

# Combinación de técnicas de procesamiento de señal y arreglo de antenas para la cuarta generación de sistemas móviles

## Combining techniques of signal processing and antenna array for fourth generation mobile systems

Gómez R., Jorge<sup>1</sup> y Camargo A., Luis L.<sup>2</sup>  
Universidad del Magdalena, Facultad de ingeniería  
Programa de Ingeniería Electrónica  
Santa Marta, Colombia

[jgomez@unimagdalena.edu.co](mailto:jgomez@unimagdalena.edu.co)  
[lcamargoa@unimagdalena.edu.co](mailto:lcamargoa@unimagdalena.edu.co)

Fecha de Recepción: agosto 27 de 2014  
Fecha de Aceptación: diciembre 03 de 2014

**Resumen**— Este documento presenta las principales características de la cuarta generación (4G) de sistemas móviles de comunicación recientemente incorporada en Colombia. Es expuesta la estructura y terminología que ha migrado cronológicamente desde la incursión de la primera generación (1G). Son descritas la evolución e implementación nacional con respecto a la internacional, conceptualizando la estructura implantada haciendo énfasis en las posibles opciones que ofrece la tecnología Long Term Evolution (LTE). Este artículo ofrece una visión general para incentivar a investigar en el área de comunicaciones móviles.

**Palabras clave**— LTE, 4G, Beamforming, comunicaciones móviles.

**Abstract**— This document shows the main characteristics to the fourth generation (4G) communication of mobile systems recently applicate in Colombia. It is exposed the structure and terminology to be migrate chronologically since the incursion of the first generation (1G). This describes evolution and implementation national with respect to international, as conceptualizing the structure implanted, making emphasizing into the possible options that offer the Long Term Evolution (LTE) technology. This article gives a basic review to incentive to research mobile in communications area.

**Keywords**— LTE, 4G, Beamforming, Mobile communications.

### I. INTRODUCCIÓN

Cuando se hace referencia al término LTE (*Long Term Evolution*), se asocia a la evolución que los sistemas móviles de comunicaciones han tenido y que se encuentra regida por el Proyecto Asociación de Tercera Generación (3GPP 3rd *Generation Partnership Project*) e incluso siendo ésta la tecnología más reciente implementada en Colombia, técnicamente LTE pertenece a la última fase de la tercera generación de móviles [1].

En una revisión rápida a la evolución de los sistemas móviles celulares es de notar que la finalización de la segunda generación (TDMA) posicionaría un solo estándar [2], pensado y diseñado para unificar todas las tecnologías de radio acceso y así converger al desarrollo de nuevas generaciones. Sin embargo, no fue posible dado que no hubo convergencia, motivo por el cual a partir del fin de la segunda generación se trató la velocidad de interfaz de radio entre usuario y red (uplink) y su contravía (downlink) como los únicos parámetros de interés para distinguir la evolución de los sistemas móviles [3].

El efecto de la aparición de la tecnología en Latinoamérica fue inmediato. Para marzo de 2012, habrían alrededor de seis operadores en actividades comerciales como AT&T (Puerto Rico), Claro (Puerto Rico), Antel (Uruguay), UNE (Colombia), SKY (Brasil) y Open Mobile (Puerto Rico) [4].

De igual forma, la aparición del Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (OFDMA) en la interfaz de radio, destaca la tecnología LTE con el fin de minimizar las interferencias e incrementar la eficiencia espectral, utilizando canales de tamaño variable entre 1.4 y 20 MHz [5].

Los creadores de LTE definen la tecnología como la implementación de un esquema de modulación digital en sus formas BPSK, 16 QAM, 64 QAM permitiendo la incorporación de un grupo de antenas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) con la finalidad de (hasta) cuadruplicar la tasa de transmisión [6]. En contexto con las temáticas pendientes de desarrollo e investigación, está alineada a la optimización de la eficiencia espectral, reduciendo costos de implementación, mejorando los

<sup>1</sup> Ingeniero Electrónico; Especialista en Teleinformática; Magíster en Ingeniería Electrónica; Doctorado en Ingeniería (c); IEEE Senior Member; Director del grupo de Investigación en Desarrollo electrónico y Aplicaciones Móviles, GIDEAM.

<sup>2</sup> Ingeniero Electrónico; Magíster en Ingeniería Electrónica; Investigador del grupo Desarrollo electrónico y Aplicaciones Móviles, GIDEAM.

servicios prestados hoy día y con el valor agregado de la integración con otras tecnologías [7].

## II. ANTECEDENTES

Es importante conocer los antecedentes en la evolución de los sistemas móviles tanto tecnológicos como legales, especialmente en Colombia. El entonces denominado Ministerio de Comunicaciones a principios de 1993 otorgó licencias de concesión para el servicio de Telefonía Móvil Celular (TMC) con un atraso de quince años referidos a la primera implementación comercial de este servicio dado en Japón [8]. La tecnología implementada no fue otra que la primera generación de móviles (AMPS, *Advanced Mobile Phone System*), netamente análoga y en coexistencia con el uso comercial de la segunda generación (TDMA) [2]. La estrategia empleada para la competición de oferentes fue la subasta, con un método de asignación radioeléctrica que le generó a Colombia un ingreso cercano a los US \$1, 180,000,000, estableciendo un récord en un evento de este tipo [9].

En el año 2003 cada operador de TMC tenía adjudicados 25 MHz y existía un operador de las frecuencias destinadas al Servicio de Comunicación Personal (PCS, Personal Communications Services) tan solo 20MHz, pese a sus frecuencias de mayor rango [10]. Hacia 2004 hubo saturación del espectro debido a las tecnologías AMPS, TDMA, GSM y CDMA [2]. Un servicio en crecimiento exponencial colocó al Ministerio de Comunicaciones a preparar propuestas y planes de acción para seguir asignando espectro. El resultado de este movimiento es la asignación final de 40 MHz de ancho de banda por operador, ordenando las bandas entre 1710 y 2025 MHz y entre 2100 y 2200 para los servicios móviles terrestres [11].

Posteriormente, en el año 2009 nuevamente se realizó una pre-planificación del espectro radioeléctrico con miras a la implementación de sistemas de tercera generación en Colombia [2]. Por tanto, el ministerio de Comunicaciones asignó 555 MHz como máximo ancho de banda que pudiese ostentar cada operador, recordando que en ese momento existían tres. Un año después, en 2010, apareció el cuarto operador móvil en Colombia, al cual se le asignó un espectro de alrededor de 2.6 GHz con un total de 50 MHz de ancho de banda en una asignación frecuencia emitida a modo de recomendación por la Unión Internacional de Telecomunicaciones para la tecnología naciente: LTE [12].

Dada la asignación de frecuencia a los operadores licenciatarios, surge como una estrategia del mercado evolutivo y la competición, los operadores de Telefonía Móvil Virtual (MVNO, *Mobile Virtual Network Operator*)

[13]. Éste se trata de una empresa que no tiene licencia de operación o concesión para explotar el espectro, motivo por el cual debe establecer acuerdos para el uso de las redes físicas de un licenciatario y así ofrecer sus servicios. Para Colombia existen cinco MVNO a 2014 [14].

Con fines de ordenamiento a nivel radioeléctrico se creó en 2010 la Agencia Nacional del Espectro (ANE) [11], con el objetivo de planificar, vigilar y controlar el espectro electromagnético colombiano. Incluye dentro de sus funciones un elemento pionero en la legislación nacional: investigar y hacer seguimiento a las nuevas tecnologías y sus tendencias a nivel internacional con fines de apropiación.

Bajo estos parámetros, la ANE aplica las tendencias internacionales en cuanto a asignaciones de frecuencias se refiere. Es posible implementar LTE en diferentes bandas de frecuencia, incluyendo las asignadas a los licenciatarios previos en Colombia. La mayor ventaja la tendrían aquellas bandas frecuenciales más bajas, ya que implican un menor número de radiobases para cubrir un cierto espacio geográfico. Esto último implica, evidentemente, una menor inversión por parte del operador con mayor nivel de penetración en el servicio.

Para los operadores que deseen aplicar esta migración de tecnología la administración gubernamental entrega tres opciones a tomar para prestar sus servicios [6]:

- La primera se basa en que únicamente migren para prestar servicio de datos. Ésta aplica tanto para nuevos operadores como para los operadores existentes, aprovechando las ventajas de rendimiento de LTE para la banda ancha móvil.
- La siguiente opción consiste en que pueda prestar servicio de datos sobre LTE y servicios de voz en 2G y 3G. Esta aplica para operadores licenciados que deseen comenzar una transición suave hacia LTE.
- Finalmente la migración total (voz y datos) a LTE, se aplica tanto para operadores existentes como para los entrantes aprovechando la flexibilidad y rendimiento que brinda LTE, además de las condiciones excepcionales que brinda el gobierno referidas a inversión inicial y retribución social.
- Tomando en cuenta el área de cobertura mencionada anteriormente, son más apetecidas para la participación en una subasta espectral las bandas de frecuencia denominadas dividendo digital. El dividendo digital consiste en la utilización de frecuencias en desuso por la aparición de la televisión digital terrestre y su tecnología de compresión que

requiere menor ancho de banda que un sistema tradicional análogo [15]. Con la emergente televisión digital las bandas de frecuencias asignadas para el servicio analógico de televisión pueden reasignarse con fines de implementar la tecnología 4G en Colombia, siguiendo preceptos emanados de distintas geografías internacionales. Esta asignación se encuentra en la etapa de planeación para subasta.

### III. ESTRUCTURA DE LA 4G

#### A. Long Term Evolution (LTE)

Las tasas de transferencia en enlaces de descenso y ascenso pueden alcanzar velocidades de pico de hasta 173 Mbps y 86 Mbps respectivamente, empleando para ello dos antenas en la estación base y dos en el móvil; es decir, aplicando tecnologías MIMO 2x2 y hasta de 300 Mbps en descenso con un sistema MIMO 4x4 [16]. En LTE Advanced (la siguiente revisión de LTE), la cual es considerada realmente como la cuarta generación, permitirá realizar descargas cercanas a los 900 Mbps [6].

Otra de las características de LTE está en los servicios, que sólo utilizan conmutación de paquetes. LTE no gestiona SMS mediante conmutación de circuitos; una operación con la que continúan encargadas las redes GSM, entre otras [10]. Con la pertinente optimización en relación costo/beneficio de cara a la infraestructura, el sistema de conmutación de paquetes de LTE está optimizado para un mundo en el que cada vez se hacen más cosas sobre el protocolo de Internet (IP, *Protocol Internet*), razón por la cual el núcleo de la red como todos los servicios estarán basados en IP.

LTE también fue diseñado para evitar que dada la duplexación realizada para los canales ascendentes y descendentes fuese un inconveniente [17]. LTE maneja tanto la canalización por división de frecuencias (FDD, *Frequency Division Duplex*) como la temporal (TDD, *Time Division Duplex*), de tal forma que es posible implementar LTE en cualquier región o país con esta división espectral regulada. Indirectamente se apoya la industria manufacturera al no tener que elegir un tipo de canalización en la fabricación de los terminales y equipamiento de red.

En la figura 1 se visualiza un sistema simplificado de telefonía móvil, donde la red de acceso es la responsable de gestionar el uso de los recursos de radio disponibles para la provisión de servicios portadores de forma eficiente [18]. La activación de los recursos de transmisión en la red de acceso se controla generalmente desde la red troncal. La red de acceso está formada por estaciones base y por equipos controladores de las estaciones base. Esta parte del sistema

es el encargado de aspectos tales como el control de acceso a la red celular gestión de la movilidad de los usuarios, gestión de las sesiones de datos o circuitos que transportan la información de los usuarios, mecanismos de interconexión con otras redes, etc. La red troncal está formada por equipos que albergan funciones de conmutación de circuitos, encaminamiento de paquetes (routing), bases de datos, etc.

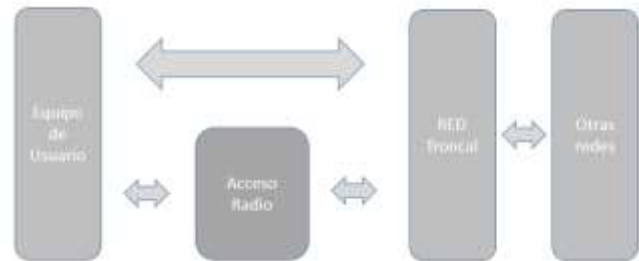


Figura 1. Modelo de un sistema simplificado de telefonía móvil [18].

En la figura 2 se visualiza la estructura de la red de tercera generación, con relación a la figura 1 se parecían las modificaciones. Las redes de acceso anteriores a la nueva red de radio terrestre UMTS (E-UTRAN, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) se basan en una arquitectura jerárquica donde las funciones de la red de acceso se distribuyen en dos tipos de nodos [19]:

- Estaciones base (denominados Nodos B en U-TRAN) y equipos controladores de estas estaciones base (RNC, *Radio Network Controller*) en U-TRAN. En esta arquitectura jerarquizada, los equipos controladores albergan el plano de control de la interfaz radio, en lo referido a la señalización de control del enlace radio, así como múltiples funciones del plano de usuario como algunas funciones de la capa de acceso al medio, control de enlace, compresión de cabeceras, etc.

De otra parte, las estaciones base se ocupan principalmente de las funciones de transmisión radio (procesado de capa física) y su operación se gestiona de forma remota desde los equipos controladores. La interconexión entre estaciones base y controladores se realiza mediante una interfaz denominada *Iub*, de forma que la topología de red resultante a nivel lógico sea una topología en forma de estrella [20].

Los equipos controladores también pueden conectarse entre sí mediante interfaces específicas casi como la interfaz *Iub* que, en el caso de UTRAN, permite la explotación del mecanismo de macro diversidad entre dos Nodos B que se encuentren conectados a RNC diferentes.

La interconexión de la red de acceso a la troncal se realiza a través de los equipos controladores mediante las

interfaces, entre RNC y los nodos servidores de soporte al GPRS (SGSN, *Serving GPRS Support Nodes*) del dominio de paquetes, y otras interfaces entre RNC y las centrales de conmutación móvil (MSC, *Mobile Switching Centre*) del dominio de conmutación de circuitos.

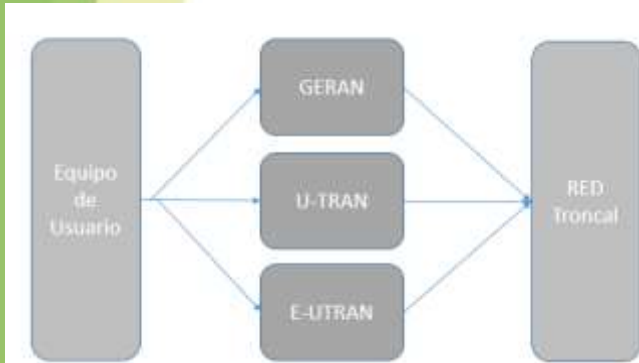


Figura 2. Arquitectura de alto nivel de los sistemas 3GPP (GSM, UMTS y LTE) [18].

### B. Sistemas de Múltiples Entradas Múltiples Salidas (MIMO)

Mencionar MIMO en sistemas de telecomunicaciones hace referencia al conjunto de técnicas relacionadas con el uso de múltiples antenas en comunicaciones inalámbricas [21]. Lo que supone incluir una dimensión espacial adicional que puede aprovechar la formación de canales estadísticamente independientes originados por el multitrayecto y mitigando el efecto del mismo, consiguiendo un incremento sustancial de la eficiencia espectral. Esta mejora lleva a las modernas tecnologías inalámbricas a contemplar el uso de MIMO para aumentar su tasa de transmisión.

Existen diversas técnicas MIMO cuyo rendimiento depende del escenario, es decir, de la complejidad del canal inalámbrico, indicando que no en todas las técnicas es necesario conocer el canal para mitigar su efecto, pero cuanto mejor sea su estimación, mejores prestaciones se podrán alcanzar. Por cuestiones de eficiencia algunas tecnologías como LTE utilizan un conjunto predeterminado de matrices para la caracterización del canal [22]. A continuación se mencionan algunas.

#### Conformación de haz (Beamforming)

Beamforming es una técnica empleada en las antenas inteligentes [23]. El término antena inteligente hace referencia generalmente a cualquier arreglo de antenas con un procesador de señales avanzado, el cual puede ajustar o adaptar su propio patrón de radiación con el fin de concentrar señales de interés y minimizar señales interferentes. También son llamadas arreglos adaptativos, antenas adaptativas o conformadores de haces digitales. A

pesar de que las técnicas de antenas inteligentes han sido desarrolladas por más de cuarenta años, hasta hace poco comenzaron a aplicarse en sistemas de comunicaciones inalámbricas en el mundo real, encontrando que dentro de los sistemas actuales se han convertido en una adición crítica para incrementar el desempeño de aplicaciones inalámbricas especialmente en ambientes hostiles dispersivos y dinámicos.

Los haces se dirigen a un destino específico según el requerimiento expresado a través de los pesos que varían el patrón de radiación, tal como lo ilustra la figura 3. Teniendo información previa sobre el canal, un transmisor con múltiples antenas realiza una pre-codificación de los datos a transmitir ajustando las ganancias y desfases de las señales transmitidas por cada antena [24]. Se puede conseguir así que llegue la máxima potencia posible al receptor con la mínima interferencia sobre otros receptores, logrando cierta optimización para varias antenas receptoras utilizando múltiples streams.

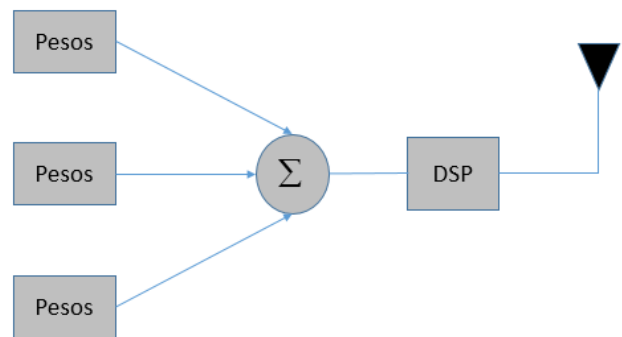


Figura 3. Pesos específicos provocan la aparición de un haz específico en el patrón de radiación de la antena. El DSP tiene muchos patrones de haz fijos previamente configurados. El DSP selecciona uno según las condiciones del canal.

Dentro de las ventajas de Beamforming está el incremento de capacidad del sistema, generando haces más directivos a los usuarios deseados mientras anula usuarios interferentes, lo cual incrementa la relación señal a ruido-interferencia (SINR), baja requerimientos en potencias de transmisión, permite una mayor reutilización de frecuencias y transmisión a mayor velocidad. Estos factores denotan una tecnología denominada Multiplexación por diversidad espacial.

Otra de las ventajas del Beamforming es mitigar los efectos dispersivos del canal multitrayectoria [25], empleando algoritmos particularmente diseñados para contrarrestar señales provenientes de múltiples fuentes reduciendo dramáticamente el desvanecimiento de las señales recibidas.

Se han desarrollado avanzadas técnicas de conformación de haces adaptativas ciegas, las cuales no necesitan información del canal (retroalimentación) para poder adaptarse a él [26]. Una de las técnicas consiste en darle peso fijo a los arreglos de antena que conforman el transmisor. Ese valor complejo físicamente se relaciona con cambios de fases que tendrán como efecto modificar el patrón de radiación del arreglo, pero todavía no lo hace de forma adaptativa. Para calcular esos pesos, es necesario conocer el ángulo de salida del rayo, es decir, la dirección en la cual el usuario se encuentra ubicado.

También es importante señalar que en caso de conocer las direcciones en las cuales los usuarios interferentes se encuentran localizados, es posible anular la señal en esa dirección, parámetros que se utilizarían como entradas pre-configuradas fijas ya que el sistema no se adapta a ellas, eliminando la necesidad de retroalimentación del canal.

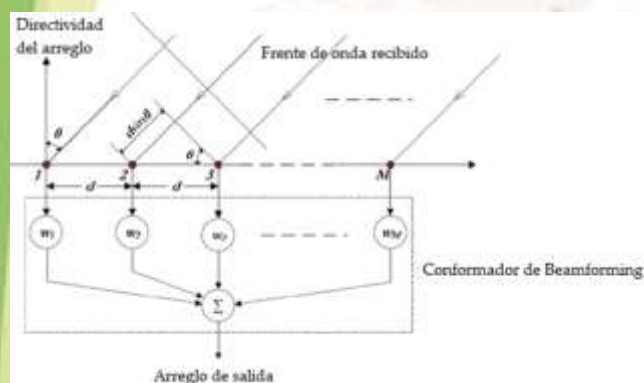


Figura 4. Arreglo lineal uniforme. Ángulo de arribó al transmisor para la selección del peso específico [18].

En la figura 4 se aprecia un arreglo de antenas para conformar un haz específico. Definiendo el factor del arreglo como [23]:

$$AF = 1 + e^{j(kd\sin(\theta+\phi))} + e^{2j(kd\sin(\theta+\phi))} + \dots + e^{j(N-1)(kd\sin(\theta+\phi))} \tag{0.1}$$

Resumiéndose (0.1)

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\gamma} \tag{0.2}$$

Debido al procesamiento digital empleado como mecanismo de control y acción sobre los pesos específicos, es necesario almacenar los valores de éstos como un vector  $w^T$ . Tomando un valor de peso fijo inicial denominado  $w_0$  y representando el factor del arreglo de antenas como:

$$AF = w^T a(\theta) \tag{0.3}$$

Este último se conoce por su anglicismo *Array Mainfold Vector* (AMV). Los pesos pueden escogerse para cumplir algún criterio específico, generalmente ese criterio es minimizar los lóbulos laterales o ubicar nulos en ciertos ángulos. El AMV dependiendo directamente del tipo de arreglo de antenas utilizado (lineal uniforme, circular, etc.) [27].

Existen diversas formas de implementar los pesos fijos de los arreglos [28].

1) *Diversidad de código (Diversity coding)*

Se transmite un stream empleando técnicas de codificación de espaciado en el tiempo que permiten aprovechar el multitrayecto del canal para aumentar la robustez de la transmisión [29]. No requieren un conocimiento previo del canal ya que esta tecnología tiene especial importancia en el uso de relays (repetidores), elementos que jugarán un importante papel en LTE-Advanced.

2) *MIMO multiusuario y MIMO Cooperativo*

Permite que varios usuarios puedan utilizar colaborativamente alguno de los métodos anteriores para mejorar la eficiencia espectral [30]. Por el momento, LTE contempla el uso de una antena por usuario, utilizando MIMO Multiusuario (MIMO-MU) para aumentar la capacidad de la celda, pero no se descarta el uso de múltiples antenas por usuario en un futuro. Existen además propuestas para la colaboración entre estaciones base, ello considerando que su coordinación es compleja y está abierta a mejoras.

En el ámbito de las redes de área local inalámbricas MIMO, ya está recogido la última especificación del estándar utilizado en las redes Wi-Fi (IEEE 802.11n) [16]. También se utiliza en HSPA+ para ofrecer servicios 3G a alta velocidad, esperando que la explosión de las técnicas MIMO llegue con la cuarta generación de telefonía móvil (4G).

Por lo anterior, es importante tener en cuenta que las tecnologías candidatas a ofrecer servicios 4G deberán cumplir ciertos requisitos indicados por la recomendación IMT-Advanced [31]. Entre ellos está una determinada eficiencia espectral, para lo que se prevé que las técnicas MIMO sean una herramienta fundamental. Tanto LTE como WiMAX en sus últimas especificaciones (3GPP Releases 8/9/10 e IEEE 802.16e/m respectivamente) contemplan el uso de diversas tecnologías MIMO; por tanto, será de vital importancia el conocimiento y dominio de estas técnicas a la hora de trabajar con tecnologías 4G.

### C. MIMO en LTE

En MIMO se han clasificado en Modos de Transmisión (TM, *Transmitter Mode*) de acuerdo con el sistema que se pretende implementar [18]. Estos modos de transmisión indican las posibilidades para establecer la operación de LTE en un operador determinado de acuerdo con sus proyecciones. Se presentan los modos de transmisión que existen en los releases actuales [12], [32], [33].

*TM-1.* El primer modo es empleando una antena en transmisión y una en recepción, en donde simplemente no aparece MIMO. Esto es análogo a los sistemas inalámbricos más actuales en donde un solo flujo de datos se transmiten en una antena de una recibida por cualquiera, de hasta dos implementadas en el móvil. Es importante citar que en los releases 8 y 9 LTE no se especifica el número de antenas en recepción (móvil) con el fin de no afectar el estándar y así contribuir con mejoras en desarrollo por parte de fabricantes.

*TM-2.* Transmisión empleando diversidad. Este modo consiste en la transmisión de la misma información en múltiples antenas (LTE soporta la opción de dos o cuatro antenas). El flujo de información se codifica de forma diferente en cada una de las antenas que utilizan los llamados códigos de bloque Espacio-frecuenciales (SFBC, *Space-Frequency Block Code*). A diferencia de los códigos de bloque espacio-temporales como *Alamouti* [34] donde los símbolos de datos se repiten en el tiempo, SFBC repite símbolos de datos sobre las subportadoras diferentes en cada antena, es decir sobre los canales generados por las frecuencias de acceso ortogonales (OFDMA, *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*). Este modo se utiliza en LTE por defecto para los canales comunes, así como para los canales de control y de difusión, puesto que una transmisión de una sola capa no mejora la tasa máxima. De otro lado, para optimizar la calidad de la señal es necesaria una relación de interferencia a ruido más alta para poder decodificar la señal.

*TM-3.* Este modo soporta la multiplexación espacial de dos a cuatro capas logrando mayores tasas de datos. Se requiere menos retroalimentación del equipo del usuario (UE, *User Equipment*) con respecto a la situación del canal, y se utiliza cuando la información del canal se encuentra o cuando el canal cambia rápidamente, por ejemplo, para los UE que se desplazan con alta velocidad. Además de la precodificación, la señal se suministra a cada antena con un retardo específico (diversidad de retardo cíclico, o CDD) [35], así artificialmente realiza la creación de diversidad de frecuencial.

*TM-4.* Muy por el contrario, la multiplexación espacial consiste en enviar símbolos distintos por antenas distintas en el mismo canal de frecuencia, mejorando así el

rendimiento del sistema (capacidad de canal). En el caso de MIMO-MU se emplea tanto para el canal de ascenso como para el de descenso.

En el caso de los TM-5, TM-6, TM7 y TM8 hace la aparición Beamforming. LTE no especifica ni da detalle sobre esto de tal forma que no es rígido en el estándar y asigna el desarrollo y la implementación a los fabricantes.

## IV. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se muestra y explica de forma simple cómo funciona la tecnología que a hoy día coloca a Colombia dentro de los primeros países en comunicaciones móviles. Su estructura y cambios en la misma con respecto de la tecnología anterior pero aún vigente, es explicada con las posibles variantes a adoptar por los operadores.

LTE presenta una alternativa a través de su sistema OFDMA que permite integrar con otras tecnologías existentes buscando disminuir el tamaño de las celdas de 2G y 3G a picoceldas, consiguendo mejoras en el número de usuarios atendidos y así aumentando la velocidad prestada. Esto implica el uso de tecnologías MIMO y sus correspondientes técnicas de procesamiento de señal. En los sistemas comercialmente vigentes se implementan sistemas MIMO 2x2.

En cuanto a servicios se refiere es posible como operador prestar solo el servicio de datos o combinar un paquete de voz y datos bajo esta tecnología. Cabe destacar que en Colombia se emplea LTE solo para datos y la voz viaja por un sistema de 3G.

En este momento LTE confronta las limitaciones físicas del postulado para capacidad de canal propuestas por Claude Shannon. Esto se interpreta como un hecho coyuntural en que se presenta una de dos situaciones: nace una nueva teoría para la capacidad de canal, o simplemente se ha llegado a un límite en el desarrollo tecnológico. Solo el tiempo y el desarrollo de trabajos de investigación confirmarán una de las dos hipótesis presentadas.

Una propuesta de desarrollo es la simulación de los canales inalámbricos de la tecnología LTE implementando diversidad MIMO según lo presentado, como posible propuesta del operador implementando escenarios reales y realizando estimación paramétrica de canal.

## REFERENCIAS

- [1] K. Aretz, M. Haardt, W. Konh, and W. Mohr, *The future of wireless communications beyond the third generation*, vol. 37, 2001.
- [2] CRC, *Telecomunicaciones : hechos y tendencias*, Informe sectorial de Telecomunicaciones, no. 13, pp. 1–19, 2009.
- [3] Y. Lu, S. Yuan, C. Yin, and G. Yue, *Joint Downlink Scheduling and Radio Resource Allocation for User-Individual QoS in Adaptive OFDMA Wireless Communication Systems*, The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, vol. 13, no. 2, pp. 1–5, Jun. 2006.
- [4] C. I. Unit, *Penetración móvil en Latinoamérica al 2012*, Frecuencia Latinoamericana, Mar-2013.
- [5] S. Lee and S. Lee, *Location-based QoS enhanced dynamic carrier allocation over multi-cell environments*, Wireless Networks, vol. 16, no. 2, pp. 437–447, Oct. 2008.
- [6] Motorola, *Long Term Evolution ( LTE ): A Technical Overview*. p. 16, 2007.
- [7] E. Perahia and M. X. Gong, *Gigabit Wireless LANs : an overview of IEEE 802 . 11ac and 802 . 11ad*, no. November 2011, 2013.
- [8] Departamento nacional de planeación, *La telefonía móvil celular en Colombia*, Documento sectorial, pp. 1–14, 1999.
- [9] C. B. Hurtado and F. Beltrán, *Subasta de PCs en Colombia: Modelo de juegos y experimentación*, 1994.
- [10] F. Beltran, *Economic and technological aspects in the design of a regulatory framework for PCS markets in Colombia*, Telecommunicatio Policy, vol. 24, no. June 1998, pp. 223–232, 2000.
- [11] L.-M. Gómez-Torres and F. Beltrán, *Analysis of an integrated plan for expanding broadband access in Colombia*, Telecommunications Policy, vol. 35, no. 9–10, pp. 871–882, Oct. 2011.
- [12] 3GPP, *3GPP -LTE, LTE*, 2013. [en línea]. Disponible: <http://www.3gpp.org/LTE>.
- [13] E. ; M. J. Florez, *Oportunidades y desafíos de la banda ancha móvil en América Latina*, Revista del centro de investigación y docencia economica, p. 44, 2012.
- [14] MinTIC, *Boletín Trimestral de las TIC*, 2013.
- [15] N. Orozco, R. León, and G. Olmedo, *Estudio de factibilidad para la migración del sistema móvil UMTS/HSPA a LTE*, Revista del Dpto de Electrónica de la Escuela Politécnica del Ejercito Ecuatoriano, vol. 11, p. 10, 2011.
- [16] M. U. Sheikh and J. Lempiäinen, *Performance analysis of dual-cell HSDPA plus MIMO and LTE along with adaptive MIMO switching at the cellular level*, Physical Communication, Jul. 2012.
- [17] Alcatel-Lucent, *The LTE Network Architecture*, no. Wiley, 2009.
- [18] Rohde & Schwarz, *LTE ( Long Term Evolution): El siguiente nivel*, Instrumentación de Rohde & Schwarz, pp. 82–86, 2010.
- [19] H. Zhang, O. Mantel, M. Kwakernaat, and M. Herben, *Analysis of Wideband Radio Channel Properties for Planning of Next-Generation Wireless Networks*, pp. 3259–3263.
- [20] G. Arunabha, Z. Jun, A. Jeffrey, and M. Rias, *Fundamentals of LTE*, Perason. 2010, p. 40.
- [21] O. Ståbler, R. Hoppe, G. Wölfle, T. Hager, T. Herrmann, and A. R. P. Model, *Consideration of MIMO in the Planning of LTE Networks in Urban and Indoor Scenarios*, pp. 2187–2191.
- [22] M. Baker, *LTE - Advanced Physical Layer*. Beijing, pp. 1–48, 2009.
- [23] R. Bhagavatula, R. W. H. Jr, and K. Linehan, *Performance Evaluation of MIMO Base Station Antenna Designs*, pp. 1–15.
- [24] B. Schulz, *LTE Transmission Modes and Beamforming White Paper*.
- [25] S. Borr, J. Mar, and M. Garc, *Estudio experimental de algoritmos espacio-temporales para sistemas multiantena en túneles*, 2011.
- [26] V. Elvira and J. Vía, *Analog antenna combining in transmit correlated channels: Transceiver design and performance evaluation*, Signal Processing, vol. 92, no. 3, pp. 757–766, Mar. 2012.
- [27] S. Lasaulce, A. Suárez, R. de Lacerda, and M. Debbah, *Using cross-system diversity in heterogeneous networks: Throughput optimization*, Performance Evaluation, vol. 65, no. 11–12, pp. 907–921, Nov. 2008.
- [28] D. Wübben and K.-D. Kammeyer, *Impulse shortening and equalization of frequency-selective MIMO channels with respect to layered space-time architectures*, Signal Processing, vol. 83, no. 8, pp. 1643–1659, Aug. 2003.
- [29] Z. Li, X. Wang, Z. Du, and K. Gong, *Performance Evaluation of a Four-Element Antenna Array with Selection Circuits for Adaptive MIMO Systems*, Tsinghua Science & Technology, vol. 15, no. 3, pp. 294–298, Jun. 2010.
- [30] Y. Li, T. Lü, X. Wu, and L. Zhang, *On the bounds of frequency-selective channel capacity with doubly correlated geometrical MIMO channel model*, The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, vol. 17, no. 2, pp. 8–13, Apr. 2010.
- [31] H. Chamkhia, A. Omri, and R. Bouallegue, *Improvement of LTE System Performances by Using a New Pilot Structure*, vol. 4, no. 1, pp. 197–206, 2012.
- [32] T. Overview, *Agilent Technologies Solutions for 3GPP LTE Technical Overview Move Forward to What is Possible in 3GPP LTE*, 2010.
- [33] C. Braithwaite and M. Scott, "UMTS network planning and development: design and implementation of the 3G CDM infrastructure". Elsevier, 2003.
- [34] D. Song and C. W. Chen, *Maximum-throughput delivery of SVC-based video over MIMO systems with time-varying channel capacity*, Journal of Visual Communication and Image Representation, vol. 19, no. 8, pp. 520–528, Dec. 2008.
- [35] X. Song and W. Wu, *Downlink Scheduling Of Multiuser Mimo Systems With Transmit Beamforming*, The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, vol. 15, no. 2, pp. 45–49, jun. 2008.