

**EVALUACION DE ESTRUCTURAS MIMO SOBRE TECNOLOGIA LTE DE  
CUARTA GENERACION (4G) DE TELEFONIA MOVIL**

**MIGUEL ANGEL SANCHEZ VANEGAS  
GERMAN DARIO VARGAS OBANDO**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA  
NEIVA-HUILA  
2013**

**EVALUACION DE ESTRUCTURAS MIMO SOBRE TECNOLOGIA LTE DE  
CUARTA GENERACION (4G) DE TELEFONIA MOVIL**

**MIGUEL ANGEL SANCHEZ VANEGAS  
GERMAN DARIO VARGAS OBANDO**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero Electrónico**

**Director:  
MARTIN DIOMEDES BRAVO OBANDO  
Ingeniero Electrónico y Telecomunicaciones**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA  
NEIVA-HUILA  
2013**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del Director del proyecto

---

Firma del primer jurado

---

Firma del segundo jurado

Neiva, 19 de junio de 2013

*A Dios por haberme iluminado en este camino por la vida, por haber puesto en mi camino personas de bien con las que puedo contar y me apoyan en cada paso que doy.*

*A mis padres Raul Vargas y Maria Margery Obando, por la excelente educación que me brindaron desde niño y todo lo que me enseñaron para crecer como una persona de bien, por haberse convertido en un apoyo incondicional durante todo mi periodo de estudio y apoyarme en todo.*

*A mis hermanos, Yuliana, Cristian y Paula, por su compañía a lo largo de mi vida y me motivan cada día a cumplir mis metas.*

*A mis compañeros de la universidad, porque con ellos crecimos y compartimos nuestros conocimientos y su ayuda incondicional, para llegar a ser los mejores ingenieros.*

**GERMAN DARIO VARGAS OBANDO**

*A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.*

*A mi madre Marleny Vanegas Aragón por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, por sus consejos, sus valores y por su incondicional apoyo a través del tiempo, convirtiéndose en el motor de mi vida.*

*A mis hermanos Jose y Diana por ser motivo de inspiración para culminar con éxito mis metas propuestas.*

**MIGUEL ANGEL SANCHEZ VANEGAS**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores del proyecto expresamos nuestros más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que de una u otra manera han sido de ayuda para la realización del mismo, en especial al director Ingeniero Martin Diomedes Bravo por su orientación y apoyo recibido, sin el cual no hubiera sido posible la culminación del mismo. Su capacidad para guiar nuestras ideas con rigurosidad y motivación ha sido clave en el trabajo que hemos realizado.

De igual manera agradecemos a la vicerrectoría de investigación y proyección social, así como al grupo de investigación en Telemática de la Universidad Surcolombiana en cabeza del Ingeniero Yamid Cerquera, por el apoyo brindado durante el desarrollo del proyecto.

Queremos agradecer a los ingenieros Albeiro Cortes Cabezas y Jesús David Quintero por el apoyo y las valiosas sugerencias realizadas en el transcurso del proyecto.

Agradecer también a todo el cuerpo docente del programa de Ingeniería electrónica por la formación recibida en el transcurso de todos estos años de carrera.

Un agradecimiento especial a nuestras familias y amigos por su paciencia, comprensión y apoyo en estos años de estudio.

## CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCION.....	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3. TECNOLOGIA PARA 4G (LTE).....	17
3.1 RESEÑA HISTORICA.....	17
3.2 LTE.....	19
3.3 MODULACION OFDM.....	22
3.3.1 Introducción OFDM.....	22
3.3.2 Características de OFDM.....	24
3.3.3 Etapas del sistema OFDM.....	25
3.3.4 Transmisor OFDM.....	26
3.3.5 Prefijo cíclico.....	26
3.4 CANAL INALAMBRICO.....	28
3.4.1 Canal multitrayecto.....	29
3.4.2 Selectividad en frecuencia.....	30
3.4.3 Modelos de desvanecimiento.....	31
3.5 TECNOLOGIA MIMO.....	33
3.5.1 Diversidad.....	35
3.5.2 Esquema de Alamouti.....	37
3.5.3 Generalización a M receptores.....	40
3.5.4 Multiplexación.....	43
3.5.5 V-BLAST.....	43
4. ANALISIS DE RESULTADOS.....	49
4.1 Entorno de simulación.....	49
4.2 MIMO.....	49
4.2.1 Alamouti.....	49

4.2.2	V-BLAST .....	52
4.3	OFDM .....	56
4.4	MIMO-OFDM .....	62
5.	CONCLUSIONES .....	67
6.	TRABAJOS FUTUROS.....	68
	BIBLIOGRAFÍA.....	69
	ANEXOS.....	72

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Evolución de la tecnología celular .....	19
<b>Tabla 2.</b> Secuencia de codificación y transmisión de Alamouti .....	38
<b>Tabla 3.</b> Definición de los canales entre antenas .....	41
<b>Tabla 4.</b> Notación para las señales recibidas .....	42
<b>Tabla 5.</b> Parámetros de simulación Alamouti .....	50
<b>Tabla 6.</b> Parámetros de simulación V-BLAST .....	53
<b>Tabla 7.</b> Parámetros de simulación OFDM.....	56
<b>Tabla 8.</b> Parámetros de simulación MIMO (Alamouti)-OFDM.....	63
<b>Tabla 9.</b> Parámetros de simulación MIMO (V-BLAST)-OFDM.....	65



## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Célula de telefonía móvil.....	17
<b>Figura 2.</b> Mapa de cobertura mundial .....	21
<b>Figura 3.</b> Modulación monoportadora y multiportadora.....	23
<b>Figura 4.</b> Diagrama modulación OFDM.....	25
<b>Figura 5.</b> Prefijo Cíclico .....	27
<b>Figura 6.</b> Ejemplo de una señal con desvanecimiento .....	29
<b>Figura 7.</b> Propagación Multitrayecto.....	30
<b>Figura 8.</b> FDP de las distribuciones Rayleigh y Rice.....	32
<b>Figura 9.</b> Tecnología de múltiples antenas .....	34
<b>Figura 10.</b> Sistema de diversidad.....	36
<b>Figura 11.</b> Esquema de Alamouti de doble rama con un receptor .....	39
<b>Figura 12.</b> Esquema para dos antenas transmisoras y dos receptoras .....	41
<b>Figura 13.</b> Arquitectura V-BLAST .....	44
<b>Figura 14.</b> Alamouti BPSK .....	50
<b>Figura 15.</b> Alamouti QPSK .....	51
<b>Figura 16.</b> Alamouti 16-QAM.....	52
<b>Figura 17.</b> V-BLAST BPSK .....	53
<b>Figura 18.</b> V-BLAST QPSK .....	54
<b>Figura 19.</b> V-BLAST 16-QAM.....	55
<b>Figura 20.</b> Bits generados símbolo OFDM .....	57
<b>Figura 21.</b> Mapeador 16-QAM.....	57
<b>Figura 22.</b> Parte real del símbolo OFDM antes y después de IFFT .....	58
<b>Figura 23.</b> Parte imaginaria del símbolo OFDM antes y después de IFFT.....	59
<b>Figura 24.</b> Adición prefijo cíclico.....	59
<b>Figura 25.</b> Retiro prefijo cíclico.....	60
<b>Figura 26.</b> Proceso de FFT .....	61
<b>Figura 27.</b> Demapeo 16-QAM .....	61
<b>Figura 28.</b> Diagrama sistema MIMO-OFDM.....	62
<b>Figura 29.</b> MIMO-OFDM usando esquema de Alamouti .....	64
<b>Figura 30.</b> MIMO-OFDM usando esquema V-BLAST .....	65

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Funciones Matlab	72

## GLOSARIO

**APLICACION:** Programa informático que realiza una función determinada

**CANAL:** Medio de transmisión por el que viajan las señales portadoras de la información

**COBERTURA:** Extensión territorial que alcanza un servicio de telecomunicaciones.

**DESVANECIMIENTO:** Pérdida de la señal enviada por el transmisor, debido a las condiciones del canal.

**DOPPLER:** Nombre dado al efecto producido por el cambio de frecuencia de una onda producida por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador.

**ESPECTRO:** Medio por el cual se transmiten las ondas de radio electromagnéticas, las cuales permiten hacer uso de medios de comunicación como la radio, televisión, Internet, telefonía móvil y televisión digital terrestre, entre otros.

**FIABILIDAD:** Probabilidad de que una máquina, un aparato o un dispositivo funcionen correctamente bajo ciertas condiciones y en un periodo de tiempo determinado.

**INALAMBRICO:** Sistema de comunicación eléctrico sin alambres conductores.

**INTERFERENCIA:** Alteración en la recepción de una señal mediante la introducción de otra señal perturbadora.

**LATENCIA:** Suma de retardos temporales dentro de una red, producidos por la propagación y transmisión de paquetes dentro de la red.

**MULTIMEDIA:** Tecnología que utiliza distintos medios de comunicación combinados, como texto, fotografías, imágenes de vídeo o sonido, con el propósito de educar o entretener.

**PORTADORA:** Forma de onda, que es modulada por una señal que se quiere transmitir.

**REPLICAS:** Copias similares de la señal transmitida que llegan a través de diferentes trayectorias y con diferentes retardos.

## ACRONIMOS

**3GPP:** 3rd Generation Partnership Project

**4G:** Fourth Generation

**BER:** Bit Error Rate

**CDMA:** Code Division Multiple Access

**FDM:** Frequency-Division Multiplexing

**FFT:** Fast Fourier Transform

**GSM:** Global System for Mobile Communications

**HSDPA:** High-Speed Downlink Packet Access

**IFFT:** Inverse Fast Fourier Transform

**ISI:** Intersymbol Interference

**LTE:** Long Term Evolution

**MIMO:** Multiple Input Multiple Output

**MMSE:** Minimum Mean Squared Error

**OFDM:** Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

**OSTBC:** Orthogonal Space-Time Block Code

**QoS:** Quality of Service

**SC-FDMA:** Single-Carrier Frequency Division Multiple Access

**SNR:** Signal to Noise Ratio

**V-BLAST:** Vertical Bell Labs Layered Space-Time

## RESUMEN

El proyecto se encamino hacia la realización de un componente de software para la simulación de un sistema LTE de telefonía móvil en el cual se permite la evaluación de estructuras MIMO de diversidad y multiplexación.

La modulación OFDM utilizada por LTE para el enlace descendente fue la utilizada junto a las estructuras MIMO para su implementación en cada una de sus etapas. De igual manera se evaluó la capacidad del sistema para reducir los efectos del canal representado en desvanecimientos tipo Rayleigh, típicos de un sistema selectivo en frecuencia.

Esta evaluación se realizó a través de la tasa de error de bit (BER) versus la relación señal a ruido (SNR). De esta forma se pudo cuantificar el efecto que tienen los diferentes arreglos de antenas sobre el rendimiento del sistema, incluyendo estructuras MIMO que se encuentran fuera de los estándares actuales de la tecnología LTE y que podrían dar un aporte valioso en cuanto al rendimiento bajo determinadas condiciones.

Los resultados obtenidos en la simulación validan el correcto funcionamiento del sistema y permite sacar conclusiones valiosas acerca del rendimiento de la tecnología LTE de cuarta generación (4G) de telefonía móvil.

Palabras claves: LTE, OFDM, MIMO, Rendimiento, 4G.

## **ABSTRACT**

The project is about the realization of software's component for the simulation of a LTE mobile telecommunication system, in which allows the evaluation of MIMO structures of multiplexing and diversity gain.

This evaluation was conducted through the BER (Bit Error Rate) versus the SNR (Signal to Noise Ratio). In this way, it was possible to quantify the effect of different antenna arrays on performance system, including MIMO structures that are beyond current standards and LTE technology that could make a valuable contribution in performance of telecommunications systems under certain terms. The OFDM modulation was used with MIMO structures to simulate LTE physical layer.

The simulation results validate the correct operation of the system and allow valuable conclusions about the performance of LTE as fourth generation (4G) of mobile telephony.

Keywords: LTE, OFDM, MIMO, Performance, 4G.

## 1. INTRODUCCION

El desarrollo de las telecomunicaciones en los últimos años ha contribuido en el mejoramiento de los servicios ofrecidos actualmente a los clientes; logrando que voz, datos y contenidos multimedia sean provistos con altos niveles de calidad.

Los cambios que se vienen produciendo han influido de manera significativa en nuestras actividades diarias. En el caso de la telefonía móvil se pasó de contar con grandes terminales analógicos con un servicio de calidad moderada y baja cobertura a tener teléfonos móviles con múltiples servicios, reducido tamaño y una cobertura casi mundial, hasta llegar a convertirse en una herramienta fundamental en la vida cotidiana.

El término cuarta generación (4G) hace referencia a un tipo de acceso móvil de banda ancha con una alta capacidad de red, conectividad a través de redes heterogéneas y alta calidad del servicio (QoS).

El estándar 3GPP (3rd Generation Partnership Project) define la tecnología LTE (Long Term Evolution) como la evolución de la norma 3GPP UMTS (3G). El objetivo principal de LTE es la de mejorar las actuales redes móviles basadas en UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), especialmente la mejora de la eficiencia del espectro, costos de despliegue reducidos y la mejora en los servicios [1].

Una parte relevante en la tecnología LTE es la técnica de múltiples antenas llamada MIMO (Multiple Input Multiple Output) con el objetivo de aumentar la cobertura y las capacidades en la capa física. La tecnología MIMO proporciona a LTE la capacidad de mejorar aún más su rendimiento de datos y la eficiencia espectral que se obtiene con el uso de OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing).

El sistema implementado permite caracterizar parte de la tecnología LTE; para la realización del mismo se usó el esquema para el enlace descendente OFDM, implementando cada una de sus etapas y midiendo su desempeño bajo diferentes configuraciones de antenas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Implementar un componente de software basado en tecnología LTE para evaluar estructuras MIMO de diversidad y multiplexación.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Análisis del desempeño que tienen las estructuras MIMO de diversidad y multiplexación sobre tecnología LTE.
- ✓ Desarrollo de un componente de software que permita comparar el desempeño de arreglos de antenas MIMO adoptados y diferentes a los utilizados actualmente en tecnología LTE.
- ✓ Implementación y evaluación de estructuras alternativas que no son consideradas en la tecnología LTE que permitan tener un desempeño significativo bajo determinadas condiciones.



### 3. TECNOLOGIA PARA 4G (LTE)

#### 3.1 RESEÑA HISTORICA

La evolución en las comunicaciones móviles ha permitido llegar a tener grandes transferencias de datos en forma eficiente y rentable. Con el aumento de la velocidad y la disminución de la latencia, los usuarios pueden disfrutar de una amplia gama de servicios y aplicaciones, incluso mientras se encuentran en movimiento.

Para entender a lo que se hace referencia con el término 4G hay que remontarse a los inicios de las comunicaciones móviles o lo que se conoció como primera generación, en donde la telefonía móvil se caracterizaba por ser analógica y estrictamente para servicios de voz.

**Figura 1.** Célula de telefonía móvil



Fuente: <http://clickpaysuccess.com/frederick-mann/>

En la segunda Generación (2G) que aparece alrededor de 1990 se desarrolla el sistema GSM (Global System for Mobile Communications), el cual soporta velocidades de información más altas para voz. Estas redes 2G involucraron en

los servicios de telefonía celular la capacidad de enviar SMS (Short Message Service).

El paso a la tercera generación no fue directo. Las Redes 2.5G también conocidas como generación de transición trajeron consigo nuevos servicios como sistemas de mensajería multimedia y una mayor velocidad de transferencia de datos a través de tecnologías como GPRS (General Packet Radio Service) y EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution).

Hasta el momento servicios como la conexión a internet desde el móvil, videoconferencias y televisión no eran posibles por la baja capacidad de transmisión de datos que poseían las redes. Basado en un sistema nuevo llamado UMTS que a su vez hace uso de la tecnología CDMA (Code Division Multiple Access) las redes 3G (tercera generación) alcanzarían velocidades elevadas y añaden un factor clave en las comunicaciones modernas como es la seguridad en las redes.

La tecnología de transición al 4G. Las redes 3.5G son básicamente un 3G potenciado (HSDPA), el resultado de modificaciones a la tecnología UMTS, haciendo llegar la misma a velocidades teóricas de hasta 14Mbps a través del uso entre otros de receptores avanzados y antenas inteligentes MIMO.

El término 4G es usado para describir la siguiente evolución completa en la comunicación inalámbrica. Con la llegada de la cuarta generación se espera proporcionar una solución IP (Internet Protocol) completa en las aplicaciones multimedia y servicios entregados al usuario sobre la base "Anytime, Anywhere" con una tasa satisfactoria de datos de alta calidad y de alta seguridad que no son alcanzables usando el actual 3G [1]. En la tabla 1 se detallan las principales características en la evolución de la tecnología móvil.

**Tabla 1.** Evolución de la tecnología celular

<b>Tecnología/ Características</b>	<b>2G</b>	<b>2.5G</b>	<b>3G</b>	<b>4G</b>
<b>Servicios</b>	Voz predominante Mensajería corta	Capacidad alta. Datos en paquetes	Alta calidad integrada de audio, video y datos	Acceso dinámico a la información sobre IP
<b>Estándar</b>	TDMA, CDMA, GSM	GPRS, EDGE	WCDMA, CDMA-2000	LTE, WiMAX
<b>Ancho de banda</b>	1.9 kbps	14.4 kbps	2 Mbps	200 Mbps
<b>Conmutación</b>	Circuitos	Circuitos	Circuitos y paquetes	Paquetes
<b>Multiplexación</b>	TDMA, CDMA	TDMA, CDMA	CDMA	OFDMA
<b>Técnicas multi-antenas</b>	No soportado	No soportado	Soporte limitado	Soportado
<b>Servicio Multicast/broadcast</b>	No soportado	No soportado	No soportado	Soportado

Fuente: S. Akhtar "2G-5G Networks: Evolution of Technologies". 2008.

### 3.2 LTE

LTE se postula como gran candidato a convertirse en estándar 4G. Se basa en un conjunto de tecnologías pensadas para que todas las comunicaciones de una red de telefonía móvil se originen mediante el protocolo IP que se usa en Internet. Esto implicaría que la totalidad del tráfico de la red de telefonía estaría compuesta por datos.

Las especificaciones de LTE emanan del 3GPP que nació en 1998 con el objetivo de especificar 3G. Puede decirse que el primer paso hacia LTE se llevó a cabo en noviembre de 2004, cuando 3GPP organizó un Workshop en Toronto (Canadá), en el que se presentaron unas 40 contribuciones con ideas, propuestas, etc. En el propio Workshop se identificaron una serie de requisitos de alto nivel, como un coste por bit reducido, mejora en la provisión de servicios, flexibilidad en el uso de las bandas frecuenciales, arquitectura simplificada con interfaces abiertos, consumo de potencia en el terminal razonable, etc [2].

En diciembre de 2004 se creó el Study Item “Evolved UTRA and UTRAN” para la evolución hacia una tecnología de acceso de elevada velocidad de transmisión, baja latencia y optimizada para la transmisión de paquetes, de modo que con ello quedase asegurada la competitividad de las soluciones 3GPP en un horizonte temporal largo [3].

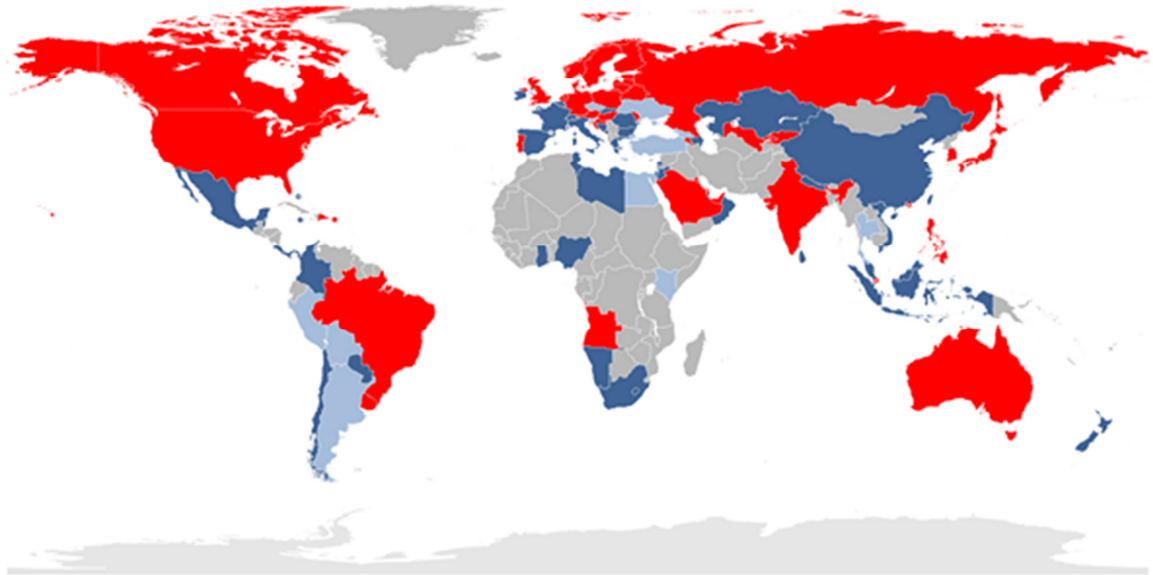
Los requisitos de LTE se pueden resumir en lo siguiente [4]:

- Aumento de las tasas de datos de los usuarios, llegando a velocidades picos downlink (enlace de bajada) y uplink (enlace de subida) de hasta 100 Mbps y 50 Mbps respectivamente.
- Reducción de los retrasos. Menor tiempo en establecer la conexión, reduciendo la latencia de transmisión.
- Uniformidad de la prestación de servicios.
- Reducción del costo por bit, lo que implica mejorar la eficiencia espectral.
- Arquitectura de red simplificada. Separación del plano de usuario y el plano de control por medio de interfaces abiertas.
- Flexibilidad en la utilización del espectro efectuando una planificación de frecuencia, asignando al usuario el canal que tenga mejores condiciones en se momento.
- Movilidad sin límites, incluso entre diferentes tecnologías de acceso de radio. En lo posible el handover entre las celdas debe ser sin interrupciones, generando una transmisión fiable.
- Consumo mínimo de energía para el terminal móvil.

Los cambios necesarios sobre las actuales redes para el despliegue de LTE son mínimos y pueden ser aplicados gradualmente. Esta propiedad la convierte en la apuesta mayoritaria de las empresas operadoras y de los fabricantes de móviles para la evolución hacia la cuarta generación.

En la figura 2 se puede observar el mapa de cobertura mundial de la tecnología LTE. El color rojo denota los países con servicio comercial de 4G/LTE en la actualidad. Con azul oscuro están aquellos en procesos finales de implementación. Por otro lado el azul claro indica los países que se encuentran en proceso de pruebas, y el gris indica aquellos con pocos planes de penetración de la tecnología LTE hasta el momento.

**Figura 2.** Mapa de cobertura mundial



Fuente: <http://www.gsacom.com>

En esta gráfica se observa que la mayoría de los países desarrollados ya prestan a nivel comercial el servicio de la tecnología LTE, lo cual muestra claramente el rumbo que va a tener esta tecnología a nivel global.

LTE tiene muchos puntos para convertirse en el nuevo estándar de las redes inalámbricas de alta velocidad, y puede añadirse a las redes existentes sin necesidad de añadir infraestructura adicional. La llegada de esta tecnología permitirá que la prometida videoconferencia, la cual fue una de las promesas incumplidas por la tecnología 3G sea una realidad [5].

La novedad de LTE es la interfaz radioeléctrica basada en OFDM para el enlace descendente y SC-FDMA (Single-carrier Frequency Division Multiple Access) para el enlace ascendente.

La consideración de técnicas de transmisión como OFDM consistente en multiplexar un conjunto de símbolos sobre un conjunto de subportadoras ortogonales, entre sí, permite eliminar los efectos de la interferencia intersimbólica gracias a la introducción del denominado prefijo cíclico, tal y como se explicara con detalle más adelante.

### 3.3 MODULACION OFDM

**3.3.1 Introducción OFDM.** La multicanalización por división de frecuencias ortogonales OFDM ha atraído mucho la atención en los últimos años y es aplicada ampliamente. Surge como una alternativa potente para los esquemas de modulación convencional debido a su capacidad de transmisión de alta tasa de datos con una alta eficiencia de ancho de banda, implementación simple y robustez ante canales con desvanecimientos selectivos en frecuencia.

En contraposición a lo que vemos en las típicas comunicaciones monoportadora o Single Carrier (SC) ilustrada en la figura 3-a, donde cada símbolo se transmite serialmente, es decir uno a la vez, ocupando todo el ancho de banda disponible; en una modulación multiportadora se envían los símbolos paralelamente en subportadoras adyacentes [6], usando la técnica de división de frecuencias.

La actual tecnología OFDM es una evolución de FDM (Frequency-Division Multiplexing), el cual consistía en dividir la información en  $N_c$  bloques. Cada uno de estos bloques sería multiplicado por una portadora diferente, con el propósito de reubicar los espectros de cada una de estas porciones en que ha sido dividida la señal. La modulación FDM es representada en la figura 3-b.

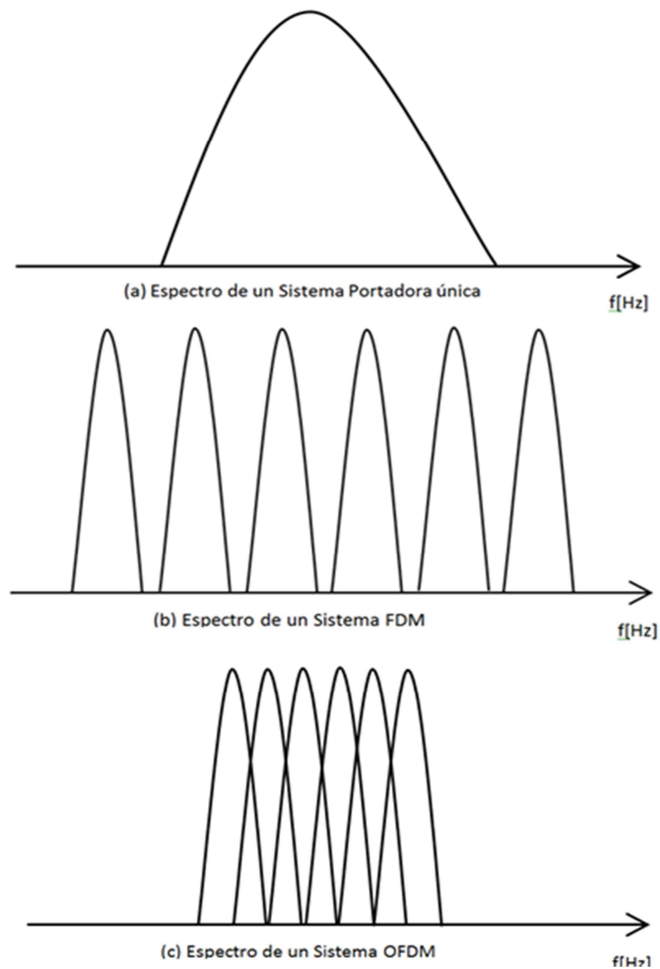
FDM representaba una alta ineficiencia espectral ya que requería de bandas de guarda para evitar la mezcla entre subportadoras que impidiera la recuperación de la información en el demodulador. Para mejorar la eficiencia espectral de este sistema aparece el concepto de portadoras ortogonales, el cual permite recuperar la información a pesar el traslape espectral que produce. A raíz de este concepto aparece como tal OFDM, el cual puede verse ilustrado en la figura 3-c.

Este tipo de transmisión reduce la interferencia intersímbolo ISI (Inter Symbol Interference) haciendo el tiempo de símbolo lo suficientemente grande para que los retardos introducidos por el canal sean una fracción insignificante de la duración del símbolo. A nivel matemático si se usan  $N$  subportadoras y cada subportadora es modulada utilizando  $M$  símbolos, la señal OFDM es expresada como [7]:

$$v(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2k\pi t/T}, \quad 0 \leq t < T$$

Donde  $X_k$  representa los símbolos de datos,  $N$  es el número de subportadoras, y  $T$  es el tiempo del símbolo OFDM.

**Figura 3.** Modulación monoportadora y multiportadora



Fuente: [http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtvdentri1/pagina\\_3.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtvdentri1/pagina_3.asp)

El espacio entre las subportadoras  $1/T$  hace que los símbolos OFDM sean ortogonales entre cada periodo de símbolo. La propiedad de ortogonalidad es expresada de la siguiente forma:

$$\frac{1}{T} \int_0^T (e^{j2\pi k_1 t/T}) * (e^{j2\pi k_2 t/T}) dt = \begin{cases} 1, & k_1 = k_2 \\ 0, & k_1 \neq k_2 \end{cases}$$

Para evitar la interferencia entre símbolos adyacentes (ISI) en canales con desvanecimiento multitrayecto se inserta un intervalo guarda antes del bloque OFDM. Este intervalo de guarda es conocido como prefijo cíclico. Tomando en

cuenta este intervalo, la señal OFDM se puede expresar también de la siguiente manera [7]:

$$v(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2knt/T}, \quad -T_g \leq t < T$$

De manera conceptual OFDM ha existido durante décadas; pero su implementación real y a costos aceptables no fue posible sino con la llegada y propagación de tecnologías como los microprocesadores de alta velocidad de procesamiento y los dispositivos de lógica programable para poder hacer fiable el procesamiento digital requerido. Así se ha llegado a una tecnología muy compatible con aplicaciones de comunicaciones inalámbricas [11].

**3.3.2 Características de OFDM.** Una vez hecha esta breve exposición de lo que es OFDM, se mencionan algunas ventajas e inconvenientes de esta modulación [8].

#### **Ventajas de OFDM**

- Elevada eficiencia espectral al utilizar múltiples portadoras que pueden ser ubicadas en un ancho de banda reducido permitiendo así transmitir elevadas tasas de información.
- Eliminación de Interferencias Intersímbolo (ISI), además de robustez frente a Interferencias Interportadora (ICI) al introducir el Prefijo Cíclico (CP).
- Ecuación simplificada. Más sencilla que la ecuación adaptativa de las modulaciones monoportadoras.
- Robustez ante interferencias multitrayecto: si un determinado rango de frecuencias sufre interferencias severas, dicho rango puede ser deshabilitado para la transmisión.
- Implementación simple y eficiente gracias a la utilización de los algoritmos de IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) y FFT (Fast Fourier Transform) para la modulación y demodulación respectivamente.

#### **Inconvenientes de OFDM**

- Una alta relación Peak Average Power Ratio (PAPR). Es decir, una gran diferencia entre la potencia máxima y la potencia media de la señal modulada, lo que dificulta la elección de un punto de trabajo en potencia.



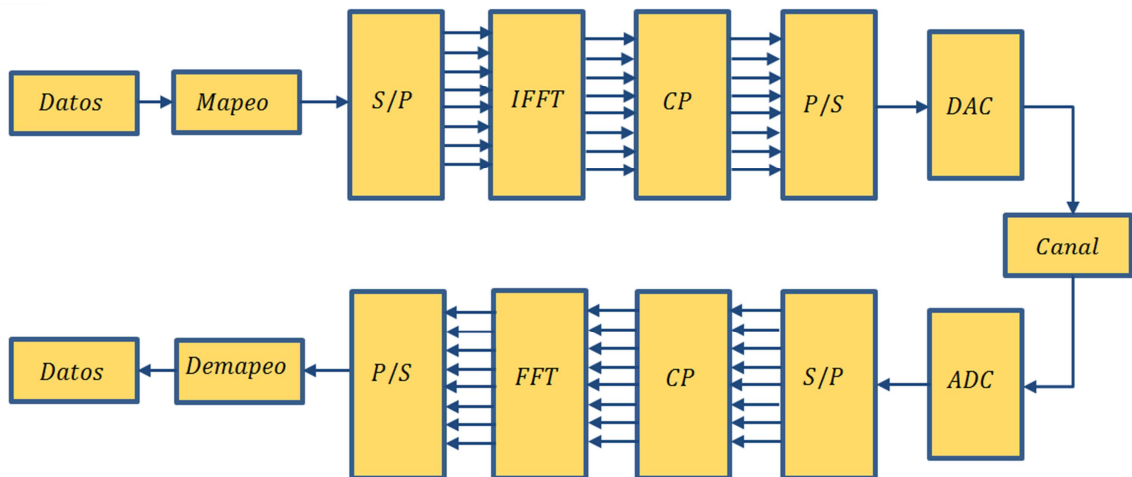
- Son altamente sensibles a los ruidos de fase. La presencia de una distorsión no lineal en la cadena de transmisión afecta de manera crítica las prestaciones de estos sistemas imponiendo severos límites a su viabilidad.
- La necesidad de los intervalos de guarda con prefijo cíclico suponen un costo en energía que acaba suponiendo una menor eficiencia en energía.
- Mayor costo de los sistemas transmisores y receptores.

**3.3.3 Etapas del sistema OFDM.** Para la implementación de OFDM se deben tener en cuenta varios parámetros como son: el número de subportadoras, el esquema de modulación y el intervalo de guarda a utilizar.

El número de subportadoras  $N_c$  se determina basándose en el ancho de banda del canal, la velocidad de los datos y la duración de símbolo útil. Las portadoras están separadas por el inverso de la duración del símbolo útil [9]:

$$N = \frac{1}{T}$$

**Figura 4.** Diagrama modulación OFDM



El número de portadoras corresponde al número de puntos complejos que son procesados por la FFT. Se pueden utilizar subportadoras del rango de varias miles, así como ajustar la velocidad de datos y la longitud del prefijo cíclico dependiendo de la aplicación.

**3.3.4 Transmisión OFDM.** Como se muestra en la figura 4, la señal de entrada de un sistema OFDM es una trama serial de datos. Estos datos pasan a un formato de  $n$  bits de longitud de acuerdo al esquema de modulación utilizado como M-PSK (Modulación por desplazamiento de fase) o M-QAM (Modulación de amplitud en cuadratura). A la salida del mapeador se tiene símbolos ortogonales entre sí y a cada uno de ellos se les asignará una subportadora por medio de la IFFT.

El conversor serie a paralelo organiza los datos para poder introducirlos a la IFFT y así generar los símbolos OFDM. La IFFT genera múltiples portadoras a diferentes frecuencias ortogonales dividiendo el ancho de banda disponible entre un número  $N_c$  subportadoras. La trama de datos en paralelo sujeta al proceso IFFT constituye la modulación OFDM. La IFFT convierte un número de puntos de datos complejos (amplitud y fase de cada componente) de longitud  $N$  la cual es una potencia de 2, en una señal en el dominio del tiempo de igual número de puntos.

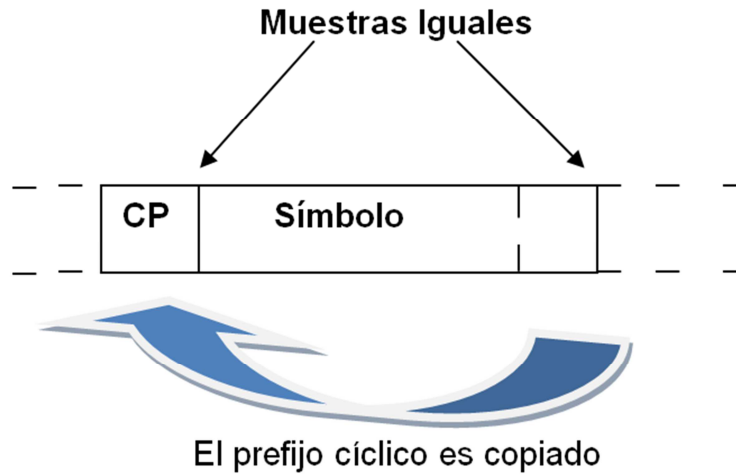
Después de la modulación OFDM se agrega el prefijo cíclico en cada símbolo para suprimir la interferencia intersímbolo causado por la distorsión multitrayectoria.

En la práctica la señal OFDM se pasa por un conversor D/A para producir una señal análoga en banda base, la cual es modulada en radiofrecuencia para ser transmitida. La señal se transmite a través de un canal que es caracterizado por su selectividad en frecuencia y por la adición de ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN) como será explicado más adelante.

**3.3.5 Prefijo cíclico.** Una de las mayores ventajas de OFDM es su eficiencia atajando los efectos que produce el canal multitrayecto. En la mayoría de aplicaciones de OFDM, se inserta un intervalo de guarda entre los símbolos OFDM para prevenir las interferencias intersímbolo (ISI), que posteriormente será eliminado en recepción. Este intervalo de guarda se elige con duración mayor que el máximo retardo de entre todos los recibidos del mismo símbolo, de forma que las componentes debidas al retardo de un símbolo no interfieran en el siguiente.

Sin embargo, en ese caso, mientras que la ISI no afecta, la interferencia interportadora (ICI) puede causar la pérdida de ortogonalidad entre las subportadoras. Para anticiparnos al problema de la ICI, normalmente el símbolo OFDM se extiende cíclicamente en el intervalo de guarda. Así, cualquier réplica directa o retrasada de la señal continuará teniendo un número entero de ciclos. Esto asegura la ortogonalidad de los distintos subcanales siempre que el retardo sea menor al intervalo de guarda elegido. La extensión cíclica se implementa como un prefijo cíclico (PC) tal y como se muestra en la figura 5.

**Figura 5.** Prefijo Cíclico



Se define la duración del PC (en número de muestras) por el entero  $N_{pc}$  que debe ser mayor que la longitud de la respuesta al impulso del canal para evitar efectivamente ISI e ICI. Se copian y pegan al principio los  $N_{pc}$  últimos bits del símbolo.

La energía que se debe transmitir incrementa con la longitud del prefijo cíclico. La pérdida en SNR debida a la inserción del PC podemos calcularla como:

$$SNR_{loss} = -10 \log_{10} \left( \frac{N_o}{N_o + N_{pc}} \right)$$

Donde  $N_{pc}$  es la longitud del prefijo cíclico y  $N_o$  la longitud original del símbolo OFDM.

El prefijo cíclico trabaja específicamente durante la transmisión, donde, gracias a las propiedades de la transformada de Fourier, se realiza una convolución circular con el canal [10], dando más elementos a favor de la señal en cada símbolo. Luego, en el receptor, las muestras que lo conforman son extraídas para nuevamente tener  $N_{FFT}$  muestras.

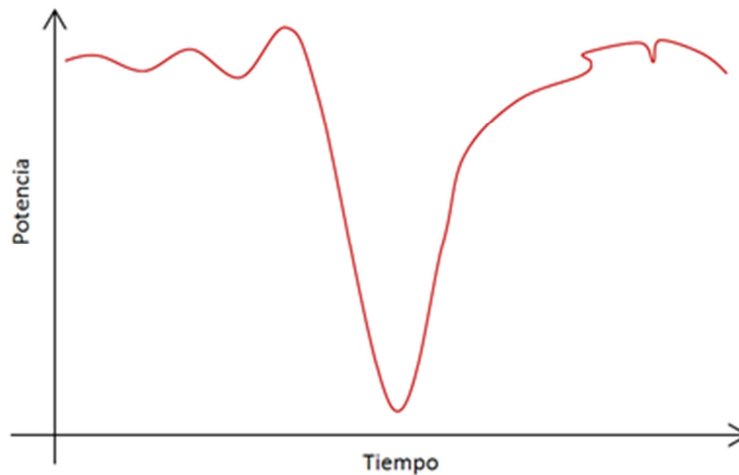
### 3.4 CANAL INALAMBRICO

El canal de radio se caracteriza por recibir varias réplicas de la señal, es decir, la señal llega al receptor a través de diferentes trayectorias y con diferentes retardos. Tienen generalmente diferentes desplazamientos en fase y, en consecuencia, pueden sumarse teniendo como resultado un fenómeno de desvanecimiento de la señal. En la figura 6 se muestra una señal recibida que ha sufrido desvanecimiento [11].

Los efectos del canal inalámbrico sobre la señal que se propaga se clasifican en dos grandes grupos [12]:

- Efectos de gran escala: los cuales se contabilizan en términos de la pérdida de propagación. Estos efectos se deben a la obstaculización de la señal por grandes objetos del entorno de propagación, tales como edificios, montañas, así como a la atenuación que sufre la señal con la distancia entre transmisor y receptor. En este caso, los cambios temporales que experimenta el canal son debidos a los movimientos del receptor (o transmisor) que involucran distancias muy superiores a la longitud de onda de operación del sistema, por lo que la variación temporal del canal se produce muy lentamente en comparación con el periodo de símbolo del sistema. La pérdida de propagación del trayecto, medida en unidades logarítmicas, se compone de una componente media constante y una componente aleatoria con función densidad de probabilidad log-normal que modela la variación de la pérdida del trayecto debida al movimiento aleatorio del móvil en las distancias anteriormente comentadas.
- Efectos de pequeña escala: por su parte, se deben a las interferencias constructiva y destructiva de las señales recibidas por múltiples trayectos en el receptor. La variabilidad temporal del canal se debe a los movimientos del receptor (o transmisor) que involucran distancias del orden de la longitud de onda de operación del sistema. Estos efectos se modelan a través de la respuesta impulsiva del canal o, de forma equivalente, de la respuesta en frecuencia del mismo.

**Figura 6.** Ejemplo de una señal con desvanecimiento

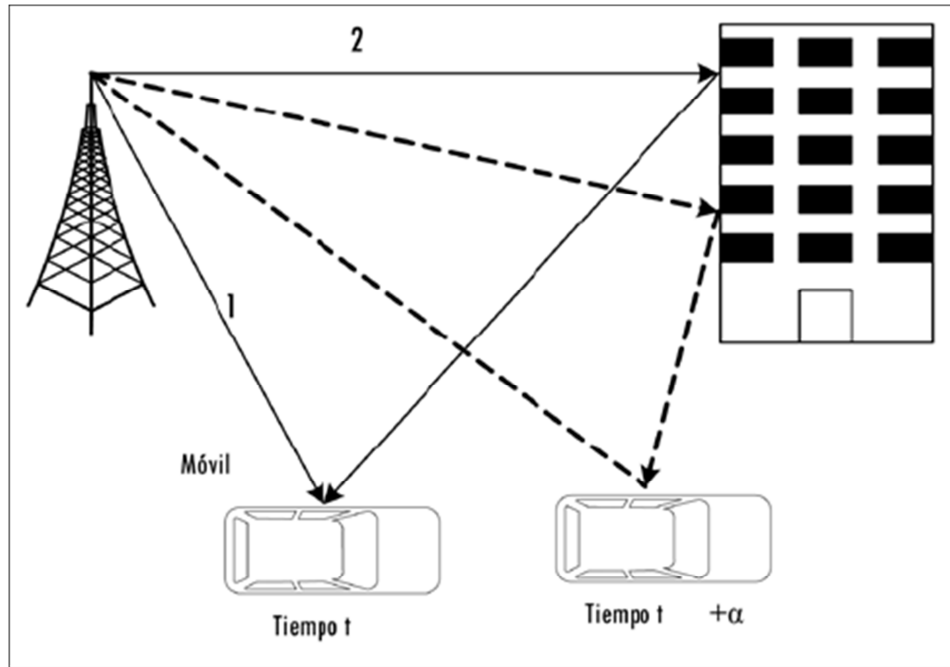


Fuente: <http://desvanecimientosradioenlaces.wikispaces.com>

**3.4.1 Canal multitrayecto.** Una de las características fundamentales de las comunicaciones móviles es la propagación multitrayecto (multipath). Este tipo de propagación consiste en que entre el transmisor y el receptor existe más de un camino de propagación, ya que la señal radio que se propaga no es un rayo estrecho que va directamente de la antena transmisora a la receptora, sino un frente de onda amplio que se va difractando y reflejando a medida que encuentra obstáculos en su camino, como edificios altos, automóviles, montañas o irregularidades del terreno [8]. La figura 7 ilustra la propagación multitrayecto sufrida por una señal de radio.

El fenómeno de la propagación multitrayecto se puede resumir diciendo que al receptor llegan varias réplicas de la misma señal, con diferentes retardos entre ellas. Las primeras pueden contener valores significativos de energía, mientras que las restantes suelen llegar muy atenuadas y pueden despreciarse.

**Figura 7.** Propagación Multitrayecto



Fuente: <http://www.scielo.org.co/scielo>

**3.4.2 Selectividad en frecuencia.** Se considera que la transmisión se realiza con desvanecimiento plano (Flat Fading) si ( $B_c > B_s$ ). Es decir si el ancho de banda del canal es mayor que el ancho de banda de la señal a transmitir. En tal caso se conservan las características de la señal transmitida en el receptor. Si el ancho de banda del canal es menor que el ancho de banda de la señal a transmitir ( $B_c < B_s$ ) se presenta desvanecimiento selectivo en frecuencia. Bajo estas condiciones la respuesta al impulso del canal tiene un retardo de propagación (Delay Spread) más grande que el periodo de símbolo; lo cual tiene como consecuencia la presencia de ISI.

Dado que existen diversas versiones retardadas distinguibles de la señal transmitida, puede relacionarse cada una de ellas con un camino de propagación físico, y asociarlo con un camino de propagación individual o rayo. Si se transmite un impulso en un canal multicamino variable en el tiempo, la señal recibida aparece como un tren de impulsos, cada uno de ellos un eco de la señal transmitida [13]:

$$H(t, \tau) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l(t) \delta(\tau - \tau_l)$$

Donde  $\tau_l$  es el retardo de propagación asociado al rayo  $l$ -ésimo de los  $L$  ecos distinguibles y  $h_l(t)$  el valor de este mismo rayo en el instante de tiempo  $t$ , que a su vez se describe como un proceso multicamino en sí mismo.

La envolvente compleja de la señal de salida,  $y(t)$ , es la convolución de la señal de entrada,  $x(t)$ , con la respuesta al impulso del canal, y puede expresarse como:

$$Y(t) = \sum_{l=0}^{L-1} x(t - \tau_l) \cdot h_l(t)$$

Es decir, la salida del canal es la suma de varios ecos de la señal transmitida, cada uno de los cuales se puede considerar que ha pasado por un canal plano con desvanecimientos. Dicho de otra forma se considera que la señal transmitida puede quedar distorsionada de forma diferente a distintas frecuencias.

Una de las cualidades que se destaca en OFDM, es que al dividir el ancho de banda de la señal en varios anchos de banda más pequeños, con cada subportadora es enviada una parte de la información. De esta forma, si hay pérdidas en una subportadora, es recuperable puesto que corresponde a una pequeña parte del código.

La velocidad con la que cambia el canal en comparación a las variaciones de la señal determina un desvanecimiento lento o rápido, causado por el efecto Doppler. En las simulaciones realizadas a lo largo de este trabajo, así como en las principales referencias bibliográficas utilizadas se considera un desvanecimiento lento. En concreto, el modelo de canal utilizado será cuasi-estacionario, es decir, se convendrá que el canal no cambia al menos durante la transmisión de una ráfaga de datos.

**3.4.3 Modelos de desvanecimiento.** El fenómeno de desvanecimiento se suele describir estadísticamente mediante la distribución Rayleigh. La función de densidad de probabilidad (FDP) de una distribución Rayleigh está dada por:

$$P(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), & (0 \leq r \leq \infty) \\ 0, & (r < 0) \end{cases}$$

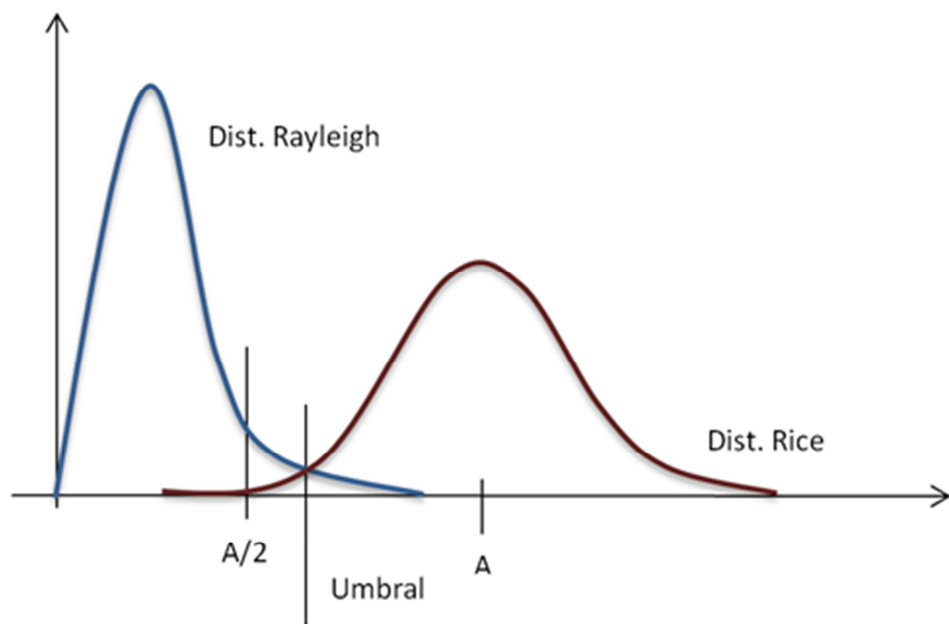
Donde  $\sigma$  es el valor cuadrático medio (amplitud) de la señal recibida,  $\sigma^2$  es su potencia media y  $r$  la envolvente de la señal.

Otra distribución habitual del desvanecimiento utilizada cuando existe una fuerte componente recibida en visión directa, es la distribución de Rice, cuya FDP sigue la ecuación [11]:

$$P(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{(r^2 + A^2)}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right), & (0 \leq r \leq \infty) \\ 0, & (r < 0) \end{cases}$$

Donde A es la amplitud de pico del trayecto dominante e  $I_0$  representa la función de Bessel de primera especie y orden cero. Para el caso en que A=0 no tenemos componente determinista y la función es la de Rayleigh. La figura 8 muestra las FDP de las distribuciones Rayleigh y Rice.

**Figura 8.** FDP de las distribuciones Rayleigh y Rice



Fuente: <http://cnx.org/content/m36884/latest/?collection=col11274/latest>



### 3.5 TECNOLOGIA MIMO

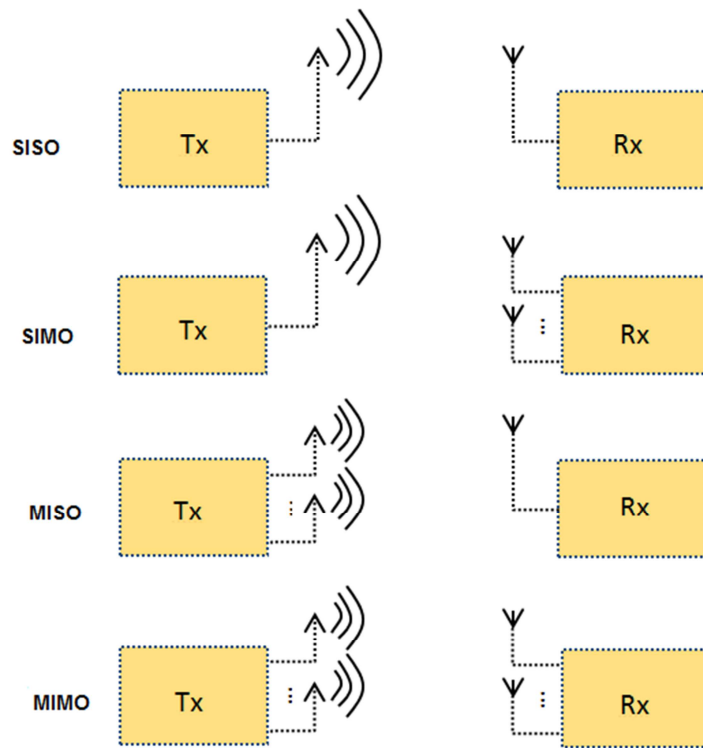
En los sistemas de comunicaciones inalámbricos uno de los principales problemas son los desvanecimientos provocados por la propagación multitrayecto. Estas dispersiones propias del canal de radio son comúnmente vistas como impedimentos para el mejoramiento de las comunicaciones inalámbricas. Sin embargo, a través de técnicas como MIMO estas pueden verse como una oportunidad para mejorar significativamente la capacidad y el rendimiento de los sistemas.

Mediante el uso de múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor en sistemas inalámbricos, los canales con dispersiones pueden ser explotados para crear múltiples enlaces paralelos sobre la misma banda.

La tecnología MIMO se basa especialmente en el trabajo desarrollado por Foschini en 1996 y por Teletar en 1999 y constituye un gran avance en el diseño de sistemas de comunicaciones inalámbricas, debido a que ofrece numerosos beneficios entre los que se encuentran el incremento de la fiabilidad del sistema, el incremento de la tasa de datos alcanzable, el incremento del área de cobertura y la disminución de la potencia requerida para transmitir [14].

La tecnología LTE utiliza la técnica de múltiples antenas con el objetivo de aumentar la cobertura y las capacidades en la capa física, sacándole provecho a las condiciones del canal. Estas técnicas de múltiples antenas pueden ser usadas tanto en transmisión como en recepción, o en ambos. Dependiendo la configuración que se tenga los sistemas MIMO se dividen en: MISO (*Multiple-Input Single-Output*) cuando se usan múltiples antenas en el transmisor, SIMO (*Single-Input Multiple-Output*) cuando se tiene el arreglo de antenas en el receptor. Utilizando esta denominación, los sistemas habituales con una única antena en cada extremo reciben el nombre de SISO (*Single-Input Single-Output*). Igualmente los que poseen múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor se conocen simplemente como MIMO. En la figura 9 se ilustra los distintos tipos de arreglos de antenas descritos.

**Figura 9.** Tecnología de múltiples antenas



Fuente: <http://www.evercom.com.tw/tran-c/msg/msg3/msg8.html>

Algunas de las desventajas en el uso de la tecnología MIMO son la complejidad del hardware, el procesamiento de la señal, el consumo de energía y el tamaño de los componentes tanto en el transmisor como en el receptor. Desventajas que se ven opacadas por las mejoras en el rendimiento de los sistemas que trae consigo MIMO. En LTE la configuración MIMO utilizada en el enlace ascendente se denomina SIMO, en el que hay una antena en el transmisor y dos en el receptor. Para el enlace descendente la configuración usada es de 2x2 o 4x4 antenas en el transmisor y receptor respectivamente.

Considerando las limitaciones expuestas los principales beneficios que trae consigo MIMO se resumen en:

- Tasa de bits: Permite la transmisión simultánea de múltiples tramas de datos, multiplicando la tasa de transmisión sin consumir más espectro. El caudal efectivo o throughput incrementa en un factor igual al número de señales transmitidas en paralelo por el mismo radiocanal y en el mismo tiempo [22].

- Eficiencia espectral: MIMO mejora la eficiencia espectral multiplicando al menos dos veces los bits transmitidos por Hz [22].
- Cobertura: Debido a las técnicas de diversidad se alcanzan mayores distancias sin ser necesario el aumento en la potencia de transmisión.
- Número de usuarios: El aumento de la capacidad del sistema trae consigo el incremento en el número de usuarios que pueden conectarse simultáneamente en un mismo canal de frecuencia.
- Costos: Debido al incremento en el número de usuarios por estación base, y a que con la misma potencia se mejora su alcance, se reduce el costo en la prestación del servicio de telefonía móvil.

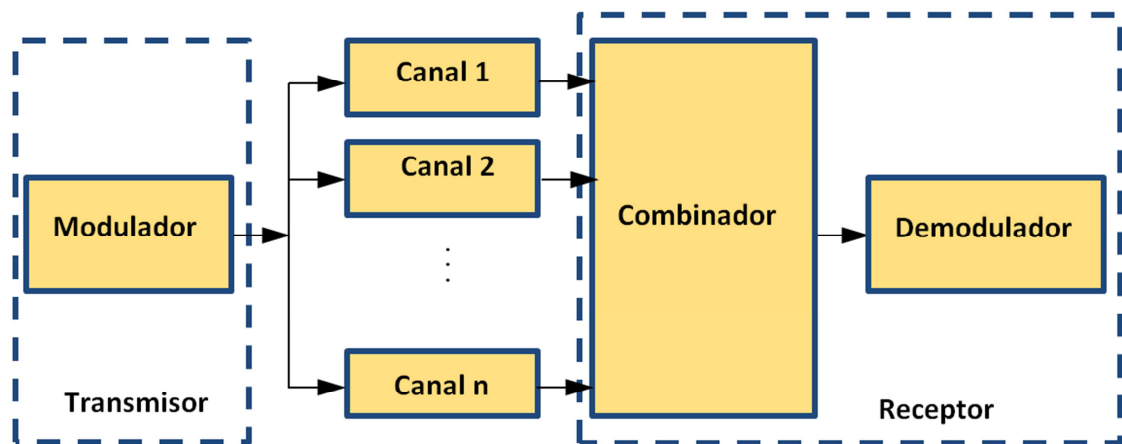
Estos beneficios que trae consigo MIMO se pueden aprovechar y explotar a través de las siguientes técnicas:

- Ganancia por diversidad: Mejora la fiabilidad del enlace, obtenida a través de la transmisión de los mismos datos sobre trayectos independientes.
- Ganancia por multiplexación espacial: Implica un incremento en la capacidad sin consumir un mayor ancho de banda, a través del uso de múltiples antenas a ambos lados de los enlaces inalámbricos.

**3.5.1 Diversidad.** Las técnicas de diversidad permiten sacar provecho de la afectación del sistema causada por el efecto multicamino, permitiendo en ocasiones evitar este deterioro a un costo relativamente bajo, pudiendo implementarse de diferentes formas tanto en transmisión como en recepción.

En la figura 10 [15] se observa como la señal se descompone en  $n$  réplicas de la señal original para ser transmitida posteriormente por distintos canales. Como cada canal posee un rango de frecuencias distinto es poco probable que ocurra un desvanecimiento profundo simultáneo en cada uno de ellos. Cuando la señal sufre afectaciones distintas en cada canal se dice que los canales están incorrelados.

**Figura 10.** Sistema de diversidad



Un índice de correlación bajo entre canales es suficiente para disminuir la relación señal a ruido (SNR) necesaria para alcanzar una determinada probabilidad de indisponibilidad. A esta disminución de SNR media se llama ganancia de diversidad. La clasificación de las principales técnicas de diversidad se describe a continuación:

- **Diversidad espacial:** También conocida como diversidad de antena, determina la señal independiente (no correlacionada) del proceso de información, por medio de un coeficiente de correlación dentro de un canal con desvanecimiento multicamino. En otras palabras se obtiene ubicando múltiples antenas tanto en transmisor como en receptor, con una suficiente distancia entre sí, las señales sufrirán desvanecimiento de manera independiente y se crearán diferentes caminos de señal. La separación entre las antenas depende de las condiciones del canal así como de la frecuencia portadora. En [16] definen que la diversidad espacial implica que en este tipo de entorno la posibilidad de perder la señal se reduce exponencialmente con el número de antenas incorreladas que se estén usando.
- **Diversidad en frecuencia:** Permite una transmisión de una sola fuente en dos frecuencias independientes, proporcionando una mejor protección contra interferencias y desvanecimiento multicamino. La diversidad en frecuencia aprovecha el hecho de que las frecuencias espaciadas respetando el ancho de banda de coherencia del canal sufren desvanecimientos independientes.
- **Diversidad en polarización:** Este tipo de diversidad se basa en el hecho de que las señales polarizadas horizontal y verticalmente presenta un grado

significativo de decorrelación. Esto quiere decir que cada señal tendrá diferentes amplitudes y fases. Luego de la suma de varias reflexiones aleatorias, las señales pueden llegar a mostrar un grado alto de decorrelación.

- **Diversidad temporal:** En esta técnica se transmite información repetidamente a espacios de tiempo, de tal forma que la repetición de la señal se haga en condiciones independientes de desvanecimiento. La razón para que la diversidad en el tiempo no sea tenida muy en cuenta es que la retransmisión de las señales reduce la velocidad de transmisión efectiva y debido a que la separación temporal entre transmisiones de las réplicas debe ser mayor que la duración media de los desvanecimientos, se produce también una considerable latencia [17].

En la teoría se suele aplicar las características de diversidad en el receptor para mejorar la calidad de la señal recibida, pero en la práctica esto no es deseable, debido a que el uso de múltiples antenas en el receptor conlleva que el dispositivo móvil lleve consigo aparte de las antenas circuitos de selección o conmutación, los cuales hacen que estos equipos sean grandes y costosos, sumándole a esto un consumo de energía elevado.

Con los argumentos expuestos resulta más económico implementar equipamiento a la estación base que al equipo móvil. Además teniendo en cuenta que la misma estación base que sirve de receptora en el enlace de subida (Uplink), hace las veces de transmisora en el enlace de bajada (Downlink) y que una estación base sirve a cientos o miles de móviles se entiende por qué las técnicas de diversidad han sido aplicadas casi exclusivamente a las estaciones base.

**3.5.2 Esquema de Alamouti.** En 1998 el ingeniero americano de origen iraní Siavash Alamouti publica un famoso artículo [18] en donde describe un esquema de diversidad en transmisión para complementar los estudios que ya existían sobre diversidad espacial, pero que sobre todo se centraban en la recepción. A través de este se podía mejorar la tasa de error y la capacidad de los sistemas de comunicaciones inalámbricas. Este esquema resultó ser efectivo en todas las aplicaciones donde la capacidad del sistema se veía limitada por el desvanecimiento multitrayecto.

El esquema de lazo abierto propuesto por Alamouti consta de dos antenas transmisoras y una antena receptora que fácilmente se extiende al uso de varias antenas receptoras. Este esquema se conocería como código espacio-tiempo de bloques (STBC). Los STBC proporcionan diversidad espacial completa y hacen uso de un algoritmo de decodificación sencillo que únicamente requiere de

procesamiento lineal sobre las señales recibidas. Dicho esquema fue generalizado más adelante por Tarokh para un número arbitrario de antenas transmisoras [19].

Los STBCs suelen ser ortogonales. Esto significa que el STBC está diseñado de tal forma que los vectores que representan cualquier par de columnas tomadas de la codificación de la matriz son ortogonales. El resultado de esto es óptima decodificación en el receptor. Su desventaja es que todos, excepto uno (Alamouti) de los códigos que satisfacen este criterio deben sacrificar algunas de sus tasas de datos.

La secuencia de transmisión consiste en que las dos antenas transmiten dos señales simultáneamente para un periodo de símbolo determinado. La señal transmitida por la primera antena se denotara como  $s_0$  y la transmitida por la segunda como  $s_1$ . En el siguiente período de símbolo la señal  $-s_1^*$  se transmite desde la antena uno y  $s_0^*$  desde la antena dos. Esta secuencia se muestra en la tabla 2.

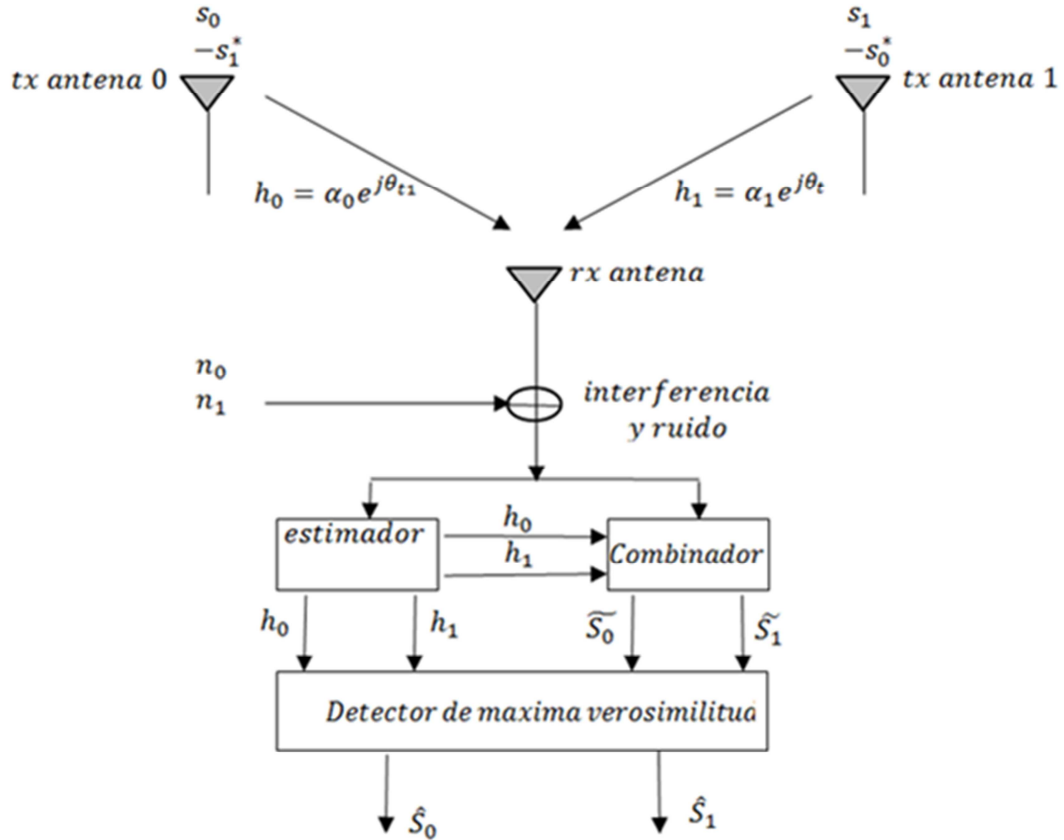
Puede observarse que se trata de una codificación en el espacio y en el tiempo. Así también se podría hacer en espacio y en frecuencia; de esta forma, en lugar de dos períodos de símbolo adyacentes se usarían dos portadoras adyacentes con codificación espacio-frecuencia. El problema es que esto involucraría una expansión del ancho de banda, y por tanto, una disminución en la capacidad del sistema.

**Tabla 2.** Secuencia de codificación y transmisión de Alamouti

<b>Símbolos transmitidos</b>	<b>Antena 1</b>	<b>Antena 2</b>
<b>Tiempo t</b>	$s_0$	$s_1$
<b>Tiempo t + T</b>	$-s_1^*$	$s_0^*$

La tasa de transmisión del código es unitaria al necesitar dos intervalos de tiempo para transmitir dos símbolos. La figura 11 muestra un diagrama detallado de la estructura de un sistema que usa el código de Alamouti con un receptor y detección de máxima verosimilitud [18].

**Figura 11.** Esquema de Alamouti de doble rama con un receptor



Fuente: S. Alamouti. IEEE Journal areas in communications. 1998

En la figura 11 se puede detallar el transmisor compuesto por las dos antenas y por el codificador. Igualmente se destaca el esquema del combinador en el lado receptor, y el decisor, en este caso de máxima verosimilitud. Si se considera el canal en el instante  $t$  se puede modelar como una distorsión multiplicativa compleja  $h_i(t)$ . Suponiendo que el desvanecimiento es constante a lo largo de dos símbolos consecutivos, se puede expresar [18]:

$$h_0(t) = h_0(t + T) = h_0 = \alpha_0 e^{j\theta_0}$$

$$h_1(t) = h_1(t + T) = h_1 = \alpha_1 e^{j\theta_1}$$

Donde  $T$  representa la duración del símbolo. Igualmente  $\alpha_1$  y  $\theta_1$  representan la amplitud y fase del canal. Conocido el canal, al igual que las señales transmitidas, podemos identificar las señales recibidas:

$$r_0 = r(t) = h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0$$

$$r_1 = r(t + T) = -h_0 s_1^* + h_1 s_0^* + n_1$$

Donde  $r_0$  y  $r_1$  son las señales recibidas en el instante  $t$  y  $t+T$  y donde  $n_0$  y  $n_1$  representan el ruido del receptor y las interferencias.

El combinador produce las siguientes señales combinadas que posteriormente son enviadas al decisor:

$$\tilde{s}_0 = h_0^* r_0 + h_1 r_1^*$$

$$\tilde{s}_1 = h_1^* r_0 - h_0 r_1^*$$

Donde  $\hat{h}_i$  representa la estimación del canal  $h_i$ . Sustituyendo tenemos

$$\tilde{s}_0 = (\alpha_0^2 + \alpha_1^2) s_0 + h_0^* n_0 + h_1 n_1^*$$

$$\tilde{s}_1 = (\alpha_0^2 + \alpha_1^2) s_1 - h_0 n_1^* + h_1^* n_0$$

Estas señales son enviadas al detector de máxima verosimilitud que, para cada señal  $S_0$  y  $S_1$ , utiliza determinadas reglas de decisión.

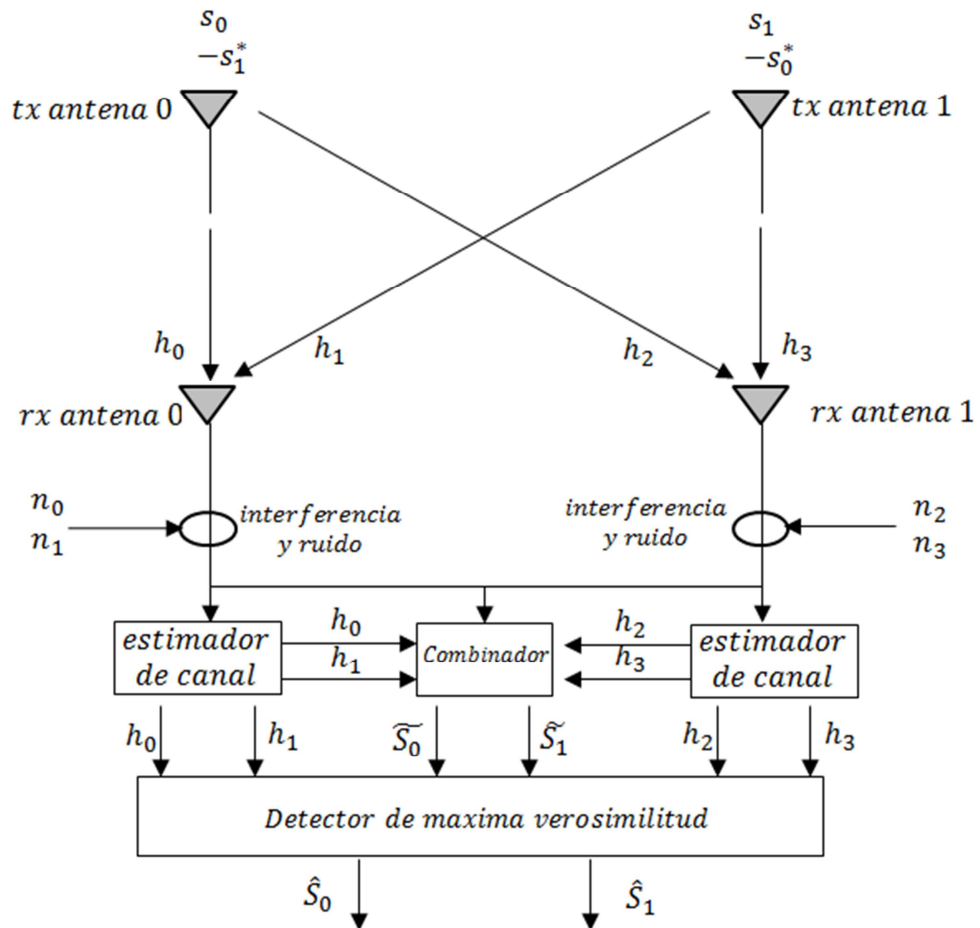
### 3.5.3 Generalización a M receptores

Pueden existir aplicaciones en donde se requiera un orden de diversidad mayor y sea útil el uso múltiples antenas en el lado del receptor. En estos casos, es posible obtener un orden de diversidad de  $2M$  con dos transmisores y  $M$  antenas en recepción. La figura 12 presenta un esquema usando dos antenas receptoras.

Tanto el proceso de codificación como la secuencia de transmisión de los símbolos del lado transmisor son idénticos a lo explicada en el caso de una antena en receptor y que se definió en la Tabla 2.



**Figura 12.** Esquema para dos antenas transmisoras y dos receptoras



Fuente: S. Alamouti. IEEE Journal areas in communications. 1998

En la Tabla 3 se define la notación que se emplea para los canales entre las antenas transmisoras y receptoras. De igual forma en la Tabla 4 se describen las señales recibidas por las dos antenas receptoras.

**Tabla 3.** Definición de los canales entre antenas

Canales entre antenas	Antena 1	Antena 2
Tiempo t	$s_0$	$s_1$
Tiempo t + T	$-s_1^*$	$s_0^*$

**Tabla 4.** Notación para las señales recibidas

Señales recibidas	Antena 1	Antena 2
Tiempo t	$s_0$	$s_1$
Tiempo t + T	$-s_1^*$	$s_0^*$

Las ecuaciones a continuación definen las señales recibidas en función de las señales transmitidas, del canal, del ruido y de la interferencia del sistema:

$$r_0 = h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0$$

$$r_1 = -h_0 s_1^* + h_1 s_0^* + n_1$$

$$r_2 = h_2 s_0 + h_3 s_1 + n_2$$

$$r_3 = -h_2 s_1^* + h_3 s_0^* + n_3$$

Las variables  $n_0$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  y  $n_3$  como ya se dijo son variables complejas aleatorias y representan el ruido térmico del receptor y la interferencia.

Al igual que en el caso anterior las señales que se obtienen del combinador se definen como:

$$\tilde{s}_0 = h_0^* r_0 + h_1 r_1^* + h_2^* r_2 + h_3 r_3^*$$

$$\tilde{s}_1 = h_1^* r_0 - h_0 r_1^* + h_3^* r_2 - h_2 r_3^*$$

Posteriormente estas señales se envían al detector para obtener los símbolos estimados. Estas señales combinadas que provienen de las dos antenas receptoras son la suma de las señales combinadas de cada antena receptora por separado, por eso el esquema de combinación se asemeja al caso con una sola antena receptora.

Por lo tanto cuando se usa dos antenas transmisoras y M antenas en el receptor, se puede utilizar el combinador para cada antena receptora y luego sumar las señales combinadas que provienen desde todas las antenas receptoras. En otras palabras con el uso de dos antenas en el transmisor se logra duplicar el orden de diversidad de sistemas con una antena transmisora y múltiples antenas en el receptor.

**3.5.4 Multiplexación.** En 1996 un ingeniero de laboratorios Bell llamado Gerard Foschini propuso la arquitectura D-BLAST (Diagonal-BLAST) [23], que consistía en un método de multiplexación espacial con codificación y decodificación secuencial. El esquema se podía aplicar a un número cualquiera de antenas y operaba en un rango amplio de niveles de relación señal a ruido y de velocidades de transmisión. La desventaja que tenía este sistema, era que presentaba dificultades en su implementación. A raíz de esto en 1998 Foschini propuso una versión simplificada conocida como V-BLAST (Vertical-BLAST) [20], el cual no utilizaba la rotación de datos entre las antenas, pero a cambio sacrificaba prestaciones en diversidad.

La tecnología BLAST saca provecho de los distintos flujos que toma la señal debido a la propagación multitrayecto.

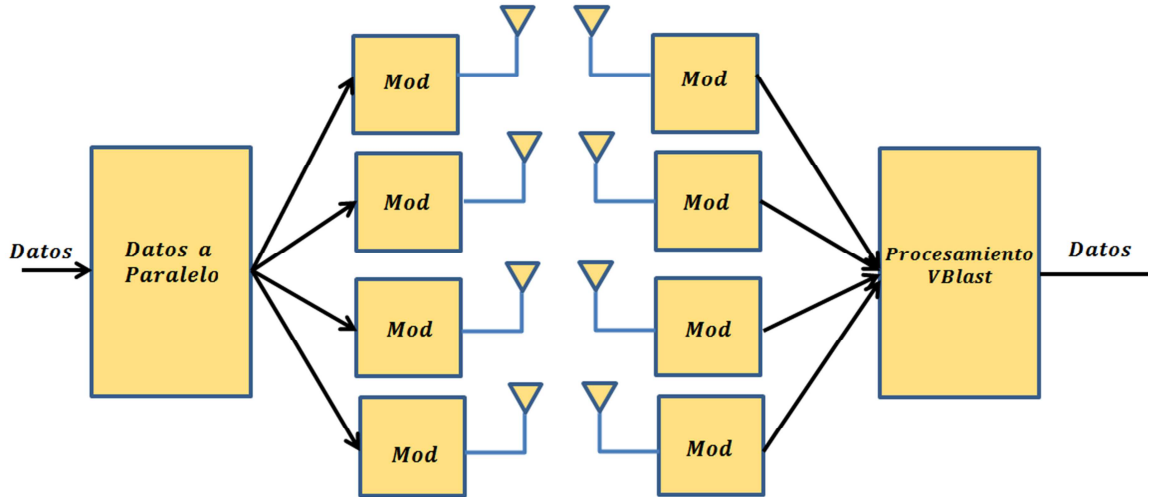
Como desventaja respecto a las anteriores técnicas multiantenas se puede denotar que el esquema V-BLAST presenta una probabilidad de error más alta que el esquema de Alamouti, pero a cambio aumenta la capacidad de transmisión de datos, mejorando la eficiencia espectral del sistema.

**3.5.5 V-BLAST.** El proceso de transmisión en V-BLAST como se ilustra en la figura 13 consiste en dividir el flujo de datos inicial, de forma que quede repartido entre las antenas transmisoras. Posteriormente estos flujos se codifican en los símbolos de la constelación utilizadas, cada uno de estos flujos también llamados capas o layers son codificados de manera independiente y se transmiten simultáneamente en ráfagas en la misma banda de frecuencia. Estas antenas deben tener una separación mínima de una semilongitud de onda.

Se asume por tanto, que se usa la misma constelación para cada subflujo y que las transmisiones se organizan en ráfagas de  $L$  símbolos. En V-BLAST el proceso de codificación es simplemente una operación de demultiplexación seguida un mapeado independiente bit a símbolo de cada sub-flujo.

Cada una de las antenas receptoras opera independientemente y en la misma banda de frecuencia. Cada una recibe las señales de todos los transmisores, aunque modificadas de forma diferente debido al efecto provocado por el desvanecimiento multitrayecto y el ruido AWGN.

**Figura 13.** Arquitectura V-BLAST



- **El proceso de detección**

Este consiste en la estimación de la señal transmitida  $s$  a partir de la señal recibida  $r$  y la estimación del canal  $\mathbf{H}$ , relacionados por [20]:

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}$$

Se asume que los  $N$  elementos transmitidos del vector  $s$  están incorrelados. De igual manera se asume que la matriz  $\mathbf{H}$  tiene rango completo.

El proceso de detección se divide en dos pasos:

1. Estimación del símbolo recibido tras la supresión del resto
2. Cancelación del símbolo decodificado en la señal recibida

- **Supresión de interferencias**

Si se denota  $\mathbf{h}_i$  como la columna  $i$ -ésima de  $\mathbf{H}$ , el vector recibido se puede expresar así:

$$\mathbf{r} = s_1\mathbf{h}_1 + s_2\mathbf{h}_2 + \dots + s_{N_t}\mathbf{h}_{N_t} + \mathbf{n}$$

En donde  $s_i$  es el símbolo transmitido desde la antena  $i$ -ésima.

La supresión de las interferencias se realiza ponderando linealmente los símbolos recibidos con un vector  $\mathbf{w}$ . Este vector para el primer criterio se calcula de manera que:

$$\mathbf{w}_i^T \mathbf{h}_j = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases}$$

Esto se hace en concordancia con los criterios de mínimo error cuadrático medio (MMSE) o de forzado a cero (ZF). En el vector  $\mathbf{w}$  la expresión  $()^T$  indica transposición. De esta forma, el símbolo  $i$ -ésimo resulta:

$$\begin{aligned} y_i &= \mathbf{w}_i^T \mathbf{r} \\ &= s_1 \mathbf{w}_i^T \mathbf{h}_1 + s_2 \mathbf{w}_i^T \mathbf{h}_2 + \dots + s_i \mathbf{w}_i^T \mathbf{h}_i + \dots + s_{N_t} \mathbf{w}_i^T \mathbf{h}_{N_t} + \mathbf{w}_i^T \mathbf{n} \\ &= 0 + 0 + \dots + s_i + \dots + 0 + \tilde{n}_i \end{aligned}$$

Por último se estima el símbolo transmitido a partir de la constelación de la modulación utilizada:

$$\hat{s}_i = Q(y_i)$$

En donde  $Q()$  es la función de decisión correspondiente.

- **Cancelación de interferencia**

En este paso el efecto de los símbolos ya detectados se puede sustraer de la señal recibida, en la que aún hay símbolos por extraer. Esto mejora el funcionamiento cuando el orden de detección ha sido correctamente escogido.

Se asume que  $\hat{s}_i = s_i$ , la cancelación del símbolo  $s_i$  del vector recibido  $\mathbf{r}$  se realizaría de la siguiente forma:

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} - \hat{s}_i \mathbf{h}_i$$

Este proceso se repite sucesivamente hasta decodificar las  $N$  ráfagas enviadas.

- **Orden de detección óptimo**

Este proceso es de gran importancia, ya que de este depende que se tomen las decisiones correctas en cada iteración, pues si se produce un error, éste se propagará en las restantes iteraciones al sustraer un símbolo incorrectamente decodificado.

Con el fin de minimizar la propagación de errores, se detectan en primer lugar los símbolos que presentan mayor nivel en recepción. Un ordenamiento óptimo sencillo se basa en la SNR de cada flujo de datos recibido. La SNR para el  $i$ -ésimo símbolo detectado del vector  $r$  viene expresada por

$$SNR = \frac{E\{|s_i|^2\}}{\sigma^2(\|w_i\|^2)}$$

Donde  $\sigma^2$  es la potencia de ruido y  $E\{\}$  representa el valor medio.

La SNR de la ráfaga  $i$ -ésima es proporcional a la norma de la columna  $i$ -ésima de  $\mathbf{H}$ . Por lo tanto, el orden de detección óptimo está íntimamente relacionado con el orden decreciente de la norma de las columnas de  $\mathbf{H}$ .

- **Criterio ZF**

Según el criterio ZF (Zero Forcing), el vector  $w_i^T$  coincide con la fila  $i$ -ésima de la pseudoinversa de  $\mathbf{H}$  [20].

$$w_i^T = \langle \mathbf{H}^\dagger \rangle_i$$

Esto es así únicamente en la primera iteración. Según se suceden las cancelaciones  $w_i^T$  pasa a ser la fila  $i$ -ésima de la pseudoinversa no de la matriz  $\mathbf{H}$ , sino de la resultante de sustituir con ceros las columnas que corresponden a las ráfagas ya decodificadas. Es decir, si  $\{k_1, k_2, \dots, k_{N_t}\}$  es el orden de detección óptimo, en la iteración  $k_i$  el vector de supresión ZF será

$$w_{ki}^T = \langle \mathbf{H}^{\dagger_{k_i-1}} \rangle_{ki}$$

Donde  $\mathbf{H}^{\dagger_{k_i-1}}$  denota a la matriz  $\mathbf{H}$  con las columnas  $\{k_1, k_2, \dots, k_{i-1}\}$  sustituida por ceros. Esto último se debe a que en la  $i$ -ésima iteración el vector  $w_i$  sólo tiene que ser ortogonal a las  $h_j$  que afectan a los símbolos no decodificados, con  $j \geq i$ .

- **Criterio MMSE**

En el criterio MMSE (minimum mean squared error) que en español traduce mínimo error cuadrático medio, el vector de pesos  $w_i^T$  se obtiene de la fila  $i$ -ésima de la matriz, lo cual está demostrado en [21].

$$G = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{N_t}{\rho} \mathbf{I}_{N_t})^{-1} \mathbf{H}^H$$

Como se demuestra también en [21] al igual que en el criterio ZF, previo al cálculo de  $\mathbf{G}$  hay que sustituir por ceros en  $\mathbf{H}$  las columnas correspondientes a las iteraciones anteriores.

El criterio MMSE es menos costoso computacionalmente al ahorrar el cálculo de la pseudoinversa. Además su rendimiento siempre es mejor que con ZF, sobre todo con menor SNR, pues es más inmune al efecto del ruido AWGN.

- **Algoritmo de detección V-BLAST/MMSE**

El algoritmo V-BLAST/MMSE consta de los siguientes pasos:

- Fase de Inicialización

1.  $i \leftarrow 1$
2.  $\mathbf{G}_1 = \mathbf{H}^\dagger$
3.  $k_1 = \arg \min_j \|\langle \mathbf{G}_1 \rangle_j\|^2$

- Fase de Recursión

1.  $\mathbf{w}_{ki}^T = \langle \mathbf{G}_i \rangle_{ki}$
2.  $y_{ki} = \mathbf{w}_{ki}^T \mathbf{r}_i$
3.  $\hat{s}_{ki} = Q(y_{ki})$
4.  $\mathbf{r}_{i+1} = \mathbf{r}_i - \hat{s}_{ki} \mathbf{h}_{ki}$
5.  $\mathbf{G} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{N_t}{\rho} \mathbf{I}_{N_t})^{-1} \mathbf{H}^H$
6.  $k_{i+1} = \arg \min_{j \notin \{k_1 \dots k_i\}} \|\langle \mathbf{G}_{i+1} \rangle_j\|^2$
7.  $i \leftarrow i + 1$

En el paso 3 de la inicialización y el 6 del bucle recursivo, el orden de detección se realiza en orden ascendente de la norma-2 de las filas de **G**, que corresponde con el orden descendente de la norma-2 de las columnas de **H**.

En algunos trabajos [21] se ha demostrado que el criterio MMSE conlleva un menor coste computacional que la alternativa ZF.



## 4. ANALISIS DE RESULTADOS

### 4.1 ENTORNO DE SIMULACIÓN

Todo el componente de software que atañe este proyecto fue desarrollado a través de Matlab® R2010b. Esta herramienta de software que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio, ofrecía prestaciones para la realización del proyecto en cuanto a la manipulación de matrices, la representación de los datos entre muchas otras.

En las simulaciones realizadas el canal que atraviesa la señal sigue una distribución Rayleigh. Este canal modela un ambiente urbano con desvanecimiento selectivo en frecuencia, como ya se explicó anteriormente.

Los esquemas propuestos son de lazo abierto, esto quiere decir que el transmisor no dispone de información sobre las condiciones del canal.

### 4.2 MIMO

**4.2.1 Alamouti.** Para la evaluación de las estructuras MIMO utilizadas se compara la tasa de error de bit (BER) frente a la relación señal a ruido (SNR), lo cual proporciona una estimación de la capacidad ofrecida por cada configuración. Esto se consigue repitiendo el proceso para distintos valores de SNR y comparando el error en cada uno de estos. De esta manera un sistema será mejor cuanto menos energía por símbolo requiera para alcanzar un valor de BER determinado.

Es necesario recordar que la señal recibida en cada antena es la suma de todas las señales transmitidas. Por lo tanto si la potencia media a la salida de cada antena es  $P$ , la SNR media en cada antena es  $P/N$ , donde  $N$  representa el número de antenas. Igualmente que los subcanales se consideran incorrelados, es decir que las antenas están lo suficientemente separadas.

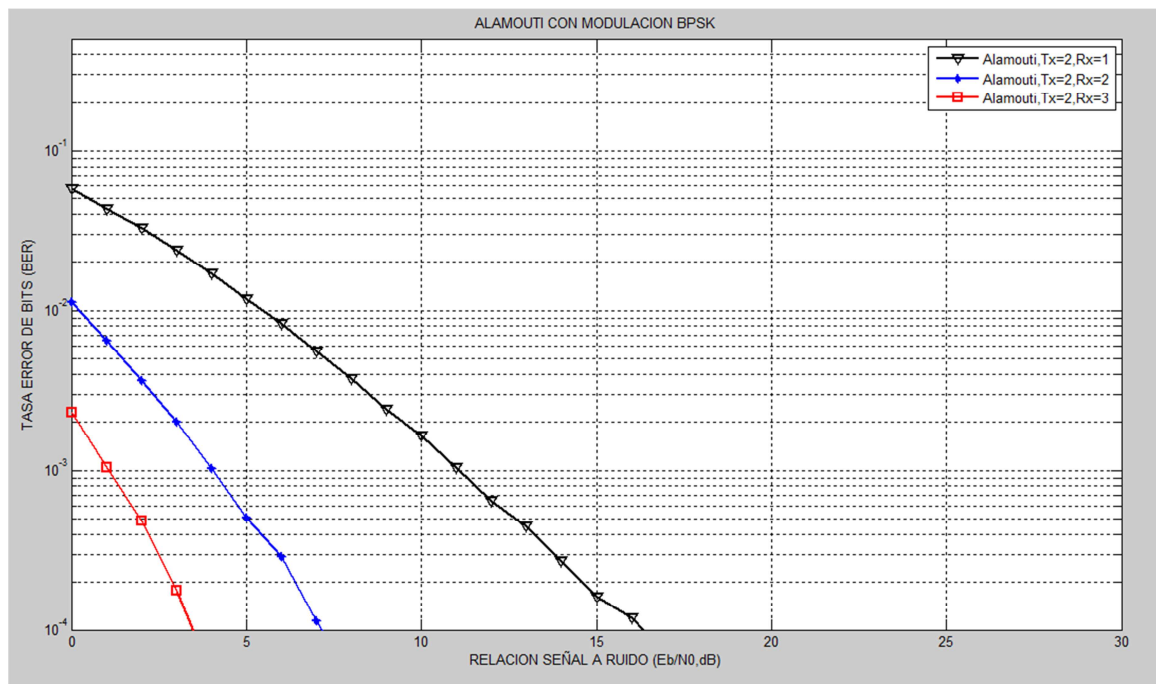
La tabla 5 describe los parámetros iniciales a ser tenidos en cuenta para la simulación del esquema MIMO.

**Tabla 5.** Parámetros de simulación Alamouti

Parámetros de simulación Alamouti	
Número de antenas transmisoras	2
Número de antenas receptoras	1,2,3
Esquema de modulación	BPSK, QPSK, 16-QAM
Modelo del canal	Rayleigh
Ruido	Gaussiano

La figura 14 corresponde al resultado obtenido con el esquema de Alamouti para evaluar diversidad, con modulación BPSK.

**Figura 14.** Alamouti BPSK



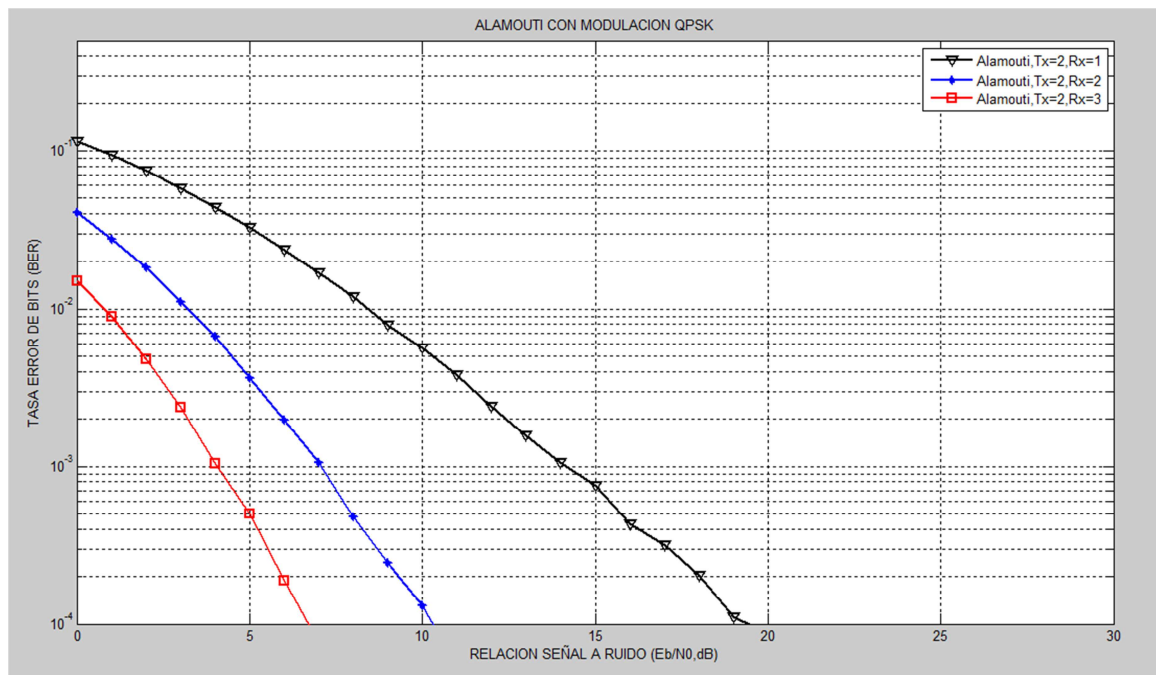
En esta simulación se evaluaron tres arreglos de antenas. La línea negra corresponde al esquema de Alamouti con 2 antenas en transmisor y 1 en receptor, mientras la azul indica el resultado usando 2 antenas tanto en transmisor como en receptor. La línea roja es el resultado de la estructura con el mismo número de antenas en transmisor, pero con 3 antenas en el receptor.

Utilizando modulación BPSK y diferentes configuraciones de antenas, se observa que Alamouti consigue niveles de BER inferiores a  $10^{-4}$ . No obstante la configuración 2x3 mejora el resultado obtenido con una y dos antenas en receptor, logrando el mismo nivel de BER con una relación señal a ruido mucho menor.

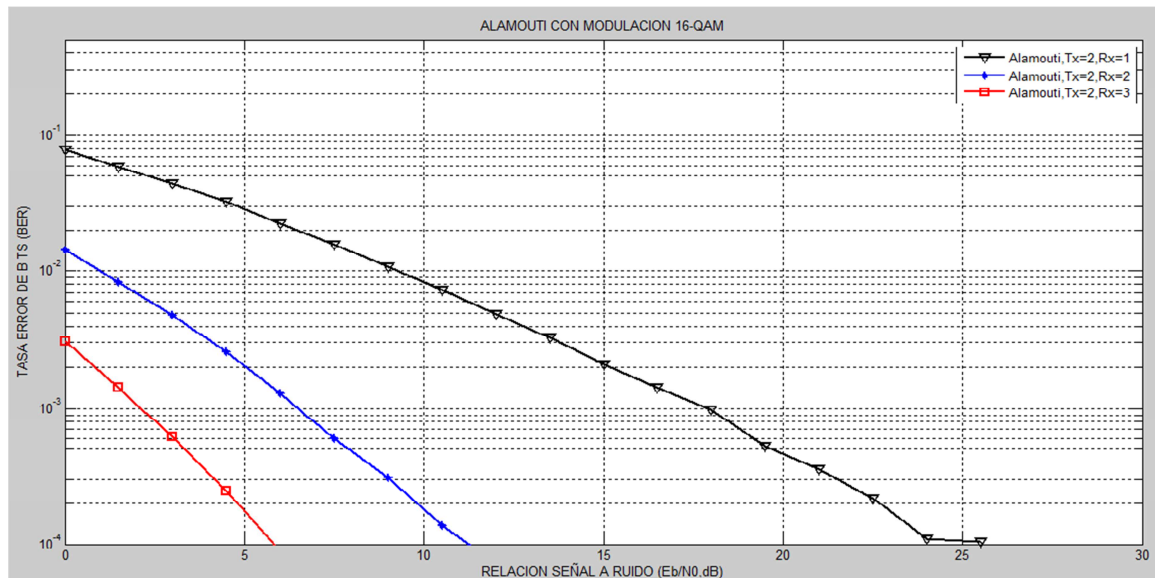
Estos resultados concuerdan con los resultados obtenidos por Alamouti en [18] en donde el aumento del número de antenas en el receptor se traducían en un aumento de ganancia de diversidad, sin requerir del aumento en ancho de banda, ni realimentación desde el receptor hacia el transmisor.

Con el fin de comprobar la influencia de la modulación utilizada se evaluó el rendimiento del esquema de Alamouti para modulaciones QPSK y 16-QAM. Los resultados están plasmados en las figuras 15 y 16 respectivamente.

**Figura 15.** Alamouti QPSK



**Figura 16.** Alamouti 16-QAM



En la figura 15 se observa que para alcanzar el mismo nivel de BER que en BPSK, el esquema con modulación QPSK necesita una mayor relación señal a ruido. Esta característica es igual para todos los arreglos de antenas simulados. Sin embargo los resultados de la evaluación de los esquemas utilizando modulación 16-QAM indican un resultado menos favorable aun que el de los dos anteriores.

Es por esto, que si lo que se quiere es utilizar modulaciones para lograr altas tasas de transmisión de datos, se debe tener en cuenta que son más susceptibles al aumento de la tasa de error y que deben ser usadas dependiendo de las condiciones del canal.

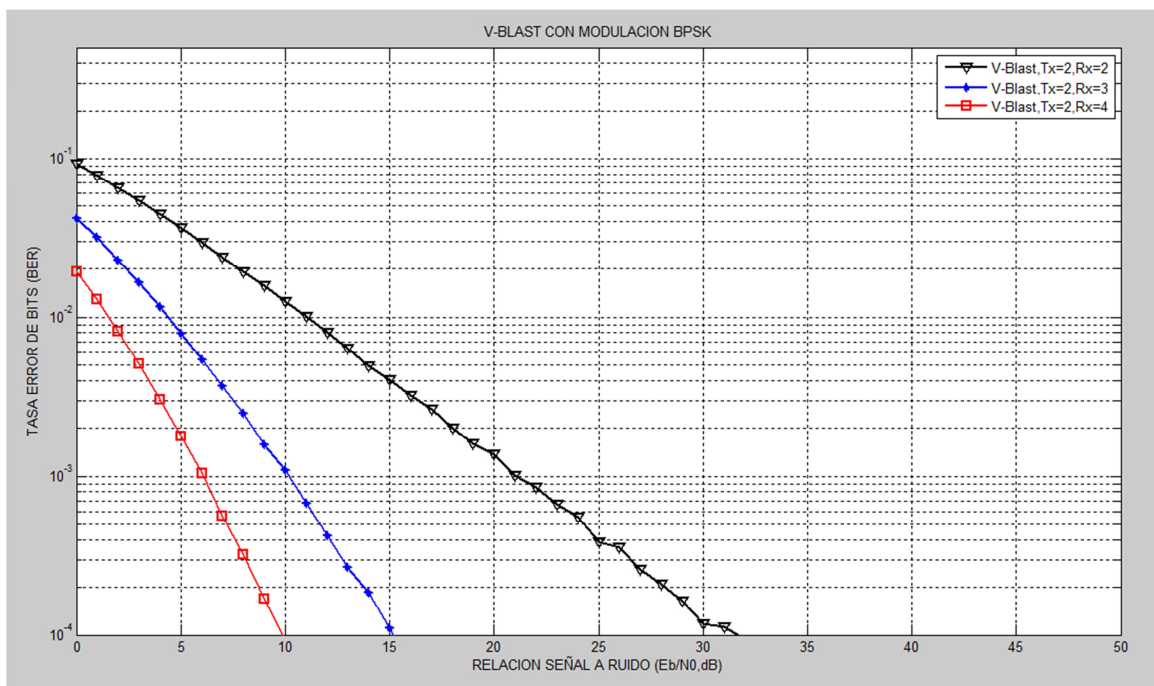
**4.2.2 V-BLAST.** Para el esquema V-Blast el proceso es similar al de Alamouti, solo que para este caso se multiplexan los datos a transmitir, buscando enviar una mayor cantidad de bits por el mismo canal, a diferencia del de Alamouti que se envía redundancia de datos buscando reducir la probabilidad de error.

De igual forma los datos son codificados en BPSK, QPSK Y 16-QAM, se agrupan por matrices para pasarlos por un canal Rayleigh y se adiciona ruido Gaussiano. Para este esquema se usó el detector MMSE que en español traduce Mínimo Error Cuadrático Medio. Se evaluaron distintos arreglos de antenas sobre la arquitectura V-BLAST. Los datos inicialmente fueron modulados con 16-QAM. La figura 17 plasma el resultado de los arreglos 2x2, 2x3 y 2x4 con modulación BPSK cada uno.

**Tabla 6.** Parámetros de simulación V-BLAST

Parámetros de simulación V-BLAST	
Tecnología MIMO	V-BLAST
Detección	MMSE
Número de antenas transmisoras	2
Número de antenas receptoras	2,3,4
Esquema de modulación	BPSK, QPSK, 16-QAM
Modelo del canal	Rayleigh
Ruido	Gaussiano

**Figura 17.** V-BLAST BPSK



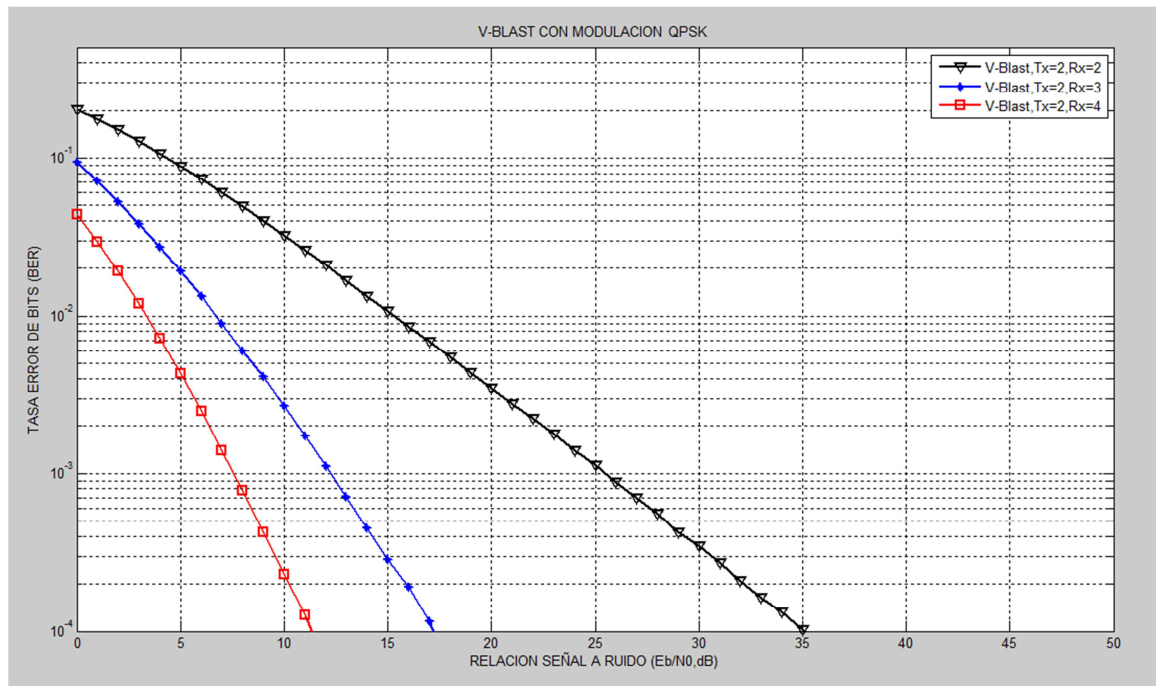
De la figura 17 se destaca que la estructura con mayor rendimiento es la que posee 4 antenas en el receptor. La estructura 2x2 es la que se ve más afectada y esto se debe a que la arquitectura V-BLAST se puede ver muy influida por el canal. Cuando el número de antenas es igual en transmisión y recepción, en caso de haber un subcanal desfavorable puede afectar de manera significativa la BER.

Los arreglos 2x2 y 2x3 evaluados en V-BLAST presentan una mayor tasa de error, que cuando se evaluaron en Alamouti, esto se explica por la característica de redundancia en los datos que conlleva el esquema de Alamouti.

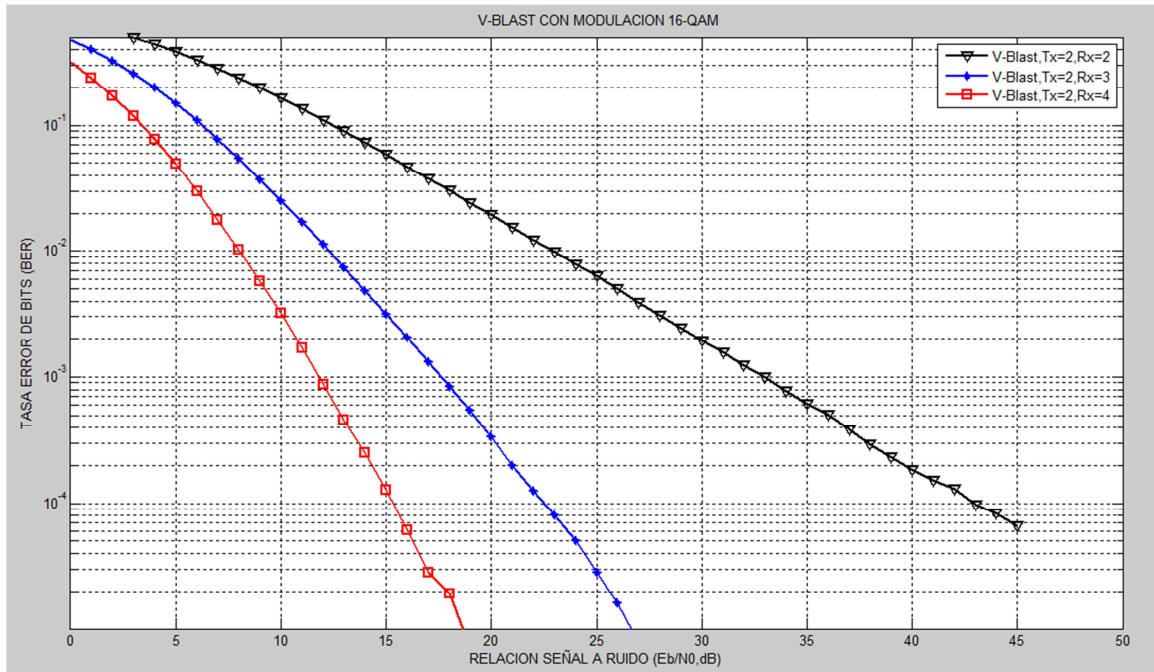
Estos resultados concuerdan con los obtenidos en [24] donde evalúan el rendimiento de un esquema MIMO V-BLAST usando BPSK y con unas condiciones de canal similares. La comparación entre las curvas muestra que la BER se mejora con el incremento en el número de antenas en recepción.

En la figura 18 y 19 respectivamente se encuentra el resultado de los tres arreglos de antenas evaluados bajo modulación QPSK y 16-QAM.

**Figura 18.** V-BLAST QPSK



**Figura 19.** V-BLAST 16-QAM



Los anteriores resultados evidencian nuevamente la influencia de la modulación en el rendimiento del sistema. Cabe recordar que entre mayor sea el nivel de la modulación como en el caso de la última figura, más propenso se hace el sistema a la interferencia intersímbolo.

Se nota claramente que los STBC como el esquema de Alamouti ofrecen mejores tasa de error que los esquemas de multiplexación como V-BLAST, incluso con un número menor de antenas. Lo cual era previsible al tratarse de codificaciones que aumentan la diversidad a través del número de antenas, sin aumentar la tasa de transmisión.

### 4.3 OFDM

OFDM como ya se explicó hace parte del estándar establecido por 3GPP para el enlace descendente. Para la simulación del sistema OFDM se deben tener en cuenta algunos parámetros iniciales como lo son la frecuencia de muestreo  $F_s = 2 \text{ MHz}$ , y el número de subportadoras, ya que a partir de este dato se calcula el número de bits aleatorios que representaran los datos a transmitir.

Para la simulación el número de subportadoras establecidas es  $N_c = 256$ .

La cantidad de bits a generar que se pueden observar en la figura 20, se calculan de la siguiente manera:

$$n = N_c * N_{bitsMod} = 256 * 4 = 1024 \text{ bits}$$

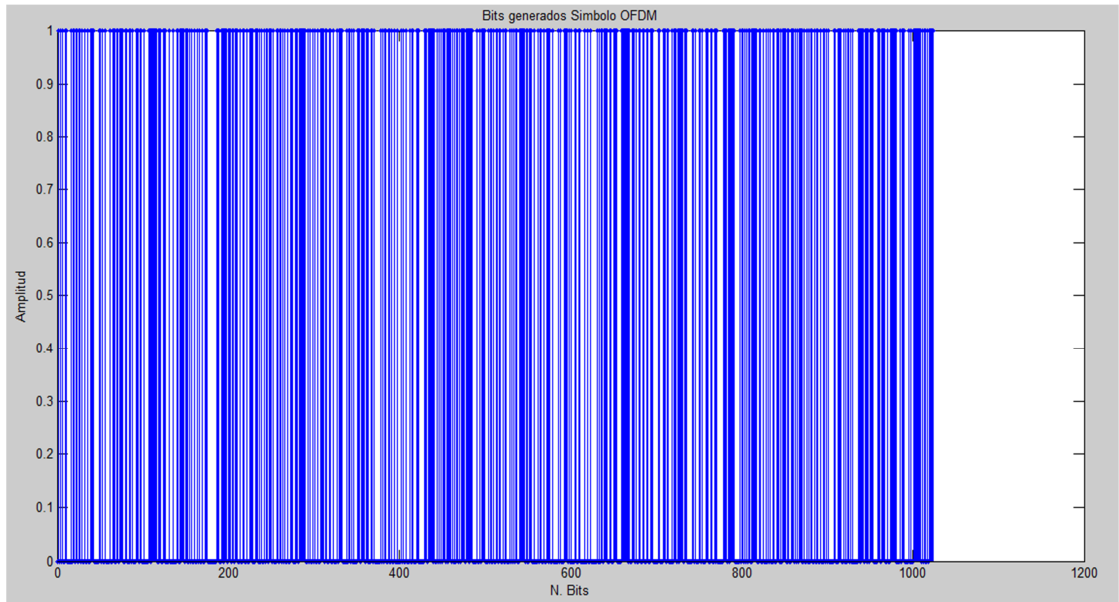
Donde  $N_{bitsMod} = \log_2 M$ , en donde M representa el orden del esquema utilizado para modular los datos (QAM, QPSK, BPSK) que en este caso es 16 QAM. La razón de utilizar este esquema de modulación es que 3GPP lo establece en sus estándares para su implementación en la tecnología LTE.

**Tabla 7.** Parámetros de simulación OFDM

Parámetros de simulación OFDM	
Número de Subportadoras	256
Longitud del prefijo cíclico	1/4
Bits transmitidos	1024
Frecuencia de muestreo	2 MHz
Esquema de modulación	16-QAM
Modelo del canal	Ideal
Ruido	Gaussiano

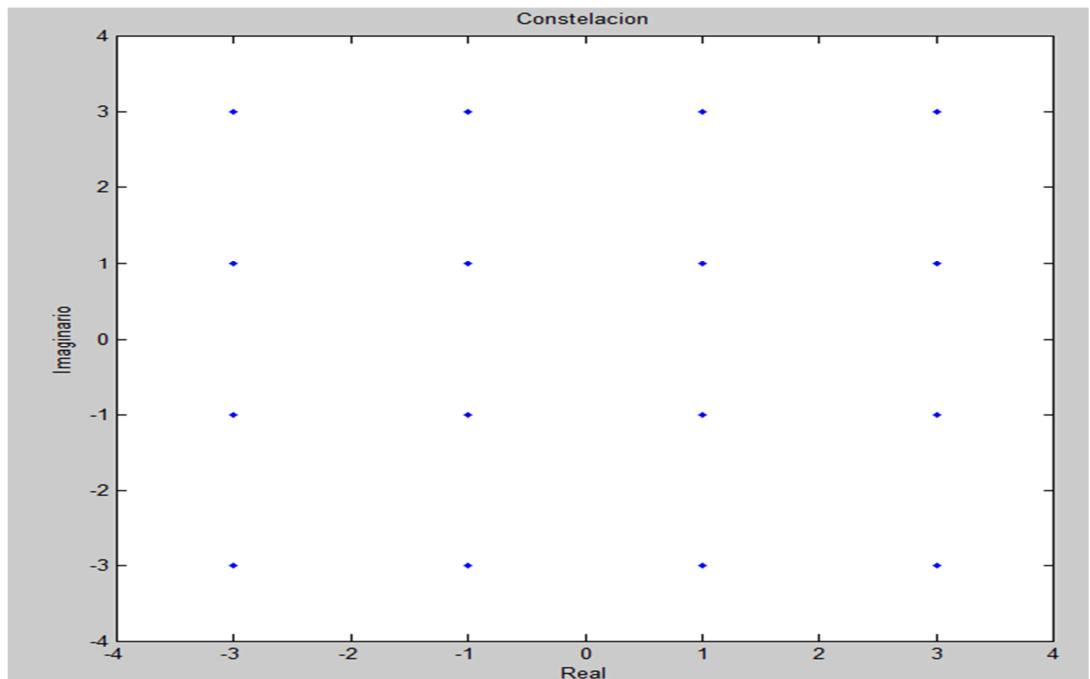


**Figura 20.** Bits generados símbolo OFDM



Posterior a esto los bits atraviesan el mapeador en donde en el caso de QAM el mensaje se modula tanto en amplitud como en fase, como puede verse en la figura 21. El mapeador asigna a cada bit un punto de la constelación 16-QAM.

**Figura 21.** Mapeador 16-QAM

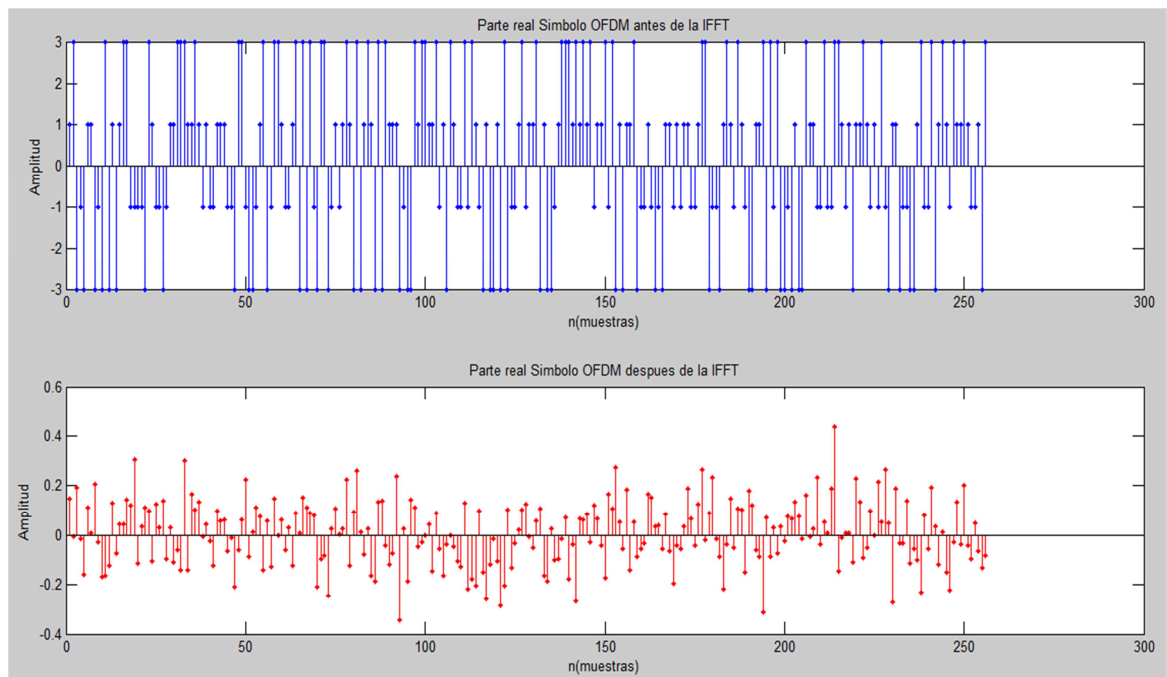


Con los datos mapeados se procede a realizar la transformada inversa de Fourier a los datos. Para esto el número de puntos que va a tomar la transformada inversa está relacionado con el número de subportadoras establecidas, por lo tanto  $N_c$  debe ser un número potencia de 2, requisito principal para la IFFT.

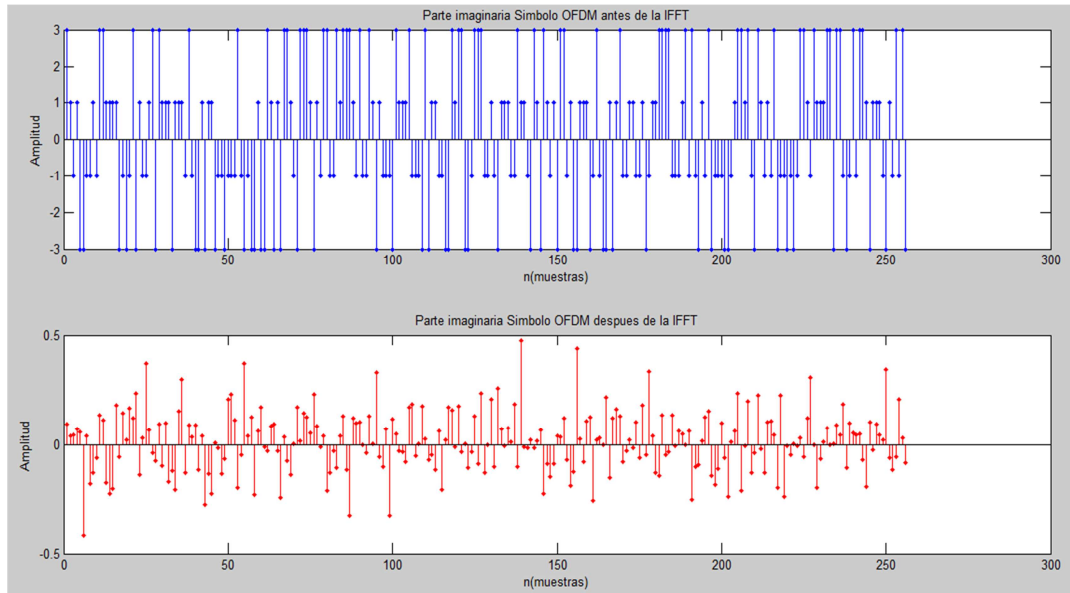
Para poder realizar la transformada inversa es necesario tener los datos en paralelo ya que la IFFT actúa en vectores columna. Esto en Matlab se realiza aplicando la operación transpuesta a la matriz de datos.

En las figuras 22 y 23 puede observarse la parte real e imaginaria del símbolo OFDM tras cruzar por la IFFT.

**Figura 22.** Parte real del símbolo OFDM antes y después de IFFT

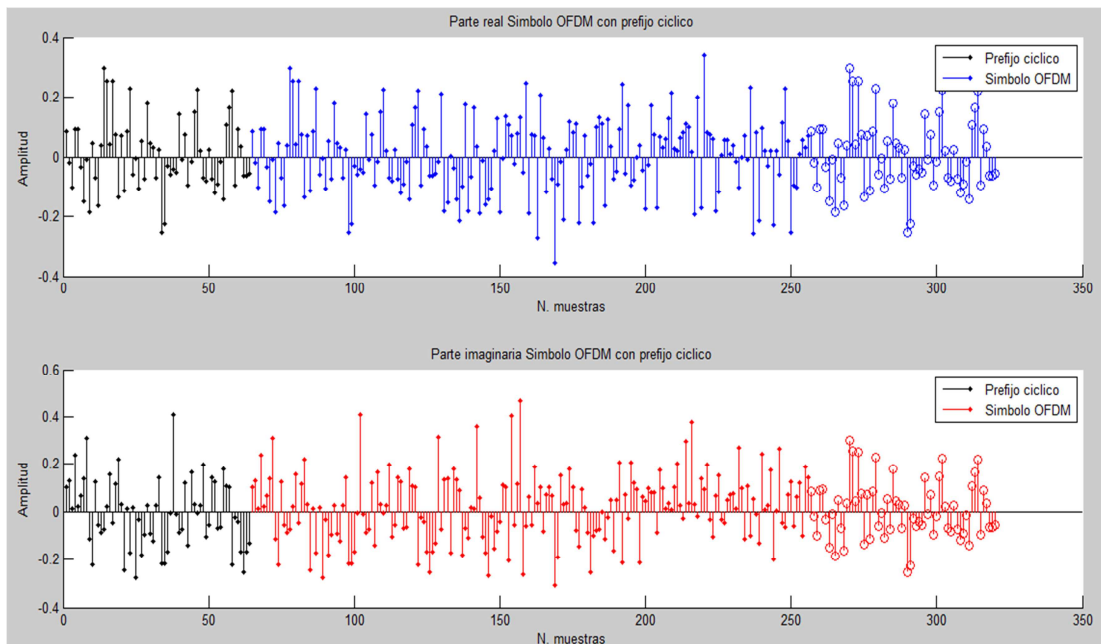


**Figura 23.** Parte imaginaria del símbolo OFDM antes y después de IFFT



Luego de aplicar la IFFT se agrega el prefijo cíclico (también conocido como intervalo de guarda) a la señal. En la siguiente gráfica se ilustra la adición del prefijo actuando directamente sobre las columnas y se observa claramente que la cantidad agregada corresponde a  $\frac{1}{4}$  de la señal original, como lo establece 3GPP.

**Figura 24.** Adición prefijo cíclico

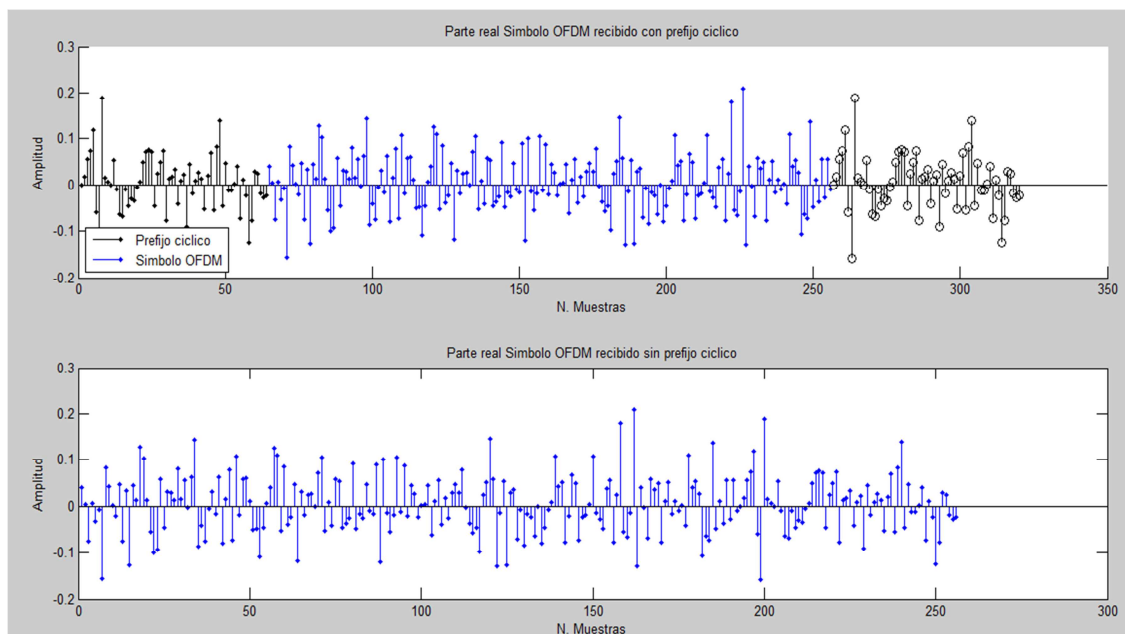


Debido a que tanto la parte real como la imaginaria sufren el mismo proceso de ahora en adelante las ilustraciones de la señal OFDM serán tan solo de la parte real.

El transmisor OFDM está compuesto por lo que llevamos hasta el momento. Para verificar el correcto funcionamiento de la modulación OFDM se supone un canal ideal, es decir que la señal no se ve afectada por ningún tipo de interferencia ni desvanecimiento. Por lo tanto la señal que llega al receptor OFDM es la misma que sale del transmisor.

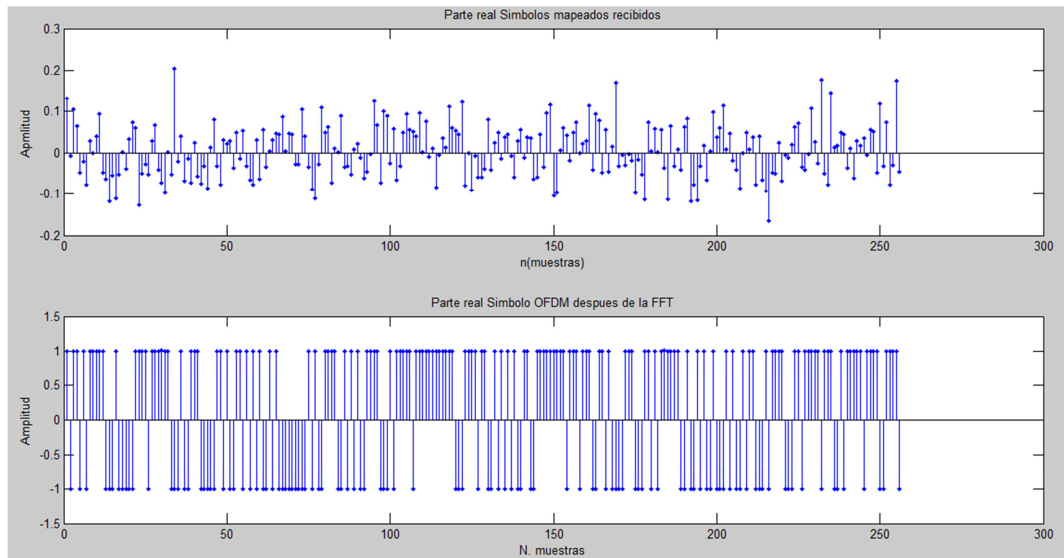
El primer paso en la recepción de la señal es el retiro del prefijo cíclico. La figura 25 ilustra este proceso en donde se actúa directamente sobre las columnas para retirar este segmento. Antes de esto se actúa sobre los datos, de forma que queden en paralelo, ya que los datos han sido transmitidos en serie por el canal.

**Figura 25.** Retiro prefijo cíclico



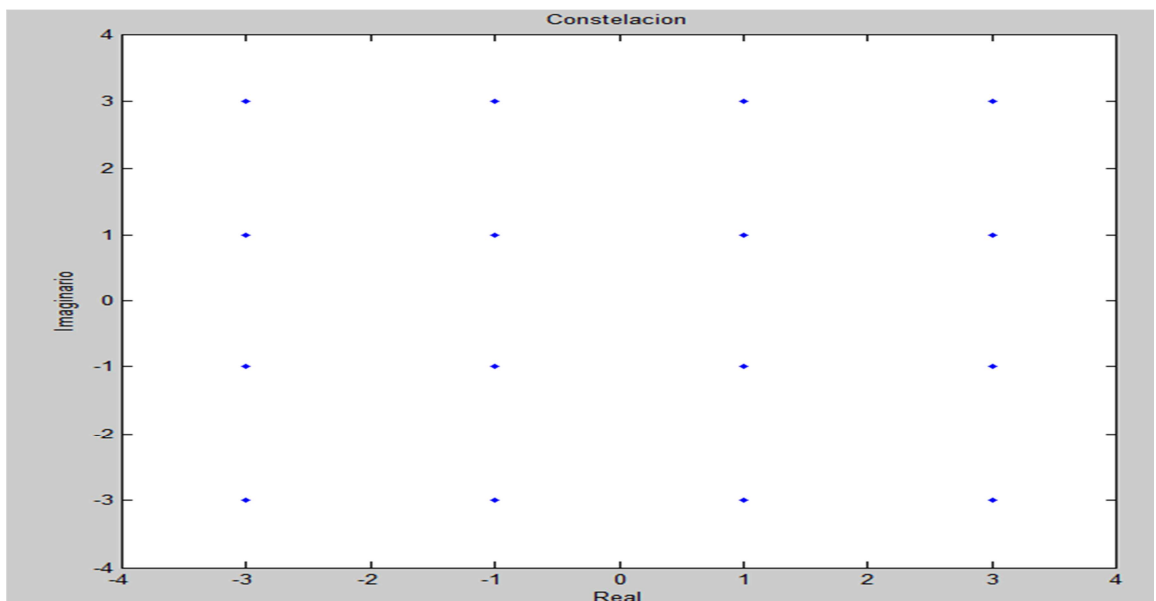
El proceso inverso a la transformada inversa se realiza aplicando la FFT a la señal, de esta manera la señal resultante es la de la figura 26.

**Figura 26.** Proceso de FFT



El proceso de demapeo en el receptor se encarga de realizar la detección de los bits enviados de acuerdo al símbolo de la constelación recibido. Luego de atravesar un canal ideal y de demapear la señal y comparar bit a bit los símbolos recibidos versus los que se generaron inicialmente, la probabilidad de error es igual a 0, lo cual indica el correcto funcionamiento de la etapa de OFDM. Los símbolos mapeados recibidos encuentran en la figura 27.

**Figura 27.** Demapeo 16-QAM



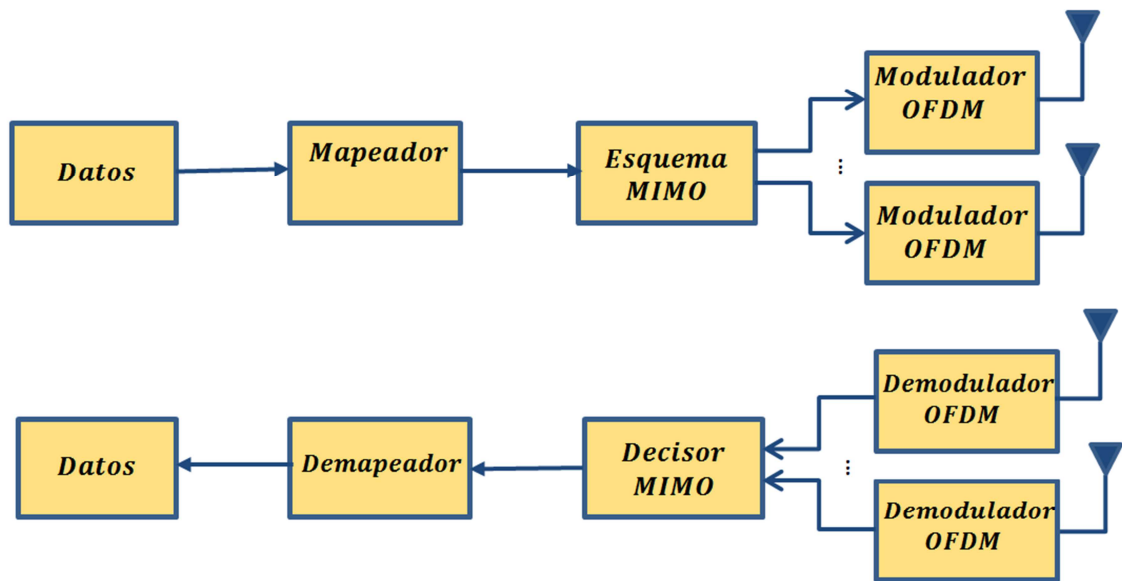
#### 4.4 MIMO-OFDM

Hasta el momento se ha tratado tanto la tecnología MIMO como OFDM por aparte. En este punto se llega a evaluar los respectivos arreglos de antenas, dentro de un sistema que involucre las dos tecnologías como lo establece la tecnología LTE para el enlace de bajada.

La figura 28 representa el esquema de transmisión y recepción de un sistema MIMO-OFDM.

Los resultados plasmados a continuación se han dividido en MIMO-OFDM usando Alamouti, y MIMO-OFDM usando V-BLAST. Con el fin de evaluar los resultados de un sistema LTE con estos esquemas para diferentes configuraciones de antenas.

**Figura 28.** Diagrama sistema MIMO-OFDM



Inicialmente el bloque datos representa los bits generados aleatoriamente, en donde la aparición de 1 o 0 tiene la misma probabilidad. El siguiente bloque representa el mapeo de los datos, en donde a cada grupo de bits se le asigna un punto de la constelación 16-QAM.

Posterior a esto la señal atraviesa la estructura MIMO correspondiente, ya sea Alamouti o V-BLAST. Las señales provenientes del bloque MIMO se modulan individualmente en los bloques OFDM para luego transmitirse por el número de antenas establecidas. La señal proveniente de cada antena se transmite a cada

una de las antenas en recepción en donde se aplica el proceso inverso a la modulación OFDM para luego ser combinadas y procesadas por el decisor MIMO. Por último se realiza la detección de los bits de acuerdo al símbolo de la constelación recibido.

3GPP establece en sus estándares arreglos de antenas 2x1, 2x2 y 4x4 para el sistema LTE. En el presente proyecto se evaluaron igualmente estructuras alternativas a las ya establecidas con el objetivo de determinar su rendimiento.

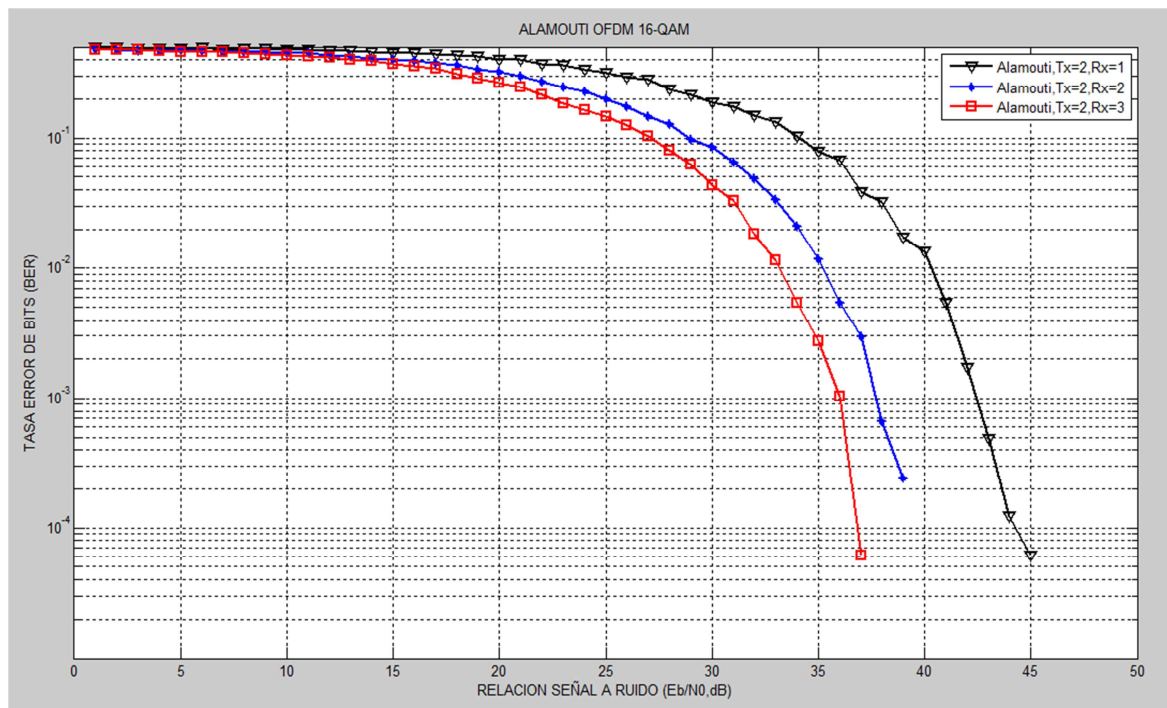
La tabla 8 expone los principales parámetros del sistema utilizando el esquema de Alamouti.

**Tabla 8.** Parámetros de simulación MIMO (Alamouti)-OFDM

<b>Parámetros de simulación LTE</b>	
<b>Tecnología MIMO</b>	Alamouti
<b>Número de Subportadoras</b>	256
<b>Longitud del prefijo cíclico</b>	1/4
<b>Número de antenas transmisoras</b>	2
<b>Número de antenas receptoras</b>	1,2,3
<b>Esquema de modulación</b>	16-QAM
<b>Modelo del canal</b>	Rayleigh

La figura 29 plasma el rendimiento de las tres estructuras evaluadas utilizando la arquitectura de Alamouti y bajo modulación 16-QAM, se utilizó esta modulación por ser la establecida por 3GPP para su uso en la tecnología LTE.

**Figura 29.** MIMO-OFDM usando esquema de Alamouti



El resultado afirma el efecto que tiene el aumento del número de antenas en recepción, siendo el esquema con 3 antenas en el receptor notablemente superior a los demás.

Este sistema se caracteriza por presentar un nivel mayor de BER cuando se unen los esquemas MIMO con OFDM, que cuando se evalúan los arreglos MIMO en solitario. Esto se debe a que el uso de la modulación OFDM sobre canales selectivos en frecuencia sufre la desventaja de la pérdida de ortogonalidad entre portadoras debido al ensanchamiento Doppler. Debido también a que la tecnología OFDM tiene como propósito el aumento en las tasas de transmisión por medio de la optimización del espectro, en otras palabras de mejorar la eficiencia espectral, esto hace el sistema más propenso al incremento de la BER.

Los resultados obtenidos en la figura 29 son levemente inferiores a los encontrados en [25], esto se explica por el uso que hacen de estructuras pilotos con el fin de mejorar el rendimiento del sistema. Sin embargo los resultados no varían notablemente y concuerdan con los resultados obtenidos.

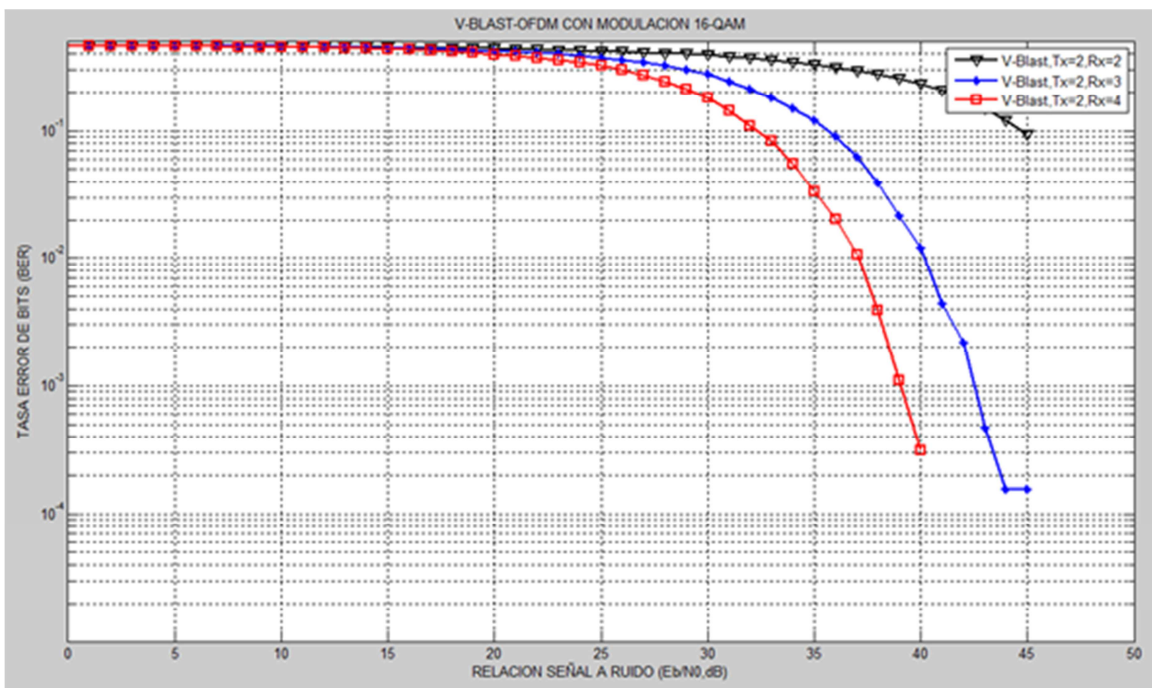
La otra etapa consistió en evaluar los arreglos de antenas propuestos en el esquema V-BLAST junto con la tecnología OFDM. La figura 30 es el resultado de esta evaluación para arreglos de antenas 2x2, 2x3 y 2x4.



**Tabla 9.** Parámetros de simulación MIMO (V-BLAST)-OFDM

Parámetros de simulación LTE	
Tecnología MIMO	V-BLAST
Detección	MMSE
Número de Subportadoras	256
Longitud del prefijo cíclico	1/4
Número de antenas transmisoras	2
Número de antenas receptoras	2,3,4
Esquema de modulación	16-QAM
Modelo del canal	Rayleigh

**Figura 30.** MIMO-OFDM usando esquema V-BLAST



A pesar de tener el mismo comportamiento en cuanto al efecto del número de antenas en el rendimiento del sistema, es de destacar que presenta un nivel de BER mayor al presentado por el sistema cuando hace uso de la tecnología de diversidad, del esquema de Alamouti más exactamente. Esto era de esperarse si se tiene en cuenta los resultados que arrojaron estas estructuras cuando se evaluaron en solitario y donde el esquema de Alamouti obtuvo mejores prestaciones en cuanto a la reducción de la BER del sistema por su característica de diversidad.

Estos resultados que se plasman en la figura 30 concuerdan con un esquema similar evaluado en [26] donde analizaron el rendimiento de V-BLAST basado en un sistema MIMO-OFDM con varias técnicas de detección. El resultado que se obtuvo utilizando la técnica de detección MMSE y un arreglo de antenas 2x2 es muy similar al obtenido en el presente trabajo.

La configuración 2x2 es la que se ve sin duda más afectada con el aumento de la BER. La utilización de 3 y 4 antenas en el receptor mejora notablemente el rendimiento del sistema, por lo que se deduce la importancia de que el receptor posea un mayor número de antenas que el transmisor, lo cual hace al sistema menos susceptible a condiciones desfavorables del canal.

La implementación de múltiples antenas en el receptor se ve limitada por las características de los equipos móviles, debido a que el aumento de las antenas conlleva que el dispositivo móvil aumente tanto su tamaño como su costo, sumándole a esto un consumo de energía elevado, causado en parte por los circuitos de selección o conmutación adicionales.

Sin embargo esta limitante parece superarse con el desarrollo de materiales y dispositivos [27] [28] que hacen factible la implementación de múltiples antenas en los dispositivos móviles. El avance en nuevos métodos y técnicas ha llevado a considerarse factible el uso de arreglos de antenas tanto en transmisor como en receptor, tanto que 3GPP establece [29] para LTE Advanced arreglos 8x8 para el enlace de bajada y 4x4 para el enlace de subida. LTE Advanced es la propuesta para el desarrollo de la tecnología de cuarta generación y contempla planes de implementación y desarrollo hasta 2020.

## 5. CONCLUSIONES

El esquema de Alamouti y en general los STBC son una buena opción frente a la arquitectura V-BLAST en entornos ruidosos por su ganancia en diversidad. Se presentan como una solución atractiva cuando se necesitan sistemas de moderadas tasas de transmisión. Sin embargo, la arquitectura V-BLAST ofrece mayores capacidades en cuanto a datos, por lo que se considera una mejor opción en sistemas que exijan grandes tasas de transmisión.

La tecnología MIMO ofrece un incremento en las capacidades de los sistemas inalámbricos. En el presente trabajo se demostró las cualidades de los sistemas multiantenas con la implementación de diversos esquemas, las configuraciones mejoraron progresivamente el rendimiento del sistema con el aumento del número de antenas en el receptor, siendo el mejoramiento de la BER del sistema proporcional a la cantidad de antenas utilizadas.

Se ha demostrado que un sistema LTE que utiliza el esquema de Alamouti presenta un mejor comportamiento que uno basado en tecnología V-BLAST. Este comportamiento es medido con respecto a la tasa de error de bit (BER) y teniendo en cuenta las mismas condiciones de canal para ambas configuraciones. El esquema de Alamouti utilizado dentro de la tecnología LTE reduce la probabilidad de errores en el sistema, por lo que es recomendable su uso en entornos ruidosos.

En cuanto a las estructuras evaluadas en el proyecto se concluye que el aumento en el número de antenas en recepción está ligado directamente con la mejora en el rendimiento del sistema. Este principio aplica para todas las configuraciones de antenas evaluadas en LTE, excepto cuando se usa tecnología V-BLAST con el mismo número de antenas en transmisor y receptor, ya que el sistema se hace más susceptible a condiciones desfavorables del canal.

Las condiciones del canal influyen en la selección de los esquemas de modulación y codificación utilizados en la tecnología LTE. Cuando las distancias son largas y en condiciones severas, se utiliza un esquema de modulación robusto y menos propenso al ruido como BPSK, sacrificando la tasa de datos. Por otra parte cuando el canal se caracteriza por sus condiciones favorables se utilizan modulaciones como QAM, con los cuales se obtiene mayores tasas de transmisión.

Hasta hace poco tiempo solo era factible la implementación de múltiples antenas en las estaciones base y no en los equipos móviles. Sin embargo esta tendencia viene reduciéndose y se contempla la implementación de múltiples antenas en los equipos móviles, esto debido al desarrollo de nuevas técnicas y materiales de fabricación de las antenas y de los circuitos adicionales que estas conllevan.

## 6. TRABAJOS FUTUROS

Mediante el desarrollo de este proyecto quedaron abiertas varias líneas de investigación a futuro, que servirán como complemento al trabajo realizado. Se proponen las siguientes:

- Utilizar técnicas de estimación de canal que permitan reducir considerablemente la BER del sistema. Una posibilidad de estimación de canal, sería que el receptor seleccionara la modulación que se emplearía en el siguiente símbolo de información a partir de una predicción del canal.
- Evaluar la capacidad de la arquitectura V-BLAST para conseguir altas tasas de transmisión de datos. Identificar las mejoras en la eficiencia espectral a través de la multiplexación espacial sin mayor demanda de ancho de banda.
- Implementación de Turbo-códigos (T-BLAST) con el fin de evaluar su capacidad y posible implementación en la tecnología LTE.
- Uso de modulación adaptativa, que permita al sistema LTE escoger el orden de modulación en función de las condiciones del canal para evitar las interferencias y mantener una tasa de error de bit moderada.
- Emplear sistemas de lazo cerrado de potencia variable. Los cuales permiten ajustar la potencia de transmisión en cada antena. De esta forma la potencia se concentra sobre las antenas que observan los canales más favorables.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Haohong Wang, Lisimachos P. Kondi, Ajay Luthra and Song Ci. "4G Wireless Video Communications". John Wiley & Sons. 2009.
- [2] R. Comes, F. Álvarez, F. Palacio, R. Ferre, J. Romero, O. Soig. "LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles". Fundación Vodafone España. 2010.
- [3] Magnus Olsson, "SAE and the Evolved Packet Core: Driving the Mobile Broadband Revolution", Academic Press, Elsevier, 2009.
- [4] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Sköld and Per Beming. "3G Evolution: HSPA and LTE for mobile Broadband". Academic Press Publishing House. 2007.
- [5] HOLMA H, TOSKALA A. "LTE for UMTS-OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access". Editorial John Wiley & Sons, 2009.
- [6] WESTE, N. y SKELLERN, D.J. "VLSI for OFDM", IEEE Communications Magazine". Octubre 1998, p. 127 – 131.
- [7] "Second Generation High-Capacity Broadband Wireless Solutions", Redline Communication Inc., 2003.
- [8] C. DEL CASTILLO. "Estudio de la modulación OFDM y de los efectos no lineales mediante simulación en Matlab". Departamento de teoría de la señal y comunicaciones. Universidad de Sevilla. 2008.
- [9] D. Matie. "OFDM as possible modulation technique for multimedia applications in the range of mm waves", Introduction to OFDM, II edition, TUD-TVS. October 1998.
- [10] ELALI, T.S., Discrete Systems and Digital Signal Processing with MATLAB, CRC Press, 2000, Boca Ratón, FL, EUA.
- [11] W. Tomasi. Electronic Communication Systems. Pearson Education, 2003.
- [12] David Tse, Pradmod Viswanath. Fundamentals of Wireless Communication. Cambridge University Press, 2005.
- [13] D. Parsons. The Mobile Radio Propagation Channel. Wiley, New York, NY, 1992.

- [14] J. Payan. Técnicas de estimación de canal para sistemas MIMO-OFDM. Centro de investigación científica y educación superior de Ensenada. 2008.
- [15] D. Mavares. “Estimación de canal y selección adaptativa de código espacio-tiempo en sistemas de diversidad en transmisión”. Departamento de ingeniería de comunicaciones, Universidad de Cantabria. 2006.
- [16] D. Gesbert, M. Shafi, D. Shiu, P. J. Smith, y A. Naguib, “From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems,” *IEEE J. Select. Areas Commun*, 2003.
- [17] H. Hourani. “An overview of diversity techniques in wireless communication systems”. Postgraduate Course in Radio Communications, 2005. Helsinki University of Technology, Finlandia.
- [18] S. Alamouti, “A simple transmit diversity technique for wireless communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, Oct.1998.
- [19] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. Calderbank, “Space-time block coding for wireless communications: performance results,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, Mar. 1999.
- [20] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden, y R. A. Valenzuela, “VBLAST: An Architecture for Realizing Very High Data Rates Over the Rich-Scattering Wireless Channel” *Proc. ISSE*, Pisa, Italia, Sep. 1998.
- [21] D. Wübben, R. Böhnke, V. Kühn, y K.-D. Kammeyer, “MMSE Extension of V-BLAST based on Sorted QR Decomposition,” *IEEE Proc.* Octubre 2003.
- [22] A. F. Molish, M. Z. Win, J.H. Wintersy A. Paulraj, “Capacity of MIMO systems”. IEEE International Conference on Communications. 2001.
- [23] G. J. Foschini, “Layered Space–Time Architecture for Wireless Communication in a Fading Environment When Using Multi-Element Antennas,” *Bell Labs Tech.* Otoño 1996.
- [24] P. K. Barmashe. “Performance Evaluation of V-BLAST MIMO System using BPSK”. International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering. Volume 1, Issue 3.
- [25] H. Chamkhia, A. Omri, R. Bouallegue. “Improvement of LTE System Performances by Using a New Pilot Structure”. International Journal of Wireless & Mobile Networks. Vol. 4, No. 1, Feb. 2012.

- [26] A. Khare, M. Saxena, V. S. Mandloi. "Performance Analysis of V-BLAST Based MIMO-OFDM System with Various Detection Techniques". International Journal of Engineering and Advanced Technology. Vol. 1, Issue 2, Dec. 2011.
- [27] A. Rivera-Albino. "Gain Enhancement in Microstrip Patch Antennas Using Hybrid Substrates". Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE. Vol. 12, 2013.
- [28] Z. Liu. "Enhancement of the Gain for Microstrip Antennas Using Negative Permeability Metamaterial on Low Temperature Co-Fired Ceramic (LTCC) Substrate". Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE. Vol. 12, 2013.
- [29] T. Nakamura. "Proposal for Candidate Radio Interface Technologies for IMT-Advanced Base don LTE Release 10 and Beyond (LTE-Advanced)". 3<sup>rd</sup> Workshop on IMT-Advanced. 15 Oct. 2009.

## **ANEXOS**

### **ANEXO A. FUNCIONES MATLAB**

Este anexo se encuentra en el CD que acompaña el libro.