

ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE EL DESEMPEÑO DE LOS SISTEMAS LTE - ADVANCED

Por: Ing. Giselle González López; Ing. Danaisy Prado Alvarez, MOVITEL
y Dr.C. Francisco Marante Rizo, ISPJAE.

giselle.glez@electrica.cujae.edu.cu, danaisy@movitel.co.cu, marante@electrica.cujae.edu.cu

RESUMEN

Hoy en día el desarrollo vertiginoso de las comunicaciones móviles, promovido por la creciente demanda de tráfico, impulsa el despliegue de redes con mejores *throughputs* y menores latencias, como lo son las redes LTE-A ya desplegadas y las redes de 5G aún por desarrollar.

En esta investigación se realizó un estudio de la arquitectura y las tecnologías que conforman el sistema LTE-A, lo cual ha permitido apreciar las potencialidades del mismo. Para ello fueron conducidas una serie de simulaciones a nivel de sistema en donde se estudió el desempeño de una red LTE-A en diferentes escenarios. De esta manera, ha sido posible identificar fortalezas de este tipo de sistemas, así como algunas tendencias previsibles en los futuros sistemas de 5G.

Palabras clave: *Throughput*, MIMO, Nodo Base evolucionado (eNB), Equipo de Usuario

ABSTRACT

Today the vertiginous development of mobile communications, promoted by the growing traffic demand, fosters networks performance with better *throughputs* and less latency, like the case of LTE-A networks - Long Term Evolution Advanced-, already deployed and the future 5G networks.

In this research, the author made a study of the system LTE-A architecture and technologies, which have allowed the appreciation of its powers. With this purpose, a series of simulations were carried out at a system level where the author studied the performance of an LTE-A network in different scenarios. By doing this, it has been possible to identify a series of strengths related to this kind of systems, as well as some predictable trends in the future 5G systems.

Key words: *Throughput*, MIMO, Developed Core Node, Premise, Equipment

Introducción

Los sistemas de 4ta Generación (LTE y LTE-A) constituyen una de las más novedosas tecnologías móviles desplegadas hasta el día de hoy. A pesar de que se han estudiado ya por varios años y son bien elevadas las prestaciones alcanzadas a nivel de laboratorio, en muy pocos lugares se ha logrado un total despliegue de todas sus funcionalidades y, por tanto, no se encuentran operando en la totalidad de su capacidad. Resulta entonces sumamente importante la realización de un estudio de la arquitectura y las tecnologías que componen este tipo de sistemas, así como del nivel de despliegue actual de los mismos, para determinar hasta qué punto están siendo explotadas hoy sus potencialidades y, en función de ello, cuáles son las perspectivas que se van trazando para el futuro.

La industria de las comunicaciones inalámbricas celulares ha experimentado un vertiginoso crecimiento en las últimas décadas buscando complacer a usuarios cada vez más exigentes. Para una mejor comprensión de la evolución de los sistemas de telefonía móvil resulta provechoso dividir su estudio en diferentes etapas o “generaciones”. Si bien este último término no es reconocido por los organismos de estandarización, es ampliamente utilizado.

Primera Generación (1G)

La primera generación estaba basada en sistemas analógicos, donde el tráfico principal era la voz. Los estándares inalámbricos 1G utilizaban TDMA —*Time Division Multiple Access*— y FDMA —*Frequency Division Multiple Access*—. La tecnología predominante de esta generación es AMPS:—*Advanced Mobile Phone System*—.

Segunda Generación (2G)

La segunda generación (2G) con sistemas digitales prometía capacidad más elevada y mejor calidad de voz que sus contrapartes analógicas. En esta generación se empiezan a soportar servicios auxiliares como fax y mensajes de texto. Los dos sistemas celulares de segunda generación ampliamente desplegados son GSM —*Global System for Mobile Communications*—, y CDMA —*Code Division Multiple Access*—. La evolución lógica de GSM hacia la 3G pasa primero por GPRS —*General Packet Radio System*—, una tecnología de conmutación de paquetes (IP) incorporada a las redes GSM diseñada para la transmisión frecuente de pequeños volúmenes de datos, como es el caso de la navegación en Internet; y luego por EDGE —*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*— estándar aprobado por la

UIT como 3G, desplegable en múltiples bandas del espectro y que complementa a UMTS (WCDMA, Wideband CDMA), [1] – [2]. (Figura 1).

Tercera Generación (3G)

Las principales características de la tecnología 3G incluyen acceso web inalámbrico, servicios multimedia, email y video conferencia. [3]

Los desarrolladores de ambas tecnologías, GSM y CDMA, formaron sus propios proyectos individuales para el desarrollo de la 3ra Generación Móvil, el 3GPP—*Third Generation Partnership Project*— y el 3GPP2—*Third Generation Partnership Project 2*— respectivamente. El estándar 3G desarrollado por el 3GPP es llamado WCDMA—*Wideband CDMA*—, mientras que el desarrollado por el 3GPP2 se conoce como cdma2000-1x o simplemente 3G-1x. El sistema más allá de 3G del 3GPP es eUTRA—*Evolved UMTS Terrestrial Radio Acces*—, más conocido como LTE—*Long Term Evolution*—, mientras que el del 3GPP2 se llama UMB—*Ultra Mobile Broadband*—.

Cuarta Generación (4G)

4G son las siglas de la cuarta generación de los sistemas de comunicaciones móviles y están basados totalmente en el protocolo de transmisión IP—*Internet Protocol*—, siendo considerados un sistema de sistemas y una red de redes. 4G se utiliza en un sentido amplio para definir varios tipos de acceso móvil de banda ancha, no solo sistemas de telefonía celular, tanto en interiores (*indoor*) como en exteriores (*outdoor*), con alta QoS—*Quality of Service*—, y óptima seguridad, permitiendo la oferta de servicios de cualquier clase en cualquier momento y lugar, con el mínimo costo posible [1] - [3]. LTE-Advanced es el sistema definido por el 3GPP como evolución de LTE, que cumple los requisitos del IMT-Advanced—*International Mobile Telecommunications Advanced*—, considerándose por ello la verdadera tecnología 4G, puesto que LTE es en verdad perteneciente a una generación 3.9. LTE-Advanced ha sido definido en el Release 10 del 3GPP y está destinado a satisfacer los diversos requisitos de las aplicaciones avanzadas que sean comunes en el mercado inalámbrico en el futuro previsible. [2]

Redes LTE

Las redes LTE son hoy la tecnología móvil de última generación más ampliamente difundida, aunque ya han sido desplegados sistemas LTE-Advanced en algunos países y se realizan estudios para el despliegue de una 5G. LTE provee un *backbone* todo IP con una reducción en el costo por bit, mejor provisión de servicio, flexibilidad en el uso de las existentes y nuevas bandas de frecuencia, una arquitectura de la red simplificada con interfaces abiertas y bajo consumo de potencia. [4]

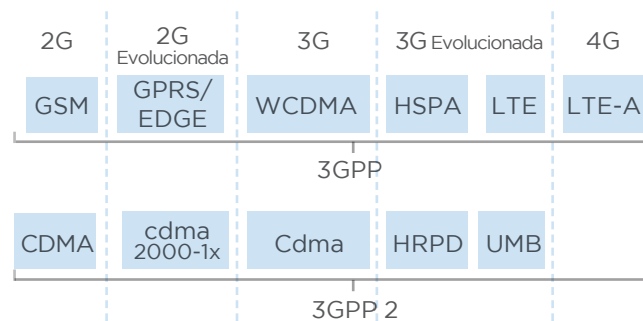


Figura 1. Evolución de los Sistemas Móviles. Fuente: Elaboración propia.

Según los reportes más recientes del GSA—*Global mobile Suppliers Association*—, 393 operadoras han lanzado de forma comercial redes y servicios LTE; de ellos, 116 están desplegando o probando tecnologías LTE-Advanced, que ya ha sido lanzada de forma comercial en 39 países por 64 operadores. Entre las estadísticas que revelan las principales tendencias en el mercado LTE se destaca que hoy en día el modo FDD—*Frequency Division Duplex*—, es el dominante, con 312 operadores desplegando este modo solamente, 31 desplegando solo TDD—*Time Division Duplex*—, y 17 desplegando ambos modos. El espectro más usado es el de los 1800 MHz, con 15 redes LTE 1800 en 76 países; el segundo espectro más utilizado es el de 2.6 GHz, en más de 25% de las redes. Hoy hay 80 operadores invirtiendo en despliegue, estudio o pruebas de VoLTE—*Voice over LTE*— y el roaming en LTE es una realidad de mercado que se hace cada vez más corriente [5], [6]. LTE-Advanced emplea la misma arquitectura que ya había sido definida para LTE, solo que incorpora una serie de nuevas tecnologías. Es por tanto preciso analizar en primer lugar aquellos elementos que componen al sistema LTE y luego los nuevos introducidos por LTE-Advanced.

Arquitectura de LTE

Los sistemas LTE presentan una arquitectura genérica ya antes adoptada por las distintas familias de sistemas celulares 2G y 3G. Esta representa un modelo de la red a muy alto nivel donde se identifican tres componentes básicos: Equipo de Usuario (EU), red de acceso y la red troncal. La separación entre la red de acceso y red troncal confiere un importante grado de flexibilidad al sistema de cara a soportar un proceso evolutivo en el que se puedan ir mejorando, agregando o sustituyendo las diferentes partes de la red con la mínima afectación posible al resto de la misma. [7] (Figura 2).

Los diferentes componentes han sido diseñados para soportar todo tipo de servicios de telecomunicación mediante mecanismos de conmutación de paquetes, por lo que no resulta necesario disponer de un componente adicional para la provisión de servicios en modo circuito.

Una red de acceso E-UTRAN está compuesta por eNB—*evolved Node B*—, que proporcionan la conectividad entre

los (UE) y la red troncal EPC—*Evolved Packet Core*—. El eNB integra todas las funciones de la red de acceso. Por ello, en él terminan todos los protocolos específicos de la interfaz radio. Un eNB puede gestionar una o varias celdas. Un caso típico es el uso de sectorización de forma que el eNB ubicado en un emplazamiento soporta tantas celdas como sectores. El diseño de la red troncal EPC ha sido concebido principalmente para proporcionar un servicio de conectividad IP (evolución del servicio GPRS) mediante una arquitectura de red optimizada que permite explotar las nuevas capacidades que ofrece la red de acceso E-UTRAN. Asimismo, otro factor clave considerado en el diseño de la arquitectura de la red troncal ha sido la posibilidad de acceder a sus servicios a través de otras redes de acceso tanto 3GPP (UTRAN y GERAN) como fuera del ámbito del 3GPP (cdma2000, WiMAX, 802.11). [7]

Tecnologías de LTE

Una red LTE está constituida por toda una gama de tecnologías que al operar en conjunto definen las capacidades del sistema. El propósito de esta investigación no ha sido abarcarlas todas, sino más bien mencionar aquellas que diferencian a LTE de otras tecnologías de comunicaciones móviles.

Técnicas de Acceso al Medio

Las transmisiones tanto de enlace descendente (de la Estación Base al Equipo de Usuario) como ascendente (del Equipo de Usuario a la Estación Base) en LTE están basadas en tecnologías de acceso múltiple. Una tecnología llamada OFDMA—*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*—, es empleada en las transmisiones del enlace descendente, mientras que para el ascendente se emplea SC-FDMA—*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*—. La técnica SC-FDMA es superior a OFDMA; sin embargo, el empleo de la misma está restringido al enlace ascendente, pues conlleva un incremento del procesamiento en el dominio del tiempo

que representaría una carga considerable a las estaciones base en caso de emplearse en el enlace descendente. [4]

FDD y TDD

El Duplexaje por División en la Frecuencia y Duplexaje por División en el Tiempo definidos en LTE permiten el uso de bandas de frecuencias pareadas y no pareadas.

FDD es generalmente más apropiado para aplicaciones como llamadas de voz, que tienen un tráfico simétrico. Esto es así porque el tráfico en ambas direcciones es siempre constante y emplear TDD sería desperdiciar ancho de banda en constante cambio de uno a otro sentido. TDD es mejor en las aplicaciones que tienen tráfico asimétrico, por ejemplo, la navegación por Internet. En la navegación web es típico que la descarga sea mucho mayor que la subida, pero en algunos casos, como es, por ejemplo, cuando se va a subir un video a YouTube, ocurre lo contrario. TDD puede asignar más tiempo para la parte que más requiera ancho de banda, con lo que se da el equilibrio a la carga. [8]

Modo de Transmisión

Las tecnologías de antenas desempeñan un papel sumamente importante en cualquier transmisión de radio. Las técnicas de múltiples antenas pretenden incrementar la robustez de la señal y aumentar la capacidad del sistema así como la tasa de datos del usuario, aprovechando para ello la diversidad espacial del canal de radio. Esto se realiza a través del empleo de diversas antenas tanto en transmisión como en recepción distribuidas espacialmente, de ahí el término MIMO—*Multiple Input Multiple Output*—. Cuando dos señales son combinadas correctamente en el receptor, se puede conseguir a la salida de un combinador apropiado una nueva señal con un mayor nivel de potencia instantánea, y de este modo, recuperar finalmente la señal de información modulada en mejores condiciones de relación potencia de señal a potencia de ruido.

En los sistemas LTE se distinguen modos de transmisión basados en el principio anterior que han sido definidos por el 3GPP, cada uno de ellos puede emplear una técnica de transmisión distinta. Los modos 3 y 4 son los modos MIMO de usuario único empleados en LTE, mientras que el modo 5 es utilizado en LTE-A como MIMO multiusuario. [9] (Tabla 1)

Modulación adaptativa

LTE emplea modulación adaptativa para proveer altas velocidades y, a la vez, protegerse del ruido y las interferencias. Donde hay un buen nivel de

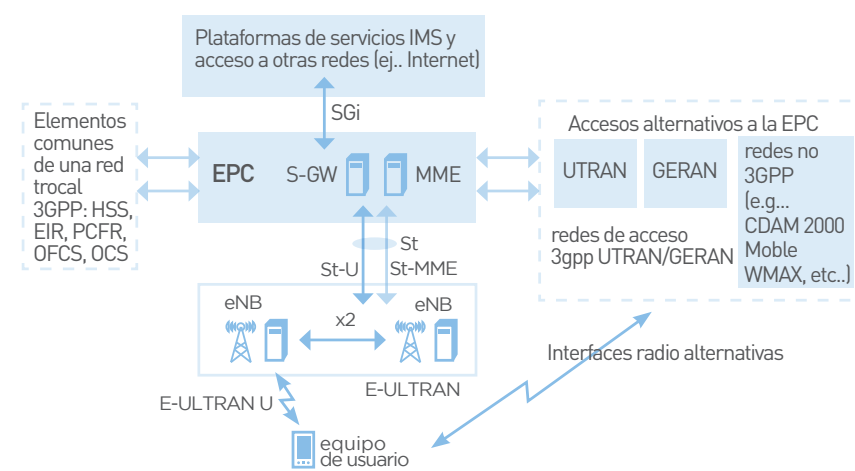


Figura 2. Arquitectura del Sistema LTE. Fuente: [7]

Modo	Técnica de Transmisión
Modo 1	Single-antenna Port ; Puerto 0
Modo 2	Transmission Diversity (TxD)
Modo 3	Open Loop Spatial Multiplexing (OL-SM)
Modo 4	Closed Loop Spatial Multiplexing (CL-SM)
Modo 5	MIMO multiusuario (MU-MIMO, Multiple User – Multiple Input Multiple Output)
Modo 6	Closed Loop Rango 1 con precodificación
Modo 7	Single-antenna port; Puerto 5

Tabla 1. Modos de Transmisión de LTE. Fuente: Elaboración propia.

señal se emplea una modulación poco robusta, pero con una tasa elevada de bits por símbolo; mientras que se apuesta por una modulación robusta cuando es baja la SNR. Para ello se emplean los CQI —*Channel Quality Identifiers*— y que toman valores de 1 a 15, siendo 1 malas condiciones del canal con modulación QPSK y 15 buenas condiciones con modulación 64QAM. [10]

Tecnologías de LTE-A

Para cumplir con las prestaciones definidas por el IMT-Advanced para LTE-Advanced han sido definidas una serie de tecnologías, pero solo mencionaremos los cinco elementos claves que distinguen al estándar LTE-Advanced de sus predecesores.

Las técnicas que se mencionarán a continuación son algunas de las que definen este estándar; sin embargo, hoy en día, la mayoría de los proveedores de servicio solo han implementado la técnica de agregación de portadoras. [11]

Técnicas definitorias del estándar agregación de portadoras

La agregación de portadoras es una técnica que emplea la forma más directa para aumentar la capacidad: aumentar el ancho de banda. Cada una de las portadoras agregadas representa una portadora componente y cada una de las portadoras componente puede tener un ancho de banda de 1.4, 3, 5, 10, 15 o 20MHz. Pueden agregarse hasta cinco portadoras componente, por tanto, el ancho de banda máximo es 100MHz. El número de portadoras del enlace ascendente nunca supera al del descendente. [11] (Figura 3).

MIMO mejorado

En LTE-Advanced un solo usuario MIMO en el enlace descendente puede usar hasta 8 niveles en transmisión y 8 en recepción (configuración MIMO 8x8), y hasta 4 en el enlace ascendente (MIMO 4x4). MIMO puede ser usado cuando la relación señal a ruido (SNR) es alta, en caso

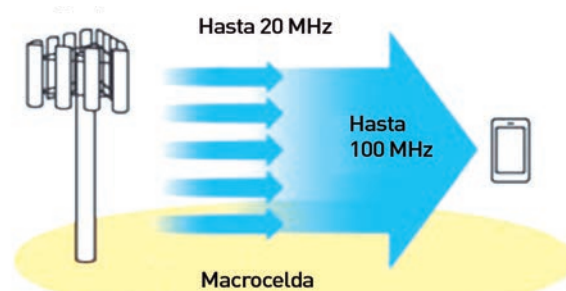


Figura 3. Agregación de Portadoras. Fuente: Elaboración propia.

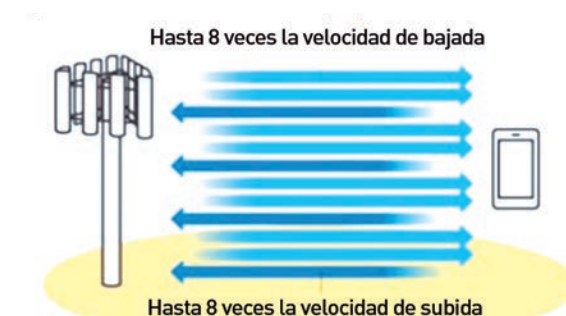


Figura 4. MIMO mejorado. Fuente: Elaboración propia.

contrario es mejor utilizar otras técnicas de múltiples antenas que aumenten la SNR, pues ello implicaría aumentar la potencia de transmisión. [11] (Figura 4).

Repetidores inteligentes

Un repetidor inteligente al recibir una señal proveniente de la Estación Base, la decodifica y después transmite solamente aquella parte de la señal destinada a los usuarios cercanos al repetidor. Este esquema permite reducir interferencias y que haya más usuarios enlazados a cada repetidor. Este puede también comunicarse con la Estación Base y con dispositivos que usen el mismo espectro y protocolos que el eNB. Esto tiene la ventaja de permitir que Equipos de Usuario LTE se conecten al repetidor como si se tratara de una torre tradicional. [11] (Figura 5).

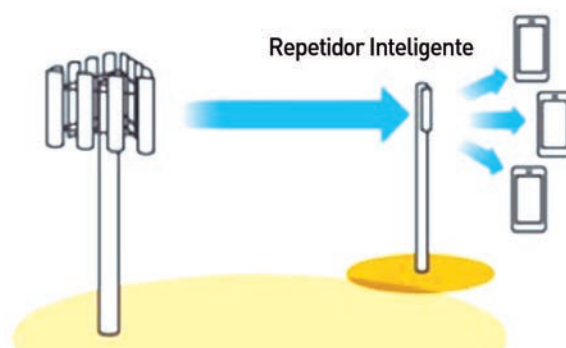


Figura 5. Repetidores inteligentes. Fuente: Elaboración propia.

Coordinación de interferencia entre Celdas Mejorada (CIC)

Esta herramienta está prevista para disminuir la congestión de la red. Es utilizada en redes heterogéneas en donde Estaciones Base de baja potencia se encuentran sobre las torres tradicionales de la red macro. Utilizando este protocolo, una Estación Base puede reducir su potencia de transmisión en ciertas frecuencias y en ciertos momentos de tiempo cuando una estación vecina esté utilizando estos recursos para comunicarse con un equipo móvil cercano al borde del área de cobertura. Sin embargo, debido a que mensajes como los de planificación y solicitudes de retransmisión, entre otros, se espera que lleguen en frecuencias y tiempos predecibles, la Estación Base no puede sencillamente prestar estos recursos a una estación vecina cuando esta los necesite.

Esto se soluciona haciendo que las señales de control sean lo suficientemente robustas como para resistir niveles relativamente altos de interferencia. [11] (Figura 6).

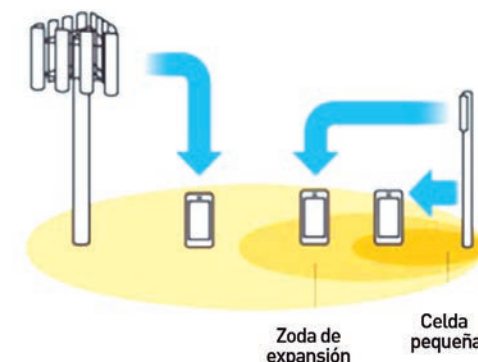


Figura 6. Coordinación de Interferencia entre Celdas Mejorada. Fuente: Elaboración propia.

Coordinación Multipunto (CoMP)

LTE-Advanced mejora la eficiencia espectral, utilizando la transmisión y recepción multipunto coordinada. El concepto CoMP coordina y combina las señales de múltiples estaciones base, las cuales forman una única célula, permitiendo al usuario móvil conectarse con todas ellas a la vez.

Esto permite, especialmente, aumentar o mejorar la conectividad que experimenta un usuario en o cerca del borde de la celda, pues este podrá recibir una transmisión de múltiples estaciones base mientras transmite a una célula pequeña cercana. [11] (Figura 7).

Simulador para un sistema LTE

Se ha empleado el simulador para LTE-Advanced del Instituto de Ingeniería en Comunicaciones y Radiofrecuencia de la Universidad de Viena LTE-A, System Level Simulator versión 1.8r1375. [12]

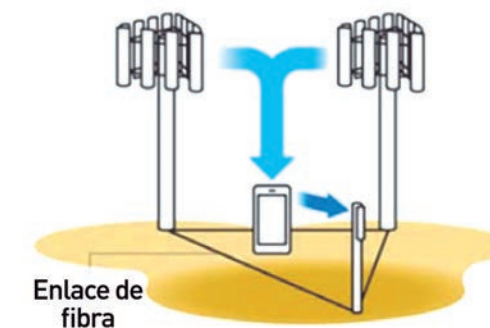


Figura 7. Funcionalidad de CoMP. Fuente: Elaboración propia.

Este simulador está desarrollado sobre MatLab, ofreciendo la facilidad de un código abierto, lo que brinda gran flexibilidad para configurar disímiles entornos de simulación. También permite adaptar el simulador a las necesidades de quien lo utiliza, pues al estar disponible el código fuente es posible generar un script propio. Tanto las facilidades que ofrece este tipo de simuladores como el amplio uso que ya se ha hecho del mismo en una gran cantidad de centros de estudio a nivel mundial, lo han convertido en una selección apropiada para el análisis del sistema LTE-Advanced en la presente investigación.

La funcionalidad de LTE-Advanced que tiene implementada es MIMO mejorado, la cual permite emplear hasta 8 antenas en la transmisión y 8 en la recepción. [12]

En una simulación a nivel de sistema se evalúa el comportamiento de una serie de parámetros como, por ejemplo, pérdidas básicas de propagación, pérdidas macroscópicas, desvanecimientos por sombra, entre otros. Dichos parámetros son típicos del medio de transmisión y en su mayoría no dependen del tipo de sistema de radiocomunicaciones móviles del cual se desea realizar el estudio.

Se llama pérdida básica de propagación de un enlace radioeléctrico al cociente entre la potencia transmitida en Watts por una antena isótropa y la potencia recibida por otra antena similar [12]. Este es el primer parámetro que determina el simulador y luego al mismo se le aplica una serie de correcciones que van a considerar el método empírico de predicción de propagación empleado y el efecto de los desvanecimientos lentos.

Variación del tipo de entorno

En esta simulación se hace un estudio para tres tipos de entorno diferentes: un entorno micro urbano, uno urbano y uno rural. En la tabla 2 están contenidos los parámetros empleados en cada simulación.

Las figuras que se muestran a continuación representan la variación de la SINR (relación Señal a Ruido e Interferencia) bajo el efecto de las pérdidas macroscópicas y

los desvanecimientos lentos en la región de interés. Los ejes de las abscisas y las ordenadas muestran la distancia en metros y la escala de colores, el valor de la SINR en decibels (dB) para cada punto de la región.

Es posible apreciar que con el aumento de la distancia respecto a la Estación Base se deteriora la SINR. Este deterioro de la señal ocurre mucho más rápido en entornos urbanos, mientras que en un entorno rural se alcanzan mayores distancias con niveles de SINR aun aceptables. Sin embargo, en entornos rurales hay también zonas de dimensiones considerables, donde la SINR está por debajo de los 0dB, no siendo este fenómeno tan marcado en ambientes urbanos.

Variación del tipo de sectorización

Parámetro	Micro Urbano	Urbano	Rural
Frecuencia (GHz)	2.14	2.14	2.14
BW (MHz)	20	20	20
Modo de transmisión	SUMIMO 8x8	SUMIMO 8x8	SUMIMO 8x8
Número de eNB	7	7	7
Distancia entre nodos (m)	500	1000	4000
Pérdidas mínimas de acoplamiento	70	70	80
Modelo de pérdidas macroscópicas	COST 231	TS 36942	TS 36942
Potencia de Transmisión del eNB (W)	40	40	40
Desvanecimientos Lentos	Claussen	Claussen	Claussen
Tipo de canal	TU	TU	Winner +
Número de EUs por eNB	1000	2000	500
Velocidad de los EUs (km/h)	50	90	120
Antena Transmisora	Kathrein 742215 (Véase Anexo 3)	Kathrein 742215	Kathrein 742215
Ganancia máxima de la antena	15	15	15
Planificador	Round Robin	Round Robin	Round Robin
Sectorización	3 sectores inclinados	3 sectores inclinados	3 sectores inclinados

Tabla 2. Parámetros de los entornos de simulación. Fuente: Elaboración propia.

La simulación se ha realizado para tres configuraciones diferentes de sectorización en la Estación Base: Tres sectores, tres sectores inclinados y seis sectores inclinados. Todas fueron realizadas en un entorno urbano y los parámetros empleados en cada una se corresponden con los utilizados en la simulación anterior para este tipo de entorno. En los casos donde hay inclinación de las antenas, esta ha sido de 8°.

Resulta de interés analizar primero el comportamiento de las pérdidas básicas de propagación (Lb) para un único sector. Ha sido seleccionado para ello el sector 1 del eNB 5 en cada entorno, que es el situado en el medio del sistema. Esto permitirá comparar el campo producido por un sector aislado con aquel que se produce cuando se está en presencia de todo un sistema de estaciones transmisoras.

La configuración de tres sectores inclinados produce una región cercana a la Estación Base donde los valores de las pérdidas son mínimos, cuya extensión es superior a la de la región de iguales características producida en el sector sin inclinación. Sin embargo, a largas distancias del eNB se perciben menos pérdidas en un sistema no inclinado. Luego, al dividir el eNB en seis sectores, disminuye la potencia del transmisor asignada a cada uno. La intensidad del campo de cada sector va a estar dada entonces por la potencia de transmisión correspondiente

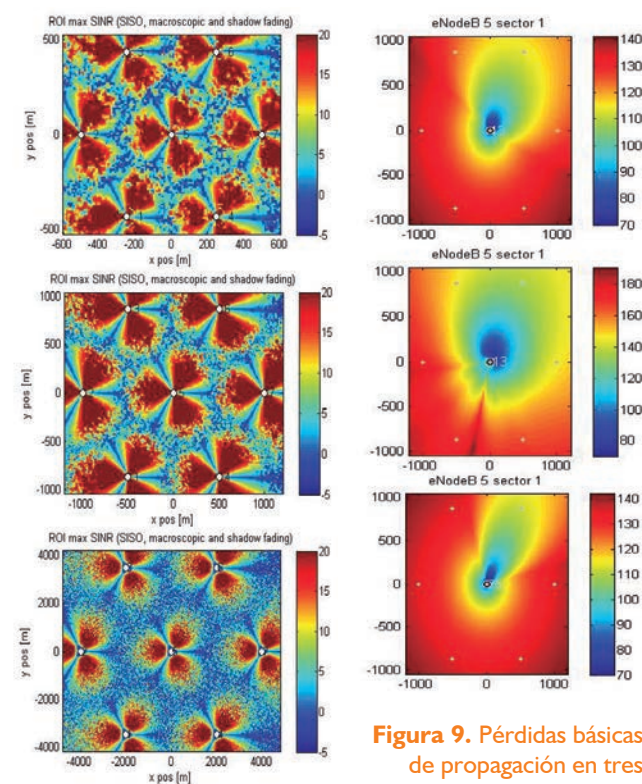


Figura 8. SINR en la región de interés para entorno micro urbano, urbano y rural (de arriba hacia abajo) Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Pérdidas básicas de propagación en tres sectores: tres sectores inclinados y seis sectores inclinados (de arriba hacia abajo) Fuente: Elaboración propia.

y por la ganancia de la antena transmisora de cada sector. En un sistema constituido por eNB de seis sectores, el lóbulo formado por el sistema de radiación es mucho más directivo. Las figuras 10, 11 y 12 representan la SINR en toda la región de interés para los escenarios planteados, bajo el efecto de desvanecimientos por sombra y pérdidas macroscópicas.

Si se comparan los dos escenarios con tres sectores, es posible observar que los niveles de SINR por sector son superiores en el escenario donde las antenas están inclinadas.

Al comparar los escenarios donde hay inclinación de las antenas, se aprecia que los mejores resultados de SINR por sector se obtienen cuando hay 3 sectores, y que una mayor sectorización incrementa el ruido y las interferencias; por tanto, afecta el área de cobertura.

Variación del tipo de distribución de los eNB

Se ha realizado una simulación con la finalidad de comparar el tipo de distribución que se ha utilizado durante las simulaciones anteriores para la red de Estaciones Base (distribución equi-espaciada) con una distribución que se asemeje más a las condiciones que se presentan en la realidad (distribución estocástica).

A pesar de las ventajas que aporta el diseño de una red de comunicaciones móviles en donde todos los eNB se encuentren distribuidos de forma homogénea sobre la región en la que se desea brindar cobertura, esto raramente es posible en la práctica. Hay dos razones fundamentales: en primer lugar, al no estar los usuarios homogéneamente distribuidos, se busca ofrecer mayor cobertura en aquellos lugares donde se prevé la mayor densidad de usuarios; y en segundo lugar, no siempre es posible en la práctica ubicar las estaciones transmisoras en su localización óptima. Lo que sucede comúnmente es que los emplazamientos se ubican en donde se puede y no en donde se quiere.

Las figuras 11 y 12 muestran los niveles de SINR tanto para una distribución de estaciones estocástica como para una distribución equi-espaciada, bajo los efectos de desvanecimientos por sombra y de pérdidas macroscópicas. Cuando las estaciones se encuentran espaciadas de manera homogénea, la zona de cobertura que se obtiene resulta mucho más uniforme, mientras que en el otro caso se produce lo mismo, zonas muy grandes con muy buenos niveles de señal y amplias zonas de silencio.

La tabla 3 contiene las estadísticas obtenidas para esta simulación. Si se analizan los parámetros obtenidos para cada distribución se observa que la distribución equi-espaciada muestra el mejor desempeño. No obstante, los resultados que se han obtenido para la distribución estocástica se asemejan más a aquellos que obtenemos en la realidad.

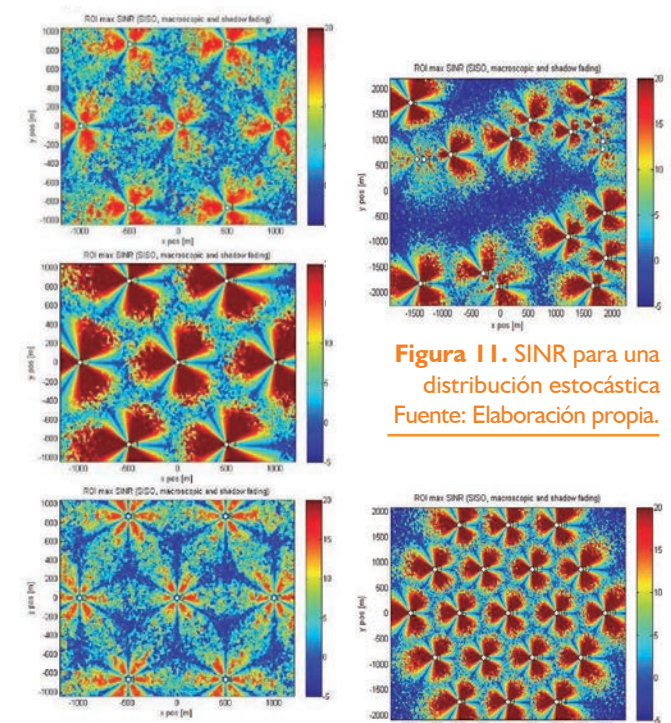


Figura 10. SINR en la región de interés para tres sectores, tres sectores inclinados y seis sectores inclinados (de arriba hacia abajo) Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. SINR para una distribución equi-espaciada. Fuente: Elaboración propia.

Proyecciones al futuro

A pesar de que los sistemas LTE-A se encuentran aún en su etapa de despliegue, ya se comienza a pensar en posibles soluciones para la siguiente generación móvil.

5G propone una migración a bandas superiores de frecuencia, pues la banda UHF en donde se opera hoy en día está muy congestionada, y por tanto se hace imposible el empleo de mayores anchos de banda tan necesarios dada la demanda de tráfico actual. La propagación en las bandas SHF y EHF (llamadas bandas milimétricas) implica ciertos desafíos, pues hay que lidiar con grandes atenuaciones de la señal debido a la pequeña longitud de las ondas en estas frecuencias. Sin embargo, la gran cantidad de espectro disponible, la posibilidad de reutilizar la misma frecuencia en distancias pequeñas, la utilización de complejos arreglos de antenas de pequeño tamaño, así como la seguridad y la privacidad inherentes de estos rangos de transmisión limitados, constituyen las motivaciones fundamentales para la utilización de esta banda. [12] Según lo definido por el IMT-2000 para LTE-Advanced, este sistema constaría de tecnologías como las ya mencionadas Coordinación de Interferencia entre Celdas Mejorada y Coordinación Multipunto, que ayudarían a mejorar la experiencia de un usuario en esta localización. Sin embargo, hoy en día estas no han sido desplegadas aun por los proveedores de

Parámetro	Distribución Estocástica	Distribución Equi-espaciada
Número de EU	1080	1140
Número de celdas	54	57
Fairness del planificador	0.620816	0.701423
Throughput promedio por celda	47.13 Mbps	61.19 Mbps
Throughput promedio por EU	2.36 Mbps	3.06 Mbps
Throughput máximo por EU	6.25 Mbps	6.32 Mbps
Edge Throughput por EU	0.34 Mbps	0.63 Mbps
Eficiencia Espectral promedio por EU	2.81 bit/cu	3.64 bit/cu
RBs/TTI/EU promedio	4.94 RBs	2.4 Bs

Tabla 3. Estadísticas de la Simulación. Fuente: Elaboración propia.

servicio, quienes ofrecen una conectividad “LTE-Advanced” compuesta en verdad por unas pocas tecnologías o, como es más común, solamente por Agregación de Portadoras [5]. Los sistemas de 5G proponen una forma diferente de abordar esta dificultad, buscando que, sin importar su localización, un usuario pueda siempre experimentar niveles similares de calidad del canal de comunicación. Para la 5G han sido planteadas dos soluciones principales: Estaciones Base ubicadas en el borde de la celda y Antenas transmisoras con lóbulos altamente directivos.

A diferencia de las comunicaciones celulares utilizando bajas frecuencias, las transmisiones MMB —*Milimetric Mobile broadband*— están basadas en haces estrechos. La probabilidad de que haces de estaciones vecinas colisionen es bastante pequeña y las ganancias superiores de los mismos permiten extender el alcance de un enlace MMB. Esto resulta en una superposición significativa del área de cobertura entre estaciones vecinas MMB sin una interferencia intercelda considerable [12]. Una propuesta es la de un sistema híbrido MMB + 4G

(Figura 13) en donde la información del sistema, el canal de control y la realimentación son transmitidos a través del sistema 4G, dejando la totalidad del espectro de las ondas milimétricas disponible para las comunicaciones de datos. [12]

Conclusiones

A partir de las investigaciones realizadas de un sistema LTE-Advanced en diferentes entornos y con diferentes configuraciones de las Estaciones Base, se ha podido observar que a nivel de sistema en diferentes entornos de propagación la influencia de los elementos que atenúan la señal se manifiesta de formas distintas y, en consecuencia, lo hará también la SINR.

El tipo de sectorización que se emplea en la Estación Base, así como la inclinación de las antenas, va a determinar también el comportamiento de la SINR para un entorno determinado. Ha sido posible observar que la configuración de eNB que ofrece mejores niveles de señal en la mayor parte de la celda es la de tres sectores con inclinación. No obstante, aun en esta configuración, un usuario ubicado en el borde de la celda experimentaría condiciones muy pobres del canal. El estándar LTE-Advanced consta de una serie de tecnologías aun no desplegadas por los proveedores de servicio, como es CoMP, que tienen la capacidad de mejorar el desempeño del sistema en general.

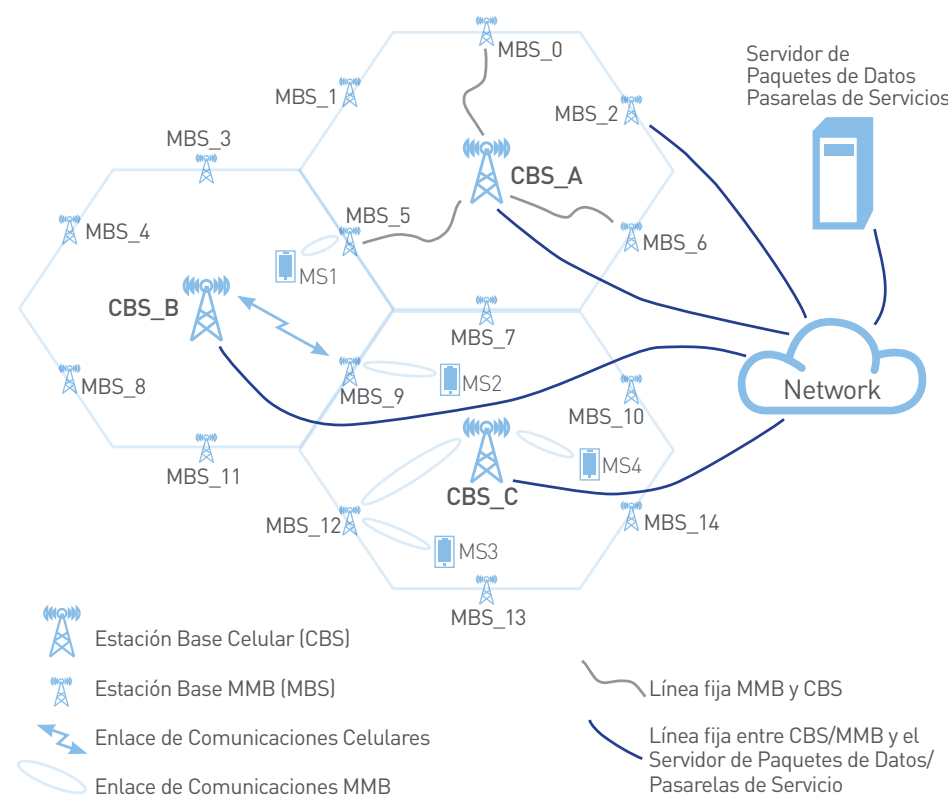


Figura 13. Sistema híbrido 4G + MMB. Fuente: Elaboración propia.

La implementación de un sistema de comunicaciones móviles desde cero es prácticamente incosteable para los proveedores de estos servicios. Es por eso que, como mismo hoy coexisten redes de 3G con redes de 4G, está prevista la coexistencia de los sistemas móviles de 4G con los de la venidera 5G. La propuesta es un sistema con una arquitectura basada en un principio diferente al

de LTE, en 5G las Estaciones Base estarán ubicadas en el borde la celda y, en lugar de generar patrones de cobertura que busquen aproximarse a una forma hexagonal, el objetivo será disponer de señales altamente directivas. Bajo este principio, sin importar cuál es la ubicación del usuario, se experimentarán buenas condiciones del canal de comunicación.

Referencias bibliográficas

- [1] Khan, A.; M. Qadeer; J. Ansari and S. Waheed: “4G as a Next Generation Wireless Network”, International Conference on Future Computer and Communication, Department of Computer Engineering Zakir Husain College of Engineering & Technology, Vol. 108, pp. 334-338, 2009.
- [2] Kumar, S.: “Fourth generation of Mobile Communication Systems: Evolution, Objectives, Prospects and Challenges”, First Asian Himalayas International Conference, Nepal Telecom, pp. 1-6, 2009.
- [3] Farooq, M.; A. Muhammad Ishtiaq y M. Al. Usman: “Future Generations of Mobile Communication Networks”, Academy of Contemporary Research Journal, Vol. 2, No. 1, pp. 15-21, India, 2013.
- [4] Bhandare, T.: “LTE and WiMAX Comparison”, Tesis de Grado, Santa Clara University, California, 2008.
- [5] GSA: LTE completes a full 360 in 2014, Evolution to LTE report, 2015.
- [6] Hadden A.: “Future of LTE – EXPO Summit”, 11th Annual LTE world summit, GSA, 2015.
- [7] Agustí, R.; F. Bernardo; F. Casadevall; R. Ferrús; J. Pérez; O. Sallent: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles, Ed. Fundación Vodafone España, Madrid, 2010.
- [8] Huidobro, J. M.: Comunicaciones Móviles. Sistemas GSM, UMTS y LTE, Ed. Ra-Ma, Madrid, 2012.
- [9] Gonçalves, E. J.: “Análise de Desempenho dos Sistemas LTE e LTE-Advanced com base em Simuladores”, Tesis de Maestría, Universidad Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.
- [10] Pérez, M. y L. M. Rizo: “Aproximación a la simulación del estándar LTE”, Tesis de Grado, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, 2012.
- [11] Bleicher, A.: “LTE-Advanced is the Real 4G”, IEEE Spectrum, 2014 Top Tech to Watch, 2013.
- [12] González, G. y D. Prado: “Análisis de los sistemas LTE y LTE-Advanced a partir de procesos de simulación”, Tesis de Grado, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, 2015.
- [13] Rábanos, J. M.: “Transmisión por Radio”, Ed. Ramón Areces, Madrid, 2008.

(Artículo recibido en noviembre de 2015 y aprobado en febrero de 2016)