

Estudio y Análisis Técnico Comparativo entre las Tecnologías LTE y LTE Advanced

Camilo Calle *; María S. Jiménez **

*Quito, Ecuador (e-mail: cml_tel@yahoo.com)

**Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Quito, Ecuador (Tel: 593-2-2507-144; maria.jimenez@epn.edu.ec)

Resumen: El proyecto consiste en un estudio y análisis de las tecnologías 4G, LTE (Long Term Evolution) y LTE-Advanced empleadas en telefonía móvil celular, para lo cual se realiza una comparación a nivel tecnológico, de bandas de frecuencia, de la arquitectura de red, de la capa física, de los esquemas de modulación, de la velocidad de transmisión, de las técnicas de múltiples antenas, de las categorías de equipos de usuario, de los servicios, aplicaciones, de redes desplegadas y lanzamientos comerciales. Cada tecnología se estudia por separado, en el caso de LTE, se realiza un estudio de la arquitectura de red lo que involucra entidades y protocolos de red asociados. También se analiza la interfaz radio en donde se describen los protocolos, canales lógicos, de transporte y físicos. Finalmente se realiza un análisis de las tecnologías de nivel físico empleadas tanto para el uplink como para el downlink. De manera similar se desarrolla un estudio de LTE-Advanced, es decir, de la arquitectura del sistema, métodos de acceso y características que definen a esta tecnología como son: la agregación de portadora, MIMO mejorado en el uplink y downlink, CoMP y Relaying.

En base a este estudio se realiza posteriormente un análisis comparativo de los parámetros mencionados de ambas tecnologías, luego de lo cual se llega a conclusiones importantes que permiten aseverar que: LTE advanced es una mejora de LTE, lo que le posibilita utilizar las mismas bandas de frecuencia y adicionar otras, compartir la misma arquitectura, el mismo plano de usuario; sin embargo gracias a las nuevas técnicas y mejoras en varios aspectos que incorpora LTE-Advanced, es posible incrementar el rendimiento, mejorar la calidad de la señal, incrementar la cobertura, disminuir la latencia y alcanzar mayores velocidades de transmisión como las propuestas por el IMT-Advanced para tecnologías 4G.

Palabras clave: LTE, LTE-Advanced, OFDM, OFDMA, SC-FDMA, MIMO, CoMP, Relaying.

1. INTRODUCCIÓN

La telefonía móvil celular crece a pasos acelerados, hoy en día se habla de tecnologías 4G. La creciente demanda de las comunicaciones móviles y los avances tecnológicos actuales permiten mejorar la calidad de las llamadas, la cobertura, el acceso rápido a Internet, descarga de aplicaciones, juegos,

música y videos a una buena velocidad. Para conseguir estos objetivos se debe contar con tecnologías robustas como *LTE* y *LTE-Advanced*.

Realizar una comparación entre las tecnologías *LTE* y *LTE-Advanced* permite entender el funcionamiento de cada una y comprender cómo es posible que mejoren notablemente el rendimiento de una red celular en relación a tecnologías de generaciones anteriores, garantizando siempre la interoperabilidad entre ambas tecnologías; posibilitando sobre una infraestructura de red celular LTE, cuando la demanda lo requiera, migrar hacia una versión mejorada como es *LTE-Advanced*. Adicionalmente, este análisis posibilita no sólo conocer las ventajas y mejoras que presenta *LTE-Advanced* con respecto a su predecesor *LTE*, sino explotar de mejor manera cada una de las tecnologías, en términos de incrementar la cobertura y la capacidad de la red y permitir ofrecer al usuario servicios y aplicaciones móviles interactivas de gran ancho de banda y elevadas velocidades de transmisión.

2. LTE

LTE nace con el objetivo de superar a sistemas previos en velocidad de transmisión, capacidad, eficiencia y movilidad, para lo cual se ha desplegado un conjunto de técnicas tanto a nivel de *hardware* como de *software*, para que de esta forma *LTE* sea considerada una tecnología superior a cualquier otra.

2.1 Arquitectura del sistema LTE^{[11][18]}

LTE presenta tres elementos que lo identifican plenamente: *E-UTRAN* (red de acceso), *EPC* (red de *core*), la evolución de *IMS* y el equipo de usuario. Tanto la red de acceso como la red de *core* de *LTE* brindan servicios encaminados a la transferencia de información basada en paquetes *IP* entre el equipo de usuario, redes de paquetes externas y fundamentalmente *Internet*. La Fig. 1, muestra la arquitectura de *LTE*, se incluye elementos que no son propios del sistema debido a que la arquitectura también permite la interconexión de otras redes, tanto *3GPP* como *no 3GPP*. La interfaz entre *E-UTRAN* y *EPC* se denomina *SI*. La interfaz entre los equipos de usuario y *E-UTRAN* es la interfaz de radio *Uu*. La conexión a redes externas y plataformas de servicios se logra a través de la interfaz *SGi* de la *EPC* [11].

(1) *Pila de protocolos, canales lógicos, canales de transporte, canales físicos y señales físicas*: La torre de protocolos usada en la interfaz aire se puede dividir en dos planos, uno llamado plano de usuario destinado al envío de la información y el otro denominado plano de control encargado de transportar los mensajes de control intercambiados entre la red y el terminal móvil. En la Figura 5 se encuentra toda la pila de protocolos que permiten que el terminal móvil pueda comunicarse con las estaciones base a través de la interfaz aire. Tanto para el plano de control como para el plano de usuario la interrelación de los diferentes protocolos se logra a partir de canales lógicos, de transporte y físicos. La Fig. 6 muestra los distintos canales utilizados por LTE tanto para el *downlink* (DL) como para el *uplink* (UL) [8].

(2) *Capa física*: La capa física del sistema LTE es la encargada de realizar la transmisión propiamente dicha a través del canal radio. Realiza funciones de codificación de canal, modulación, procesado asociado a las técnicas de múltiples antenas de transmisión y recepción.

Los servicios de transferencia que la capa física ofrece a la capa MAC se denominan canales de transporte. En el enlace ascendente (Móvil a eNB), la capa física se basa en un esquema *Single-Carrier FDMA*. En el enlace descendente (eNB a Móvil), el esquema de transmisión es *OFDMA*. En ambos casos la separación entre subportadoras es fija e igual a 15 KHz.

El estándar define hasta 40 posibles bandas de operación trabajando bien en modo de duplexión por división de frecuencia (FDD) o bien en duplexión por división en el tiempo (TDD).

Los posibles esquemas de modulación presentados en la capa física son: *QPSK*, *16QAM* y *64QAM* para el enlace descendente; y, *QPSK* y *16QAM* para el enlace ascendente. También existe la posibilidad de incluir *64QAM* en el *uplink* en función de las capacidades del terminal móvil.

El mínimo elemento de información que puede ser asignado por el eNB a un terminal móvil se conoce como PRB (*Physical Resource Block*). El ancho de banda de un PRB es de 180 KHz, es decir, 12 sub-portadoras separadas 15 KHz entre ellas en el que se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDMA, dependiendo de la longitud de prefijo cíclico utilizada. La duración de un PRB es igual a 0,5 ms, este período de tiempo también se conoce como duración de un *slot* o ranura temporal. El número de subportadoras es 12 veces (el número de PRBs más una), el más uno corresponde a una subportadora que se denomina subportadora central o subportadora DC y no se utiliza para transmitir información, se utiliza para la sincronización de la frecuencia del receptor.

En la Tabla 1 se puede apreciar el número de PRBs asociados a cada ancho de banda y su relación con el número de

subportadoras, también se presentan las velocidades pico globales en la interfaz aire para los distintos anchos de banda [3].

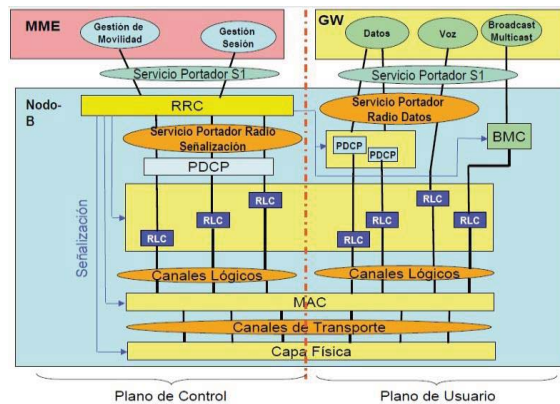


Fig. 5. Interfaz radio de LTE [3]

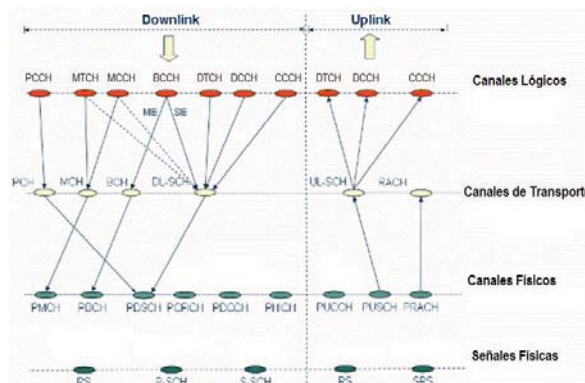


Fig. 6. Canales que se utilizan en la interfaz aire de LTE [8]

Tabla 1. Relación entre el número de PRBs, el número de subportadoras y la velocidad de transmisión para los diferentes anchos de banda que maneja LTE [3].

Ancho de Banda [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
Número de PRB	6	15	25	50	75	100
Velocidad pico total [Mbps]	≈6	≈15	≈25	≈50	≈75	≈100
Velocidad pico bruta de usuario [Mbps]	≈5.1	≈12.8	≈21	≈42.5	≈63.7	≈85

2.3 Tecnologías de nivel físico^{[3][14][20]}

Las tecnologías de nivel físico empleadas por LTE permiten conseguir mayores niveles de capacidad y eficiencia en el uso de los recursos radio, es por ello que se abordará una descripción de las técnicas de acceso múltiple, OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) y SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*), para lo cual es indispensable primero entender el origen de estas técnicas, OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), finalmente se describirá la tecnología MIMO

aplicada a *LTE* que abordará temas referentes a estructuras de transmisión y recepción con múltiples antenas.

(1) *OFDM*: *OFDM* es un esquema de modulación multiportadora que utiliza un gran número de subportadoras para poder transmitir información de datos y control (símbolos) sobre cierto ancho de banda. Gracias a las propiedades de ortogonalidad de las subportadoras, es posible efectuar la transmisión simultánea de todos los símbolos manteniendo la capacidad de separación de los mismos en recepción. Cada subportadora es modulada individualmente mediante esquemas de modulación convencionales tales como *QAM*. La Fig. 7 muestra un esquema simplificado de la modulación y demodulación *OFDM* [13], también se ilustra en la Fig. 8 el espectro de frecuencia que se obtiene al modular cinco subportadoras ortogonales [14].

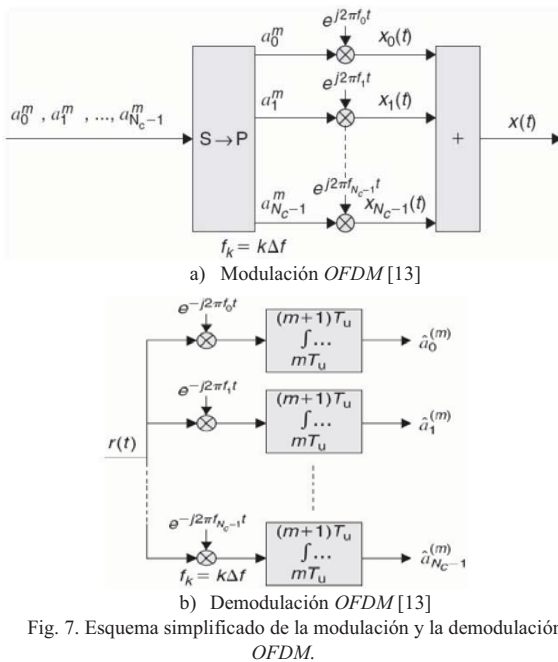


Fig. 7. Esquema simplificado de la modulación y la demodulación *OFDM*.

(2) *OFDMA*: *OFDMA* es una técnica de acceso basada en *OFDM* que se utiliza en el *DL* de *E-UTRAN*. *OFDMA* está basada en la modulación multiportadora y en el acceso múltiple por división de frecuencia. La Fig. 9 muestra el esquema de transmisión *OFDMA* [21]. Las subportadoras en *OFDMA* pueden ser asignadas a diferentes usuarios indistintamente, ello va a depender del servicio que el usuario tenga contratado. Con la asignación de más subportadoras se puede mejorar la calidad de servicio que un usuario tenga asignado, también se puede mejorar la velocidad de transmisión.

Gracias a *OFDMA* es posible enviar varias transmisiones de datos simultáneas de diferentes usuarios en subportadoras diferentes, tal como lo muestra la Fig. 10.

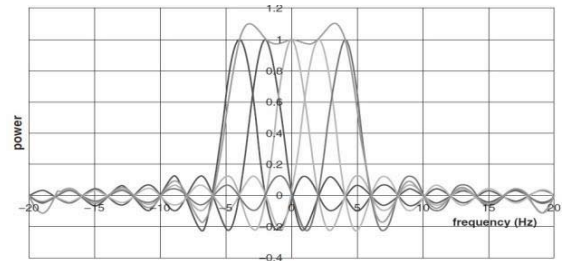


Fig. 8. Espectro de cinco subportadoras ortogonales moduladas *QAM* para obtener una portadora *OFDM* [14]

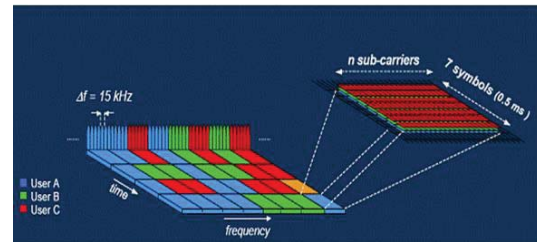


Fig. 9. Esquema de transmisión *OFDMA* [21]

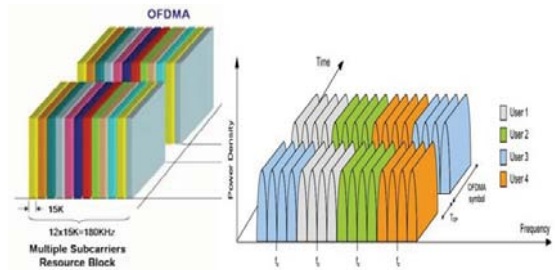


Fig. 10. Asignación de recursos de diferentes usuarios en *OFDMA* [21]

(3) *SC-FDMA*: En *SC-FDMA* se transmite un símbolo de determinado usuario en un conjunto de subportadoras simultáneamente. Todas las subportadoras en el *uplink* son moduladas con el mismo símbolo; la Figura 11 muestra que el primer grupo de subportadoras de color verde son moduladas por el mismo dato, por lo tanto se transmiten *M* símbolos secuencialmente cada uno ocupando todo el ancho de banda disponible y con una duración igual al tiempo de símbolo. Adoptar este esquema de modulación en el *uplink* es muy ventajoso para reducir el *PAPR* (*Peak to Average Power Ratio*), factor que mide la relación entre la potencia instantánea de la señal transmitida respecto de la potencia media y por lo tanto permite incrementar la eficiencia de los amplificadores de potencia.

(4) *MIMO*: *MIMO* usa las palabras *input* y *output* para hacer referencia al canal radio (medio de transmisión, antenas, cableado y circuitos analógicos conectados a las antenas) y no a los transmisores y receptores. *LTE* utiliza la técnica *SFBC* (*Space Frequency Block Coding*) la cual se basa en el principio de *Alamouti*, en donde los datos se copian en distintas frecuencias en lugar de bloques de tiempo. La terminología que se usa en *LTE* cuando se habla de *MIMO* es:

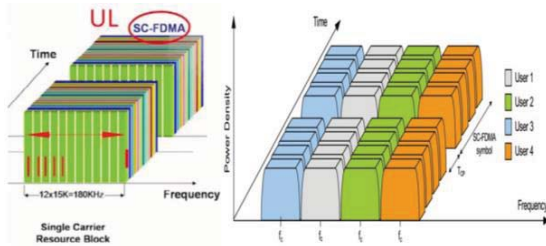


Fig. 11. Asignación de recursos de diferentes usuarios en SC-FDMA [21].

- **Codeword (CW); datos de usuario:** Representan los datos de un usuario antes de que sean modificados para su transmisión. Se pueden usar uno o dos CWs, (CW0 y CW1) dependiendo de las condiciones del canal.
- **Layer, stream:** Es sinónimo de flujo. En multiplexación espacial al menos dos layers deben ser usadas. En LTE se permiten hasta cuatro layers. El número de layers es siempre menor o igual al número de antenas.
- **Precoding:** La precodificación modifica los flujos de datos antes de la transmisión. Esto puede ser hecho por diversidad o multiplexación espacial.

En *SU-MIMO*, se envían dos CWs a un único UE. En tanto que en *MU-MIMO* cada CW es enviado solamente a un UE. La Fig. 12, (a) muestra el funcionamiento de *SU-MIMO* y (b) de *MU-MIMO* [17]. En la opción (a) se puede apreciar el uso de dos codewords para un único usuario (UE). En la opción (b) se muestra un escenario de *MU-MIMO DL* en el que la estación base transmite simultáneamente a K UEs. En LTE se definen siete modos de operación para MIMO en el enlace descendente, éstos son: Puerto de antena simple, Diversidad de transmisión, Multiplexación espacial de lazo abierto, Multiplexación espacial de lazo cerrado, Multi-Usuario MIMO, Lazo cerrado de grado 1 con pre-codificación y Puerto de antena única.

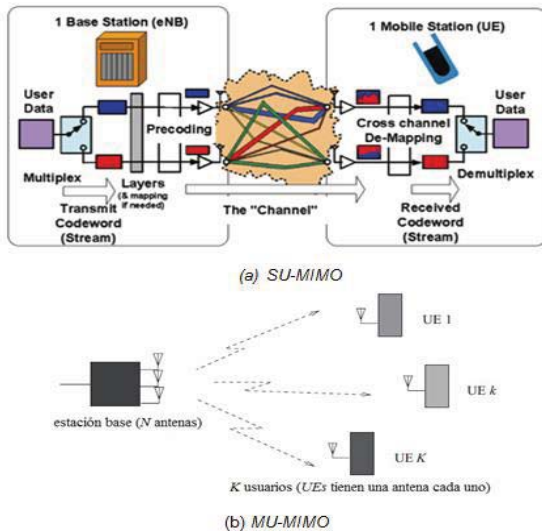


Fig. 12. Esquemas MIMO en el downlink de LTE [17]

En el *uplink* únicamente *MU-MIMO* puede ser implementado, lo que implica la transmisión simultánea de codewords de diferentes UEs en el mismo instante y frecuencia en varias

layers.

3. LTE-ADVANCED

En el 2008 la ITU asignó el término *IMT-Advanced* para identificar sistemas con capacidad superior a las tecnologías del *IMT-2000*. *LTE-Advanced* (*LTE-A*) es la versión evolucionada de *LTE*, cuyo objetivo es exceder los requisitos impuestos por el estándar *IMT-Advanced*. En octubre del 2009 el 3GPP envió a la ITU-R todas las especificaciones de *LTE-A* para que sean verificadas y evaluadas y de esta manera conseguir que *LTE-A* sea una tecnología candidata 4G *IMT-Advanced*. *LTE-A* busca mejoras en tres áreas: velocidades de transmisión de datos pico y promedio; eficiencia espectral y latencia en el plano de usuario y de control. Los objetivos de *LTE-A* están enfocados en mantener compatibilidad con versiones previas a ésta. Esto permite a los operadores de red continuar sirviendo a sus clientes *LTE* mientras su equipo de red es actualizado progresivamente. Las principales características de *LTE-Advanced* que fueron añadidas a *LTE* son:

- Agregación de portadora
- Transmisión de múltiples antenas para el *downlink* mejorado.
- Transmisión de múltiples antenas para el *uplink*.
- *CoMP* (*Coordinated multipoint transmission and reception*)
- *Relaying*

3.1 Agregación de portadora^{[20][12][19]}

LTE Advanced necesita de un ancho de banda de 100 Mhz para su operación como tecnología 4G, el problema es que hoy en día ningún operador tiene esta cantidad de espectro asignada, lo que sí tienen es bloques de frecuencia en bandas diferentes. Una motivación para usar agregación de portadora es usar eficazmente el espectro fragmentado independientemente de la velocidad de transmisión pico. En la versión 8 de *LTE* se usa un único CC (*Component Carrier*) ocupando un ancho de banda máximo de 20 Mhz. *LTE Advanced* usa agregación de portadora de hasta cinco componentes de portadoras (*Component Carriers, CCs*) para lograr un gran ancho de banda de transmisión.

La Fig. 13 muestra un escenario en el que el *R10 UE* puede tener asignado recursos *DL* y *UL* de 5 componentes de portadoras *CCs*, lo que significa que el ancho de banda máximo es de 100 MHz con *CCs* de 20 MHz cada una, en tanto que los *R8/R9 UEs* pueden tener asignado solamente una única *CC*. Las *CCs* pueden ser de diferentes anchos de banda tal y como lo muestra la figura [19].

La agregación de portadora en *LTE Advanced* está diseñada para soportar agregación de una variedad de arreglos de distintos *CCs*, esto incluye *CCs* del mismo o de diferentes anchos de banda, *CCs* adyacentes o no adyacentes en la misma banda de frecuencia y *CCs* en diferentes bandas de

frecuencia. Cada *CC* puede tomar un ancho de banda de transmisión diferente correspondiente a anchos de banda de canal de 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 Mhz. En la Fig. 14 se ilustra a modo de ejemplo las alternativas brindadas por *LTE-Advanced* en cuanto a agregación de portadoras [19].

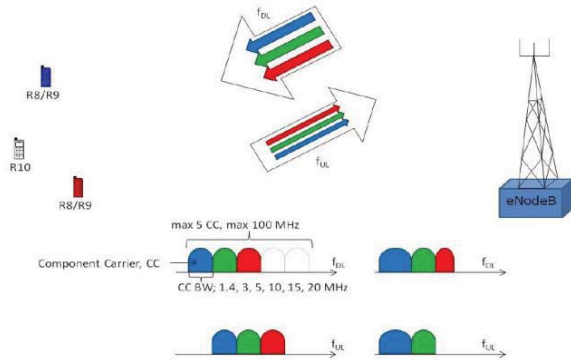


Fig. 13. Agregación de portadora [19]

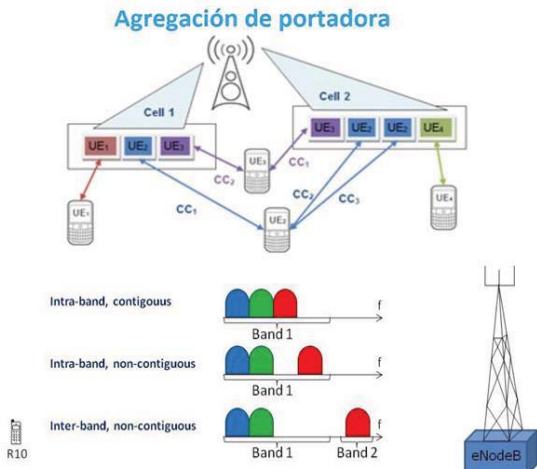


Fig. 14. Alternativas *intra-band* e *inter-band* para agregación de portadoras [19]

3.2 Técnicas de múltiples antenas para *LTE-Advanced*[20]

En *LTE-Advanced* se ha introducido el modo *TM9* para el *DL*, en tanto que para el *UL* se ha introducido el *TM2*. Gracias a la introducción de estos modos en *LTE-Advanced* se soporta *MIMO 8x8* en el *DL* y *4x4* en el *UL*. Con respecto al *downlink* se mejora *SU-MIMO* y consecuentemente se incrementan las velocidades de transmisión; y, mejorando las técnicas *MU-MIMO* se consigue un aumento en la eficiencia espectral. Para llevar a cabo estas mejoras y avances se introducen nuevas señales de referencia y mejores *UEs*. En el *uplink* en cambio se introduce por primera vez *SU-MIMO* y se mejora la técnica de acceso.

3.3 *Coordinated Multipoint (CoMP)*[17][20]

CoMP no se ha incluido en los estándares del *Release 10* del *3GPP*, pero su trabajo está en marcha y se estudiará fuertemente en los *releases* futuros. A pesar del hecho de que el *Release 10* no provee un soporte específico para *CoMP*,

algunos esquemas pueden ser implementados en las redes *LTE Release 10* de una manera apropiada. Esto permitirá optar por una actualización más sencilla a futuro.

La transmisión y recepción basada en la técnica *coordinated multipoint* es una tecnología que utiliza múltiples antenas de varias celdas, de tal manera que tanto las antenas de la celda de servicio como las antenas de las celdas vecinas contribuyen en mejorar la calidad de la señal recibida en el *UE* y en el *eNodeB*, tanto como la reducción de la interferencia co-canal producida de las celdas adyacentes.

Varios *eNBs* que se coordinan dinámicamente permitiendo que exista planificación, transmisión y procesamiento conjunto. De esta forma en el borde de una celda el *UE* puede ser atendido por dos o más *eNBs* mejorando la transmisión/recepción y el *throughput* [20].

3.4 *Relaying*[20]

El *Relaying* es una nueva característica en *LTE-Advanced* que se basa en el uso de una red de *Relay Nodes (RNs)* que permitirán complementar las macro-celdas, incrementando así la cobertura y la capacidad de la red. En contraste con un repetidor, un *RN* procesa la señal recibida antes de reenviarla. Este procedimiento involucra operaciones de Capa 1, 2 o 3. Hay que tomar en cuenta también que el retardo mínimo producido por un repetidor es bajo comparado con un *RN*. Un *RN* tiene dos fases de transmisión para poder entregar la señal recibida del *donor eNB* al *UE*. En la Fig. 15 se pueden apreciar los nombres de los enlaces y elementos que integran una arquitectura de *relaying* [20].

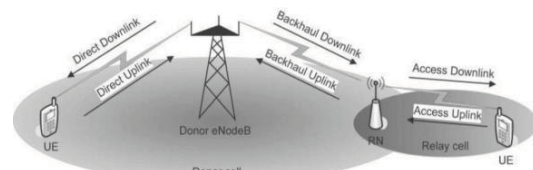


Fig. 15. Arquitectura *relaying* [20]

4. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LTE Y LTE-ADVANCED

En base al estudio y análisis de las tecnologías previas es posible desarrollar una comparación entre *LTE* y *LTE-Advanced*, es por ello que a continuación se presentan comparaciones entre el *Release 8* y el *Release 10* de *LTE*.

4.1 *Comparación Tecnológica*[19]

Cuando se trata de definir las características principales de una tecnología celular se consideran los parámetros más importantes para realizar su descripción, estos parámetros tienen que ver con velocidad de transmisión, ancho de banda, eficiencia espectral, latencia, movilidad, cobertura y capacidad. En la Tabla 2 se realiza una comparación entre las tecnologías celulares *LTE* y *LTE-Advanced* tomando como

argumento los parámetros descritos anteriormente [19].

4.2 Comparación de bandas de frecuencia^{[10][14][20]}

En LTE las bandas de frecuencia están especificadas por el IMT-2000, y a diferencia de las bandas heredadas de UMTS, LTE añade 8 bandas nuevas para operación en modo *duplex TDD*. Por otro lado, LTE-Advanced utiliza nuevas bandas de frecuencia debido al uso de más espectro por parte de la tecnología, las nuevas bandas asignadas están especificadas por el IMT-Advanced. En la Tabla 3 se presentan, en color negro, las bandas de frecuencia asignadas tanto para LTE como para LTE-Advanced y en color rojo, las bandas de frecuencia adicionales para LTE-Advanced [10] [14] [20].

4.3 Comparación de la arquitectura de red^{[10] [20]}

LTE y LTE-Advanced se basan en una plataforma netamente basada en IP que se extiende desde el eNB hasta el núcleo de paquetes evolucionado. Ambas tecnologías presentan cuatro elementos principales: el equipo de usuario, la red de acceso E-UTRAN, la red de core EPC y los servicios brindados a través de IMS e Internet [10]. Véase la Fig. 16.

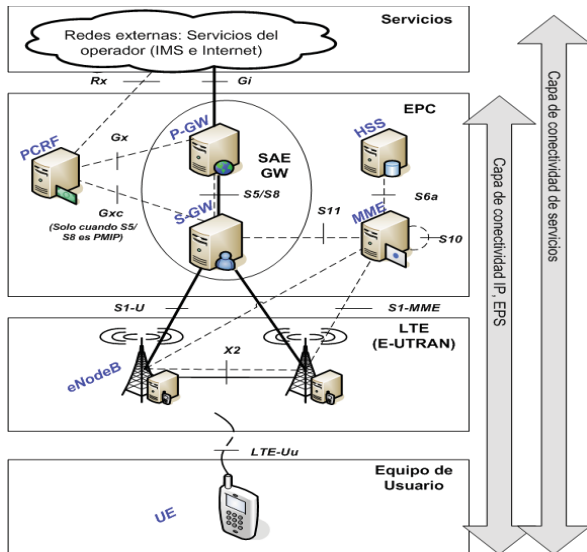


Fig. 16. Arquitectura general de LTE y LTE-Advanced [10]

A diferencia de LTE, LTE-Advanced incorpora en E-UTRAN un elemento adicional conocido como Relay Node, con funcionalidades similares a las de un eNB, permitiendo incrementar la cobertura, el rendimiento y la capacidad de la red. La Fig. 17 muestra la topología de red para una arquitectura relay usada por LTE-Advanced [20].

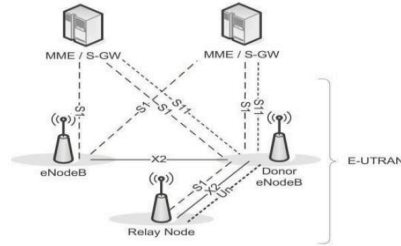


Fig. 17. Arquitectura Relay para LTE-Advanced [20]

(1) Plano de usuario y plano de control: En LTE y LTE-Advanced el plano de usuario es utilizado para el envío de paquetes IP de usuario. El plano de control es utilizado para gestionar y controlar las diferentes interfaces. La Figs. 18, 19 y 20 muestran los protocolos que se utilizan en los planos de usuario y de control tanto para LTE como para LTE-Advanced [20].

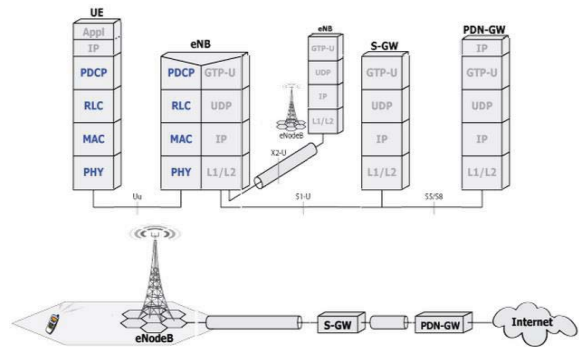


Fig. 18 Plano de usuario [20]

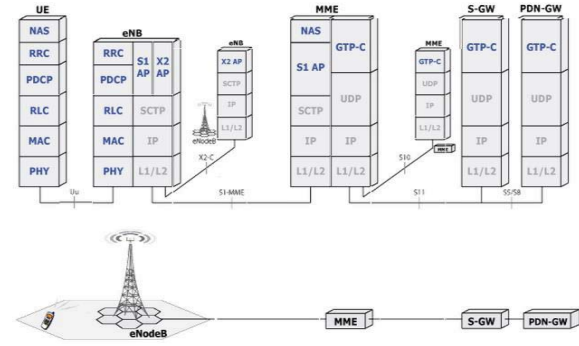


Fig. 19 Plano de control [20]

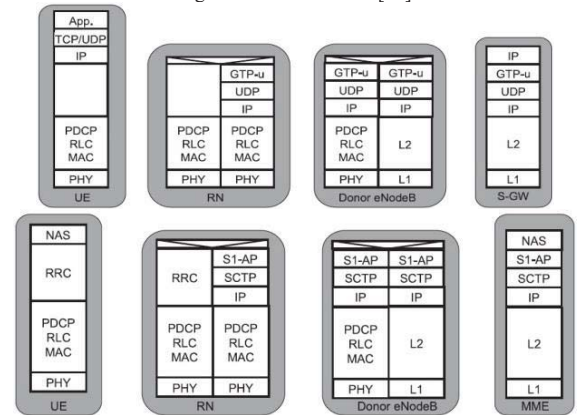


Fig. 20 Plano de usuario y de control para una topología Relay para LTE-Advanced [20]

Tabla 2. Comparación entre *LTE* y *LTE-ADVANCED* [19]

Parámetro		LTE		LTE-Advanced	
Velocidad de transmisión pico	DL	300 Mbps (MU-MIMO 4x4, 64QAM, 20 MHz)		1.2 Gbps (SU-MIMO 8X8, 64 QAM, 2 CCs 40 MHz)	
	UL	75 Mbps (MU-MIMO 4x4, 64 QAM, 20 MHz)		600 Mbps (SU-MIMO 4X4, 64 QAM, 2 CCs 40 MHz)	
Ancho de banda soportado		Hasta 20 MHz (1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz)		Hasta 100 Mhz	
Eficiencia espectral	Pico [bps/Hz]	DL	15	30	8x8 SU-MIMO
		UL	3.75	15	4x4 SU-MIMO
	Promedio [bps/Hz]	DL	1.87	3.7	CoMP, MIMO
		UL	1	2	CoMP, MIMO,
	Borde de la celda [bps/Hz]	DL	0.06 (MIMO 4x2)	0.12 (MIMO 4x4)	CoMP, MIMO
		UL	0.03 (MIMO 2x4)	0.07 (MIMO 2x4)	CoMP, MIMO,
Latencia en el plano de usuario		< 30 ms		< 10 ms	
Latencia en el plano de control		< 100 ms		< 50 ms	
Movilidad		Optimizado para bajas velocidades (< 15 km/hr) hasta los 120 km/hr. Los enlaces se mantienen hasta velocidades de 350 km/h		Optimizado para bajas velocidades (< 15 km/hr) hasta los 120 km/hr. Los enlaces se mantienen hasta velocidades de 350 km/hr.	
Radio de cobertura de una celda		5 km		5 km	
Número de usuarios en una celda		200 usuarios activos por celda en 5 MHz		600 usuarios activos por celda en 5 MHz	

Tabla 3. Bandas de frecuencia asignadas para *LTE* (negro) y *LTE-ADVANCED* (rojo) [14]

Banda de operación	Uplink		Downlink		Ancho de banda tanto en <i>uplink</i> como en <i>downlink</i> [MHz]	Espaciamiento entre <i>uplink</i> y <i>downlink</i> [MHz]	Modo Dúplex
	Low [MHz]	High [MHz]	Low [MHz]	High [MHz]			
1	1920	1980	2110	2170	60	130	FDD
2	1850	1910	1930	1990	60	20	FDD
3	1710	1785	1805	1880	75	20	FDD
4	1710	1755	2110	2155	45	355	FDD
5	824	849	869	894	25	20	FDD
6	830	840	875	885	10	35	FDD
7	2500	2570	2620	2690	70	50	FDD
8	880	915	925	960	35	10	FDD
9	1749.9	1784.9	1844.9	1879.9	35	60	FDD
10	1710	1770	2110	2170	60	340	FDD
11	1427.9	1452.9	1475.9	1500.9	25	23	FDD
12	698	716	728	746	18	12	FDD
13	777	787	746	756	10	21	FDD
14	788	798	758	768	10	20	FDD
15	1900	1920	2600	2620	20	680	FDD
16	2010	2025	2585	2600	15	560	FDD
17	704	716	734	746	12	18	FDD
18	815	830	860	875	15	30	FDD
19	830	845	875	890	15	30	FDD
20	832	862	791	821	30	71	FDD
21	1447.9	1462.9	1495.9	1510.9	15	33	FDD
22	3410	3500	3510	3600	90	10	FDD
33	1900	1920	1900	1920	20	0	TDD
34	2010	2025	2010	2025	15	0	TDD
35	1850	1910	1850	1910	60	0	TDD
36	1930	1990	1930	1990	60	0	TDD
37	1910	1930	1910	1930	20	0	TDD
38	2570	2620	2570	2620	50	0	TDD
39	1880	1920	1880	1920	40	0	TDD
40	2300	2400	2300	2400	100	0	TDD
41	3400	3600	3400	3600	200	0	TDD

4.4 Comparación de la capa física [5] [20]

LTE y LTE-Advanced basándose en el esquema de multiplexación propuesto por OFDM utilizan OFDMA como método de acceso para la comunicación en el downlink. La Fig. 21 muestra el esquema de transmisión OFDMA utilizado por LTE y LTE-Advanced en base a un diagrama de bloques [5].

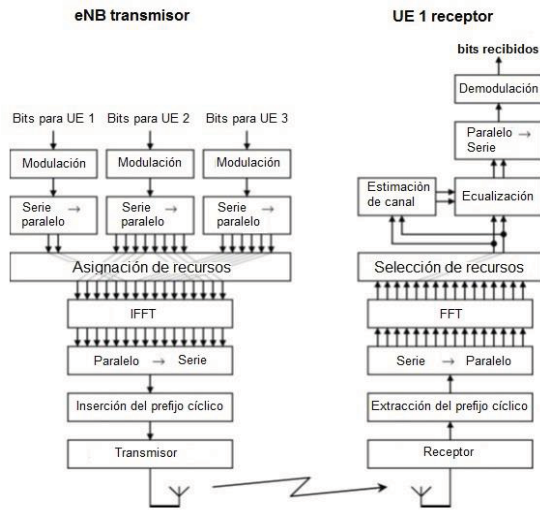


Fig. 21. Esquema de transmisión OFDMA [5]

En el uplink, la técnica de acceso múltiple difiere ya que LTE utiliza SC-FDMA, en tanto que LTE-Advanced gracias a la agregación de portadoras utiliza clustered SC-FDMA. La Fig. 22 muestra un diagrama de bloques en donde se puede apreciar el funcionamiento de SC-FDMA [5].

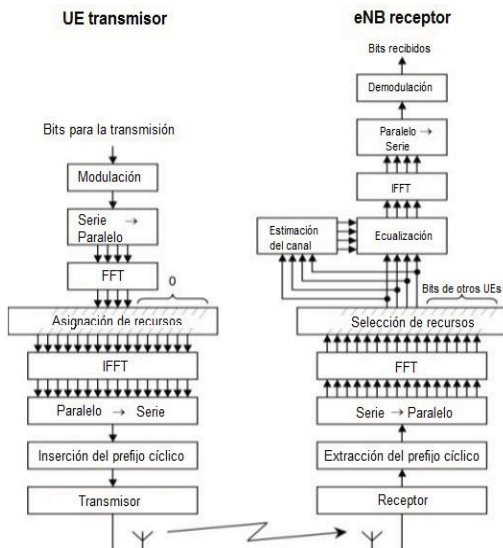


Fig. 22 Esquema de transmisión SC-FDMA [5]

4.5 Comparación de los esquemas de modulación [5]

Los esquemas de modulación empleados por LTE y LTE-Advanced son: QPSK, 16QAM y 64QAM. La Tabla 4

relaciona aspectos importantes de estos esquemas de modulación, evidenciándose conforme aumenta el número de estados de modulación la mejora en eficiencia espectral, así como el requerimiento para mantener el mismo BER de una mayor SNR [5].

Tabla 4. Comparación de los esquemas de modulación

Modulación	QPSK	16QAM	64QAM
Número de Vectores	4	16	64
Número de Amplitudes	1	3	9
Número de Fases	4	12	52
Número de Bits por símbolo	2	4	6
Baudios	$V_{tx}/2$	$V_{tx}/4$	$V_{tx}/6$
Eficiencia Espectral teórica [bps/Hz]	2	4	6
BER para SNR en dB	10^{-7} a 12dB	10^{-7} a 16dB	10^{-7} a 20dB

La Tabla 5 y la Tabla 6 presentan los esquemas de modulación utilizados por los diferentes canales físicos tanto para downlink como para uplink de las dos tecnologías en cuestión, LTE y LTE-Advanced.

Tabla 5. Esquemas de modulación utilizados en los canales físicos del downlink

Canales Físicos en el Downlink	Esquema de modulación
PBCH	QPSK
PDCCH	QPSK
PDSCH	QPSK, 16QAM, 64QAM
PMCH	QPSK, 16QAM, 64QAM
PCFICH	QPSK
PHICH	BPSK

Tabla 6. Esquemas de modulación utilizados en los canales físicos del uplink

Canales Físicos en el Uplink	Esquema de modulación
PUCCH	BPSK, QPSK
PUSCH	QPSK, 16QAM, 64QAM

4.6 Comparación de la velocidad de transmisión y la eficiencia espectral [5] [20]

La velocidad de transmisión pico alcanzada en LTE es de aproximadamente 300 Mbps en el downlink y de 75 Mbps en el uplink, para lo cual se utilizan técnicas MIMO 4x4 y un ancho de banda de 20MHz.

Por su parte la velocidad de transmisión pico alcanzada en LTE Advanced con dos componentes de portadora de 20 MHz cada una, es decir, un ancho de banda de 40 MHz en total y técnicas de múltiples antenas, MIMO 8x4 (8 layers en el downlink y 4 layers en el uplink), es de 1200 Mbps y 600 Mbps en el donwlink y uplink respectivamente. Con respecto a la eficiencia espectral pico, LTE tiene 15 bps/Hz en el downlink y 3,75 bps/Hz en el uplink, por su parte LTE-

Advanced tiene 30 bps/Hz y 15 bps/Hz en *downlink* y *uplink* respectivamente.

Las velocidades de transmisión promedio de *LTE* y *LTE-Advanced*, así como la eficiencia espectral promedio y en el borde de una celda, son más importantes que los valores teóricos o picos, porque ellas indican una medida real del rendimiento actual de la red y porque pueden ser usadas para estimar la capacidad requerida de los enlaces del sistema. Estas velocidades son estimadas en base a simulaciones y para ilustrar aquello, en las Figs. 23, 24 y 25 se muestran los resultados que han sido obtenidos por el *3GPP* durante el diseño del sistema [5].

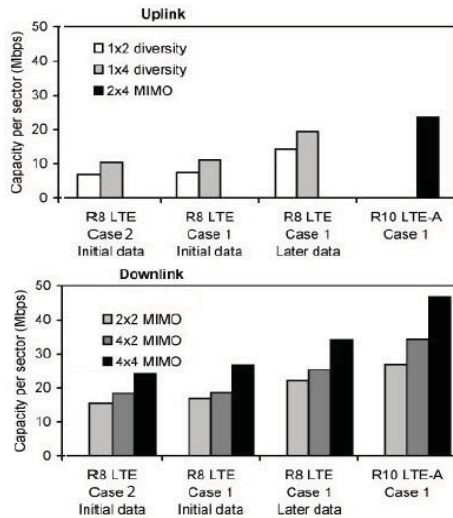


Fig. 23. Capacidad por sector en una macrocelda con un ancho de banda de 10 MHz [5]

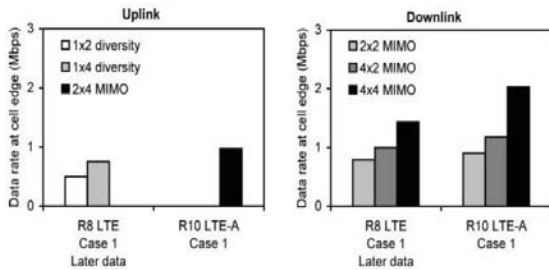


Fig. 24. Velocidad de transmisión promedio en el borde de una celda por usuario asumiendo 10 usuarios por sector en un ancho de banda de 10 MHz

4.7 Comparación de Técnicas de múltiples antenas^[14]

Tanto *LTE* como *LTE-Advanced* basan su principio de funcionamiento en técnicas de multiplexación espacial, técnicas de diversidad de transmisión/recepción y técnicas de conformación de haces de radiación. El modo de acceso para el canal radio que usan ambas tecnologías se denomina MIMO y existen distintas configuraciones y modos de operación tanto para el *uplink* como para el *downlink* de cada una. Dependiendo de la tecnología en cuestión se puede hablar de *SU-MIMO* y *MU-MIMO* para los diferentes enlaces; y, algo en común a tomar en cuenta es que para

ambas tecnologías el número máximo de codewords usado es dos [14].

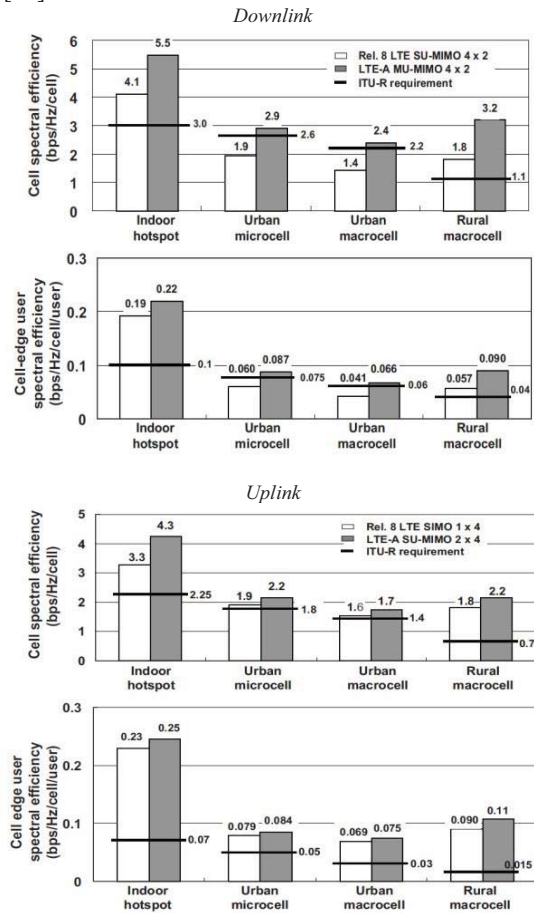


Fig. 25. Eficiencia espectral promedio y en el borde de la celda para el *uplink* y el *downlink* en varios escenarios de acuerdo a la *ITU-R* [5]

Con respecto a *LTE*, el *downlink* puede soportar un número máximo de 4 *layers* con uno o dos *codewords* y hasta un total de cuatro puertos de antenas, es decir, en *SU-MIMO* la configuración ideal sería 4x4, tanto para el *eNB* como para el *UE*, pero esto es complicado desde el punto de vista de implementación en el equipo móvil ya que las características de éste serían modificadas notablemente, sin embargo no se descarta la posibilidad de ser implementado. También es posible optar por *MU-MIMO* 4x4, en este tipo de arreglo existen dos opciones en donde lo común es que cuatro antenas estén localizadas en el *eNB*. Mientras que en la primera opción, de las cuatro antenas, dos se encuentran en un *UE* y dos en otro *UE* diferente, en la segunda, cada *UE* dispone de una única antena. En el *uplink* del *Release 8* de *LTE*, *SU-MIMO* no está especificado. Con respecto a *MU-MIMO* el *eNB* puede soportar diversidad de recepción con dos o cuatro antenas mientras que los *UEs* tienen una sola antena o máximo dos, presentándose las siguientes combinaciones: *MU-MIMO* 4x4 y *MU-MIMO* 4x2 [14]. *LTE-Advanced* está basado en esquemas *MIMO* 8x8 en el *downlink* y *MIMO* 4x4 en el *uplink*. A diferencia de *LTE*, en *LTE-Advanced* se introduce por primera vez *SU-MIMO* con un número máximo de 4 antenas en el *UE*.

En LTE existen 7 modos de transmisión basados en técnicas de múltiples antenas para el *downlink*; en *LTE-Advanced* se incrementan a nueve, siendo el fundamental el *TM9* para *MIMO 8x8*. Con respecto al *uplink*, *LTE* trabaja con el *TM1* en tanto que *LTE-Advanced* utiliza el modo *TM2* para operar con *MIMO 4x4*. Los distintos modos de transmisión difieren en el número de *layers*, número de puertos de antena, tipo de señales de referencia y el tipo de precodificación empleado.

4.8 Comparación de categorías de equipo de usuario [20]

En la Fig. 26 se puede apreciar las categorías de equipo de usuario tanto para *LTE* como para *LTE-Advanced*. *LTE* define 5 categorías de terminales 1 – 5, en tanto que *LTE-Advanced* añade 3 categorías de terminales más (6, 7 y 8).

Las categorías de equipo de usuario de *LTE* son compatibles con las de *LTE-Advanced*, es decir que la comunicación es posible entre usuarios *LTE* y *LTE-Advanced*. Por otro lado, los equipos terminales de categoría 6, 7 y 8 también pueden ser usados como equipos de categorías 1 – 5, esto es factible para mantener compatibilidad con redes que aún no soportan la versión 10.

4.9 Comparación de servicios y aplicaciones

Las redes móviles celulares *LTE* y *LTE-Advanced* se encargan de prestar servicios móviles interactivos a sus usuarios y es por ello que estas redes satisfacen necesidades productivas, comerciales, de entretenimiento y comunicación. Al realizar una comparación entre las dos tecnologías celulares se puede comprobar que ambas pueden brindar los mismos servicios usando las mismas aplicaciones, entonces, la diferencia está en que tan rápido lo hacen. Con estos argumentos *LTE-Advanced* lleva ventaja ya que sus velocidades de transmisión son muy superiores a las ofrecidas por *LTE*.

4.10 Comparación de redes desplegadas y lanzamiento comercial

Según estudios realizados por la *GSA (The Global mobile Suppliers Association)* existen 360 operadores en 105 países que están invirtiendo en *LTE*, de éstos 308 están comprometidos en utilizar la tecnología y 52 se encuentran en versiones de prueba en 11 países.

Concretamente se encuentran desplegadas en el mundo 113 redes comerciales en 51 países y se prevé que a finales del 2013 existan 209 en 75 países. Por ahora ya se ha hecho el lanzamiento de 11 redes *LTE* en operación *TDD* y se estima que el 36% de las redes han sido implementadas en la banda de 1800 MHz.

Con respecto a *LTE-Advanced*, esta tecnología aún se encuentra en etapa de prueba. Se espera que el sistema y los equipos de usuario estén disponibles comercialmente a finales del año 2013 o a inicios del año 2014.

LTE-Release 8 User Equipment Categories



Category		1	2	3	4	5
Peak rate Mbps	DL	10	50	100	150	300
	UL	5	25	50	50	75
Capability for physical functionalities						
RF bandwidth	20MHz					
Modulation	DL	QPSK, 16QAM, 64QAM				
	UL	QPSK, 16QAM				QPSK, 16QAM, 64QAM
Multi-antenna						
2 Rx diversity	Assumed in performance requirements.					
2x2 MIMO	Not supported	Mandatory				
4x4 MIMO	Not supported				Mandatory	

(a)

Categorías de UE soportados en el Release 10

	UE category		
	6	7	8
Approximate supported downlink data rate (Mbps)	300	300	3000
Approximate supported uplink data rate (Mbps)	50	100	1500
Number of downlink MIMO layers supported	2 or 4	2 or 4	8
Number of uplink MIMO layers supported	1, 2 or 4	1, 2 or 4	4
Support for 64QAM modulation in downlink	✓	✓	✓
Support for 64QAM modulation in uplink	✗	✗	✓

(b)

Fig. 26 Categorías de equipo de usuario (a) *LTE* y (b) *LTE-Advanced* [20]

5. CONCLUSIONES

- *LTE-Advanced* no es una nueva tecnología, simplemente añade características significativas a *LTE* que permitirán alcanzar los parámetros establecidos por el *IMT-Advanced* para tecnologías 4G.
- Las bandas de frecuencia asignadas a *LTE* también pueden ser utilizadas por *LTE-Advanced*, pero esta última adiciona 5 bandas. Esto implica que *LTE-Advanced* está diseñado para mantener compatibilidad hacia atrás con *releases* previos; en este caso, *Release 8*.
- La arquitectura general de *LTE* y *LTE-Advanced* es la misma para ambas tecnologías. La integran tres redes: la red de acceso *E-UTRAN*, la red de *core EPC* y la red de servicios externos. La diferencia fundamental se encuentra en *E-UTRAN* ya que *LTE-Advanced* incorpora una arquitectura adicional basada en *relay nodes*.
- El plano de usuario y el plano de control tanto de *LTE* como de *LTE-Advanced* es idéntico, ya que ambos sistemas utilizan la misma torre de protocolos en las entidades de red correspondientes y las distintas interfaces que las unen.
- Gracias a la incorporación de *SU-MIMO* en el enlace ascendente de *LTE-Advanced*, la mejora de *SU-MIMO* y *MU-MIMO* para el enlace descendente

y el uso de la técnica de acceso *clustered SC-FDMA*, es posible alcanzar las velocidades de transmisión propuestas por el *IMT-Advanced* para tecnologías 4G.

- La técnica de agregación de portadora, utilizada por *LTE-Advanced*, permite trabajar con un ancho de banda de hasta 100 MHz con el uso de 5 componentes de portadora de 20 MHz cada una, utilizando espectro contiguo, no contiguo o la suma de espectro de diferentes bandas de frecuencia.
- La transmisión y recepción basada en *coordinated multipoint* permite la coordinación dinámica entre las diferentes estaciones base para incrementar el rendimiento, mejorar la calidad de la señal recibida por parte del *UE* en los bordes de una celda, reducir la interferencia co-canal producida por las celdas adyacentes e incrementar la cobertura.
- Los *relay nodes* utilizados en *LTE-Advanced* permiten complementar a las macro-celdas incrementando la cobertura y la capacidad de la red.
- Los esquemas de modulación utilizados tanto por *LTE* como por *LTE-Advanced* son *QPSK*, *16QAM* y *64QAM*. La utilización de cualquiera de ellos dependerá del nivel de *SNR* que se tenga, a mayor *SNR* se podrán utilizar esquemas de modulación de mayor orden y viceversa.
- Para incrementar la velocidad de transmisión se asignan más bits por símbolo, esto quiere decir que se utilizan esquemas de modulación de mayor orden, lo que para una *SNR* dada implica una mayor probabilidad de error.
- Los esquemas de acceso usados por *LTE* y *LTE-Advanced* son *OFDMA* para el *downlink* y *SC-FDMA* para el *uplink*, ambas técnicas de acceso utilizan están basadas en *OFDM*. Adicionalmente, en *LTE-Advanced* se usa el esquema de acceso *clustered DFT-S-OFDM* que es una mejora de *SC-FDMA* y emplea múltiples portadoras.
- La velocidad de transmisión máxima en *LTE* es de 300 Mbps en el *downlink* y 75 Mbps en el *uplink*. En tanto que estas velocidades son superadas en *LTE-Advanced* alcanzándose una velocidad de transmisión máxima para el *downlink* de 3000 Mbps y de 1500 Mbps en el *uplink*.
- Los servicios y aplicaciones que brindan y soportan tanto *LTE* como *LTE-Advanced* se basan en servicios y aplicaciones móviles interactivas de gran ancho de banda y elevadas velocidades de transmisión.
- *LTE* es la nueva tendencia en comunicaciones móviles

alrededor del mundo por la que la mayoría de operadores de telefonía móvil celular están optando.

REFERENCIAS

- [1] A. Taha, A. Najah y H. Hassanein, *LTE, LTE-ADVANCED and WiMAX. Towards IMT-Advanced Networks*, 1era ed., Ed. United Kingdom: Jhon Wiley & Sons Ltd, 2012.
- [2] Agilent Technologies, "Introducing LTE-Advanced", Application Note.
- [3] A. Ramos, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez, O. Sallent, *Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*, Ed. Fundación Vodafone, 2012.
- [4] B. Clerckx, A. Lozano, S. Sesia, C. Rensburg y C. Papadias, "3GPP LTE and LTE-Advanced", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2009.
- [5] C. Cox, *An introduction to LTE. LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications*, 1era ed., Ed. United Kingdom: Jhon Wiley & Sons Ltd, 2012.
- [6] E. Dahlman, S. Parkvall y J. Sköld, *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*, Ed. ELSEVIER, 2011.
- [7] F. KHAN, *LTE for 4G Mobile Broadband Air Interface Technologies and Performance*, Ed. CAMBRIDGE, 2009.
- [8] F. Montealegre, M. Salas, P. Acuña, J. Salazar, *Propuesta de requerimientos técnicos para la implementación de redes móviles con tecnología LTE*, Costa Rica, 2009.
- [9] *GSA update LTE Developments Worldwide*. GSA (Global mobile Suppliers Association) www.gsacom.com
- [10] H. Holma y A. Toskala, *LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*, 1era ed., Ed. United Kingdom: Jhon Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [11] J. Sánchez, "Analysis of SC-FDMA and OFDMA Performance over Fading Channels", Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad de Málaga, Málaga, España, 2011.
- [12] J. Wannstrom, "LTE-Advanced", 2012: <http://www.3gpp.org/lte-advanced> http://www.3gpp.org/IMG/pdf/lte_advanced_v2.pdf
- [13] K. Soto, *LTE Evolución a largo plazo para el acceso inalámbrico de banda ancha móvil*, Chile, 2009.
- [14] L. Korowajczuk, *LTE, WiMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis*, CelPlan Technologies, Inc., Reston, VA, USA, 2da ed., Ed. United Kingdom: Jhon Wiley & Sons Ltd, 2011.
- [15] L. Liu, R.Chen, S.Geirhofer, K. Sayana, Z. Shi y Y. Zhou, "Downlink MIMO in LTE-Advanced: SU-MIMO vs. MU-MIMO", *IEEE Communications Magazine*, Paper R-140-147.
- [16] M. Ergen, *Mobile Broadband Including WiMAX and LTE*, Ed. Springer, 2009.
- [17] M. Rummey, *LTE and the Evolution to 4G Wireless*, Ed. United Kingdom: Jhon Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [18] R. Agustí, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez y O. Sallent, *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*, Ed. España: Fundación Vodafone España, 2010.
- [19] Rohde&Schwarz, "LTE-Advanced Technology Introduction", White paper.
- [20] S. Sesia, I. Toufik y M. Baker, *LTE – The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice*, 2da ed., Ed. United Kingdom: Jhon Wiley & Sons Ltd, 2011.
- [21] 3GPP-LTE – Evolved UTRA – Radio Interface Concepts <http://ecce.colorado.edu/~ccen4242/LTE/radio.htm>
- [22] 4G Americas. Global 3G and 4G Deployment Status HSPA / HSPA+ / LTE /14 Dec 2012. www.4gamericas.org