

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS ESQUEMAS DE MULTIPLEXACIÓN
ESPACIAL V-BLAST, H-BLAST Y D-BLAST, EN UN SISTEMA MIMO**



**ÁLVARO RAÚL IZQUIERDO MERA
ALEX SEBASTIÁN GUZMÁN MUÑOZ**

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones GNTT
Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones
Popayán
2011**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS ESQUEMAS DE MULTIPLEXACIÓN
ESPACIAL V-BLAST, H-BLAST Y D-BLAST, EN UN SISTEMA MIMO**



**ÁLVARO RAÚL IZQUIERDO MERA
ALEX SEBASTIÁN GUZMÁN MUÑOZ**

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

**Directora:
Ing. Claudia Milena Hernández Bonilla**

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones GNTT
Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones
Popayán
2011**



CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. MOTIVACIONES DEL TRABAJO DE GRADO	2
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO	3
2. GENERALIDADES	4
2.1 MODELO GENERAL DE UN SISTEMA MIMO	4
2.2 DIAGRAMA EN BLOQUES GENERAL DE UN SISTEMA MIMO	6
2.2.1 Sistema Transmisor	7
2.2.2 Sistema Receptor.....	7
2.3 SISTEMA MIMO PUNTO A PUNTO 2X2.....	8
2.4 SISTEMA MIMO PUNTO A PUNTO 4X4.....	9
2.5 ESQUEMAS DE FUNCIONAMIENTO	10
2.5.1 Multiplexación Espacial	10
2.6 ALGORITMO ESFÉRICO	11
2.6.1 Detector Esférico.....	12
2.7 CANALES DE COMUNICACIÓN	14
2.7.1 Canal de comunicación AWGN.....	14
2.7.2 Canal de comunicación Rayleigh	15
2.8 MODULACIÓN QAM	19
2.8.1 Modulación 16-QAM.....	19
2.9 ARQUITECTURAS BLAST	21
2.9.1 Arquitectura V-BLAST	21
2.9.2 Arquitectura H-BLAST.....	23
2.9.3 Arquitectura D-BLAST.....	24
2.9.4 Sistema Receptor.....	26



3. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO	27
3.1 PROCESO DE DESARROLLO DE UNA SIMULACIÓN	27
3.2 FASE 1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA	28
3.3 FASE 2 ANÁLISIS	28
3.4 FASE 3 FORMULACIÓN DEL MODELO.....	29
3.4.1 Diagrama en bloques de las arquitecturas BLAST	29
3.4.2 Diagramas de Flujo	31
3.5 FASE 4 SELECCIÓN DEL LENGUAJE	35
3.6 FASE 5 CODIFICACIÓN DEL MODELO	35
3.7 FASE 6 VALIDACIÓN.....	43
3.8 FASE 7 EXPERIMENTACIÓN	43
3.9 FASE 8 IMPLANTACIÓN.....	43
3.10 FASE 9 MONITOREO Y CONTROL.....	43
4. VALIDACIÓN DE RESULTADOS	44
4.1 PRIMERA VALIDACIÓN.....	44
4.2 SEGUNDA VALIDACIÓN	47
4.3 TERCERA VALIDACIÓN	49
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	52
5.1 RESULTADOS OBTENIDOS.....	52
5.1.1 Escenario 1	52
5.1.2 Escenario 2	56
5.1.3 Escenario 3	60
5.1.4 Escenario 4	64
5.1.5 Tiempo de transmisión	68
6. CONCLUSIONES	70
REFERENCIAS	73



LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1. Comparación de desempeño arquitectura V-BLAST, 2x2.....	46
Tabla 4.2. Comparación de desempeño arquitectura V-BLAST, 3x3.....	49
Tabla 4.3. Comparación de desempeño arquitectura V-BLAST, 4x4, 16-QAM, AWGN.....	50
Tabla 5.1. BER para diferentes valores de SNR (Escenario 1).....	54
Tabla 5.2. SNR para diferentes valores de BER (Escenario 1).....	54
Tabla 5.3. BER para diferentes valores de SNR (Escenario 2).....	58
Tabla 5.4. SNR para diferentes valores de BER (Escenario 2).....	58
Tabla 5.5. BER para diferentes valores de SNR (Escenario 3).....	62
Tabla 5.6. SNR para diferentes valores de BER (Escenario 3).....	62
Tabla 5.7. BER para diferentes valores de SNR (Escenario 4).....	66
Tabla 5.8. SNR para diferentes valores de BER (Escenario 4).....	66
Tabla 5.9. Tiempos de transmisión en sistemas MIMO 2x2 y 4x4	69



LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Sistema general MIMO	5
Figura 2.2.	Trayectos en sistema MIMO	6
Figura 2.3.	Sistema Transmisor	6
Figura 2.4.	Sistema Receptor	7
Figura 2.5.	Sistema MIMO 2x2	8
Figura 2.6.	Sistema MIMO 4x4	9
Figura 2.7.	Proceso de multiplexación espacial	11
Figura 2.8.	Representación geométrica del algoritmo de detección esférico	11
Figura 2.9.	Multitrayectorias de la señal transmitida	16
Figura 2.10.	Representación geométrica de las variables W_1 y W_2	16
Figura 2.11.	Diagrama constelación 16-QAM y bits asignados.....	20
Figura 2.12.	Transmisor V-BLAST	16
Figura 2.13.	Matriz de Señales V-BLAST	16
Figura 2.14.	Receptor V-BLAST	16
Figura 2.15.	Transmisor H-BLAST	23
Figura 2.16.	Matriz de señales H-BLAST.....	24
Figura 2.17.	Receptor H-BLAST	16
Figura 2.18.	Transmisor D-BLAST	16
Figura 2.19.	Receptor D-BLAST	25
Figura 2.20.	Matriz de señales D-BLAST.....	26
Figura 3.1.	Desarrollo del modelo de simulación	27
Figura 3.2.	Diagrama de Bloques Transmisor – Receptor V-BLAST	30
Figura 3.3.	Diagrama de Bloques-Transmisor - Receptor H-BLAST.....	31
Figura 3.4.	Diagrama de Bloques-Transmisor - Receptor D-BLAST.....	31
Figura 3.5.	Diagrama de Flujo V-BLAST.....	32
Figura 3.6.	Diagrama de Flujo H-BLAST.....	33
Figura 3.7.	Diagrama de Flujo D-BLAST.....	34
Figura 4.1.	Desempeño detector ML, SD con radio inicial fijo y SD modificado..	45
Figura 4.2.	Desempeño arquitectura V-BLAST, 2X2, 16-QAM, AWGN.....	46
Figura 4.3.	Desempeño arquitectura V-BLAST, 3X3, 16-QAM, MLD, V- BLAST, ZF, SD	47
Figura 4.4.	Desempeño arquitectura V-BLAST, 3x3, 16-QAM, AWGN.....	48
Figura 4.5.	Desempeño arquitectura V-BLAST, 4x4, 16-QAM, AWGN, ML, SD, MMSE, ZF.....	49
Figura 4.6.	Desempeño arquitectura V-BLAST, 4x4, 16-QAM, AWGN.....	50
Figura 5.1.	Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el escenario 1	53



Figura 5.2. Acercamiento de la Figura 5.1	53
Figura 5.3. Tiempos de simulación para el escenario 1	55
Figura 5.4. Acercamiento Figura 5.3.....	56
Figura 5.5. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el escenario 2	57
Figura 5.6. Acercamiento Figura 5.5.....	57
Figura 5.7. Tiempo de simulación para el escenario 2.....	59
Figura 5.8. Acercamiento Figura 5.7.....	60
Figura 5.9. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el escenario 3	61
Figura 5.10. Acercamiento Figura 5.9.....	61
Figura 5.11. Tiempo de simulación para el escenario 3.....	63
Figura 5.12. Acercamiento Figura 5.11	64
Figura 5.13. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el escenario 4	65
Figura 5.14. Acercamiento Figura 5.13	65
Figura 5.15. Tiempo de simulación para el escenario 4.....	67
Figura 5.16. Acercamiento figura 5.15	67
Figura 5.17. Tiempo de transmisión.....	68



LISTA DE ABREVIATURAS

- AWGN:** “*Additive White Gaussian Noise*”, Ruido Blanco Aditivo Gausiano.
- BER:** “*Bit Error Rate*”, Tasa de Error de Bit.
- BLAST:** “*Bell Labs Layered Space-Time*”, Codificación Espacio Temporal por Capas de Laboratorios Bell.
- D-BLAST:** “*Diagonal Bell Labs Layered Space-Time*”, Codificación Diagonal Espacio Temporal por Capas de Laboratorios Bell.
- H-BLAST:** “*Horizontal Bell Labs Layered Space-Time*”, Codificación Horizontal Espacio Temporal por Capas de Laboratorios Bell.
- MIMO:** “*Multiple-Input Multiple-Output*”, Múltiple Entrada, Múltiple Salida,
- QAM:** “*Quadrature Amplitude Modulation*”, Modulación por Amplitud en Cuadratura.
- 16-QAM:** “*Quadrature Amplitude Modulation of 16 States*”, Modulación por Amplitud en Cuadratura de 16 Estados.
- SISO:** “*Single-Input Single-Output*”, Entrada Única, Salida Única.
- SNR:** “*Signal to Noise Ratio*”, Relación Señal a Ruido.
- V-BLAST:** “*Vertical – Bell Labs Layered Space-Time*”, Codificación Vertical Espacio Temporal por Capas de Laboratorios Bell.



1. INTRODUCCIÓN

Las últimas generaciones de sistemas inalámbricos han enfocado sus esfuerzos en brindar servicios de manera eficiente en cuanto a calidad, velocidad de transmisión de datos, capacidad, cobertura y fiabilidad, de manera comparable a las capacidades de las redes cableadas. En esta búsqueda surgen tecnologías que permiten alcanzar estos objetivos, una de ellas es la de Múltiples Entradas, Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*), un sistema que emplea múltiples antenas en transmisión y en recepción, que toma ventaja del desvanecimiento con el fin de aumentar la capacidad de los sistemas de comunicación inalámbricos, como también la reducción de la Tasa de Bit Erróneos (BER, *Bit Error Rate*).

En los sistemas MIMO las altas velocidades de transmisión de datos se logran utilizando la técnica de multiplexación espacial o esquema de Codificación Espacio Temporal por Capas de Laboratorios Bell (BLAST, *Bell Labs Layered Space-Time*), propuesta por Gerard J. Foschini y desarrollada en conjunto con Laboratorios Bell [1], la cual consiste en la demultiplexación de los datos de entrada en el transmisor en N flujos de datos, que se transmiten de forma independiente por cada antena en la misma frecuencia, incrementando la cantidad de datos transmitidos por unidad de tiempo, lo que la convierte en una buena opción para sistemas que requieren altas velocidades de transmisión de datos, pero que a su vez exige una relación señal a ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*) relativamente alta.



1.1. MOTIVACIONES DEL TRABAJO DE GRADO

En las últimas décadas, la tecnología MIMO en sistemas de comunicación inalámbricos, han surgido como uno de los avances tecnológicos más significativos en las comunicaciones modernas.

Muchos desarrolladores centran sus esfuerzos en la búsqueda de nuevos mecanismos, que permitan satisfacer las exigencias de los usuarios de los sistemas de comunicaciones inalámbricos, empleando para ello sistemas MIMO, los cuales haciendo uso de la multiplexación espacial, permiten transmitir y recibir más información, dado que las diferentes antenas proporcionan distintos canales de propagación usados en paralelo, aumentando la velocidad de transmisión del sistema.

Por lo tanto, se hace necesario analizar el desempeño de los sistemas MIMO que utilizan las arquitecturas de multiplexación espacial BLAST, por medio de simulación, permitiendo la variación de parámetros, con el fin de realizar nuevos estudios y mejoras del mismo. En la actualidad son limitadas las simulaciones o herramientas, que permiten determinar cuál esquema de multiplexación espacial brinda el mejor desempeño a nivel físico en un sistema MIMO, justificando de esta manera el desarrollo del presente trabajo de grado.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Analizar comparativamente el funcionamiento y desempeño a nivel físico de los esquemas de multiplexación espacial V-BLAST, H-BLAST, D-BLAST, en un sistema MIMO punto a punto 2x2 y 4x4.

1.2.2. Objetivos específicos

- Aplicar y adaptar una metodología para obtener el modelo de simulación de los esquemas de multiplexación espacial V-BLAST, H-BLAST y D-BLAST, en un sistema MIMO punto a punto 2x2 y 4x4.



- Simular los esquemas de multiplexación espacial V-BLAST, H-BLAST y D-BLAST a nivel físico, en un sistema MIMO punto a punto 2x2 y 4x4, modulación 16-QAM, algoritmo de detección esférico y modelos de canal Rayleigh y AWGN.
- Evaluar el desempeño de los esquemas de multiplexación espacial V-BLAST, H-BLAST y D-BLAST, empleados en un sistema MIMO punto a punto 2x2 y 4x4.

1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO

En el capítulo 2, se describen los aspectos generales de los sistemas MIMO y las arquitecturas de multiplexación espacial BLAST, se estudia su topología y se analizan sus características como el algoritmo de detección, además de estudiar los modelos de canal y modulación digital.

En el capítulo 3, se muestra la aplicación de la metodología, donde se analizan aspectos como la definición del sistema y formulación del modelo, presentando los diagramas en bloque y el flujo de los procesos desarrollados, además de la selección de la herramienta de simulación y la validación de los resultados.

En el capítulo 4, se desarrolla la validación y la verificación de resultados, con el propósito de realizar comparaciones con trabajos similares realizados a nivel local y mundial.

En el capítulo 5, se analiza el desempeño a nivel físico en cada uno de los escenarios de simulación del sistema MIMO con los diferentes esquemas de multiplexación espacial BLAST.

Por último, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones y trabajos futuros.



2. GENERALIDADES

En este capítulo se explica el funcionamiento de los sistemas MIMO y las arquitecturas de multiplexación espacial, tratando aspectos como su topología, funcionamiento y algoritmos de detección.

La comunicación mediante sistemas MIMO surge como uno de los avances tecnológicos más significativos en las comunicaciones modernas. Esta tecnología ocupa un lugar destacado en la lista de los últimos avances para sistemas de comunicaciones inalámbricos, con la posibilidad de resolver el problema de la capacidad de tráfico de datos en las futuras redes inalámbricas.

La idea detrás de los sistemas MIMO, es que las señales transmitidas se combinen de tal manera que la calidad o la velocidad de transmisión de datos mejore, esto se consigue gracias a que los sistemas MIMO tienen la capacidad de aprovechar la propagación multitrayecto que sufre la señal en el canal, lo que tradicionalmente es un problema en los sistemas de Única Entrada, Única Salida (SISO, *Single Input Single Output*) [2].

2.1 MODELO GENERAL DE UN SISTEMA MIMO

La figura 2.1 muestra un sistema MIMO conformado por N_T antenas transmisoras y N_R antenas receptoras, representado por la ecuación 2.1.

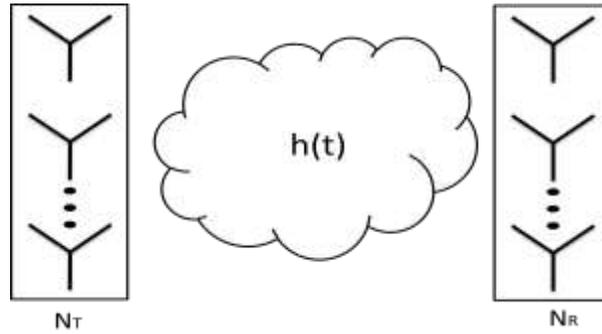


Figura 2.1. Sistema general MIMO

$$y(t)_i = \sum_{j=1}^{N_T} h(t)_{i,j} * s(t)_j + n(t)_i \quad (2.1)$$

donde $n(t)_i$ representa el ruido aditivo, el elemento $h(t)_{i,j}$ representa la función de transferencia compleja entre la antena transmisora j y la antena receptora i , es decir los diferentes trayectos que toman las señales desde las antenas transmisoras hacia las antenas receptoras, tal como se muestra en la figura 2.2, $s(t)_j$ es la señal transmitida, $y(t)_i$ es la señal recibida, teniendo en cuenta que el sistema es invariante en el tiempo, que $s \in \mathbb{C}^{N_T}$, $y \in \mathbb{C}^{N_R}$ y definiendo la matriz de transferencia H , indicada con la ecuación 2.2, se obtiene la ecuación 2.3 [3], [4].

$$H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \cdots & h_{1,N_T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R,1} & \cdots & h_{N_R,N_T} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$y = Hs + n \quad (2.3)$$

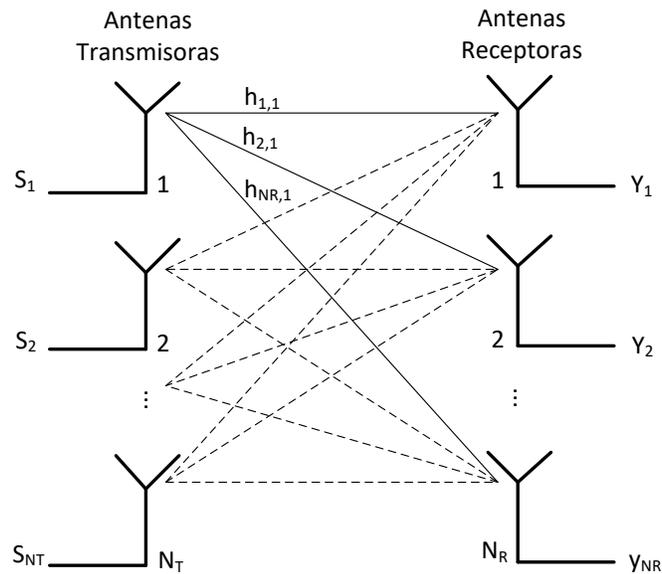


Figura 2.2. Trayectos en sistema MIMO

2.2 DIAGRAMA EN BLOQUES GENERAL DE UN SISTEMA MIMO

Las figuras 2.3 y 2.4 describen el transmisor y receptor de un sistema con múltiples antenas transmisoras y receptoras.

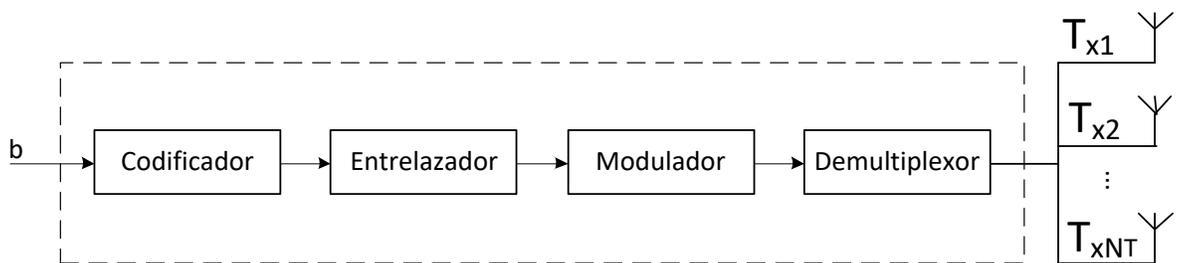


Figura 2.3. Sistema Transmisor

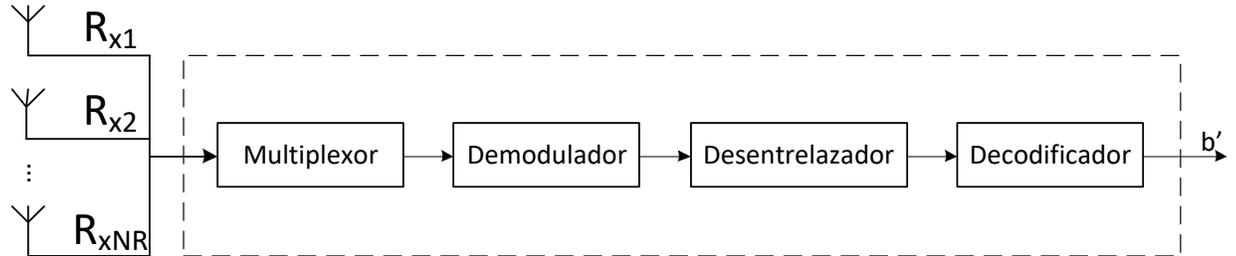


Figura 2.4. Sistema Receptor

2.2.1 Sistema Transmisor

En este sistema los datos inicialmente son codificados, entrelazados y modulados, luego son demultiplexados en N_T antenas transmisoras para ser transmitidos.

Codificador: agrega redundancia a la secuencia de información binaria, con esto se busca que el receptor sea capaz de superar los efectos causados por el ruido y las interferencias, detectando y corrigiendo errores que puedan encontrarse en la transmisión.

Entrelazador: se utiliza para proteger la transmisión contra errores en ráfaga producidos por desvanecimientos profundos en el canal.

Modulador: adapta la información digital para ser transmitida, esta consisten en la modulación de una onda portadora mediante una señal digital moduladora [5].

Demultiplexor: convierte la distribución de la secuencia de información de serial a paralela.

2.2.2 Sistema Receptor

Inicialmente las señales recibidas son multiplexadas. Los datos resultantes del proceso de multiplexación son demodulados, desentrelazados y decodificados. Así, los datos transmitidos por las N_T antenas transmisoras son recuperados en el receptor.

Multiplexor: convierte la secuencia de información de paralela a serial.

Demodulador: recupera la información contenida en la señal recibida.



Desentrelazador: deshace el efecto del entrelazador, ubica los datos en la secuencia correcta y la pasa al decodificador.

Decodificador: detecta y corrige errores, convirtiendo los datos recibidos de la transmisión a su forma original.

2.3 SISTEMA MIMO PUNTO A PUNTO 2X2

Un sistema MIMO 2x2 está conformado por 2 antenas en transmisión y 2 antenas en recepción como se observa en la figura 2.5.

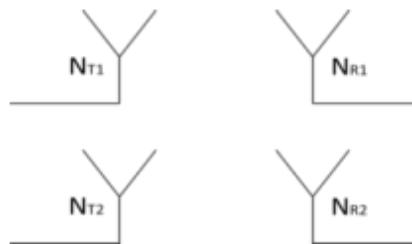


Figura 2.5. Sistema MIMO 2x2

La expresión matemática de la ecuación 2.3 para este sistema, teniendo en cuenta los vectores de la ecuación 2.4, se resuelve como lo indican las ecuaciones 2.5, 2.6 y 2.7, donde y_1 (2.7.a) y y_2 (2.7.b) son los vectores que contienen los valores recibidos por cada una de las antenas receptoras.

$$s = [s_1, s_2] \quad y = [y_1, y_2] \quad n = [n_1, n_2] \quad (2.4)$$

donde s es el vector de los símbolos transmitidos y n es el vector del ruido del canal.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1}s_1 + h_{1,2}s_2 + n_1 \\ h_{2,1}s_1 + h_{2,2}s_2 + n_2 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$y_1 = h_{1,1}s_1 + h_{1,2}s_2 + n_1 \quad (2.7.a)$$



$$y_2 = h_{2,1}s_1 + h_{2,2}s_2 + n_2 \quad (2.7.b)$$

2.4 SISTEMA MIMO PUNTO A PUNTO 4X4

Un sistema MIMO 4x4 está conformado por 4 antenas en transmisión y 4 antenas en recepción como se presenta en la figura 2.6.

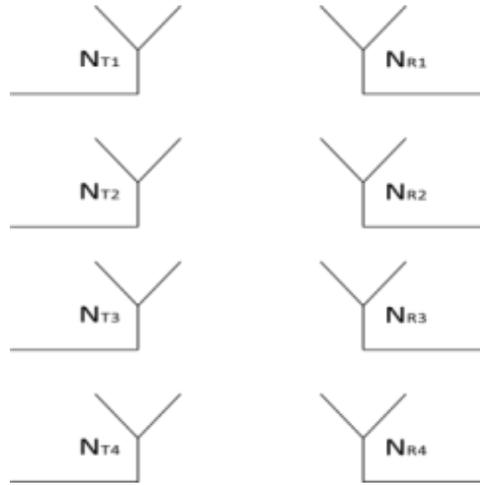


Figura 2.6. Sistema MIMO 4x4

La expresión matemática de la ecuación 2.3 para este sistema, teniendo en cuenta los vectores de la ecuación 2.8, se resuelve como lo indican las ecuaciones 2.9, 2.10, 2.11, donde y_1 (2.11.a), y_2 (2.11.b), y_3 (2.11.c) y y_4 (2.11.d), son los vectores que contienen los valores recibidos por las antenas receptoras.

$$s = [s_1, s_2, s_3, s_4] \quad y = [y_1, y_2, y_3, y_4] \quad n = [n_1, n_2, n_3, n_4], \quad (2.8)$$

donde s es el vector de los símbolos transmitidos y n es el vector de ruido del canal.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & h_{1,3} & h_{1,4} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & h_{2,3} & h_{2,4} \\ h_{3,1} & h_{3,2} & h_{3,3} & h_{3,4} \\ h_{4,1} & h_{4,2} & h_{4,3} & h_{4,4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ n_4 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$



$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1}s_1 + h_{1,2}s_2 + h_{1,3}s_3 + h_{1,4}s_4 + n_1 \\ h_{2,1}s_1 + h_{2,2}s_2 + h_{2,3}s_3 + h_{2,4}s_4 + n_2 \\ h_{3,1}s_1 + h_{3,2}s_2 + h_{3,3}s_3 + h_{3,4}s_4 + n_3 \\ h_{4,1}s_1 + h_{4,2}s_2 + h_{4,3}s_3 + h_{4,4}s_4 + n_4 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$y_1 = h_{1,1}s_1 + h_{1,2}s_2 + h_{1,3}s_3 + h_{1,4}s_4 + n_1 \quad (2.11.a)$$

$$y_2 = h_{2,1}s_1 + h_{2,2}s_2 + h_{2,3}s_3 + h_{2,4}s_4 + n_2 \quad (2.11.b)$$

$$y_3 = h_{3,1}s_1 + h_{3,2}s_2 + h_{3,3}s_3 + h_{3,4}s_4 + n_3 \quad (2.11.c)$$

$$y_4 = h_{4,1}s_1 + h_{4,2}s_2 + h_{4,3}s_3 + h_{4,4}s_4 + n_4 \quad (2.11.d)$$

2.5 ESQUEMAS DE FUNCIONAMIENTO

Los sistemas MIMO utilizan dos mecanismos para mejorar el funcionamiento de los sistemas inalámbricos:

- Diversidad Espacial o Diversidad de Antena: En este mecanismo la misma información se transmite por todas las antenas, y por lo tanto se utiliza para mejorar la calidad de la señal recibida.
- Multiplexación Espacial: Este mecanismo divide el flujo de datos entre las antenas disponibles en transmisión, incrementando la capacidad de los sistemas inalámbricos; por división del canal MIMO en canales paralelos [6].

Este trabajo de grado se enfoca en el análisis comparativo de los esquemas de multiplexación espacial.

2.5.1 Multiplexación Espacial

El mecanismo de multiplexación espacial se basa en aprovechar el arreglo de antenas en el transmisor, de tal manera que no se envíe la misma información por todas las antenas, sino que los datos sean demultiplexados para su envío por el canal. La multiplexación espacial permite transmitir y recibir más información dado que las diferentes antenas proporcionan distintos canales de propagación usados en paralelo [7], [8].

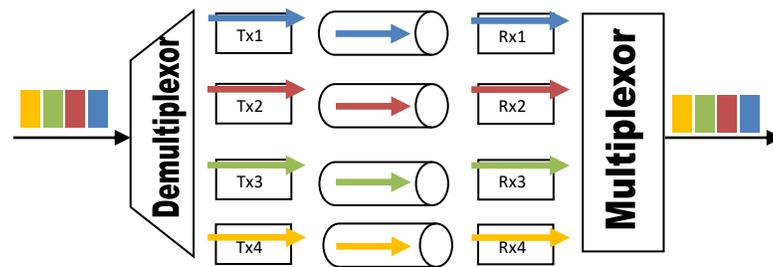


Figura 2.7. Proceso de multiplexación espacial

2.6 ALGORITMO ESFÉRICO

Es el algoritmo de detección básico que permite disminuir la complejidad computacional del sistema receptor, manteniendo un buen desempeño. El fin del algoritmo de detección esférico, es encontrar la distancia más corta entre las posibles soluciones y la señal recibida, dentro del radio de una esfera. En un problema de dos dimensiones, representado por la figura 2.8, se puede restringir la búsqueda dibujando un círculo alrededor de la señal recibida lo suficiente para incluir un punto de posible solución, descartando todos los puntos fuera del círculo, con el fin de reducir la complejidad en la búsqueda para encontrar la solución de la señal recibida [8].

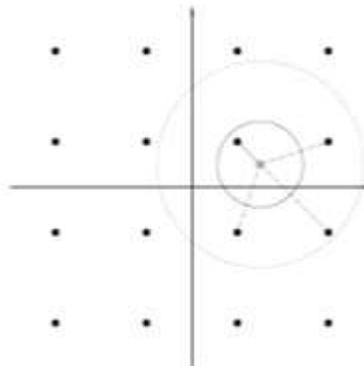


Figura 2.8. Representación geométrica del algoritmo de detección esférico



2.6.1 Detector Esférico

La relación entrada-salida en un sistema MIMO está dada por la ecuación 2.3. La señal que se transmite es una señal compleja ($s = [s_1, s_2, \dots, s_M]^T, \in \mathbb{C}^M$) donde las partes reales e imaginarias pertenecen a un conjunto discreto \mathcal{A} . El conjunto discreto \mathcal{A} , a partir del cual se escogen los s símbolos a transmitir, es finito ($|\mathcal{A}|=L$), y en el campo de las telecomunicaciones es conocido como constelación o alfabeto de símbolos.

Se deben encontrar todos los vectores $s \in \mathcal{A}_L^M$, donde \mathcal{A}_L está definido por el método de modulación usado para codificar la información (para 16-QAM, \mathcal{A}_L está conformado por -3, -1, +1, +3) [8], tales que

$$r^2 \geq \|y - Hs\|^2 \quad (2.12)$$

donde se selecciona el vector $y - Hs$ que minimice la anterior función.

Para resolver la ecuación 2.12 y reducir su complejidad se realiza una factorización de H como un producto de una matriz ortogonal por una triangular superior llamada descomposición QR [9], [10], donde R es una matriz triangular de dimensiones MxM con elementos de la diagonal positivos y $Q = [Q_1 \ Q_2]$ es una matriz ortogonal NxN. Las matrices Q1 y Q2 representan las primeras m y las últimas n-m columnas ortogonales de Q. La condición 2.12, puede por tanto escribirse como lo indican las ecuaciones 2.13 hasta 2.17:

$$r^2 \geq \|x - QRs\|^2 \quad (2.13)$$

$$r^2 \geq \left\| x - Q \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix} s \right\|^2 \quad (2.14)$$

$$r^2 \geq \left\| Q^T x - \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix} s \right\|^2 \quad (2.15)$$

$$r^2 \geq \left\| \begin{bmatrix} Q_1^T \\ Q_2^T \end{bmatrix} x - \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix} s \right\|^2 \quad (2.16)$$

$$r^2 \geq \|Q_1^T x - Rs\|^2 + \|Q_2^T x\|^2 \quad (2.17)$$



o lo que es lo mismo, como la ecuación 2.18.

$$r^2 - \|Q_2^T x\|^2 \geq \|Q_1^T x - Rs\|^2 \quad (2.18)$$

Definiendo $y = Q_1^T x$ y $r'^2 = r^2 - \|Q_2^T x\|^2$ la ecuación 2.18 se reescribe como la ecuación 2.19:

$$r'^2 \geq \|y - Rs\|^2 \quad (2.19)$$

luego, teniendo en cuenta que R es triangular superior, la desigualdad 2.19 puede ser nuevamente escrita como la desigualdad 2.20:

$$r'^2 \geq \sum_{i=1}^m (y_i - \sum_{j=i}^m r_{i,j} s_j)^2 \quad (2.20)$$

Debido a la naturaleza de la matriz superior R, se puede evaluar desde el último elemento de y como lo indica la ecuación 2.21:

$$r'^2 \geq (y_m - R_{m,m} s_m)^2 + \|y_{1:m-1} - R_{1:m-1,1:m} s_{1:m}\|^2 + \dots \quad (2.21)$$

de la ecuación 2.21, se desprende que una condición necesaria para que Rs esté dentro de la esfera, es que $r'^2 \geq (y_m - R_{m,m} s_m)^2$, es decir que la componente s_m , pertenezca al intervalo dado por la ecuación 2.22:

$$\left[\frac{-r' + y_m}{R_{m,m}} \right]_{\mathcal{A}} \leq s_m \leq \left[\frac{r' + y_m}{R_{m,m}} \right]_{\mathcal{A}} \quad (2.22)$$

donde $\left[\frac{-r' + y_m}{R_{m,m}} \right]_{\mathcal{A}}$ denota el menor elemento de la constelación \mathcal{A} mayor o igual que $\frac{-r' + y_m}{R_{m,m}}$, y $\left[\frac{r' + y_m}{R_{m,m}} \right]_{\mathcal{A}}$ denota el mayor elemento menor o igual que $\frac{r' + y_m}{R_{m,m}}$. Luego, para cada valor de s_m dentro del intervalo $\left[\frac{-r' + y_m}{R_{m,m}} \right]_{\mathcal{A}} \leq s_m \leq \left[\frac{r' + y_m}{R_{m,m}} \right]_{\mathcal{A}}$, se determina el intervalo donde estarán los valores de s_{m-1} mediante la ecuación 2.23:

$$\left[\frac{-r_{m-1}' + y_{m-1|m}}{R_{m-1,m-1}} \right]_{\mathcal{A}} \leq s_{m-1} \leq \left[\frac{r_{m-1}' + y_{m-1|m}}{R_{m-1,m-1}} \right]_{\mathcal{A}} \quad (2.23)$$

donde $r_{m-1}'^2 = r'^2 (y_m - R_{m,m} s_m)^2$ y $y_{m-1} = y_{m-1} - R_{m-1,m} s_m$.



El algoritmo continúa de la misma forma para determinar s_{m-2} y así sucesivamente hasta determinar s_1 . En caso de no obtener ninguna solución, se incrementa el radio r y nuevamente se ejecuta el algoritmo [8], [11].

2.7 CANALES DE COMUNICACIÓN

Las características del canal tienen un papel importante en el proceso de análisis de un sistema de comunicación y se estudian con el fin de conocer los efectos en el desempeño sobre el sistema. En esta sección se discuten los modelos de canal utilizados en el estudio de las arquitecturas BLAST.

2.7.1 Canal de comunicación AWGN

En el canal de comunicación con Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*) la señal en el receptor se describe por la ecuación 2.24,

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad (2.24)$$

donde $s(t)$ es la señal de entrada al canal y $n(t)$ representa el ruido adicionado denominado ruido blanco gaussiano. Agregar este ruido implica que la magnitud de la respuesta en frecuencia del canal es plana, por lo tanto tiene un ancho de banda ilimitado o infinito y la fase es lineal con pendiente negativa para todas las frecuencias.

Estas consideraciones ideales permiten que una señal modulada sea transmitida, sin pérdida en amplitud, sin distorsión en la fase y sin desvanecimiento, la única distorsión es la introducida por el ruido aditivo [12], [13].

La densidad espectral de potencia del ruido blanco está representada por la ecuación 2.25,

$$N(w) = N_0/2 \quad (2.25)$$



donde la función de autocorrelación $R(\tau)$, dada por la ecuación 2.27, se puede calcular usando el teorema de Wiener-Khinchin [14], como indica la ecuación 2.26,

$$R(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} N(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{N_0 e^{j\omega\tau}}{2} d\omega \quad (2.26)$$

$$R(\tau) = \frac{N_0}{2} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega\tau} d\omega = \frac{N_0}{2} \delta(\tau), \quad (2.27)$$

donde $\delta(\tau)$ es la función delta de Dirac, lo que indica que las muestras de ruido no guardan correlación o estas son independientes debido al proceso gaussiano [12], [13].

En cualquier instante de tiempo, la amplitud de $n(t)$ obedece a una función de densidad de probabilidad dada por la ecuación 2.28,

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (2.28)$$

donde x representa la amplitud del proceso aleatorio $n(t)$ y σ^2 es la varianza del proceso aleatorio, con valor medio igual a cero.

En la realidad el canal AWGN no existe debido a que ningún canal tiene un ancho de banda infinito, sin embargo, cuando el ancho de banda de la señal transmitida es menor al ancho de banda del canal, se puede aproximar de manera práctica, a un canal AWGN [13].

2.7.2 Canal de comunicación Rayleigh

Cuando el receptor se encuentra en un entorno con gran cantidad de objetos a su alrededor, por ejemplo en una ciudad, los edificios, árboles, hacen que la señal se refleje, dando origen a réplicas o copias de la señal transmitida, que viajan por distintos caminos hasta llegar al receptor como se ilustra en la figura 2.9.

El receptor detecta todas las señales (señal directa + réplicas), presentándose dos tipos de interferencia: la primera es constructiva, que ocurre cuando la señal directa y algunas réplicas llegan en fase al receptor, ocasionando un incremento en el nivel de potencia de la señal recibida; la segunda es destructiva y sucede



cuando la señal directa y algunas réplicas llegan desfasadas al receptor, ocasionando un decremento en el nivel de la potencia de la señal recibida.

La interferencia destructiva puede ocasionar serios desvanecimientos en la señal [15], [16].

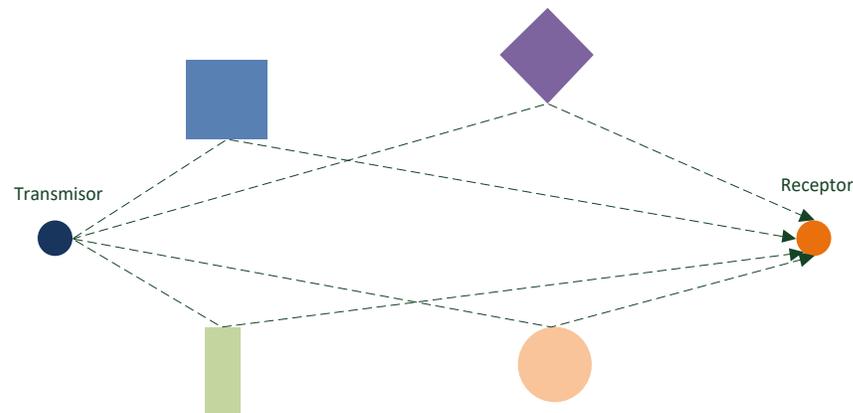


Figura 2.9.Multitrayectorias de la señal transmitida

Este tipo de desvanecimiento se conoce como desvanecimiento Rayleigh y se puede simular haciendo uso de la distribución Rayleigh.

Para este trabajo se considera que el sistema inalámbrico es fijo, por lo que no existe desplazamiento Doppler, además teniendo en cuenta que cualquier señal recibida en el entorno de propagación de un canal inalámbrico, se puede considerar como la suma de las señales recibidas provenientes de un número infinito de trayectos y haciendo uso del teorema del límite central¹, la señal es afectada por un canal cuyo comportamiento se puede representar mediante un proceso estocástico gaussiano, en otras palabras, un canal inalámbrico con desvanecimiento se puede representar por una variable aleatoria compleja gaussiana [17].

Con el fin de obtener la función de densidad de probabilidad de la distribución Rayleigh, a partir de una función de probabilidad de la distribución gaussiana, se

¹ La función de distribución de la suma de n variables aleatorias independientes, se aproxima a una distribución normal.



suponen dos variables aleatorias gaussianas W_1 y W_2 , con media cero y varianza unitaria.

Para continuar con el proceso, es necesario transformar las variables aleatorias gaussianas W_1 y W_2 , a sus coordenadas radial y angular, haciendo uso de la representación de la figura 2.10.

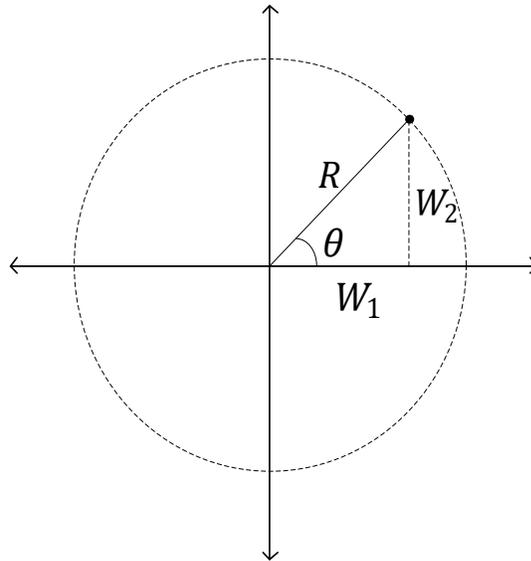


Figura 2.10. Representación geométrica de las variables W_1 y W_2

Aplicando el teorema de Pitágoras se obtiene, la coordenada radial, representada por la ecuación 2.29; donde R denota la amplitud de la variable aleatoria compleja, y su coordenada angular, como lo indica la ecuación 2.30.

$$T_1(W_1, W_2) = R = \sqrt{W_1^2 + W_2^2} \quad (2.29)$$

$$T_2(W_1, W_2) = \theta = \tan^{-1} \left(\frac{W_2}{W_1} \right) \quad (2.30)$$

Con el fin de encontrar la función de densidad de probabilidad de la distribución Rayleigh, obtenida a partir de dos variables aleatorias gaussianas independientes e idénticamente distribuidas. Las transformadas inversas de las ecuaciones 2.29 y 2.30, están dadas por las ecuaciones 2.31 y 2.32, respectivamente.



$$T_1^{-1}(R, \theta) = W_1 = R \cos \theta \quad (2.31)$$

$$T_2^{-1}(R, \theta) = W_2 = R \sin \theta \quad (2.32)$$

Con estas funciones de transformación, la función de densidad de probabilidad para las variables aleatorias está dada por la ecuación 2.33 [18],

$$f_{r,\theta}(r, \theta) = |J| f_{W_1, W_2}(T_1^{-1}, T_2^{-1}) \quad (2.33)$$

donde, $|J|$ es el determinante del jacobiano de las funciones de transformación, para este caso $r, f_{W_1, W_2}(T_1^{-1}, T_2^{-1})$ es la función de densidad de probabilidad conjunta gaussiana para W_1 y W_2 representada por la ecuación 2.34 [18],

$$f_{w_1, w_2}(T_1^{-1}, T_2^{-1}) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{w_1^2 + w_2^2}{2\sigma^2}} \quad (2.34)$$

entonces, reemplazando el jacobiano y la ecuación 2.34 en 2.33 se obtiene la ecuación 2.35,

$$f_{r,\theta}(r, \theta) = r \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2} \right) e^{-\frac{w_1^2 + w_2^2}{2\sigma^2}} \quad (2.35)$$

Finalmente se reemplazan las transformadas inversas de las ecuaciones 2.31 y 2.32 en 2.35, obteniendo:

$$f_{r,\theta}(r, \theta) = \frac{r}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (2.36)$$

Donde la ecuación 2.36 representa la función de densidad de probabilidad de la distribución Rayleigh obtenida a partir de dos variables aleatorias gaussianas independientes e idénticamente distribuidas, en la cual r representa la amplitud de la señal recibida, que tiene un comportamiento aleatorio, y $2\sigma^2$ representa la potencia promedio de la señal recibida.

Para la generación de la variable aleatoria Rayleigh r en MATLAB, se generan dos variables aleatorias gaussianas independientes e idénticamente distribuidas, con media cero y varianza uno, W_1 y W_2 . La variable aleatoria Rayleigh r con función de densidad de probabilidad (2.36), se puede representar por la ecuación 2.37,

$$|r| = \sigma \sqrt{W_1^2 + W_2^2} \quad (2.37)$$



donde $W_1 \sim N(0,1)$ y $W_2 \sim N(0,1)$ ², una vez que W_1 y W_2 son generadas, la variable aleatoria r con potencia promedio $2\sigma^2$, se puede generar por la ecuación 2.37, dado que la potencia obtenida mediante las ecuaciones 2.36 y 2.37 es la misma.

$$E\{r^2\} = 2\sigma^2 \quad (2.38)$$

Para normalizar la potencia, esta se considera unitaria, esto se presenta en la ecuación 2.39,

$$2\sigma^2 = 1 \quad (2.39)$$

Despejando σ en la ecuación 2.39, se obtiene la ecuación 2.40.

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2.40)$$

La variable aleatoria compleja gaussiana se multiplica por el factor $1/\sqrt{2}$, de la ecuación 2.40, para obtener la normalización de la potencia, como se presenta en la ecuación 2.41.

$$|r| = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{W_1^2 + W_2^2} \quad (2.41)$$

Finalmente la ecuación 2.41, se convierte en su equivalente en número complejo, como lo indica la ecuación 2.42.

$$r = (W_1 + jW_2)/\sqrt{2} \quad (2.42)$$

2.8 MODULACIÓN QAM

La modulación de amplitud en cuadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*), es una forma de modulación digital en donde la información digital está contenida, tanto en la amplitud como en la fase de la portadora transmitida.

2.8.1 Modulación 16-QAM

En la modulación 16-QAM, se utilizan cuatro fases y cuatro amplitudes para formar 16 símbolos diferentes, donde cada símbolo es representado por 4 bits. El plano de la constelación y la asignación de bits se presentan en la figura 2.11.

² $N(0,1)$ representa una distribución gaussiana con media 0 y varianza 1.

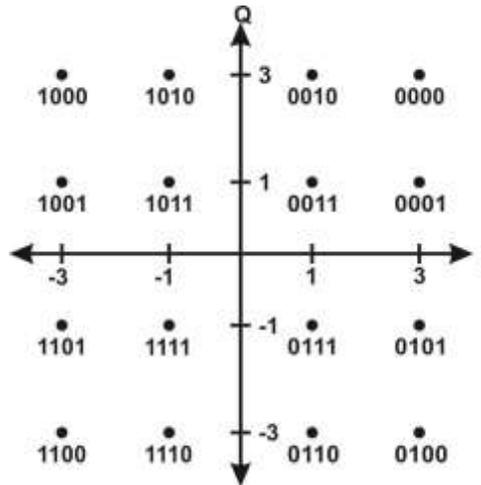


Figura 2.11 Diagrama constelación 16-QAM y bits asignados

Los dos primeros bits son aquellos que especifican el cuadrante en el que se encuentra el símbolo y los otros dos, especifican su posición en el cuadrante [19], [20]. Los símbolos correspondientes a la modulación 16-QAM son:

$$\alpha = \{-3-3i, -3-i, -3+3i, -3+i, -1-3i, -1-i, -1+3i, -1+i, 1-3i, 1-i, 1+3i, 1+i, 3-3i, 3-i, 3+3i, 3+i\} \quad (2.37)$$

Para mantener una potencia promedio constante, se utiliza un factor de normalización que para la modulación 16-QAM es igual a $Z_q/10$ donde Z_q son los puntos o símbolos de la constelación.

La fórmula para la probabilidad de error del símbolo relativa a la modulación QAM M-aria está dada por la ecuación 2.38,

$$P_e \cong 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}}\right) \quad (2.38)$$

donde,

P_e : Probabilidad de error del símbolo

M: Número de símbolos

E_s : Energía de símbolo

N_0 : Densidad espectral de potencia de Ruido

erfc: Función de error complementario



2.9 ARQUITECTURAS BLAST

Las arquitecturas BLAST se pueden incluir en la familia de los sistemas MIMO, las cuales hacen parte de los mecanismos de multiplexación espacial. Estas arquitecturas nacen de la necesidad de incrementar la eficiencia espectral en entornos con desvanecimientos, incrementando la velocidad de transmisión de datos, aumentando así la capacidad de los sistemas de comunicación inalámbricos [21].

El funcionamiento general de V-BLAST, H-BLAST y D-BLAST, se basa en la distribución del flujo de datos inicial en tantos flujos como antenas disponibles en transmisión, cada uno de estos flujos o capas se codifica de forma independiente para después ser transmitidos en la misma banda de frecuencia. La diferencia entre estas arquitecturas, es la forma en que se distribuyen los flujos entre las antenas transmisoras [22].

2.9.1 Arquitectura V-BLAST

La figura 2.12, presenta el sistema transmisor de la arquitectura de Codificación Vertical Espacio Temporal por Capas de Laboratorios Bell (V-BLAST , “*Vertical – Bell Labs Layered Space-Time*”), donde se aplican al flujo de bits procesos codificación de fuente, entrelazado y modulación, luego los símbolos resultantes son demultiplexados en N_T sub flujos paralelos de símbolos; donde N_T es el número de antenas utilizadas en el sistema transmisor, por lo tanto los símbolos transmitidos son independientes entre sí.

La matriz de señales transmitidas por V-BLAST de la figura 2.13, es el resultado del proceso de modulación 16-QAM de 128 bits, para un sistema de cuatro antenas, donde cada conjunto de N_T símbolos componen un vector de transmisión [22], [23]. Se denomina V-BLAST porque la distribución secuencial de los símbolos se realiza de forma vertical a las antenas.

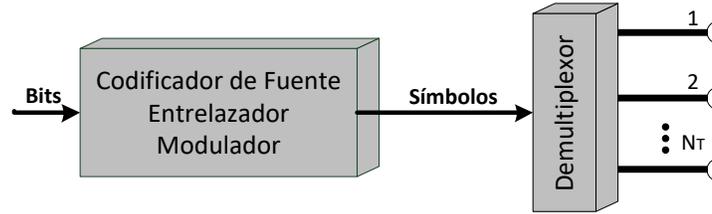


Figura 2.12. Transmisor V-BLAST

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Antena 1	S1	S5	S9	S13	S17	S21	S25	S29
Antena 2	S2	S6	S10	S14	S18	S22	S26	S30
Antena 3	S3	S7	S11	S15	S19	S23	S27	S31
Antena 4	S4	S8	S12	S16	S20	S24	S28	S32

Figura 2.13. Matriz de Señales V-BLAST

Una de las características principales de V-BLAST, se encuentra en la posición que ocupa el bloque demultiplexor y multiplexor del sistema transmisor y sistema receptor presentado en las figuras 2.12 y 2.14 respectivamente. El bloque demultiplexor se encarga de distribuir los símbolos resultantes del bloque codificador-entrelazador-modulador entre las antenas transmisoras. El bloque multiplexor se encarga de unir los símbolos resultantes del detector esférico de cada antena, en un solo flujo de datos para su posterior demodulación, desentrelazado y decodificación.

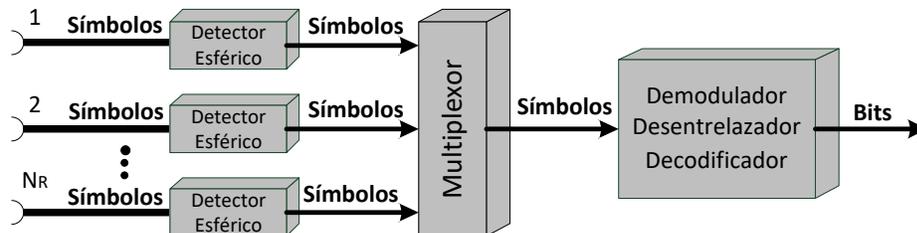


Figura 2.14. Receptor V-BLAST



2.9.2 Arquitectura H-BLAST

La figura 2.15 presenta el transmisor de la arquitectura de Codificación Horizontal Espacio Temporal por Capas de Laboratorios Bell (H-BLAST, “*Horizontal – Bell Labs Layered Space-Time*”), el flujo de bits se demultiplexa en N_T sub flujos de bits separados. Luego cada sub-flujo de bits es codificado en fuente, entrelazado y modulado por separado. Los símbolos resultantes son transmitidos por las N_T antenas transmisoras.

La matriz de símbolos transmitidos por H-BLAST de la figura 2.16, es el resultado del proceso de modulación 16-QAM de 128 bits, para un sistema de cuatro antenas, donde la primera columna corresponde a los símbolos procesados por la primera antena, la segunda columna corresponde a los símbolos procesados la segunda antena y así sucesivamente, se denomina H-BLAST porque la distribución secuencial de los símbolos se realiza de manera horizontal a las antenas.

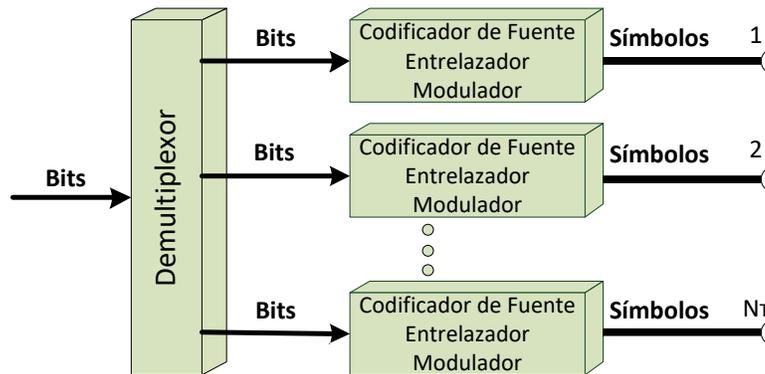


Figura 2.15. Transmisor H-BLAST

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Antena 1	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Antena 2	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16
Antena 3	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24
Antena 4	S25	S26	S27	S28	S29	S30	S31	S32

Figura 2.10. Matriz de señales H-BLAST

A diferencia de V-BLAST, la ubicación del demultiplexor para esta arquitectura representada en figura 2.15, es utilizado para dividir el flujo de bits principal entre las antenas transmisoras, los procesos de codificación de fuente, entrelazado y modulación de los flujos secundarios, se realiza de manera separada por su respectivo bloque ubicado en cada antena transmisora. El multiplexor presente en la figura 2.17, se encarga de unir los flujos de bits secundarios entregados por el bloque Demodulador-Desentrelazador-Decodificador de cada antena receptora.

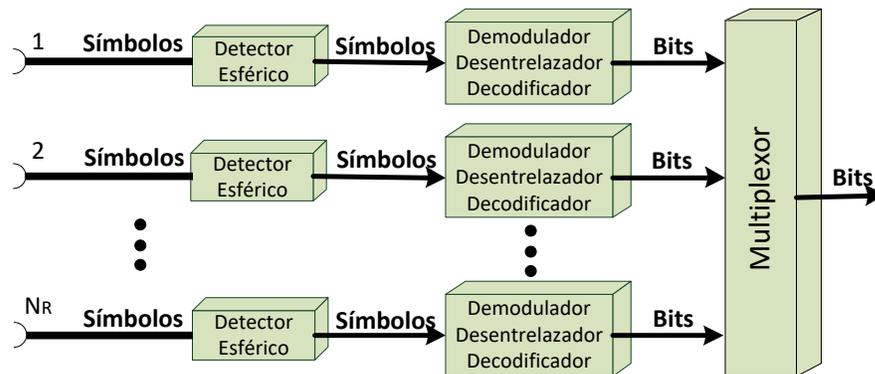


Figura 2.17. Receptor H-BLAST

2.9.3 Arquitectura D-BLAST

La figura 2.18 presenta el transmisor de la arquitectura de Codificación Diagonal Espacio Temporal por Capas de Laboratorios Bell (D-BLAST, “*Diagonal – Bell Labs Layered Space-Time*”), en donde el flujo de bits se demultiplexa en N_T sub flujos de bits separados, luego cada sub-flujo de bits es codificado, entrelazado y modulado por separado. Adicionalmente se realiza un proceso de rotación de símbolos por medio del codificador espacio-temporal referido en la figura 2.18, el cual se encarga de cambiar la posición de los símbolos entre las antenas transmisoras antes de su transmisión, rellenando con ceros aquellas ubicaciones que quedan sin información.



El bloque demultiplexor para esta arquitectura, es utilizado para dividir el flujo de bits principal entre las antenas transmisoras, los procesos de codificación de fuente, entrelazado y modulación de los flujos de bits secundarios, se realizan de manera separada por su respectivo bloque, la rotación se aplica a todos los símbolos, como se observa en figura 2.18. El multiplexor presente en figura 2.19, se encarga de unir los sub flujos de bits secundarios entregados por el bloque Demodulador-Desentrelazador-Decodificador de cada antena receptora.

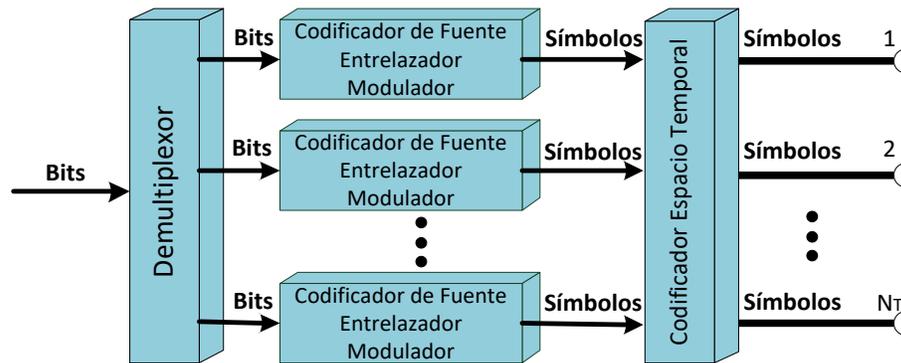


Figura 2.18. Transmisor D-BLAST

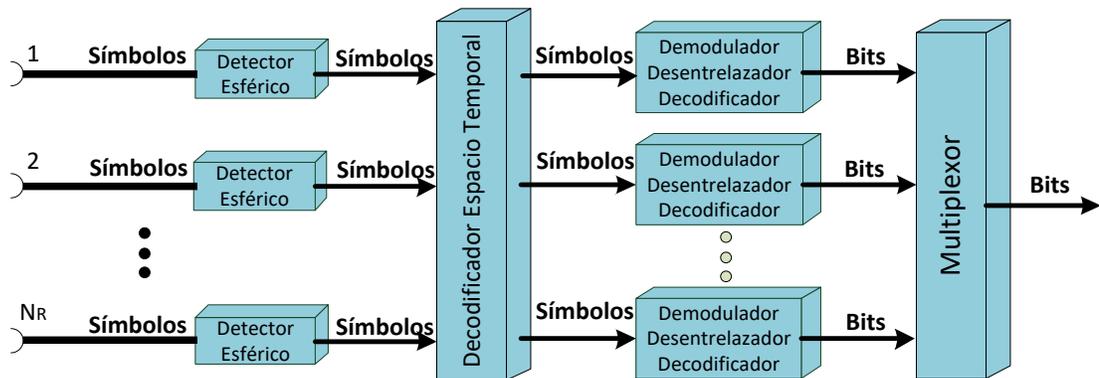


Figura 2.19. Receptor D-BLAST

Para comprender el funcionamiento de la rotación de los símbolos producida por el codificador Espacio-Temporal, se empleará un sistema con 4 antenas transmisoras, modulación 16-QAM y 128 bits, enumerando los símbolos resultantes de 1 a 32. En el primer instante de tiempo, el símbolo 1 es enviado por la antena 1, en el segundo instante de tiempo, el símbolo 2 es transmitido por la antena 1, mientras que el símbolo 3 es transmitido por la antena 2, para el tercer



instante de tiempo, el símbolo 4 es transmitido por la antena 1, el símbolo 5 se transmite por la antena 2 y el símbolo 6 por la antena 3, la rotación cíclica continua como se describe en la figura 2.20.

Para este sistema, durante los primeros 3 instantes de tiempo (antenas 2, 3, 4) y últimos 3 (antenas 1, 2, 3), no hay transmisión de datos produciendo el efecto borde, considerado perjudicial para sistemas que apliquen este tipo de arquitectura, en donde el ancho de banda se desaprovecha debido a que no todas las antenas se encuentran transmitiendo, disminuyendo la capacidad del mismo [22].

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
Antena 1	S1	S2	S4	S7	S11	S15	S19	S23			
Antena 2		S3	S5	S8	S12	S16	S20	S24	S27		
Antena 3			S6	S9	S13	S17	S21	S25	S28	S30	
Antena 4				S10	S14	S18	S22	S26	S29	S31	S32

Figura 2.20. Matriz de señales D-BLAST

2.9.4 Sistema Receptor

El bloque detector esférico presente en los sistemas receptores de las arquitecturas BLAST, estudiado en la sección 2.6.1 de este trabajo de grado, es una buena opción para sistemas con alta velocidad de transmisión de datos, aumentando su capacidad, debido al buen desempeño que presenta [24], [25].



3. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO

En este capítulo se presenta el desarrollo de la metodología de trabajo, para alcanzar las metas propuestas, teniendo en cuenta los objetivos de la simulación, la selección de la herramienta, el plan de pruebas, el proceso de desarrollo y el análisis de la simulación.

3.1 PROCESO DE DESARROLLO DE UNA SIMULACIÓN

La Metodología a seguir para la creación y desarrollo de una simulación se resume en el diagrama de flujo que se muestra en la figura 3.1 [26].

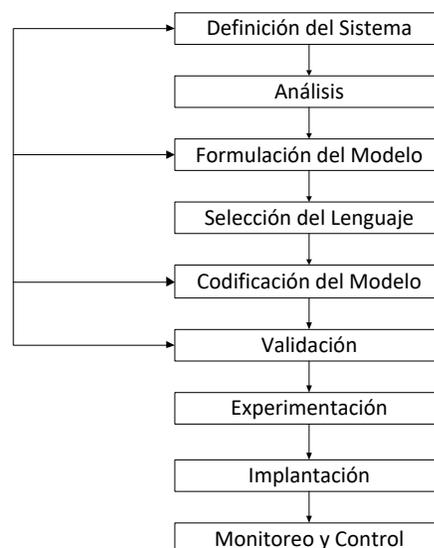


Figura 3.1. Desarrollo del modelo de simulación



3.2 FASE 1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA

Cada vez que se realiza un estudio, se inicia con la descripción detallada del sistema a desarrollar. Para este trabajo de grado se define como un sistema MIMO punto a punto 2x2 y 4x4, haciendo uso los esquemas de multiplexación espacial V-BLAST, H-BLAST y D-BLAST, con algoritmo de detección esférico, modulación 16-QAM en canal AWGN.

En este trabajo de grado no se realiza el análisis del sistema con modelo de canal Rayleigh, ya que su uso implica el modelamiento de múltiples trayectorias entre las antenas de transmisión y recepción, por lo tanto la matriz del canal debe considerar nuevos elementos provenientes del multitrayecto, esto es un inconveniente para la consideración de conocimiento perfecto del canal, de la cual parte este trabajo. Cuando se consideran las múltiples trayectorias es necesario utilizar un estimador del canal MIMO para detectar correctamente los símbolos en el receptor, el análisis, diseño e implementación de un estimador de canal incrementa la complejidad del trabajo de grado y el tiempo necesario para su desarrollo.

3.3 FASE 2 ANÁLISIS

En esta fase se describen las interacciones lógicas entre las variables de decisión, definiendo ciertos términos como el estado del sistema, actividad y entidades. Para este trabajo de grado, el análisis del sistema es el siguiente:

- Estado del sistema: se trabajan con dos tipos de variables denominadas primarias y secundarias. Las principales son aquellas que influyen directamente en los resultados de la simulación, entre las que están, la BER y el tiempo de simulación. Las variables secundarias son las que influyen en las variables primarias, entre ellas están el número de antenas implementadas y el modelo de canal, estas variables definen al sistema.
- Actividad: la actividad principal que se efectúa en la simulación es el proceso de transmisión de información, utilizando las arquitecturas de multiplexación espacial H-BLAST, V-BLAST y D-BLAST, esta actividad varía en su tiempo de



ejecución dependiendo de factores como: número de antenas, bits enviados y modelo de canal.

- Entidades: son cualquier objeto dentro del sistema y pueden ser estáticas como el algoritmo de detección esférico el cual no varía dentro del sistema o dinámicas como el arreglo de antenas, el modelo de canal; que influyen en el comportamiento de las entidades estáticas.

3.4 FASE 3 FORMULACIÓN DEL MODELO

Una vez realizada la fase de análisis, se genera un modelo lógico matemático que involucra todas las variables que forman parte del sistema, sus relaciones lógicas, diagramas en bloque y de flujo que describan en forma completa el modelo.

Este trabajo de grado hace énfasis en el análisis las arquitecturas de multiplexación espacial H-BLAST, V-BLAST y D-BLAST con algoritmo de detección esférico; la formulación del modelo se elabora teniendo en cuenta temas estudiados en el capítulo 2. En las figuras 3.2, 3.3 y 3.4, se presentan de manera detallada los diagramas en bloque para cada arquitectura BLAST.

3.4.1 Diagrama en bloques de las arquitecturas BLAST

A continuación se describen los bloques que conforman los sistemas de las arquitecturas BLAST. No se consideran los procesos de codificación y entrelazado con el fin de simular el peor de los casos.

Generación de Datos: Suministra la información a transmitir, esta se genera de manera aleatoria.

Modulación: Se emplea el esquema de modulación 16-QAM.

Demultiplexación: Distribuye la información a transmitir entre las antenas transmisoras dependiendo del esquema de multiplexación seleccionado.

Codificación Espacio-Temporal: Proceso propio de la arquitectura D-BLAST, lleva a cabo una rotación circular de la información entre las antenas transmisoras.



Arreglo de Antenas Tx y Rx: 2x2 y 4x4.

Canal: Modelo de canal AWGN. Se asume conocimiento perfecto del canal en el receptor.

Detección: Algoritmo de Detección Esférico.

Multiplexación: Multiplexa varios flujos de información en un solo flujo.

Demodulación: Proceso contrario asociado a la modulación 16-QAM.

Decodificación Espacio-Temporal: Se emplea solo en la arquitectura D-BLAST y realiza una decodificación Espacio-Temporal de la información recibida.

Destino: Recibe la información enviada inicialmente.

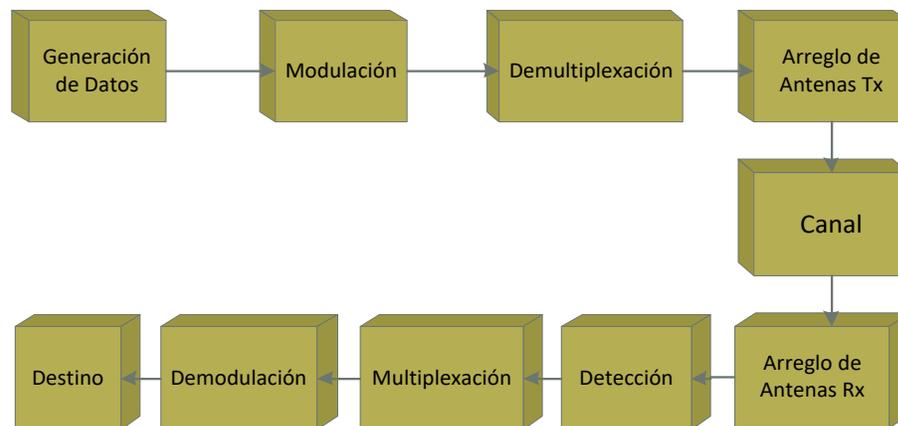


Figura 3.2. Diagrama de Bloques Transmisor – Receptor V-BLAST

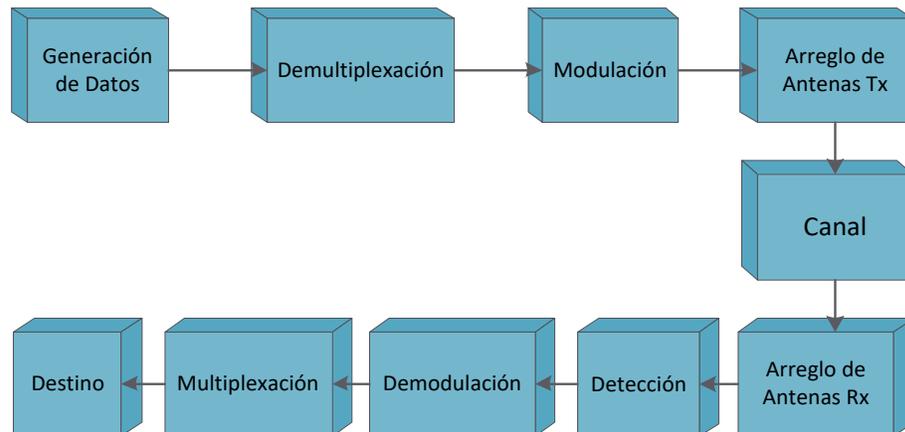


Figura 3.3. Diagrama de Bloques-Transmisor - Receptor H-BLAST

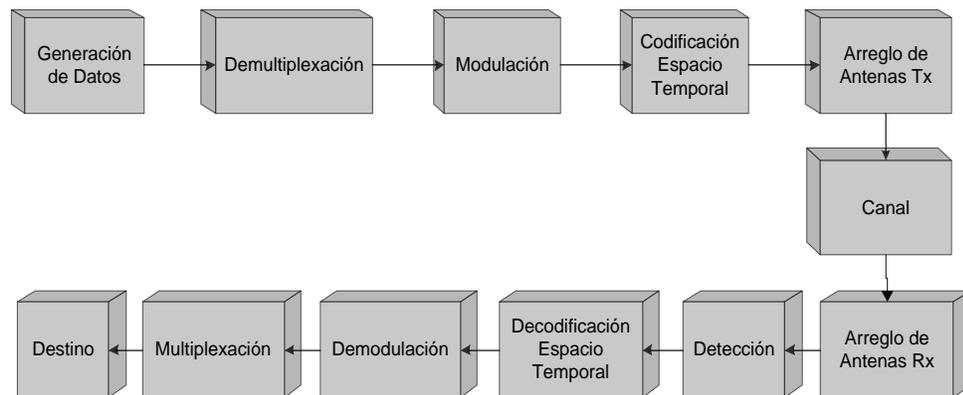


Figura 3.4. Diagrama de Bloques-Transmisor - Receptor D-BLAST

3.4.2 Diagramas de Flujo

En las figuras 3.5, 3.6 y 3.7, se describen los diagramas de flujo de las arquitecturas de multiplexación espacial BLAST, los cuales permiten comprender su funcionamiento y diferencias, como es el proceso de multiplexación, que varía su posición en el diagrama dependiendo de la arquitectura; en V-BLAST se encuentra después de la modulación de los datos, mientras que para H-BLAST y D-BLAST, se encuentra después de generar los datos y antes de la modulación, por otra parte la arquitectura D-BLAST tiene dos procesos adicionales, en comparación a H-BLAST y V-BLAST, que son: codificación y decodificación espacio-temporal.



3.4.2.1 Diagrama de Flujo de la Arquitectura V-BLAST

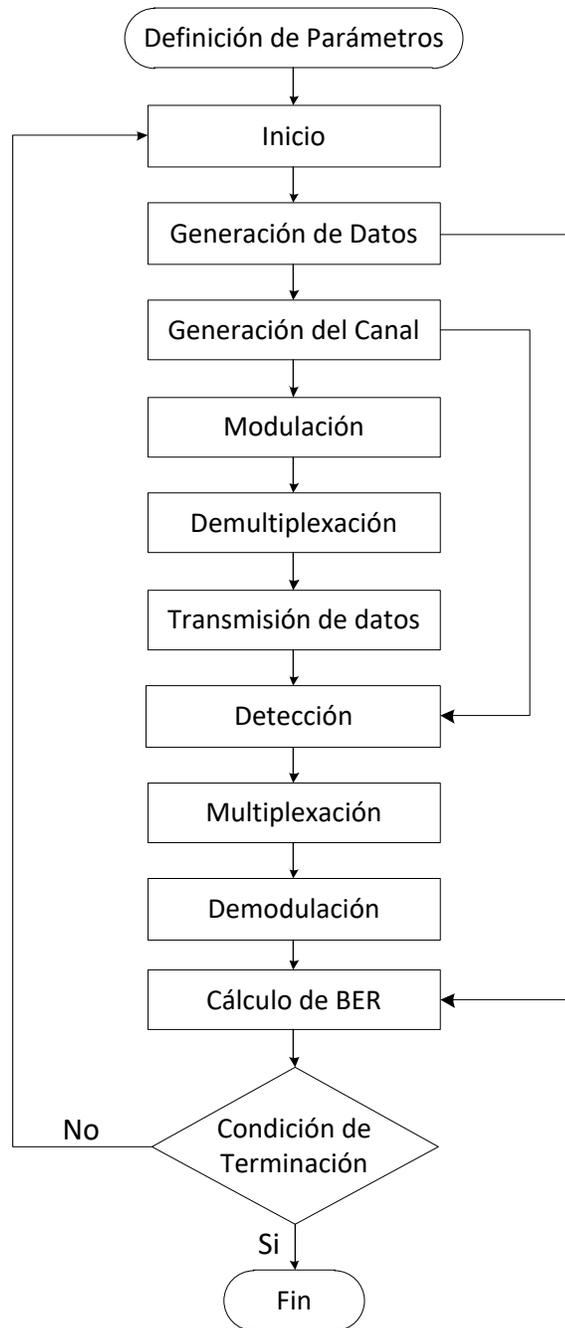


Figura 3.5. Diagrama de Flujo V-BLAST



3.4.2.2 Diagrama de Flujo de la Arquitectura H-BLAST

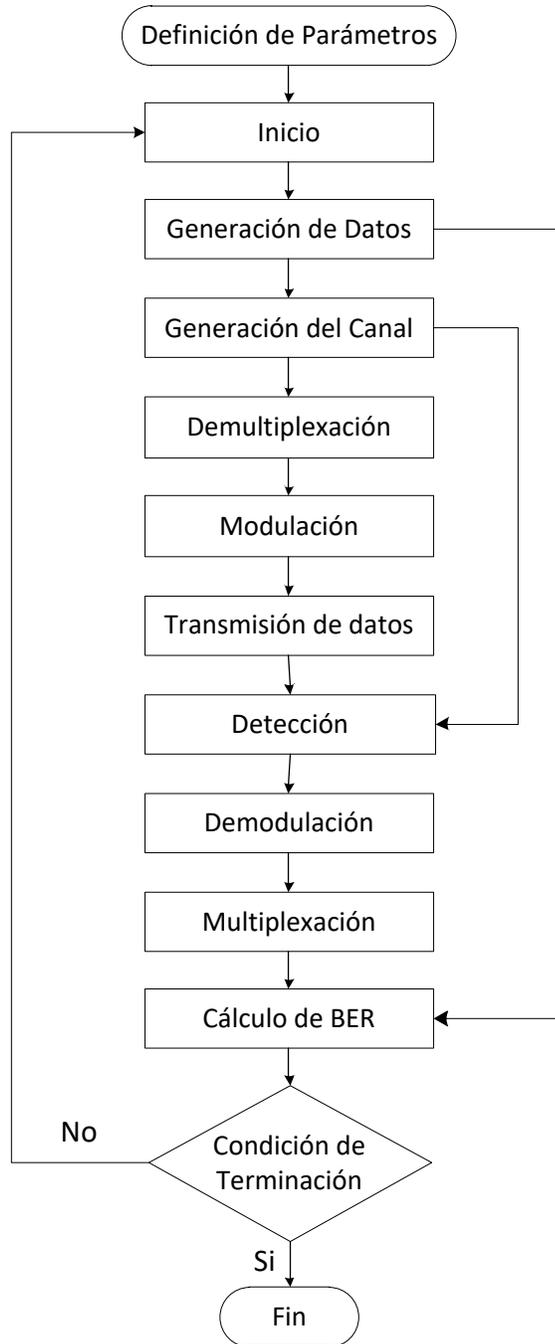


Figura 3.6. Diagrama de Flujo H-BLAST



3.4.2.3 Diagrama de Flujo de la Arquitectura D-BLAST

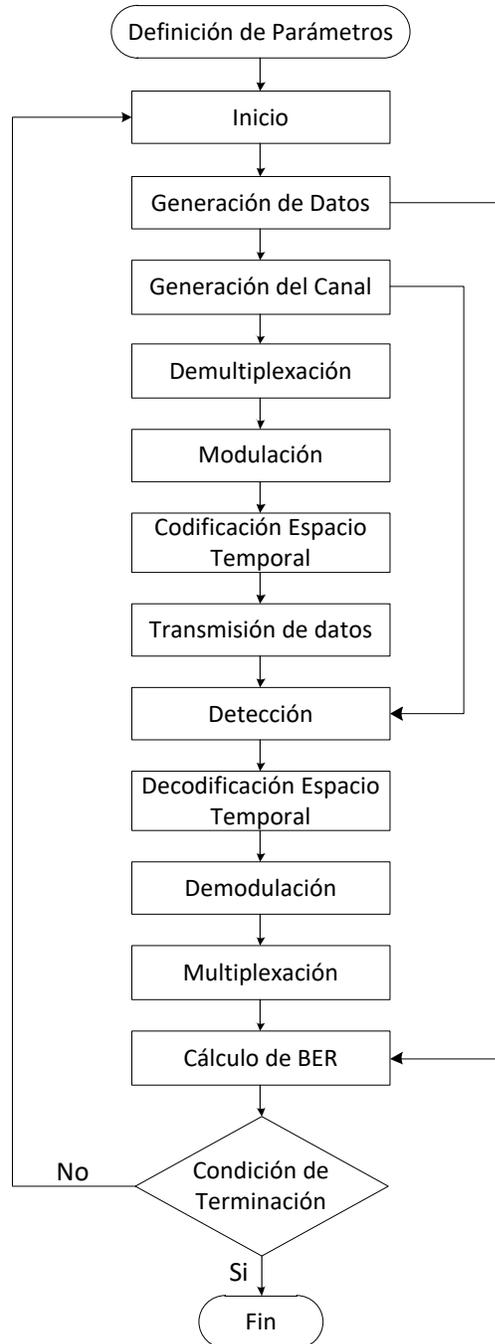


Figura 3.7. Diagrama de Flujo D-BLAST



3.5 FASE 4 SELECCIÓN DEL LENGUAJE

Teniendo la formulación del modelo, es necesario elegir una herramienta adecuada que brinde la posibilidad de simular el sistema. Existen herramientas que se pueden utilizar para realizar el proceso de simulación como: MATLAB, LabVIEW, SCILAB, entre otras.

Se escogió la herramienta MATLAB, porque es un entorno de computación usado ampliamente para resolver problemas prácticos de ingeniería y matemáticas, con gran énfasis en procesamiento de señales, poniendo a disposición del usuario prestaciones esenciales como manipulación de matrices, implementación de algoritmos, representación de datos y funciones, creación de interfaces gráficas, entre otras; que son ayudas apropiadas para llevar a cabo el desarrollo de la simulación del sistema.

3.6 FASE 5 CODIFICACIÓN DEL MODELO

Consiste en la generación de un código computacional con el fin ejecutar el modelo. A continuación se explica la codificación utilizada en los sistemas de las arquitecturas BLAST, realizada con el lenguaje de programación seleccionado.

3.6.1 Canal

Sintaxis

```
%AWGN
for i=1:num_trama
H(:, :, i) = (randn(Nr, Nt) + 1j * randn(Nr, Nt));
End
```

Descripción

Genera un canal aleatorio de números complejos.

Parámetros de entrada

Nt: número de antenas transmisoras.



Nr: número de antenas receptoras.

num_trama: número de tramas.

Parámetros de salida

H: canal resultante.

3.6.2 Generación de Datos

Sintaxis

```
%V-BLAST
datos = randint(k,Nt);

%H-BLAST y D-BLAST
datos = randint(k,[]);
```

Descripción

Genera un flujo aleatorio de enteros.

Parámetros de entrada

k: número de bits por símbolo.

Nt: número de antenas transmisoras.

Parámetros de salida

datos: datos aleatorios generados.

3.6.3 Modulación

Sintaxis

```
datos_modulados = modulate(modem.qammod(num_mod),datos_dec);
```

Descripción

Modula la información con el esquema 16-QAM.



Parámetros de entrada

datos_dec: datos a modular.

num_mod: número de puntos de la constelación.

Parámetros de salida

datos_modulados: datos modulados.

3.6.4 Normalización

Sintaxis

```
datos_modulados_nor=datos_modulados*scale;
```

Descripción

Realiza la normalización a la modulación.

Parámetros de entrada

datos_modulados: datos modulados.

scale: valor de la normalización.

Parámetros de salida

datos_modulados_nor: datos modulados normalizados.

3.6.5 Demultiplexación

Sintaxis

```
%V-BLAST  
Datos_demultiplexados = reshape (datos_modulados,Nt, []);  
  
%H-BLAST y D-BLAST  
for i=1:Nt  
%Generación de datos  
%Modulación  
end
```



Descripción

Divide el flujo de datos de entrada en subflujos.

Parámetros de entrada

datos_modulados: datos modulados.

Nt: número de antenas transmisoras.

Parámetros de salida

Datos_demultiplexados: representa los Nt subflujos a transmitir.

3.6.6 Canal y Ruido

Sintaxis

```
r=H(:, :, tmp1)*datos_demultiplexados;  
  
for j=1:Nt  
rr(j, :)=awgn(r(j, :), snr, 'measured');  
end
```

Descripción

Adiciona a los datos el efecto del canal.

Parámetros de entrada

datos_demultiplexados: datos demultiplexados.

H: canal generado.

Nt: número de antenas transmisoras.

snr: relación señal a ruido.

Parámetros de salida

rr: datos con el efecto del canal y del ruido.



3.6.7 Codificación Espacio-Temporal

Sintaxis

```
long = long_trama/(2^Nt);  
  
Y = [rr, zeros(Nt, (Nt - 1)*long)];  
  
for i = 1: Nt  
Y(i,:) = wshift(1,Y(i,:), -(i-1)*long);  
end  
  
Y = flipud(Y);  
  
for i = 0:2*Nt - 2  
    Y(:,i*long + 1:(i+1)*long) = wshift(2,Y(:,i*long  
        + 1:(i+1)*long), [-i-1,0]);  
end  
  
% a1  a2  a3      -->  a1  b1  c1  0  0  
% b1  b2  b3      -->  0  a2  b2  c2  0  
% c1  c2  c3      -->  0  0  a3  b3  c3
```

Descripción

Realiza una codificación Espacio-Temporal al flujo de datos de entrada en el esquema D-BLAST.

Parámetros de entrada

rr: datos con el efecto del canal.

long_trama: longitud de la trama.

Nt: número de antenas transmisoras.

Parámetros de salida

datosCodd: datos codificados diagonalmente.



3.6.8 Decodificación Espacio-Temporal

Sintaxis

```
rev = decoEspacial(rev_temp,Nt,(long_trama/(2^Nt)),Nt);
for i = 0:Nt + Nt - 2
    Z(:,i*long + 1:(i+1)*long) = wshift(2,W(:,i*long +
1:(i+1)*long),[i-3,0]);
end

for i = 1:Nt
Z(i,:) = wshift(1,Z(i,:),-(i-1)*long);
end

M = flipdim(Z,1);

for i = 1:Nt
    N(i,:) = wshift(1,M(i,:),[(Nt - 1)*long (Nt - 1)*long]);
end

[O P]=size(N);

for u=1:O
for ii=1:(P-(Nt - 1)*long)
R(u,ii)=N(u,ii);
end
end

% a'1 b'1 c'1 0 0      --> a'1 a'2 a'3
% 0 a'2 b'2 c'2 0      b'1 b'2 b'3
% 0 0 a'3 b'3 c'3      c'1 c'2 c'3
```

Descripción

Realiza una decodificación Espacio-Temporal al flujo de datos recibidos en el esquema D-BLAST, con el fin de eliminar la información adicional generada por los ceros que representan la no transmisión de las antenas.

Parámetros de entrada

rev_temp: datos recibidos.

long_trama: longitud de la trama.

Nt: número de antenas transmisoras.



Parámetros de salida

rev: datos decodificados en Espacio y Tiempo.

3.6.9 Detector Esférico

Sintaxis

```
Eb/No = 10.^(snr./10)/Nt;  
C = (2*Nt) * (2 / (10^(EbNo/10)));  
y_res = detectorEsferico(recibido, C, H);
```

Descripción

Encuentra la distancia más corta entre las posibles soluciones de todos los puntos recibidos y la señal recibida, dentro del radio de una esfera, determinando la mejor solución de los símbolos recibidos.

Parámetros de entrada

recibido: datos recibidos en el detector.

C: energía de bit por antena, asociada al valor de SNR.

H: matriz del canal.

Parámetros de salida

y_res: mejor solución detectada.

3.6.10 Desnormalización

Sintaxis

```
y_res1 = y_res/scale;
```

Descripción

Desnormaliza la señal entregada por el detector esférico.



Parámetros de entrada

y_res: señal entregada por el detector esférico.

scale: valor de la normalización.

Parámetros de salida

y_res1: señal desnormalizada.

3.6.11 Demodulación

Sintaxis

```
zsym = demodulate(modem.qamdemod(num_mod), y_res);
```

Descripción

Demodula la señal en el esquema 16-QAM.

Parámetros de entrada

num_mod: orden de la modulación.

y_res: señal entregada por el detector esférico desnormalizada.

Parámetros de salida

zsym: señal demodulada.

3.6.12 Multiplexación

Sintaxis

```
z1 = reshape(z.', 1, numel(z));
```

Descripción

Multiplexa varios flujos de datos en un solo flujo.



Parámetros de entrada

z: datos demodulados.

Parámetros de salida

z1: flujo de de datos de salida.

3.7 FASE 6 VALIDACIÓN

Se analizan las diferencias entre los resultados de la simulación y resultados de trabajos con características similares. Esta fase se presenta en el capítulo 4.

3.8 FASE 7 EXPERIMENTACIÓN

Se definen los escenarios de simulación de acuerdo a las variables de entrada, como el arreglo de antenas en transmisión y recepción y el número de bits transmitidos. Estos escenarios se presentan en el capítulo 5 y se clasifican y ordenan para realizar un análisis completo y detallado del sistema.

3.9 FASE 8 IMPLANTACIÓN

Una vez seleccionadas las mejores opciones de la fase de experimentación, estas se ponen en práctica. Para la simulación desarrollada en este trabajo de grado, se realizarán 10 iteraciones por cada uno de los escenarios definidos, estos resultados se presentan en el capítulo 5.

3.10 FASE 9 MONITOREO Y CONTROL

Esta fase incluye medidas necesarias para asegurar que las fases anteriores funcionen correctamente, enfocándose en determinar y analizar el origen de fallas del sistema, evitando que se vuelvan a presentar en el futuro.



4. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan las comparaciones de los resultados obtenidos en la simulación desarrollada con resultados de investigaciones similares.

Las discrepancias entre los valores de la simulación y los valores de los resultados de investigaciones similares, se presentan por las diferencias en los valores de las variables de entrada consideradas en las simulaciones y el uso de distintos parámetros del sistema.

4.1 PRIMERA VALIDACIÓN

La figura 4.1 muestra los resultados de desempeño del detector de máxima verosimilitud, el detector esférico con radio inicial fijo y el algoritmo de detección esférico modificado, para la arquitectura V-BLAST, con arreglo de antenas 2x2 y esquema de modulación 16-QAM generada en [8].

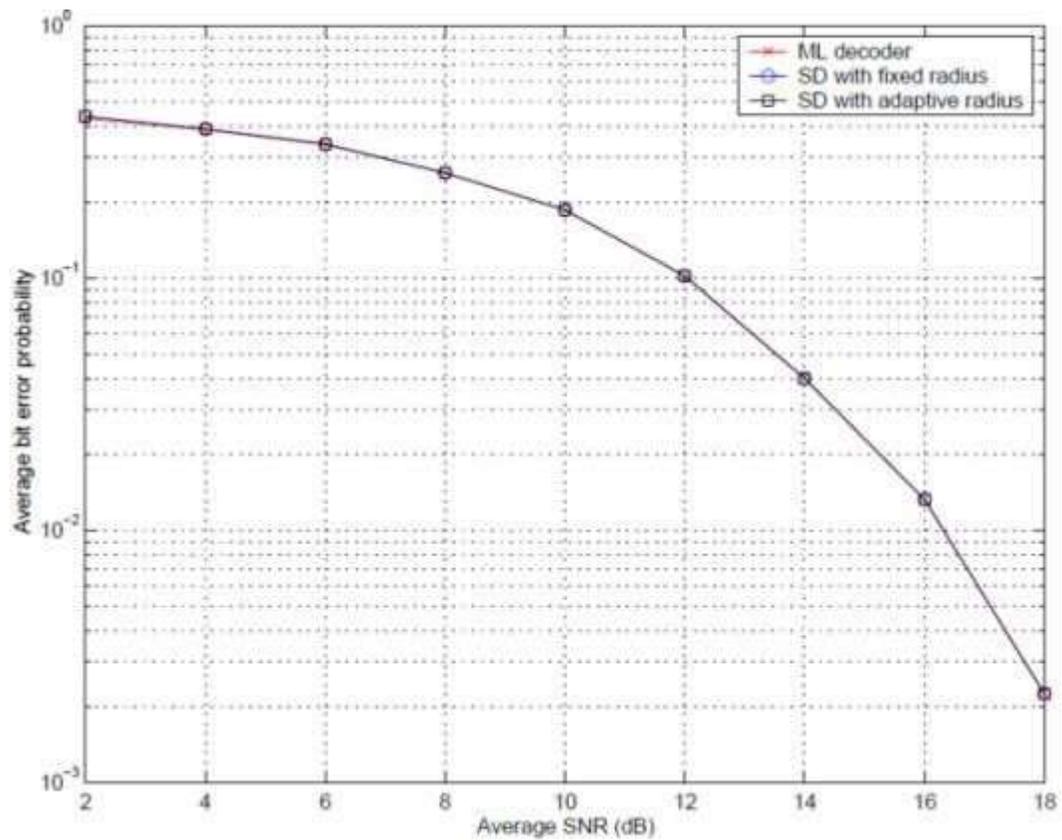


Figura 4.1.Desempeño detector ML, SD con radio inicial fijo y SD modificado

Los resultados que se presentan en la figura 4.2, corresponden a la transmisión de 1024 símbolos en un sistema V-BLAST con arreglo de antena 2x2, modulación 16-QAM, y algoritmo de detección esférico en un canal AWGN, esta comparación se realiza con el fin de validar el funcionamiento del simulador desarrollado, procedimiento que se repite 10 veces con resultados iguales.

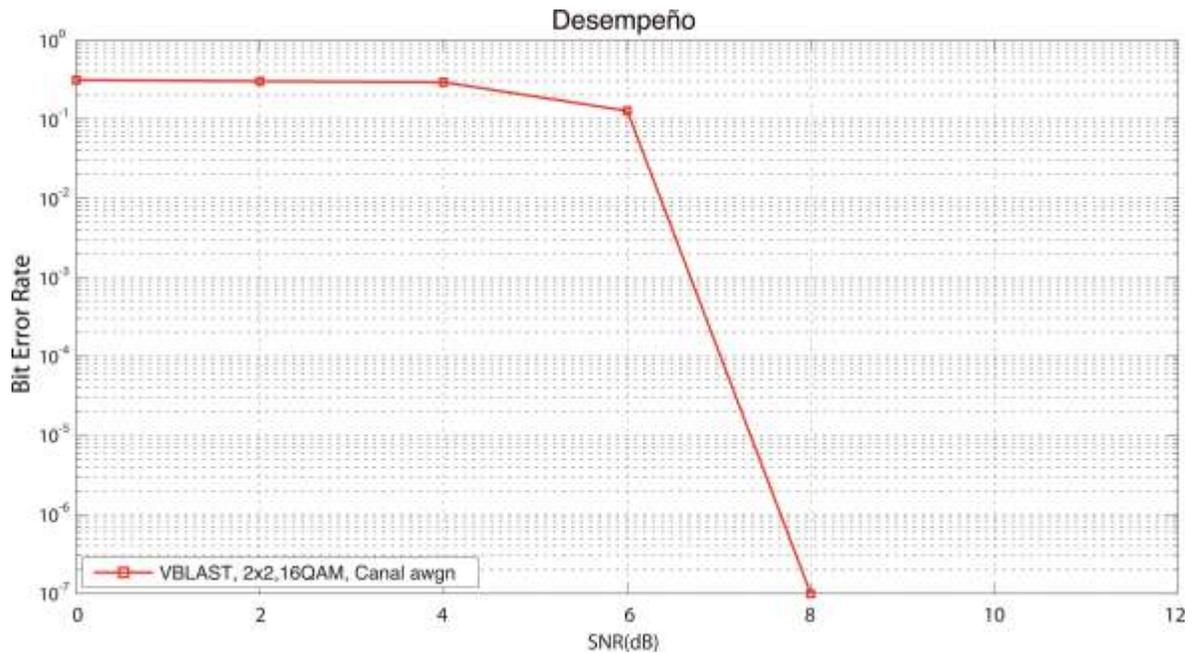


Figura 4.2. Desempeño arquitectura V-BLAST, 2X2, 16-QAM, AWGN

En la tabla 4.1 se presentan los valores de BER y SNR correspondientes a la curvas de la figuras 4.1 y 4.2.

SNR (dB)	BER Figura 4.1	BER Figura 4.2
2	$10^{-0.38}$	$10^{-0.52}$
4	$10^{-0.40}$	$10^{-0.55}$
6	$10^{-0.46}$	$10^{-0.82}$
8	$10^{-0.57}$	10^{-7}

Tabla 4.1. Comparación de desempeño arquitectura V-BLAST, 2x2.

En las figuras 4.1 y 4.2, se observa un comportamiento semejante; la BER disminuye a medida que la SNR aumenta, sin embargo para valores de SNR entre 2 y 6 dB, la curva de la figura 4.1 presenta una variación en los valores de BER, desde $10^{-0.38}$ hasta $10^{-0.46}$, mientras que la curva de la figura 4.2 lo hace entre valores de $10^{-0.52}$ y $10^{-0.82}$, como muestra la tabla 4.1.

Para valores de SNR entre 6 y 8 dB, la BER de la curva de la figura 4.2 disminuye rápidamente su valor de $10^{-0.82}$ a 10^{-7} ; alcanzando la BER de 10^{-7} en 8dB de SNR,



mientras que la BER en la figura 4.1 cambia su valor de $10^{-0.46}$ a $10^{-0.57}$, el cual decrece hasta llegar a una BER de $10^{-2.64}$ en 18dB de SNR.

4.2 SEGUNDA VALIDACIÓN

En la figura 4.3 se compara el desempeño de varios algoritmos de detección, entre los que se encuentra el algoritmo de detección esférico para la arquitectura V-BLAST, con modulación 16-QAM y arreglo de antenas 3x3 de acuerdo con [8].

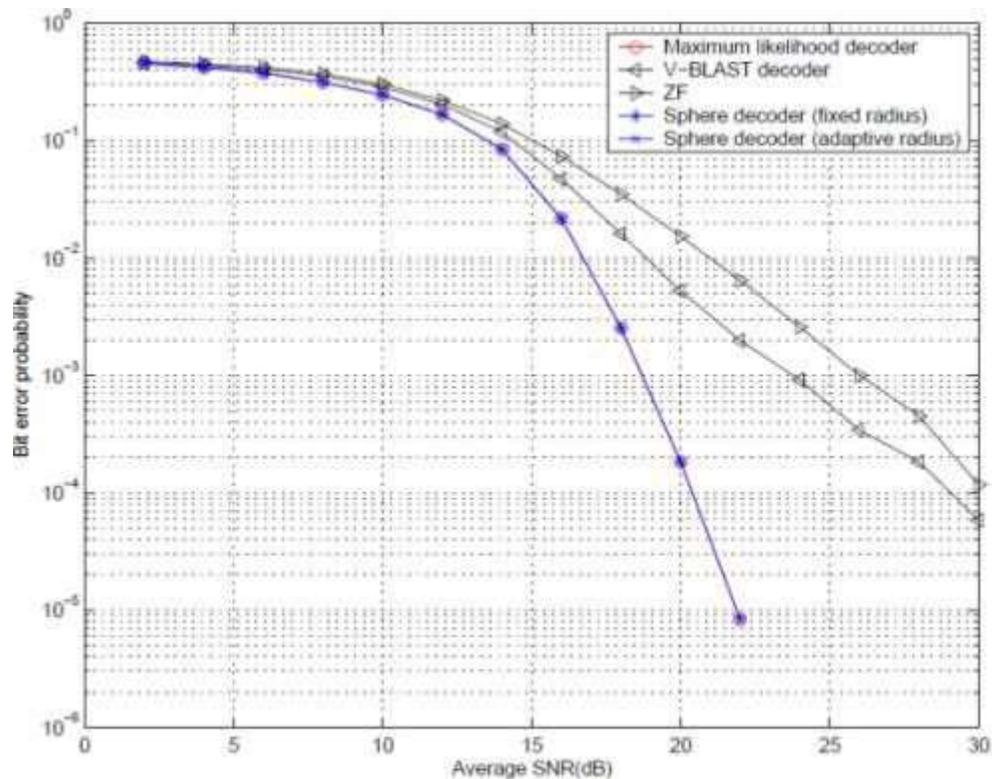


Figura 4.3. Desempeño arquitectura V-BLAST, 3X3, 16-QAM, MLD, V-BLAST, ZF, SD

La figura 4.4 presenta los resultados de desempeño de un sistema V-BLAST, arreglo de antenas 3x3, modulación 16-QAM y canal AWGN, con una transmisión de 1024 símbolos, esta comparación se realiza con el fin de validar el funcionamiento del simulador desarrollado, procedimiento que se repite 10 veces con resultados iguales.

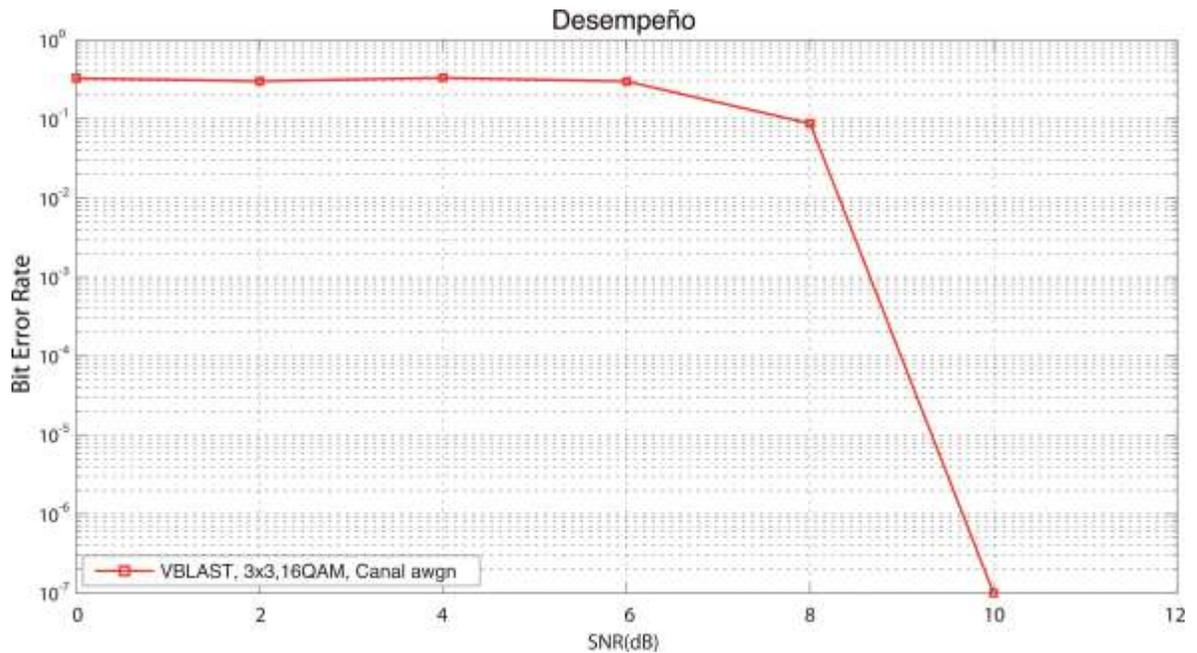


Figura 4.4. Desempeño arquitectura V-BLAST, 3x3, 16-QAM, AWGN

En la tabla 4.2 se muestran los valores de BER y SNR de las curvas de las figuras 4.3 y 4.4; solo se tiene en cuenta la curva de desempeño del detector esférico con radio adaptativo de la figura 4.3.

Se observa que el incremento en el número de antenas, genera un aumento de BER en las curvas de las figuras 4.3 y 4.4 respectivamente. La tabla 4.2 muestra que para valores de SNR entre 2 y 8 dB, la BER presenta el mismo comportamiento analizado en la tabla 4.1; existiendo una variación del valor de BER entre $10^{-0.31}$ y $10^{-0.49}$, para la figura 4.3 y una variación de BER entre $10^{-0.51}$ y 10^{-1} para la figura 4.4. Para valores comprendidos entre 8 y 10 dB, la BER de la figura 4.4, disminuye rápidamente alcanzando el valor mínimo de 10^{-7} en 10 dB de SNR; a diferencia de la figura 4.2, este valor mínimo de BER se alcanza 2 dB de SNR después, mientras que la BER de la figura 4.3, alcanza un valor mínimo de BER de $10^{-5.05}$ en 23 dB de SNR.



SNR (dB)	BER Figura 4.3	BER Figura 4.4
2	$10^{-0.31}$	$10^{-0.51}$
4	$10^{-0.38}$	$10^{-0.51}$
6	$10^{-0.41}$	$10^{-0.52}$
8	$10^{-0.49}$	10^{-1}
10	$10^{-0.60}$	10^{-7}

Tabla 4.2. Comparación de desempeño arquitectura V-BLAST, 3x3.

4.3 TERCERA VALIDACIÓN

En la figura 4.5 se muestran las curvas de desempeño de un sistema MIMO con arquitectura V-BLAST, modulación 16-QAM, canal AWGN, y arreglo de antenas 4x4; transmitiendo 100 tramas de 100 bits, para diferentes algoritmos de detección como se muestra en [27].

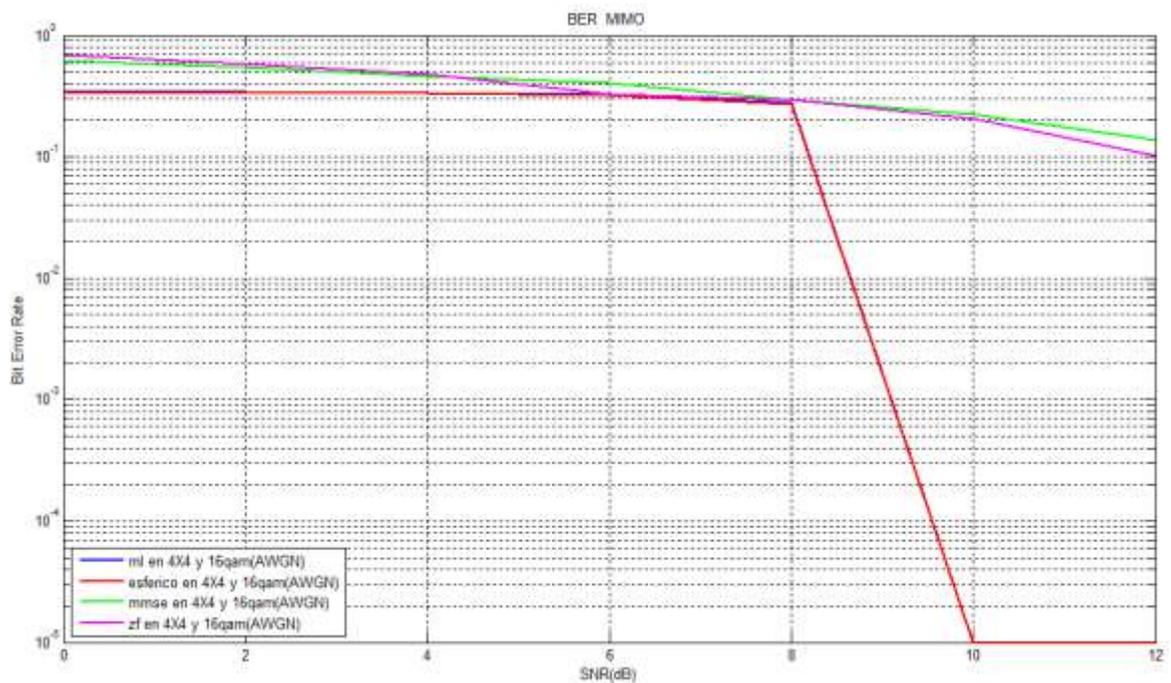


Figura 4.5. Desempeño arquitectura V-BLAST, 4x4, 16-QAM, AWGN, ML, SD, MMSE, ZF.



En la figura 4.6 se ilustran resultados correspondientes a la simulación de un sistema V-BLAST con arreglo de antenas 4x4, modulación 16-QAM, en un canal AWGN, y transmitiendo 1024 símbolos, esta comparación se realiza con el fin de validar el funcionamiento del simulador desarrollado, procedimiento que se repite 10 veces con resultados iguales.

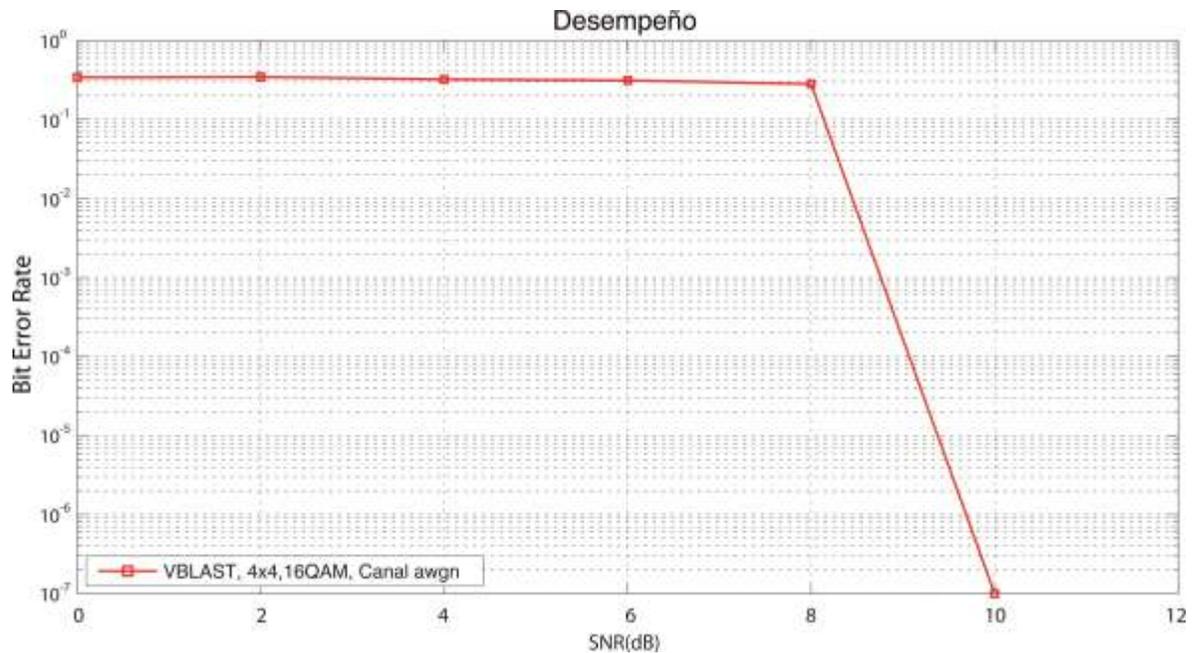


Figura 4.6. Desempeño arquitectura V-BLAST, 4x4, 16-QAM, AWGN

En la tabla 4.3 se muestran los valores de BER y SNR, tomados de las figuras 4.5 y 4.6.

BER	SNR (dB) Figura 4.5	SNR (dB) Figura 4.6
10 ⁻¹	8.3	8.1
10 ⁻²	8.6	8.5
10 ⁻³	9.4	8.7
10 ⁻⁵	10	9.5
10 ⁻⁷	NA	10

Tabla 4.3. Comparación de desempeño arquitectura V-BLAST, 4x4, 16-QAM, AWGN.



De la tabla 4.3, se nota una diferencia de SNR de 0.2 dB para una BER de 10^{-1} y 0.1 dB para una BER de 10^{-2} , entre las curvas de las figuras 4.5 y 4.6, para una BER de 10^{-3} , se tiene una diferencia más notable, 0.7 dB de SNR. El valor mínimo de BER de 10^{-5} en la figura 4.5, se logra en 10 dB de SNR, mientras que este mismo valor de BER en la figura 4.6 se alcanza en 9.5 dB, se observa que el comportamiento de las curvas de desempeño son similares para valores de BER mayores a 10^{-3} , sin embargo para valores menores o iguales a 10^{-3} , el sistema de la figura 4.6 presenta un mejor desempeño.

En la primera y segunda validación, las curvas de desempeño comparadas, presentan un comportamiento similar, donde la BER disminuye a medida que la SNR aumenta, además la BER se incrementa cuando aumenta el número de antenas.

Para la tercera validación, los valores de comparación de la tabla 4.3 son muy cercanos entre sí, por ejemplo para conseguir una BER de 10^{-2} , el sistema de la figura 4.5 requiere una SNR de 8.6 dB y el sistema de la figura 4.6 necesita 8.5 dB de SNR.

Como los resultados del simulador desarrollado en este trabajo de grado presentan un comportamiento similar a los obtenidos en otras investigaciones, por consiguiente los resultados presentados se consideran válidos.



5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se crean los escenarios de simulación con diferentes configuraciones. Estas simulaciones permiten analizar y comparar los resultados del comportamiento a nivel físico de los sistemas de multiplexación espacial BLAST, variando el número de antenas. Para cada escenario se transmitieron 1024 símbolos, el número de tramas es un proceso interno relacionado con el número de antenas en transmisión. El procedimiento se repitió 10 veces obteniendo resultados similares.

Las características del equipo utilizado para las simulaciones son: Procesador Intel (R) Core (TM) 2 Duo P8600 2.4GHz, 3 Gigabytes de memoria RAM, Tarjeta gráfica Mobile Intel (R) 4 Series Express Chipset Family, Sistema Operativo Windows Vista Home Premium de 32 bits.

5.1 RESULTADOS OBTENIDOS

5.1.1 Escenario 1

Sistema MIMO 2x2 con arquitecturas de multiplexación espacial H-BLAST, V-BLAST y D-BLAST, en un canal AWGN con modulación 16-QAM y algoritmo de detección esférico. La figura 5.1 ilustra las curvas de desempeño de las arquitecturas BLAST.

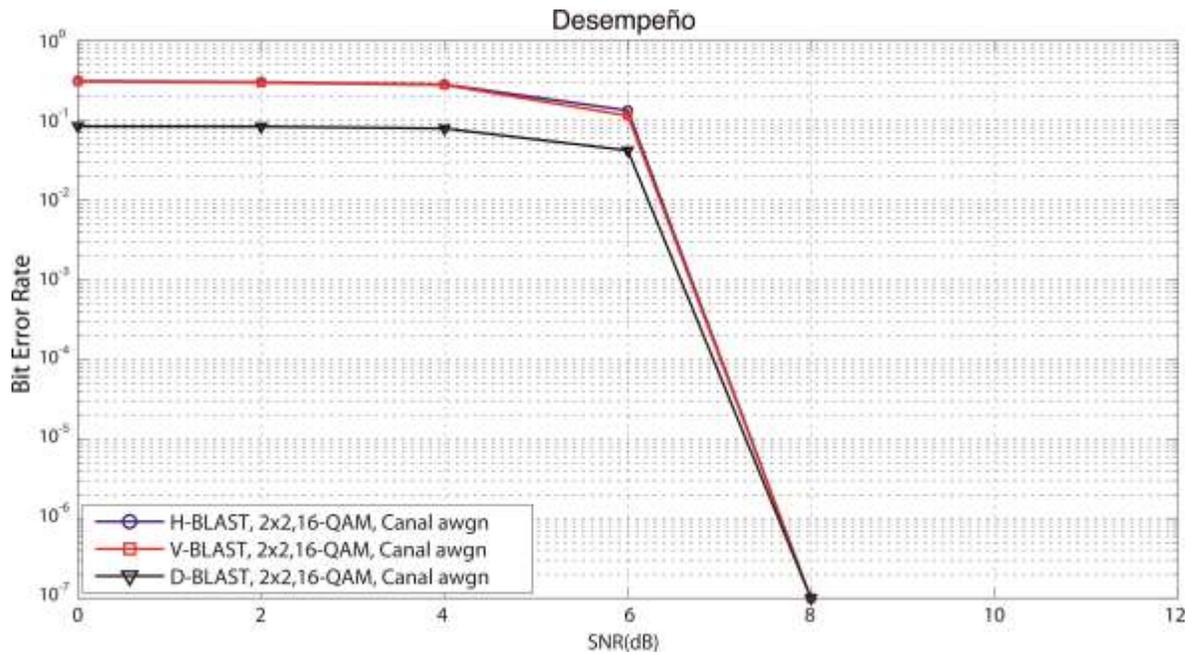


Figura 5.1. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el escenario 1

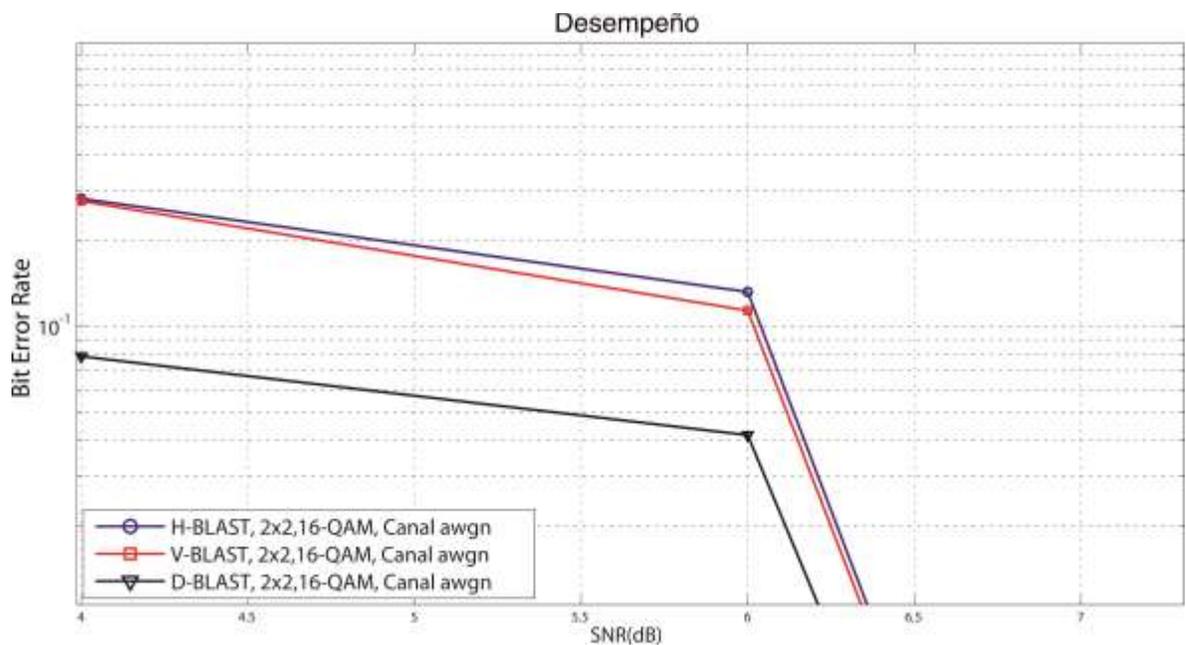


Figura 5.2. Acercamiento de la Figura 5.1

Las figuras 5.1 y 5.2 muestran que la BER disminuye a medida que aumenta la SNR. De los resultados de la tabla 5.1, se puede decir que la arquitectura que



presenta los menores valores de BER es D-BLAST; para valores de SNR entre 0 y 8 dB. De los datos consignados en la tabla 5.2, se observa la arquitectura D-BLAST tiene mejor desempeño, debido a que requiere menores valores de SNR para alcanzar los diferentes valores de BER.

Con respecto a las arquitecturas H-BLAST y V-BLAST, estas presentan similitudes notables en sus curvas de desempeño, se realiza un acercamiento de la figura 5.1, la cual se ilustra en la figura 5.2 para evidenciar sus diferencias. En la tabla 5.1, se comprueba que existen diferencias en los valores de BER entre estas arquitecturas, comprendidos entre 0.015 a 0.049 y de 0.02 a 0.07, además de la tabla 5.2, se aprecia que la arquitectura V-BLAST presenta mejor desempeño en comparación con la arquitectura H-BLAST.

En una SNR de 8 dB, las curvas de desempeño de las arquitecturas alcanzan un valor de BER de 10^{-7} .

SNR (dB)	BER		
	H-BLAST	V-BLAST	D-BLAST
0	0.3098	0.3049	0.0837
2	0.2998	0.2952	0.0829
4	0.2810	0.2756	0.0786
6	0.1323	0.1138	0.0416
8	10^{-7}	10^{-7}	10^{-7}

Tabla 5.1. BER para diferentes valores de SNR (Escenario 1)

BER	SNR (dB)		
	H-BLAST	V-BLAST	D-BLAST
10^{-1}	6.07	6.0	NA
10^{-2}	6.38	6.33	6.2
10^{-3}	6.7	6.66	6.56
10^{-4}	7.03	7	6.92
10^{-5}	7.36	7.33	7.27
10^{-6}	7.68	7.66	7.62

Tabla 5.2. SNR para diferentes valores de BER (Escenario 1)



La figura 5.3, presenta los tiempos de simulación de las arquitecturas BLAST. La arquitectura que más tiempo emplea para procesar la señal es D-BLAST (Negro), seguido por H-BLAST (Azul) y en último lugar se encuentra V-BLAST (Rojo).

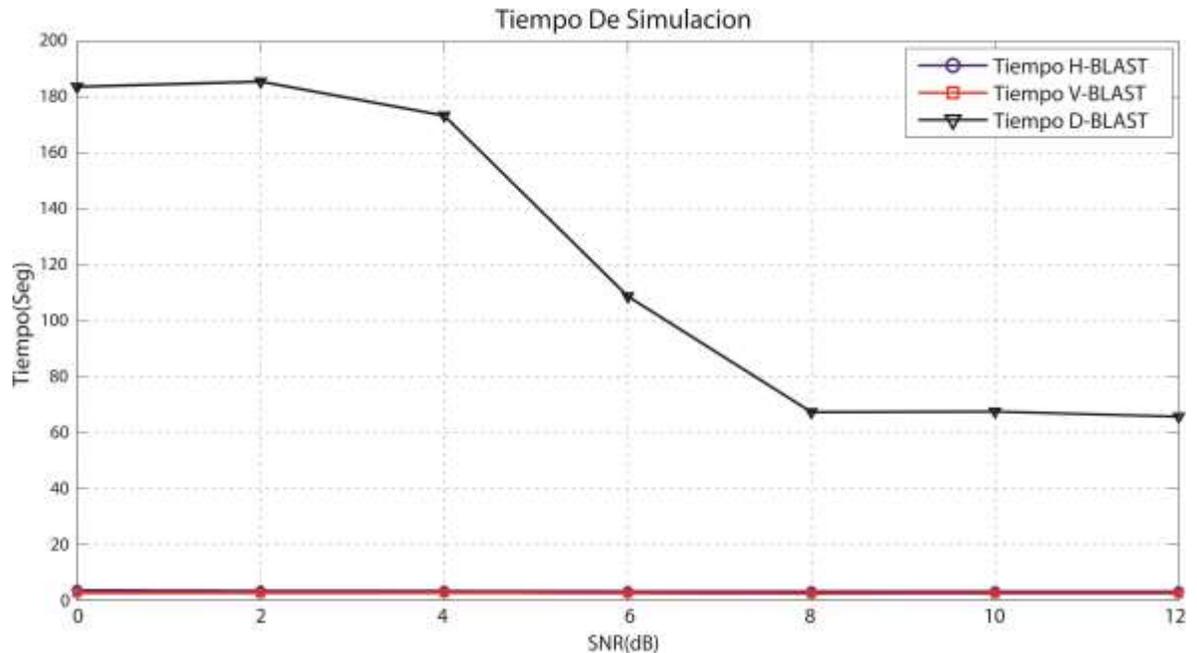


Figura 5.3. Tiempos de simulación para el escenario 1

El tiempo de simulación para las tres arquitecturas disminuye con el aumento de la SNR, para V-BLAST y H-BLAST el decrecimiento es suave con el aumento de SNR como se ilustra en la figura 5.4, mientras que en D-BLAST el tiempo de procesamiento disminuye bruscamente entre 2 y 8 dB de SNR debido a los procesos de codificación y decodificación Espacio-Temporal; para H-BLAST y V-BLAST esta variación está entre 3 y 4 segundos y para D-BLAST está entre 15 y 60 segundos aproximadamente.

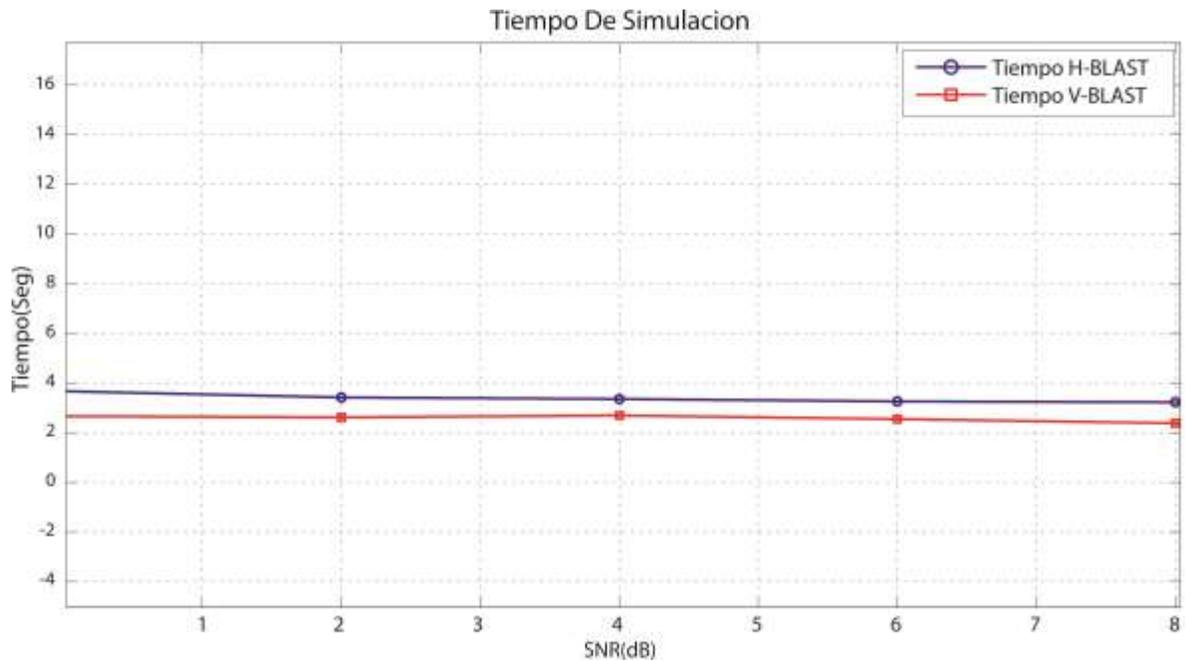


Figura 5.4. Acercamiento Figura 5.3

5.1.2 Escenario 2

Sistema MIMO 4x4 con arquitecturas de multiplexación espacial H-BLAST, V-BLAST y D-BLAST, en canal AWGN, modulación 16-QAM y algoritmo de detección esférico. La figura 5.5 muestra las curvas de desempeño de las arquitecturas BLAST para este escenario.

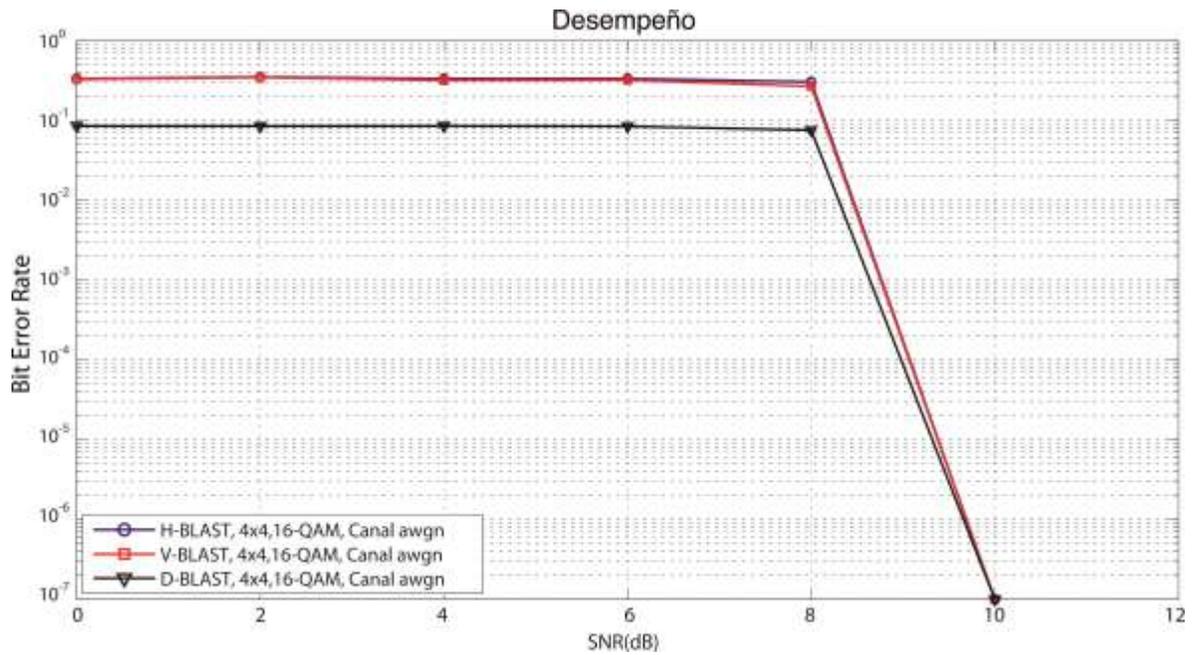


Figura 5.5. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el escenario 2

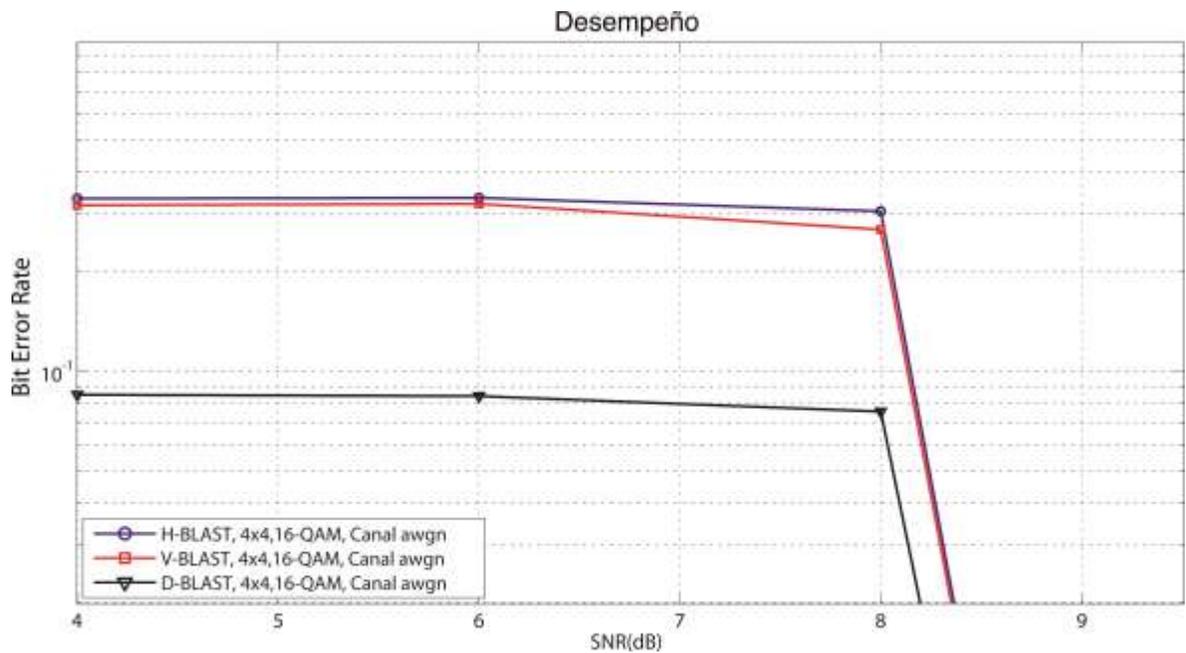


Figura 5.6. Acercamiento Figura 5.5

Los valores de BER de las arquitecturas BLAST, decrecen con el incremento de la SNR, sin embargo, el sistema 2x2 tiene un mejor desempeño en comparación con



4x4. Para este escenario, la arquitectura D-BLAST presenta los menores valores de BER, en 0dB de SNR, esta arquitectura tiene una BER igual a 0.0837 en el arreglo de antenas 2x2 y una BER de 0.0853 en el arreglo 4x4.

De igual manera se observa que los valores de BER (arreglo de antenas 4x4) de la tabla 5.4, se alcanzan con valores de SNR mayores a los indicados en la tabla 5.2 (arreglo de antenas 2x2), debido al incremento de la interferencia intersimbólica, consecuencia del aumento del número de trayectorias entre el transmisor y receptor.

Las arquitecturas H-BLAST y V-BLAST muestran comportamientos similares, sin embargo, V-BLAST necesita menores valores de SNR para obtener los mismos valores de BER que H-BLAST, como se indica en la tabla 5.4. El valor de BER de 10^{-7} , se logra cuando la SNR es igual a 10dB; 2 dB más que en el escenario 1.

SNR (dB)	BER		
	H-BLAST	V-BLAST	D-BLAST
0	0.3323	0.3276	0.0853
2	0.3503	0.3464	0.0846
4	0.3325	0.3174	0.0850
6	0.3342	0.3206	0.0842
8	0.3044	0.2681	0.0756
10	10^{-7}	10^{-7}	10^{-7}

Tabla 5.3. BER para diferentes valores de SNR (Escenario 2)

BER	SNR (dB)		
	H-BLAST	V-BLAST	D-BLAST
10^{-1}	8.16	8.12	NA
10^{-2}	8.47	8.44	8.3
10^{-3}	8.78	8.75	8.62
10^{-4}	9.08	9.06	8.97
10^{-5}	9.39	9.37	9.31
10^{-6}	9.69	9.68	9.65

Tabla 5.4. SNR para diferentes valores de BER (Escenario 2)

El tiempo de simulación presentado en las figuras 5.7 y 5.8, aumenta proporcionalmente con el número de antenas; el tiempo de procesamiento para un valor de 0dB de SNR, para la arquitectura D-BLAST, tarda alrededor de 800



segundos en el sistema 4x4, mientras que el tiempo de procesamiento en un sistema 2x2 transmitiendo la misma cantidad de símbolos es de 120 segundos. El comportamiento de las curvas de tiempo del sistema MIMO 4x4 es similar al del sistema 2x2, donde las pendientes de las curvas de las arquitecturas decrecen levemente con el incremento de la SNR.

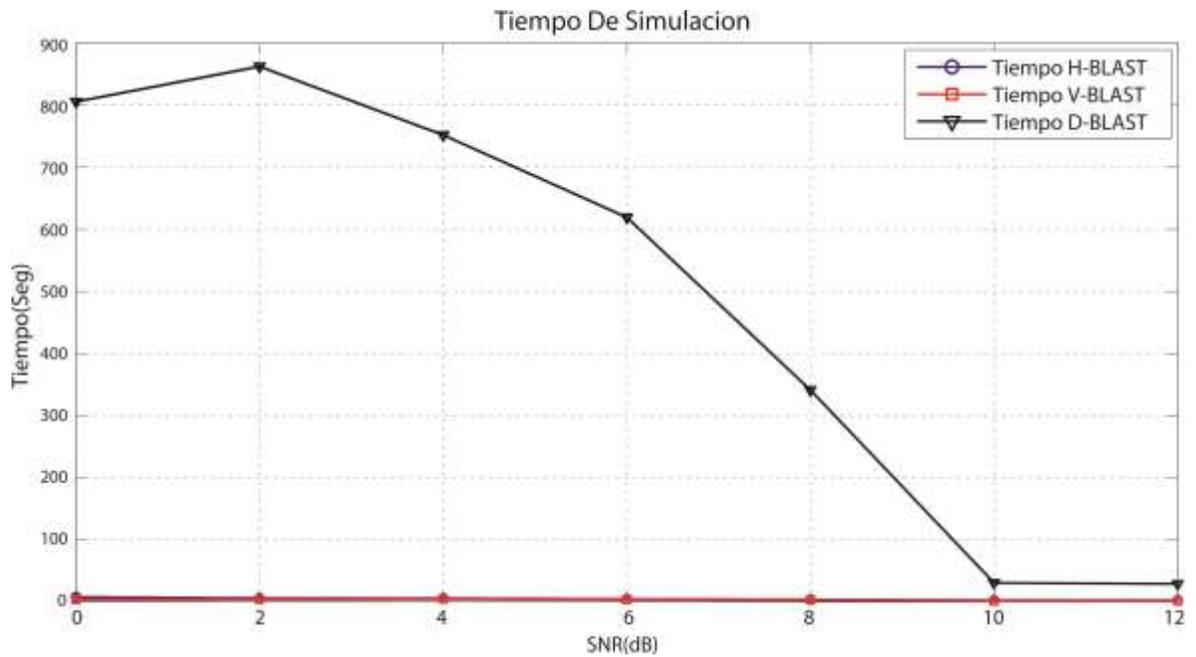


Figura 5.7. Tiempo de simulación para el escenario 2

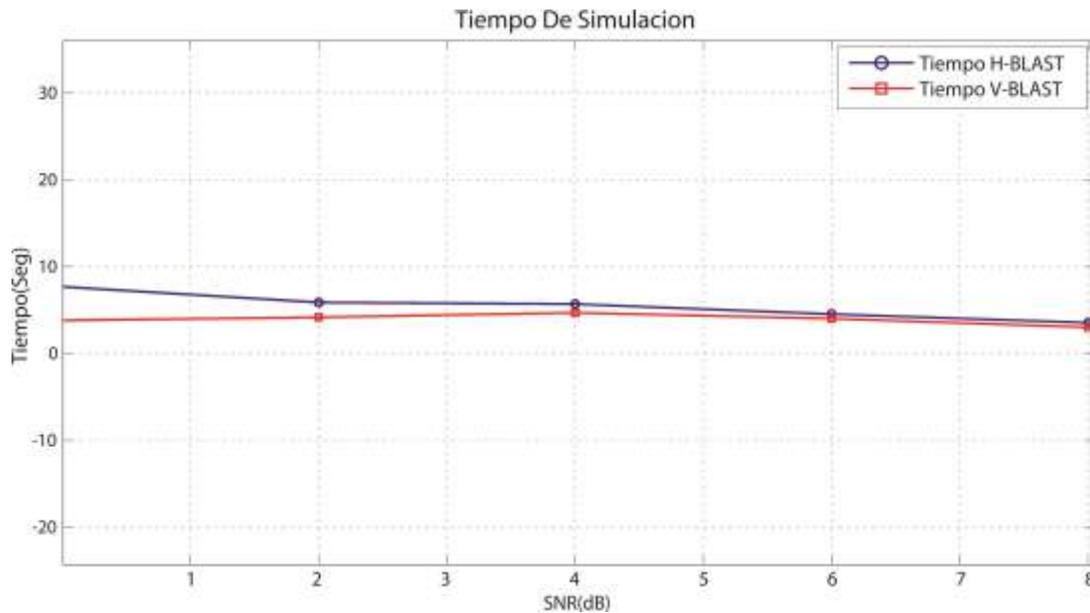


Figura 5.8. Acercamiento Figura 5.7

5.1.3 Escenario 3

Sistema MIMO 2x2 con arquitecturas de multiplexación espacial H-BLAST, V-BLAST y D-BLAST, en un canal AWGN, modulación 16-QAM y algoritmo de detección esférico. La figura 5.9 muestra los resultados obtenidos en dicho escenario.

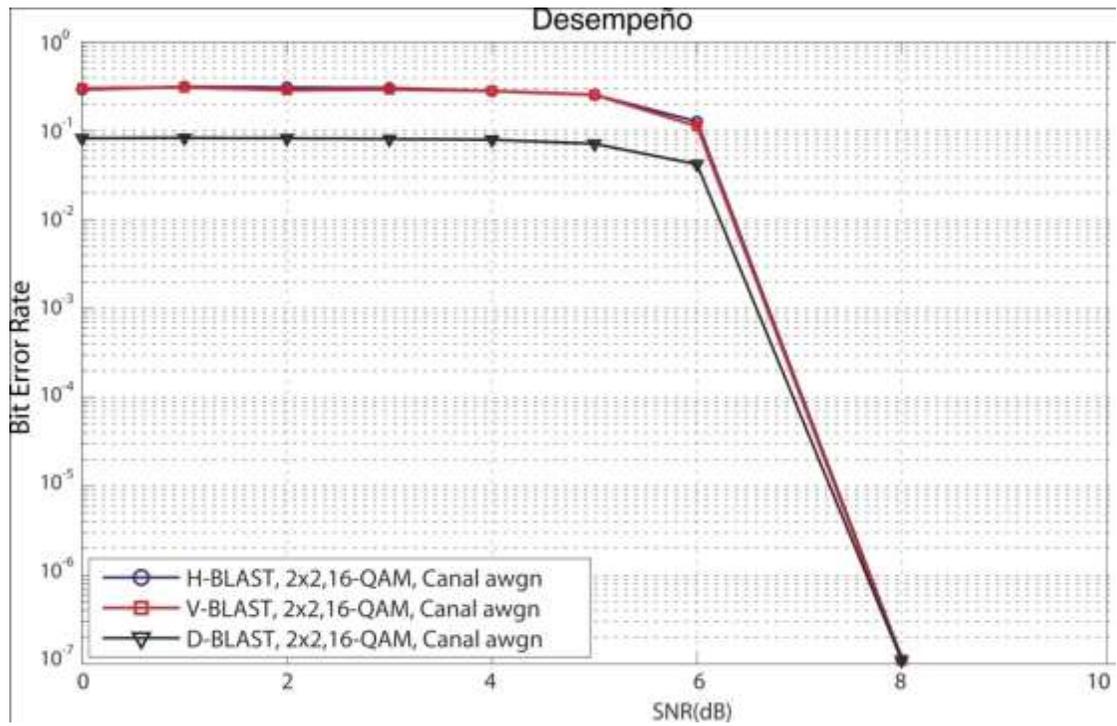


Figura 5.9. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el escenario 3

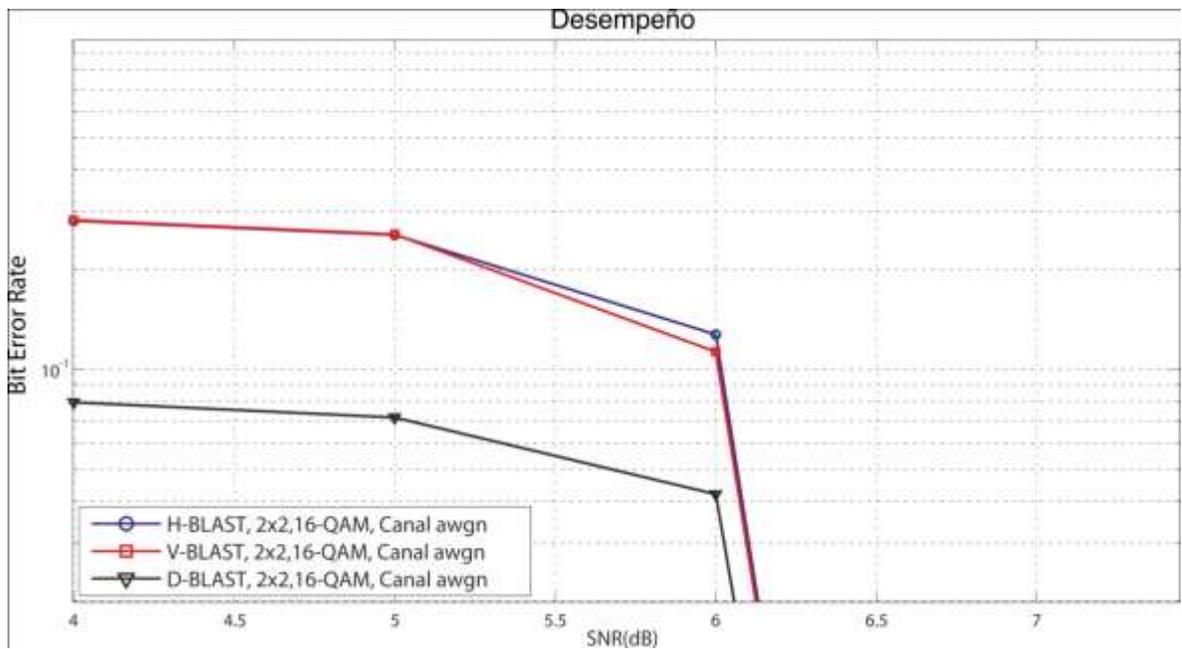


Figura 5.10. Acercamiento Figura 5.9



SNR (dB)	BER		
	H-BLAST	V-BLAST	D-BLAST
0	0.3003	0.2979	0.0823
2	0.2910	0.2905	0.0829
4	0.2944	0.2783	0.0793
6	0.1475	0.1357	0.0416
8	10^{-7}	10^{-7}	10^{-7}

Tabla 5.5. BER para diferentes valores de SNR (Escenario 3)

BER	SNR (dB)		
	H-BLAST	V-BLAST	D-BLAST
10^{-1}	6.02	6.0	NA
10^{-2}	6.18	6.17	6.11
10^{-3}	6.36	6.34	6.29
10^{-4}	6.52	6.51	6.47
10^{-5}	6.67	6.67	6.65
10^{-6}	6.85	6.85	6.82

Tabla 5.6. SNR para diferentes valores de BER (Escenario 3)

De acuerdo a la figura 5.9, el comportamiento de las curvas de las arquitecturas V-BLAST y H-BLAST es parecido, sin embargo, la arquitectura V-BLAST presenta una leve mejora en el desempeño en comparación con H-BLAST, en particular de la tabla 5.5 para una SNR de 4 dB, se tiene una BER de 0.2783 para V-BLAST y una BER de 0.2944 para H-BLAST.

Por otro lado, teniendo en cuenta los datos consignados en la tabla 5.6, se evidencia que la arquitectura D-BLAST requiere de una SNR menor para alcanzar ciertos valores de BER en comparación con H-BLAST y V-BLAST, como por ejemplo, D-BLAST necesita una SNR de 6.47 dB para alcanzar una BER de 10^{-4} , mientras que H-BLAST y D-BLAST requieren de 6.52 dB y 6.51 dB para lograr ese mismo valor de BER.

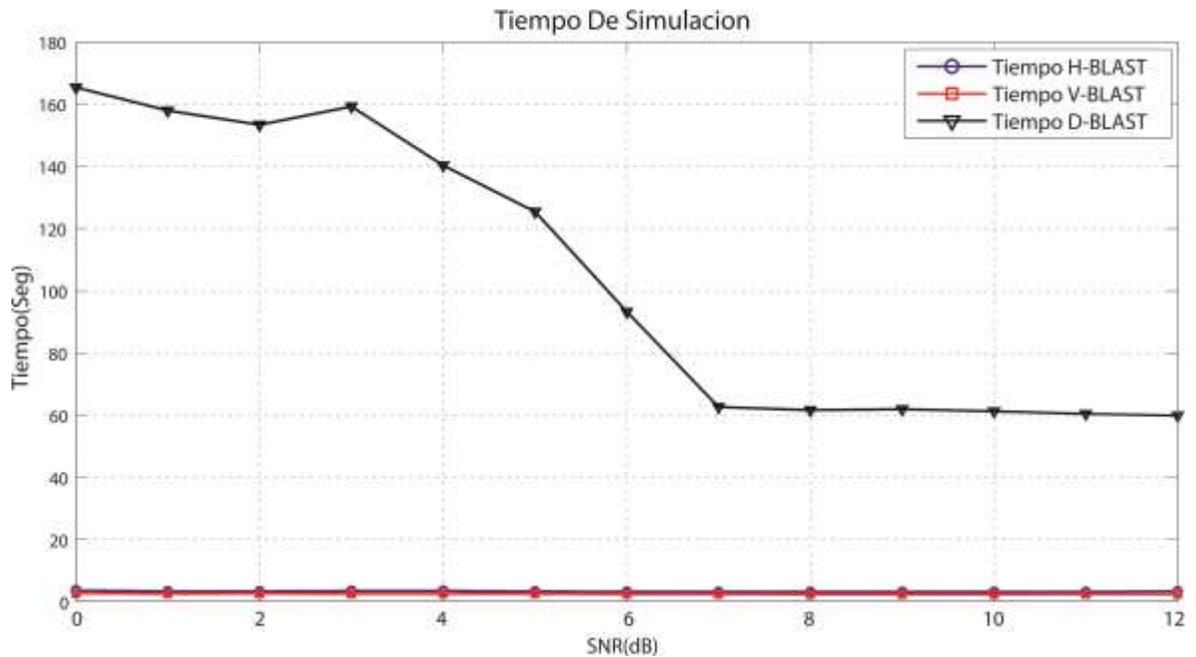


Figura 5.11. Tiempo de simulación para el escenario 3

La figura 5.11 ilustra el tiempo de simulación de cada una de las arquitecturas BLAST. El tiempo de simulación de la arquitectura D-BLAST es mayor que el de las arquitecturas V-BLAST y H-BLAST, en el peor de los casos, es decir en 0 dB, es aproximadamente 40 veces mayor y en el mejor de los casos, en 12 dB, es 15 veces.

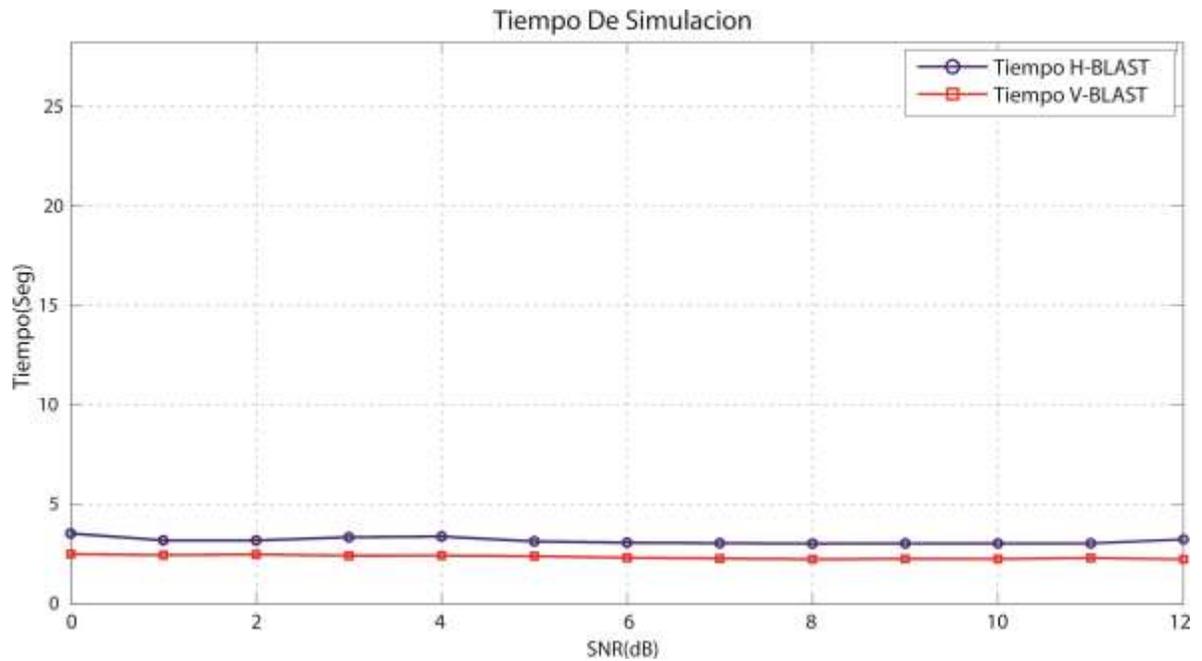


Figura 5.12. Acercamiento Figura 5.11

5.1.4 Escenario 4

Sistema MIMO 4x4 con arquitecturas de multiplexación espacial H-BLAST, V-BLAST y D-BLAST en un canal de transmisión AWGN, modulación 16-QAM y algoritmo de detección esférico. En la figura 5.13 se presentan las curvas de desempeño de dicho sistema.

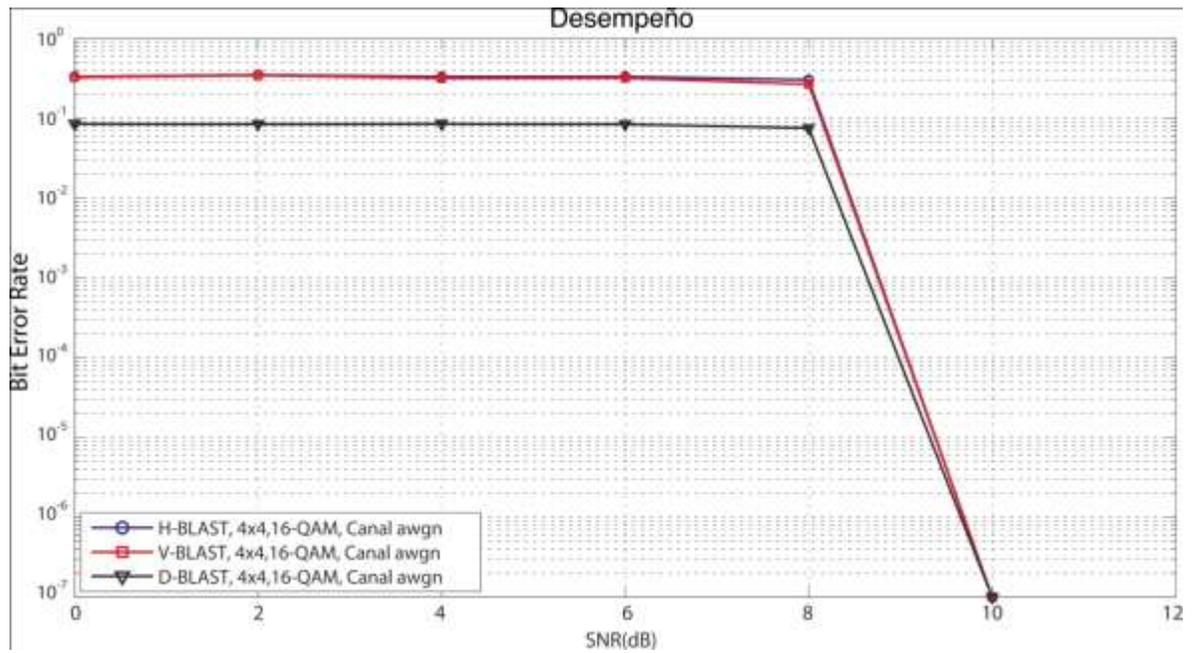


Figura 5.13. Tasa de error de bit (BER) Vs SNR para el escenario 4

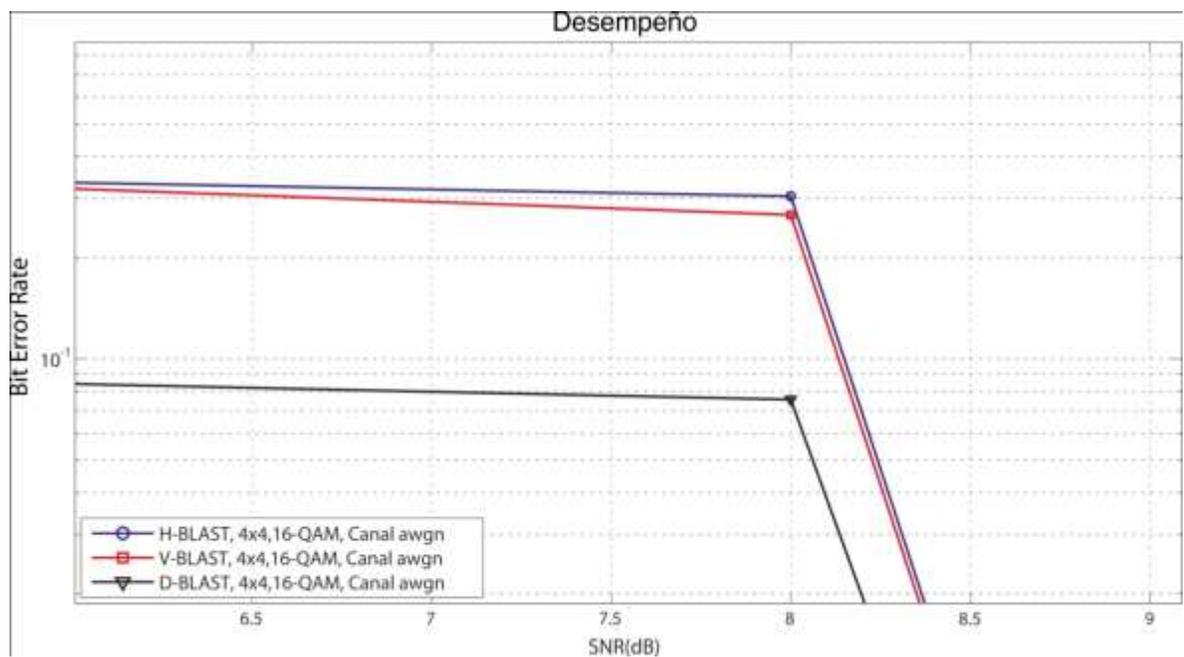


Figura 5.14. Acercamiento Figura 5.13

Considerando los valores presentados en tablas 5.7 y 5.8 obtenidos de la figura 5.13, se observa que el comportamiento de la BER de las arquitecturas BLAST es



similar a los anteriores escenarios; la arquitectura V-BLAST tiene mejor desempeño comparada con la arquitectura H-BLAST, pero al ser comparadas con D-BLAST, esta última presenta los mejores resultados, debido a que D-BLAST presenta valores de BER que no superan los 0.0856, mientras que H-BLAST y V-BLAST tienen una BER máxima de 0.3372 y 0.3354 respectivamente.

D-BLAST requiere de SNR menores para alcanzar ciertos valores de BER en comparación con H-BLAST y V-BLAST, para el caso de BER de 10^{-3} , D-BLAST necesita 8.65 dB mientras que V-BLAST requiere 8.75 dB y H-BLAST 8.78 dB, además el desempeño para el sistema 4x4 es peor que para el sistema 2x2, debido al aumento de BER ocasionado por la presencia de interferencia intersimbólica.

SNR (dB)	BER		
	H-BLAST	V-BLAST	D-BLAST
0	0.3086	0.3354	0.0851
2	0.3220	0.3149	0.0856
4	0.3372	0.3350	0.0845
6	0.3198	0.3220	0.0840
8	0.2922	0.2893	0.0763
10	10^{-7}	10^{-7}	10^{-7}

Tabla 5.7. BER para diferentes valores de SNR (Escenario 4)

BER	SNR (dB)		
	H-BLAST	V-BLAST	D-BLAST
10^{-1}	8.15	8.13	NA
10^{-2}	8.45	8.44	8.30
10^{-3}	8.78	8.75	8.65
10^{-4}	9.07	9.05	8.98
10^{-5}	9.41	9.38	9.31
10^{-6}	9.68	9.68	9.66

Tabla 5.8. SNR para diferentes valores de BER (Escenario 4)

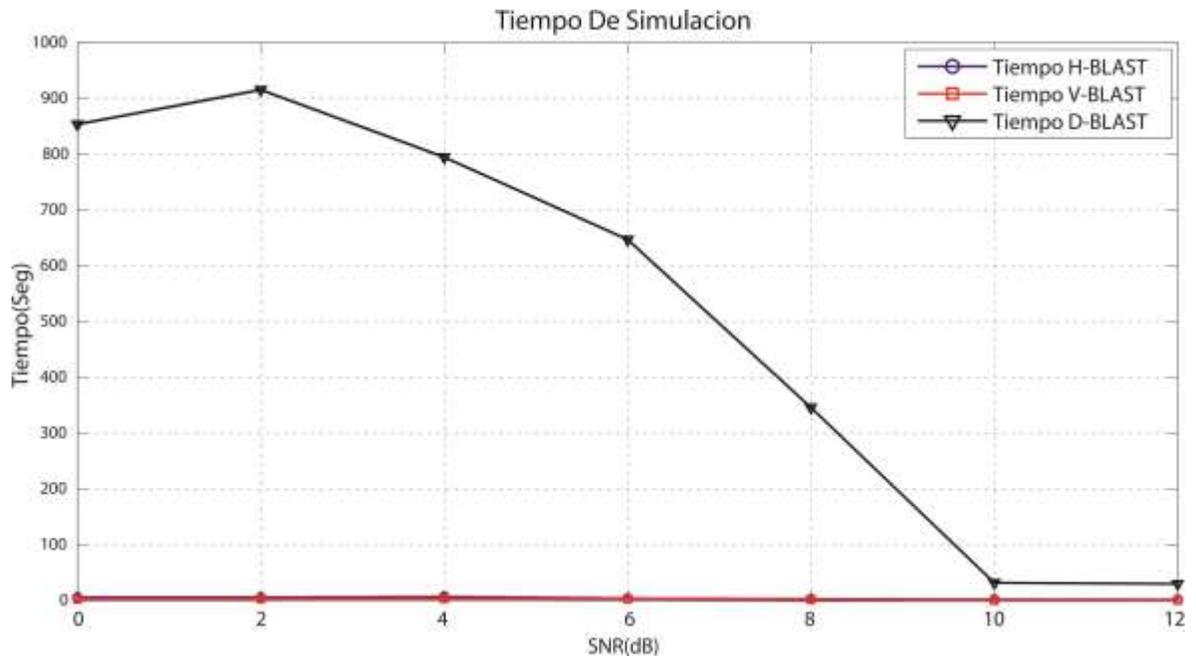


Figura 5.15. Tiempo de simulación para el escenario 4

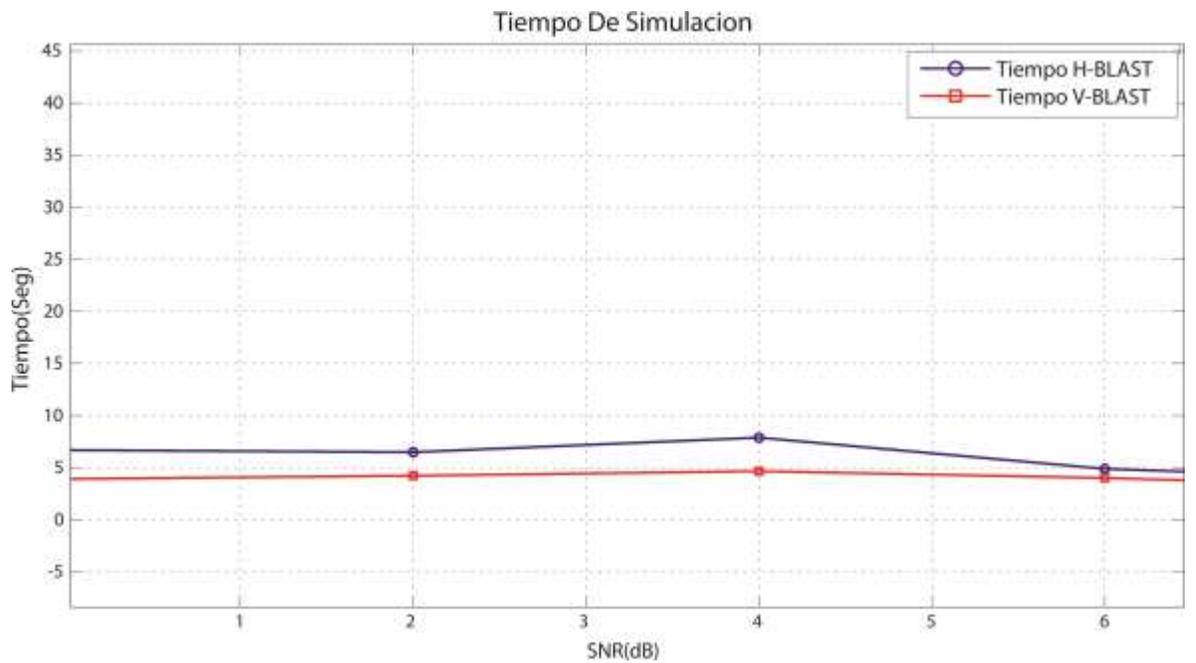


Figura 5.16. Acercamiento figura 5.15



El tiempo de simulación para las arquitecturas BLAST del escenario 4, se muestra en las figuras 5.15 y 5.16, en estas gráficas se visualiza que para un sistema 4x4 el tiempo de simulación aumenta en comparación con un sistema 2x2, por ejemplo, en 2x2. La arquitectura D-BLAST en 0 dB de SNR, necesita alrededor de 165 segundos para realizar la simulación, mientras que en el sistema 4x4 tarda alrededor de 850 segundos.

5.1.5 Tiempo de transmisión

En la figura 5.17 se presenta el tiempo de transmisión de 1024 símbolos en un sistema MIMO 2x2 y 4x4 en canal AWGN con arquitectura V-BLAST.

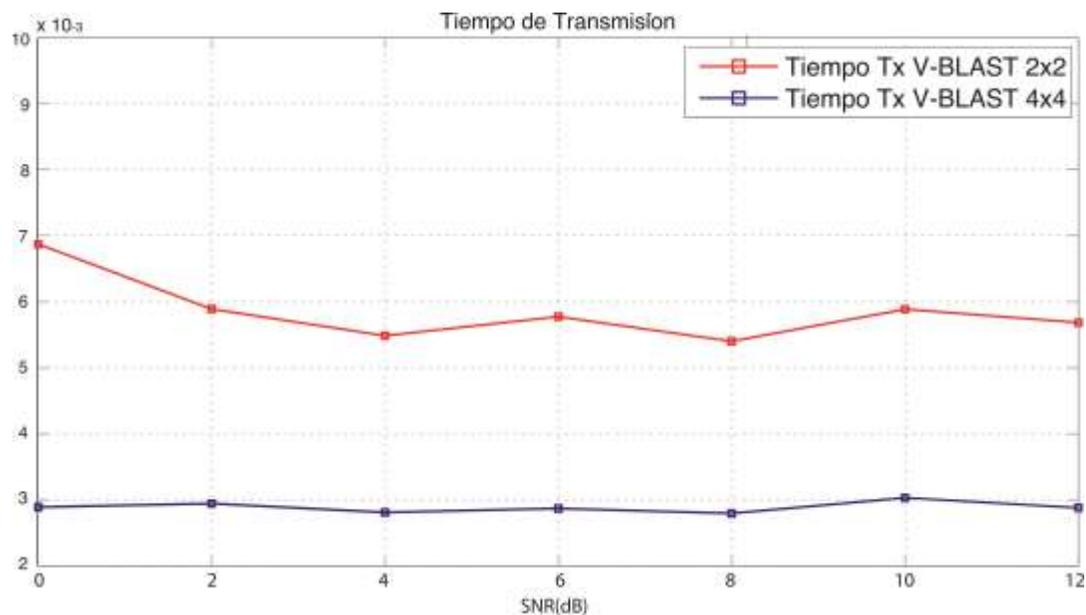


Figura 5.17. Tiempo de transmisión

De la anterior figura se observa que un sistema MIMO 4x4 requiere menor tiempo para realizar la transmisión de la información en comparación con un sistema MIMO 2x2, debido a que la cantidad de información que se envía por un arreglo de antenas 4x4 es mayor a la que se envía por un arreglo 2x2. De los datos consignados en tabla 5.9, se evidencia que el sistema MIMO 4x4 transmite la información en la mitad del tiempo en comparación con el sistemas 2x2, para un valor de SNR de 8dB el sistema MIMO 4x4 tarda 5.4×10^{-3} segundos, mientras que el sistema MIMO 2x2 tarda 2.7×10^{-3} segundos.



SNR (dB)	Tiempo de Transmisión (seg.)	
	MIMO 2X2	MIMO 4X4
0	6.8×10^{-3}	2.8×10^{-3}
2	5.9×10^{-3}	2.9×10^{-3}
4	5.5×10^{-3}	$2,7 \times 10^{-3}$
6	5.7×10^{-3}	2.8×10^{-3}
8	5.4×10^{-3}	2.7×10^{-3}
10	5.9×10^{-3}	3.1×10^{-3}
12	5.7×10^{-3}	2.8×10^{-3}

Tabla 5.9. Tiempos de transmisión en sistemas MIMO 2x2 y 4x4



6. CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones del trabajo de grado.

6.1 CONCLUSIONES

- El análisis comparativo entre las arquitecturas de multiplexación espacial BLAST, demuestra que la arquitectura D-BLAST presenta mejor desempeño en el manejo de SNR y BER, en comparación con H-BLAST y V-BLAST debido a la rotación cíclica del flujo de datos, también permite observar que las arquitecturas V-BLAST y H-BLAST presentan desempeños aproximados aunque V-BLAST supera levemente a H-BLAST debido a la diferencia en el tratamiento de la información que realiza cada una de estas arquitecturas.
- El tiempo de simulación de la arquitectura D-BLAST es más alto, comparado con las otras arquitecturas, esto se debe a los procesos de codificación y decodificación espacio-temporal que se aplican a la señal. Por otra parte, el tiempo de simulación entre las arquitecturas V-BLAST y H-BLAST presentan mínimas diferencias en sus valores, observándose que V-BLAST es la arquitectura que tiene el menor tiempo de simulación.
- Para obtener el modelo de simulación requerido, fue importante adaptar y aplicar una metodología de desarrollo de simulaciones, dado que esta proporcionó una serie de pasos a seguir, los cuales brindaron una comprensión más detallada del sistema que permitió obtener exitosamente los resultados esperados.
- Los resultados obtenidos comprobaron que un sistema MIMO 2x2, presenta mejor desempeño que el ofrecido por un sistema MIMO 4x4, debido al



aumento de la interferencia intersimbólica, consecuencia del incremento en el número de antenas del sistema.

- El incremento de las antenas en los sistemas MIMO que hacen uso de los esquemas de multiplexación espacial BLAST, disminuye el tiempo de transmisión de la información, aumentando su capacidad.
- Cuando se desarrollan simulaciones, es posible estudiar el comportamiento de varios tipos de sistemas y verificar su funcionamiento de forma más sencilla y económica, que en una implementación real. Por esta razón, el desarrollo de simulaciones se convierte en una buena opción, ante la dificultad de construir o adquirir dichos sistemas.
- Las simulaciones realizadas en este trabajo de grado obtuvieron resultados similares a los trabajos y/o investigaciones desarrolladas por otros autores, consiguiendo curvas de desempeño con el mismo comportamiento y valores de comparación de BER y SNR muy cercanos.
- El desempeño de los esquemas de multiplexación espacial BLAST, mejora utilizando en recepción el algoritmo de detección esférico, ya que este último pertenece al conjunto de detectores óptimos, además este desempeño varía de acuerdo al número de antenas y el canal de comunicación utilizado.
- El trabajo desarrollado, servirá a estudiantes de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones y programas de telecomunicaciones, como soporte en el tema de mecanismos de multiplexación espacial BLAST, también como apoyo en aspectos relacionados con sistemas MIMO, modulación digital, modelos de canal y algoritmo de detección esférico.

6.2 TRABAJOS FUTUROS

- Realizar un análisis de los esquemas de multiplexación espacial BLAST en un sistema MIMO, que utilice distintos tipos de modulación y algoritmos de detección, además incluir codificación y entrelazado a la señal.
- Realizar un análisis comparativo de las tasas de velocidad de transmisión de datos en los esquemas de multiplexación espacial en un sistema MIMO.



**Análisis comparativo de los esquemas de multiplexación espacial
V-BLAST, H-BLAST y D-BLAST, en un sistema MIMO**

Alex Sebastián Guzmán Muñoz, Álvaro Raúl Izquierdo Mera
Universidad del Cauca

- Implementar un sistema MIMO con esquemas de multiplexación espacial BLAST sobre una Matriz de Puertas Programables en Campo (FPGA, *Field Programmable Gate Array*) o en un Procesador Digital de Señal (DSP, *Digital Signal Processor*) para analizar su desempeño.



REFERENCIAS

- [1] Y. Guo, *“Advanced MIMO-CDMA Receiver for Interference Suppression: Algorithms, System-on-Chip Architectures and Design Methodology”*, Tesis de Doctorado, Rice University, Houston, Texas, Mayo 2005.
- [2] D. Gesbert, M. Shafi, D, et al, *“From theory to practice: An overview of MIMO space-time coded wireless systems,”* IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Volume: 21, No 3, Abril 2003.
- [3] G. Tsoulos, *“MIMO system technology for wireless communications”*, Taylor & Francis Group, 2006.
- [4] M. Wrulic, *“Capacity Analysis of MIMO Systems”*, Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Viena, Suiza, Enero 2006.
- [5] F. Li, *“Performance Analysis of V-BLAST WMAN Performance Analysis of V-BLAST”*, Tesis de Maestría, Department Of Signal, Sensor And Systems, Royal Institute Of Technology, Estocolmo, Suecia, Junio 2007.
- [6] A. Goldsmith, *“Wireless Communications”*. Cambridge University Press, New York, 2005.
- [7] J. Córdova, *“Evaluación del Rendimiento de la Técnica Multi-Antena (MIMO) En Sistemas Inalámbricos OFDM mediante el desarrollo de un Simulador”*, Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica Del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2009.
- [8] S. Chen, *“The Sphere Decoding Algorithm Applied To Space-Time Block Codes”*, Tesis de Maestría, Department Of Signal, Sensor And Systems, Royal Institute Of Technology, Estocolmo, Suecia, Junio 2003.
- [9] A. Aubanell, A. Benseny, et al, *“Útiles básicos de Cálculo Numérico”*, Labor Universitaria, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España, 1993.
- [10] S. Fariborz, *“Hardware Implementation of V-BLAST MIMO”*, Tesis Doctoral, The University Of New South Wales, Enero 2006.



- [11] R. Trujillo, “Algoritmos Paralelos para la Solución de Problemas de Optimización Discretos Aplicados a la Decodificación de Señales”, Tesis Doctoral, Universidad politécnica de Valencia, Julio 2009.
- [12] C. Torres, I. Páez, “Análisis de un Sistema de Comunicaciones Afectado por los Desvanecimientos Plano y Lento tipo Rayleigh”, Artículo, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, Enero 2008.
- [13] J. Cáceres, “Distribución de Rayleigh y Ricean”, Artículo, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Electrotecnia y Computación, Managua, Nicaragua, Septiembre 2010.
- [14] M. Ochi, “*Ocean waves. The stochastic approach*”, Cambridge University Press, Cambridge, 2005.
- [15] P. Malmkvist, “*Design of an n-path Rayleigh Fading Channel Model in the DSP Canvas simulator*”, Tesis de Maestría en Ciencias, Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suecia, Junio 1997.
- [16] P. Salazar, “Análisis de las tecnologías CDMA y OFDM para comunicaciones en banda ancha multiusuario”, Bachillerato en Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, Julio 2007.
- [17] Y. Soo Cho, J. Kim, et al, “*MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*”, Wiley, Octubre 2010.
- [18] Peebles, Z. Peyton , “Principios de probabilidad, variables aleatorias y señales aleatorias”, Cuarta Edición, Ed. McGraw-Hill, Enero 2006.
- [19] J. Biró, E. Borbély, “*DVB-T OFDM Modulation System*”, Budapest Tech, Budapest, Hungría, 2004.
- [20] R. Cushing, “*A Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis*”, Técnicas para el uso de bloques de procesamiento digital de señales, Analog Devices, Inc., Tech. Rep., Mayo 2009.
- [21] D. Lorente, A. Lorigo, “*BLAST Architecture, Architectures using Wireless Links with a High Percentage of Fading using Multiple Antennas*”, Universidad de Linköpings, Suecia, 2007.



- [22] H. Jafarkhani, “*Space-Time Coding Theory and Practice*”, Cambridge University Press, New York, 2005.
- [23] A. Dowhuszko, “Teoría de la Transmisión de Información sobre Canales MIMO Inalámbricos con Múltiples Usuarios”, Tesis doctoral en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, Marzo 2010.
- [24] O. Damen, A. Chheif, et al, “*Lattice Code Decoder for Space-Time Codes*”, IEEE Communication Letters, Vol. 4, No. 5, Mayo 2000.
- [25] G. Ben Othma, R. Ouertani. “*Hard and soft Spherical Bound Stack decoder for MIMO Systems*”, Artículo, Universidad de Cornell, Estados Unidos, Noviembre 2008.
- [26] E. Astaiza, H. Bermúdez, et al, “Simulación de sistemas de telecomunicaciones”, Arte Imagen, Armenia, Colombia, 2007.
- [27] P. Caicedo, A. Medina, “Análisis de Desempeño del Nivel Físico de un Sistema MIMO Punto a Punto”, Tesis de Pregrado, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2010.