

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE UN SISTEMA SISO Y
UN SISTEMA MIMO**

**CARLOS FRANCISCO PLAZA VÁSQUEZ
EDWIN LEONARDO REY MUÑOZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO I+D EN NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES
POPAYÁN
2008**

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE UN SISTEMA SISO Y UN SISTEMA MIMO



**CARLOS FRANCISCO PLAZA VÁSQUEZ
EDWIN LEONARDO REY MUÑOZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO I+D EN NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES
POPAYÁN
2008**

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE UN SISTEMA SISO Y UN SISTEMA MIMO



**CARLOS FRANCISCO PLAZA VÁSQUEZ
EDWIN LEONARDO REY MUÑOZ**

**Trabajo de Grado presentado para optar al título de Ingeniero en Electrónica y
Telecomunicaciones**

**Director
Ingeniera. Claudia Hernandez**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO I+D EN NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES
POPAYÁN
2008**

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABLA	iv
LISTA DE ANEXOS	v
LISTA DE ACRÓNIMOS	v
INTRODUCCIÓN	1
1 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS SISO Y MIMO.....	4
2 FUNDAMENTOS Y COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS SISO Y MIMO	7
2.1 GENERALIDADES DE LAS RADIOCOMUNICACIONES	7
2.2 FUNDAMENTOS DE LOS SISTEMAS SISO	9
2.3 DIAGRAMA EN BLOQUES DE LOS SISTEMAS SISO	10
2.4 MECANISMOS DE COMPENSACIÓN DE ERRORES	13
2.4.1 Codificación de Canal en los Sistemas SISO.....	13
2.4.2 Detección y Corrección de Errores	13
2.4.3 Diversidad en Sistemas SISO	16
2.5 MODELADO DEL CANAL DE RADIO	20
2.5.1 Modelo de Canal Gaussiano	21
2.5.2 Modelo de Canal Rayleigh	22
2.6 CAPACIDAD DE CANAL	23
2.6.1 Capacidad del Canal SISO con Desvanecimiento Plano	24
2.7 FUNDAMENTO DE LOS SISTEMAS MIMO	25
2.8 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS MIMO	26
2.8.1 Codificador del Canal Espacio Temporal.....	27
2.8.2 Canal de un Sistema MIMO	28
2.9 MECANISMOS DE COMPENSACIÓN DE ERRORES	28
2.9.1 Codificación de Canal de los Sistemas MIMO.....	28
2.9.2 Codificación Espacio-Temporal.....	28
2.10 CANAL EN LOS SISTEMAS MIMO	30
2.10.1 Características del Canal MIMO.....	30
2.10.2 Modelo Matemático del Canal MIMO	32
2.10.3 Capacidad del Canal Mimo Determinístico y Plano en Frecuencia.....	33
2.11 DIVERSIDAD EN SISTEMAS MIMO	34
2.11.1 Diversidad Espacial en un Sistema MIMO.....	34
2.11.2 Multiplexación Espacial en un Sistema MIMO	35
2.12 COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS MIMO Y SISO.....	36
2.12.1 Comparación en la Codificación	36
2.12.2 Comparación en Diversidad	38
2.12.3 Comparación del Canal MIMO y el Canal SISO	39
3 SIMULACIÓN DE CAPACIDAD DE UN SISTEMA SISO Y UN SISTEMA MIMO.....	43
3.1 INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN	43
3.2 JUSTIFICACIÓN DE LA SIMULACIÓN	44
3.3 MATLAB 7.1.....	44
3.4 LabVIEW 7.0	45
3.5 SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN.....	46

3.6 APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN	46
3.6.1 Modelamiento	46
3.6.2 Modelo Conceptual	47
3.6.3 Modelo de Simulación	51
3.6.4 Apropiación de la Base Teórica de los Sistemas SISO y los sistemas MIMO para su Simulación.....	56
3.6.5 Validación del Modelo de Simulación	57
3.7 SIMULACIONES Y RESULTADOS	57
3.7.1 Escenarios de Simulación	58
3.7.2 Análisis de la BER.....	65
3.8 CONCLUSIONES DE LA SIMULACIÓN	73
4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	75
4.1 CONCLUSIONES.....	75
4.2 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	77
BIBLIOGRAFÍA	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Topología de un Sistema MIMO	4
Figura 1-2. Topología de un Sistema SISO	5
Figura 2-1. Presencia de Multitrayectorias en el Canal Inalámbrico	8
Figura 2-2. Diagrama en Bloques de un Sistema de Comunicaciones SISO	10
Figura 2-3. Codificador Bloques.....	14
Figura 2-4. Codificador Convolutivo	15
Figura 2-5. Esquema de Diversidad Temporal.....	17
Figura 2-6. Estructura de un Entrelazador de longitud $L=12$	17
Figura 2-7. Esquema de Diversidad de Frecuencia	18
Figura 2-8. Esquema de Diversidad en Recepción	19
Figura 2-9. Esquema de Diversidad en Transmisión	19
Figura 2-10. Canal AWGN	22
Figura 2-11. Canal Rayleigh	23
Figura 2-12 Diagrama de Transmisión de un Sistema de Comunicaciones MIMO	26
Figura 2-13. Diagrama en Bloques de un Sistema MIMO.....	27
Figura 2-14. Codificador Espacio Temporal	28
Figura 2-15. Esquema de un Codificador STBC	29
Figura 2-16. Esquema Básico de un Codificador STTC	30
Figura 2-17. Modos de Propagación de la señal en un Sistema MIMO.....	31
Figura 2-18. Esquema de Diversidad Espacial en Sistemas MIMO	35
Figura 2-19. Esquema de Multiplexación Espacial en Sistemas MIMO.....	36
Figura 2-20. Diagrama en Bloques de Sistema MIMO, usando..... Codificación Espacio Temporal de Alamouti.	38
Figura 3-1. Estructura del Sistema Total	47
Figura 3-2. Estructura del Subsistema Transmisor	48
Figura 3-3. Estructura del Subsistema Receptor.....	50
Figura 3-4. Diagrama General de los Bloques Generados para la Simulación	56
Figura 3-5. Comparación de Capacidad de Sistemas con Múltiples Antenas .. para Canal AWGN.....	60
Figura 3-6. Comparación de Capacidad de Sistemas con Múltiples Antenas .. con canal Rayleigh	61
Figura 3-7. Capacidad de un Sistema SISO y un Sistema MIMO 2x2 con..... Canal Rayleigh y Codificación de Canal	62
Figura 3-8. Capacidad de un Sistema SISO y un Sistema MIMO con Canal... AWGN y Codificación de Canal.....	63
Figura 3-9. Capacidad de un Sistema SISO y MIMO 2x2 sin Codificación de . Canal y Canal Rayleigh	64
Figura 3-10. Capacidad de un Sistema SISO y MIMO 2x2 sin Codificación de Canal y Canal AWGN	65
Figura 3-11. BER SISO con Canal Rayleigh sin Codificación de Canal	66
Figura 3-12. BER sistema con Codificación de Canal.....	67

Figura 3-13. BER Sistema SISO y MIMO con Canal Rayleigh y Codificación de Canal	68
Figura 3-14. BER Sistema SISO y MIMO con Canal Rayleigh con Codificación de Canal.....	69
Figura 3-15. BER de un Sistema SISO y un Sistema MIMO 2x2 con Canal.... Rayleigh y Codificación de Canal	71
Figura 3-16. BER de un Sistema SISO y un Sistema MIMO 2x2 con Canal.... AWGN y Codificación de Canal.....	71
Figura 3-17. BER de un Sistema SISO y MIMO 2x2 sin Codificación de Canal y canal Rayleigh.....	72

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 2-1. Tabla comparativa entre sistemas SISO y MIMO	42
---	----

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. ESQUEMAS DE RECEPCIÓN PARA SISTEMAS CON MULTIPLEXACIÓN ESPACIAL

ANEXO B. MÉTODOS DE COMBINACIÓN EN EL RECEPTOR

ANEXO C. DOCUMENTACIÓN DE LA SIMULACIÓN

LISTA DE ACRÓNIMOS

AP: Punto de Acceso (*Access point*)

ARQ: Solicitud de Repetición Automático (*Automatic Repeat Request*).

AWGN: Ruido Gaussiano Blanco Aditivo (*Addition White Gaussian Noise*)

BER: Tasa de Error de Bit (*Bit Error Rate*)

BPSK: Modulación por Cambio de Fase binaria (*binary Phase Shift keying*)

EGC: Combinación por Igual Ganancia (*Equal Gain Combining*)

EWC: Consorcio Inalámbrico Mejorado (*Enhanced Wireless Consortium*)

FEC: Corrección de Error Hacia Delante (*Forward Error Correction*)

FDM: Multiplexación por División de Frecuencia (*Multiplexing Division Frequency*)

GNTT: Grupo de Investigación y Desarrollo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones

GPL: Licencia Pública General (*General Public License*)

IEEE: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*)

ISI: Interferencia Intersimbólica (*Intersymbol Interference*)

LOS: Línea de Vista (*Line of sight*)

MAN: Red de Área Metropolitana (*Metropolitan Area Network*)

MATLAB: Laboratorio Matricial (*Matrix Laboratory*)

MIMO: Múltiple Entrada, Múltiple Salida (*Multiple input, Multiple output*)

MISO: Múltiple Entrada, Simple Salida (*Multiple Input, Simple Output*)

ML: Maxima verosimilitud (*maximum likelihood*)

NLOS: Sin línea de Vista (*No Line of sight*)

NCTUns: Simulador de Red de la Universidad Nacional Chiao Tung (*National Chiao Tung University Network Simulator*)

MMSE: Receptor de Error Cuadrático Medio (*Minimun Mean-Square Error Receiver*)

MRC: Combinación por Máxima Relación (*Maximal Ratio Combining*)

NS2: Simulador de Redes (*Network Simulator*)

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

PSK: Modulación por Cambio de Fase (*Phase Shift keying*)

SC: Combinación por Selección (*Selection Combining*)

SDMA: Acceso Múltiple por División Espacial (*Spatial Division Multiple Access*)
SIMO: Entrada Simple-Salida Múltiple (*Simple Input-Multiple Output*)
SISO: Entrada Simple, Salida Simple (*Simple Input, Simple Output*)
SNR: Relación Señal a Ruido (*Signal to Noise Ratio*)
STC: Código Espacio Temporal (*Space Time Code*)
STTC: Código Espacio Temporal Trellis o Convolutivos (*Space Time Trellis Code*)
STBC: Código Espacio Temporal por Bloques (*Space Time Block Code*)
TCM: Modulación por Codificación Trellis (*Trellis Code Modulation*)
UMTS: Sistema de Telefonía Móvil Universal (*Universal Mobile Telephony System*)
V-BLAST: Arquitectura Vertical Espacio Temporal de los laboratorios Bell (*Vertical-Bell Labs Layered Space-Time architecture*)
WAN: Red de Área Amplia (*Wide Area Network*)
Wi-Fi: Alianza de Fidelidad Inalámbrica (*Wireless Fidelity Alliance*)
WiMax: Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (*Worldwide Interoperability Microwave Access*)
WLAN: Red de Área Local Inalámbrica (*Wireless Local Area Network*)
WPAN: Red de Área Personal Inalámbrica (*Wireless Personal Area Network*)
ZF: Receptor Zero Forcing (*Zero Forcing Receiver*)

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicaciones inalámbricos convencionales conocidos como sistemas SISO (Single Input-Single Output) presentan en su topología una sola antena en el transmisor y una sola antena en recepción, con lo cual idealmente se generaba un solo trayecto entre los dos extremos de la comunicación, sin embargo debido a que el medio de propagación es dispersivo, la señal llega al receptor a través de múltiples caminos o trayectorias cada una con factores de atenuación, corrimiento de fase y tiempos de arribo diferentes, lo que origina sumas constructivas o destructivas de la señal recibida, generando fluctuaciones en la amplitud de la señal, conocidas como desvanecimiento por multitrayectorias originados por fenómenos como reflexión, difracción y dispersión propios del medio de propagación.

Para contrarrestar éstas fluctuaciones en los sistemas SISO se han implementado esquemas de diversidad en el tiempo, frecuencia y espacio, con el propósito de tener redundancia de la señal en el receptor, a costa de generar retardos o usar frecuencias adicionales; a diferencia de los sistemas MIMO que usan múltiples antenas en transmisión y recepción para generar estas señales redundantes.

En este documento se estudia el funcionamiento y características de los sistemas SISO y los sistemas MIMO (Multiple Input-Multiple Output), con el propósito de analizar comparativamente la capacidad de canal y el desempeño de estos sistemas para un enlace entre dos dispositivos. La comparación se realiza a través de un diagrama en bloque básico de los dos sistemas, el cual cuenta con un bloque de fuente, codificador de fuente, codificador de canal, modulación, canal radio y sus respectivos bloques en el lado receptor, con el fin de determinar dónde se generan las diferencias más significativas debido al uso de múltiples antenas en el receptor y el transmisor; finalmente se realiza una simulación en MATLAB 7.1 que permite evaluar y analizar la capacidad del canal radio al variar el número de antenas desde una hasta cuatro en los dos extremos de la comunicación y el desempeño respecto a la tasa de error de bit (*Bit Error Rate*, BER) entre un sistema SISO y un sistema MIMO (2,2) con dos antenas en transmisión y en recepción, considerando un modelo de canal Rayleigh que permite simular un entorno con presencia de múltiples trayectorias y un modelo de canal Gaussiano para simular un entorno con ruido blanco. A continuación se describen brevemente los capítulos contenidos en el documento.

En el capítulo uno se describen los aspectos más generales de un sistema SISO y un sistema MIMO, se estudia su topología y se introduce el concepto de capacidad de canal para los dos sistemas.

En el capítulo dos se analizan comparativamente los sistemas SISO y los sistemas MIMO, mediante el uso de un diagrama en bloques que permite realizar un estudio modular de sus características, para determinar la capacidad de canal y desempeño en términos de la tasa de errores, con lo que se puede determinar que componentes de MIMO, aportan en la solución de los problemas que presenta SISO en el canal radio; para esto se estudian los fundamentos de los sistemas SISO y MIMO.

Posteriormente se analizan los cambios fundamentales en el bloque de codificación de canal, dado que MIMO hace uso de la diversidad espacial en ambos extremos de la comunicación para lo cual requiere que se implemente codificación espacio temporal.

En lo concerniente al bloque del canal radio el análisis para el sistema SISO se centra en la capacidad del canal y en las técnicas implementadas para reducir los efectos nocivos causados por la presencia de ruido, como es la implementación de códigos correctores de error y técnicas que permiten explotar diversidad temporal, diversidad de frecuencia y diversidad espacial en recepción.

Mientras tanto en el bloque del canal radio para MIMO se debe considerar las multitrayectorias generadas a voluntad con la implementación de diversidad espacial en transmisión, evidenciando el análisis matricial requerido en el canal radio. También se estudian los mecanismos usados para aumentar la velocidad de transmisión como implementación de multiplexación espacial o técnicas que apuntan hacia la disminución de la tasa de errores como la explotación de diversidad espacial en transmisión.

Para este estudio de los sistemas SISO y MIMO se asume un modelo de canal quasi-estático con desvanecimiento lento, ambientes con mucha dispersión y separación entre las antenas, enfocado a un enlace punto a punto para un solo usuario, con conocimiento perfecto del canal únicamente en el receptor.

En MIMO se usa múltiples antenas en transmisión y múltiples antenas en recepción, generando una matriz de canal con una distribución *Gaussiana* compleja constante para cada trama de datos. La potencia de transmisión se distribuye de manera equitativa por todas las antenas para evitar ganancia por arreglo.

En el capítulo tres se realiza un balance de las herramientas de simulación exploradas durante el desarrollo de este trabajo, las razones por las que se escogió MATLAB y la metodología empleada para la realización de la simulación, además se simula un sistema SISO (1,1) y MIMO (2,2), para calcular la capacidad del canal y la BER; características que se grafican respecto a la variación de la Relación Señal a Ruido (*Signal to Noise Ratio*,

SNR). De igual manera se calcula la capacidad de un sistema MIMO (2,2), (3,3) y (4,4).

También se presentan los resultados obtenidos y la comparación realizada entre los sistemas expuestos a diferentes ambientes, como la presencia de ruido *Gaussiano* blanco aditivo (*Addition White Gaussian Noise, AWGN*), simulando el canal como una variable aleatoria que sigue una distribución Normal y posteriormente la caracterización de un canal con presencia de multitrayectorias, representado por una distribución *Rayleigh*.

Para cada tipo de canal se calculó la BER del sistema y su capacidad; también se realizaron variaciones en el número de antenas, empezando en un sistema SISO, pasando a un sistema MIMO (2,2), (3,3), (4,4), con lo cual se comprobó que el aumento en la capacidad del canal es prácticamente lineal con respecto al número de antenas utilizado.

Finalmente, en el capítulo cuatro se desarrolla un análisis de las ventajas y desventajas que presentan los sistemas MIMO, las conclusiones de este trabajo de grado y las propuestas para trabajos futuros frente al tema de los sistemas MIMO.

1 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS SISO Y MIMO

La señal viaja por múltiples caminos o trayectorias debido al comportamiento dispersivo del canal radio haciendo que las señales lleguen al receptor por diferentes caminos, lo que origina sumas constructivas o destructivas de la señal recibida, generando fluctuaciones en la amplitud de la señal, conocidas como desvanecimiento por multitrayectorias que degrada el desempeño del sistema incrementando el número de errores en la transmisión.

Una de las alternativas usadas para disminuir las alteraciones presentes en la señal, es la implementación de diversidad espacial, que consiste en usar múltiples antenas generalmente en el receptor, con el fin de capturar señales reflejadas que presenten desvanecimientos independientes que posteriormente refuercen la señal [5]. Luego con la implementación de múltiples antenas en el lado del transmisor, se originan los sistemas MIMO (*Multiple input Multiple Output*).

La tecnología MIMO fue originalmente concebida a principios de los años setenta por ingenieros de los Laboratorios *Bell -The BLAST Team*, quienes trataban de direccionar las limitaciones de ancho de banda, ocasionadas por las señales interferentes en los cables de gran capacidad de transmisión. Sin embargo, con el paso de los años, la limitada capacidad de procesamiento para manejar las señales, hizo que MIMO fuera demasiado costoso para llevarlo a la práctica [38]. Actualmente con las reducciones de costo en el procesamiento de señales, gracias al desarrollo de códigos espacio temporales, que buscan transmitir la información por cada antena de una manera apropiada con el objetivo de generar ganancia por diversidad para y así mejorar la calidad de la señal en el receptor, nuevamente la atención de los desarrolladores se ah centrado hacia los sistemas MIMO [38].

Los sistemas MIMO o multi-antena, presentan en su topología dos o más antenas en el transmisor y otro tanto en el receptor, como se puede apreciar en la Figura 1-1, mientras los sistemas SISO (*single input, single output*) usan una antena en el transmisor y otra en el receptor, como se presenta en la Figura 1-2.



Figura 1-1. Topología de un Sistema MIMO

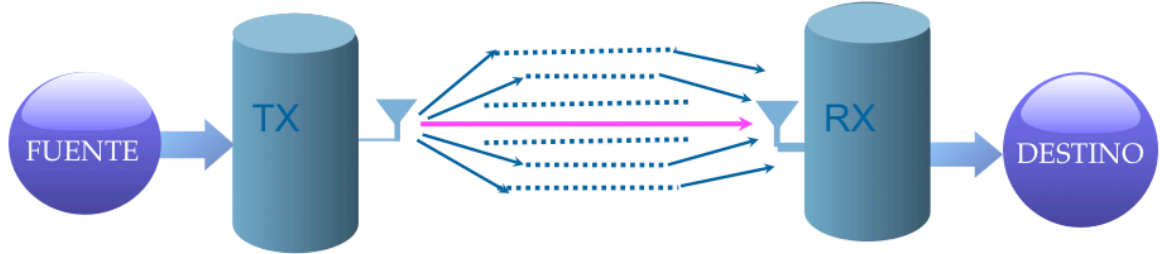


Figura 1-2. Topología de un Sistema SISO

En un sistema SISO se genera un único canal entre el receptor y el transmisor, aunque el uso de antenas con poca directividad ocasiona la aparición de multitrayectorias o presencia de señales que llegan al receptor a través de caminos diferentes al camino principal; el problema se origina cuando muchas señales reflejadas llegan al receptor desfasadas, incluso en perfecta contrafase, ocasionando atenuación de la señal transmitida.

En un sistema MIMO, gracias a la disponibilidad de varias antenas en el transmisor se generan múltiples trayectorias o nodos a voluntad, y se cuenta con un sistema que permite capturar la señal de una manera adecuada, gracias a la presencia en recepción de múltiples antenas, que disminuyen la atenuación causada por las multitrayectorias, ya que la información se obtiene con muestras que llegaron al receptor a través de diferentes rutas y por lo tanto fueron afectadas por el medio de transmisión de manera independiente [39][40].

El límite teórico de *Shannon* establece que la capacidad de un sistema de comunicaciones depende del ancho de banda del sistema y de la potencia de transmisión sin embargo la capacidad del canal puede aumentarse considerablemente variando el número de antenas en el transmisor y el receptor; lo que requiere de mayor procesamiento de la señal y hace de este un método costoso y difícil de llevar a la práctica, por tanto, el aumento en la capacidad del canal, se limita al incremento de la potencia de transmisión o ancho de banda [41], como se puede observar la siguiente ecuación:

$$C = b \log_2(1 + \rho |h|^2) \text{ bits / s / Hz,} \quad (1.1)$$

donde ρ representa la relación señal a ruido y h representa el canal o medio de transmisión entre las dos antenas.

Si el aumento en la capacidad depende del ancho de banda y de la potencia de transmisión, se presenta una restricción muy grande, porque estas características no pueden ser manipuladas de manera arbitraria ya que las variaciones en el ancho de banda, deben estar previstas mediante un plan de frecuencias para evitar interferencias con otros sistemas y el incremento de la

potencia de transmisión disminuye el tiempo de autonomía de los equipos móviles y eleva los costos de fabricación.

Los sistemas MIMO, representan una opción muy atractiva al asociar la capacidad del canal con el número de antenas usadas en transmisión y en recepción, parámetro que teóricamente no tiene límite; es decir si se desea duplicar la capacidad del canal, bastaría con duplicar el número de antenas usadas.

La capacidad de un canal MIMO, se puede observar en la siguiente ecuación:

$$C = \log_2 \left(I_{Nr} + \frac{\rho}{Nt} HH^* \right) \text{bits} / \text{s} / \text{Hz} , \quad (1.2)$$

donde ρ representa la relación señal a ruido, Nt representan el número de antenas transmisoras y Nr representa el número de antenas receptoras y H el canal de radio, que en este caso es una matriz de transferencia entre las antenas de transmisión y recepción.

Los sistemas MIMO han tenido acogida y se han incluido en estándares como Sistema de Telefonía Móvil Universal (*Universal Mobile Telephony System, UMTS*), Alianza de Fidelidad Inalámbrica (*Wireless Fidelity Alliance, Wi-Fi*) y Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (*World wide Interoperability Microwave Access, WiMax*); este último ha mejorado su cobertura usando MIMO, permitiendo tener movilidad en el receptor. El uso de los sistemas MIMO en Redes de Área Local Inalámbrica (*Wireless Local Area Network, WLAN*), permite incrementar la velocidad de transmisión, facilitando el surgimiento de nuevas aplicaciones, razones que motivan a distintos desarrolladores de productos inalámbricos a promover el surgimiento de un nuevo estándar para WLAN conocido como 802.11n, el cual incluye MIMO como su transformación esencial [38].

Por las razones expuestas anteriormente en este trabajo de grado se va a desarrollar el estudio y análisis de los sistemas SISO y MIMO, con el fin de realizar una comparación entre estos y corroborar la información teórica de las ventajas de usar múltiples antenas tanto en recepción como en transmisión y sus posibles aplicaciones; generando contenidos actuales para las asignaturas de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, facilitando una base para la enseñanza futura, de tal forma que aporte a la formación de profesionales que respondan a las exigencias actuales del sector de las telecomunicaciones en el país y en el mundo.

2 FUNDAMENTOS Y COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS SISO Y MIMO

Introducción

En este capítulo se realiza un análisis de los fundamentos de los sistemas SISO y MIMO, usando su diagrama en bloques, con el fin de observar la funcionalidad de cada uno, también se estudian diversas técnicas usadas para disminuir el número de errores, como la implementación de esquemas de diversidad y métodos desarrollados para detectar y corregir errores en la transmisión de datos.

Para terminar se realiza una comparación bloque a bloque entre los sistemas SISO y MIMO, focalizada en la codificación y en el canal de radio, bloques responsables del incremento de capacidad y rendimiento del sistema.

2.1 GENERALIDADES DE LAS RADIOCOMUNICACIONES

Los canales de comunicaciones móviles se caracterizan por la variación temporal de sus características, la presencia de ruido, señales interferentes y obstáculos naturales o artificiales que afectan la comunicación ya que carecen de un medio de transmisión guiado que permita proteger y controlar la información.

Con el estudio de las condiciones del canal se busca comprender su comportamiento, para determinar las características del medio de propagación, tarea que no es fácil de realizar debido a las variaciones temporales de éste [4].

La presencia de multitrayectorias es un fenómeno que se presenta en el canal radio, generando en el receptor múltiples componentes o ecos de la señal originalmente transmitida, cada uno con factores de atenuación, corrimiento de fase y tiempos de llegada diferentes, los cuales son originados por fenómenos como reflexión, difracción y dispersión propios del canal o medio de transmisión como se puede observar en la Figura 2-1 [5][49][51][52][43].

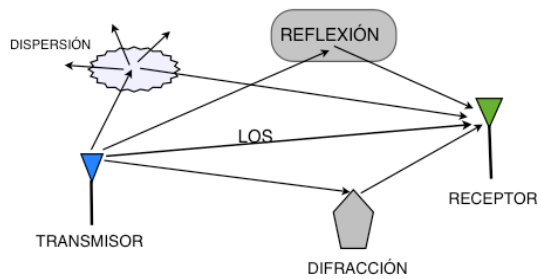


Figura 2-1. Presencia de Multitrayectorias en el Canal Inalámbrico

En la Figura 2-1 se observa que la señal transmitida tiene un rayo directo con el receptor, denominada línea de vista (*Line of Sight*, LOS) trayecto en el que la señal recibida es usualmente más fuerte y dominante; en un ambiente en el que existe una obstrucción por parte de un objeto entre el trayecto de la señal transmitida hacia el receptor, se denomina sin línea de vista (*Non Line of Sight*, NLOS).

La reflexión de una onda electromagnética ocurre porque la señal puede ser reflejada por cualquier objeto que sea más grande que su longitud de onda y así llegar al receptor a través de múltiples señales reflejadas, recorriendo una mayor distancia, lo que repercute en un cambio de intensidad y fase, respecto a la señal que tiene LOS.

La difracción es otro fenómeno de propagación de la onda electromagnética, que ocurre cuando la onda encuentra a su paso una superficie con irregularidades muy finas o un pequeño obstáculo y lo rodea

La dispersión, ocurre cuando la onda se encuentra con objetos más pequeños que su longitud de onda, propagándose a través de diferentes direcciones.

La reflexión, dispersión y difracción generan multitrayectorias o modos de propagación, los cuales se pueden sumar constructiva o destructivamente en el receptor produciendo cambios en el nivel de potencia de la señal para pequeños cambios de posición; lo que se conoce como desvanecimiento a pequeña escala [11]. El desvanecimiento a gran escala corresponde al estudio del comportamiento de la señal a grandes distancias, donde la potencia de la señal recibida es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el transmisor y el receptor.

Las variaciones en la señal por sus trayectorias ya sean causadas por reflexión, dispersión y difracción, generan que la señal en el receptor tenga una intensidad que varía rápidamente por periodos muy cortos de tiempo. Por esto un canal con multitrayectorias puede ser modelado como un canal con variación lineal en el tiempo [51][52][11].

Los retardos por multitrayectoria pueden ser modelados por un canal con desvanecimiento plano o con desvanecimiento selectivo en frecuencia y los efectos de la dispersión *doppler*, pueden ser modelados por un canal con desvanecimiento lento o desvanecimiento rápido; de donde se desprende la siguiente clasificación de los desvanecimientos presentes en el canal de radio:

- Desvanecimiento plano y lento: cuando el ancho de banda de la señal es más pequeño que el ancho de banda de coherencia del canal y la duración de la señal es más pequeña que el tiempo de coherencia del canal.
- Desvanecimiento plano y rápido: cuando el ancho de banda de la señal es más pequeño que el ancho de banda de coherencia del canal y la duración de la señal es más grande que el tiempo de coherencia del canal.
- Desvanecimiento selectivo en frecuencia y lento: cuando el ancho de banda de la señal es más grande que el ancho de banda de coherencia del canal y la duración de la señal es más pequeña del tiempo de coherencia del canal.
- Desvanecimiento Selectivo en frecuencia y rápido: cuando el ancho de banda de la señal es más grande que el ancho de banda de coherencia del canal y la duración de la señal es más grande que el tiempo de coherencia del canal.

2.2 FUNDAMENTOS DE LOS SISTEMAS SISO

Las comunicaciones a través del tiempo han presenciado la necesidad de incrementar la cantidad de datos a transmitir, ya sea de manera cableada o inalámbrica [3][1].

Inicialmente los sistemas inalámbricos presentaban en su estructura una antena en transmisión y una antena en recepción, motivo por el cual se conocen como sistemas SISO, posteriormente a medida que evolucionan los equipos y el procesamiento de la señal, han incorporado un mayor número de antenas especialmente en recepción con el fin de mitigar el desvanecimiento por multitrayectorias, factor que producen una baja inteligibilidad de los datos en recepción.

Razón que ha motivado la búsqueda de métodos capaces de incrementar la eficiencia del sistema y capacidad del canal radio, que permita la recuperación de datos sin errores. Para lograrlo, las comunicaciones inalámbricas, implementan codificación de canal y mecanismos de diversidad.

2.3 DIAGRAMA EN BLOQUES DE LOS SISTEMAS SISO

Los sistemas de comunicaciones inalámbricos SISO, han tenido continuos desarrollos en el procesamiento de la señal con el objetivo de incrementar la velocidad en la transmisión de información y contrarrestar los efectos nocivos presentes en el canal de radio.

Para optimizar el desempeño del canal en la transmisión de información se han implementado técnicas de codificación de fuente, de canal, diferentes tipos de modulaciones (digital o analógica).

Para entender la estructura de un sistema de comunicaciones, en la Figura 2-2, se ilustra el diagrama para un sistema SISO.

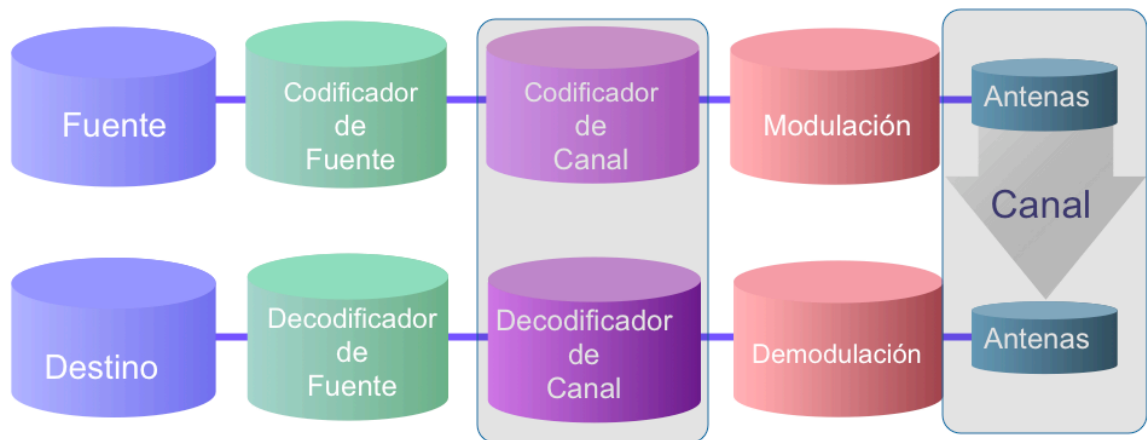


Figura 2-2. Diagrama en Bloques de un Sistema de Comunicaciones SISO

- **Fuente de Información**

Son los datos compuestos de distintos símbolos que se desean transmitir, siendo de naturaleza digital (dispositivos de almacenamiento óptico o magnético) o analógica (señales de audio y video); éstas señales una vez producidas están formadas por información redundante.

- **Codificador de Fuente**

Los símbolos emitidos por la fuente llegan a éste bloque donde se extrae la mayor cantidad posible de información redundante e irrelevante de la señal original, reduciendo los requerimientos de ancho de banda de transmisión, generando una menor transmisión de bits y menor uso del canal.

Durante la transmisión de los símbolos a través del canal pueden producirse alteraciones sobre los mismos debido a la presencia de ruido en el canal, a éstas se les denomina errores¹. Por ello, antes de enviar los símbolos codificados, se realiza una nueva codificación, orientada a que el receptor pueda detectar y corregir los errores producidos en el canal, conocido como codificación de canal [19].

- **Codificación de Canal**

Tiene como objetivo principal la protección de la información para ser transmitida con alta fidelidad, mediante el control de los errores, lo que implica la detección y la corrección de éstos. Entendiendo que un error se produce por pérdida o por un daño del paquete.

En la detección de errores, es necesario añadir redundancia de forma controlada, para que el receptor determine si los datos recibidos son correctos o erróneos [2], usando codificación en bloque o codificación convolucional.

Los códigos bloque son aquellos que agregan bits de paridad a un bloque de bits para formar palabras de código [17] y la codificación convolucional es un código con memoria donde la palabra codificada es función del bloque previo, con lo que se obtiene mayor ganancia por codificación que un código bloque, sin embargo se incrementa el procesamiento en recepción para decodificar la información [13][7].

- **Modulación – Demodulación**

El proceso de modulación digital consiste en convertir cada palabra que sale del codificador de canal a una forma de onda adaptada a la respuesta de frecuencia del canal. Esta forma de onda es también denominada símbolo del canal.

Sea $Y = (y_1, \dots, y_n)$ una palabra codificada de duración T segundos. Entonces el modulador, para cada combinación de bits de la palabra codificada $(y_i, 0; 1)$, asigna una forma de onda de la siguiente manera:

$$(y_1, \dots, y_n) = A(t)e^{j(w(t)t + \theta(t))}; (0 : t : T), \quad (2.1)$$

donde A representa la amplitud del fasor (voltios), w la frecuencia angular (rad/s) y θ la fase (rad).

¹ Teniendo en cuenta que un error es un bit que no se recibe correctamente. Los errores en los bits se presentan tanto en la forma de errores aleatorios únicos o como en ráfaga de errores. El IEEE define ráfaga de errores como "un grupo de bits en el que dos bits sucesivos con error están separados por una cantidad de bits correctos que es inferior a una cantidad establecida". Freeman, 1995, P. 386 [16].

Para representar cada combinación del espacio de señales codificadas se pueden utilizar diferentes valores de amplitud, frecuencia, fase o una combinación de éstos, dando como resultado los diferentes esquemas de modulación digital, como se observa en la expresión (2.1) [4].

- **Canal Inalámbrico**

Cuando se hace mención al canal de radio, se refiere al aire; el cual es un medio inestable, que permite fácilmente la aparición de ruido e interferencia con otras señales, dispersión y presencia de multitrayectorias, produciendo disminución en la calidad de la señal y presencia de múltiples errores que distorsionan la información.

Sin embargo para enlaces en condiciones específicas se han construido modelos matemáticos que permiten simular o estudiar el comportamiento de la señal, éstos han sido desarrollados mediante medidas experimentales.

- **Decodificador de Canal**

Se encarga de realizar el proceso inverso al ejecutado por el bloque codificador de canal en el lado transmisor. Es decir, el decodificador de canal intenta reconstruir la secuencia de información original, de forma que presente la menor tasa de error posible, debido al ruido introducido en el canal.

Para realizar la decodificación, se detectan y se corrigen los errores que por efectos de propagación ocurran, para ello se usa el algoritmo de máxima verosimilitud (*Maximum Likelihood*. ML), empleado por los códigos existentes, bloque o convolucional, aclarando que si la codificación fue convolucional, en el decodificador se usa el algoritmo de *Viterbi* [5].

El algoritmo de decodificación de *Viterbi* basa su funcionamiento en el llamado diagrama de *Trellis*. En dicho diagrama se reconstruyen las transiciones que se produjeron al codificar una secuencia de entrada dada, de manera que se pueda conocer en el decodificador cual fue dicha secuencia de entrada, es decir, se encarga de predecir o determinar cual es la ruta más eficiente de los datos codificados; el proceso consiste en desechar algunos de todos los caminos posibles para reducir el número de cálculos.

- **Decodificador de la Fuente**

En este bloque se procede a una posible descompresión de los símbolos en el caso de haber sido comprimidos en la fuente.

- **Destino**

Es la última unidad funcional, generalmente, el destino es una persona, una maquina o una memoria.

2.4 MECANISMOS DE COMPENSACIÓN DE ERRORES

2.4.1 Codificación de Canal en los Sistemas SISO

Con el objetivo de mejorar el desempeño en los sistemas de comunicaciones y proteger la señal transmitida, es necesario la implementación de códigos para detección y corrección de errores, para lo cual se añade redundancia y en consecuencia se disminuye la cantidad de información efectiva transmitida, ya que se debe considerar que se está transmitiendo bits adicionales que permiten detectar y corregir los errores [3][16].

2.4.2 Detección y Corrección de Errores

La corrección de errores repara el error que se detecta. Existen dos categorías básicas de técnicas de control de error que según su estrategia de uso se clasifican en Correctores de Error Hacia Delante (*Forward Error Correction*, FEC) y en Solicitud de Repetición Automática (*Automatic Repeat Request*, ARQ).

2.4.2.1 ARQ

Este sistema usa un canal de retorno. Cuando se detecta un error, el receptor lo indica al transmisor por el canal de retorno y se transmite de nuevo el bloque de información que contiene el error.

2.4.2.2 FEC

Emplea códigos correctores de error para combatir los bits erróneos ocasionados por las imperfecciones del canal, añadiendo redundancia (bits de paridad) a los paquetes de información antes de ser transmitidos. Esta redundancia se usa por el receptor para detectar y corregir los errores; solo es posible corregir un número limitado de errores en el receptor [3][16].

ARQ en su modo de operación es simple y mantiene un nivel de *throughput*² razonable si la tasa de error es pequeña; sin embargo ARQ acarrea retardos variables que no se pueden aceptar en aplicaciones de tiempo real, es decir es usado en aplicaciones no sensibles a retardos (como la transferencia de datos o imágenes), a diferencia de los esquemas FEC que mantienen un *throughput* constante y tienen un tiempo de retardo limitado.

Para reducir la BER, se han diseñado una variedad de códigos encargados de introducir bits redundantes o de paridad a los bits de información a transmitir, entre los cuales se encuentran los denominados códigos de bloque que

² Cantidad de datos transmitidos que contienen información útil y no redundante.

presentan dos tipos de clasificación según su estructura: Bloque o Convolutacional [5][3].

Claro está que no son la única clase de códigos existentes, también se encuentran los turbo códigos (concatenación de códigos bloque y convolucionales), LDPC (*Low-Density Parity Check*), BICM (*Bit-Interleaved Coded Modulation*), solo por mencionar algunos, pero éste caso de estudio se centrará en los códigos FEC. Entre las principales categorías de códigos FEC están [16][18]:

- Códigos Bloque
- Códigos Convolucionales

2.4.2.3 Códigos Bloque

En los códigos bloque una trama de k bits, se codifica formando una nueva trama de longitud n , con $n > k$ bits (la transformación depende exclusivamente del valor de los k bits), los bits adicionales en la palabra codificada son de paridad o de redundancia, $r=n-k$ bits, como se puede apreciar en la Figura 2-3. Éstos bits tienen el propósito de detectar y corregir errores en el receptor; así k bits de información se codifican mediante n bits, por lo tanto los códigos se pueden expresar como código (n,k) , con una velocidad de código (*code rate*) $R_c=k/n$ [17][6][7].

Los esquemas de codificación bloque dividen una cadena de bits entre bloques independientes y codifican cada bloque de manera independiente. Los códigos bloque son usados en aplicaciones prácticas, y actualmente pertenecen a la clase de códigos cíclicos lineales, los cuales llaman la atención por su facilidad de implementación. Un esquema de codificación es lineal si la suma de dos vectores de código da como resultado un vector de código. Similarmente, un esquema de codificación es cíclico si todos los cambios de ciclo de un vector de código resultan en un vector de código válido (un corrimiento cíclico de una palabra código genera otra palabra código) [3].



Figura 2-3. Codificador Bloques

2.4.2.4 Códigos de Convolución (Convolutacional)

Su operación consiste en convertir una secuencia de bits a otra nueva secuencia de bits a la salida del codificador. Generalmente el codificador está compuesto de registros de corrimiento y se usan sumadores en módulo dos

para verificar los dígitos, cada uno de los cuales es función binaria de un subconjunto particular de los datos de información del registro de corrimiento, por esto es conocido como el tipo de codificación con memoria [16]. La codificación convolucional puede implementarse mediante un esquema como se muestra en la Figura 2-4 [7].

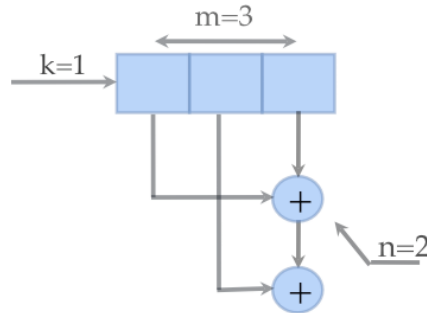


Figura 2-4. Codificador Convolucional

Por lo tanto el código convolucional se logra al pasar la secuencia de bits por un registro de desplazamiento de estados finitos. Según el esquema, la secuencia de entrada es desplazada a lo largo de los registros de memoria k bits a la vez, entonces se tendrán n bits como secuencia de salida para cada k bits de entrada. El parámetro m es la restricción de longitud e indica el número de bits de entrada de la cual depende la actual salida. Es decir la transformación no sólo depende de los k bits que se quieren codificar si no también del conjunto de los $m-k$ bits precedentes (bits en los registros) [7], en la Figura 2-3 se observa un ejemplo de un código convolucional para $K=1$ (bits de entrada), $m=3$ (bits de registro o memoria) y $n=2$ (bits codificados).

Este tipo de códigos al igual que los códigos de bloque tienen una velocidad de código dada por $R = k/n$, es la relación entre el número de bits que entran al codificador (k) y el número de bits que se obtienen a la salida del codificador (n) [3].

En los sistemas SISO, el incremento de la eficiencia en la utilización de frecuencias puede lograrse mediante la selección de un esquema de modulación de alto orden (es decir, 8-PSK en vez de 4-PSK), esto implicaría que la potencia de la señal necesariamente debe ser mas grande, para mantener la misma separación de la señal y mantener la tasa de error constante. Para contrarrestar el efecto de incrementar la potencia y obtener un uso no eficiente del canal, por la cantidad de bits redundantes, en 1982 Ungerboeck [36], creó un tipo de codificación denominada codificación de Trellis (*Trellis Code Modulation*, TCM), que es un método para mejorar la fiabilidad de un sistema de transmisión digital porque combina la selección de un esquema de modulación de alto orden con un código convolucional en un

mismo bloque, sin incrementar el ancho de banda y sin reducir la velocidad de los datos [22].

2.4.3 Diversidad en Sistemas SISO

Los esquemas o técnicas de diversidad son ampliamente difundidos en el extremo receptor y consisten en introducir redundancia en el sistema y conseguir en el receptor dos o más señales reflejadas cuyos desvanecimientos sean independientes, y de esta manera a través de algoritmos, combinar las señales con el objetivo de obtener una señal de mayor calidad [15].

La presencia de multitrayectorias causa desvanecimientos a pequeña escala en la potencia recibida, lo que resulta en fluctuaciones en la amplitud de la señal que termina por degradar el desempeño del sistema incrementando la BER [15][8].

El principio básico de diversidad consiste en enviar varias réplicas de la señal de información, estas son recibidas a través de enlaces con desvanecimientos independientes, en consecuencia se tiene una alta probabilidad de que al menos uno o más de esos enlaces presenten desvanecimiento independientes, mejorando al calidad de la información recibida. Claramente, esta probabilidad mejora si el número de enlaces se incrementa.

En un enlace limitado por ruido, sin una diversidad adecuada, la potencia de transmisión necesita ser mayor o disminuir el número de bits a transmitir para proteger el enlace contra el desvanecimiento. Así mismo, en enlaces con interferencia co-canal, sin una diversidad adecuada, el factor de re-uso tendrá que ser incrementado para que la interferencia co-canal este por debajo del promedio del nivel de señal; el factor de reuso es la posibilidad de usar la misma frecuencia, para realizar la transmisión de información sin generar interferencia con otros sistemas; lo cual debe estar estipulado en el plan de frecuencias [8].

Las tres formas principales de diversidad tradicionalmente utilizadas en los sistemas de comunicaciones inalámbricos son la diversidad temporal, diversidad de frecuencia y diversidad espacial o de antena.

- **Diversidad Temporal:**
Consiste en transmitir el mismo símbolo a lo largo de un intervalo temporal múltiplo del tiempo de coherencia del canal el cual se define como el intervalo en el cual la señal recibida experimenta desvanecimientos independientes. Este tipo de diversidad presenta una desventaja inherente al generar retardos en el tiempo de propagación.

Las condiciones del canal varían a medida que transcurre el tiempo y el intervalo en que estas condiciones se mantienen fijas se conoce como tiempo de coherencia, se espera que durante este periodo de tiempo la atenuación sea constante para todos los datos transmitidos.

En la Figura 2-5 se muestra un diagrama del funcionamiento de la diversidad temporal [9].

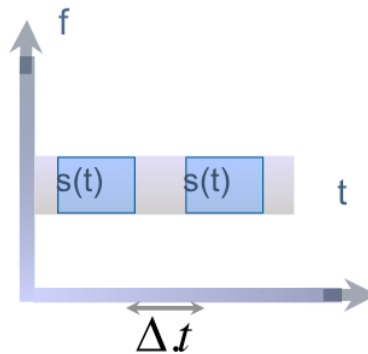


Figura 2-5. Esquema de Diversidad Temporal

Donde, la diversidad óptima es alcanzada cuando los intervalos de tiempo (time slots) son mayores que la dispersión del retardo multirrayecto.

Δt es la duración de tiempo entre cada intervalo de información.
 $S(t)$ es la información transmitida

En el contexto de radiocomunicaciones móviles, a menudo varios símbolos sucesivos pueden estar corruptos por desvanecimientos profundos. Esto tiene un impacto crucial sobre el desempeño en la decodificación. En el transmisor, un entrelazador simplemente permuta la cadena de símbolos en una manera predefinida, así los símbolos son transmitidos en un orden diferente, alterando el orden de transmisión inicial que es $b[0]$, $b[1]$, $b[2]$ y así sucesivamente por $b[0]$, $b[3]$, $b[6]$, $b[9]$, enviando primero los datos fila por fila. Consecuentemente un desentrelazador tiene que ser empleado en el receptor, con el propósito de reordenar los símbolos en su cadena de datos originales. En la Figura 2-6, se muestra la estructura de un entrelazador (este módulo, se usa después del proceso de codificación) [13].

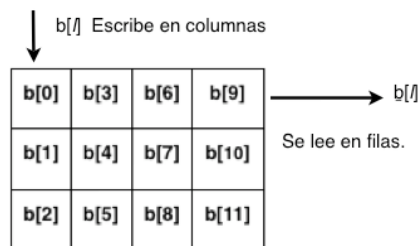


Figura 2-6. Estructura de un Entrelazador de longitud L=12

- **Diversidad de Frecuencia:**
Consiste en transmitir el mismo símbolo a lo largo de un intervalo de frecuencias múltiplo del ancho de banda de coherencia del canal. Por definición el ancho de banda de coherencia es el intervalo de frecuencias en las cuales la señal recibida experimenta desvanecimientos independientes [8][9].

Δf distancia entre anchos de banda de coherencia.
 B_m es el ancho de banda de coherencia.
 T_m es el tiempo de coherencia.

Para implementar esta técnica se transmiten simultáneamente dos señales con frecuencias diferentes, con lo que se obtiene una mejora en la calidad del enlace, es decir si una portadora está afectada es muy probable que la otra no lo esté, sin embargo, el uso de una nueva frecuencia puede representar una limitante, debido a la necesidad de independizar ampliamente una portadora de la otra incrementando la separación entre sus frecuencias; lo cual no se puede realizar de una manera arbitraria ya que los valores dependen exclusivamente del plan de frecuencias que se este usando [10].

Este tipo de diversidad se considera efectiva cuando el desvanecimiento es selectivo en frecuencia, en la Figura 2-7 se muestra un esquema de diversidad en frecuencia, donde $S(t)$ es la información a transmitir.

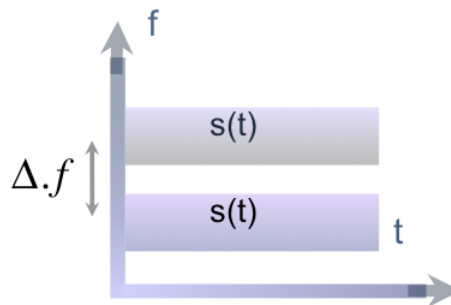


Figura 2-7. Esquema de Diversidad de Frecuencia

- **Diversidad Espacial:**
Conocida también como diversidad de antena, en esta, se reciben y se transmiten señales de información desde antenas que están espaciadas (o separadas físicamente) por una distancia mayor que la distancia de coherencia. La distancia de coherencia es la mínima separación espacial de

antenas para obtener desvanecimientos independientes y depende del ángulo de propagación de los múltiples caminos de llegada provenientes del arreglo de antena [8].

Las replicas de la forma de onda transmitida son recibidas a través de diferentes antenas en el receptor lo cual exige un aumento en el procesamiento de la señal; esto contribuye a elevar los costos y la complejidad del procesamiento para recuperar la señal transmitida. En la Figura 2-8, se muestra la estructura de un sistema con diversidad en recepción.

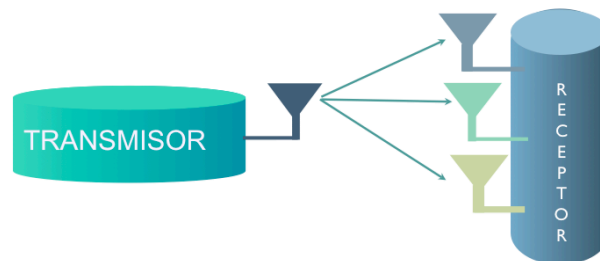


Figura 2-8. Esquema de Diversidad en Recepción

La Diversidad en Transmisión se basa en el uso de múltiples antenas en transmisión con el fin de generar señales no correlacionadas, con desvanecimientos independientes en el otro extremo. Este esquema introduce redundancias controladas de señal en el transmisor, que pueden ser explotadas por técnicas de procesamiento de señal apropiadas en el receptor, lo que genera un incremento en los costos y en el procesamiento de la señal [15]. En la Figura 2-9, se muestra la estructura de un sistema con diversidad en transmisión.

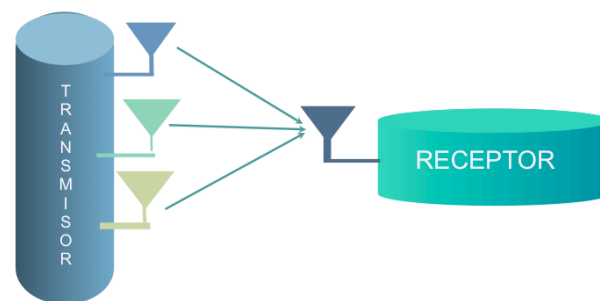


Figura 2-9. Esquema de Diversidad en Transmisión

La diversidad en transmisión y en recepción presenta similitudes y diferencias; mientras la diversidad en recepción necesita simplemente múltiples antenas con desvanecimientos independientes, la diversidad en transmisión necesita conocimiento perfecto del canal en el transmisor para

su máximo desempeño, de lo contrario requiere de la implementación de códigos espacio temporales para ser efectiva.

Para el caso de los sistemas MIMO se introducirá el concepto de diversidad conocida como espacio temporal, fruto de considerar múltiples antenas en transmisión y recepción simultáneamente y contar con los códigos espacio temporales que introducen una nueva dimensión para realizar la codificación [9].

Existen muchos esquemas tradicionales de combinación de diversidad utilizadas en recepción para un sistema SISO como: combinación por selección (Selection Combining, SC), realimentación, combinación por máxima relación (Maximal Ratio Combining, MRC) y combinación por igual ganancia (Equal Gain Combining, EGC). Para mayor información remítase al anexo B.

En resumen, el énfasis principal de los sistemas de diversidad se basa en la capacidad de generar desvanecimientos independientes en la señal transmitida, puesto que el canal de radio sufre de una natural aleatoriedad, en ese sentido, la probabilidad que dos o más partes importantes en la señal experimenten desvanecimientos profundos se reduce, por otra parte el esquema de diversidad seleccionado, debe entonces combinar correctamente las diversas formas de onda recibidas para así maximizar la calidad de la señal resultante [15].

2.5 MODELADO DEL CANAL DE RADIO

Obtener un modelo de canal es una tarea difícil de realizar porque éste varia con el tiempo, además cada entorno de transmisión tiene unas características propias que hacen que las predicciones sobre su comportamiento no sean exactas; pero tener un modelo matemático es una herramienta muy útil dado que permite estudiar a fondo los diferentes fenómenos que se presentan en el canal de radio y así realizar el diseño de los sistemas [9].

Para modelar el canal inalámbrico es necesario apoyarse en medidas experimentales de un entorno de comunicación concreto y desarrollar un estudio estadístico que permita reconocer las características más relevantes y comunes a varios entornos de comunicación para así obtener un modelo aproximado del canal [9]; lo que hace de éste, un procedimiento crítico, ya que es necesario establecer un ambiente específico para el enlace, donde se determine la cobertura, velocidad de transmisión y condiciones de LOS o NLOS de operación del sistema [34][37].

Dada la rigurosa exclusividad de los fenómenos que afectan cada enlace, la práctica más desarrollada y la que mejores resultados ha ofrecido es inicialmente describir el canal de forma matemática (modelarlo) para comprender mejor su comportamiento bajo ciertas condiciones, aunque se

pierde precisión con un modelo matemático, el beneficio que presenta permite establecer computacional y matemáticamente la respuesta del canal de radio a ciertos estímulos y así garantizar un enlace de calidad [9][37].

En términos generales, los modelos de propagación buscan predecir la potencia de una señal que se propaga por un ambiente geográfico determinado, considerando el efecto causado por la frecuencia de operación, distancia entre transmisor y receptor, presencia de fenómenos atmosféricos, desvanecimientos por multitrayectoria, difracción, dispersión y refracción. Cada modelo de canal considera estas variables de manera diferente, aunque, independientemente de cuál sea el fenómeno, el efecto total sobre la señal normalmente es un desvanecimiento [37].

Existen dos tipos de modelo de propagación. El primero incluye aquellos modelos que intentan predecir la potencia media recibida en función de la distancia al transmisor, estos son denominados modelos a gran escala ya que permiten establecer el área de cobertura de un transmisor. El segundo tipo de modelos de propagación se denomina a pequeña escala cuyo objetivo es predecir la fluctuación de la señal recibida en puntos próximos a una localización de referencia, para dichos puntos se considera que la atenuación producida por la distancia al transmisor es común para todos los puntos [9].

Para realizar el diseño de un enlace y caracterizar la potencia recibida en una comunicación móvil en un entorno con variaciones a largo plazo, se debe tener en cuenta que el resultado obtenido dependerá de la frecuencia y la distancia; si se consideran las variaciones a mediano plazo las cuales son causadas por la presencia de grandes obstáculos y reflectores lejanos al móvil, se debe considerar una distribución Log-Normal.

Para variaciones a corto plazo debido al movimiento y a las componentes multitrayecto generadas por el entorno cercano al receptor y NLOS, se considera una distribución *Rayleigh* [38].

Entonces el canal radio se puede modelar conceptualmente como un canal en el que la amplitud recibida varía de modo aleatorio para cada símbolo transmitido, generando aleatoriedad en la capacidad del canal; la cuál puede ser obtenida únicamente si se conoce que tipo de distribución representa el canal; como en el caso de una distribución *Rayleigh* que se utiliza cuando se quiere evaluar el efecto causado por la presencia de las multitrayectorias, o una distribución *Gaussiana* en el caso de probar el enlace con la presencia de ruido AWGN [9][38][39].

2.5.1 Modelo de Canal Gaussiano

Uno de los modelos más simples en un canal de comunicaciones con ruido *Gaussiano blanco aditivo* (AWGN), dado que solo implica adición de ruido

aditivo al canal. En este modelo, la señal que se transmite x , es afectada por un ruido *Gaussiano* blanco aditivo n , obteniéndose una señal recibida y , afectada por este ruido como se puede apreciar en la siguiente ecuación:

$$y = x + n \quad (2.2)$$

Físicamente un ruido aditivo puede ser originado por los componentes electrónicos, por los amplificadores en el receptor de un sistema de comunicaciones y por la interferencia presente en el medio.

El ruido introducido por los componentes electrónicos y amplificadores en el receptor, puede ser analizado como ruido térmico; este tipo de ruido es caracterizado estadísticamente como un ruido con distribución *Gaussiana*. Consecuentemente, el modelo matemático resultante para este canal es llamado generalmente ruido *Gaussiano* blanco aditivo, representado en la siguiente Figura 2-10 [42].

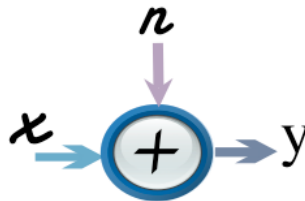


Figura 2-10. Canal AWGN

Adicionalmente se tiene que la función de densidad de probabilidad de distribución Normal se representa como se muestra en la siguiente ecuación:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right)}, \quad (2.3)$$

donde σ representa la desviación estándar y μ representa el valor medio.

2.5.2 Modelo de Canal Rayleigh

La propagación de la señal a través de un canal inalámbrico llega al destino por medio de diferentes caminos, llamados multitrayectorias. Estas multitrayectorias son formadas por las reflexiones y/o difracciones de la señal transmitida sobre estructuras próximas al receptor, como edificios, morros, árboles entre otros obstáculos presentes en la trayectoria de la señal.

La suma vectorial de las señales recibidas, puede resultar en una interferencia constructiva o destructiva, generando una variación en la potencia de la señal. Esta alteración de la intensidad de la señal se denomina desvanecimiento. El canal con presencia de multitrayectorias puede ser modelado con una distribución Rayleigh con una función de densidad de probabilidad que se muestra en la siguiente ecuación:

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\left(\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad (2.4)$$

donde x , representa la amplitud de la señal recibida, la cual tiene un comportamiento aleatorio; σ representa la desviación estándar de la distribución *Gaussiana* asociada a la distribución *Rayleigh* y es el valor más probable de x .

Los efectos del desvanecimiento se pueden clasificar en dos tipos: rápidos o lentos. Un desvanecimiento rápido ocurre cuando existe una rápida variación de potencia de la señal en un intervalo de tiempo corto. Un desvanecimiento lento sucede cuando ocurre una variación de potencia de la señal en un intervalo de tiempo mayor. En la siguiente ecuación se muestra el modelo matemático para un canal *Rayleigh*:

$$y = h * x + n, \quad (2.5)$$

donde se observa que el canal h , ejerce un efecto multiplicativo o se comporta como función de transferencia que aporta ganancia a la señal x transmitida. El ruido está representado por n , $[\cdot]^*$ denota la convolución y la señal recibida está representada por y .

La Figura 2-11, ilustra el modelo del canal *Rayleigh* [42].

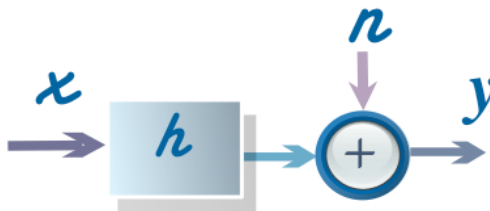


Figura 2-11. Canal Rayleigh

2.6 CAPACIDAD DE CANAL

El primer concepto a tener en cuenta para realizar transmisiones inalámbricas es la existencia de un límite fundamental en la capacidad de transmisión, que

depende directamente de la potencia y el ancho de banda del canal; estos límites fueron definidos en 1948, cuando *Claude Shannon* estableció las condiciones que habilitan la transmisión de información sobre un canal ruidoso [1].

La capacidad de canal es una medida de la máxima cantidad de información libre de errores que puede ser transmitida a través de un canal de comunicaciones; la cual se expresa en función de la relación señal a ruido y el ancho de banda utilizado en la transmisión, esto se puede observar en la siguiente ecuación [9]:

$$C = b \log_2(1 + \rho) \text{ bits / s ,} \quad (2.6)$$

donde ρ es la relación señal a ruido, b es el ancho de banda utilizado y C es la capacidad del canal.

De la ecuación (2.6) se deduce que para doblar la capacidad del canal, si se asume la relación señal a ruido como un parámetro fijo, entonces se debe aumentar el ancho de banda al doble, es decir la capacidad y el ancho de banda para esta consideración son variables directamente proporcionales; si $b=1\text{Hz}$ entonces:

$$C = \log_2(1 + \rho) \text{ bits/s/hz} \quad (2.7)$$

2.6.1 Capacidad del Canal SISO con Desvanecimiento Plano

La ecuación (2.6) se refiere a un escenario de canal ideal, en donde se asume como único efecto negativo la introducción de ruido blanco aditivo, sin embargo, las comunicaciones inalámbricas se ven afectadas por otros factores.

Como se mencionó anteriormente el canal de transmisión inalámbrico es un medio variable, donde la señal está expuesta a factores que atenúan la señal. Para determinar el modelo del canal, los símbolos transmitidos se denotan por $x(n)$, los símbolos recibidos por $y(n)$ y la función de transferencia del canal se describe como un coeficiente multiplicativo modelado por una variable aleatoria h , por lo tanto la relación entrada/salida puede ser expresada de manera muy simple como:

$$y(n) = h * x(n) + w(n), \quad (2.8)$$

donde $w(n)$ representa el ruido *Gaussiano blanco aditivo* (AWGN), esta ecuación es conocida como modelo desvanecimiento plano (*Flat Fading Model*), en donde el atributo plano, viene del modelado de la función de transferencia del canal como una constante [13].

Ahora la capacidad del canal queda condicionada con el valor h , conocido en el lado receptor pero desconocido por el transmisor [1][12]. La capacidad de éste canal está representado por la siguiente ecuación:

$$C_{\text{siso}} = \log_2 \left(1 + |h|^2 \rho \right) \text{bits} / \text{s} / \text{Hz} , \quad (2.9)$$

Usualmente cuando se realizan análisis de la capacidad de un canal se considera el ancho de banda como 1Hz, por lo tanto en las unidades se debe adicionar Hz, como se observa en la ecuación (2.9) donde la capacidad de un sistema SISO se ve afectada por la relación señal a ruido, representada por ρ .

Se deduce que para incrementar la capacidad del canal SISO, se debe incrementar el valor de ρ , lo que se puede conseguir disminuyendo el número de errores presentados o elevando la potencia de transmisión, tarea que no se puede realizar de manera arbitraria y que finalmente produciría una variación con características logarítmicas para la capacidad del canal, la cual está limitada por un valor asintótico propio de este tipo de variaciones.

2.7 FUNDAMENTO DE LOS SISTEMAS MIMO

Introducción

Los sistemas de comunicaciones MIMO se han estudiado desde hace más de una década por autores como *Foschini, Tarok et al, Telatar* los cuales han ejecutado investigaciones en las que demuestran las ventajas que ofrecen los sistemas MIMO en la transmisión de información [14]. Por tal motivo han surgido como una de las técnicas más significativas en el progreso de las comunicaciones inalámbricas actuales.

Los sistemas MIMO pueden ser definidos como un enlace en el cual el transmisor y el receptor están equipados con múltiples elementos de antena, como se puede observar en la Figura 2-12. El concepto detrás de los sistemas MIMO implica que las señales sobre las antenas transmisoras (TX) y receptoras (RX) se combinan en una forma que permita mejorar el desempeño y la velocidad de transmisión, mediante el procesamiento digital de la señal en el cual la dimensión temporal es complementada con la dimensión espacial. Todas estas mejoras se consiguen sin generar costos extras en el espectro radioeléctrico, ya que se aumenta la cantidad de datos transmitidos sin requerir un mayor ancho de banda; con lo que se incrementa la eficiencia en el uso del canal [12][13].

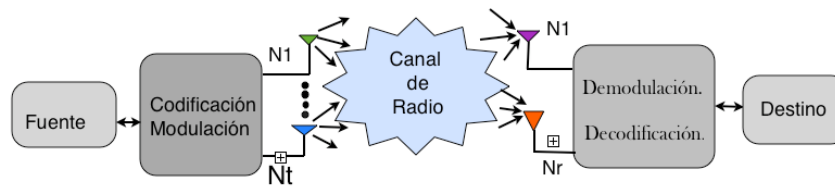


Figura 2-12 Diagrama de Transmisión de un Sistema de Comunicaciones MIMO

En la actualidad, grandes compañías líderes en el desarrollo de tecnologías inalámbricas, ofrecen equipos basados en MIMO, capaces de alcanzar velocidades superiores a los 100 Mbps en interiores, lo cual evidencia la necesidad de trabajar por la estandarización que permita la interoperabilidad de éstos, con los equipos de redes WLAN existentes (que funcionan con estándar IEEE 802.11b/a/g) para que puedan difundirse con mayor eficacia y economía. Es así como dentro del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE*³) se han formado diferentes grupos de trabajo para redes de área personal, local y metropolitana, con el fin de estudiar las características necesarias para estandarizar e implementar redes que usen MIMO [32][31].

2.8 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS MIMO

En un sistema MIMO la capacidad del canal se incrementa de manera directamente proporcional al número de antenas utilizadas, MIMO basa su funcionamiento en el aprovechamiento de la diversidad de caminos de propagación, generados por el uso de múltiples antenas en el origen sin necesidad de incrementar el ancho de banda o la potencia de transmisión y no intercambia esta ganancia por el incremento en la directividad, como sucede con las antenas inteligentes [15][21]. En la Figura 2-13 se presenta el diagrama en bloques de un sistema MIMO.

³ Organización internacional que agrupa a los ingenieros eléctricos y electrónicos y desarrolla estándares internacionales en las tecnologías eléctricas y electrónicas; en particular, el subgrupo de estándares 802 desarrolla los estándares para redes de área local y área metropolitana.

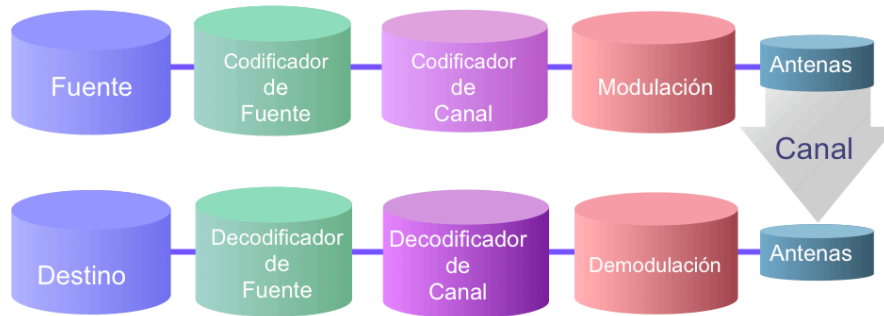


Figura 2-13. Diagrama en Bloques de un Sistema MIMO

Al igual que los sistemas SISO los sistemas MIMO presentan como inconvenientes el ruido, el desvanecimiento y la interferencia de la señal. Así mismo, comparando sus diagramas en bloques básicos, se encuentra que los dos primeros módulos realizan sus funciones aplicando los mismos conceptos básicos; es decir la fuente de información es la misma y la codificación de la fuente se realiza de igual manera en los dos sistemas, los bloques restantes, están comprometidos con el nuevo concepto espacio temporal en ambos terminales. El proceso de codificación es espacio-temporal y el tratamiento de la señal en el canal de radio tendrá una componente matricial y no vectorial debido al uso de varias antenas en transmisión y en recepción.

A continuación se realiza un análisis de los bloques de canal y codificador de canal, que hacen la diferencia entre estos sistemas dado que los bloques Fuente de Información, Codificador de Fuente y Modulador, fueron tratados en los sistemas SISO y se comportan de igual manera para los sistemas MIMO.

2.8.1 Codificador del Canal Espacio Temporal

Este módulo es equivalente al codificador de canal en sistemas de una sola antena, introduce redundancia para conseguir una mejor utilización de los recursos de potencia y ancho de banda en el canal, la diferencia fundamental con respecto al caso SISO es que ahora la codificación debe tener en cuenta la dimensión espacial para transportar los bits (o símbolos) codificados y un modelo de canal distinto.

La codificación espacio temporal (*Space Time Codes, STC*), puede ser desarrollada implementando códigos bloque espacio temporales (STBC) o códigos espacio temporales de Trellis (STTC), los cuales se explican más adelante [23][24].

2.8.2 Canal de un Sistema MIMO

El canal MIMO se puede modelar como si se tuvieran varios canales en paralelo que son afectados de manera independiente por los efectos nocivos presentes en el medio de transmisión, como son la interferencia, la presencia de ruido y de multitrayectorias.

2.9 MECANISMOS DE COMPENSACIÓN DE ERRORES

2.9.1 Codificación de Canal de los Sistemas MIMO

2.9.2 Codificación Espacio-Temporal

Una forma de aproximarse a la capacidad del canal MIMO, es emplear codificación espacio temporal (STC). Ésta es una técnica de codificación diseñada para ser usada con múltiples antenas transmisoras. La codificación espacio temporal logra ganancia por diversidad en transmisión sobre sistemas espaciales no codificados, sin sacrificar el ancho de banda. Para su diseño se deben considerar los criterios del rango y del determinante, que buscan una relación entre ganancia por codificación y ganancia por diversidad [28][9][15]. Existen varias aproximaciones en la estructura de codificación como los códigos espacio temporales de bloque (STBC) y los códigos espacio temporales de Trellis (STTC) [23]; que son una extensión para los sistemas MIMO de las técnicas clásicas de codificación de canal usadas en los sistemas SISO [24]. En los esquemas de codificación espacio temporal el número de símbolos codificados es igual al número de antenas transmisoras, siendo generado y transmitido simultáneamente un símbolo por antena. Estos símbolos se crean con un codificador espacio temporal, el cual mediante el procesamiento de la señal en el receptor, maximiza la ganancia por diversidad y/o codificación en la Figura 2-14, se muestra un diagrama en bloques simple de un STC [12].

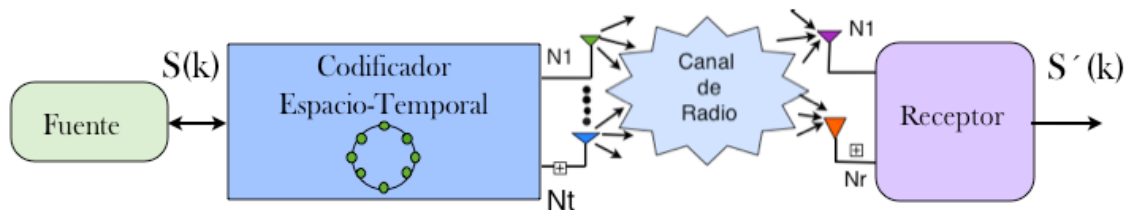


Figura 2-14. Codificador Espacio Temporal

La codificación espacio temporal pueden dividirse en dos categorías: bloque y convolucional, dentro de los dos grupos básicos mencionados están los códigos bloque espacio temporales (STBC: *Space Time Block Code*) y códigos espacio-temporales Trellis o convolucionales (STCM-STTC: *Space Time Trellis Code*).

Los primeros se basan únicamente en la mejora de la ganancia de diversidad, mientras que los segundos ofrecen ganancias de diversidad y de codificación. La principal ventaja de STBC respecto a STCM-STTC es que la técnica de decodificación es más sencilla.

- Código Espacio Temporal de Bloque (STBC):

Los STBC usan un codificador bloque para lograr la diversidad y la ortogonalización del canal, lo cual permite realizar una decodificación usando un procesamiento lineal más simple en el receptor (en contraste con el vector de *Viterbi* requerido para STTC); así mismo, el codificador actúa sobre un bloque de datos al tiempo, y provee únicamente ganancia de diversidad, dado que su esquema de codificación presenta mayor interés en colocar los datos a ser transmitidos de una manera adecuada en cada antena, en lugar de generar una ganancia de codificación. (que depende de la velocidad de codificación) [26][12].

El primer esquema basado en STBC fue propuesto por *Alamouti* [24] y consiste en un sistema con dos antenas transmisoras y una antena receptora, se asume que el canal no es selectivo en frecuencia y en este esquema, la información a transmitir se distribuye sobre el canal a través de una matriz de codificación A , donde los datos a transmitir son $[c_1, c_2]$.

$$[c_1, c_2] \rightarrow \begin{pmatrix} c_1 & -c_2^* \\ c_2 & c_1^* \end{pmatrix} = A$$

Este esquema en recepción está soportado por la detección de máxima verosimilitud (Maximum-Likelihood, ML) [12], mejorando la velocidad de transmisión de datos, lo cual generó gran interés en el campo investigativo con el objetivo de ampliar este tipo de esquemas para sistemas con más de dos antenas en transmisión y recepción. En la Figura 2-15, se ilustra el diagrama de un STBC.

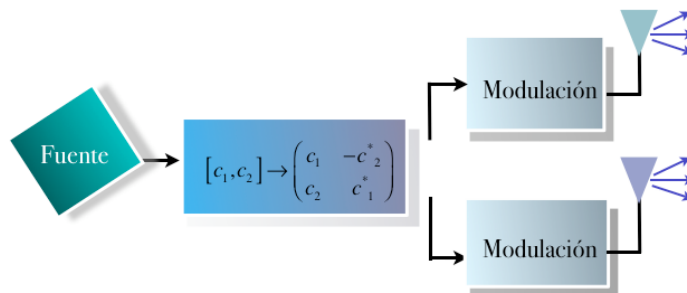


Figura 2-15. Esquema de un Codificador STBC

- Código Espacio Temporal de Trellis (STTC):

Son códigos convolucionales extendidos al caso de múltiples antenas en transmisión y en recepción, siendo éstos el desarrollo clave en el concepto de codificación espacio temporal ofreciendo ganancia de codificación (que depende de la complejidad del código: número de estados de *Trellis*) y ganancia de diversidad [12][15]. En éstos, la salida del codificador en cada periodo de símbolo está determinada por la etiqueta de la rama de *Trellis* por lo cual requieren de un algoritmo multidimensional de Viterbi en el receptor para ser decodificados, lo que precisa de una mayor cantidad de procesamiento de la señal [9][12]. Estos sistemas no tienen conocimiento del estado del canal en el transmisor pero si en el receptor, como es usual en un sistema de comunicaciones [15]. La Figura 2-16 presenta un diagrama básico de un STTC.

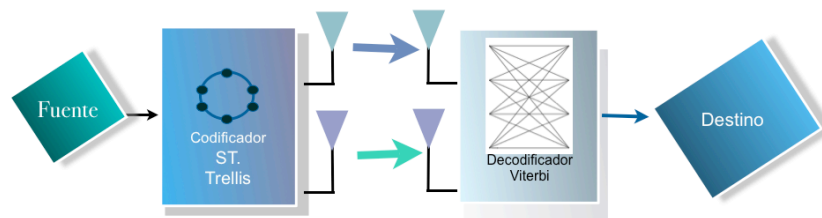


Figura 2-16. Esquema Básico de un Codificador STTC

Los códigos ST *Trellis* creados hasta la fecha han sido difíciles de diseñar, dado que los que han sido implementados, tienen unas especificaciones y parámetros definidos para cada sistema (número de antenas, *Trellis* y constelación). Sin embargo, la mayor desventaja de los STTCs es la complejidad asociada al proceso de decodificación, el decodificador ML tiene una complejidad que crece exponencialmente con el número de antenas transmisoras, el orden de la modulación y la memoria del *Trellis* [26][9].

2.10 CANAL EN LOS SISTEMAS MIMO

2.10.1 Características del Canal MIMO

Como ya se mencionaron las mejoras que pueden ofrecer los sistemas MIMO sobre los sistemas SISO, ahora se explorará la ganancia ofrecida por los sistemas MIMO en términos de la capacidad. Se comparan las capacidades de los sistemas SISO, SIMO, MISO y MIMO, teniendo en cuenta que son los casos más generales.

En los sistemas MIMO, cada equipo transmisor tiene asociadas un número de antenas n , desde el punto de vista de la propagación, el canal de radio no es único, existe un canal entre cada antena transmisora y cada antena receptora, lo que obliga a representar la propagación mediante una matriz, que se conoce

como matriz de transmisión, o matriz H que se presenta en la ecuación (2.10). El elemento h_{ij} representa la función de transferencia compleja entre la antena transmisora j y la antena receptora i .

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & \dots & h_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{i1} & \dots & h_{ij} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

El principio de ganancia de los sistemas MIMO se cumple si los caminos de propagación son diferentes, con n antenas en el transmisor y otras n en el receptor se pueden establecer no uno, sino n canales radio independientes entre sí, o modos de propagación, ilustrados en la Figura 2-17. Una forma intuitiva de ver este fenómeno es considerar que las señales radio llegan de las antenas transmisoras a las receptoras después de varias reflexiones en edificios o paredes, y que la combinación de reflexiones es diferente para cada antena receptora, de forma que se transmite una señal diferente para cada combinación de reflexiones.

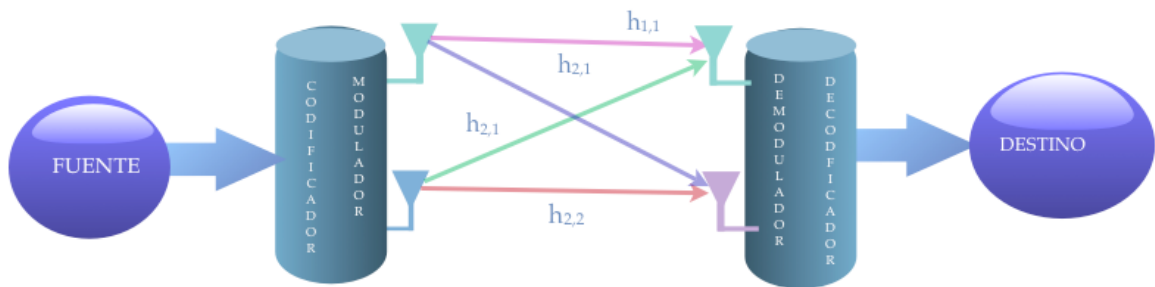


Figura 2-17. Modos de Propagación de la señal en un Sistema MIMO

La diferencia existente en los caminos de propagación es que en el caso de la propagación por rayo directo solamente existe un modo de propagación, no hay reflexiones. Sólo a medida que la propagación se vuelve multitrayecto empiezan a no correlacionarse los caminos y a incrementar el número de modos. Esta situación corresponde a condiciones de propagación pobres, como las que se encuentran en entornos metropolitanos o de interiores en comunicaciones móviles [33].

La matriz del canal presenta una distribución aleatoria para cada una de sus entradas. El modelo más general consiste en suponer una componente fija h_f y una aleatoria h_a . La primera componente es su promedio y la segunda sería la aleatoria de media cero y de covarianza dada, se asume que se trata de entradas cuyas componentes en fase y cuadratura son *Gaussianas*.

El canal en forma general está representado por $H = h_f + H_a$, pero en entornos donde no se tiene visión directa entre el transmisor y el receptor se cuenta únicamente con la segunda componente [34].

Un sistema MIMO cuenta con múltiples antenas en el transmisor (N_t) y en el receptor (N_r) por lo cual se puede pensar que el número de canales disponibles es el producto $N_t \cdot N_r$, pero si solo se consideran los canales libres de interferencia íter simbólica (*Intersymbol Interference*, ISI) se encuentra que la cantidad de canales disponibles se reduce a $\min(N_t, N_r)$, es decir en el mejor de los casos el número de canales es igual a los autovalores del canal MIMO (H), ya que si $H(N_t, N_r)$, cumple que $N_t = N_r$, entonces, H tiene al menos N_t valores propios o autovalores [50].

Para realizar este trabajo es necesario diferenciar los canales en atención a su selectividad en frecuencia es decir, en el caso de tener desvanecimiento selectivo se presenta una dependencia de la respuesta del canal con la frecuencia, en caso contrario el canal se considera con desvanecimiento plano, por lo tanto la respuesta del canal es de magnitud constante e independiente de la frecuencia.

Finalmente se asume que el receptor dispone de conocimiento del canal (*Channel Stimante Information*, CSI) lo que permite controlar el consumo de energía y contrarrestar la degradación que sufren los datos o el número de errores debido a los desvanecimientos que sufre la señal en el medio inalámbrico.

El receptor logra CSI mediante secuencias de entrenamiento que el transmisor le remite para tal fin. En concreto los códigos espacio-temporales tienen su origen en un sistema MIMO donde el transmisor no dispone de CSI y el receptor si.

2.10.2 Modelo Matemático del Canal MIMO

El modelo matemático que relaciona la entrada salida de la matriz del canal inalámbrico, se puede describir como:

$$y = H * s + w(n), \quad (2.11)$$

donde $y = [y_0, y_1, \dots, y_{N(r-1)}]^T$ es el vector de la señal recibida ($N_r, 1$).

H es la matriz de transferencia (N_r, N_t).

$s = [s_0, s_1, \dots, s_{N(t-1)}]^T$ es el vector de la señal transmitida ($N_t, 1$).

$w(n) = [n_0, n_1, \dots, n_{N(r-1)}]^T$ es vector de ruido ($N_r, 1$).

Al trabajar únicamente con la componente aleatoria del canal se encuentra que los elementos de la matriz de transferencia H son variables aleatorias complejas *Gaussianas* circularmente simétricas.

Una variable aleatoria *Gaussiana* cuyas componentes real e imaginaria son independientes y de idéntica distribución cumple la propiedad de simetría circular. Una variable aleatoria compleja *Gaussiana* circularmente simétrica es del tipo $z=(x+jy) \approx CN(0,\sigma^2)$, donde x/y son distribuciones reales *Gaussianas* con distribución Normal $N(0, \sigma^2/2)$. Este modelo es típico en un ambiente rico en dispersión y suficiente separación entre las antenas transmisoras y receptoras.

2.10.3 Capacidad del Canal Mimo Determinístico y Plano en Frecuencia

Para realizar un análisis de capacidad de un sistema MIMO se partirá desde la capacidad de un sistema SISO la cual se representa por:

$$C_{siso} = \log_2(1 + \rho |h|^2) \text{ bits / s / Hz ,} \quad (2.12)$$

donde h representa el canal inalámbrico y ρ representa la relación señal a ruido. Si se incrementa el número de antenas en RX y se mantiene una sola antena en TX, lo cual hace referencia a un sistema SIMO, la capacidad se ve afectada y se representa por:

$$C_{simo} = \log_2(1 + \rho \sum_{i=1}^{N_r} |h_i|^2) \text{ bits / s / Hz ,} \quad (2.13)$$

donde h_i es la ganancia en recepción para la i -ésima antena, en esta ecuación se puede destacar que el incremento de N_r produce un aumento logarítmico en la capacidad promedio, N_r representa el número de antenas en el receptor.

Ahora, si se decide implementar diversidad espacial en el transmisor, se tiene un sistema con múltiples entradas y única salida (*Multiple Input-Single Output*, MISO) y si se asumen las características generales donde el TX no conoce el canal, la capacidad de este sistema está dada por:

$$C_{miso} = \log_2(1 + \frac{\rho}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} |h_i|^2) \text{ bits / s / Hz ,} \quad (2.14)$$

donde la normalización entre N_t asegura que se respeta el límite de la potencia total transmitida, lo que muestra que no se obtiene ganancia por arreglo o incremento de las antenas; nuevamente la capacidad tiene una relación logarítmica con N_t .

Si se implementa el uso de múltiples antenas en el transmisor y en el receptor simultáneamente, la capacidad del canal MIMO, queda representada por la siguiente ecuación:

$$C_{mimo} = \log_2 \left[\det \left(I_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} HH^* \right) \right] \text{ bits / s / Hz ,} \quad (2.15)$$

donde H es la matriz del canal, $[.]^*$ hace relación al uso de la transpuesta conjugada de H , N_t es el número de antenas en el transmisor y N_r es el número de antenas en el receptor y la potencia en transmisión se divide sobre el número de antenas transmisoras para evitar ganancia por arreglo de antenas [9].

2.11 DIVERSIDAD EN SISTEMAS MIMO

Como se ha mencionado la característica más importante de MIMO es el uso de diversidad espacial sobre la cual se aplican técnicas de codificación. Adicionalmente el hecho de usar varias antenas, ofrece la posibilidad de explotar en los sistemas MIMO dos esquemas de operación: diversidad espacial o multiplexación espacial, con los cuales se obtienen beneficios diferentes que se van a estudiar a continuación.

2.11.1 Diversidad Espacial en un Sistema MIMO

En este tipo de diversidad, se combate el desvanecimiento transmitiendo por cada antena la misma información simultáneamente, la cual llega a todas las antenas receptoras mediante señales directas o reflejadas, donde se recogen y se combinan para recuperar la información. La implementación de este esquema produce un incremento en la SNR, lo que mejora la calidad de la señal recibida (BER), ya que permite el envío de la misma señal por varias antenas, generando redundancia para contrarrestar los desvanecimientos en la señal. La Figura 2-18, se presenta un esquema con diversidad espacial.

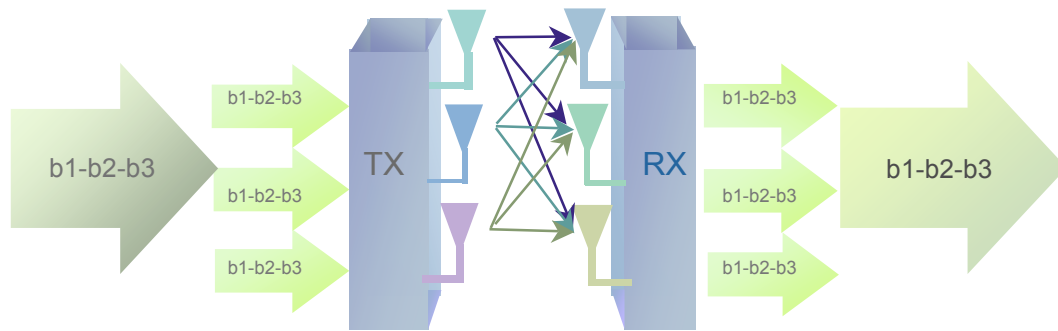


Figura 2-18. Esquema de Diversidad Espacial en Sistemas MIMO

Los mecanismos desarrollados que aprovechan de manera óptima la diversidad espacial son los códigos espacio temporales, explicados anteriormente.

2.11.2 Multiplexación Espacial en un Sistema MIMO

En los sistemas que usan multiplexación espacial, la cadena de símbolos a transmitir se divide entre el número de antenas usadas en el transmisor, generando subcadenas de información, las cuales se envían simultáneamente desde las antenas transmisoras dentro de la misma banda de frecuencias. La señal al propagarse genera múltiples caminos, con lo cual cada antena receptora observa una superposición de las señales transmitidas.

Las antenas transmisoras introducen una "firma" espacial a los datos con el fin que cada antena receptora pueda reconocer y recuperar la información que le pertenece, reconstruyendo las subcadenas que son multiplexadas para entregar los datos originales al destino [8].

Existen tres esquemas de multiplexación espacial: con Codificación Horizontal, Codificación Vertical V-BLAST, y Codificación Diagonal D-BLAST [9].

Las estructuras comúnmente usadas en recepción para recuperar los datos son el receptor *Zero forcing* (ZF), receptor de error cuadrático medio (*Minimum Mean-Square Error Receiver*, MMSE), receptor V-BLAST, y el receptor de máxima verosimilitud (*Maximum Likelihood Receiver*, ML) entre otras. Para ampliar la información al respecto remítase al anexo A.

En la Figura 2-19, se muestra un esquema de multiplexación espacial.

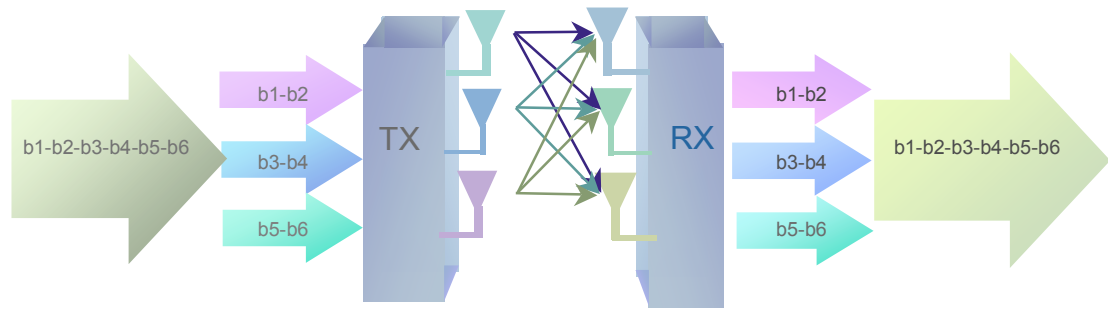


Figura 2-19. Esquema de Multiplexación Espacial en Sistemas MIMO

La multiplexación espacial incrementa la eficiencia espectral dado que con el mismo ancho de banda se transmite/recibe más información, así mismo las diferentes antenas proporcionan canales de propagación distintos usados en paralelo, es decir permite enviar diferentes señales por cada antena transmisora, obteniendo un mejor desempeño [27].

La diversidad espacial mejora la calidad de la señal transmitida y alcanza una alta relación señal a ruido en el receptor, especialmente en redes de área extensa; la multiplexación espacial permite que los sistemas alcancen sus límites puesto que provee una "mayor" capacidad pero no asegura un mejor desempeño.

Resumiendo, la diversidad y la multiplexación buscan objetivos distintos, con lo que pueden llegar a ser mutuamente excluyentes. En ambos casos, el uso de varias antenas en transmisión y recepción proporcionan una serie de canales efectivos en paralelo. Si el objetivo es obtener redundancias en la señal se debe usar diversidad espacial, y si se busca aumentar la velocidad de transmisión se debe usar multiplexación [27].

2.12 COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS MIMO Y SISO

Retomando las Figuras (2-1) y (2-14) de los diagramas en Bloque de los sistemas SISO y los sistemas MIMO, se van a analizar los bloques que representan una diferencia relevante en el rendimiento de estos sistemas.

2.12.1 Comparación en la Codificación

En la codificación, los sistemas SISO y MIMO, en su estructura manejan los mismos conceptos, pero en su implementación, los códigos en los sistemas MIMO tienen unos criterios para codificación ST: Criterio del Rango y Criterio del Determinante, que no se consideran en la codificación de los sistemas SISO [28].

Para visualizar la diferencia entre la codificación SISO y la codificación MIMO, se recurrirá al estudio de un código bloque lineal para un sistema SISO y código bloque para un sistema MIMO, *Hamming* y *Alamouti* respectivamente.

- **Código *Hamming*:** Si se considera códigos Bloque para un sistema SISO y se trabaja con un bloque de bits, de longitud k , denominado "secuencia de información", queda codificado en una palabra de longitud n , con $n > k$.

Los bits adicionales en la palabra codificada son bits de paridad, $n-k$ bits, usados para comprobar si existen errores.

Si hay errores, el decodificador los detecta y los corrige. Una codificación Hamming se ilustra en el siguiente ejemplo.

Para una secuencia de longitud cuatro (a_0, a_1, a_2, a_3), se añaden tres bits de redundancia (b_0, b_1, b_2) calculados usando la aritmética en modulo 2 con los que se conforma la palabra codificada. En este caso el código (7,4) maneja una tasa de codificación $R_c=4/7$, una capacidad de detección de 3 bits y una capacidad de corrección de 1 bit donde $k=4$ y $n=7$, donde los 4 primeros bits de la palabra codificada son la misma secuencia de la palabra de información y los 3 últimos bits corresponden a la redundancia y se calculan a través de las siguientes ecuaciones:

$$b_0 = a_1 + a_2 + a_3 \quad (2.16)$$

$$b_1 = a_0 + a_1 + a_3 \quad (2.17)$$

$$b_2 = a_0 + a_2 + a_3 \quad (2.18)$$

Al concatenar con la secuencia, el bloque transmitido (b_t) resulta:

$$b_t = a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2 \quad (2.19)$$

Donde se puede observar que los cuatro bits a transmitir, se transformaron en siete con los bits de redundancia. Los bits de redundancia ayudan a corregir errores [52].

- **Código espacio temporal de *Alamouti*:** Considera un sistema con dos antenas en transmisión y una antena en recepción, en el cual se asume que trabaja únicamente con los canales generados por los rayos directos, para analizar únicamente los canales no correlacionados. Se envían dos símbolos c_1 y c_2 , los cuales pasan por el bloque de codificación espacio temporal que genera una matriz $C = \begin{pmatrix} c_1 & -c_2^* \\ c_2 & c_1^* \end{pmatrix}$, como se puede observar en la Figura 2-20. Posteriormente ser transmitida y afectada por el canal

introduciéndole ruido.

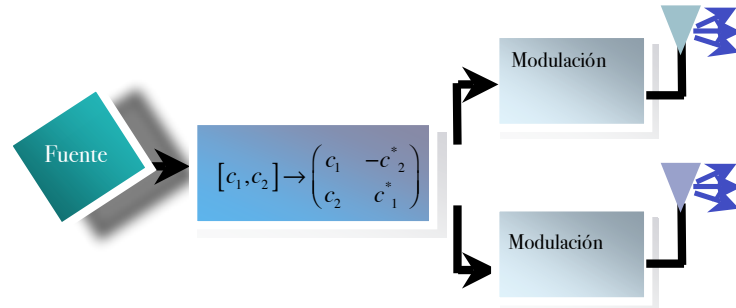


Figura 2-20. Diagrama en Bloques de Sistema MIMO, usando Codificación Espacio Temporal de Alamouti.

Finalmente los datos llegan al receptor donde se extraen los datos inicialmente transmitidos. La antena en recepción recibe y almacena los datos en el vector r_1 y los datos que arriban después son almacenados en r_2 , como se muestra a continuación:

$$r_1 = h_1^* c_1 + h_2 c_2 + n_1 \quad (2.20)$$

$$r_2 = -h_1 c_2^* + h_2 c_1^* + n_2 \quad (2.21)$$

finalmente r_1 y r_2 se pasan por el combinador y se obtiene, c_1 y c_2 , como se muestra a continuación:

$$\hat{c}_1 = h_1^* r_1 + h_2 r_2^* = (|h_1|^2 + |h_2|^2) c_1 + h_1^* n_1 + h_2 n_2^* \quad (2.22)$$

$$\overline{c}_2 = h_2^* r_1 - h_1 r_2^* = (|h_1|^2 + |h_2|^2) c_2 - h_1 n_2^* + h_2^* n_1 \quad (2.23)$$

Con lo anterior, se concluye que la codificación bloque espacio temporal (STBC), no adiciona bits de redundancia pero genera señales redundantes con lo que mitiga el desvanecimiento, a diferencia de la codificación bloque en un sistema SISO.

La codificación espacio temporal, maximiza la velocidad de información transmitida sin ver afectada de manera significativa los datos enviados por presencia de errores, gracias a su esquema de envío y recepción de información, a diferencia de los códigos implementados en SISO que buscan proveer de inmunidad a los datos introduciendo bits de redundancia.

2.12.2 Comparación en Diversidad

En SISO existen varios métodos de diversidad en el tiempo, en la frecuencia y en el espacio con los cuales se busca disminuir la atenuación que el canal produce en la señal transmitida.

Los esquemas de diversidad en SISO y la diversidad espacial usada en MIMO, buscan el mismo objetivo, reducir la tasa de errores presentados en la transmisión, sin embargo los procedimientos son diferentes, por ejemplo la diversidad temporal envía el mismo dato en diferentes intervalos de tiempo, generando redundancia y al mismo tiempo retardo en la transmisión, mientras que la diversidad espacial en MIMO, transmite el mismo dato simultáneamente por todas las antenas trasmisoras, generando redundancia sin retardo, lo que representa una ventaja significativa [29]; de igual manera cuando se genera redundancia por diversidad de frecuencia en SISO, se genera redundancia sacrificando una frecuencia adicional, mientras en MIMO se cuenta con esa redundancia sin el uso de esta frecuencia.

Finalmente la multiplexación espacial es un esquema completamente diferente a los esquemas de diversidad en SISO, ya que busca un objetivo diferente, el aumento en la velocidad de transmisión, sin centrarse en la disminución de los errores, lo que hace que estas técnicas no sean comparables.

2.12.3 Comparación del Canal MIMO y el Canal SISO

La capacidad del canal SISO está dada por **iError!No se encuentra el origen de la referencia.** y la capacidad de un sistema MIMO está dada por **iError!No se encuentra el origen de la referencia..**

Si se descompone la matriz del canal en autovalores se tiene $HH^* = Q\Lambda Q^*$, donde Q representa la matriz de covarianza de H, entonces se puede expresar la ecuación (2.24) como:

$$C = \log_2 \left[\det \left(I_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} Q\Lambda Q^* \right) \right] \quad (2.24)$$

Utilizando la identidad $\det(I_m + AB) = \det(I_n + BA)$, para matrices $A_{m \times n}$ y $B_{n \times m}$, y $Q^*Q = I_{N_r}$ la ecuación anterior se simplifica a:

$$C = \log_2 \left[\det \left(I_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} \Lambda \right) \right] \quad (2.25)$$

que es equivalente a:

$$C = \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N_t} \lambda_i \right) \quad (2.26)$$

donde r es el rango de H y λ_i es el i -ésimo autovalor de HH^* . En general, si el i -ésimo valor singular positivo de H se denomina σ_i , entonces el i -ésimo autovalor positivo de HH^* es $\lambda_i = \sigma_i^2$. Esta ecuación permite ver la capacidad

de un canal MIMO como la suma de las capacidades de r canales SISO, cada uno con ganancia de potencia λ_i y la potencia transmitida está distribuida uniformemente entre todas las antenas que se usan para la transmisión.

Por tanto, el uso de múltiples antenas en transmisión y recepción en un canal radio es equivalente a disponer de varios canales escalares (denominados "modas") entre el transmisor y el receptor. Si se restringe la potencia del canal a $\|H\|_F^2 = \sum_{i=1}^r \lambda_i = \xi$, se debe considerar una estructura del canal específica para conseguir maximizar su capacidad, como el número de antenas transmisoras Nt igual al número de antenas receptoras Nr y un canal de rango completo, para que el canal sea ortogonal, es decir $Nt = Nr = r$, condiciones bajo las cuales se cumple que $HH^* = H^*H = \begin{pmatrix} \xi \\ r \end{pmatrix} I_r$, lo que maximiza la capacidad. Si se reemplazan todas estas consideraciones en (2.27), se tiene que la capacidad está dada por:

$$C_{mimo} = \log_2 \left[\det \left(I_r + \frac{\rho}{r} \begin{pmatrix} \xi \\ r \end{pmatrix} I_r \right) \right] \text{bits / s/ Hz} \quad (2.27)$$

entonces se llega a :

$$C = \log_2 \left\{ \det \left[I_r \left(1 + \frac{\rho \xi}{r^2} \right) \right] \right\} \text{bits / s/ Hz} \quad (2.28)$$

ahora se puede escribir la capacidad como:

$$C = \log_2 \left\{ \det \left(1 + \frac{\rho \xi}{r^2} \right) \right\} \text{bits / s/ Hz} \quad (2.29)$$

Si además los elementos de \mathbf{H} tienen módulo unidad, es decir que cada $\lambda_i = 1, \forall i (1 \leq i \leq r)$, se tiene que $\|h_{ij}\|^2 = \sum_{i=1}^r \lambda_i = r^2$, entonces se puede escribir la capacidad de los sistemas MIMO como:

$$C = r \log_2 (1 + \rho), \quad (2.30)$$

donde C representa la capacidad asintótica del canal, r representa el número de antenas usadas en transmisión. Lo que permite afirmar que la capacidad de un canal MIMO es r veces la capacidad SISO para un canal con presencia de ruido *Gaussiano* blanco aditivo.

Hasta aquí, se han abordado los fundamentos de los sistemas MIMO y SISO, como la descripción de sus diagramas en bloque y las técnicas que usan cada

uno de ellos, para entender los componentes de los sistemas, identificar sus capacidades y particularidades.

A partir de este estudio es posible concluir que la tecnología de las redes inalámbricas MIMO presenta grandes ventajas que solucionarán los problemas en la capacidad de transmisión para cualquier tipo de red inalámbrica, por lo cual se hace necesario estudiar la capacidad de los sistemas, con el fin de cumplir con el objetivo del proyecto que consiste en analizar comparativamente las tecnologías de los sistemas MIMO y los sistemas SISO, en el canal de radio en un enlace entre dos dispositivos. Con este propósito, en el siguiente capítulo se realiza la implementación de los sistemas en una herramienta útil y versátil para la simulación, donde se presenta un análisis comparativo de la simulación realizada de los dos sistemas, lo que permitirá comprobar el análisis teórico planteado en el capítulo dos.

En la Tabla 2-1, se muestra el resumen de la comparación entre los sistemas SISO y MIMO.

TABLA 2-1. TABLA COMPARATIVA ENTRE SISTEMAS SISO Y MIMO

CARACTERÍSTICA		SISTEMA SISO (1X1)	SISTEMA MIMO (NtxNr)	GANANCIA
No DE ANTENAS EN TX		1	Ntx >= 2	
No DE ANTENAS EN RX		1	Nrx >= 2	
ESQUEMAS DE DIVERSIDAD USADOS		<ul style="list-style-type: none"> • Diversidad espacial en RX. • Diversidad temporal. • Diversidad en frecuencia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diversidad espacial en TX y RX. 	Mejoramiento de la BER .
			<ul style="list-style-type: none"> • Multiplexación espacial. 	Incremento de la velocidad de transmisión.
CODIFICACIÓN DE CANAL		<ul style="list-style-type: none"> • Códigos FEC. 	<ul style="list-style-type: none"> • Código bloque. 	Ganancia de diversidad.
			<ul style="list-style-type: none"> • Código Convolutivo (Trellis). 	<ul style="list-style-type: none"> • Espacio temporal bloque (STBC) • Espacio temporal de Trellis (STTC).
CAPACIDAD DE CANAL	CANAL GENERAL	$C_{siso} = \log_2(1 + \rho h ^2) \text{ bits / seg / Hz}$		$C_{mimo} = \log_2 \left[\det \left(I_{Nr} + \frac{\rho}{Nt} HH^* \right) \right] \text{ bits}$
	CANAL AWGN.	$C = b \log_2(1 + \rho) \text{ bits / seg / Hz}$		$C = r \log_2(1 + \rho) \text{ bits / seg / Hz}$

3 SIMULACIÓN DE CAPACIDAD DE UN SISTEMA SISO Y UN SISTEMA MIMO

3.1 INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN

El desarrollo de las técnicas de procesamiento de señales y la búsqueda de un desempeño adecuado del canal de transmisión, provocan que los sistemas de comunicaciones estén continuamente en una era de cambios fundamentales que les permitan adecuarse y adaptarse, al avance de la tecnología. Este desarrollo en el área de las telecomunicaciones, así como la aparición de servicios de red novedosos cada vez más complejos, han llevado a los proveedores de tecnología, empresas de telecomunicaciones, universidades y grupos de investigación, a analizar el desempeño de las diferentes tecnologías gracias a la simulación y experimentación.

Sin embargo, considerando la complejidad de las nuevas aplicaciones soportadas por las redes de comunicaciones, se observa que es casi imposible generar un modelo analítico que pueda cubrir todos los aspectos técnicos. Por lo tanto, la mayoría de las técnicas analíticas se utilizan solamente para la evaluación del comportamiento y desempeño de un sistema o una parte específica dentro de éste, razón por la cual, los programas desarrollados para simular diferentes tecnologías de telecomunicaciones, se utilizan con gran frecuencia para permitir recrear ambientes cercanos a la realidad, así mismo facilitan el análisis de los sistemas representando una reducción de costos, tiempo de diseño y planeación de los sistemas de comunicaciones.

Por medio de estos programas de simulación, es posible probar diferentes escenarios; permitiendo analizar y evaluar el desempeño de la tecnología estudiada.

El desarrollo de herramientas de simulación, fortalecen la investigación y la experimentación de arquitecturas de redes más complejas; ya que dichas actividades de investigación e ingeniería recurren constantemente a la simulación para estudiar los parámetros, propiedades, funcionamiento de los sistemas y verificar el comportamiento dinámico de algoritmos, protocolos y aplicaciones, de manera más sencilla y económica comparada con una implementación real.

Los sistemas MIMO, no cuentan con equipos y componentes estandarizados lo que eleva los costos y dificulta el estudio de estos sistemas a nivel hardware, de ahí que se considere la gran potencialidad de utilizar metodologías de simulación y herramientas software para el estudio de nuevas tecnologías. Por esto se decidió analizar el comportamiento de los dos sistemas de

comunicaciones en el canal de radio respecto a su capacidad a través de una simulación que permita observar el comportamiento de los sistemas al incrementar el número de antenas para transmitir y recibir datos. A continuación se realiza una descripción de la herramienta software de simulación seleccionada, la justificación de su selección, funcionamiento, y además sus ventajas en la simulación de este tipo de sistemas.

3.2 JUSTIFICACIÓN DE LA SIMULACIÓN

La selección del software para la simulación se realizó después de explorar varias herramientas existentes en el mercado que permiten la simulación de los sistemas en estudio; inicialmente el análisis se enfocó en aquellas que operan bajo licencia GPL (*General Public License*, GPL) y luego se basó en buscar herramientas que admitan realizar pruebas a los sistemas SISO y los sistemas MIMO en el área en estudio definida. Tarea que inicialmente presentó inconvenientes por ser una tecnología emergente, en ese sentido, los desarrollos que se encontraron fueron escasos por ser un área de conocimiento que está restringida a las empresas fabricantes de equipos y a los grupos de investigación, encargados de realizar la estandarización de ésta.

Entre las herramientas de simulación que se encontraron para el análisis de sistemas de comunicaciones inalámbricas están: LabVIEW 7.0, MATLAB 7.1, NS2, NCTUns 3.0, entre otras. Sin embargo, no todas permiten analizar los sistemas SISO y los sistemas MIMO en el área de estudio y de manera modular, por esta razón el estudio de las herramientas de simulación se limitó a MATLAB 7.1 (laboratorio matricial) y a LabVIEW 7.0, que cuentan con los bloques necesarios para desarrollar el análisis. A continuación se realiza una definición de cada una de las herramientas de simulación y finalmente se define cual se va a utilizar.

3.3 MATLAB 7.1

MATLAB es un software de simulación que presenta un ambiente de cómputo para procesamiento numérico y visualización. También integra el análisis numérico, calculo de matrices, procesamiento de señales y generación de graficas en un ambiente sencillo de utilizar.

MATLAB, tiene soluciones para aplicaciones específicas llamadas cajas de herramienta "*toolboxes*", que son colecciones de funciones utilizadas para resolver alguna clase particular de problema. Las áreas en donde los "*toolboxes*" están disponibles incluyen el procesamiento de señales, diseño de sistemas de control, la simulación de sistemas dinámicos, la identificación de sistemas, redes neuronales y otros, los cuales son útiles para el desarrollo de diferentes aplicaciones en el campo de la investigación científica y académica.

Ésta es una herramienta que permite realizar diferentes tipos de cálculos numéricos orientados a la investigación y estudio de sistemas de control y comunicaciones, los cuales presentan una estructura modular, que permite conocer la información que está recibiendo/entregando cada bloque, para explicar el comportamiento del sistema.

Este simulador tiene como característica fundamental, que permite redactar y programar las ecuaciones como están escritas en la literatura matemática, generando un lenguaje real de comunicación con el usuario. Es así como MATLAB, por ser una herramienta de análisis numérico, genera los datos y realiza el procesamiento que el usuario desee, permitiendo expresar las ideas técnicas con simplicidad.

MATLAB maneja diversos modelos matemáticos que interpretan comportamientos físicos, lo que facilita realizar una investigación aproximada a la realidad con una interfaz agradable para el usuario.

Para crear un algoritmo de simulación en MATLAB, se utiliza una ventana de comandos (*Command Window*) donde se digita lo que se quiere simular, definiendo las variables, las funciones y los modelos matemáticos que sirvan para ejecutar el proyecto.

La herramienta permite observar lo que está pasando en cada bloque perteneciente al sistema a través de una ventana llamada espacio de trabajo (*Workspace*), así mismo se puede analizar qué está pasando en cada variable definida [44].

3.4 LabVIEW 7.0

LabVIEW es un programa creado por *National Instruments (NI)*, es una herramienta de simulación gráfica de prueba, control y diseño mediante la programación gráfica llamado lenguaje G, facilitando el uso por parte de cualquier usuario ya sea que tenga poco conocimiento en este tipo de herramientas o ya este familiarizado con las mismas.

LabVIEW es un software diseñado para realizar la simulación de varios sistemas enfocándose principalmente a los sistemas de control, adquisición de datos, automatización industrial, diseño embebido y domótica, [46] manejando un alto grado de interoperabilidad con equipos de control [47].

Los programas desarrollados mediante LabVIEW se denominan Instrumentos Virtuales (*Virtual Instruments, VIs*), porque su apariencia y funcionamiento imitan los de un instrumento real. Sin embargo son análogos a las funciones creadas con los lenguajes de programación convencionales. Los *VIs* tienen una

parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente, y aceptan parámetros procedentes de otros VIs [45].

3.5 SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

Analizando las características de los simuladores se concluye que el simulador MATLAB 7.1 presenta mayores ventajas para la implementación de este proyecto, las cuales pueden resumirse en el manejo de las ecuaciones matemáticas especializadas definidas, que ayudan en la interpretación de los modelos matemáticos utilizados para simular el canal de radiocomunicaciones, así mismo, el manejo de los datos por medio de matrices, ayuda a realizar procedimientos de una manera más eficiente, ya que precisamente en un sistema MIMO, el canal de radio debe ser caracterizado por una matriz conformada en cada componente por los canales formados entre las antenas.

A diferencia de LabVIEW 7.0, donde se encontraron unos VIs para MIMO, con unas características desconocidas y de difícil obtención lo cual no permitió realizar la comparación entre los dos sistemas con esta herramienta.

Una de las características más importantes que tiene MATLAB 7.1, se basa en que incorpora gran variedad de modelos matemáticos que permiten simular con precisión la información contenida en cada bloque de un sistema de comunicaciones ya sea inalámbrico o cableado, así mismo tiene funciones que permiten realizar gráficas y de esta manera estudiar el comportamiento de la capacidad en los sistemas para modelos de canal planteados en este proyecto; sin embargo, los modelos que usa la herramienta son una aproximación a lo que sería un comportamiento bajo determinadas consideraciones.

3.6 APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN

3.6.1 Modelamiento

La implementación del modelo de simulación resultante se hizo en MATLAB, por lo tanto el análisis y los resultados obtenidos se enfocaron hacia ese objetivo.

Formulación y Planificación del Estudio

La simulación implementada para este proyecto permite estudiar aspectos concretos del comportamiento dinámico de los dos sistemas, a través de unos modelos con los cuales se desea evaluar y analizar la capacidad en el canal y el desempeño en términos de la BER de los sistemas SISO y MIMO con presencia de multitrayectorias y ruido blanco en el canal de radiocomunicaciones, donde se espera obtener los resultados teóricos analizados en el capítulo dos como el

aumento en la capacidad y un mejor desempeño por parte de los sistemas MIMO.

Para cumplir con las características mencionadas, se establecieron dos modelos de canal: un modelo de canal Rayleigh representado por su función de densidad de probabilidad y un modelo de canal AWGN representado por la función de densidad de probabilidad Normal, los cuales permiten recopilar información del canal con presencia de multitrayectorias y con ruido blanco respectivamente.

Formulación de objetivos de simulación

- Evaluación de la capacidad del canal radio en un sistema, variando las antenas desde una hasta cuatro antenas en el transmisor y en el receptor, contra la relación señal a ruido, para los modelos de canal Rayleigh y AWGN.
- Evaluación de la BER en un sistema SISO y un sistema MIMO (2,2) variando la relación señal a ruido en los dos tipos de canal.

Después de la definición de los modelos que afectan las variables de los sistemas se describen unos breves conceptos teóricos utilizados para el desarrollo de la simulación.

3.6.2 Modelo Conceptual

De acuerdo a los objetivos planteados con esta metodología de simulación se procede a plantear un modelo de simulación en donde se consideran únicamente los aspectos más importantes y de mayor interés para lograr los objetivos planteados. El modelamiento matemático de los sistemas de comunicaciones permite reducir la complejidad, mostrar con mayor claridad los procesos que son objetos de estudio y simular el modelo. El sistema se ha dividido en tres subsistemas generales que son:

- Subsistema transmisor
- Subsistema modelo de canal
- Subsistema receptor

La estructura del sistema basada en los subsistemas anteriores se muestra en la Figura 3-1.

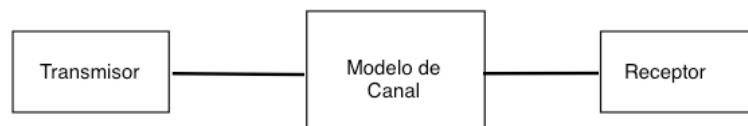


Figura 3-1. Estructura del Sistema Total

Modelo de Conceptual: Transmisor

La implementación del transmisor en su nivel mas alto de abstracción se muestra en la Figura 3-2.

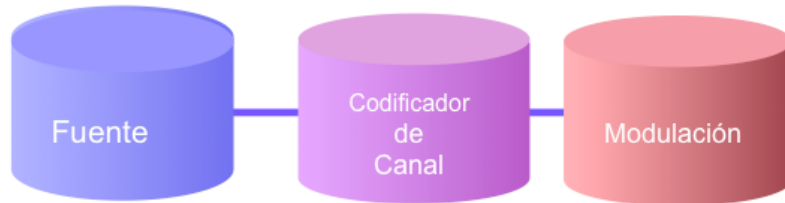


Figura 3-2. Estructura del Subsistema Transmisor

Estructura interna y caracterización de la Fuente:

Señal de entrada:

Ninguna

Variables de entrada:

Tipo de dato de salida: binario

Conjunto de datos entregados por la fuente: 1000

Señales de Salida:

Datos Binarios

Este bloque es el generador de datos binarios aleatorios; los datos reales pueden ser analógicos o digitales, pero para efectos de simulación se asumieron datos binarios para evitar un módulo conversor de datos A/D (Analógico-Digital), D/A (Digital-Analógico)

Estructura interna y caracterización del codificador de canal en SISO:

Señal de entrada:

Datos Binarios entregados por la fuente

Variables de entrada:

Tasa de codificación

Código convolucional

Señal de salida:

Datos Binarios con codificación convolucional

Estructura interna y caracterización del codificador de canal en MIMO:

Señal de entrada:

Datos Binarios entregados por la fuente

Señal de salida:

Matriz (2,2) con datos codificados mediante un codificador espacio temporal de Alamouti

Este bloque hace referencia a la codificación de la información a ser enviada a través del canal. El tipo de codificación seleccionado para el sistema SISO es convolucional con una velocidad de codificación de $\frac{1}{2}$, es decir por cada bit enviado por el módulo generador crea dos bits de código lo que representa un bit de redundancia, entregando esta nueva información al bloque modulador encargado de modular los datos con BPSK; en MIMO se utilizó la codificación de *Alamouti*, una codificación espacio temporal y se utilizó la misma modulación de SISO.

Estructura interna y caracterización de la modulación:

Señal de entrada:

Datos codificados por el codificador de canal

Señal de salida:

Símbolos modulados en BPSK

Modelo Conceptual: Canal Radio

Señal de entrada:

Símbolos modulados con BPSK

Variables de entrada:

Tipo de canal a simular

Canal con presencia de multitrayectorias: canal Rayleigh

Canal con ruido Gaussiano blanco aditivo: canal AWGN

Señal de salida:

Señal afectada por el canal con presencia de multitrayectorias
Señal afectada por ruido Gaussiano blanco aditivo

El bloque de canal, tiene dos modelos de canal: *Rayleigh* (multitrayectorias) y Gaussiano (ruido *Gaussiano* blanco aditivo); seleccionados para efectos de análisis con el fin de representar el comportamiento de la señal en el espacio libre. Estos dos modelos fueron simulados para SISO y MIMO.

Modelo Conceptual: receptor

La implementación del receptor en su nivel mas alto de abstracción se muestra en la siguiente Figura 3-3.

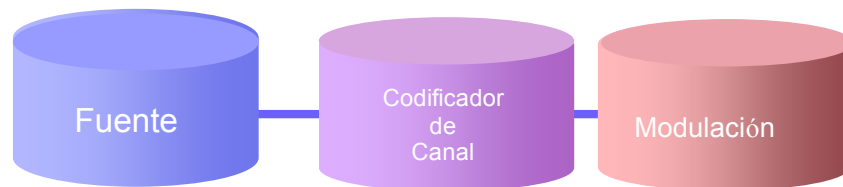


Figura 3-3. Estructura del Subsistema Receptor

Estructura interna y caracterización de la demodulación

Señal de entrada:

Símbolos BPSK afectados por el Subsistema modelo de canal

Señal de salida:

Señal demodulada y codificada

Estructura interna y caracterización del decodificador de canal para SISO

Señal de entrada:

Señal codificada

Variables de entrada:

Decodificación convolucional

Señal de salida:

Datos de usuario

Estructura interna y caracterización del decodificador de canal para MIMO

Señal de entrada:

Matriz (2,2) de datos demodulados

Señal de salida:

Datos de usuario

3.6.3 Modelo de Simulación

Modelo de Simulación de la Fuente:

Para generar los datos en SISO y MIMO, se usó la función "*randint*" propia de la herramienta de simulación.

Modelo de Simulación del Modulador:

El bloque modulador, modula la señal con BPSK en los dos sistemas, a continuación se mencionan las funciones utilizadas:

- Para SISO se desarrollo la función "*modPSK*", que llama una función propia de la herramienta denominada "*pskmod*".
- Para MIMO queda definido por la función "*codmimo*".

```

function d=codmimo(data)      %Función que realiza el proceso de modulación

symb_one = 1;                %Cuando llega un símbolo 1 le asigna una valor 1
                              %por ser una modulación BPSK

symb_zero = -1;              %Cuando llega un símbolo 0 le asigna una valor de -
                              %1 por ser una modulación BPSK

bits(1)=data(1,1);
bits(2)=data(1,2);
if bits(1) == 0
s1 = symb_zero;
else
s1 = symb_one;
end

if bits(2) == 0
s2 = symb_zero;
else
s2 = symb_one;
end

```

Modelo de Simulación del Codificador de Canal

Las funciones con las cuales se implementaron los códigos para la simulación quedan descritas a continuación:

- En SISO el código convolucional está definido mediante la función "coder" que a su vez llama la función "xconvol" que realiza la codificación utilizando una función propia de MATLAB.
- En MIMO el codificador espacio temporal queda definido por la función "codmimo" encargada de realizar la codificación de los datos generados.

```

function d=codmimo(data) %Función de codificación
                        para MIMO que recibe los datos de
                        data

[c1,c2]= $\begin{pmatrix} c_1 & c_2 \\ -c_2^* & c_1^* \end{pmatrix}$  %matriz de Alamouti.

d = [s1 s2; -conj(s2) conj(s1)]; %Es la matriz de Alamouti que se encarga
                                del proceso de codificación de los datos,
                                y los devuelve por la variable d

```

Modelo de Simulación del Canal Radio

Los modelos de canal implementados para los sistemas son expresados por el vector H de dimensión 1x1 para SISO y la matriz 2x2 para MIMO:

- Canal con distribución *Rayleigh*:

```

H = (randn(2, 2) + j*randn(2,2))/sqrt(2); %Canal Rayleigh

%Define un matriz aleatoria de canal H con distribución Rayleigh de tamaño
Ntx=2 x Nrx=2.

```

- Canal con distribución normal (modela canal AWGN):

```

H = (randn(2, 2) + j*randn(2,2));%canal normal

%Define un matriz aleatoria de canal H con distribución AWGN de tamaño Ntx x
Nrx.

```

Luego, la señal transmitida, es afectada por el ruido AWGN, calculado con la función "awgn" propia de MATLAB utilizada para los sistemas.

Modelo de Simulación del Demodulador

El proceso de demodulación se utiliza las siguientes funciones:

- En SISO mediante la función "pskdemod" de MATLAB.
- En MIMO, mediante la función "decodmimo", descrita a continuación.

```

function dc= decodmimo(H,senalr,t) %Función de demodulación
symb_zero = -1;
symb_one = 1;
senal=senalr;
He=H;

for f=1:t;
y=senal(:,f);

%Combinador de la Matriz de Alamouti

s0 = conj(He(1,1))*y(1,1) + He(1,2)*conj(y(1,2)) + conj(He(2,1))*y(2,1) +
He(2,2)*conj(y(2,2));
s1 = conj(He(1,2))*y(1,1) - He(1,1)*conj(y(1,2)) + conj(He(2,2))*y(2,1) -
He(2,1)*conj(y(2,2));

```

```

%Modulador BPSK

if real (s0) <0
dec(1,1) =0;
else
dec(1,1)=1;
end% end s0 detector
if real (s1) < 0;
dec(1,2) = 0;
else
dec(1,2) =1 ;
end % end s0 detector
dc(:,f)=dec();
end

```

Modelo de Simulación del Decodificador

El proceso de decodificación utiliza las siguientes funciones:

- En SISO el proceso de decodificación se realiza a través de la función "decoder", que llama otra función "deconvol" que utiliza una función de MATLAB en el proceso de decodificación de los datos, recuperando la señal que se transmitió.

- En MIMO, se utilizó un combinador (ilustrado en el capítulo dos) que captura las señales que llegan a cada antena, recuperando la señal original transmitida utilizando las réplicas de las señales recibidas.

La función "decodmimo" se encarga de realizar este proceso.

```
function dc= decodmimo(H,senalr,t) %
symb_zero = -1;
symb_one = 1;
senal=senalr;
He=H;

s0 = conj(He(1,1))*y(1,1) + He(1,2)*conj(y(1,2)) + conj(He(2,1))*y(2,1) +
He(2,2)*conj(y(2,2));
s1 = conj(He(1,2))*y(1,1) - He(1,1)*conj(y(1,2)) + conj(He(2,2))*y(2,1) -
He(2,1)*conj(y(2,2));
```

Después de tener los modelos de canal, se calcula la capacidad de los sistemas empleando la ecuación de canal que depende del número de antenas.

```
cap(1,oye)=log2(det(IM + (EbNo/Ntx)*H*H'));
```

La BER se calcula del promedio de los errores obtenidos, variando la SNR como se muestra a continuación:

```
% Calcula el número de errores comparando la señal transmitida con la señal
decodificada

bit_error(1,oye) = sum(x~=decod); %Para el sistema SISO

BER = bit_error)/(length(x) ; % Calcula la BER.

bit_error(1,g) = sum(data~=senalrecibida'); % Para el
sistema MIMO
BER =bit_error/length(data);%Calcula la BER
```

Para obtener más información en detalle de las funciones mencionadas anteriormente, remítase al anexo C del documento.

3.6.4 Apropiación de la Base Teórica de los Sistemas SISO y los sistemas MIMO para su Simulación

El diagrama en bloques completo de los dos sistemas queda representado por la siguiente Figura:

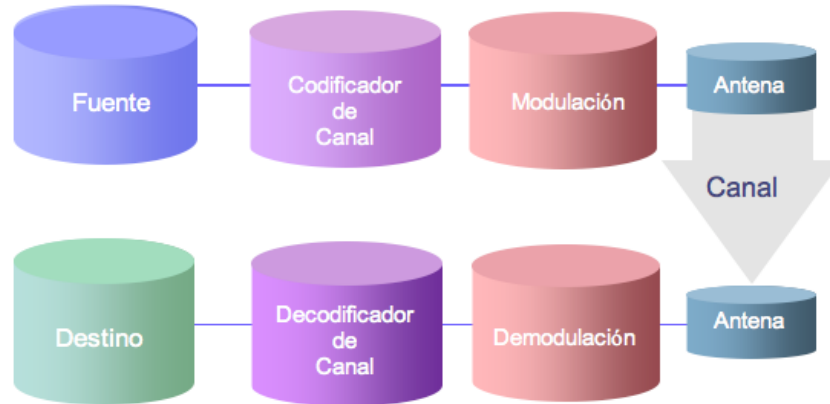


Figura 3-4. Diagrama General de los Bloques Generados para la Simulación

Los sistemas para efectos de simulación considerara únicamente un enlace unidireccional entre el transmisor y el receptor, se usa un ancho de banda de un Hertz (1Hz) plano para estas frecuencias, la potencia de símbolo $E_s = 1$, la potencia de cada componente de ruido $\sigma_n^2 = N_0$, se asume que el periodo de símbolo $T=1s$ y el receptor tiene conocimiento del canal [9][13].

La señal en el receptor para el sistema completo está dada por:

$$y = \sqrt{\frac{E_s}{N_t}} H * S + n, \quad (3.1)$$

donde E_s es la potencia de símbolo, N_t es el número de antenas transmisoras, $H_{(N_t, N_r)}$ representa la matriz de canal MIMO, S representa la información a transmitir y n representa el ruido AWGN.

La relación $\sqrt{\frac{E_s}{N_t}}$ de la expresión (3.1) es la normalización de la potencia de transmisión, realizada para asegurar que se transmite con la misma potencia por cada antena y así no obtener ganancia por arreglo, a la cual se le pueda atribuir las mejoras conseguidas en la BER y en la capacidad de un sistema MIMO, comparado con SISO.

Teniendo en cuenta los parámetros de la expresión (3.2) y considerando la ecuación para la capacidad del canal que se vio en el capítulo dos, se llega a:

$$C_{MIMO} = \log_2 \left(\det \left(I_{N_r} + \frac{E_s}{N_t N_0} HH^* \right) \right) \text{ bits / s / Hz}, \quad (3.2)$$

donde se tiene que:

$$\frac{E_s}{N_0} = \rho = SNR \quad (3.3)$$

Los modelos de canal utilizados quedan definidos por sus funciones de densidad de probabilidad descritas en el capítulo dos.

3.6.5 Validación del Modelo de Simulación

Los modelos planteados para la simulación inicialmente tenían un comportamiento aleatorio y en las primeras pruebas realizadas para determinar la capacidad del canal y desempeño del sistema, los resultados obtenidos fueron inestables y por tanto se obtuvieron resultados no previstos en el estudio teórico en cuanto al desempeño de los dos sistemas, conllevando esto a realizar nuevas consideraciones en el comportamiento del modelo del canal, para buscar más estabilidad.

3.7 SIMULACIONES Y RESULTADOS

El propósito de esta sección es realizar las pruebas de simulación necesarias para verificar el funcionamiento de los sistemas MIMO y SISO implementados, con el fin de identificar la capacidad del canal respecto al número de antenas usadas. Para tal fin, se establecieron unos escenarios de prueba que permitieran analizar el desempeño de los sistemas ante factores como las trayectorias múltiples y la perturbación en la señal ocasionada por el ruido *Gaussiano* blanco aditivo. En cada uno de estos escenarios se evaluó la capacidad en bits/s/Hz, y la tasa de error de bit contra la relación señal a ruido (SNR).

Todas las pruebas de simulación se realizaron sobre los sistemas de comunicaciones implementados en MATLAB7.1 donde se analizaron los modelos explicados en el capítulo dos sección cuatro.

La simulación de los sistemas, se realizó bajos las siguientes consideraciones generales, expresadas en MATLAB:

```

K = 1e4;           %Numero de datos a ser
                  % transmitidos

M = 2;           %Tamaño de constelación, señal
                 % BPSK

k = log2(M);     %Número de bits por símbolo

Ntx=1 o 2;      %Número de antenas Transmisoras

Nrx=1 o 2;      %Número de antenas Receptoras

SNR_max = 15;   %Relación señal a ruido máxima

snr=1:1:SNR_max; % Variación de SNR

IM=1;           % Matriz identidad para los sistemas SISO.
IM =  $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ ; % Matriz identidad para
                  % sistemas MIMO.

```

3.7.1 Escenarios de Simulación

3.7.1.1 Escenario 1: Capacidad de Sistemas con Múltiples Antenas

El siguiente escenario, ilustra la capacidad sin codificación ni modulación de varios sistemas, empezando desde un (1,1) hasta llegar a un sistema (4,4), con el objetivo de verificar el incremento en la capacidad al aumentar el número de antenas y la SNR (dB). Por ejemplo, teóricamente un sistema con $N_t=N_r=4$, ofrece mayor capacidad que un sistema MIMO de $N_t=N_r=2$ con un factor que depende del número adicional de antenas es decir para este caso particular dos, adicionalmente la capacidad también aumenta cuando se tiene una buena SNR, sin embargo este crecimiento es limitado porque la relación señal a ruido se ubica dentro de una función logarítmica, como se puede apreciar en la siguiente ecuación, que representa la capacidad para un sistema MIMO [15].

$$C_{mimo} = \log_2 \left[\det \left(I_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} HH^* \right) \right] \text{ bits / s / Hz ,} \quad (3.4)$$

entonces bajo las consideraciones mostradas en la sección 2.12.3 del documento, la ecuación (3.4) queda representada por

$$C = r \log_2(1 + \rho) \text{ bits / s / Hz ,} \quad (3.5)$$

donde se observa que la capacidad MIMO es r veces la capacidad de un sistema SISO como se concluyó en el capítulo dos.

A continuación, se mostrarán algunas funciones utilizadas en el simulador para desarrollar este escenario. Primero, se generan datos binarios y se define el número de antenas en dos vectores, uno para las antenas transmisoras y el otro para las receptoras.

```

nt_V = [1 2 3 4];           % Vector que define el número de antenas transmisoras
nr_V = [1 2 3 4];           % Vector que define el número de antenas receptoras

data=randint(1,48,2);       % Función que genera 48 datos binarios.

```

Los datos se dividen dependiendo del número de antenas, para luego pasarlos por el canal *Rayleigh* o AWGN.

```

Canal Rayleigh
H=(randn(Nrx, Ntx) + j*randn(Nrx, Ntx))/sqrt(2);
%Define un matriz aleatoria de canal H con distribución Rayleigh de tamaño Ntx x Nrx.

Canal AWGN
H=(randn(Nrx, Ntx) + j*randn(Nrx, Ntx));
%Define un matriz aleatoria de canal H con distribución AWGN de tamaño Ntx x Nrx.

```

Y finalmente se realizan los cálculos de capacidad con el fin de analizar como es el incremento en la capacidad.

```

cap(1,oye)=log2(det(IM + (EbNo/Ntx)*H*H'));

% Ecuación que se encarga de calcular la capacidad MIMO.

```

Por lo tanto, las gráficas representan este crecimiento respecto a la SNR y al número de antenas. El aumento en la capacidad, ocurre tanto para un canal *Rayleigh*, como se puede apreciar en las Figuras 3-2 y 3-3 respectivamente, donde se ilustran las gráficas de capacidad contra la SNR de los sistemas variando las antenas desde un sistema SISO hasta un MIMO (4,4).

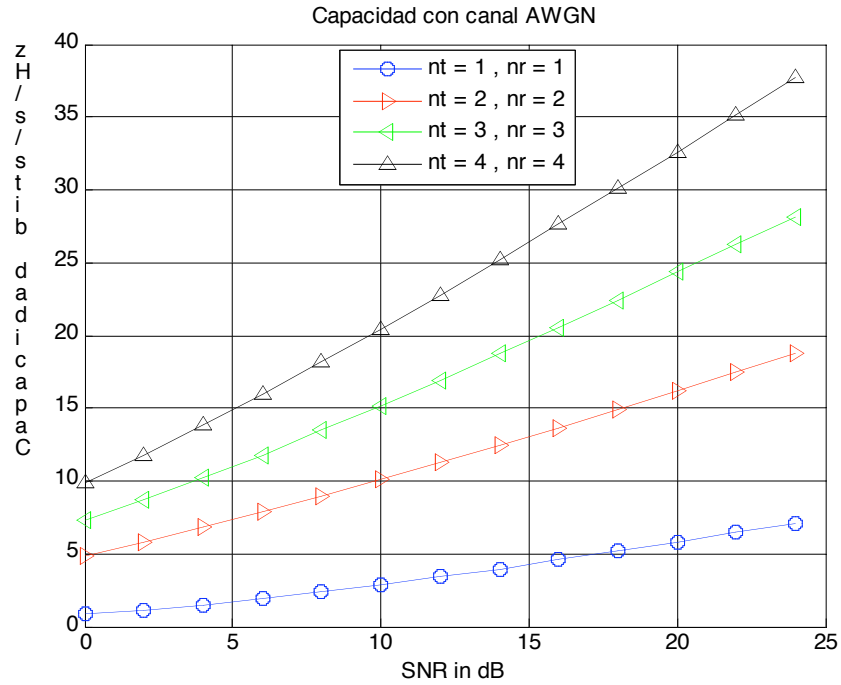


Figura 3-5. Comparación de Capacidad de Sistemas con Múltiples Antenas para Canal AWGN

En la Figura 3-5 para el sistema (4,4) y una SNR=10dB la capacidad es de 20bits/s/Hz y en la Figura 3-3 para el mismo sistema con canal Rayleigh y bajo la misma SNR, se tiene una capacidad de aproximadamente 21 bits/s/Hz, con lo cual se aprecia que los sistemas presentan un comportamiento similar en lo referente a la capacidad soportada por cada sistema.

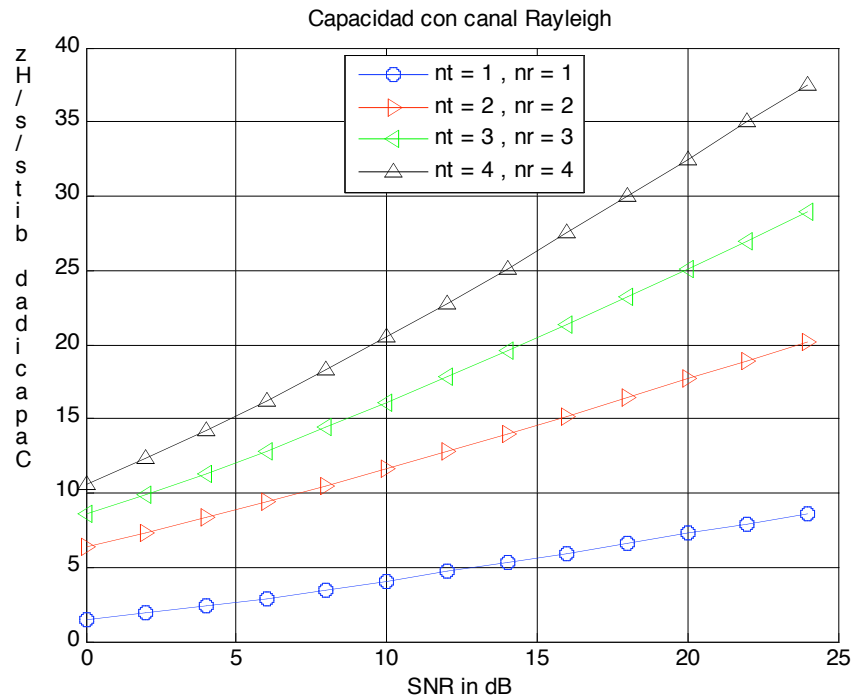


Figura 3-6. Comparación de Capacidad de Sistemas con Múltiples Antenas con canal Rayleigh

3.7.1.2 Escenario 2: Capacidad de un Sistema SISO y un Sistema MIMO 2x2 con codificación de canal

Los sistemas se analizaron con unos modelos de canal *Rayleigh* o AWGN. En este escenario de simulación, se estudió la capacidad contra la SNR de un sistema SISO y un sistema MIMO (2,2), con un código corrector de error convolucional y un código espacio temporal en bloque para MIMO con el esquema de *Alamouti*, con el fin de evaluar y analizar el comportamiento de la capacidad al incrementar el número de antenas y la relación señal a ruido en un sistema de telecomunicaciones.

Con las gráficas obtenidas mediante la simulación se puede analizar la variación de las características en estudio. En la Figura 3-7 y en la Figura 3-8, MIMO está representado por la gráfica de color rojo y SISO está representado por la gráfica de color azul, para un canal *Rayleigh* y un canal AWGN respectivamente:

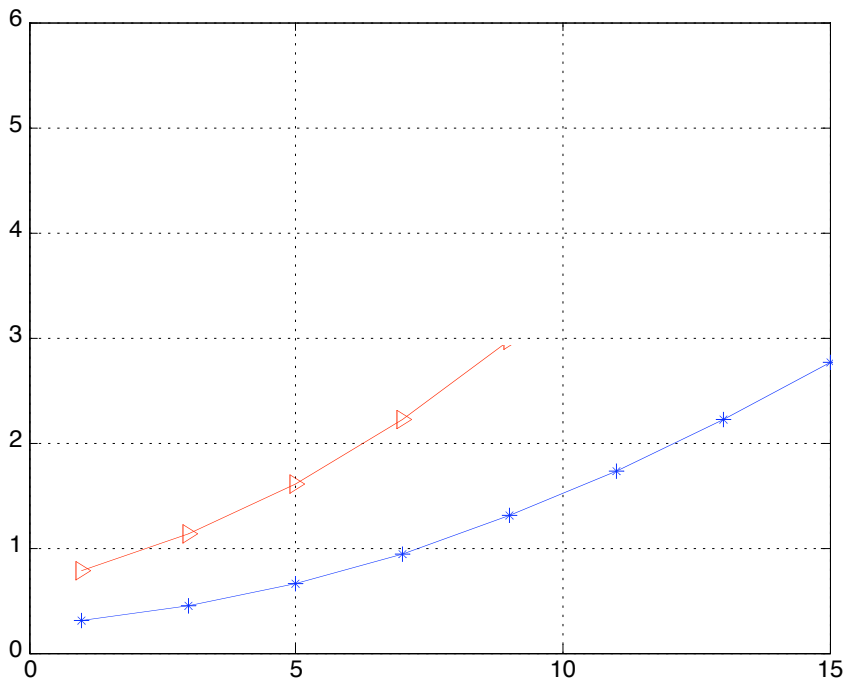


Figura 3-7. Capacidad de un Sistema SISO y un Sistema MIMO 2x2 con Canal Rayleigh y Codificación de Canal

En la Figura 3-7 para un valor de SNR=5dB, SISO tiene una capacidad aproximada de 0.8 bits/s/Hz y MIMO una capacidad de 1.7 bits/s/Hz para el modelo de canal con distribución *Rayleigh*, donde la capacidad del sistema (2,2) es mayor que el sistema SISO.

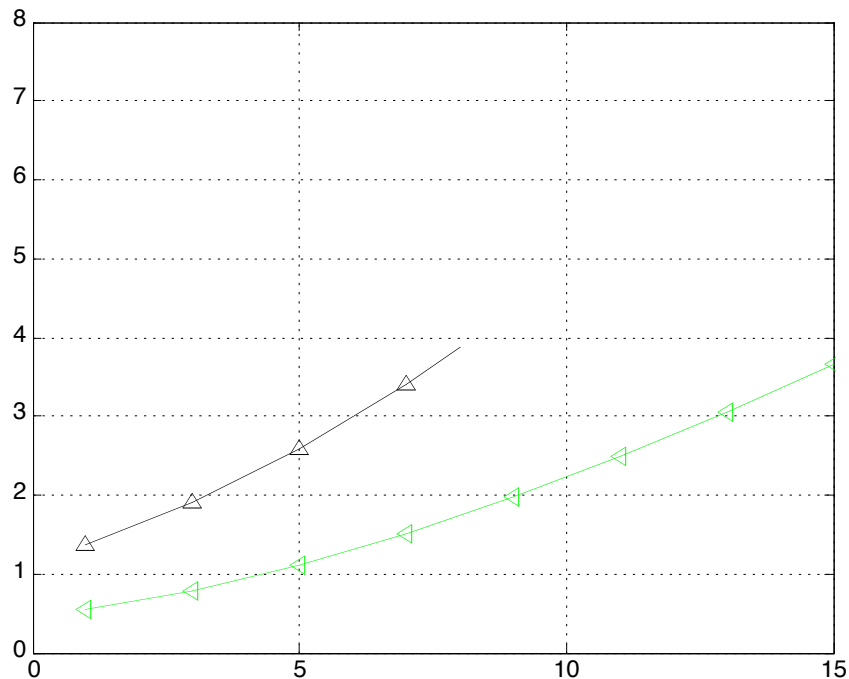


Figura 3-8. Capacidad de un Sistema SISO y un Sistema MIMO con Canal AWGN y Codificación de Canal

En la Figura 3-8 para el modelo de canal AWGN, se tiene una capacidad alrededor de 1 bits/s/Hz en SISO y cerca de 2.2 bits/s/Hz para MIMO con una SNR=5dB, reafirmando el incremento expresado en la capacidad del canal al aumentar el número de antenas como se observó en la Figura 3-7 con otro modelo de canal.

En las Figuras 3-7, 3-8 que representan la capacidad de los sistemas contra la SNR, se encuentra que ésta aumenta casi al doble, independientemente del modelo de canal usado, es decir, se consigue una variación en bits/s/Hz solo con el hecho de adicionar antenas, característica prevista cuando se realizó el análisis matemático en el capítulo dos, cumpliendo con las expectativas planteadas teóricamente. De igual manera se observa que la capacidad de los sistemas aumenta a medida que crece la relación señal a ruido, como se esperaba.

3.7.1.3 Escenario 3: Capacidad de un Sistema SISO y MIMO 2x2 sin Codificación de Canal

Este escenario, ilustra el comportamiento de un sistema SISO y MIMO sin código corrector de error con modelos de canal *Rayleigh* y AWGN para evaluar y analizar su capacidad al no proteger sus datos.

La capacidad al ser un factor que depende del número de antenas, tiene el mismo comportamiento del escenario anterior donde se codificaban los datos, lo cual se aprecia en las Figuras 3-9 y 3-10 para los dos modelos de canal.

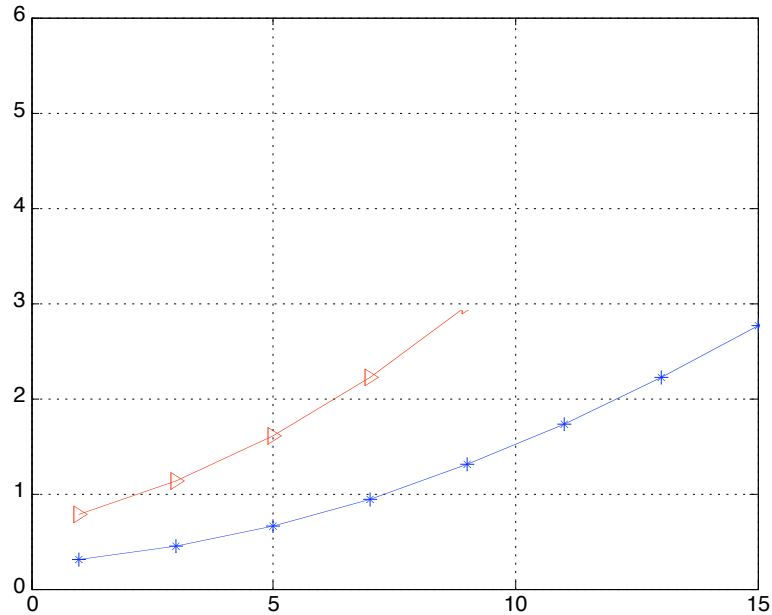


Figura 3-9. Capacidad de un Sistema SISO y MIMO 2x2 sin Codificación de Canal y Canal Rayleigh

En la Figura 3-9 para un valor de $SNR=5dB$, SISO tiene una capacidad aproximada de 0.8 bits/s/Hz y MIMO una capacidad alrededor de 1.7 bits/s/Hz para el modelo de canal con distribución *Rayleigh*, valores similares a los obtenidos en los sistemas con codificación, por lo tanto el aumento en la capacidad de los sistemas se obtiene con el hecho de adicionar antenas en los dos extremos, así no tengan en su estructura algún esquema de codificación de canal.

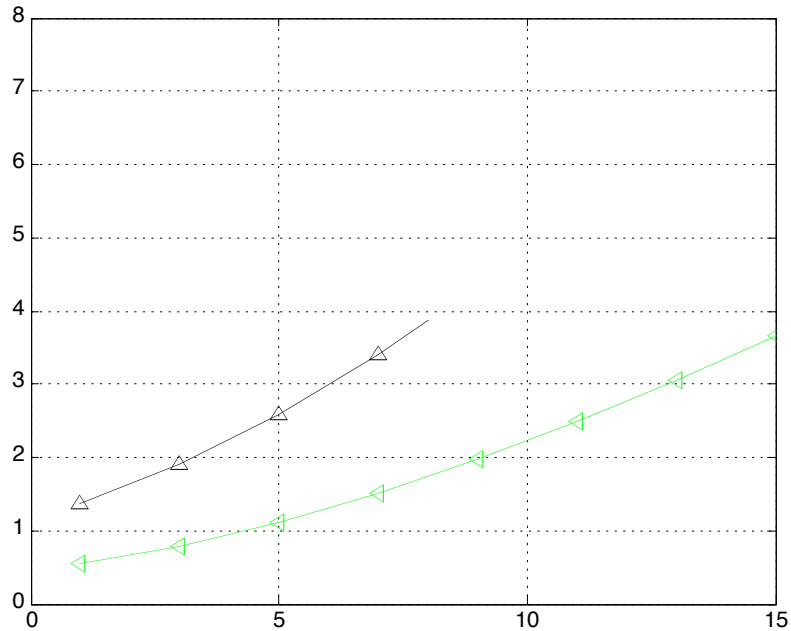


Figura 3-10. Capacidad de un Sistema SISO y MIMO 2x2 sin Codificación de Canal y Canal AWGN

En la Figura 3-10 se observa que sucedió lo mismo que en la Figura 3-8, donde la capacidad aumenta de la misma manera que los sistemas con codificación. Es decir, se tiene una capacidad de un poco más de 1 bits/s/Hz en SISO y cerca de 2.2 bits/s/Hz para MIMO con la misma SNR de 5dB, reafirmando el incremento expresado en la capacidad del canal al aumentar el número de antenas.

Por lo tanto, la incidencia de un esquema de codificación de canal para proteger los datos, no produce algún beneficio o reducción en la capacidad, por lo tanto bajo las consideraciones teóricas ésta sólo se incrementa al aumentar el número de antenas.

3.7.2 Análisis de la BER

Para el análisis de los sistemas respecto a su tasa de error de bit (BER) contra la relación señal a ruido (SNR), inicialmente se implementó un sistema SISO que sirvió como base para el desarrollo de los bloques del sistema MIMO, tratando de usar la misma secuencia lógica y de adaptar las mismas funciones para los dos entornos, tarea que en muchos momentos fue difícil y en algunos casos imposible, ya que estos sistemas realizan un manejo completamente diferente de la información y del canal de radio.

Aparentemente el canal de radio para un sistema SISO es el mismo que para un sistema MIMO, ya que teóricamente se afirma que un canal MIMO puede ser modelado como varios canales SISO en paralelo, cada uno de ellos independiente entre si; lo que en la práctica no es tan simple, ya que en MIMO se necesitan combinar las señales recibidas en recepción para recuperar la información y así explorar el manejo que realizan los códigos espacio temporales con los datos. En este caso, el codificador espacio temporal que se empleó fue el de *Alamouti*.

3.7.2.1 Escenario 4: BER de un Sistema SISO con Canal Rayleigh sin Codificación de Canal

Se generó una sistema SISO, que transmitía un conjunto de 1000 bits generados aleatoriamente, se varió la SNR hasta 30dB, no se utilizó codificación de canal para no tener ganancia por codificación, y finalmente el experimento se realizó 100 veces sin estimación del canal, donde se variaban aleatoriamente los datos a transmitir y el canal *Rayleigh*. Con esto se encontró el promedio de la BER para un sistema SISO que se observa en la Figura 3-10.

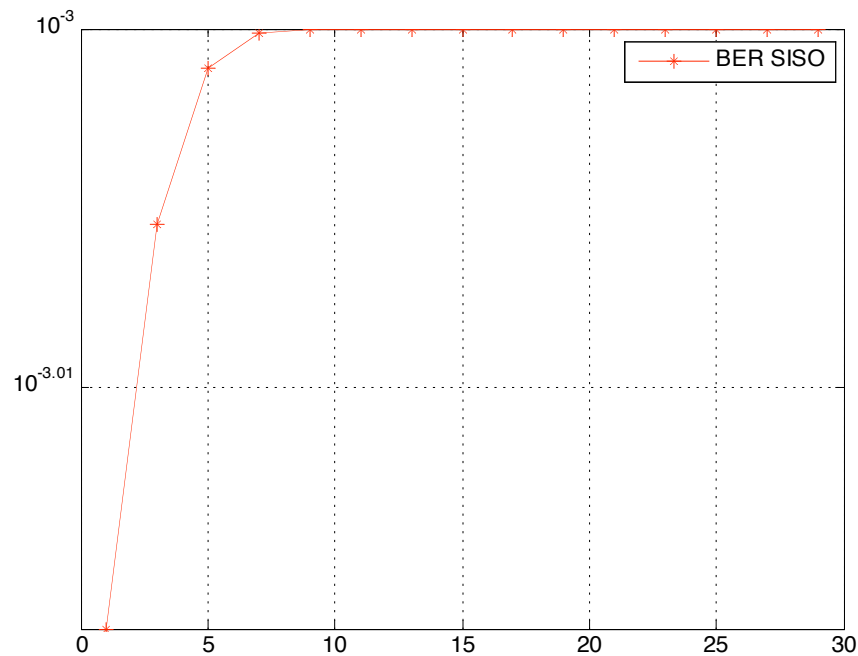


Figura 3-11. BER SISO con Canal Rayleigh sin Codificación de Canal

En la Figura 3-11 de BER contra SNR el sistema se comporta de manera opuesta a lo esperado, ya que para una SNR=1dB el sistema no presenta

errores y a medida que se incrementa el valor de SNR la tasa de errores se dispara y llega a un valor estable el cual no se ve modificado, ni siquiera en presencia de SNR mayores a 25dB.

Después de este inesperado resultado, se variaron diferentes aspectos, como la implementación de un codificador convolucional para SISO, con el fin de analizar la respuesta del sistema y calcular la ganancia por codificación del canal, además se conservaron los otros parámetros idénticos al experimento anterior. La grafica que muestra el resultado de esta simulación se puede ver a continuación en la Figura 3-12.

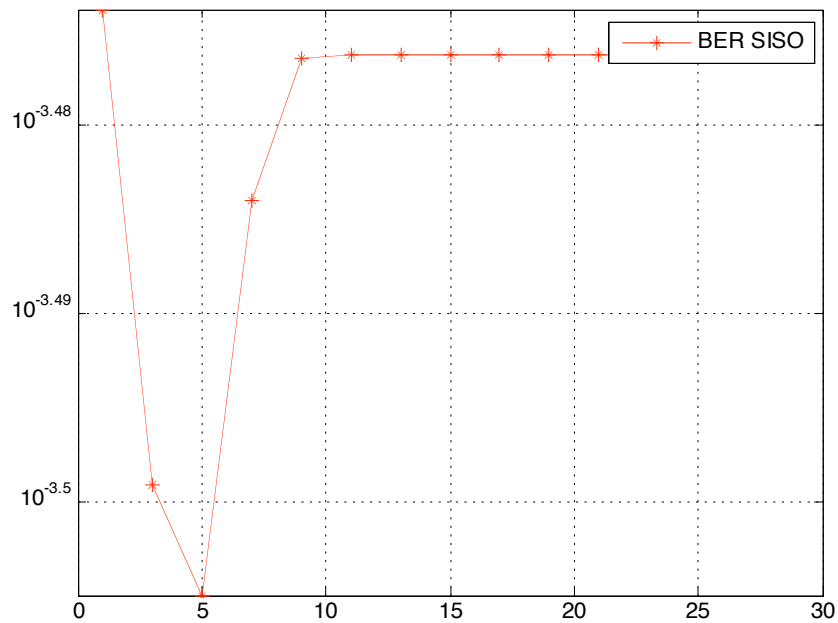


Figura 3-12. BER sistema con Codificación de Canal

Se observa que no se produce un cambio importante en la respuesta del sistema, y prácticamente se tiene el mismo comportamiento, donde la tasa de error de bits se reduce hasta un valor asintótico o fijo a medida que se incrementa el valor de la SNR igual que en el anterior escenario.

Debido a que este comportamiento no es coherente con el valor teórico de la BER para un sistema SISO que usa codificación convolucional, se puede concluir que la variación aleatoria de la función del canal de radio, está afectando la capacidad del receptor para poder decodificar adecuadamente la información que recibe; ante estos resultados, se puede afirmar que la adición de un código corrector de errores de características convolucionales no afecta significativamente los resultados obtenidos en este tipo de sistema.

En el próximo escenario se simularán los dos sistemas para comparar el comportamiento de MIMO con respecto a SISO, variando el modelo de canal de

radio de *Rayleigh* a AWGN.

3.7.2.2 Escenario 5: Gráfica Comparativa de la BER de un Sistema SISO y MIMO

Se simuló un sistema SISO y un sistema MIMO con las mismas características, es decir con el mismo tipo de distribución de canal, sin estimación de canal y variando en cada iteración tanto el canal como el conjunto de datos a transmitir. Ésta aleatoriedad en sus componentes produjo resultados completamente contradictorios a medida que se repetía la simulación, por ejemplo en las Figuras 3-13 y 3-14 se presentan los resultados de la simulación.

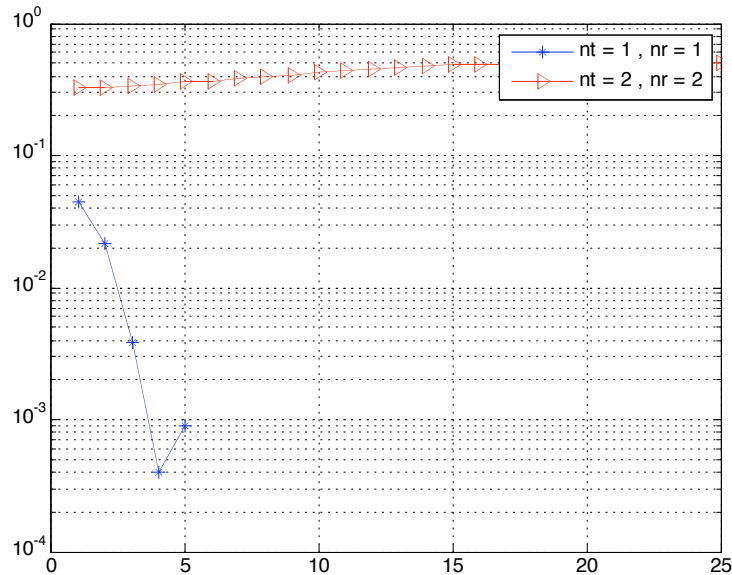


Figura 3-13. BER Sistema SISO y MIMO con Canal Rayleigh y Codificación de Canal

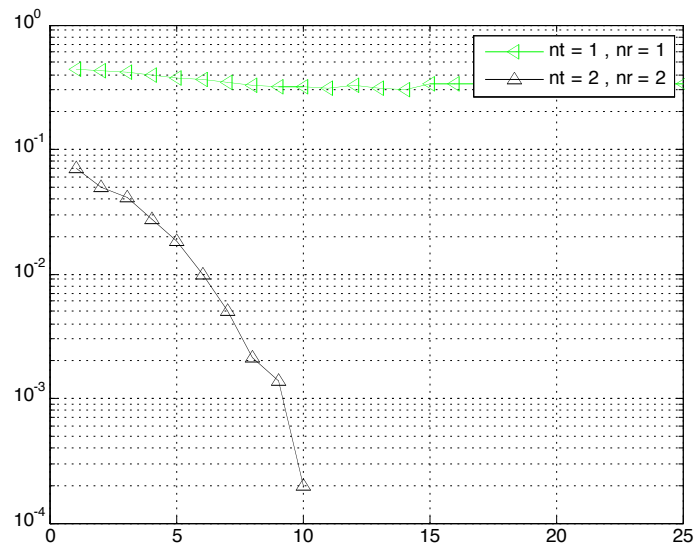


Figura 3-14. BER Sistema SISO y MIMO con Canal Rayleigh con Codificación de Canal

En la Figura 3-13 se observa que la tasa de error de bits de un sistema MIMO, se mantiene prácticamente constante o estable a medida que se incrementa la relación señal a ruido, mientras la BER para un sistema SISO se reduce rápidamente; sin embargo posteriormente cuando se repitió el experimento manteniendo fijas las mismas variables o mejor dicho las funciones con las que se generan las componentes aleatorias del canal *Rayleigh*, se obtiene un resultado completamente opuesto, como se puede ver en la Figura 3-14, donde la BER del sistema MIMO disminuye rápidamente a medida que se incrementa la SNR, mientras la BER de un sistema SISO se mantiene prácticamente constante; es importante aclarar que las gráficas muestran el resultado de la BER para ambos sistemas después de realizar más de 50 iteraciones para cada escenario, es decir son resultados promedio.

Posteriormente se realizaron pruebas a los dos sistemas cambiando el tipo de modulación usada, pasando de BPSK a DBPSK, se controló el nivel de ruido que se estaba introduciendo a los datos con la función AWGN propia de MATLAB y se usaron diferentes funciones propias de la herramienta para generar el canal de radio, cambiando la función de densidad de probabilidad que lo representa, con lo cuál no se consiguió ninguna mejoría en las graficas que representan los sistemas ya que seguían comportándose aleatoriamente a pesar de incrementar ampliamente el número de iteraciones, por consiguiente, se puede concluir que los resultados mostrados anteriormente son producto de la incapacidad de los sistemas para recuperar los datos transmitidos, los cuales son afectados por el canal de radio, lo que hace necesario el desarrollo e implementación de un módulo capaz de realizar estimación de canal para los

sistemas, con el fin de otorgar al receptor habilidades, para que pueda calcular el efecto causado por el canal de radio a los datos transmitidos y así recuperarlos sin errores.

En la búsqueda de soluciones para este inconveniente se encontró que MATLAB no cuenta con las funciones o los algoritmos necesarios para realizar estimación de canal para los dos sistemas, y al elaborar una estimación para SISO posteriormente se debería extrapolar a un entorno MIMO, procedimiento que desbordaría ampliamente el objetivo y la dimensión prevista para este trabajo, por lo tanto, para controlar la falta de estabilidad en los resultados de los sistemas se procedieron a definir nuevas características para realizar los próximos escenarios de simulación, con el fin de realizar la comparación en un entorno beneficioso para los dos sistemas:

- Se creó el canal de radio para un sistema MIMO, el cuál se mantuvo constante durante toda la transmisión es decir, para esta simulación se empleo un canal con comportamiento estático, plano en frecuencia con desvanecimientos lentos y con el transmisor y receptor estático con el fin de evitar dispersión *doppler*.
- Para cumplir con el objetivo principal de este trabajo de grado, el canal para SISO, se escogió entre las cuatro componentes que conforman la matriz del canal MIMO. El objetivo de esta suposición fue realizar la transmisión de SISO y de MIMO, bajo el mismo entorno.
- El canal SISO fue escogido considerando la componente que tuviera mayor aproximación al desempeño teórico de un sistema con modulación BPSK.

3.7.2.3 Escenario 6: BER de un Sistema SISO y un Sistema MIMO 2x2 con Canal Rayleigh y Codificación de Canal

Las Figuras 3-15 y 3-16 se generaron a partir de las condiciones anteriormente mencionadas para el análisis de la BER, creando aleatoriamente los datos a transmitir y variando la SNR hasta 15dB

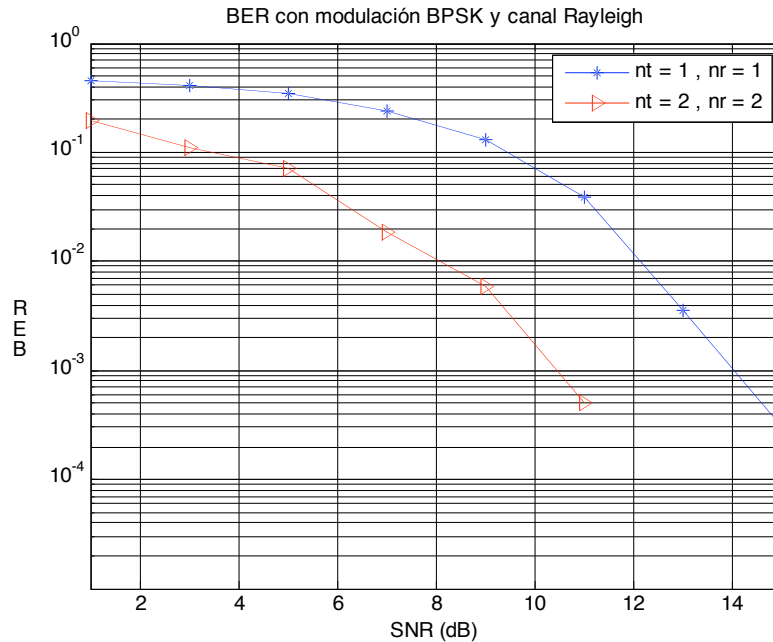


Figura 3-15. BER de un Sistema SISO y un Sistema MIMO 2x2 con Canal Rayleigh y Codificación de Canal

En la Figura 3-15 se observa que mientras SISO necesita 14dB de SNR para obtener una $BER=10^{-3}$, MIMO lo logra con una SNR=11dB para un canal *Rayleigh*.

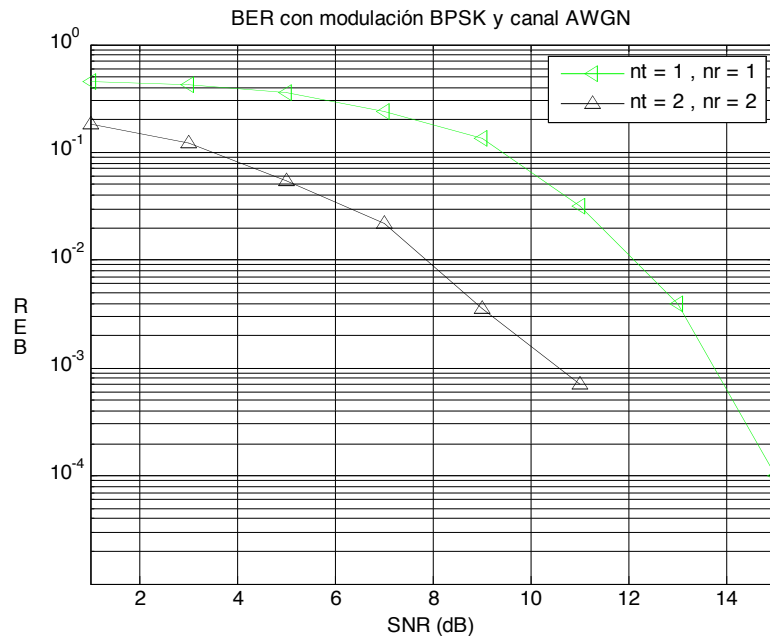


Figura 3-16. BER de un Sistema SISO y un Sistema MIMO 2x2 con Canal AWGN y Codificación de Canal

En la Figura 3-16 se muestran los resultados para un canal AWGN, donde se tiene que SISO necesita una SNR=12dB para tener una $BER=10^{-2}$, mientras MIMO requiere de una SNR=8dB para alcanzar esta misma tasa de errores.

Por lo tanto, los sistemas MIMO presentan un mejor desempeño manejando los mismos niveles de potencia de SISO, debido al incremento del número de antenas.

3.7.2.4 Escenario 7: BER de un Sistema SISO y un Sistema MIMO 2x2 con Canal Rayleigh sin Codificación de Canal

En el escenario 6 se analizaron los sistemas con codificación de canal para los modelos de canal seleccionados. A continuación en las Figuras 3-16 y 3-17 se presenta la BER de los sistemas sin codificación de canal en el entorno *Rayleigh* y AWGN.

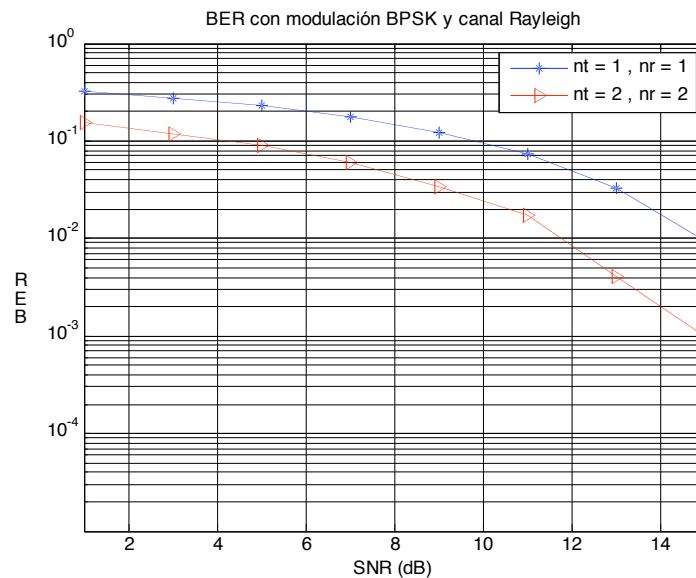


Figura 3-17. BER de un Sistema SISO y MIMO 2x2 sin Codificación de Canal y canal Rayleigh

En la Figura 3-17 se graficó la BER para los sistemas con un modelo de canal *Rayleigh*, donde se observa que SISO en 13dB de SNR tiene una BER=0.0326 y MIMO tiene una BER=0.0041.

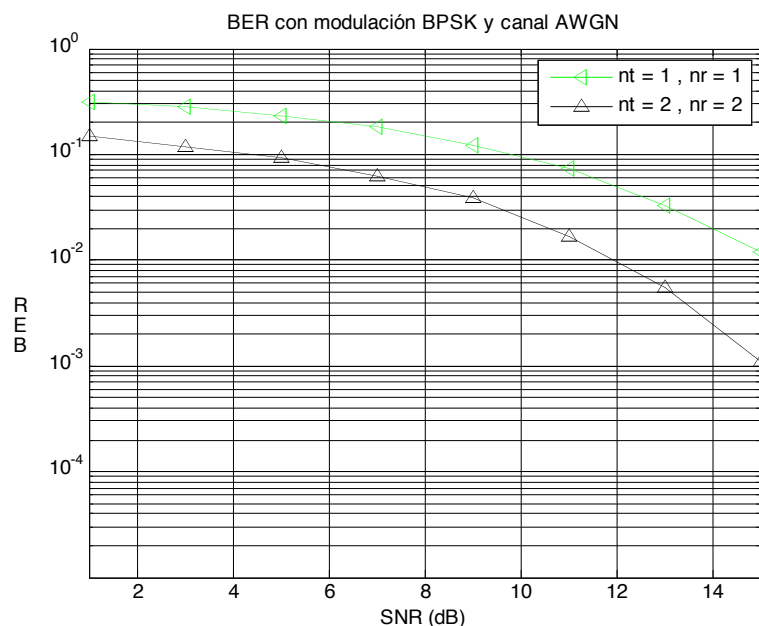


Figura 3-18. BER de un Sistema SISO y MIMO 2x2 sin Codificación de Canal y Canal AWGN

En la Figura 3-18 se observa que los sistemas con canal AWGN presentan un comportamiento similar al descrito para el canal *Rayleigh*, donde se concluye que en la ausencia de codificación de canal, la BER se comporta de manera similar para los dos modelos.

Por lo tanto los valores de la BER en un sistema sin codificación de canal son más grandes que un sistema que use codificación, es decir presentan un desempeño inferior, resultado previsto en los análisis realizados de los fundamentos teóricos.

Se concluye que un sistema de múltiples antenas mejora notablemente su desempeño con un código corrector de error combinado con un esquema espacio-temporal; el inconveniente que presenta es la complejidad computacional que esto requiere.

3.8 CONCLUSIONES DE LA SIMULACIÓN

La simulación en muchos casos, resulta la mejor estrategia de análisis de tecnologías emergentes en comunicaciones y en sistemas de ingeniería, porque permite recrear situaciones cercanas a la realidad, es así como los resultados obtenidos por la simulación propuesta en este trabajo de grado, determinan la capacidad y el desempeño en términos de la BER en los sistemas de comunicaciones inalámbricos al incrementar el número de antenas, en transmisión y en recepción.

Es importante mencionar las características más significativas referentes al proceso de simulación:

- Se ilustra de manera gráfica la capacidad de los sistemas respecto a la relación señal a ruido, obteniendo unos resultados que se asemejan a lo esperado matemáticamente bajo ciertas características.
- El comportamiento en la tasa de error de los sistemas MIMO está fuertemente ligado a las características del canal de radio bajo el cual se desea realizar la simulación.
- Los escenarios de simulación en el cual el canal se variaba de manera aleatoria, no produjeron ninguna mejora en la BER con codificación de canal, por lo tanto se estableció una estructura de canal fija con la cual se apreció la mejoría de la BER cuando se codifica el canal.
- La capacidad del canal para MIMO aumenta linealmente con el número de antenas, independientemente de las condiciones del canal de radio, aleatoriedad, iteraciones y modelo de canal; resultado obtenido en las Figuras 3-8 y 3-9, donde se aprecia de manera consistente lo mencionado anteriormente.
- Para realizar la comparación mediante la simulación de estos sistemas que presentan diferencias sustanciales, se emplearon las mismas parámetros en las funciones de los dos sistemas, lo que limitó el resultado de la simulación, haciendo necesario realizar aproximaciones y acotar características para adaptar las funciones disponibles en SISO a un entorno MIMO.
- Para tener conocimiento verdadero del canal y su impacto en los datos transmitidos se requiere implementar un estimador de canal en recepción para recuperar la información transmitida; aspecto necesario en los dos sistemas.
- Los valores de la tasa de error de bit son menores para los sistemas codificados comparados con los sistemas sin codificación.

4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La elevada capacidad asociada a los canales MIMO se debe a que ésta se incrementa de manera directamente proporcional al número de antenas transmisoras y receptoras; este incremento en la capacidad del canal permite la transmisión a gran velocidad de flujos de datos sin incurrir para ello en un incremento del ancho de banda utilizado y/o la potencia requerida [9]; se presentaron diferentes criterios sobre el canal de transmisión y los efectos de ruidos sobre la señal, además de abordar posibles soluciones que podrían ayudar a que MIMO se establezca como alternativa para mejorar la capacidad de transmisión y con esto conseguir incrementar la calidad de los enlaces inalámbricos.

4.1 CONCLUSIONES

- El canal de radio se puede modelar conceptualmente como un canal en el que la señal recibida varía de modo aleatorio para cada símbolo transmitido, por lo tanto su capacidad es también aleatoria y puede ser obtenida si se conoce la distribución que sigue el canal.
- Las diferencias más importantes entre un sistema SISO y un sistema MIMO, representado por su diagrama en bloques básico, se encuentra en el Codificador de Canal, Arreglo de Antenas y Canal de Radio.
- En un sistema MIMO se hace uso de una nueva dimensión, la espacial, sobre la cual se puede transportar información, lo que abre efectivamente la puerta a obtener velocidades de transferencia mayores que las actualmente disponibles, con una característica muy importante que es el bajo costo de implementación, comparado con la explotación de diversidad en tiempo o frecuencia, las cuales se pueden ver imposibilitadas debido a la necesidad de implementar aplicaciones sin retardo, o por la dificultad de usar una nueva frecuencia en la transmisión de una señal redundante debido a la limitación del espectro.
- Es necesario estudiar el nivel físico de los sistemas de comunicaciones inalámbricos, porque en ésta se encuentran los principales inconvenientes de éstos sistemas, lo que ha generado que los desarrollos obtenidos hasta el momento solo hayan sido ejecutados teóricamente bajo interpretaciones matemáticas, por lo tanto para abordar un estudio de este tipo se requiere de una sólida formación matemática con la cual se interpreten y analicen los resultados.

- Con los datos obtenidos en la simulación de la capacidad de SISO (1,1) contra SNR y la capacidad del canal MIMO (2,2) contra SNR, se puede afirmar que la capacidad del canal MIMO supera ampliamente la capacidad del canal SISO de manera independiente de la fdp (Función de densidad de probabilidad) que modele el canal, sea *Rayleigh* o AWGN, en este caso un factor de 2, comprobando que la capacidad del canal de radio crece de manera lineal con el aumento del número de antenas en transmisión y recepción, por lo cual se concluye que la capacidad del canal en MIMO teóricamente únicamente esta acotado por la imposibilidad física de realizar un arreglo de antenas ilimitado.
- La capacidad del canal MIMO se considera teóricamente como n canales SISO independientes, sin embargo, si se quiere determinar el desempeño de este sistema, no se puede manejar como varios canales en paralelo, ya que finalmente para obtener una mejoría en la BER, es necesario un esquema que combine los datos recibidos por las múltiples trayectorias.
- Los modelos probabilísticos son útiles para comparar técnicas diferentes sin necesidad de disponer de medidas reales de la respuesta del canal. Sin embargo, pueden representar una limitante, ya que el mismo modelo es aplicado a canales con características diferentes que producirían diferencias significativas, entre los datos obtenidos a través de la simulación y los datos obtenidos en la práctica.
- Con los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas no se puede asegurar que el desempeño de un sistema MIMO sea superior que el desempeño de un sistema SISO bajo cualquier condición, porque la falta de estimación del canal y la aleatoriedad en el comportamiento del canal, produjeron resultados que imposibilitan afirmar que MIMO tenga una tasa de error de bit menor que SISO. Sin embargo, con las condiciones establecidas en el capítulo tres se logra alcanzar las expectativas que se tenían con el estudio teórico.
- Para asegurar la confiabilidad de los datos recuperados, es necesario implementar un estimador de canal en el receptor, para garantizar conocimiento perfecto del canal y así satisfacer una condición necesaria para el funcionamiento del combinador usado en la codificación espacio temporal de *Alamouti*, lo que permite al receptor conocer y determinar el efecto que tiene el canal sobre los datos transmitidos, en la simulación realizada no se estimó el canal sino que el receptor tenía conocimiento del canal.
- Debido a su creciente desarrollo y poca implementación práctica no se cuenta con un modelo de canal de radio para un sistema MIMO, lo que obliga a realizar adaptaciones de los modelos de canal existentes, los cuales fueron desarrollados en circunstancias precisas y en muchos casos

mediante la aproximación realizada con la recolección de datos experimentales, dificultando su adaptación a un sistema MIMO.

- La simulación es una herramienta ideal para el estudio y verificación del comportamiento de los sistemas ante la imposibilidad de construirlos o adquirirlos. Además, permite estudiar los parámetros, propiedades y funcionamiento de los sistemas, de manera más sencilla y económica comparada con una implementación real y determinar la conveniencia de una tecnología para un fin en particular.
- Este trabajo de grado representa el primer acercamiento a esta prometedora técnica que usa múltiples antenas en transmisión y en recepción, con el cual se trata de corroborar la eficiencia de estos sistemas frente a los sistemas convencionales. Aumentar el número de antenas en transmisión requiere de un incremento en la capacidad de procesamiento de la señal, factor que es más fácil de asumir y manejar, en lugar de implementar cualquier otro método existente de diversidad para mejorar la respuesta del sistema ante el desvanecimiento.
- Con el desarrollo de este trabajo se obtuvieron fundamentos para determinar con claridad que los sistemas MIMO representan una propuesta realmente viable, para mejorar el desempeño de los sistemas, ya que incrementa la capacidad del canal.
- Mediante la realización de este trabajo de grado, se deja un aporte al plan de estudios del programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones que ayuda a consolidar el modelamiento y la simulación como herramientas complementarias y de acercamiento a nuevas tecnologías que no son factibles de analizar mediante herramientas hardware, debido a que aún no han sido implementadas o es muy costosa su adquisición.

4.2 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Debido a que este ha sido el primer acercamiento a los sistemas MIMO, se abre un amplio campo de acción porque quedan diversos aspectos por conocer frente a esta tecnología que genera cambios drásticos en el manejo del canal de radio

Para encontrar resultados más próximos a la realidad es importante realizar el proceso de simulación en diferentes ambientes y variar las características del sistema con el fin de determinar la estructura que permita obtener el mejor desempeño; especialmente en una tecnología como MIMO que actualmente se encuentra en desarrollo. Por ejemplo se pueden usar esquemas de modulación de alto orden y considerando el aumento en la complejidad computacional, evaluar la mejoría en el desempeño del sistema, considerar las variaciones

temporales del canal de radio incluyendo para esto el uso de MIMO con OFDM y finalmente experimentar con diferentes arreglos de antenas en ambos extremos para determinar su comportamiento.

En este tipo de proyectos es muy importante ceñirse a una metodología de simulación para sistemas de telecomunicaciones y adquirir una excelente base teórico-matemática del sistema a simular, para definir previamente los objetivos esperados y posteriormente realizar un análisis de los resultados obtenidos.

Respecto a la herramienta de simulación es necesario realizar una exploración continua, debido a que periódicamente se conocen nuevos resultados obtenidos en simulación, y realizar una excelente apropiación de la herramienta para extraer todo su potencial.

PROPUESTAS DE TRABAJOS FUTUROS

Desarrollar un estudio del canal de radio basándose en las características encontradas mediante medidas empíricas, para establecer el comportamiento de estos sistemas en un entorno real.

Realizar una comparación entre dispositivos conocidos como pre-N, los cuales se han liberado a pesar de no contar con la ratificación del estándar 802.11n, con dispositivos 802.11a/b/g, en un entorno *indoor*.

Realizar un estudio que permita la apropiación y desarrollo de las técnicas existentes para realizar estimación de canal tanto en SISO como en MIMO.

Realizar un estudio de los sistemas de comunicaciones con un modelo de canal aleatorio y la implementación de estimación de canal en receptor.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Multiantenna Wireless Communication Systems capitulo 1. Documento PDF. Disponible en: <http://infocom.uniroma1.it/~sergio/Introduction.pdf>
- [2] Capitulo 3 codificación. Disponible en: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4040051/docs_curso/capitulos/cap_iii/comunicacion_confiable.pdf
- [3] LIU, H. MA, H. EL ZARKI, M. et Al. Control schemes for networks: An overview. Artículo PDF. Disponible en: <http://mia.ece.uic.edu/~papers/Surveys/pdf00002.pdf>.
- [4] "Generalidades sobre los sistemas de radio comunicación digital". Documento PDF. Disponible en: <http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/profesores/jruiz/jairocd/texto/usmintroducc.pdf>
- [5] CAMPUZANO, A. VARELA, I. Reducción de la probabilidad de error en transmisión mediante la utilización de codificación convolucional y decodificación de Viterbi. Artículo PDF. Disponible en: <http://www.tecnun.es/Asignaturas/transdat/ficheros%5Cviterbi.pdf>
- [6] LARA, B. Codificación de Datos: Nuevas Tecnologías en Comunicaciones Móviles. En: I+E Revista Digital "Investigación y Educación. Número 10. Septiembre de 2004. Disponible en: <http://www.csi-csif.es/andalucia/modules/mod_sevilla/archivos/revistaense/n10/Datos.PDF>
- [7] ACEITÓN, R. Codificación de Canal en Tecnología GSM. Universidad Técnica Federico Santa María. Documento PDF. Noviembre 2005. Disponible en: <http://www.elo.utfsm.cl/~elo341/material/CodCanGSM.pdf>
- [8] BÖLCSKEI, H. AROGYASWAMI, P. Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Wireless Systems.
- [9] GONZALEZ LOPEZ, M. Técnicas Avanzadas de Procesado de Señal para Sistemas Multiple Input Multiple Output (MIMO). Tesis Doctoral, Departamento de Electrónica y Sistemas, Universidad de A Coruña. Febrero de 2004. Disponible en: <http://www.des.udc.es/~miguelgl/docs/tesis.pdf>
- [10] Propagación por caminos múltiples. Documento PDF. Disponible en: <http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/ftp/Radioenlaces/1514.PDF>

- [11] FEICK, RODOLFO. Modelado del Canal Inalámbrico: Resultados y Trabajo Futuro. Documento PDF. Junio 2005.
- [12] GESBERT, D. SHAFI, M. SHIU, D. SMITH, P. NAGUIB, A. From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems. IEEE Journal on selected areas in communications, VOL. 21, NO. 3, APRIL 2003.
<http://citeseer.ist.psu.edu/cache/papers/cs/27267/http:zSzzSzheim.ifi.uio.no/Sz~gesbertzSzpaperszSzJSACMIMOtutorial.pdf/gesbert03from.pdf>
- [13] KÜHN VOLKER. Wireless Communications over MIMO Channels: Applications to CDMA and Multiple Antenna Systems. Universidad de Rostock Alemania. 1 ed. Inglaterra. 2006.
- [14] GÓMEZ, C. GARCIA, L. HARO, L. Diseño e implementación de un demostrador MIMO para medidas de canal y pruebas de algoritmos. Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones. Universidad Politécnica de Madrid. Artículo PDF. Disponible en:
http://w3.iec.csic.es/ursi/articulos_gandia_2005/articulos/CMo4/436.pdf
- [15] Hoo-Jin Lee, Shailesh Patil, Raghu G. Raj, Fundamental overview and simulation of MIMO systems for Space-Time coding and Spatial Multiplexing. Artículo PDF. Disponible en:
http://www.ece.utexas.edu/~wireless/EE381K11_Spring03/projects/4.3.pdf
- [16] FREEMAN, R. Ingeniería de Sistemas de Telecomunicaciones. 1 ed. México D.F. 1995.
- [17] ALVARADO, RAUL. Códigos para detección y corrección de errores e comunicaciones digitales. Documento PDF. Disponible en:
http://www.ingenierias.uanl.mx/25/25_codigos.pdf
- [18] RAMIREZ, MARCO A. Codificación para Control de Error y Turbo Códigos. Documento PDF. Disponible en:
<http://capcom.uniandes.edu.co/docs/tcodigos.pdf>
- [19] Conceptos generales sobre codificación. Disponible en:
<http://www.isa.cie.uva.es/proyectos/codec/marco1.html>
- [20] CASTILLO, E. Principios generales de redes de telecomunicaciones. Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca. Popayán. 2001.
- [21] Nuevas tecnologías radio. Documento PDF. P. 184-190. Disponible en:
http://www.telefonica.es/sociedaddeinformacion/pdf/publicaciones/movilidad/capitulo_10.pdf

- [22] HONG, MEI. Analysis of the Bit Error Rate of Trellis-coded Modulation. Communication Systems Group, Department of Signals and Systems, School of Electrical Engineering CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg Sweden December 2002.
http://db.s2.chalmers.se/download/masters/master_EX043_2002.pdf
- [23] GREGORIO, F. Space Time Coding For MIMO Systems. Signal Processing Laboratory, Helsinki University of Technology. Disponible en:
http://www.comlab.hut.fi/opetus/333/2004_2005_slides/space_time_codes_text.pdf
- [24] PASCUAL, A. LAGUNAS, M. Avances en Técnicas de Codificación Espacio-Temporal en Sistemas de Comunicaciones Móviles. Artículo PDF. Disponible en:
http://gps-tsc.upc.es/array/res/img/Image/publicacions/conferences/2002/pascual_ursi_2002.pdf?PHPSESSID=1ed7b6a9d5d8295729f9cd41384563db
- [25] VCELAK, J. JAVORNIK, T. SYKORA, J. et Al. Multiple-Input Multiple-Output Wireless Systems. Artículo PDF. Disponible en:
http://radio.feld.cvut.cz/~sykora/publications/papers/Vcelak-Javornik-Sykora-Kandus-Plevel_2003-EIRev.pdf
- [26] NAGUIB, A. TAROKH, V. SESHADRI, N. et Al. Space-Time Codes for High Data Rate Wireless Communication. Documento PDF. Disponible en:
<http://www.dia.unisa.it/isit2000/tutorials/spacetime.pdf>
- [27] INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE MÚLTIPLES ANTENAS. Temas Avanzados en Comunicaciones, Universidad Autónoma de Madrid. Documento PDF. Disponible en:
http://www.ii.uam.es/~tac/Tema_V_Introduccion_Sistemas_Multiples_Antenas_ver0.pdf
- [28] TAROKH, V. SESHADRI, N. CALDERBANK. et Al. Space-Time Codes for High Data Rate Wireless Communication: Performance Criterion and Code Construction. IEEE transactions on information theory, VOL. 44, NO. 2, pp 744-765, Marzo 1998. Documento PDF. Disponible en:
<http://www.stanford.edu/class/ee492m/Papers/paper4.pdf>
- [29] SANDHU, S. NABAR, R. GORE, D. et Al. Introduction to Space-Time Codes. Documento PDF. Disponible en:
<http://www.stanford.edu/group/sarg/sandhu062503.pdf>
- [30] LUNDHEIM, L. On Shannon and "Shannon's formula". Department of Telecommunication, Norwegian University of Science and Technology (NTNU). Documento PDF. Disponible en:
<http://www.iet.ntnu.no/projects/beats/Documents/LarsTelektronikk02.pdf>

- [31] Wireless Industry Leaders Promote Next-Generation Wi-Fi Technology to Accelerate IEEE Standards Development. Disponible en: <http://www.enhancedwirelessconsortium.org/news/>
- [32] Superior 802.11n performance. Disponible en: <http://www.dlink.com/press/pr/?prid=363>
- [33] HEN, I. MIMO Architecture for Wireless Communications. Mobility Group, Intel Corporation. Intel Technology Journal, Vol. 10, No. 2. Mayo 15. 2006. Artículo PDF. Disponible en: http://download.intel.com/technology/itj/2006/volume10issue02/vol10_art07.pdf
- [34] LAGUNAS, MIGUEL A. Capitulo I: Introducción. Documento PDF. Disponible en: http://www.cttc.es/docs/undergraduate/mimo1_introduccion.pdf
- [35] FOSCHINI, G. GANS, M. On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas. Disponible en: <http://citeseer.ist.psu.edu/cache/papers/cs/17186/http:zSzzSzwww.bell-labs.comzSzprojectzSzblastzSzwpc-v6n3.pdf/foschini98limit.pdf>
- [36] UNGERBOECK, GOTTFRIED. Channel Coding with Multilevel/Phase Signals. IEEE Transactions on information theory, VOL. IT-28, NO. 1, Enero 1982.
- [37] GALVIS, A. HINCAPIÉ, R. GÓMEZ, C. Modelos de canal inalámbricos y su aplicación al diseño de redes WiMAX. Grupo de Investigación, Desarrollo y Aplicación en Telecomunicaciones e Informática (GIDATI). Universidad Pontificia Bolivariana – Medellín. Artículo PDF. Disponible en: http://dspace.icesi.edu.co/dspace/bitstream/item/1006/1/modelos_canal_inalambrico_wimax.PDF
- [38] BECERRA, José Luis. ¿Está en MIMO el futuro inalámbrico?. Disponible En: <http://www.red.com.mx/index.php?gadget=StaticPage&action=Page&id=9>
- [39] C. Muñoz, J. Muñoz. Metodología para la Simulación de Equipos de Telecomunicaciones. Proyecto de Grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca. Popayán, 1995.
- [40] Ruteador de Banda Ancha Wireless-N Establezca una Red inalámbrica con un Alcance 4 Veces Superior y una Velocidad 12 Veces Superior. Disponible en: http://www-es.linksys.com/servlet/Satellite?c=L_Product_C2&childpagename=ES%2FLayout&cid=1145389298994&packedargs=site%3DES&pagename=Linksys%2FCommon%2FVisitorWrapper

[41] WIRELESS INDUSTRY Leaders Promote Next-Generation Wi-Fi Technology to Accelerate IEEE Standards Development. Disponible en: <http://www.enhancedwirelessconsortium.org/news/>

[42] TAMARA RODRIGUES, ANDRICH. Proposta de Esquemas ARQ híbrido usando Códigos Turbo para os Canais SISO e MIMO. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Universidade tecnológica federal do Paraná. Curitiba, 20 de dezembro de 2006. Disponible en: http://www2.cpgei.cefetpr.br/diss_teses/Ano_2006/dissertacoes/Proposta_de_Novos_Esquemas_de_ARQ_Hibrido_Usando_Codigos_Turbo_para_os_Canais_SISO_e_MIMO.pdf

[43] CANO PLEITE, ALFONSO. Técnicas de máxima diversidad con modulaciones diferenciales sobre canales inalámbricos con desvanecimientos. tesis doctoral. departamento de teoría de la señal y comunicaciones. universidad carlos III de madrid. Leganés, Abril. 2006. Documento PDF. Disponible en: http://www.tsc.urjc.es/personal/alfonso/publicaciones/PhD_Thesis.pdf

[44] MATLAB:Communications Toolbox 3 User's Guide. Documento PDF.

[45] TUTORIAL DE LABVIEW. Disponible en: <http://www.esi2.us.es/~jdedios/asignaturas/LCPCP1.pdf>

[46] LabVIEW. Página disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/LabVIEW>

[47] NI LabVIEW: 20 Years of Innovation. Página disponible en: <http://www.ni.com/labview/>

[48] HERNÁNDEZ CUESTA, ALFONSO. Efectos del ruido en las comunicaciones electrónicas. Abril. 2001. Documento PDF. Disponible en: <http://kim.ece.buap.mx/comunikece/archivos/ruido.pdf>

[49] GUTIÉRREZ, C. SÁNCHEZ, J. GUTIÉRREZ, L. et Al. Diversidad Espacial y Entrelazado de Bit en Comunicaciones Móviles Multitasa con Desvanecimientos de Plazo Corto. Artículo PDF. Disponible en: http://usuario.cicese.mx/~jasan/art_rocc03_cadrian.pdf

[50] Vector propio y valor propio. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/autovalor>

[51] JAFARKHANI, HAMID. SPACE-TIME CODING THEORY AND PRACTICE. University of California, Irving. 1 ed. Cambridge University Press. The United States of America, New York. 2005.

[52] BIGLIERI, E. PROAKIS, J. SHAMAI, S. Fading Channels: Information-Theoretic and Communications Aspects. IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY, VOL. 44, NO. 6, OCTOBER 1998.