérdida de potencia en la línea de transmisión y se necesitaba de amplificadores de potencia de alta ganancia para poder recuperar la señal los radios utilizados (figura 4.3).



Figura 4.3 Unidades de radio al nivel del piso.

Sin embargo, una nueva configuración fue diseñada para reducir las pérdidas en la línea de transmisión instalando el radio cerca de la antena y conectándolo mediante fibra óptica a la unidad digital. Una de las ventajas de esta configuración es que la transmisión de datos es más rápida entre el radio y la unidad digital y que la longitud del cable de RF hacia la antena es de menor longitud lo cual implica menos pérdidas de potencia (figura 4.4). A pesar de que este nuevo diseño permite reducir las pérdidas de potencia, la unidad de radio se encuentra a la intemperie por lo tanto tiene que soportar las diferentes condiciones ambientales y su acceso es más difícil en caso de que se necesite reemplazar o repararse.

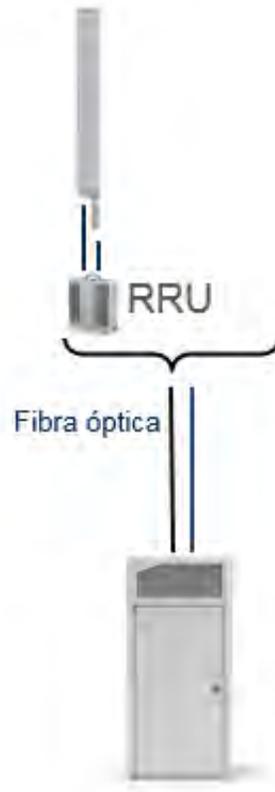


Figura 4.4 CPRI utilizando fibra óptica

**RET (Remote Electrical Tilt):** Este es un elemento que permite ajustar la inclinación de la antena hacia abajo (downtilt) o hacia arriba (uptilt) modificando el patrón de radiación de la antena remotamente para optimizar la propagación de la señal de radio realizando movimientos verticales a la antena.



Figura 4.5 RET.

**Router:** Debido a que el ENodeB necesita enviar y recibir tráfico IP hacia la red troncal e internet es necesario contar con un elemento que se encargue de brindar conectividad externa mediante de protocolos de enrutamiento, así como brindar calidad de servicio y éste es definido como CSR (Cell Site Router). Existen tres formas en que las estaciones base puede conectarse a la red troncal; usando fibra óptica, cobre o microondas. Cabe mencionar que dependiendo del medio de transmisión que se utilice el modelo del CSR es seleccionado.



Figura 4.6 CSR (Cell Site Router). [3]

En el estándar de LTE la latencia es medida en milisegundos por lo que comúnmente la fibra óptica es utilizada como medio de transmisión ya que la transmisión de datos es mucho más rápida y a su vez el router permite hacer uso de VLANs para separar el tráfico de voz, datos, video y de esta manera ofrecer calidad de servicio (QoS en inglés). Existen diferentes modelos de router, pero la mayoría cuenta con diferentes puertos Ethernet y de fibra óptica, que soportan VLANs, MPLS, así como un enlace de operación y mantenimiento para reportar el estado del ENodeB en algún servidor remoto.

**Gabinete:** Este es un módulo que cuenta con ranuras para añadir los elementos antes descritos (RRU, DU, CPRI y CSR). El gabinete se encarga de suministrar la energía eléctrica (-48 [V] DC) a cada elemento, además, cuenta con baterías y un respaldo de estas en caso de que la energía eléctrica de la acometida eléctrica falle. El sistema de alimentación del gabinete puede alimentar a otra radiobase además los gabinetes cuentan con un software que ayudan a hacer eficiente el ahorro de energía e incrementar la durabilidad de las baterías desactivando todos los componentes que no se encuentren en uso, dependiendo del modelo la durabilidad del respaldo de baterías sin embargo algunos soportan hasta 18 horas.

Por otro lado, dentro del gabinete hay una unidad de clima que brinda enfriamiento a cualquier elemento que lo requiera utilizando ventiladores para cualquier condición dada con un ruido que evita interferencias en el cableado. Adicionalmente es agregada una unidad de soporte para alarmas con el fin de monitorear el estado de la radiobase remotamente y pueda detectarse algún mal funcionamiento en el equipo.

En la figura 4.6 se muestran a manera de ejemplificación un gabinete Ericsson que pertenece a la familia de RBS (Radio Base Station) 6000, el modelo del gabinete es el RBS 6102, un gabinete utilizado en exteriores con unidades de radio internas o externas o una combinación de ambas. Soporta hasta 12 unidades de radio y 4 unidades digitales. Los módulos de radio pueden ser una combinación de GSM, WCDMA y LTE para operar sobre las bandas de frecuencia comunes estas tecnologías. Cada módulo de radio soporta hasta 3 × 16 GSM, 3 × 4 MIMO WCDMA, 3 × 20 MHz MIMO LTE o una combinación de estos estándares. También, es agregado un respaldo de baterías, este modelo de RBS puede ser alimentada con 200-250V de AC o -48V en DC con dos módulos de baterías [4]

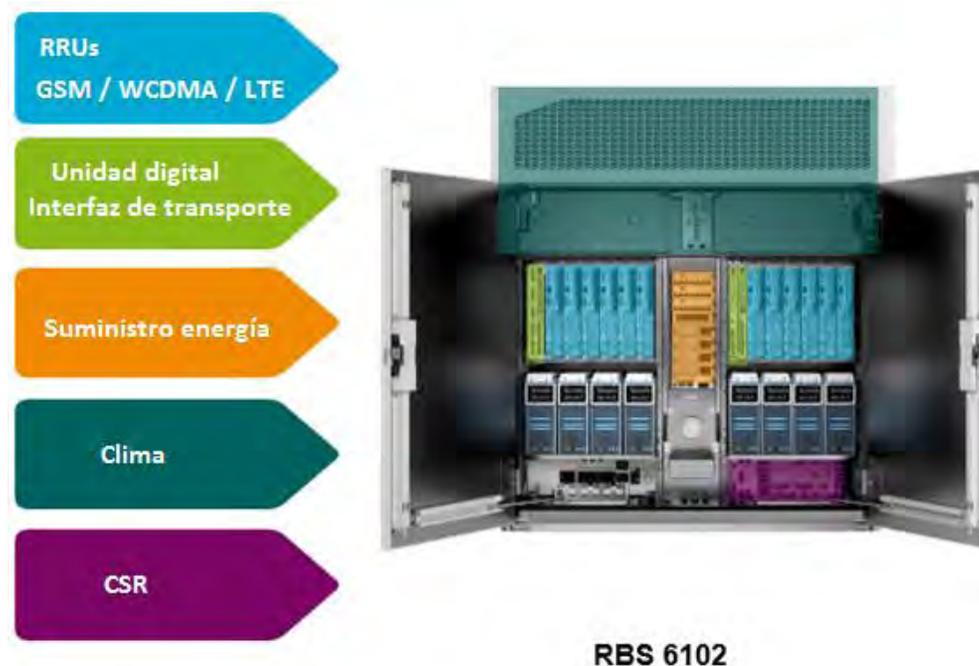


Figura 4.7 Gabinete Ericsson RBS 6102. [4]

## 4.2. Tipo de torres utilizadas en comunicaciones móviles.

Las estructuras donde son instaladas las unidades de radio y las antenas para proporcionar la altura adecuada para ofrecer mayor cobertura en una zona, son conocidas como torres celulares, además éstas brindan soporte cuando fuerzas externas como el viento y sismos están presentes en una zona geográfica. Existen diferentes estructuras con varias características las cuales son utilizadas de acuerdo al diseño o posibilidades del operador de telefonía celular, las estructuras más comunes se encuentran las torres arriostradas, torres tipo monopolo y las torres autoportadas [5].

### **Torre tipo monopolo:**

Esta estructura consiste en tubos de sección circular o poligonal, y en elevación puede ser de sección constante o cónica. Este tipo de torres se utilizan cuando el espacio disponible para la torre no es muy amplio, ya que la cimentación de estas es mucho más pequeña que las torres autoportadas. Se fabrican para alturas de hasta 42 [m] o más. Algunas veces estas torres son camuflajeadas en forma de árbol, palmera, pino, reloj monumental, poste de alumbrado, asta bandera, campanario etc., estas estructuras son utilizadas en zonas urbanas.



Figura 4.8 Torre tipo monopolo. [6]

### **Torres autoportadas:**

Este tipo de torres manejan alturas de hasta 81 [m] en tramos múltiples de 6 [m] y remate de 3 [m]; generalmente son utilizadas en sitios en terreno natural o para sitios con difícil acceso en donde no es posible utilizar una grúa. Su geometría en elevación es de forma piramidal y en planta triangular. Es posible el uso de torres autoportadas esbeltas de sección constante para alturas de 42 [m].



Figura 4.9 Torre autoportada. [7]

### **Torre arriostrada:**

Este tipo de torre es soportada por tensores generalmente de acero con alta resistencia, una de las ventajas es que proporciona una gran altura con un costo económico. Comúnmente tiene tirantes en tres direcciones sobre un radio de anclaje de 2/3 de altura de la torre, este tipo de torre es más ligera, sin embargo, requiere más espacio de libre para el anclaje de los cables. La instalación de esta estructura se realiza en azoteas de casas y edificios donde no hay problema de espacio. Manejan desde 3 [m] hasta 60 [m] o más dependiendo de los parámetros de diseño.



Figura 4.10 Torre arriostrada. [8]

### 4.3. Identificación de la celda en LTE.

#### 4.3.1. Señales de referencia PSS y SSS.

Las señales de la capa física permiten entregar información relacionada con la sincronización temporal, identificación de la celda servidora, así como la estimación del canal. En el enlace descendente las señales PSS (Primary Synchronization Signal) y SSC (Secondary Synchronization Signal) son utilizadas para sincronización en tiempo de la trama y obtener el identificador de la celda. Por otro lado, también existe una señal de referencia que ayuda a ofrecer un punto de referencia para la potencia en el enlace descendente que es recibida por el Ue.

En FDD la PSS se transmite dos veces por cada trama; en el último símbolo OFDM de los slots 0 y 10. Esta señal ocupa 62 subportadoras centrales del canal que utilice LTE facilitando su búsqueda en cualquier ancho de banda. Aunque se asignan 72 subportadoras (6 RBs) para transmitir las señales de sincronización, 5 subportadoras son reservadas los extremos de los 6 bloques de recursos. Las subportadoras PSS se modulan con una secuencia en el dominio espectral llamada Zadoff -Chu que entrega la misma potencia con diferente fase haciendo una excelente correlación con el resto de las subportadoras [12].

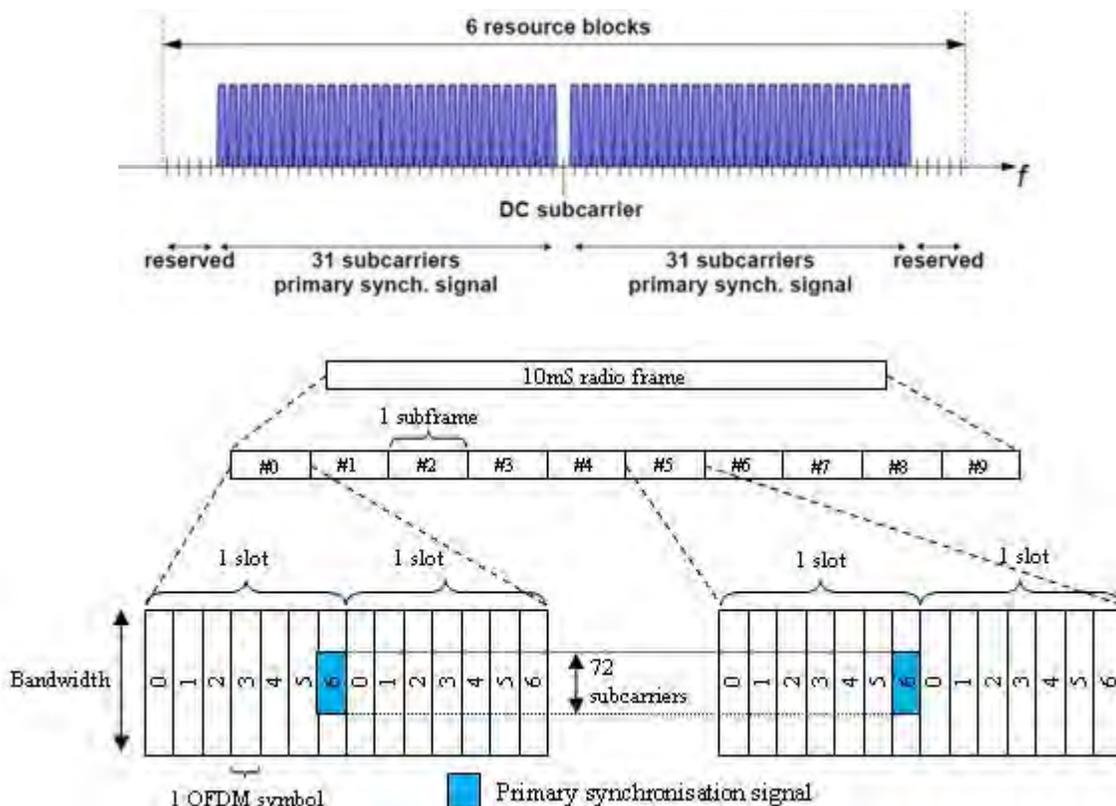


Figura 4.11 Ubicación de la PSS en la trama de LTE. [9]

La SSS se transmite dos veces por trama en el penúltimo símbolo OFDM de los slots 0 y 10 sobre las mismas subportadoras que la PSS. Cabe mencionar que ocupa las 62 subportadoras centrales de un total de 72 subportadoras (6 bloques de recurso) que son asignadas.

#### 4.3.2. PCI

Cada celda tiene un identificador que ayuda a diferenciar a la celda dentro del ENodeB, éste a su vez puede ser utilizado para diferenciar las bandas de frecuencia en cual la celda se encuentre operando. El identificador de la celda es definido en LTE como PCI (Physical Cell ID) que se divide en dos; el identificador de grupo de la celda “Physical Cell Identity Group en inglés “ el cual se obtiene de la SSS y el identificador físico (Physical Layer Identity). El “Physical Layer Cell Identity Group” toma valores de 0-167 mientras que el “Physical Layer Identity” puede ser de 0-2, con estos dos identificadores el Ue es capaz de determinar el PCI. El PCI es calculado como se muestra en la ecuación 4.1, tomando valores desde 0-503 [10].

$$PCI = 3 * Physical Layer Cell Identity Group + Physical Layer Identity \quad (4.1)$$

Los PCIs son únicos por sector y ENodeB entre celdas cercanas entonces, por lo tanto, las celdas que contengan el mismo PCI, tienen que estar alejadas una de la otra, de lo contrario podría presentarse alguna confusión o colisión en los PCIs. El reúso de PCIs se puede implementar automáticamente por el ENodeB o manualmente asignando un “Physical Layer Cell Identity Group” por ENodeB y un “Physical Layer Identity” por cada sector/celda. Una confusión de PCI se presenta cuando una celda tiene más de un vecino con el mismo PCI. Por otra parte, una colisión de PCI ocurre si una celda tiene el mismo PCI y frecuencia que su celda vecina, causando que el handover nunca se realice dentro de estas celdas.

Como ejemplo, se realizará el cálculo del PCI usando un “Physical Layer Cell Identity Group” con un valor igual a 15. Al utilizar la ecuación “” y ser multiplicado por tres el valor obtenido es 45 por consiguiente, al hacer la operación con los tres valores (0,1,2) que puede tomar el “Physical Layer Identity” se obtienen los diferentes valores que se muestran en la figura “” que a su vez son asignados a las celdas del ENodeB con tres sectores que son diferenciados por cada valor del PCI.

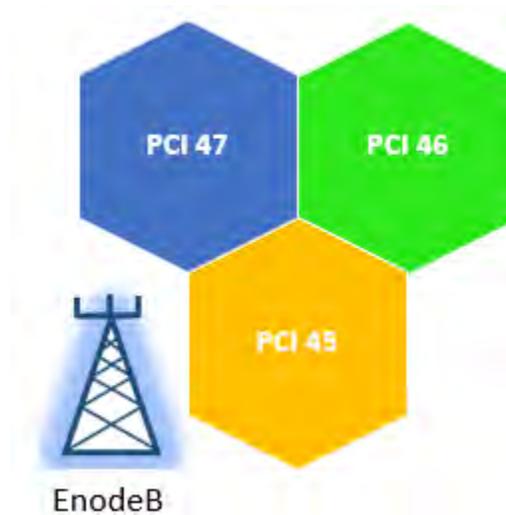


Figura 4.12 PCIs en un EnodeB con tres celdas.

Una vez que el Ue conoce el PCI de una determinada celda, ubica la localización de las señales de referencia en tiempo y frecuencia de la trama en LTE, esta ubicación es mapeada en los elementos de recursos con el fin de que el Ue tenga conocimiento de los parámetros que permiten realizar la estimación del canal, selección y reelección de la celda, así como de handover. Es importante mencionar, que la ubicación dentro de los elementos de recurso es determinada por el tipo de configuración de la antena.

Las señales de referencia son insertadas entre el primero y el antepenúltimo símbolo OFDM (esto corresponde al 4° símbolo OFDM) de cada slot, sin embargo, hay un escalonamiento en frecuencia de tres subportadoras entre la ubicación del primer símbolo y el cuarto símbolo OFDM. Una vez que son mapeados estos símbolos hay que tomar en cuenta que el espacio en frecuencia entre cada señal de referencia cuando se utiliza una sola antena es de 6 subportadoras, dando como resultado 4 señales de referencia en cada bloque de recurso [11].

En la figura 4.13 se muestra la rejilla del bloque de recurso con dos de las 6 posibles ubicaciones en las que pueden ser mapeadas las señales de referencia dentro de los elementos de recurso, en color rojo son mapeadas cuatro señales de referencia con las posiciones antes mencionadas (R1). Por otro lado, en color azul se muestra un cambio de frecuencia de una subportadora modificando la ubicación de las señales de referencia con un desplazamiento en frecuencia (marcadas como R2).

Como se puede observar, cuando una sola antena es utilizada puede haber hasta 6 cambios en frecuencia variando la ubicación de las señales de referencia en el bloque de recurso. El mapeo de las señales de referencia es esencial para que el Ue pueda interpolar los valores de cada símbolo y estimar la calidad del canal con separaciones en tiempo y frecuencia a fin de evitar interferencia entre las celdas.

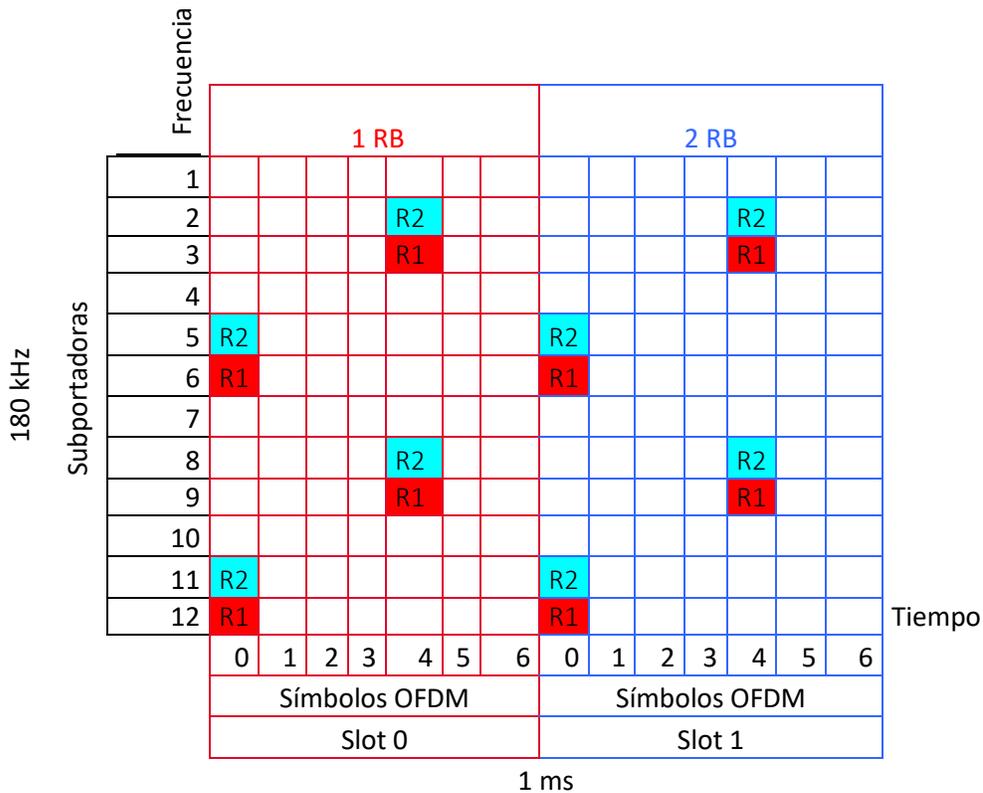


Figura 4.13 Mapeo de señales de referencia en el bloque de recurso.

En caso de que la configuración de la antena tenga más de dos antenas transmisoras, para los múltiples puertos de la antena algunas de las frecuencias son usadas por la otra antena, por lo tanto, solo pueden presentarse 3 diferentes cambios de frecuencia en la ubicación de las señales de referencia ya que el segundo puerto de la antena es desplazado por tres subportadoras con respecto a las señales de referencia de la primera antena de cada símbolo OFDM. Mientras que las señales de referencia de la tercera y cuarta antena son localizadas en el segundo símbolo de cada slot (dos señales de referencia por bloque de recurso). La figura 4.14 muestra el mapeo de las señales de referencia para cada antena en donde existen espacios de los elementos de recurso que no son ocupados ya que son reservados para transmitir las señales de referencia del resto de las antenas.

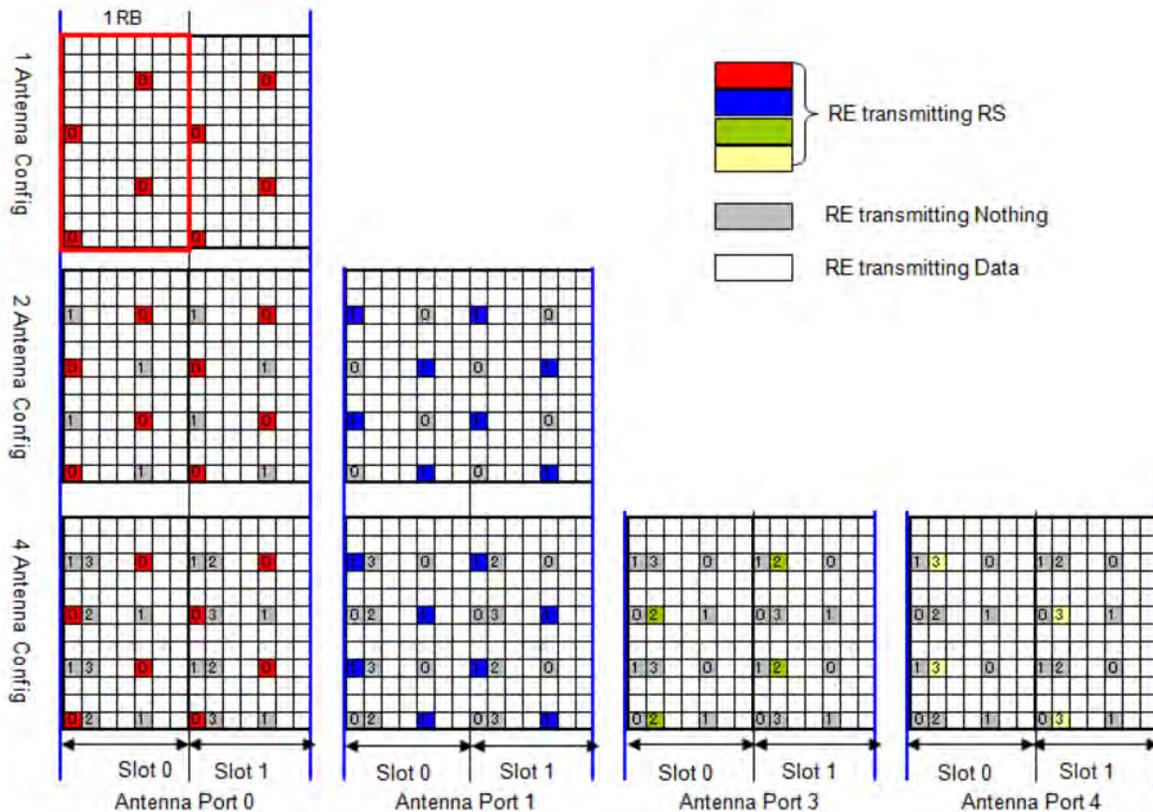


Figura 4.14 Mapeo de señales de referencia MIMO 4x4. [12]

Para saber si existe colisión entre las ubicaciones de las señales de referencia de diferentes celdas se calcula el modulo del PCI, esta operación varía dependiendo del sistema de configuración de la antena. El módulo se calcula mediante la división del valor de PCI entre el total de posiciones posibles de las señales de referencia, Por consiguiente, el modulo del PCI se calcula con un valor de 6 para una sola antena transmisora y con un valor de 3 para en sistemas MIMO 2x2 y 4x4 [13]. Calculando el módulo del PCI se asegura que no exista traslape de las señales de referencia de cada PCI en los elementos de recurso lo cual puede causar dificultades al identificar la celda y la estimación del canal es mejor. Una de las ventajas del mapeo de las señales de referencia en el enlace descendente que son generadas usando una modulación QPSK lo cual reduce la cantidad de potencia requerida al ser transmitidas.

#### 4.4. Mediciones de potencia en el Ue.

##### RSRP

La medición de cobertura en LTE es importante para que los Ue para la selección de celdas y el proceso de scheduling. El RSRP (Reference Signal Received Power) es un indicador de la señal recibida en donwlink que entrega el ENodeB al Ue. El rango de valores de potencia del RSRP pueden ser desde -40 dBm hasta -140 dBm

con una resolución de 1 dB. El propósito principal del RSRP es determinar cuál es la mejor celda en la interfaz de radio y seleccionarla como la celda servidora para acceder a esta o realizar un inter-LTE handover, aunque, la sensibilidad de recepción del Ue puede variar dependiendo del modelo de dispositivo por esta razón también los usuarios pueden experimentar diferente calidad de servicio dentro de LTE.

El Ue se encarga de enviar los valores del RSRP mediante el mensaje de RRC al ENodeB donde cada valor de RSRP es mapeado con un valor del 0-97 antes de ser incluido en los mensajes de RRC (Tabla 4.1). Existen diferentes niveles de potencia que pueden hacer una estimación de la calidad de servicio del enlace de radio estos valores pueden entrar en tres categorías; si el RSRP > -75 dBm una excelente calidad de servicio es proporcionada por el ENodeB y no muchos usuarios compiten por ancho de banda disponible dentro de la celda. El rango de -75 dBm y -95 dBm es un nivel intermedio y una ligera degradación de calidad de servicio puede ser experimentada con un declive de throughput del 30% al 50% [13].

Conforme el valor de RSRP disminuye la calidad de servicio al igual que el throughput es menor debido a la modulación adaptativa que ofrece LTE, por lo tanto, valores de RSRP entre -100 a -108 dBm en interiores como edificios o casas experimentarán fallas o intermitencia en el servicio de datos.

Reported value	Measured quantity value	Unit
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 4.1 Valores de RSRP [14]

## RSRQ

Otro de las mediciones de potencia es el RSRQ (Reference Signal Received Quality) el cual es usado en conjunto con el RSRP para determinar que celda de LTE es la mejor dentro de una locación específica, la potencia del RSRQ también es usada como criterio para la selección o handover dentro de una celda, y está fuertemente relacionada con el RSRP (ecuación 4.2). En donde N es el número de bloques de recurso sobre el cual es medido el RSSI [13].

$$RSRQ = N * \frac{RSRP}{RSSI} \quad (4.2)$$

El valor del RSSI (Received Signal Strength Indicator) es un parámetro que proporciona la información acerca del total de la potencia recibida en un ancho de banda de LTE, es decir, de todos los símbolos incluyendo las señales de interferencia y ruido de las celdas vecinas sobre la misma banda de frecuencia.

Al igual que el RSRP el RSRQ es clasificado en tres rangos sin embargo los valores de este parámetro pueden variar en base a la capacidad de cada celda en LTE. En general los valores de RSRQ mayores a -9 dB garantizan al usuario la mejor experiencia en la calidad de servicio. Mientras que el rango de -9 dB a -12 dB es visto con una ligera degradación o bien una experiencia justa. Finalmente, empezando con valores de RSRQ de -13 dB hacia abajo el throughput decae significativamente con un bajo throughput por lo cual la transmisión de datos es lenta con un alto riesgo de intermitencia. El mapeo de los valores de RSRQ en dBms se realiza a un número entero antes de incluirlo en el mensaje de RRC en un rango de valores del 0 al 34 (Tabla 4.2).

Reported value	Measured quantity value	Unit
RSRQ_00	$RSRQ < -19.5$	dB
RSRQ_01	$-19.5 \leq RSRQ < -19$	dB
RSRQ_02	$-19 \leq RSRQ < -18.5$	dB
...	...	...
RSRQ_32	$-4 \leq RSRQ < -3.5$	dB
RSRQ_33	$-3.5 \leq RSRQ < -3$	dB
RSRQ_34	$-3 \leq RSRQ$	dB

Tabla 4.2 Valores de RSRQ [15]

En LTE, tanto el RSRP como el RSRQ ayudan a determinar si existen problemas de cobertura, interferencia e incluso de capacidad dentro de una celda. Por ejemplo, si el RSRP tiene una buena calidad y el RSRQ es bajo puede haber problemas de interferencia. Por otro lado, si el RSRP y el RSRQ decaen al mismo tiempo en una locación, esto claramente indica que el área tiene poca cobertura, en ambos casos presentando problemas de conectividad en LTE.

### **SINR (Signal to Noise Interference Ratio)**

El método para estimar el SINR en el Ue no entra dentro de las mediciones de potencia de la 3GPP así que el valor puede variar de acuerdo al fabricante del equipo de radio del Ue. En general este indicador es definido como la relación de la señal deseada con la potencia del ruido e interferencia de otras celdas y fuentes externas. La potencia de la señal es toda la potencia recibida, incluyendo los elementos de recurso que no transportan datos de usuario. La interferencia y el ruido son niveles promedio para los elementos de recurso para la transmisión de datos.

El Ue puede reportar diferentes valores de SINR cuando se encuentra en un ambiente con baja movilidad en la práctica para diversos dispositivos de teléfono puede alcanzar valores de alrededor de -5 dB-23 dB, sin embargo, si el UE se encuentra en movimiento este valor se reduce [16]. El SINR ayuda a calcular CQI en el EnodeB la potencia que es medida es de todos los elementos de recurso.

#### 4.5. Identificación de banda de frecuencia en LTE.

LTE puede ser desplegado sobre diferentes bandas de frecuencia, tanto el EnodeB como el Ue necesitan identificar la frecuencia en la que se encuentra las celdas. El identificador que es utilizado para conocer el canal, así como la banda de frecuencia de LTE es conocido como EARFCN (EUTRA Radio Frequency Channel Number). El EARFCN indica la frecuencia de la portadora en la que opera una celda sobre toda la banda de frecuencia disponible.

Los valores definidos para los EARFCNs se encuentran en el rango de 0-65535 de acuerdo a la especificación TS 36.101 de la 3GPP (ver tabla 4.3). Como se observa hay dos columnas con un rango de valores definidos como “Range of NDL” y “Range of NUL” las cuales corresponden al rango de valores que toman los EARFCNs en el enlace descendente y ascendente respectivamente. Cabe mencionar que rango de valores de EARFCNs son iguales en TDD ya que un solo canal es utilizado y es multiplexado en tiempo.

Así mismo en la especificación antes mencionada, también se definen las ecuaciones 4.3 y 4.4. Para el cálculo de la frecuencia de la portadora de LTE.  $F_{DL\_LOW}$  es el valor más bajo de frecuencia en el enlace descendente sobre una banda de frecuencia. Mientras que el  $N_{off\_DL}$  es un valor definido para el cálculo de la frecuencia del canal.

$$F_{DL} = F_{DL\_low} + 0.1(N_{DL} - N_{off\_DL}) [MHz] \quad (4.3)$$

$$F_{UL} = F_{UL\_low} + 0.1(N_{UL} - N_{off\_UL}) [MHz] \quad (4.4)$$

E-UTRA Operating Band	Downlink			Uplink		
	F <sub>DL_low</sub> (MHz)	N <sub>Offs-DL</sub>	Range of N <sub>DL</sub>	F <sub>UL_low</sub> (MHz)	N <sub>Offs-UL</sub>	Range of N <sub>UL</sub>
1	2110	0	0 – 599	1920	18000	18000 – 18599
2	1930	600	600 – 1199	1850	18600	18600 – 19199
3	1805	1200	1200 – 1949	1710	19200	19200 – 19949
4	2110	1950	1950 – 2399	1710	19950	19950 – 20399
5	869	2400	2400 – 2649	824	20400	20400 – 20649
6	875	2650	2650 – 2749	830	20650	20650 – 20749
7	2620	2750	2750 – 3449	2500	20750	20750 – 21449
8	925	3450	3450 – 3799	880	21450	21450 – 21799
9	1844.9	3800	3800 – 4149	1749.9	21800	21800 – 22149
10	2110	4150	4150 – 4749	1710	22150	22150 – 22749
11	1475.9	4750	4750 – 4949	1427.9	22750	22750 – 22949
12	729	5010	5010 – 5179	699	23010	23010 – 23179
13	746	5180	5180 – 5279	777	23180	23180 – 23279
14	758	5280	5280 – 5379	788	23280	23280 – 23379
...						
17	734	5730	5730 – 5849	704	23730	23730 – 23849
18	860	5850	5850 – 5999	815	23850	23850 – 23999
19	875	6000	6000 – 6149	830	24000	24000 – 24149
20	791	6150	6150 – 6449	832	24150	24150 – 24449
21	1495.9	6450	6450 – 6599	1447.9	24450	24450 – 24599
22	3510	6600	6600 – 7399	3410	24600	24600 – 25399
23	2180	7500	7500 – 7699	2000	25500	25500 – 25699
24	1525	7700	7700 – 8039	1626.5	25700	25700 – 26039
25	1930	8040	8040 – 8689	1850	26040	26040 – 26689
26	859	8690	8690 – 9039	814	26690	26690 – 27039
27	852	9040	9040 – 9209	807	27040	27040 – 27209
28	758	9210	9210 – 9659	703	27210	27210 – 27659
29 <sup>2</sup>	717	9660	9660 – 9769		N/A	
30	2350	9770	9770 – 9869	2305	27660	27660 – 27759
31	462.5	9870	9870 – 9919	452.5	27760	27760 – 27809
...32 <sup>2</sup>	1452	9920	9920 – 10359		N/A	
33	1900	36000	36000 – 36199	1900	36000	36000 – 36199
34	2010	36200	36200 – 36349	2010	36200	36200 – 36349
35	1850	36350	36350 – 36949	1850	36350	36350 – 36949
36	1930	36950	36950 – 37549	1930	36950	36950 – 37549
37	1910	37550	37550 – 37749	1910	37550	37550 – 37749
38	2570	37750	37750 – 38249	2570	37750	37750 – 38249
39	1880	38250	38250 – 38649	1880	38250	38250 – 38649
40	2300	38650	38650 – 39649	2300	38650	38650 – 39649
41	2496	39650	39650 – 41589	2496	39650	39650 – 41589
42	3400	41590	41590 – 43589	3400	41590	41590 – 43589
43	3600	43590	43590 – 45589	3600	43590	43590 – 45589
44	703	45590	45590 – 46589	703	45590	45590 – 46589

Tabla 4.3 Rango de EARFCNs por banda de frecuencia [17].

#### 4.6. Medición de parámetros en el Ue para LTE.

Los smartphones cuentan con un código para acceder a un modo de prueba que permite realizar pruebas de hardware, software y selección de configuraciones avanzadas en el dispositivo. Sin embargo, la prueba que muestra los parámetros de transmisión, recepción y mediciones de potencia de LTE es identificada como “Field Test Mode” en los distintos sistemas operativos de los dispositivos, para acceder a esta prueba se ingresa un código en el menú de marcación dependiendo del modelo y fabricante del dispositivo.

A fin de conocer los valores de potencia reales que entrega un operador móvil, se realizó una prueba en la red de movistar utilizando un smartphone “LG G3-D852”, éste tiene un procesador “Qualcomm MSM8974AC Snapdragon 801” que lo coloca en la Categoría 4 de LTE (Tabla 4.4).

<b>Características de LTE Qualcomm MSM8974AC Snapdragon 801 (Categoría 4)</b>	
Categoría Ue	4
Downlink Features	2x10 MHz CA/ 64 QAM
Uplink Features	1x20 MHz CA/ 16 QAM
Transmisión pico de datos downlink	150 Mbps
Transmisión pico de datos uplink	50 Mbps

Tabla 4.4 Especificaciones de LTE del procesador Qualcomm MSM8974AC Snapdragon 801 [18]

Para acceder al modo de prueba de este dispositivo se ingresaron los dígitos 277634#\*# en el menú de marcación (Figura 4.15).



Figura 4.15 Código acceso a Field Test mode LG G3- D852

Después una nueva ventana es abierta para seleccionar la opción “Field Test”, posteriormente se selecciona “Modem Settings” y finalmente, se accede al modo “Engineering Mode” como se ve en la figura 4.16.

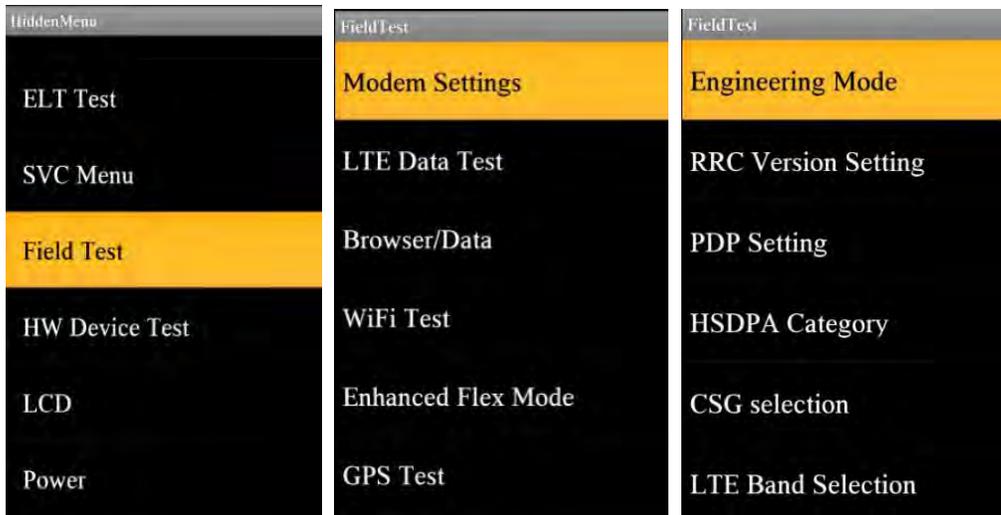


Figura 4.16 Modo de acceso al “Field Test” LG G3-D852.

En “Engineering Mode” se muestran las mediciones de potencia que el Ue está recibiendo para las diferentes tecnologías de radio (GSM, WCDMA y LTE), la opción “next” y “previous” ayuda a cambiar las mediciones de potencia de cada tecnología.

Como se muestra en la figura 4.17, se obtendrán los valores que ya han sido descritos previamente y adicionalmente algunos parámetros importantes como el indicador “Mod Pref” que proporciona información acerca de la tecnología a la que se conecta el smartphone (configurado automáticamente en el ejemplo). También otro atributo dentro de la lista de mediciones es la banda de frecuencia y el ancho de banda (señalados como “Band/BW” respectivamente). Por otro lado, muestra el número de tracking area en la que se encuentra el Ue (“TAC”). Finalmente, es añadido el modo en el que se encuentra el Ue (“RRC” conectado o idle).



Figura 4.17 Resultados en LTE en modo “Field Test”

En la figura 4.17 se muestra que el modo de preferencia al seleccionar la tecnología de radio es automático y el dispositivo se encuentra en modo conectado a LTE (RRC connected). Además, son mostrados los EARFCNs 1125/19125 para el enlace descendente y ascendente respectivamente. Aplicando las ecuaciones 4.3 y 4.4 con los respectivos valores definidos en la tabla 4.3 se obtiene la frecuencia central en la cual encuentran los EARFCNs. Una vez realizado el cálculo se obtiene que frecuencia de la portadora en el enlace descendente es de 1982.5 MHz, mientras que en el enlace ascendente de 1902.5 MHz con una separación dúplex de 80 MHz entre ellas, localizadas sobre la banda de frecuencia 2 como lo muestra en la captura de pantalla y operando con un ancho de banda de 15 MHz.

$$F_{DL} = 1930 + 0.1(1125 - 600) = 1982.5 \text{ [MHz]}$$

$$F_{UL} = 1850 + 0.1 * (19125 - 18600) = 1902.5 \text{ [MHz]}$$

El identificador del tracking área tiene un valor de 41413 y el Cell ID con un valor de 2421273 el cual no está relacionado con el identificador del sector ya que este es utilizado de diferente forma, para obtener el PCI se hará uso de otra aplicación.

Ahora bien, los valores de potencia de LTE (RSRP, SINR y RSRQ) que fueron obtenidos en la prueba comparados con los valores previamente citados indican que la calidad de la señal es buena, por lo tanto, una modulación de alto orden es entregada permitiendo obtener un alto throughput. Es importante considerar las características de transmisión y recepción tanto del Ue como del EnodeB, en este caso se conocen parcialmente las características del EnodeB, sin embargo, las características del Ue fueron encontradas en la ficha técnica del dispositivo para hacer una estimación de las velocidades de datos que se pueden encontrar (tabla 4.4).

Una de las desventajas del “Field Test mode” en el LG G3 es que no muestra el valor del PCI. Recurriendo a una aplicación llamada “NetMonster” en la cual se pueden obtener mediciones de potencia de GSM, WCDMA y LTE, en la figura 4.18 se puede observar que se obtuvieron valores cercanos a las mediciones de potencia de LTE de la prueba sin la aplicación. Sin embargo, muestra el valor del PCI de la celda en la que está acampando el dispositivo que es de gran utilidad para identificar el sector y el EnodeB en donde se encuentra el Ue. Otra de las ventajas de esta aplicación es que muestra el operador móvil y las mediciones de potencia para cada una de las celdas vecinas (PCI 263 y 170 respectivamente).



Figura 4.18 Mediciones de LTE usando la aplicación NetMonster.

Finalmente, una de las pruebas que se necesitan realizar para medir el desempeño de LTE es la tasa de transmisión de datos (throughput), en este caso mediante el uso de la aplicación “SpeedTest” se realizó la prueba en el enlace descendente y ascendente. Al realizar la prueba del throughput de LTE (ver figura 4.19) en el enlace descendente se obtuvieron 41.36 [Mbps] y en el enlace ascendente hasta 24.85 [Mbps].

Para un ancho de banda de 15 [MHz] el throughput sin utilizar MIMO teóricamente es de 56.7 [Mbps] en el enlace descendente y 37.8 [Mbps] para el ascendente. Retomando las velocidades de datos obtenidas se puede determinar que el EnodeB al que el Ue se conecta cuenta con MIMO 2x2 solo para el enlace descendente, sin embargo, para el enlace ascendente no cuenta con esta característica ya que el Ue es de categoría 4.

El throughput en ambos sentidos es muy bueno basado en las mediciones obtenidas de RSRP, RSRQ y SINR, el EnodeB está entregando una modulación máxima de 64 QAM para el enlace descendente y 16 QAM en enlace ascendente. Hay que tomar en cuenta que los bloques de recurso están siendo compartidos entre todos los usuarios que se encuentran conectados a la celda además de que el EnodeB posee mecanismos de configuración para limitar el throughput máximo para cada Ue limitando la asignación de los bloques de recurso.

En la prueba de las mediciones de LTE con el uso del “Field Test Mode” no se registraron mediciones de LTE con agregación de portadoras, si la red estuviera implementada con agregación de portadoras con dos componentes CCs, la transmisión de datos sería de 82.72 [Mbps] y 49.7 [Mbps] para el enlace descendente y ascendente respectivamente, de esta forma se soluciona la limitación del uso de antenas MIMO 4x4 en el enlace descendente añadido a que el tiempo de duración de la batería en el Ue es mayor.



Figura 4.19 Prueba de throughput del enlace descendente y ascendente en LTE.

También es posible hacer la prueba para LTE CA en el Ue, donde se puede visualizar la potencia de cada componente de la portadora y las bandas de frecuencia de cada una de éstas, sin embargo, debido a que en México todavía no es desplegada esta tecnología estos valores aparece como nulos o ceros. El “Field test” ayuda a conocer las características de potencia de transmisión y recepción del canal de radio, a su vez parámetros de configuración del EnodeB que ayudan a detectar algún problema de interferencia, cobertura e incluso una configuración de parámetros al identificar a que celda se conecta el Ue.

#### 4.7. Mapeo de elementos de recurso y desempeño en LTE.

En esta sección se hace el cálculo del throughput tomando en cuenta el mapeo de los canales físicos de LTE en tiempo y frecuencia. Cada elemento de recurso es asignado para transportar las señales de sincronización, señales referencia, control, Broadcast y datos basándose en la posición del símbolo, subportadora y número de subtrama. Para obtener la cantidad de elementos de recurso de datos de usuario está dada por la ecuación 4.5.

$$RE_{PDSCH (TRAMA)} = RE_{TOTALES} - RE_{SEÑALIZACIÓN Y CONTROL (TRAMA)} \quad (4.5)$$

El número de elementos de recurso disponibles para los datos se obtiene al hacer la diferencia entre la cantidad de elementos de recursos totales y elementos de recurso de control y señalización. Una vez que se conoce la cantidad de elementos de recurso asignados al canal de tráfico (PDSCH), se puede obtener el throughput de LTE mediante el uso de la ecuación 4.6.

$$Throughput = RE_{PDSCH (TRAMA)} * m * cr * 100 * n \quad (4.6)$$

$RE_{PDSCH (TRAMA)}$ : Número de elementos de recurso en de PDSCH en la trama.

$m$ : Número de bits/simbolo (tipo de modulación)

$cr$  (code rate): Tasa de código.

100: Número de tramas por segundo

$n$ : Número de elementos de antenas MIMO (multiplexación espacial)

El mapeo de elementos de recurso en tiempo y frecuencia está definido para cada canal físico, la posición o asignación dentro de los elementos de recurso también dependerá de la configuración del ENodeB, sin embargo, la posición de los canales de control es fija, por lo tanto, pueden ser contabilizados dentro de la trama (ecuación 4.7).

$$RE_{SEÑALIZACIÓN Y CONTROL (TRAMA)} = PDCCH + PCFICH + PHICH + RSs + Reserved + PSS + SSS + PBCH \quad (4.7)$$

La cantidad de elementos de recurso totales ( $RE_{TOTALES}$ ) depende completamente del ancho de banda de LTE, el prefijo cíclico y la estructura de la trama de LTE.

$$RE_{TOTALES} = PRBs * Simbolos OFDM * Subportadoras * 10 \quad (4.8)$$

$PRBs$ : Número de bloques de recurso en el ancho de banda

$Simbolos OFDM$ : Símbolos OFDM en cada subtrama

$Subportadoras$ : Número de subportadoras en cada subtrama.

10: Número de subtramas

En LTE FDD con un prefijo cíclico normal existen 168 elementos de recurso en cada PRB (14 símbolos OFDM y 12 subportadoras en el dominio del tiempo y de la frecuencia respectivamente). Sin embargo, la cantidad de elementos de recurso en cada subtrama es variable ya que depende directamente de los PRBs dentro del ancho de banda en el que sea desplegado LTE.

**PDCCH (Physical Downlink Control Channel):** Este canal transporta la asignación de los recursos en el enlace descendente. El mapeo dentro de los elementos de recurso del PDCCH puede ser en los símbolos OFDM 1, 2 o 3 en el comienzo de cada subtrama en anchos de banda mayores a 1.4 [MHz], la cantidad de símbolos OFDM es determinado por el PCFICH y el PHICH [19].

**PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel):** Este canal transporta el número de símbolos que pueden ser usados en los canales de control (PDCCH y PHICH). Es mapeado sobre el primer símbolo OFDM en cada una de las subtramas en el enlace descendente. El PCFICH es transportado sobre 16 subportadoras del primer símbolo OFDM de la subtrama (16 elementos de recurso), los datos son transportados en 4 REGs para cualquier ancho de banda. La posición en los elementos de recurso es determinada por el identificador de la celda y el ancho de banda.

**PHICH (Physical Hybrid-ARQ Indicator Channel):** Este canal transporta los mensajes de ACK/NACK del Hybrid-ARQ para las transferencias de datos en el enlace ascendente. El mapeo de este canal dentro de los elementos de recurso se realiza en el primer símbolo OFDM de cada subtrama y la cantidad de elementos de recurso que puede ocupar es variable.

Múltiples PHICHs pueden ser mapeados en los mismos REGs y ser diferenciados por arreglos de secuencias ortogonales. Los PHICHs que comparten los mismos recursos componen un grupo de PHICH. Un específico PHICH es identificado por dos parámetros: El número de grupo PHICH y el índice de la secuencia ortogonal entre el grupo, para transportar un solo PHICH se necesitan 3 REGs.

En LTE FDD utilizando un prefijo normal, el número de grupos PHICH es definido por el ancho de banda y el parámetro  $N_g$  que es proporcionado por las capas superiores, por lo tanto, la cantidad de grupos es definida por la ecuación (4.9). Debido a que los canales PHICHs son mapeados en el primer símbolo OFDM de cada subtrama el cálculo de estos se realiza solo para contabilizar el número de los elementos de recursos asignados netos del PDCCH [20].

$$PHICH\ groups = \frac{(N_g * PRB)}{8} \quad (4.9)$$

$N_g : \left\{ \frac{1}{6}, \frac{1}{2}, 1, 2 \right\}$  es proporcionado por las capas superiores de LTE.

Un total de 8 secuencias ortogonales han sido definidas por la 3GPP en la especificación TS 36.211 Tabla 6.9.1-2 para que cada grupo pueda transportar hasta 8 PHICHs.

**Señales de referencia:** Las señales de referencia son utilizadas para estimar la calidad de la señal y la potencia de recepción del ENodeB, éstas señales son mapeadas sobre todo el ancho de banda, donde en cada subtrama existen 8 señales de referencia por puerto de la antena.

**Reserved:** Son los elementos de recurso disponibles que se encuentran reservados como banda de guarda y si se utiliza un sistema de MIMO 2x2, 4x4 para que puedan ser transmitidas las señales de referencia de los otros puertos de las antenas.

**PBCH:** Este canal es solo utilizado en el enlace descendente con el fin de que el ENodeB transmita información útil para todos los Ues dentro de la celda, ocupa 72 subportadoras ocupando los 4 primeros símbolos OFDM del segundo slot de cada trama. Por lo tanto, en total 264 elementos de recurso son utilizados en este canal.

**PSS (Primary Synchronization Signal):** En FDD la PSS se transmite dos veces por cada trama en el último símbolo OFDM de la subtrama 0-slot 0 y en la subtrama 5-slot 10 ocupando 72 subportadoras partiendo de la frecuencia central del total del ancho de banda.

**SSS (Secondary Synchronization Signal):** En FDD LTE la SSS ocupa 72 subportadoras que son transmitidas en las mismas subtramas al igual que la PSS, sin embargo, estas señales son mapeadas sobre el penúltimo símbolo OFDM de los slots 0 y 10 respectivamente.

#### 4.7.1. Throughput en el enlace descendente LTE.

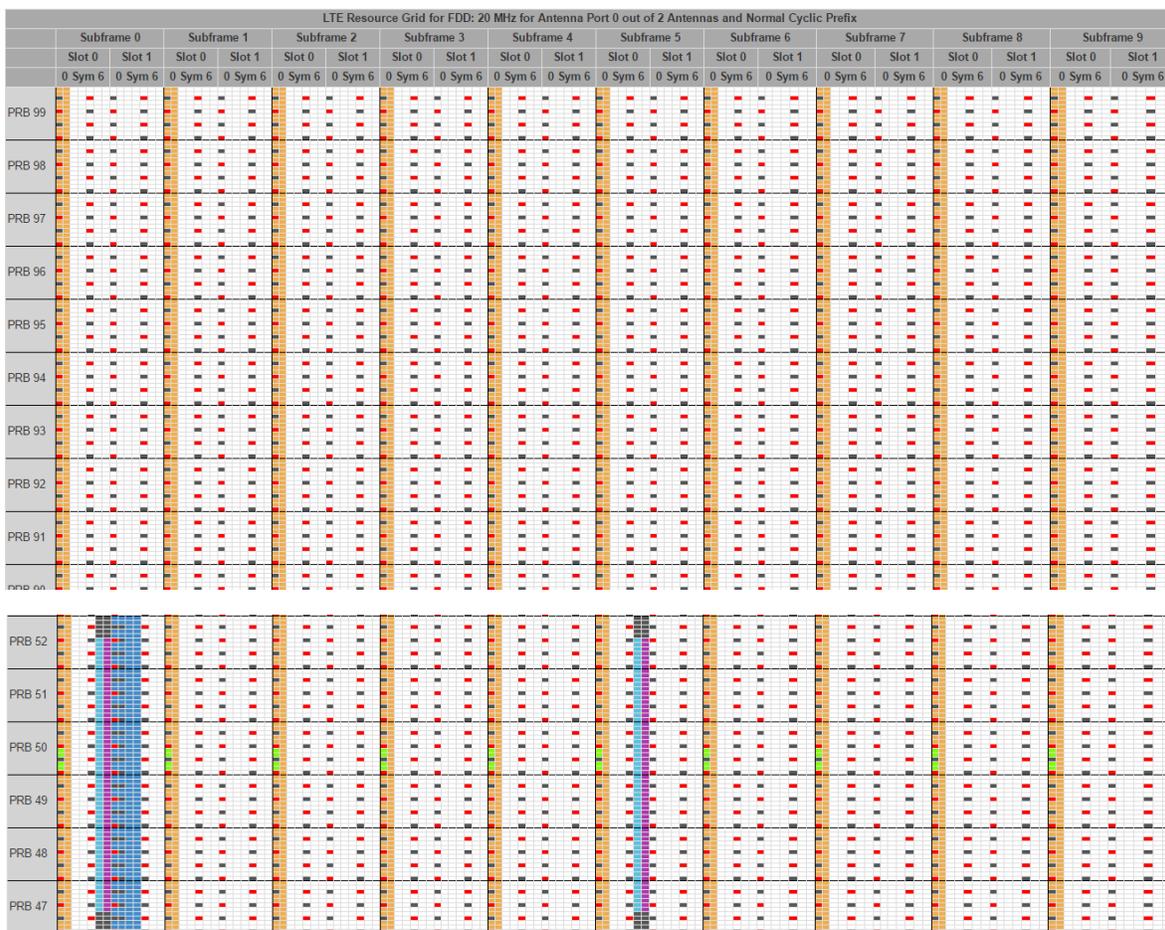
Después de haber calculado el throughput de LTE con MIMO 2x2 en el enlace descendente y ascendente, ahora se considerará el mapeo de elementos de recurso de los canales PDSCH, PDCCH, PCFICH, PHICH, PBCH, señales de referencia y señales de sincronización (PSS, SSS) en la trama de LTE FDD con un prefijo cíclico normal. Como el cálculo anterior se realizó en base al ancho de banda de los bloques de recurso, al tomar en cuenta el mapeo de los elementos de recursos el cálculo del throughput es más preciso ya que se conoce la cantidad exacta de elementos de recurso disponibles para el PDSCH.

Con el uso de una simulación en [21] es posible visualizar la distribución de los elementos de recursos en tiempo y frecuencia para los canales de LTE además el número de recursos en cada subtrama de LTE en el enlace descendente. Aunque la posición exacta de los elementos de recursos para cada canal puede variar ya que algunas veces depende de los valores del PCI, así como del formato de cada

mensaje, la cantidad de los elementos de recurso utilizados para determinado ancho de banda puede ser calculada haciendo una gran aproximación de bits de datos transmitidos para el usuario.

Los parámetros que son utilizados en la simulación fueron los siguientes:

- El modo de LTE es FDD con un ancho de banda de 20 [MHz].
- En el campo del número de puertos se refiere al arreglo de antenas que en este caso son dos por lo tanto es utilizado MIMO 2x2 como multiplexación espacial.
- El prefijo seleccionado es normal por consiguiente, 7 símbolos OFDM son asignados por slot.
- El canal PCFICH igual a 2 (el cual indica que dos símbolos OFDM son asignados para el canal de PDCCH).
- La duración del PHICH es normal y el factor Ng toma un valor de 2 el cual es el máximo para ocupar una mayor cantidad de grupos de para el canal PHICH.



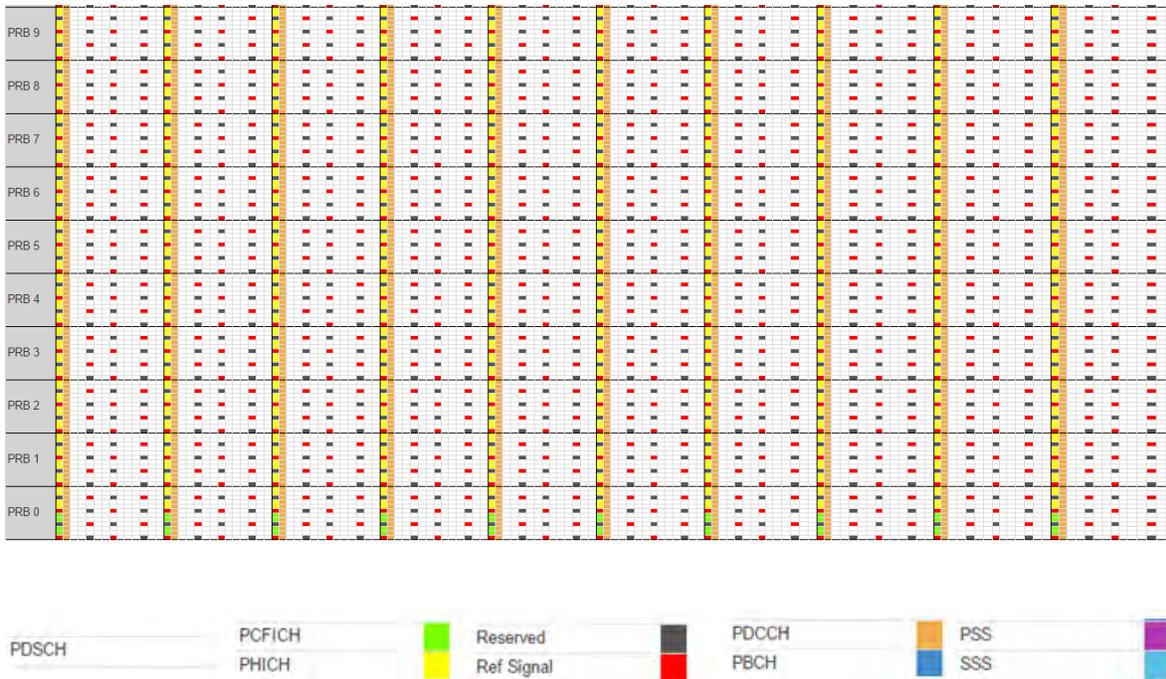


Figura 4.20 Mapeo de canales de LTE en los elementos de recurso para el enlace descendente.

En la figura 4.20 se encuentran mapeados los canales de control, señalización y datos sobre los elementos de recurso de acuerdo a como son definidos para el estándar en FDD. En el ejemplo el ancho de banda es de 20 MHz por lo que están disponibles 100 PRBs, con 12 subportadoras cada uno y 14 símbolos OFDM por subtrama. En la figura solo se muestran algunos de los PRBs del 0- 9, 47-52 y del 91-99, donde los elementos de recurso son representados con diferente color para distinguir cada uno de los canales de LTE.

Sobre los primeros dos símbolos de cada subtrama se encuentra mapeado el PDCCH ocupando dos símbolos ya que el PCFICH fue seleccionado con un valor de 2. La cantidad de elementos de recursos del PCFICH, es de 16 para el primer símbolo OFDM en cada subtrama y es distribuido en frecuencia dentro de las subportadoras. En el primer símbolo también se encuentra mapeado el PHICH la cantidad de elementos de recursos aplicando la ecuación (4.9) da como resultado 75 REGs (300 elementos de recursos) de igual forma distribuidos en las subportadoras.

Las señales de sincronización (PSS y SSS) se encuentran mapeadas en las subtramas 0 y 5 del último y penúltimo símbolo respectivamente ocupando las 72 subportadoras en el centro del ancho de banda, con 5 subportadoras en color gris en los extremos que son utilizadas como banda de guarda para evitar interferencias con las señales adyacentes. Por otro lado, el canal PBCH se encuentra mapeado en color azul dentro de la primera subtrama en el slot 1 sobre los primeros 4 símbolos igual utilizando 72 subportadoras en el centro de la frecuencia del ancho de banda.

Las señales de referencia son insertadas entre el primero y el antepenúltimo símbolo OFDM (esto corresponde al cuarto símbolo OFDM) de cada slot, sin embargo, hay un escalonamiento en frecuencia de tres subportadoras entre la ubicación del primer símbolo y el cuarto símbolo OFDM. En cada subtrama son mapeadas 8 señales de referencia en los elementos de recurso de cada puerto de la antena. En este caso es utilizado MIMO 2x2 los elementos de recurso marcados en color gris del primer y antepenúltimo símbolo OFDM son reservados con el fin de que el otro puerto de la antena pueda transmitir sus respectivas señales de referencia. En el caso de MIMO 4x4 son reservados cuatro elementos de recursos mapeados en el segundo símbolo de cada slot para las señales de referencia de la tercera y cuarta antena.

Finalmente, los elementos de recurso restantes son utilizados para transportar los datos de usuario sobre el PDSCH y con estos es posible calcular el throughput que experimentar los Ues en LTE. Cada trama tiene una duración de 10 [ms], por lo que es necesario contabilizar el tráfico de datos y control de la trama completa. Las subtramas 1,2,3,4,6,7,8 y 9 cuentan con un porcentaje mayor de elementos de recursos disponibles en el enlace descendente. Mientras que, las subtramas 0 y 5 contienen más elementos de recursos tanto de control como de sincronización.

Con la ayuda de un programa realizado en Matlab fue posible calcular la cantidad de elementos de recurso asignados al PDSCH además de los elementos de recursos de los canales de control, señalización como se muestran en la tabla 4.5 y 4.6.

El programa en Matlab que calcula el throughput está basado en la posición de los elementos de recurso de los canales de sincronización, señales de referencia y control. Este fue diseñado para obtener la cantidad de elementos de recurso disponibles para el canal de PDSCH. Las entradas del programa son las siguientes: Ancho de banda, configuración MIMO, formato del canal PCFIH, valor Ng del canal PHICH, MCS (modulación y tasa de código), los cuales son procesados con el fin de calcular el throughput en LTE FDD con un prefijo ciclico normal en el enlace descendente.

ELEMENTOS DE RECURSO EN SUBTRAMAS 1,2,3,4,6,7,8,9		
Canales	REs	REGs
PHICH	300	75
PCFIH	16	4
Reference Signals (RSs)	800	200
Reserved	800	200
PDCCH	1684	421
Señalización y control	3600	900

Tabla 4.5 Elementos de recurso subtramas 1,2,3,4,6,7,8,9.

ELEMENTOS DE RECURSO SUBTRAMA 0 Y 5		
Canales	REs Subtrama 0	REs Subtrama 5
PSS	72	72
SSS	72	72
PBCH	240	-

Tabla 4.6 Elementos de recurso subtramas 0 y 5.

El throughput máximo en LTE para el enlace descendente con los parámetros configurados en la herramienta y Matlab fueron de; 20 [MHz], MIMO 2x2, prefijo cíclico normal, duración del PHICH normal y el factor Ng igual a un valor de 2 para tener mayor número de REGs en el canal PHICH.

Sustituyendo los valores obtenidos de Matlab en la ecuación 4.7 se obtuvo lo siguiente:

$$RE_{SEÑALIZACIÓN Y CONTROL (TRAMA)} = (1684 + 16 + 300 + 800 + 800) * 10 + 144 + 144 + 240$$

$$RE_{SEÑALIZACIÓN Y CONTROL (TRAMA)} = 36\ 528\ REs$$

La estructura de la trama de LTE está compuesta de 10 subtramas por lo que con estos datos es posible determinar la cantidad de elementos de recurso disponibles en toda la trama aplicando la ecuación 4.8.

$$RE_{TOTALES} = 100\ PRBs * 12 * Subportadoras * 14\ simbolos\ OFDM * 10\ subtramas$$

$$RE_{TOTALES} = 168\ 000\ REs$$

Para obtener el número de elementos de recurso asignados para transportar los datos de usuario sobre el canal PDSCH se aplica la ecuación 4.5:

$$RE_{PDSCH (TRAMA)} = 168\ 000 - 36\ 528\ REs$$

$$RE_{PDSCH (TRAMA)} = 131\ 472\ REs$$

Para realizar el cálculo del throughput LTE en el enlace descendente en este ejemplo se considera que el Ue tiene buena calidad de la señal y que el ENodeB asigna un esquema de modulación más alto (MCS=28) el cual proporciona una modulación 64 QAM con un valor de m=6 [bits/símbolo] en cada elemento de recurso mapeado en el PDSCH, y una tasa de código “code rate” de 0.81 (estos valores fueron obtenidos de la tabla 2.7). Finalmente, como MIMO 2x2 es utilizado como multiplexación espacial, el throughput máximo en el enlace descendente alcanzado es de 127.791 [Mbps] aplicando la ecuación 4.6.

$$\text{Throughput} = 131\,472 \left[ \frac{REs}{\text{trama}} \right] * 6 \left[ \frac{\text{bits}}{\text{simbolo}} \right] * 0.81 * 100 \left[ \frac{\text{Tramas}}{\text{seg}} \right] * 2$$

$$\text{Throughput}_{DL} = 127.791 \text{ [Mbps]}$$

En diferentes bibliografías se estima que en promedio el 25% de los datos son utilizados como señalización y control, sin embargo, haciendo el mapeo de los elementos de recurso se muestra que este valor depende completamente del PHCFI, PDCCH y el ancho de banda que sea utilizado en LTE ya que para un ancho de banda de 1.4 [MHz] que es muy reducido se estaría utilizando más del 25% de los datos de control y señalización. En el ejemplo del cálculo del throughput basado en los elementos de recurso se obtuvo que el 21.74% es utilizado como datos de señalización y control aprovechando un 78.25% de los datos asignados a la parte de tráfico.

$$\% \text{Datos}_{\text{CONTROL Y SEÑALIZACIÓN}} = \frac{RE_{\text{SEÑALIZACIÓN Y CONTROL (TRAMA)}}}{RE_{\text{TOTALES (TRAMA)}}} \quad (4.9)$$

$$\% \text{Datos}_{\text{CONTROL Y SEÑALIZACIÓN}} = \frac{36\,528 \text{ REs}}{168\,000 \text{ REs}} = 21.74\%$$

$$\% \text{Datos}_{\text{USUARIO}} = \frac{RE_{\text{PDSCH (TRAMA)}}}{RE_{\text{TOTALES (TRAMA)}}} \quad (4.10)$$

$$\% \text{Datos}_{\text{USUARIO}} = \frac{131\,472 \text{ REs}}{168\,000 \text{ REs}} = 78.25\%$$

En la figura 4.21 se muestra la gráfica del máximo throughput que puede alcanzar LTE es de 127.79.1 [Mbps] utilizando un esquema de modulación MCS=28 que corresponde a una tasa de código de 0.81 y una modulación 64 QAM. Por el contrario, si el ENodeB asigna un esquema de modulación MCS=0, la modulación asignada es QPSK con una tasa de código igual a 0.11 lo cual conlleva a una menor cantidad de bits de datos. Entonces, aunque se utilice MIMO 2x2 el throughput alcanzado con un MCS=0 da como resultado 5.78 [Mbps].

Como se puede apreciar en la figura 4.21 entre mayor sea el MCS, el throughput alcanzado también es alto y se aprecia las ventajas de la modulación adaptativa con los diferentes esquemas de modulación que son asignados al Ue en el enlace descendente en base a la calidad de la señal de radio.

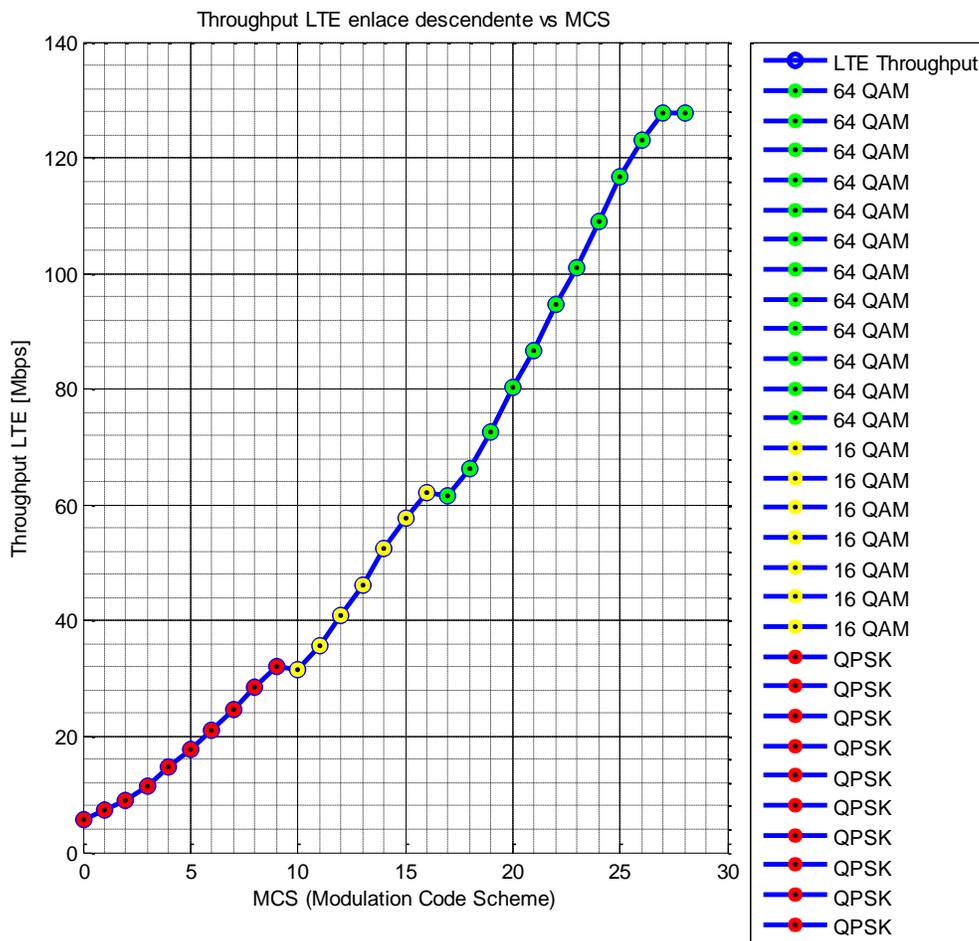


Figura 4.21 Gráfica throughput LTE enlace descendente 20 MHz MIMO 2x2

#### 4.8. Codecs AMR utilizados en VoIP

En la actualidad existen múltiples aplicaciones utilizadas para el servicio de VoIP (Voice over IP) como lo son; Skype, Facebook, WhatsApp, etc., sin embargo, todavía no son completamente utilizadas para realizar llamadas de voz. Una de las principales limitantes es que LTE no tiene la suficiente capacidad y cobertura para cubrir la demanda de todos los usuarios tanto en la parte de radio como en la red troncal. Debido a que la tendencia es realizar de llamadas sobre IP, en este capítulo se hará una estimación de la cantidad de llamadas que LTE puede soportar en el enlace descendente.

Como ya se ha descrito en el primer capítulo, LTE es un estándar con un entorno puramente IP donde los servicios de voz que eran manejados por nodos basados en la conmutación de circuitos de la red troncal, en LTE son sustituidos por nodos capaces de soportar una red conmutada de paquetes para cubrir la demanda de las

aplicaciones de internet. LTE está diseñado para soportar solo datos, por lo tanto las llamadas ahora son realizadas basadas en el protocolo de VoIP o bien, VoLTE utilizando los servicios del sistema IMS para tener compatibilidad con redes anteriores.

La voz es una señal analógica la cual tiene que ser convertida a una señal digital para poder ser transmitida/recibida sobre una red conmutada de paquetes. El DSP (Digital Signal Processor) es el encargado de muestrear la señal analógica, asignar valores de voltaje mediante la cuantización, aplicar la codificación y finalmente, realizar la compresión de los datos.

VoIP maneja diferentes tipos de codecs (codificador/decodificador) que son empleados para la conversión A/D y D/A, cada uno con características diferentes como lo son la frecuencia de muestreo, el número de tramas, carga útil y la cantidad de bits por trama. Uno de los codecs comúnmente utilizado es el G.711 PCM con una tasa de datos de 64 kbps empleado en la PSTN.

Para el cálculo de llamadas que puede soportar LTE se utilizará un códec multi-tasa adaptativo AMR (Adaptive Multi-Rate), el cual contiene 9 diferentes tasas de bit que permite ser usado en entornos ruidosos y ofrece mayor calidad que los codecs de banda estrecha. En el AMR-WB (Wide Band), la tasa de bit se encuentra en un rango de 6.6 a 23.85 kbps y el AMR de 4.75-12.2 kbps. La duración de una trama es de 20 ms para ambos AMR y AMR-WB la frecuencia de muestreo de AMR es de 8 kHz dando como resultado, 160 muestras por trama mientras que, el AMR-WB de 16 kHz con 320 muestras por trama. Cabe mencionar, que el número de tramas por segundo para ambos protocolos es de 50 [22].

Protocolo	Tasa de bit [kbps]	Bits/trama	Carga útil	Duración trama [ms]
AMR-WB	23.85	477	61 bytes	20
AMR-WB	12.65	253	33 bytes	20
AMR-WB	8.85	177	24 bytes	20
AMR-WB	6.6	132	18 bytes	20
AMR	12.2	244	32 bytes	20
AMR	7.95	159	22 bytes	20
AMR	5.9	118	16 bytes	20
AMR	4.75	95	14 bytes	20

Tabla 4.7 Codecs AMR y AMR-WB en VoIP [23].

#### 4.8.1. Cálculo de llamadas VoIP en LTE.

El encabezado de un paquete de VoIP es de 40 bytes el cual incluye los encabezados de RTP/UDP/IP mientras que la carga útil puede variar dependiendo del códec utilizado, por ejemplo, si se utiliza un codec AMR-WB con una tasa de 23.85 kbps, el tamaño de una carga útil puede ser de 61 bytes que son añadidos al encabezado de VoIP [24].

Posteriormente el paquete de VoIP, entra en la capa de enlace de LTE donde el protocolo de PDCP se encarga de segmentar este paquete, en este caso el encabezado de PDCP se le asignará un valor fijo de 5 bytes. Después el paquete es encapsulado en la capa de RLC con un encabezado propuesto de 4 bytes y en la capa de MAC se considera un encabezado de 3 bytes. Por lo tanto, la cantidad de datos utilizados como encabezado en la capa del enlace de datos de LTE da como resultado un total de 12 bytes como se muestra en la tabla 4.8.

		Protocolo	Encabezado [bytes]
Paquete VoIP [bytes]	Carga útil	Codec	-
		VoIP	
	LTE	RTP	8
		UDP	12
		IP	20
	LTE	PDCP	5
		RLC	4
MAC		3	

Tabla 4.8 Estructura del paquete de VoIP en LTE.

Si en la parte del protocolo de PDCP es implementado el método de compresión ROHC el tamaño del encabezado de IP es reducido hasta 3 bytes, disminuyendo la cantidad de bytes del paquete de IP. Al utilizar este método de compresión es posible aumentar la capacidad de llamadas de LTE sin necesidad de añadir más infraestructura.

En la ecuación 4.11 se muestra la ecuación que ayuda a determinar la cantidad de datos utilizados en el paquete la transmisión de un paquete de VoIP sin ROHC. Como se muestra, se considera la carga útil del codec, la cantidad de bytes del encabezado de IP y de LTE al pasar por cada una de las capas hasta llegar a la capa física. Cada campo añade su encabezado y de esta forma contribuye con datos que están son agregados para aumentar el tamaño del paquete de VoIP hasta llegar a la capa física de LTE donde son mapeados los elementos de recurso.

Al aplicar la ecuación 4.11 con los respectivos valores del codec AMR-WB de tasa de bit de 23.85 kbps es posible manejar una carga útil de 61 bytes, a los cuales son añadidos 40 bytes del encabezado de IP y 12 bytes en la parte de LTE con un tamaño del paquete de VoIP de 904 bits.

$$VoIP_{\text{tamaño\_paquete}} = AMR_{\text{cargautil}} + IP_{\text{encabezado}} + LTE_{\text{Encabezado}} \quad (4.11)$$

$$VoIP_{\text{tamaño\_paquete}} = 61 \text{ bytes} + 40 \text{ bytes} + 12 \text{ bytes}$$

$$VoIP_{\text{tamaño\_paquete}} = 113 \text{ bytes} = 904 \text{ bits}$$

La tasa de datos o throughput del paquete de VoIP es calculado tomando en cuenta el tamaño del encabezado de IP, LTE y de la carga útil. Con la ecuación 4.12 se obtiene el throughput del paquete de VoIP una vez que ha sido encapsulado por las diferentes capas. Se realiza una división del tamaño del paquete de VoIP entre la duración de la trama del codec seleccionado, que en el caso de AMR-WB y AMR es de 20 [ms], para obtener la tasa de datos del paquete de VoIP o el rendimiento del códec.

$$Tasa \ de \ datos_{VoIP} = \frac{VoIP_{\text{tamaño\_paquete}}}{Duración_{\text{trama}}} \quad (4.12)$$

$$Tasa \ de \ datos_{VoIP} = \frac{904 \text{ bits}}{20 \text{ ms}} = 45.20 \text{ [kbps]}$$

En la tabla 4.7 se muestra el cálculo de la tasa de datos de VoIP para cada uno de los codecs AMR y AMR-WB con el fin de obtener el número de llamadas que pueden ser soportadas con cada uno de estos. Como se puede observar la carga útil del códec con tasa de bit 23.85 kbps tiene una carga útil de 113 bytes con una tasa de datos del paquete de VoIP en la capa física de LTE de 45.2 [kbps].

Protocolo	Tasa de bit [kbps]	Encabezado y carga útil [Bytes]	Tasa de datos VoIP [kbps]
AMR-WB	23.85	113	45.2
AMR-WB	12.65	45	18
AMR-WB	8.85	24	9.6
AMR-WB	6.6	18	7.2
AMR	12.2	32	12.8
AMR	7.95	22	8.8
AMR	5.9	16	6.4
AMR	4.75	14	5.6

Tabla 4.7 Tasa de datos del paquete VoIP capa física LTE.

Para calcular la cantidad de llamadas que puede soportar LTE, se obtiene con el throughput de LTE dividido entre la tasa de datos de la capa física del paquete de VoIP. El throughput contiene el número de elementos de recursos y bits que pueden ser transportados para los datos de usuario sobre el canal PDSCH por lo tanto, solo es necesario conocer la tasa de bit del paquete de VoIP. En la ecuación 4.11 se observa que es aplicable para el enlace descendente y ascendente.

$$NumLlamadas_{DL/UL} = \frac{Throughput_{DL/UL} [Mbps]}{Tasa\ de\ datos_{VoIP} [kbps]} \quad (4.11)$$

Con el fin de hacer una estimación del máximo número de llamadas de VoIP en una celda de LTE, se necesita considerar el tipo de códec utilizado en VoIP y de esta forma obtener las tasas de bit a nivel de la capa física para cada códec. Por otro lado, otro valor importante es el throughtput de LTE ya que los elementos de recurso que son asignados para la transmisión de datos limitan la cantidad de llamadas dentro de la celda.

Para realizar la estimación de las llamadas en una celda de LTE en FDD primero se realizó el cálculo con un ancho de banda de 20 [MHz] utilizando un esquema de modulación MCS=28 (64 QAM y una tasa de código  $r=0.81$ ). El códec seleccionado es un AMR-WB de 23.85 [kbps] que ofrece una buena calidad para las llamadas. En la sección 4.7 se obtuvo un valor de 127.791 [Mbps] para el throughput de LTE en el enlace descendente. Mientras que la tasa de datos del paquete de VoIP es de 45.2 [kbps]. Al aplicar estos valores en la ecuación 4.11 se obtiene la cantidad de llamadas en la celda de LTE.

$$NumLlamadas_{DL} = \frac{127.791 [Mbps]}{45.2 [kbps]} = 2827$$

Como ya se ha observado en la figura 4.21, el throughput de LTE es variable dependiendo del esquema de modulación utilizado por esta razón la cuantificación de las llamadas que soporta LTE se hace con la selección de una tasa de código y el tipo de modulación, una vez que es obtenido el throughput es posible aplicar la ecuación 4.11 para cada uno de los codecs. En la figura 4.22 se muestra el número de llamadas que son soportadas en el enlace descendente para cada códec AMR y AMR-WB.

----- SELECCIÓN DE PARAMETROS DE LTE FDD PARA EL CALCULO DE LLAMADAS DL -----

Ingresa el tipo de modulación m[bits/simbolo]={2,4,6}: 6

Elige la tasa de código (cr): 0.81

BW: 20 MHz #RB:100 | MIMO 2x2 | bits/simbolo:6 | Tasa de código: 0.8100

Throughput LTE: 127.791 Mbps

	Codec	Tasa de bit [kbps]	Carga útil/Encabezado [bytes]	#Llamadas VoLTE
1	AMR-WB	45.20	904	2827
2	AMR-WB	18.00	360	7099
3	AMR-WB	9.60	192	13311
4	AMR-WB	7.20	144	17748
5	AMR	12.80	256	9983
6	AMR	8.80	176	14521
7	AMR	6.40	128	19967
8	AMR	5.60	112	22819

>> |

Figura 4.22 Llamadas VoLTE enlace descendente 20 MHz MIMO 2x2.

Como se puede observar la cantidad de llamadas simultaneas en una celda de LTE con un códec AMR-WB 23.85 kbps es de 2827 ya que la carga útil del paquete de IP es de 113 bytes por lo cual ocupa una mayor cantidad de elementos de recurso para la transmisión de cada llamada. Particularmente los codecs AMR-WB son capaces de ofrecer una muy buena calidad en la llamada ya que la frecuencia de muestreo es de 16 [kHz], sin embargo, la cantidad de llamadas es limitada en la celda de LTE.

Al utilizar un códec AMR la cantidad de llamadas aumenta notablemente, por ejemplo, al utilizar un códec AMR de 12.2 [kbps] la celda de LTE es capaz de soportar hasta 9983 llamadas simultáneas, tres veces más que el AMR de 23.85 [kbps]. Entonces, aunque al hacer la selección del tipo de códec implementado en LTE se necesita considerar si se opta por un códec que proporcione una muy buena calidad de la llamada o bien, un códec de calidad intermedia como lo es el AMR de 12.2 [kbps] donde permite tener una mayor cantidad de llamadas en LTE.

La gráfica 4.23 muestra la cantidad de llamadas de VoLTE de los diferentes codecs utilizados identificando el primero como el AMR-WB de 23.85 kbps y el último como AMR 4.75 [kbps] como se muestran en la figura 4.22.

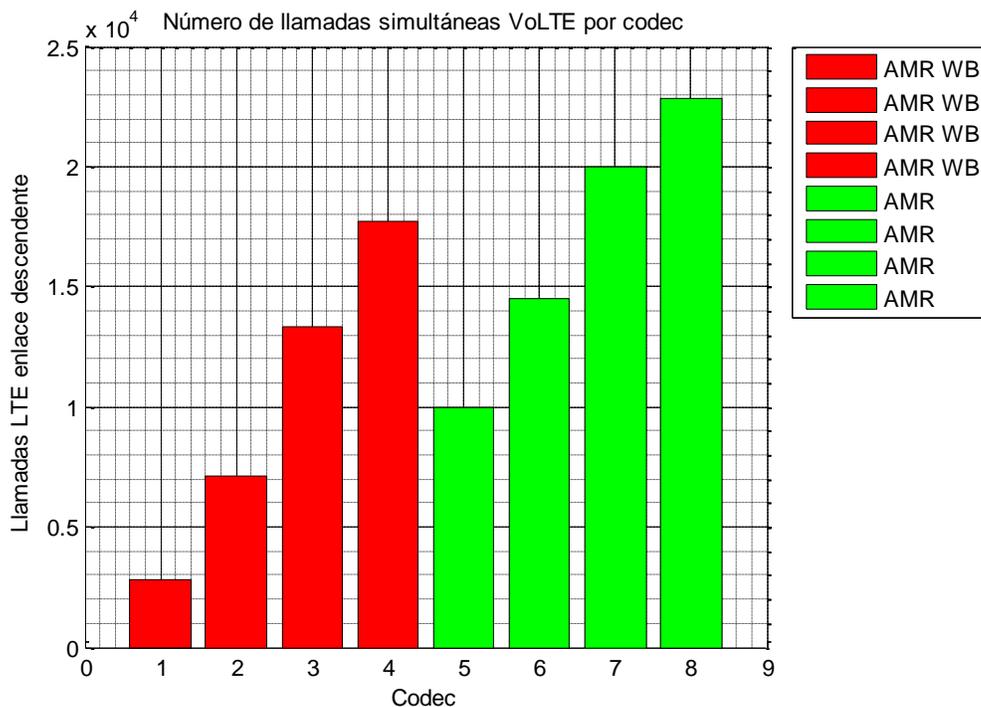


Figura 4.23 Gráfica de llamadas VoLTE enlace descendente 20 MHz MIMO 2x2.

Finalmente se hizo una prueba en Matlab para el cálculo del throughput de LTE y el número de llamadas en el enlace descendente con un ancho de banda de 5 [MHz] utilizando MIMO 2x2, donde el throughput de LTE mínimo fue de 1.29 [Mbps] y el máximo de 28.64 [Mbps] para los esquemas de modulación MCS=0 y MCS=28 respectivamente. En la figura 4.24 se pueden observar ambos valores graficados y el rango de valores para cada esquema de modulación.

Ahora bien, en la selección de los parámetros de entrada para el cálculo del número de llamadas de simultáneas de LTE fue tomado un valor del esquema de modulación MCS=16 el cual representa una modulación 16 QAM con una tasa de código  $cr= 0.59$ , el throughput obtenido seleccionar estos valores fue de 13.91 [Mbps] (ver figura 4.26). El hecho de considerar los diferentes esquemas de modulación es necesario para conocer el número de bits que realmente son enviados en la transmisión de datos del enlace descendente.

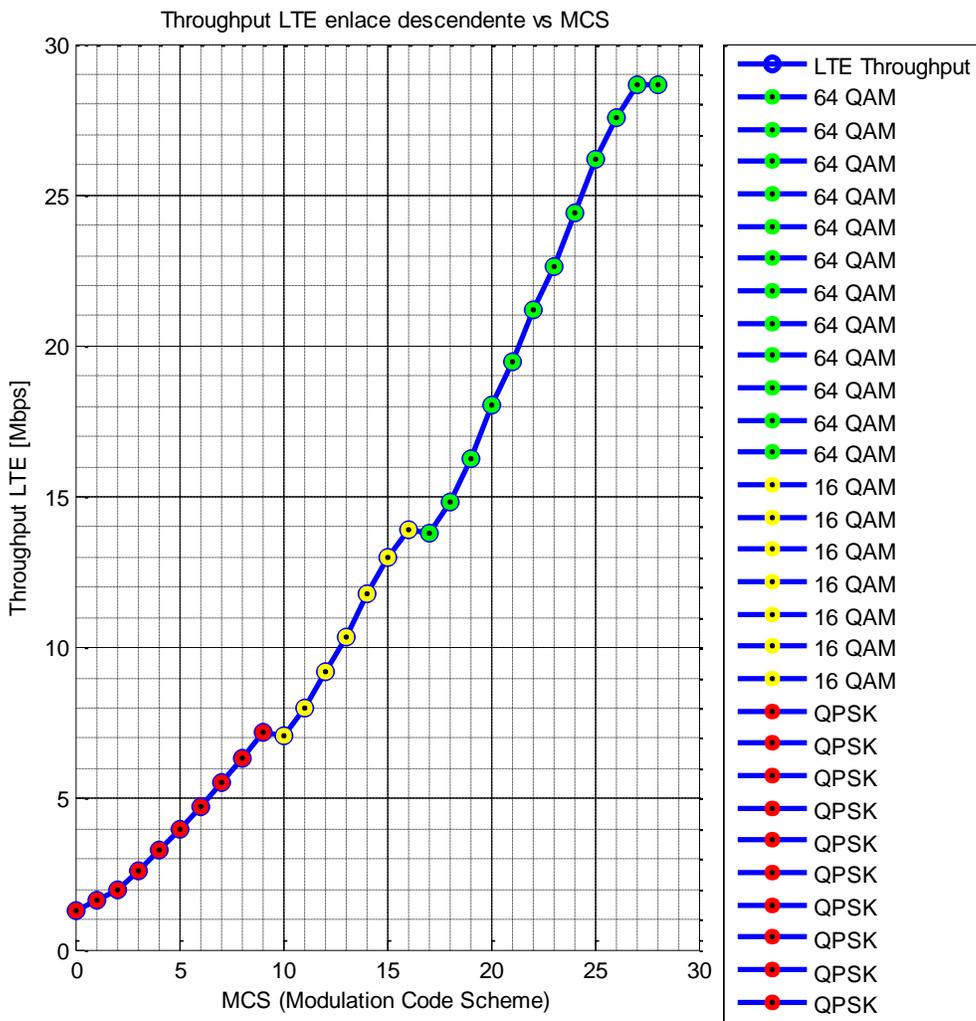


Figura 4.24 Gráfica throughput enlace descendente LTE FDD 5 MHz MIMO 2x2.

En la figura 4.26 se observa que las llamadas simultaneas de VoLTE con un ancho de banda de 5 [MHz] y utilizando un códec AMR de 4.75 [kbps], el número máximo de llamadas soportadas en la celda es de 2484. Por otro lado, con un códec AMR-WB 23.85 [kbos] soporta solo un total de 307 llamadas por lo que no es óptimo para el diseño de LTE ya que se estarían desperdiciando los recursos y la capacidad con la que se puede explotar LTE.

El número de llamadas soportadas por LTE dependerá del códec utilizado y particularmente entre menor sea la tasa de bit del códec mayor cantidad de llamadas pueden ser soportadas por la celda. En el caso de un códec AMR 4.75 [kbps] existe una ventaja sobre la cantidad de las llamadas que maneja la celda de LTE, ya que para el primer caso de 20 [MHz] el número de llamadas fue igual a 22 819, tomando ventaja sobre los otros codecs. Sin embargo, hay que considerar que las llamadas serían de muy baja calidad y los usuarios pueden experimentar ruido e incluso se puede perder la llamada.

----- SELECCIÓN DE PARAMETROS DE LTE FDD PARA EL CALCULO DE LLAMADAS DL -----

Ingresa el tipo de modulación m[bits/simbolo]={2,4,6}: 4  
 Elige la tasa de código (cr): 0.59

BW: 5 MHz #RB:25 | MIMO 2x2 | bits/simbolo:4 | Tasa de código: 0.5900  
 Throughput LTE: 13.911 Mbps

	Codec	Tasa de bit [kbps]	Carga útil/Encabezado [bytes]	#Llamadas VoLTE
1	AMR-WB	45.20	904	307
2	AMR-WB	18.00	360	772
3	AMR-WB	9.60	192	1449
4	AMR-WB	7.20	144	1932
5	AMR	12.80	256	1086
6	AMR	8.80	176	1580
7	AMR	6.40	128	2173
8	AMR	5.60	112	2484

Figura 4.25 Llamadas VoLTE enlace descendente 5 [MHz] y MIMO 2x2.

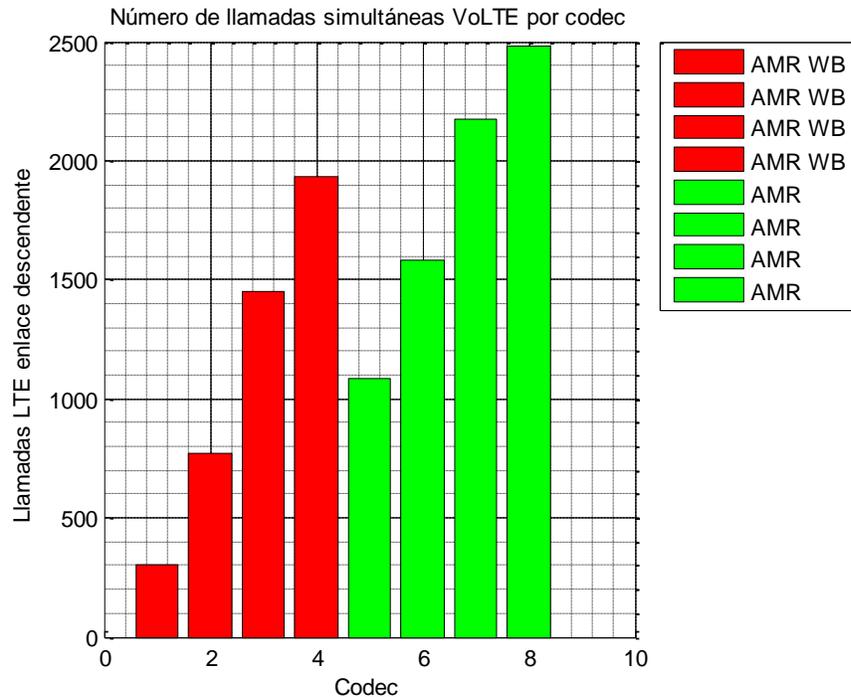


Figura 4.26 Gráfica de llamadas en VoLTE enlace descendente 5 [MHz] y MIMO 2x2.

El hecho de hacer el cálculo de llamadas de LTE es de importancia para saber cuántos usuarios pueden ser soportados en una sola celda con las diferentes características como lo son; el ancho de banda, MIMO, el esquema de modulación. El programa en Matlab proporciona los diferentes esquemas de modulación, sin embargo, en la practica el EnodeB asigna diferentes MCSs basados en la calidad de la señal del Ue por lo que es necesario tomar en cuenta que no es un valor fijo y puede variar para cada Ue.

Por otro lado, también es necesario considerar la capacidad de la celda en el EnodeB depende del número de Ues y está limitada por la señal a ruido pues como en todo canal inalámbrico si es saturado, el canal los usuarios pueden interferir entre sí degradando la recepción y transmisión de la señal. Aunque cuando se hizo el cálculo de LTE FDD con un ancho de banda de 20 [MHz] se obtuvo que la celda podía soportar hasta 20 000 llamadas es necesario hacer un estudio involucrando los niveles de potencia para no saturar el canal inalámbrico y de esta forma limitar el número de Ues conectados a la celda.

## REFERENCIAS CAPITULO IV:

- [1] Ericsson, Remote Radio Unit Description, 2013.  
[http://bsm.sfdpw.org/pics/14WR0138/RRUS%2012%20Descriptions%20\(Page%2020%20f or%20Noise\).pdf](http://bsm.sfdpw.org/pics/14WR0138/RRUS%2012%20Descriptions%20(Page%2020%20f or%20Noise).pdf) (10/12/2016).
- [2] Ericsson AB, Huawei Technologies Co. Ltd, NEC Corporation, Alcatel Lucent, and Nokia Siemens Networks GmbH & Co. KG, CPRI Specification V6.0, 30/08/2013.  
[http://www.cpri.info/downloads/CPRI\\_v\\_6\\_0\\_2013-08-30.pdf](http://www.cpri.info/downloads/CPRI_v_6_0_2013-08-30.pdf) (18/12/2016).
- [3] Ericsson, RBS 6102 Description, 2009-2013.  
<https://docs.google.com/file/d/0BwNg9AbayLpRMDfESjhNdWc0cHc/view> (19/12/2017).
- [4] Ericsson, RBS 6000 survey, 2009.  
<http://es.slideshare.net/zine22/1-introduction-to-rbs-6000-family> (27/12/2016).
- [5] <http://www.chinatowers.es/2-communication-tower.html> (30/12/2016).
- [6] <http://www.nelloinc.com/wireless-cell-towers/monopole-towers.cfm> (30/12/2016).
- [7] [http://www.metalcoltda.com/Torres\\_Autosoportadas.html](http://www.metalcoltda.com/Torres_Autosoportadas.html) (30/12/2016).
- [8] <http://www.ddelectric.com/cellular-towers> (01/01/2017)
- [9] <https://www.mathworks.com/help/lte/ug/synchronization-signals-pss-and-sss.html> (01/01/2017).
- [10] 3GPP, LTE, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Physical channels and modulation, TS 36.211 version 12.3.0, Release 12.
- [11] <http://telecomunicados.com.ve/2015/06/29/caracteristicas-proposito-pci-lte/> (03/01/2017).
- [12] <http://www.telecom-cloud.net/wp-content/uploads/2010/09/PCI-Planning-for-LTE.pdf> (06/01/2017).
- [13] Kreher Ralf, Karsten Gaenger, LTE Signaling: Troubleshooting and Performance Measurement, Wiley, 2nd Edition, 2016.
- [14] 3GPP, Requirements for support of radio resource management, TS 36.133 version 12.5.0, Release 12, Table 9.1.4-1: RSRP measurement report mapping.
- [15] 3GPP, Requirements for support of radio resource management, Op cit., Table 9.1.7-1: RSRQ measurement report mapping.

- [16] <http://communicationanddsp.blogspot.mx/2013/04/rssisinrrsrp-and-rsrq-in-lte.html> (10/01/2017).
- [17] 3GPP, LTE Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), User Equipment (UE) radio transmission and reception, TS 36.101 version 12.5.0, Release 12, 2014-11.
- [18] <https://www.qualcomm.com/products/snapdragon/processors/comparison> (13/01/2017).
- [19] [http://lteuniversity.com/get\\_trained/expert\\_opinion1/b/hongyanlei/archive/2011/05/20/pdcch-construction.aspx](http://lteuniversity.com/get_trained/expert_opinion1/b/hongyanlei/archive/2011/05/20/pdcch-construction.aspx) (20/03/2017).
- [20] [http://www.sharetechnote.com/html/Handbook\\_LTE\\_PHICH\\_PHICHGroup.html](http://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_PHICH_PHICHGroup.html) (21/03/2017).
- [21] <http://dhagle.in/LTE> (22/03/2017).
- [22] <https://tools.ietf.org/html/rfc3267> (22/03/2017).
- [23] Ericsson, VoIP Dimensioning FDD, RECOMMENDATION, 2016.
- [24] <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/voice/voice-quality/7934-bwidth-consume.html> (23/03/2017).

## Conclusiones.

El hecho de conocer el funcionamiento de los protocolos utilizados en LTE y LTE con Agregación de Portadoras es importante en el diseño e implementación del estándar ya que de esta forma se puede dominar la arquitectura en la red en la parte de radio como en la red troncal.

En este trabajo se analizaron los parámetros involucrados en el cálculo del throughput de LTE con un ancho de banda de 20 MHz, utilizando un arreglo MIMO 2x2 y considerando un CQI lo suficientemente alto para obtener una modulación 64 QAM, dando como resultado un throughput en el enlace descendente de hasta 127.79 Mbps pico, el cual es repartido entre todos los usuarios que se conectan a la celda.

Al calcular el número de llamadas de VoLTE se puede hacer una estimación del número de usuarios que pueden realizar una llamada de voz con los codecs AMR y AMR-WB. De los resultados obtenidos se determinó que un códec con una baja tasa de bit hace que la celda de LTE pueda establecer mayor número de llamadas, sin embargo, la calidad de la voz no es la adecuada para los usuarios. Al implementar MIMO el número de llamadas también aumenta siempre y cuando se tenga una buena señal y una alta tasa de código.

Como se mostró en el capítulo 3, las bandas de frecuencia limitan el ancho de banda que puede ser utilizado por los diferentes operadores, por consiguiente, LTE con Agregación de Portadoras está diseñado para combinar diferentes anchos de banda como bandas de frecuencia alcanzando un throughput máximo de hasta 3 Gbps en el enlace descendente con cinco portadoras y una configuración MIMO 8x8 incrementando el throughput diez veces más que el valor definido en la versión 8.

Además, se obtuvieron mediciones de potencia en LTE como lo son; RSRP, RSSI, RSRQ, SINR y PCI que permitieron evaluar la intensidad y calidad de la señal e identificar la celda a la que se conecta el Ue, con estos valores se evalúan problemas de interferencia, cobertura, así como de posibles colisiones entre los PCIs, para esto se accedió al modo de "Field Test" el cual permitió recuperar la información de LTE solo con el dispositivo.

Por otro lado, se investigaron los elementos que componen al ENodeB o bien el hardware que es utilizado para LTE con sus respectivas características que necesitan ser evaluados en la parte de radio para seleccionar el tipo de antena, unidad de radio, CPRI, unidad digital, CSR y el tipo de gabinete que es utilizado en el diseño del sitio de acuerdo a las características de tráfico, condiciones de terreno y el servicio que se desea ofrecer a los usuarios.

El despliegue de LTE con Agregación de Portadoras en países desarrollados ya ha comenzado donde hasta 3 CCs son combinadas para aumentar el throughput utilizando un ancho de banda de hasta 60 MHz con una configuración intra-band continua sobre la banda 41, con estas características alcanzan velocidades de transmisión de datos de 230 [Mbps] en el enlace descendente que es repartido entre todos los usuarios de la celda. Aunque en diversos operadores y universidades están trabajando para poder implementar las 5 CCs que fueron propuestas por la 3GPP en LTE-Advanced, el consumo de batería del Ue sigue siendo un obstáculo para utilizar mayor número de antenas en MIMO y la cantidad de CCs.

Si se despliega LTE con Agregación de Portadoras sobre bandas de alta frecuencia es conveniente implementar una configuración intra-band continua, de esta manera es más fácil para el transceptor del Ue el manejo de una sola frecuencia y se aprovecha de mejor manera el espectro radioeléctrico.

Finalmente, para el caso de México los operadores móviles aún no despliegan LTE con Agregación de Portadoras ya que todavía LTE está siendo instalado en ciertas regiones del país. Una de las posibles bandas de frecuencia como candidata para el diseño de LTE con Agregación de Portadoras es la banda 28 ya que pertenece a la banda de frecuencia de los 700 [MHz].

Al utilizar la banda de 700 [MHz], la cobertura y la combinación de las portadoras se podría realizar sobre las bandas de frecuencia existentes que manejan algunos operadores (banda 2 y 5 que pertenecen a 1900 MHz y 850 MHz respectivamente). La configuración sería inter-band no continua la combinación de diferentes bandas de frecuencia con anchos de banda de 15 [MHz] y 10 [MHz] por consiguiente, el throughput incrementaría considerablemente para los usuarios cerca de la celda y los que se localizan en el borde de la celda.

## ***Acrónimos y abreviaciones.***

**3G:** Término definido por los operadores para las tecnologías CDMA/WCDMA.

**3GPP (Third Generation Partnership Project):** Organización encargada de desarrollar estudios de 3G y 4G.

**4G:** Término adoptado por diversos operadores para la tecnología de LTE.

**ACK (Acknowledgement):** Mensaje en Hybrid ARQ si el receptor recibe datos sin errores.

**APT 700 (Asia-Pacific Telecommunications):** Propuesta de plan de frecuencias en la banda de 700 [MHz] en región Asia-Pacífico.

**ARIB (Association of Radio Industries and Businesses):** Asociación de Industria y Negocios de Radio encargada del espectro radioeléctrico de Japón.

**ARQ (Automatic Repeat Request):** Método de corrección de errores en LTE.

**AS (Access Stratum):** Protocolo de LTE en el plano de control del ENodeB y el Ue.

**ATBC (Aggregated Transmission Bandwidth Configuration):** Ancho de Banda Agregando en LTE CA.

**ATIS (Alliance for Telecommunications Industry Solutions):** Alianza para Soluciones e Industria de Telecomunicaciones es un foro donde diferentes compañías desarrolladoras de tecnología encuentran soluciones a los problemas que se pueden enfrentar.

**BBU (Base Band Unit):** Acrónimo utilizado para las unidades digitales multi-estandar

**BCCH (Broadcast Control Channel):** Canal lógico de Broadcast y control en LTE.

**BER (Bit Error Rate):** Tasa de bits erróneos.

**Broadcast Channel (BCH):** Canal de transporte de Broadcast para manejar información de sistema del BCCH.

**BW (Bandwidth):** Ancho de banda.

**Carrier Aggregation (CA):** Agregación de Portadoras.

**Carrier Indicator Field (CIF):** Indicador del número de símbolos asignados al PDCCH.

**CC (CC Carrier Component):** Componente de la portadora en LTE CA.

**CCCH (Common Control Channel):** Canal utilizado para la transmisión de información de control.

**CCSA (China Communications Standards Association):** Asociación de Estándares y Comunicaciones de China.

**CDMA (Code Division Multiple Access):** Acceso Múltiple por División de Código.

**CIAF (Cuadro Internacional de Atribución de Frecuencias).**

**CMR (Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones).**

**CNAF (Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias).**

**CPRI (Common Public Radio Interface):** Interfaz entre la RRU y la DU.

**CQI (Channel Quality Indicator):** Indicador de la calidad del canal en el enlace de radio.

**CRC (Cyclic Redundancy Check):** Método de corrección de errores.

**CSR (Cell Site Router):** Router instalado en la estación base.

**DCCH (Dedicated Control Channel):** Canal lógico utilizado para enviar información de control a una terminal en el enlace descendente.

**DCI (Downlink Control Information):** Información de control en el enlace descendente.

**DL (Downlink):** Acrónimo utilizado para definir el enlace descendente.

**Downlink Shared Channel (DL-SCH):** Canal de transporte para la transmisión de datos en el enlace descendente.

**Downlink:** Enlace descendente estableciendo la comunicación de la terminal a la estación base.

**Download:** Descarga de información o datos.

**DRX (Discontinuous Reception):** Mecanismo de recepción discontinua en el Ue para ahorrar batería.

**DTCH (Dedicated Traffic Channel):** Canal lógico para recibir/transmitir datos de tráfico del ENodeB o el Ue.

**DU (Digital Unit):** Unidad digital se encarga de procesar las señales digitales a la RRU.

**EARFCN (EUTRA Radio Frequency Channel Number):** Identificador del canal y banda de frecuencia en LTE

**EPS (Evolved Packet System):** Término adoptado para la nueva arquitectura del estándar de LTE y SAE.

**ERAB (EUTRAN Radio Access Bearer):** Túnel establecido entre el Ue y la red para transportar datos de usuario.

**ETSI (European Telecommunications Standards Institute):** Es una organización de estandarización independiente, sin fines de lucro de la industria de las telecomunicaciones de Europa.

**EUTRAN (Evolved UTRAN):** Término definido por la 3GPP para la parte de radio.

**FDD (Frequency Division Duplex):** Modo de transmisión con canales independientes en el enlace descendente y ascendente.

**FEC (Forward Error Correction):** Corrección de errores hacia adelante, método de corrección de errores.

**GPRS (General Packet Radio Service):** Servicio General de Paquetes vía Radio, permite el manejo de paquete de datos en GSM.

**GSM (Global System for Mobile communications):** Sistema Global de Comunicaciones Móviles, estándar basado en la tecnología TDMA.

**GSMA (GSM Association):** Organización de operadores móviles, dedicada al apoyo de la normalización, la implementación de GSM.

**HARQ (Hybrid ARQ):** Mecanismo de corrección y detección de errores en LTE

**HSPA (High Speed Packet Access):** Es un estándar de internet móvil definido en la versión 7 de 3GPP y posteriores.

**HSS (Home Subscriber Service):** Nodo que contiene una base de datos con información de los suscriptores.

**IFFT (Inverse Fast Fourier Transform):** Transformada Inversa Rápida de Fourier.

**IMT (International Mobile Telecommunications):** Telecomunicaciones Móviles Internacionales término definido por UIT para estandarizar las redes móviles.

**IMT-Advanced (International Mobile Telecommunications-Advanced):** Estándar emitido por la UIT-R basado en IP para alcanzar tasas de transmisión de datos de 1 Gbps.

**IP (Internet Protocol):** Protocolo de Internet.

**ISI (Inter-Symbol Interference):** Interferencia entre símbolos presente en señales digitales.

**LTE (Long Term Evolution):** Estándar para las redes móviles a largo plazo, aunque generalmente este término es utilizado en la parte de RAN.

**LTE CA (LTE Carrier Aggregation):** LTE con Agregación de Portadoras.

**LTE-Advanced:** Término generado por la 3GPP para optimizar LTE y cumplir con los requerimientos de IMT-Advanced.

**MAC (Medium Access Control):** Capa de control de acceso al medio en LTE.

**MCS (Modulation Code Scheme):** Esquema de modulación asignado al Ue por el ENodeB en base a la SINR.

**MIB (Master Information Block):** Información de señalización de control utilizada para conocer los parámetros del ENodeB.

**MIMO (Multiple-Input Multiple-Output):** Múltiple Entrada Múltiple Salida en un arreglo de antenas.

**MME (Mobility Management Entity):** Nodo en LTE encargado del plano de control en el EPC, administra conexiones del Ue en modo idle.

**NACK (No Acknowledgement):** Mensaje en Hybrid ARQ si el receptor recibe datos erróneos.

**NAS (Non-Access Startum):** Protocolo de LTE encargado de la autenticación y seguridad en la red.

**OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing):** Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal

**ONU (Organización de las Naciones Unidas).**

**OSI (Open System Interconnection):** Sistema abierto de interconexión.

**Paging Channel (PCH):** Canal de transporte para enviar información de Paging al PCCH.

**PAPR (Peak to Average Power Ratio):** Tasa promedio de potencia pico presente en el Ue.

**PBCH (Physical Broadcast Channel):** Canal físico encargado de transportar información hacia todas las terminales dentro de una celda.

**PCCH (Paging Control Channel):** Canal lógico de control que transporta mensajes de Paging.

**Pcell (Primary Cell):** Celda primaria utilizada en LTE CA.

**PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel):** Canal físico indicador del número de símbolos del PDCCH.

**PCI (Physical Cell ID):** Identificador de un sector dentro de una celda.

**PCRF (Policy and Charging Rules Function):** Nodo de LTE encargado de la tarificación de datos y políticas del acceso a los recursos de datos en internet.

**PDCCH (Physical Downlink Control Channel):** Canal físico de control en el enlace descendente en el cual se transmite información del scheduling

**PDCP (Packet Data Convergence Protocol):** Protocolo de LTE utilizado entre el ENodeB y el Ue encargado de la compresión de paquetes IP.

**PDN-GW (Packet Data Network Gateway):** Nodo de LTE en la red troncal que provee conectividad hacia internet.

**PDSCH (Physical Downlink Shared Channel):** Canal físico que transporta datos de usuario.

**PHICH (Physical Hybrid-ARQ Indicator Channel):** Canal físico que transporta mensajes de ACK y NACK para el Hybrid-ARQ.

**PRACH (Physical Random-Access Channel):** Canal físico usado en el enlace ascendente por el Ue para iniciar contacto al ENodeB.

**PSS (Primary Synchronization Signal):** Señal de Sincronización Primaria, es utilizada entre el Ue y el ENodeB.

**PUCCH (Physical Uplink Control Channel):** Canal físico de control del enlace ascendente.

**PUSCH (Physical Uplink Shared Channel):** Canal físico que transporta datos de usuario.

**QAM (Quadrature Amplitude Modulation):** Modulación digital por amplitud en cuadratura.

**QoS (Quality of Service):** Calidad de servicio.

**QPSK (Quadrature Phase Shift Keying):** Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura.

**Radio Access Channel (RACH):** Canal de transporte para sincronizar al Ue con el ENodeB en el enlace ascendente

**RAN (Radio Access Network):** Término definido por la 3GPP para la parte de acceso del enlace de radio.

**REG (Resource Element Group):** Conjunto de 4 REs.

**Resource Block (RB):** Bloque de recurso

**Resource Element (RE):** Elemento de recurso

**RET (Remote Electrical Tilt):** Inclinación remota eléctrica de la antena.

**RLC (Radio Link Control):** Capa de LTE que brinda servicio a la capa de PDCP.

**ROHC (Robust Header Compression):** Método de compresión de datos utilizado en LTE.

**RRC (Radio Resource Control):** Protocolo del plano de control entre el Ue y el ENodeB.

**RRU (Remote Radio Unit):** Término utilizado para definir un radio remoto en LTE.

**RSRP (Reference Signal Received Power):** Potencia de la señal de referencia recibida en el Ue.

**RSRQ (Reference Signal Received Quality):** Calidad de la señal de referencia recibida en el Ue.

**RSSI (Received Signal Strength Indicator):** Intensidad del indicador de la señal recibida en el Ue.

**SAE (System Architecture Evolution):** Término definido por la 3GPP para los trabajos de estudio de CN en LTE

**Scells (Secondary Cells):** Celdas secundarias utilizadas en LTE CA.

**SC-FDMA (Single Carrier- Frequency Division Multiple Access):** Técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia de única portadora.

**S-GW (Serving Gateway):** Nodo encargado de establecer comunicación con los ENodeBs y otras tecnologías como 2G y 3G.

**SIBs (System Information Blocks):** Bloques de información de sistema utilizados para enviar mediciones de RF.

**SINR (Signal to Interference Noise Ratio):** Relación señal a ruido utilizada por el Ue para medir la calidad de la señal y de esta manera determinar el valor del QCI.

**Spatial Multiplexing:** Multiplexación espacial utilizada en arreglos de antena MIMO.

**SSC (Secondary Synchronization Signal):** Señal secundaria de sincronización.

**TAU (Tracking Area Updates):** Actualizaciones de áreas de seguimiento emitidas por el Ue.

**TDMA (Time Division Multiple Access):** Es una técnica de Acceso Múltiple por División de Tiempo.

**Throughput:** Transmisión de datos en LTE usualmente medida en bps.

**Timeslots:** Ranuras de tiempo en una trama.

**Tracking Area (TA):** Área de seguimiento, conjunto de ENodeBs en una determinada área.

**Tracking Area Update:** Actualización de área de seguimiento enviada por el Ue al MME.

**TTA (Telecommunications Technology Association):** Asociación de Telecomunicaciones y Tecnología, organización compuesta de diferentes compañías para desarrollar nuevos estándares en las tecnologías y comunicación.

**TTC (Telecommunications Technology Committee):** Comité de Telecomunicaciones y Tecnología es una organización encargada de los estándares de telecomunicación en Japón.

**TTI (Transmission Time Interval):** Tiempo de transmisión de datos en LTE realizada cada milisegundo.

**Ue (User Equipment):** Término utilizado en LTE para definir el equipo o dispositivo móvil del usuario.

**UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones):** Organismo especializado en telecomunicaciones, encargado de regular las telecomunicaciones a nivel internacional entre las distintas administraciones empresas y operadoras.

**UL (Uplink):** Acrónimo utilizado para definir el enlace ascendente.

**Uplink Shared Channel (UL-SCH):** Canal físico que transporta datos de usuario.

**Uplink:** Enlace ascendente comunicación de la terminal a la estación base.

**Upload:** Carga de datos o información a la red.

**UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network):** Red Universal de Acceso de Radio Terrestre, definición de la parte de RAN en UMTS.

**WCDMA (Wide Code Division Multiple Access):** Técnica de Acceso Múltiple por División de Código de banda ancha.

## Apéndice A. Código Matlab

```
%% CÁLCULO DEL THROUGHPUT DE LTE FDD Y NÚMERO DE LLAMADAS EN VOLTE ENLACE
DESCENDENTE.
clc;
fprintf(1,'----- CÁLCULO DEL THROUGHPUT LTE FDD DL (Normal Cyclic Prefix)
Port 0-----');
BW=input('\n\n Selecciona el BW (3,5,10,15 hasta 20 [MHz]) ');
BW_Subp=0.015;
BW_RB=0.18;
RB=floor(BW*0.9/BW_RB);
Subp=floor(BW*0.9/BW_Subp);
RS=8;
fprintf(' \n          #RBs= %d #Subportadoras= %d\n', RB, Subp);
Ports=input('\n Número de puertos de la antena (1,2,4): ');
Ports;
CFI=input('\n Elige CFI (Control Format Indicator) 1,2 o 3: ');
CFI;
PCFIH=16;
%% Elementos de recurso de señalización y control.
Ng=input('\n Indica el PHICH Ng Factor (1/6,1/2,1, o 2) :');
PHICH=((ceil(RB*Ng/8))*3*4);
fprintf(' \n \n ----- #RES EN LOS CANALES DE CONTROL Y DATOS EN
SUBTRAMAS 1,2,3,4,6,7,8,9 -----')
fprintf(' \n \n #RES PHICH =%d\n',PHICH);
fprintf(' \n #RES PCFIH =%d\n',PCFIH);

if (Ports==2 | Ports==4)
    Rsv=((RS*Ports)/2)*RB; rsv=6*6;
else Rsv=((RS*Ports)/4)*RB; rsv=2*6;
end

if (CFI>=2 & Ports==4)
    Rsvls=6*RB;
else Rsvls=2*RB;
end
rsst=RS*RB;
rssl=2*RB;
fprintf(' \n #RES Reference signals =%d\n',rsst);
fprintf(' \n #RES Reserved =%d\n',Rsv);
pdcch=Subp*(CFI-1);
PDCCH=pdcch+(Subp-PCFIH-PHICH-Rsvls-rssl);
Totl=CFI*Subp;
fprintf(' \n #RES PDCCH =%d\n',PDCCH);
rectrl=PDCCH+PCFIH+PHICH+Rsv+rsst;
fprintf(' \n #RES señalización y control por subtrama: %d\n',rectrl);
resbt=Subp*14;
fprintf(' \n #RES totales por subtrama: %d\n',resbt);
redatos=resbt-rectrl;
fprintf(' \n #RES PDSCH por subtrama: %d\n',redatos);

%% Elementos de recurso subtrama 0 y 5 / Señales referencia OFDM.
fprintf(' \n \n -----#RES SEÑALES PSS,SSS,PBCH SUBTRAMA 0 Y 5 ---
-----')
PSS=72*2;
fprintf(' \n #RES PSS Subtrama 0 y 5 : %d\n',PSS);
```

```

SSS=72*2;
fprintf(' \n #REs PSS Subtrama 0 y 5 : %d\n',SSS);
PBCHsr=4*12*6;
ref=2*6;
PBCH=PBCHsr-ref-rsv;
fprintf(' \n #REs PBCH Subtrama 0: %d\n',PBCH);
fprintf(' \n \n -----#REs totales trama LTE FDD -----');
resctrltot=10*(PDCCH+PCFICH+PHICH+Rsv+rsst)+PSS+SSS+PBCH;
fprintf(' \n #REs control y señalización trama: %d\n',resctrltot);
restot=12*14*RB*10;
fprintf(' \n #REs totales: %d\n',restot);
resdatos=restot-resctrltot;
fprintf(' \n #REs datos trama: %d\n',resdatos);

%% Porcentaje de datos de usuario y señalización trama LTE.
porcenc=(resctrltot/restot) *100;
fprintf(' \n Porcentaje datos control y señalización: %.2f \n',porcenc);
fprintf(' \n Porcentaje datos de usuario: %.4f \n',100-porcenc);
%% Selección del tipo de modulación y tasa de código (cr) LTE.

fprintf('\n ----- THROUGHPUT LTE POR MCS ----- \n');
crm=[0 2 0.11;1 2 0.14;2 2 0.17;3 2 0.22;4 2 0.28;5 2 0.34; 6 2 0.4;7 2
0.47;8 2 0.54;9 2 0.61;10 4 0.3;11 4 0.34;12 4 0.39;13 4 0.44;14 4 0.5;15
4 0.55; 16 4 0.59;17 6 0.39;18 6 0.42;19 6 0.46;20 6 0.51;21 6 0.55;22 6
0.6;23 6 0.64;24 6 0.69;25 6 0.74;26 6 0.78;27 6 0.81;28 6 0.81];
ms=crm(end,1);
fprintf(' \n MCS \t m \t \t cr \t \t Throughput LTE DL [Mbps]: \n');
%% Gráfica Throughput LTE vs MCS.
for i=1:ms+1
    thptcrm(i)=(resdatos*crm(i,end)*crm(i,2)*100*Ports)/1000000;
    bitslte(i)=crm(i,end)*m*redatos;
    MCS(i)=i-1;

    fprintf(' \n %d \t %d \t \t %.2f \t \t \t \t %.4f \n', MCS(i),
    crm(i,2),crm(i,end),thptcrm(i));
end

grid minor
hold on;
figure(1)
plot (MCS,thptcrm,'-o','linewidth',2.3,'Displayname','LTE Throughput')
for i=1:10

    plot (MCS(i),thptcrm(i), '-o',...
        'LineWidth',2.5,...
        'MarkerEdgeColor','r',...
        'MarkerFaceColor', [0 0 0],...
        'MarkerSize',5,...
        'DisplayName','QPSK')
end

for i=11:17
    plot (MCS(i),thptcrm(i),'-o',...
        'LineWidth',2.5,...
        'MarkerEdgeColor','y',...

```

```

        'MarkerFaceColor',[0 0 0],...
        'MarkerSize',5,...
        'DisplayName','16 QAM')
end

for i=18:ms+1
    plot (MCS(i),thptcrm(i), '-o',...
        'LineWidth',2.5,...
        'MarkerEdgeColor','g',...
        'MarkerFaceColor', [0 0 0],...
        'MarkerSize',5,...
        'DisplayName','64 QAM')
end
legend('Location','bestoutside')
title('Throughput LTE enlace descendente vs MCS')
xlabel('MCS (Modulation Code Scheme)');
ylabel('Throughput LTE [Mbps]');
%% Selección del cr y modulación LTE.
fprintf(1,' \n \n ----- SELECCIÓN DE PARAMETROS DE LTE FDD PARA EL
CALCULO DE LLAMADAS DL ----- \n ');
m=input('\n Ingresa el tipo de modulación m[bits/simbolo]={2,4,6}: ');
cr=input('\n Elige la tasa de código (cr): ');
thpt=(resdatos*m*cr*100*Ports);

fprintf(' \n \n BW: %d MHz  #RB:%d | MIMO %dx%d | bits/simbolo:%d | Tasa
de código: %.4f \n ',BW,RB,Ports, Ports,m,cr);
fprintf(' \n Throughput LTE: %.3f Mbps \n',thpt/1000000);
%% Gráfica llamadas en VoLTE para cada codec.
bitsamr=[904; 360; 192; 144; 256; 176; 128; 112];
tasavoc=[45.2; 18; 9.6; 7.2; 12.8; 8.8; 6.4; 5.6 ];
AMR={'AMR-WB', 'AMR-WB', 'AMR-WB', 'AMR-WB', 'AMR', 'AMR',
'AMR', 'AMR'};

amrel=numel(bitsamr);
fprintf(' \n Codec \t Tasa de bit [kbps] \t Carga útil/Encabezado
[bytes] #Llamadas VoLTE \n')
for i=1: amrel
    Voipcalls(i)= floor(thpt/(tasavoc(i)*1000));
    fprintf(' \n %d \t %s \t %.2f \t \t
%d \t \t
%d ', i, AMR{i},tasavoc(i),bitsamr(i),Voipcalls(i));
end
fprintf(' \n');

figure (2)
ax.yAxis.Exponent =0;
ax.xAxis.Exponent =0;
grid minor
title('Número de llamadas simultáneas VoLTE por codec')
xlabel('Codec');
ylabel('Llamadas LTE enlace descendente ');
for i=1:4
    hold on;

    bar(i,Voipcalls(i),'r',...
        'DisplayName', 'AMR WB');

```

```
end

for i=5:amrel
    hold on;
    bar(i,Voipcalls(i),'g',...
        'DisplayName','AMR ');
end
legend('Location','bestoutside')
```