UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Electrónico

PROYECTO TÉCNICO CON ENFOQUE INVESTIGATIVO:

"SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CODIFICACIÓN ESPACIO-TEMPORAL PARA MIMO USANDO D-BLAST"

AUTORES:

FREDDY LEONARDO CARDENAS IÑAMAGUA JAIRO LENIN OTÁÑEZ MORENO

TUTOR:

Ing. Juan Inga Ortega, MgT.

CUENCA – ECUADOR 2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Freddy Leonardo Cárdenas Iñamagua con documento de identificación N° 0105429740 y Jairo Lenin Otáñez Moreno con documento de identificación N° 0604787002, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **"SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CODIFICACIÓN ESPACIO–TEMPORAL PARA MIMO USANDO D-BLAST"**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Electrónico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, diciembre del 2019

AllFreddy

Freddy Leonardo Cárdenas Iñamagua C.I.: 0105429740

/

Jairo Lenin Otáñez Moreno C.I.: 0604787002

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **"SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CODIFICACIÓN ESPACIO-TEMPORAL PARA MIMO USANDO D- BLAST"**, realizado por Freddy Leonardo Cárdenas Iñamagua y Jairo Lenin Otáñez Moreno, obteniendo el *Proyecto Técnico con enfoque investigativo*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, diciembre del 2019

AN THUE

Ing. Juan Paul Inga Ortega. MgT.

C.I.: 0104166491

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Freddy Leonardo Cárdenas Iñamagua con documento de identificación N° 0105429740 y Jairo Lenin Otáñez Moreno documento de identificación N° 0604787002, autores del trabajo de titulación: "SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CODIFICACIÓN ESPACIO– TEMPORAL PARA MIMO USANDO D-BLAST", certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico con enfoque investigativo*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría

Cuenca, diciembre del 2019

AllFraddy

Freddy Leonardo Cárdenas Iñamagua C.I.: 0105429740

1 des

Jairo Lenin Otáñez Moreno C.I.: 0604787002

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Ing. Juan Inga, por su colaboración, exigencia y guía para cumplir con todos los objetivos propuestos para este trabajo de titulación.

De igual forma agradezco a mi familia por su apoyo incondicional a lo largo de este periodo de formación., siendo pilares fundamentales para conseguir un título profesional.

Freddy Leonardo Cárdenas Iñamagua

Agradezco primeramente a mi familia por brindarme el apoyo necesario para lo alcanzado en esta meta, ya que fueron de suma importancia por abrirme las puertas en el camino hacia la vida profesional.

De igual manera el reconocimiento al Ing. Juan Inga, por ser un apoyo académico y sabernos guiar durante las etapas del desarrollo de nuestro proyecto técnico.

Jairo Lenin Otáñez Moreno

DEDICATORIAS

Este trabajo de titulación está dedicado a mis padres por ser la mayor motivación para cumplir este objetivo y crecer profesionalmente. Los mejores resultados se consiguen con grandes retos.

Freddy Leonardo Cárdenas Iñamagua

Dedico este proyecto principalmente a Dios, por brindarme la sabiduría necesaria y fuerza suficiente para seguir adelante con este gran reto.

De igual forma a mis amados padres, que supieron comprender y apoyarme tanto en la parte económica como emocional en todas las adversidades que se presentaron a lo largo de la carrera Universitaria.

Por último, a mis hermanos por creer y tener confianza en el cumplimiento de todos mis objetivos académicos.

Jairo Lenin Otáñez Moreno

ÍNDICE GENERAL

AgradecimientosI
Dedicatorias II
Índice General III
Índice de FigurasV
Índice de Tablas VIII
ResumenX
IntroducciónXI
Antecedentes del Problema de EstudioXIII
Justificación (Importancia y Alcances)XIV
ObjetivosXVI
Objetivo GeneralXVI
Objetivos EspecíficoXVI
CAPITULO 1. Codificación Espacio Temporal BLAST Para MIMO 1
1.1 Tecnología 5G 1
1.2 Comunicaciones MIMO2
1.3 Tipos de diversidades para Comunicaciones MIMO4
1.3.1 Diversidad Espacial41.3.2 Diversidad Temporal41.3.3 Diversidad de Código51.3.4 Diversidad de Usuario51.3.5 Análisis de diversidad61.4 Codificación Espacio–Temporal (ST) y Multiplexación Espacial (SM)7
1.4.1 Codificador ST Alamouti 8 1.4.2 Multiplexación espacial H-BLAST 11 1.4.3 Multiplexación espacial V-BLAST 14 1.4.4 Multiplexación espacial D-BLAST 15 1.4.5 Ventajas y desventajas de los codificadores espacio temporales IMPLEMENTADOS 22 CAPITULO 2. Simulación e Implementación de D-BLAST sobre Sistemas de Radio Definido por Software (SDR) 27
a ruaro Dermito por Dortura (DDT).

2.1 Transmisor	. 28
2.1.1 Codificador de Texto a Bits.	. 29
2.1.2 Demultiplexación de Bits	. 30
2.1.3 Codificador de Canal Convolucional	. 31
2.1.4 Modulación Digital	.32
2.1.5 Transmisor D-BLAST	.33
2.1.6 Secuencia de Entrenamiento	35
2.1.7 Filtro de Conformación de Pulso o Pulse Shape	.37
2.2 Canal	. 38
2.3 Receptor.	. 38
2.3.1 Detector de la señal recibida.	. 40
2.3.2 Filtro de Conformación de Pulso o Pulse Shape	.43
2.3.3 Sincronización de sÍmbolo	.44
2.3.4 Sincronización de trama.	45
2.3.5 Estimación de canal	46
2.3.6 Decodificador espacio temporal D-BLAST.	.51
2.3.7 Demodulación	.56
2.3.8 Decodificador Convolucional	58
2.3.9 Multiplexación	58
2.3.10 Análisis del número de errores recibidos	.59
2.3.11 Decodificador de Bits a Texto	. 60
2.4 Sincronización de Equipos	. 60
2.5 Configuraciones y Especificaciones	. 62
CAPITULO 3. Análisis de Resultados	. 64
3.1 Simulacion	. 65
3.2 Implementacion	. 70
3.3 Comparación entre Simulación e Implementación	.71
CAPITULO 4. Conclusiones y Recomendaciones	.73
Referencias Bibliográficas	.76
Apéndices	. 79
Apéndice A: Fotografías	. 79
Apéndice B: Diagramas de bloques utilizados en la implementaci	IÓN
DEL TRASMISOR PARA EL SISTEMA DE COMUNICACIONES MIMO	. 85
Apéndice C: Diagramas de bloque utilizados en la implementaci	IÓN
DEL RECEPTOR PARA EL SISTEMA DE COMUNICACIONES MIMO	.92

	APÉNDICE	D:	Código	EN	MATLAB	PARA	LA	SIMULACIÓN	DEL	SISTEMA
MIMC)			•••••						100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de un sistema de comunicación MIMO	3
Figura 1.2 Arquitectura de un sistema de Codificación Espacio Temporal	7
Figura 1.3 Diagrama de bloques de una Codificación Alamouti	9
Figura 1.4 Diagrama de bloques de una Codificación H-BLAST	. 12
Figura 1.5 Diagrama de bloques de una Codificación V-BLAST	. 15
Figura 1.6 Diagrama de bloques de una Codificación D-BLAST	. 17
Figura 1.7 Diagrama de una comunicación inalámbrica aplicando D-BLAST	. 26
Figura 2.1 Diagrama de bloques del trasmisor MIMO 3X2 simulado	. 28
Figura 2.2 Diagrama de bloques del trasmisor MIMO 3X2 implementado	. 29
Figura 2.3 Diagrama de bloque de la conversión de texto a bits	. 29
Figura 2.4 Representación binaria de tres letras	. 30
Figura 2.5 Diagrama de flujo bloque de la conversión de texto a bits	. 30
Figura 2.6 Diagrama de bloque del demultiplexor	. 30
Figura 2.7 Diagrama de flujo del bloque de demultiplexación	. 31
Figura 2.8 Proceso de codificación convolucional.	. 31
Figura 2.9 Diagrama de bloque del codificador convolucional	. 32
Figura 2.10 Diagrama de flujo del bloque de codificación convolucional	. 32
Figura 2.11 Diagrama de bloque del modulador	. 33
Figura 2.12 Diagrama de flujo del bloque de modulación	. 33
Figura 2.13 Diagrama de bloque del trasmisor D-BLAST	. 34
Figura 2.14 Diagrama de flujo del bloque de codificación D-BLAST	. 35
Figura 2.15 Diagrama de bloque de la secuencia de entrenamiento	. 36
Figura 2.16 Diagrama de flujo de la secuencia de entrenamiento agregada	. 36
Figura 2.17 Diagrama de bloque del filtro de conformación de pulso en el Tx	. 37
Figura 2.18 Diagrama de flujo del filtro de conformación de pulso en el trasmisor	: 37
Figura 2.19 Representación del canal para un sistema MIMO 3X2	. 38
Figura 2.20 Diagrama de bloques del receptor MIMO 3X2 simulado	. 39
Figura 2.21 Diagrama de bloques del receptor MIMO 3X2 implementado	. 40

Figura 2.22 Diagrama de bloques del detector de señal recibida 4	0
Figura 2.23 Diagrama de flujo del bloque detector de señal recibida4	3
Figura 2.24 Diagrama de bloques del filtro de conformación de pulso en el Rx 4	.3
Figura 2.25 Diagrama de flujo del filtro de conformación de pulso en el receptor4	4
Figura 2.26 Diagrama de bloques de la sincronización de símbolo4	4
Figura 2.27 Diagrama de flujo para el bloque de sincronización de símbolo4	5
Figura 2.28 Diagrama de bloques de la sincronización de trama	5
Figura 2.29 Diagrama de flujo para el bloque de sincronización de trama	6
Figura 2.30 Diagrama de bloques de la estimación de canal5	0
Figura 2.31 Diagrama de flujo para el bloque de estimación de canal5	0
Figura 2.32 Diagrama de bloques del decodificador D-BLAST	6
Figura 2.33 Diagrama de flujo para el bloque de decodificación D-BLAST5	6
Figura 2.34 Diagrama de bloques del demodulador5	7
Figura 2.35 Diagrama de flujo para el bloque de demodulación5	7
Figura 2.36 Diagrama de bloques del decodificador convolucional5	8
Figura 2.37 Diagrama de flujo para el bloque de decodificación convolucional 5	8
Figura 2.38 Multiplexado de las subtramas o subflujos5	9
Figura 2.39 Diagrama de bloques del multiplexor5	9
Figura 2.40 Diagrama de flujo para el bloque multiplexor5	9
Figura 2.41 Diagrama de bloques del analizador de errores recibidos6	0
Figura 2.42 Diagrama de bloques del conversor de bits a texto6	0
Figura 2.43 Diagram de conexion del equipo de sincronizacion CDA-29906	0
Figura 3.1. Curvas del BER obtenidas de simulación del sistema MIMO 2X2 par	·a
tres tipos de Técnicas D-BLAST diferentes6	5
Figura 3.2. Curvas del SER obtenidas de simulación del sistema MIMO 2X2 par	a
tres tipos de Técnicas D-BLAST diferentes6	6
Figura 3.3 Curvas del BER obtenidas de simulación del sistema MIMO 3X2 para tre	?S
tipos de Técnicas D-BLAST diferentes6	6
Figura 3.4. Curvas del SER obtenidas de simulación del sistema MIMO 3X2 par	a
tres tipos de Técnicas D-BLAST diferentes6	7
Figura 3.5. Comparación del BER entre los dos sistemas de comunicación MIM	0
2X2, 3X2 y 4X3 simulados aplicando D-BLAST6	8
Figura 3.6 Comparación del SER entre los dos sistemas de comunicación MIM	0
2X2, 3X2 y 4X3 simulados aplicando D-BLAST6	9

Figura	3.7.	Comparación	del	BEF	R de	los	tres	sistema	s de	comun	icac	ción
implem	entado	<i>s</i>	•••••	•••••	•••••	•••••			•••••	•••••	•••••	. 70
Figura	3.8.	Comparación	del	SEF	R de	los	tres	sistemas	s de	comun	icac	ción
implem	entado	<i>s</i>		•••••	•••••			•••••		•••••	•••••	.71
Figura	3.9.	Comparación	del	BER	de la	a sin	nulaci	ón e imp	oleme	ntación	de	los
sistema	s de co	omunicación M	IMO	reali	zados	para	ı D-BL	AST	•••••	•••••	•••••	.72
Figura	3.10.	Comparación	del	SER	de la	ı sin	iulacio	ón e imp	oleme	ntación	de	los
sistema	s de co	omunicación M	IMO	reali	zados	para	ı D-BL	AST	•••••	•••••	•••••	.73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Resumen y Optimización de los tipos de diversidades6
Tabla 1.2 Subflujos para cada antena de transmisión antes de aplicar D-BLAST 17
Tabla 1.3 Señales transmitidas en la comunicación D-BLAST con 2 antenas Tx 18
Tabla 1.4 Señales recibidas en la comunicación D-BLAST con 2 antenas Rx 19
Tabla 1.5Propuesta de decodificación D-BLAST en forma de Capas.20
Tabla 1.6 Señales transmitidas en la comunicación D-BLAST con 4 antenas Tx 21
Tabla 1.7 Coeficientes de canal para una comunicación inalámbrica MIMO 4X3
aplicando D-BLAST
Tabla 1.8. Señales recibidas en la comunicación D-BLAST con 3 antenas Rx 22
Tabla 1.9 Ventajas y desventajas de los codificadores espacio temporal.23
Tabla 2.1 Señales transmitidas en la comunicación D-BLAST con 3 antenas Tx 34
Tabla 2.2 Matriz que forma la secuencia de entrenamiento para 3 canales36
Tabla 2.3 Señales recibidas para el sistema MIMO 2X2 aplicando D-Blast
Tabla 2.4 Señales recibidas para el sistema MIMO 3X2 aplicando D-Blast
Tabla 2.5 Señales recibidas para el sistema MIMO 4x3 aplicando D-Blast
Tabla 2.6 Simbolos recibidos por el sistema MIMO 2X2 sin la secuencia de
entrenamiento
Tabla 2.7 Simbolos recibidos por el sistema MIMO 3X2 sin la secuencia de
entrenamiento
Tabla 2.8 Simbolos recibidos por el sistema MIMO 4X3 sin la secuencia de
entrenamiento
Tabla 2.9 Técnica D-BLAST 1 para la decodificación D-BLAST del sistema MIMO
2X2
Tabla 2.10 Técnica D-BLAST 2 para la decodificación D-BLAST del sistema MIMO
2X2
Tabla 2.11 Técnica D-BLAST 1 para la decodificación D-BLAST del sistema MIMO
<i>3X2</i>
Tabla 2.12 Técnica D-BLAST 2 para la decodificación D-BLAST del sistema MIMO
<i>3X2</i>

Tabla 2.13 Técnica D-BLAST 3 para la decodificación D-BLAST del sistema M	IMO
3X2	54
Tabla 2.14 Parámetros para la sincronización interna y externa del USRPX310.	61
Tabla 2.15 Parámetros utilizados en la implementación	62
Tabla 2.16 Equipos utilizados en la Implementación	63

RESUMEN

Con el objeto de brindar una herramienta que permita el análisis de un sistema de Comunicaciones MIMO y además evaluar escenarios donde el número de antenas de recepción puede ser menor o igual al número de antenas de transmisión, este trabajo describe el proceso de simulación e implementación de un sistema de codificación espacio-temporal para MIMO usando la técnica de codificación D-BLAST. Así, en la búsqueda de establecer el proceso de codificación y decodificación para la implementación, se ha desarrollado en primera instancia, un simulador del codificador espacio-temporal D-BLAST. En este sentido, la segunda etapa desarrolla la implementación correspondiente basada en la simulación a través del uso de los equipos Periféricos Universales de Radio por Software (USRP) que pertenecen al laboratorio de Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca. El desarrollo de este trabajo considera el uso de N_T antenas de transmisión y N_R antenas de recepción y con esto un sistema MIMO de $N_{Tx} \times$ N_{Rx} . Debido a las restricciones del número de equipos la implementación permite un sistema de hasta 3×2 . Para validar los resultados se usa un esquema básico de modulación de 4QAM además de usar un codificador de canal convolucional. Las figuras de mérito que han sido usadas para el desarrollo de este trabajo es la tasa de error de bit BER y la tasa de error de símbolo SER. Cabe mencionar que los resultados son comparados con el rendimiento de un codificador espacio-temporal de uso clásico como el de Alamouti.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los sistemas de comunicaciones inalámbricas necesitan una mayor tasa de transmisión de datos para los usuarios buscando incrementar la cantidad de estos. Por esta razón, se han investigado nuevos métodos y esquemas de trasmisión que permitan usar, entre otros, la diversidad espacial para maximizar la capacidad del sistema. Cada uno de estos métodos buscan maximizar la llamada diversidad, ya sea de tiempo, frecuencia o espacio entre otras. En este sentido, uno de los métodos más utilizados para lograr diversidad espacial es MIMO que trata de una técnica que está compuesta de varias antenas tanto en el transmisor como en el receptor.

Así, con el desarrollo de esta tecnología se han generado varias técnicas para brindar robustez en las señales transmitidas para disminuir el desvanecimiento y probabilidad de error tomando en cuenta que, en los sistemas inalámbricos MIMO, el canal combina las señales transmitidas en cada una de las antenas de recepción. Entonces, para separar los efectos del canal sobre los símbolos recibidos que son combinados en el receptor, se han desarrollado técnicas de codificación espacio– temporal. Los laboratorios Bell tienen propuestas para este tipo de codificación empleando Arquitectura por Capas Espacio–temporales (**Bell Laboratorios Arquitecture Layered Space-Time / BLAST**) en formato Vertical, Horizontal y Diagonal conocidas como V-BLAST, H-BLAST y D-BLAST respectivamente.

De entre las técnicas BLAST, D-BLAST propone una arquitectura donde se despliega una diversidad temporal y espacial ya que varias copias de los símbolos de información se transmiten a través de cada antena de transmisión usando un esquema diagonal en la codificación espacio-temporal de manera que los datos a transmitir, pasan por un proceso de demultiplexación y reordenamiento de los símbolos a transmitir. Es decir que, el flujo de datos principal que ingresa al sistema se divide en subflujos dependiendo del número de antenas de transmisión (N_{Tx}). Entonces cada símbolo pasa a ser codificado o distribuido a través de una matriz denominada de transmisión con (N_{Tx}) filas por ($2N_{Tx} - 1$) columnas. De acuerdo con todo lo mencionado, esta técnica de trasmisión hace uso la codificación espacial cuando divide el flujo de datos que se va a enviar para el numero de antenas de trasmisión, de tal forma que cada columna de la matriz del codificador corresponde un tiempo de trasmisión diferente.

Es necesario mencionar que este trabajo evalúa el proceso para la implementación de D-BLAST usando los equipos USRP para brindar una herramienta adecuada del estudio práctico de MIMO en ambientes cerrados (indoor) verificando el rendimiento del sistema de comunicaciones mediante las figuras de mérito BER y SER. De igual forma se detalla cómo implementar las ecuaciones del modelo matemático generalizando el proceso para N_{Tx} antenas de transmisión y N_{Rx} antenas de recepción.

ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO

El desarrollo en las telecomunicaciones impulsa la investigación e implementación de nuevos esquemas y técnicas de transmisión que permitan mejorar el rendimiento de los sistemas de comunicaciones MIMO. Gracias a esto se puede incrementar la diversidad espacial en el mismo canal y minimizar la tasa de error de bit (BER), al disponer en varios instantes de tiempo más versiones de las señales originales transmitidas. Así, si los canales son independientes la probabilidad de que ocurra un desvanecimiento profundo y simultáneo en todos los canales disminuye. [1] Hay otras tecnologías como por ejemplo de entrada múltiple y salida única (MISO), que tiene varias antenas en el trasmisor y una sola antena en el receptor, y de entrada única y salida múltiple (SIMO), que posee una sola antena en el transmisor y varias antenas en el receptor, MIMO combina los esquemas de transmisión de estas dos tecnologías para ofrecer una mayor tasa de trasmisión de datos [1].

Entonces la codificación espacio-temporal es un método empleado en las comunicaciones inalámbricas basadas en MIMO para mejorar la fiabilidad de la transmisión de datos enviando redundantes copias codificadas de una trama de datos por cada antena transmisora [1]. Cuando hay múltiples copias de información en el receptor, el decodificador debe ser robusto para realizar el análisis entre las versiones del mismo flujo de datos y obtener la información correcta.

Existen diferentes técnicas que buscan aprovechar la diversidad espacial en el canal como, los codificadores espacio temporal por bloque STBC, por codificación de Trellis STTC, codificadores espacios temporales ortogonales por bloque OSTBC. Además, están los codificadores espacio temporal de múltiples antenas, desarrollado por los laboratorios Bell, llamados, V-BLAST, H-BLAST o D-BLAST, nombrados así por el estilo de tomar la información en símbolos y codificarlos ya sea de forma vertical (V-BLAST), horizontal (H-BLAST), o diagonal (D-BLAST). Estos codificadores son conocidos como Multiplexación Espacial, usado como un codificador espacio temporal ST. Los esquemas BLAST son implementados en el estándar IEEE 802.11n por ejemplo mostrando ser esquemas de alto impacto.

JUSTIFICACIÓN (IMPORTANCIA Y ALCANCES)

El motivo para realizar el análisis y simulación de un codificador espaciotemporal para MIMO, se debe a que es una tecnología de las comunicaciones inalámbricas que presenta mejores resultados y que se propone como obligatoria para las redes quinta generación (5G). Se espera que esta tecnología permita realizar un entorno del Internet de las Cosas masivo en el cual las redes pueden satisfacer las necesidades de comunicación de miles de millones de dispositivos conectados, con un balance entre velocidad, latencia y costo.

Los sistemas MIMO surgen como la tecnología que promete resolver problemas de transmisión y recepción en un futuro inmediato, ya que ofrece mejores resultados como mayores tasas de transmisión, mayor capacidad de usuarios y más fiabilidad del sistema. Estos resultados favorables son las principales razones por que se realizará la simulación e implementación de un sistema de comunicaciones MIMO, aplicando una codificación espacio–temporal, aplicando D-BLAST.

Este tipo de codificación actúa como una configuración de flujos de datos dispuestos de forma diagonal para lograr que pasen por todas las antenas de transmisión, de esta manera se consigue tener una mejor detección de símbolos en el receptor, para ello se implementara tres métodos empíricos en el receptor, cabe recalcar que los símbolos que se transmiten forman una matriz, con un tamaño que dependerá del número de antenas de transmisión El primer método que se aplicara en el receptor consiste, en promediar cada uno de los símbolos transmitidos en las diferentes posiciones de las columnas donde se repite cada símbolo, ya que el mismo se distribuye de forma diagonal en cada una de las filas de la matriz pero con una interferencia de otros símbolos. El segundo método es similar al primero, pero en este caso se restará la interferencia. Para el tercer método es necesario saber que la mayor interferencia se encontrara en la columna de la mitad de la matriz, ya que aquí se suman todos los símbolos transmitidos, por esta razón en este método se despreciara esta columna y se realizara el promedio en las otras columnas, similar a los métodos ya mencionados. Desplegar una plataforma experimental que sea capaz de evaluar estos sistemas no solo a través de simulaciones, sino también a través de la implementación.

El aporte de este trabajo de titulación está en evaluar los resultados obtenidos al implementar este tipo de configuración para transmitir por un sistema MIMO mediante el análisis de las gráficas de la tasa de error de bit (BER), con el objetivo de encontrar la mejor técnica de detección para este tipo de comunicación. Esta implementación se realizará con los equipos del laboratorio de Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, y se analizará el comportamiento de D-BLAST en un canal indoor.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

• Simular e Implementar un codificador espacio-temporal D-BLAST para sistemas MIMO.

OBJETIVOS ESPECÍFICO

- Realizar un estado del arte de codificadores espacio-temporal BLAST y sus aplicaciones, identificando la versión con mayores potenciales.
- Simular la técnica de trasmisión D-BLAST.
- Implementar el sistema de codificación espacio-temporal D-BLAST para MIMO usando los equipos del laboratorio de Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.
- Analizar los resultados de la gráfica del BER y SER obtenidos en la práctica y compararlos con la simulación.

CAPITULO 1. CODIFICACIÓN ESPACIO TEMPORAL BLAST PARA MIMO

En este capítulo se describe un estudio teórico sobre la tecnología MIMO que permite el despliegue de la llamada quita generación de comunicaciones móviles (5G). Además, se describen varios tipos de codificación espacio-temporal que pueden ser implementados en dicha tecnología. Finalmente, se muestra un esquema propuesto de comunicación inalámbrica aplicando una codificación espacio temporal D-BLAST.

1.1 TECNOLOGÍA 5G

El sistema de comunicaciones móviles 5G (Quinta Generación), propone solucionar problemas que limitan la capacidad de la red en la actualidad. En este sentido, se busca mejorar el ancho de banda de las comunicaciones móviles que incluyen alta velocidad, baja latencia, alta disponibilidad, confiabilidad y seguridad para admitir servicios como los vehículos autónomos y la salud móvil [2].

De esta manera, con 5G el dispositivo móvil podrá establecer una conexión por lo menos unas 10 veces más rápida comparada con la tecnología 4G (velocidad promedio de 4G en Ecuador 23,29 Mbps) [3], alcanzando velocidades teóricas de trasmisión entre 3 Gbps y 20 Gbps, siendo esto suficiente para transmitir un video de "8K" o descargar una película 3D en 30 segundos, mientras que en 4G tarda 6 minutos. Además del incremento de la capacidad de transmisión, se busca también confiabilidad para hacerlo [4]. Las redes 5G también reducirán considerablemente el tiempo de retraso o latencia a menos de 1 milisegundo entre los equipos que se comunican, esto significa una comunicación sin interrupciones entre dispositivos y servidores [4].

Para lograr estos beneficios, entre diferentes opciones, la tecnología 5G necesitaría funcionar en frecuencias portadoras extremadamente altas [2]. En este sentido, se han definido tres bandas de funcionamiento; por debajo de 1 GHz, entre 1-6 GHz y por encima de 6 GHz para brindar una cobertura amplia y admitir todos los casos [5][6]. La operación con frecuencias altas es posible alcanzar mayores velocidades; pero, se vuelven considerablemente débiles al ser aplicadas en distancias largas. Esto implica que, los radios de cobertura se reducirán y por tanto el número de estaciones bases y dispositivos se incrementara [4]. De acuerdo con lo mencionado, es menester mencionar que en el caso de Ecuador, se ha iniciado las primeras pruebas en la banda de 3.5 GHz para proporcionar altas velocidades de datos a las decenas de miles de usuarios en la localidad [7].

En definitiva, la evolución del 5G no es similar a la migración de tecnología de 3G a 4G, ya que el enfoque ahora es obtener el mayor número de usuarios en la red, permitiendo una alta conectividad entre sus dispositivos, considerando la energía de consumo, la capacidad del canal y el ancho de banda [4].

Para disponer de una alta cantidad de dispositivos conectados con bajas latencias y grandes tasas de transmisión de datos, es necesario de un impacto tecnológico importante en la red de acceso (RAN) y en el núcleo de la red. Entre estos cambios tecnológicos, está la propuesta del uso de MU-MIMO (MIMO Multiusuario) y del MIMO Masivo para comunicaciones móviles, cambios propuestos con el objetivo de poder tener un crecimiento de la red, además de ofrecer buenas características adaptables para la comunicación en 5G [6]. En la siguiente Subsección se explica la definición, características y ventajas del uso del sistema MIMO en comunicaciones inalámbricas.

1.2 COMUNICACIONES MIMO

Los sistemas MIMO, acrónimo en inglés de Multiple-Input Multiple-Output (en español, Múltiple entrada, Múltiple salida) surge como como una de las tecnologías más prometedoras para ser aplicada en los sistemas inalámbricos 5G, considerando las múltiples antenas en el extremo de transmisión y recepción, como se puede observar en la Figura 1.1 [8]. Es común representar un sistema de comunicaciones MIMO con la nomenclatura MIMO $N_{Tx} \times N_{Rx}$, que representa a la cantidad de antenas que se utiliza en el trasmisor N_{Tx} y en el receptor N_{Rx} .



Figura 1.1 Diagrama de un sistema de comunicación MIMO

La tecnología MIMO propone el uso de MU-MIMO o conocido también como MIMO Multiusuario, que permite a un equipo de transmisión o recepción comunicarse con múltiples dispositivos de forma simultánea, con el objetivo de reducir el tiempo de espera de los dispositivos conectados para recibir la señal inalámbrica e incrementa significativamente la velocidad de la red. Otra propuesta es MIMO Masivo, que trata de la aplicación de un número elevado de antenas de transmisión y recepción para comunicaciones móviles, es por esto por lo que ofrece grandes posibilidades futuras en cuanto al crecimiento de la red, además de ofrecer buenas características adaptables para la comunicación en 5G [9].

Entonces, MIMO específica el uso de múltiples señales que viajan con la misma frecuencia y de forma simultánea por un solo canal, aprovechando la propagación multi-trayecto para incrementar la eficiencia espectral del sistema de comunicaciones inalámbrico. Para lograr esto se aplica la diversidad espacial o de antena (Ver Subsección 1.3.1) y algunas técnicas de trasmisión como los codificadores espacio–temporal [8].

El concepto de la tecnología MIMO se puede confundir con el de Smart Antenna (en español Antenas Inteligentes), debido a que también consiste en utilizar varias antenas espacialmente distribuidas (diversidad espacial) y algoritmos de tratamiento de señales para aplicar conformadores de haces así establecer la zona de radiación de Radio Frecuencia (RF). Pero, en realidad MIMO se considera como una versión extendida de Smart Antenna, sus principales diferencias son el comportamiento ante la propagación multi-trayecto y la multidimensionalidad. La tecnológica de Smart Antenna considera que la propagación multi-trayecto es perjudicial así se aplique cualquier técnica de mitigación, e intenta minimizar su daño, en cambio MIMOx, aprovecha la propagación multi-trayecto para incrementar la tasa efectiva de trasmisión y la fiabilidad, no trata de disminuir su efecto, sino que, la utiliza para llevar más información. Además, Smart Antenna al igual que los sistemas actuales de comunicación representan sistemas unidimensionales, mientras que MIMO propone sistemas innovadores multidimensionales, es decir permite enviar varias señales de datos simultáneamente y por el mismo canal [8].

1.3 TIPOS DE DIVERSIDADES PARA COMUNICACIONES MIMO

Una de las ventajas de las comunicaciones MIMO son los diferentes tipos de diversidades que se obtiene al enviar varias copias de la señal transmitida. Por esta razón, en esta sección se abordarán las diversidades que se pueden aplicar en los sistemas MIMO, tales como diversidad espacial, diversidad temporal, diversidad de código y diversidad de usuarios.

1.3.1 DIVERSIDAD ESPACIAL

La diversidad espacial también conocida como diversidad de antena, que es llamada así debido a las múltiples antenas instaladas con una separación adecuada, tanto en el lado del trasmisor como en el del receptor. Las señales que se propagan sufren un desvanecimiento independiente creando diferentes rutas o trayectos diferenciados para enviar la información [10].

La separación que se requiere entre las antenas está en función de la frecuencia de la portadora y de la dispersión local del medio. Por lo general para los sistemas MIMO que se encuentran instalados en torres se maneja un estándar de separación entre antenas, que es igual a diez veces el ancho de banda de la portadora [11].

1.3.2 DIVERSIDAD TEMPORAL

La diversidad temporal es una técnica donde se transmite una señal de información repetida en diferentes intervalos de tiempo, la separación de estos intervalos es necesaria para que las señales recibidas estén sujetas a desvanecimientos independientes [12][13].

Sin embargo, la diversidad de tiempo genera un retraso de transmisión, ya que utiliza varios tiempos para enviar las múltiples copias de la señal. La ventaja de este tipo de diversidad es que se reduce la probabilidad de error de bit (BER), pero la desventaja es que disminuye la tasa efectiva de transmisión, debido al incremento de tiempos para trasmitir [13].

1.3.3 DIVERSIDAD DE CÓDIGO

La diversidad de código es una técnica muy aplicada para el control de fallas, transmite la señal de información utilizando códigos de detección, convolucionales y espacio-temporales. Cada uno de estos códigos fortalecen la robustez en la transmisión, aprovechando los multi-trayectos del canal. Además, el sistema de comunicación necesita un conocimiento del canal para que los datos logren ser recuperados y tengan una transparencia para los usuarios finales [14][15].

La ventaja de este tipo de diversidad es que se puede tener diferentes bloques de codificación en un mismo sistema. Los códigos de detección son capaces de añadir los bits de redundancia necesarios para minimizar la capacidad de detección, esto reduce la probabilidad de los errores no detectados. Los códigos convolucionales tienen la ventaja de tener memoria, donde los bits codificados dependerán de los bits originales para obtener los nuevos bits, se dice que posee memoria debido a las unidades de registro de desplazamiento que utiliza para almacenar los bits generados por la operación de sumas exclusivas, que se encuentra dentro de este bloque [15].

1.3.4 DIVERSIDAD DE USUARIO

Este tipo de diversidad se da cuando el trasmisor selecciona el mejor usuario entre varios posibles candidatos de acuerdo a la calidad de cada canal existente [15]. El tipo de MIMO que aprovecha de mejor forma la diversidad de usuarios es el MIMO multiusuario, el cual se clasifica en dos tipos de configuraciones, punto a multipunto y multipunto a multipunto, el enlace puede ser descendente que se refiere a la comunicación desde la estación base hasta los usuarios y el enlace ascendente que es la comunicación desde los usuarios hasta la estación base [8].

Este proceso también es conocido como diversidad por selección, y se presenta como una diversidad en las antenas de recepción, donde el receptor puede

escoger una de las antenas basándose en la señal de mayor potencia, en la que tenga un mejor SNR [8].

1.3.5 ANÁLISIS DE DIVERSIDAD

Es conveniente entender cómo optimizar o aprovechar el concepto de diversidad a la hora de diseñar un sistema de comunicación de MIMO. Por esto, la Tabla 1.1 resume y compara cada una de las diversidades antes mencionadas.

Tipo	Especificación	Optimización
Diversidad Espacial	Se transmite varias versiones de la misma señal por trayectos diferentes, también se conoce como diversidad de antena, debido a que utiliza varias antenas de trasmisión y recepción.	Mientras mayor sea el número de antenas, tanto de trasmisión como de recepción, se consiguen mejores resultados.
Diversidad Temporal	Se transmite varias versiones de la misma señal en instantes diferentes.	Mientras mayor sea el tiempo que tarda en enviar y recibir las copias de la información, la tasa de trasmisión se reduce, pero también disminuye la tasa de error de bit (BER), es decir si se desea obtener valores bajos de BER, se puede incrementar el tiempo en el que se trasmite varias versiones de la misma señal.
Diversidad de Código	Se transmite la señal aplicando bloques de codificación.	Este tipo de diversidad es capaz de ampliar el número de bloques de codificación en un mismo sistema, de esta manera obtiene las ventajas correspondientes a cada uno de los bloques aplicados, con esto el sistema mejorara su robustez.
Diversidad de Usuario	Se da cuando el transmisor escoge el mejor usuario para establecer la comunicación, de acuerdo con la calidad de cada canal.	Usa un proceso de selección de usuario para establecer la comunicación, por lo que, para optimizarlo se debe mejorar el sistema de selección para un incremento significativo de usuarios.

 Tabla 1.1 Resumen y Optimización de los tipos de diversidades.

Es necesario analizar los tipos de diversidades que se pueden aplicar en los sistemas de comunicación MIMO, debido a que son la base para comprender el funcionamiento de un codificador espacio-temporal. Este codificador se basa en la diversidad espacial y temporal, combinando las ventajas para obtener mejores resultados y es lo que aplica D-BLAST.

1.4 CODIFICACIÓNESPACIO-TEMPORAL(ST)YMULTIPLEXACIÓN ESPACIAL (SM)

Esta técnica de codificación se denomina espacio-temporal debido a que realiza una combinación de la diversidad de espacial y temporal. Es aplicable para sistemas de comunicaciones inalámbricas con la finalidad de transmitir y recibir mediante varias antenas, múltiples ráfagas de datos, con una alta confiabilidad de transferencia de datos. Los esquemas de codificación espacio-temporal (ST por sus siglas en inglés), admiten diferentes compensaciones entre velocidad, diversidad y ganancia de codificación [1]. De acuerdo con lo mencionado, la arquitectura de este tipo de codificadores se la puede observar en la en la Figura 1.2. Existen dos formas de codificación de diversidad (ST), la codificación (ST) Trellis (STTC) donde los códigos tienen una definición de enrejado y la codificación de bloque espaciotemporal (STBC) donde se transmiten varios flujos de datos a través de un determinado número de antenas [3]. Existen varios tipos de codificadores espaciotemporal por bloques que usan, entre los más usados está Alamouti, codificador ST implementado en este trabajo para ser contrastado con la técnica de multiplexación espacial (SM por las siglas en inglés de spatial multiplexing) BLAST indicada en el alcance de este documento.



Figura 1.2 Arquitectura de un sistema de Codificación Espacio Temporal.

Por otra parte, está la implementación de MIMO a través de SM que consiste en combinar varias señales iguales de un bajo ancho de banda en una sola señal de mayor ancho de banda que se obtiene a la salida de sistema de transmisión [8][16]. En el caso del receptor, se implementa un demultiplexor que divide una señal de un gran ancho de banda en varas señales iguales de menor ancho de banda [8]. Además, similar a lo que sucede en ST, se transmite al mismo tiempo y por el mismo canal cada una de las señales multiplexadas. Entonces, tanto ST como SM son técnicas usadas en los sistemas de transmisión MIMO [8].

De acuerdo con lo mencionado, el caso de SM nace del intento de obtener la ganancia de multiplexación máxima y, por lo tanto, la capacidad de canal máxima según [17], aunque en realidad no supera el límite de la capacidad de Shannon [17]. La documentación original lo describe Foschini en [18] y muestra que la arquitectura SM principal fue desarrolla por los laboratorio Bell denominándolo como BLAST (por Bell Labs Layered Space Time). Así, en las diferentes arquitecturas de BLAST los flujos de datos basan sus arquitecturas con interleaving o entralazado además de poder usar codificación para corrección de errores hacia adelante (FEC) por capa antes del mapeo o selección de antena [17]. El mapeo se describe convenientemente con referencia a una matriz cuyas filas representan los símbolos transmitidos en la misma antena y son conocidos como V-BLAST, H-BLAST, D-BLAST por su estructura vertical, horizontal o diagonal respectivamente [1]. En las siguientes subsecciones se explica a detalle cada uno de estos codificadores.

1.4.1 CODIFICADOR ST ALAMOUTI

Este tipo de codificador pertenece al grupo de codificación espacio-temporal por bloques (STBC). Alamouti propuso un esquema con diversidad espacial, usando dos antenas trasmisoras y N_{Tx} antenas receptoras para obtener una ganancia de diversidad representada como $[2 \times N_{Rx}]$ [19]. De acuerdo con estas dimensiones, este codificador permite el uso de más ecuaciones que incógnitas en el análisis del canal de acuerdo con la ecuación (1) donde para el término $h_{i,j}$ la coordenada *i* corresponde a la antena receptora y *j* corresponde a una de las dos antenas transmisoras.

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \\ \vdots & \vdots \\ h_{i,1} & h_{i,2} \\ \vdots & \vdots \\ h_{N_{Rx},1} & h_{N_{Rx},2} \end{bmatrix}$$
(1)

En la Figura 1.3 se muestra un esquema de una codificación Alamouti con dos antenas de trasmisión y recepción, pero se deja abierta la posibilidad de que se incremente el número de antenas de recepción.



Figura 1.3 Diagrama de bloques de una Codificación Alamouti

En diagrama representado en la Figura 1.3, se puede observar tres partes bien diferenciadas [16][20]:

- 1. La primera parte es el trasmisor, que tiene una entrada de los símbolos que se desea trasmitir, representada por una matriz de dos filas (s_1,s_2) . Dicha matriz ingresa al bloque de codificación Alamouti y envía los símbolos codificados a través de las dos antenas de trasmisión.
- La segunda parte es el efecto del canal sobre los símbolos codificados que se han enviado, para este caso particular de comunicación, se tiene cuatro componentes de canal H = {h₁, h₂, h₃, h₄} donde h₁ = h_{1,1}, h₂ = h_{1,2}, h₃ = h_{2,1} y finalmente h₄ = h_{2,2}.
- 3. La tercera parte representa el receptor, se puede apreciar en la Figura 1.3 cuál es la disposición de las señales que llegan a las antenas de recepción, para luego obtener los símbolos enviados, por medio de los coeficientes de la estimación de canal y aplicando la decodificación Alamouti.

La Figura 1.3 presenta el ejemplo para dos antenas de transmisión para enviar dos señales de manera simultánea en un mismo periodo de símbolo, representado como un tiempo (*T*). La señal que se envía por la antena Tx_1 , se representa como s_1 , mientras que la trasmitida por la antena Tx_2 , se representa como S_2 . Para el siguiente periodo de símbolo representado como un tiempo (*T* + 1), la antena Tx_1 , envía la señal representada como s_2^* y la antena Tx_2 la señal representada como $-s_1^*$. Donde (*) es la representación matemática de complejo conjugado.

La ecuación (2) pretende aclarar por qué Alamouti se denomina codificación espacio-temporal, de manera que en las columnas se representa la codificación temporal y en las filas la codificación espacial. Cada instante de tiempo (T) corresponde a un tiempo de símbolo.

$$\begin{bmatrix} \cdot & \text{tiempo}(T) & \text{tiempo}(T+1) \\ \text{Antena} Tx_1 & S_1 & S_2^* \\ \text{Antena} Tx_2 & S_2 & -S_1^* \end{bmatrix}$$
(2)

Considerando el canal para cada instante de tipo (T) y (T + 1), se puede modelar como una distorsión multiplicativa compleja (h_1, h_2, h_3, h_4) como se muestra en la ecuación (1). Una vez que se ha definido la notación de los coeficientes del canal, se representa en la ecuación (3) las señales recibidas por las dos antenas.

$$\begin{bmatrix} \cdot & \text{tiempo}(T) & \text{tiempo}(T+1) \\ \text{Antena} Rx_1 & Y_1^1 & Y_1^2 \\ \text{Antena} Rx_2 & Y_2^1 & Y_2^2 \end{bmatrix}$$
(3)

La matriz formada por las señales recibidas en la ecuación (3), está conformada por ecuaciones en función de las señales trasmitidas, los coeficientes del canal y el ruido del sistema que son mostradas en las ecuaciones (4) a la (7). Se debe mencionar que Y_1^1 corresponde a la señal recibida por la primera antena en el primer instante de tiempo de transmisión y por tanto Y_1^2 corresponde a la señal recibida también por la primera antena en el segundo instante de transmisión. Se puede entonces deducir que las correspondencias para las ecuaciones (5) y (7).

$$Y_1^1 = h_1 S_1 + h_3 S_2 + n_1 \tag{4}$$

$$Y_2^1 = h_1 S_2^* - h_3 S_1^* + n_2 \tag{5}$$

$$Y_1^2 = h_2 S_1 + h_4 S_2 + n_3 \tag{6}$$

$$Y_2^2 = h_2 S_2^* - h_3 S_1^* + n_4 \tag{7}$$

Las variables que no se han definido en las ecuaciones anteriores son las definidas como n_1, n_2, n_3, n_4 que representan la interferencia y el ruido térmico del receptor. Por otra parte, símbolo codificado que devuelve el esquema de codificación Alamouti se generaliza de acuerdo a la ecuación (**8**):

$$\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} S_1 & S_2^* \\ S_2 & -S_1^* \end{bmatrix}$$
(8)

Cada columna de la ecuación (8) representa a las señales o símbolos transmitidos en cada uno de los instantes o tiempos de trasmisión. Entonces, Alamouti a pesar de ser una buena opción para realizar una codificación espacio-temporal en sistemas de comunicación MIMO, se limita a 2 antenas transmisoras, lo que representa un problema para usarlo en un sistema MIMO donde se requiera usar más de dos antenas de trasmisión [1][16][21].

Se debe indicar también que en el caso de Alamouti, es posible representar el modelo de la señal recibida de acuerdo a la ecuación (**11**) donde $y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2^* \end{bmatrix}$ es decir que en el segundo tiempo de símbolo del codificador ST de Alamouti se transmiten las versiones conjugadas de los dos primeros símbolos. Esto es usado en la decodificación o desacoplamiento de los símbolos transmitidos usando H_{eff} donde, para el caso de Alamouti que es un codificador ST ortogonal se tiene que $H_{eff}^H H_{eff} = ||H||_F^2 I_2$. Esto permitirá obtener los símbolos recibidos y desacoplados mediante la ecuación (**10**).

$$y = \sqrt{\frac{E_s}{2}} \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \\ h_{1,1}^* & h_{1,2}^* \\ h_{2,1}^* & h_{2,2}^* \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3^* \\ n_4^* \end{bmatrix}$$

$$= \sqrt{\frac{E_s}{2}} H_{eff} s + n$$

$$= \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \sqrt{E_s} H_{eff}^H y = ||H||_F^2 I_2 S + n \qquad (10)$$

Entonces, debido a las limitaciones antes comentadas de Alamouti, se han investigado y desarrollo otros sistemas de codificación espacio temporal que integran multiplexación, capaces de manejar varias antenas de trasmisión y recepción, tal como los esquemas de codificación BLAST que son altamente usados entre otros por el estándar IEEE 802.11 tal como ya se había mencionado antes. A continuación, se presenta una breve explicación de los codificadores H-BLAST, V-BLAST y D-BLAST [1][9].

1.4.2 MULTIPLEXACIÓN ESPACIAL H-BLAST

Z

Este multiplexor espacial es de tipo horizontal, de ahí su nombre H-BLAST o codificador BLAST horizontal. Propone un esquema con diversidad de trasmisión y recepción, usando (N_{Tx}) antenas trasmisoras y (N_{Rx}) receptoras para así obtener una ganancia de diversidad de $(N_{Tx} \times N_{Rx})$. Se denomina codificador horizontal debido a que envía las señales por cada una de las antenas de forma horizontal, es decir cada antena de transmisión tiene un flujo de datos totalmente independiente como se muestra en la Figura 1.4 que presenta un ejemplo para un esquema de comunicación de dos antenas de trasmisión y dos de recepción.

Este tipo de codificador BLAST Horizontal genera subflujos de datos a partir del flujo principal denominado (*k Bits*) en función del número de antenas de trasmisión representadas como (N_{Tx}), donde *k* representa el número de datos o bits que se desea enviar, esta acción se realiza mediante el bloque Demultiplexor. De esta manera, cada subflujo de datos tiene un procesamiento independiente debido a que en su primera etapa se encuentra un demultiplexor que separa los flujos de datos dependiendo del número de antenas transmisoras (N_{Tx}). Esto significaría que la tasa espacial (r_s) será igual a (N_{Tx}), después de ello a cada flujo de datos se aplica la codificación temporal y el mapeo de símbolos o modulación, así cada símbolo de información se transmite por una sola antena.



Figura 1.4 Diagrama de bloques de una Codificación H-BLAST.

Esta arquitectura de codificación simplifica el diseño del receptor ya que el orden de diversidad de las antenas receptoras (N_{Rx}) es factible debido a que cualquier símbolo se trasmite desde una sola antena Tx [1][9][22]. Además, las señales que se trasmiten por cada antena se muestran en la ecuación (11) se representa en la primera fila de la matriz $[S_H]$, el flujo de datos correspondiente a la antena Tx_1 , y en la segunda fila el flujo de datos de la antena Tx_2 . Cada señal se trasmite en paralelo y es totalmente independiente de las demás señales. se puede observar que H-BLAST realiza una codificación espacio temporal, en las columnas se representa la codificación temporal y en las filas la codificación espacial. Se

nombra a esta matriz con las siglas S_H , debido a que representa la disposición de los símbolos a trasmitir en el sistema de codificación H-BLAST.

$$\boldsymbol{S}_{H} = \begin{bmatrix} s_{1}^{1} & s_{4}^{2} & s_{7}^{3} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{S}_{H} = \begin{bmatrix} s_{2}^{1} & s_{5}^{2} & s_{8}^{3} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} s_{3}^{1} & s_{6}^{2} & s_{9}^{3} \end{bmatrix}$$
(11)

Considerando el canal para cada instante de tiempo (*T*), se puede modelar como una distorsión multiplicativa compleja por cada antena de trasmisión, como $H_B = (h_{11}, h_{12}, h_{13}, \dots, h_{1 NTx})$. La ecuación (**12**) muestra la notación para los coeficientes del canal entre las antenas de trasmisión y recepción, cuya dimensión es limitada por el número de antenas de recepción y trasmisión [$N_{Rx} \times N_{Tx}$]. Se nombra a esta matriz con las siglas H_B , debido a que esta disposición de los coeficientes se usará para todos los codificadores BLAST (H-BLAST, V-BLAST y D-BLAST).

$$\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{B}} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & \cdots & h_{1 \, NTx} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \cdots & h_{2 \, NTx} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & \cdots & h_{3 \, NTx} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ h_{NRx \, 1} & h_{NRx \, 2} & h_{NRx \, 3} & \cdots & h_{NRx \, NTx} \end{bmatrix}$$
(12)

Las señales recibidas por cada una de las antenas para cada instante de tiempo (T) se muestra en la ecuación (13). Se nombra a esta matriz con las siglas Y_B , debido a que su usará la misma nomenclatura para todos los codificadores BLAST (H-BLAST, V-BLAST y D-BLAST).

$$\boldsymbol{Y}_{\boldsymbol{B}} = \begin{bmatrix} Y_1^1 & Y_1^2 & Y_1^3 & Y_1^4 & Y_1^5 & \cdots & Y_1^T \\ Y_2^1 & Y_2^2 & Y_2^3 & Y_2^4 & Y_2^5 & \cdots & Y_2^T \\ Y_3^1 & Y_3^2 & Y_3^3 & Y_3^4 & Y_3^5 & \cdots & Y_3^T \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ Y_{NRx}^1 & Y_{NRx}^2 & Y_{NRx}^3 & Y_{NRx}^4 & Y_{NRx}^5 & \cdots & Y_{NRx}^T \end{bmatrix}$$
(13)

Matemáticamente también se puede representar las señales recibidas como una multiplicación de matrices, como se muestra en la ecuación (14), donde la matriz H_B que corresponde a los coeficientes del canal se multiplica por S_H que son los símbolos enviados con la codificación H-BLAST y sumado el valor de **n** que corresponde al ruido presente en el sistema.

$$\boldsymbol{Y}_{\boldsymbol{B}} = \boldsymbol{H}_{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{S}_{\boldsymbol{H}} + \boldsymbol{n} \tag{14}$$

Las señales recibidas en función de las señales trasmitidas, la respuesta al impulso del canal y el ruido del sistema, se representan por las ecuaciones de la (15) a la (17), que sirven para determinar las señales que fueron enviadas, para ello se debe emplear un estimador de canal para luego poder decodificar.

$$Y_1^1 = h_{11}s_1^1 + h_{12}s_2^1 + h_{13}s_3^1 + \dots + n_1$$
 (15)

$$Y_2^1 = h_{21}s_1^1 + h_{22}s_2^1 + h_{23}s_3^1 + \dots + n_2$$
(16)

$$Y_3^1 = h_{31}s_1^1 + h_{32}s_2^1 + h_{33}s_3^1 + \dots + n_3$$
(17)

1.4.3 MULTIPLEXACIÓN ESPACIAL V-BLAST

El esquema SM V-BLAST o conocido también como esquema SM BLAST vertical, y que incluso puede considerarse como un tipo de STBC. En la Figura 1.5 se muestra el esquema para este tipo de codificación. De acuerdo con esto, se denomina codificador vertical debido a que las señales que se van a trasmitir forman una matriz de manera que cada antena de transmisión tiene un flujo de datos dependiente de una matriz de codificación, como se muestra en la Figura 1.5.

El codificador BLAST Vertical tiene un procesamiento de datos en forma dependiente, es decir que el flujo principal de datos (*k Bits*) no se divide en subflujos para ser procesados por el modulador y codificación FEC como en el caso de H-BLAST, si no que a todo el conjunto de datos se aplica FEC + el esquema de modulación a través de un solo flujo serial para luego aplicar un demultiplexor donde se separa el flujo de datos en forma vertical para cada antena transmisora de acuerdo con N_{Tx} . Esto significaría que la tasa espacial (r_s) será igual a N_{Tx} [1][23]. Esta arquitectura alcanza un orden superior de diversidad en N_{Rx} , pero el receptor (Rx) puede ser complejo debido a que necesita decodificar conjuntamente secuencias secundarias y complicando el proceso de identificación de símbolos en el receptor.



Figura 1.5 Diagrama de bloques de una Codificación V-BLAST.

V-BLAST realiza una codificación espacio temporal, en las columnas se representa la codificación temporal y en las filas la codificación espacial, esto se puede apreciar en la ecuación (**18**). Donde se muestra las señales que se envían por las antenas de trasmisión en dos instantes de tiempo (*T*), utilizando una configuración matricial para indicar el flujo de datos correspondiente a la antena Tx_1 , y a la antena Tx_2 . Se nombra a esta matriz con las siglas S_V , debido a que representa la disposición de los símbolos a trasmitir en el sistema de codificación V-BLAST.

$$\mathbf{S}_{\boldsymbol{V}} = \begin{bmatrix} s_1^1 & s_3^2 & s_5^3 \\ s_2^1 & s_4^2 & s_6^3 \end{bmatrix}$$
(18)

Considerando el canal para cada instante de tipo T y T + 1, se puede modelar como una distorsión multiplicativa compleja $H_B = (h_{11}, h_{12}, h_{13}, \dots, h_{1 NTx})$, como se muestra en la ecuación (12) analizada en la Subsección 1.4.2. De igual forma, las señales recibidas con este tipo de codificador para el mismo instante de tipo (T), es igual a las recibidas con el codificador H-BLAST representadas en la ecuación (13).

Por otra parte, en el receptor, para determinar las señales que fueron enviadas a partir de las trasmitidas, se necesita tener conocimiento de los coeficientes del canal, por esta razón es necesario utilizar un estimador de canal.

1.4.4 MULTIPLEXACIÓN ESPACIAL D-BLAST

Para el caso de D-BLAST o multiplexación espacial D-BLAST, tiene un procesamiento similar al esquema Horizontal en las etapas previas a la transmisión,

ya que primero se separa el flujo de datos en el demultiplexor de acuerdo con N_{Tx} , seguido por el bloque de codificación FEC y el mapeo de símbolos o modulación [1]. Así, cada palabra de código FEC se divide en tramas de símbolos. Estas tramas pasan a través de un bloque rotador de flujo que las hace girar a los símbolos de transmisión de forma diagonal como se muestra en la Figura 1.6 [1][9].

Este tipo de codificador es llamado diagonal, debido a que distribuye los datos que se van a trasmitir por cada una de las antenas utilizando una disposición espacio-tiempo que corresponde a una etapa diagonal. Es decir, los símbolos de cada secuencia secundaria se dispersan en forma diagonal a través de las antenas Tx y del tiempo de transmisión [1][24]

Para explicar de mejor forma se divide el diagrama anterior en cuatro etapas bien diferenciadas:

- La primera etapa es la parte inicial del trasmisor, que tiene una entrada de un flujo de (*k Bits*) que se divide en varios subflujos en función del número de antenas de trasmisión, cada subflujo se codifica y modula de forma independiente.
- La segunda etapa se describe como la parte final del trasmisor, que recibe los subflujos generados y los coloca en forma diagonal para trasmitirlos por cada una de las antenas.
- La tercera etapa es el efecto del canal sobre los símbolos codificados que se han enviado, para este caso particular de comunicación se tiene cuatro canales (h₁₁, h₁₂, h₂₁, h₂₂,).
- La cuarta etapa representa el receptor, donde se puede apreciar en el esquema la forma de la información que llega a las antenas de recepción, para luego obtener los símbolos enviados.


Figura 1.6 Diagrama de bloques de una Codificación D-BLAST.

El análisis matemático se realiza en base al esquema del sistema de comunicación MIMO 2 × 2. Se ejecuta la primera etapa donde la información es codificada y modulada. En la Tabla 1.2 se representa la disposición de los datos en forma de matriz justo antes de ser rotados, es decir los símbolos que provienen de la primera etapa descrita anteriormente. La matriz debe tener una dimensión de $\left[N_{Tx} \times \frac{kBits}{N_{Tx}}\right]$.

	tiempo(T)	tiempo $(T + 1)$
Subflujo para la Antena Tx_1	<i>s</i> ₁	<i>S</i> ₃
Subflujo para la Antena Tx_2	<i>S</i> ₂	<i>S</i> ₄

Tabla 1.2 Subflujos para cada antena de transmisión antes de aplicar D-BLAST.

Luego de aplicar la codificación FEC y la modulación digital de cada flujo, lsa segunda etapa es la encargada de rotar el flujo de datos, donde cada tiempo de símbolo (*T*) se coloca de forma diagonal de manera que cada símbolo tiene su posición en una antena para cada instante de transmisión. En la Tabla 1.3 se muestra cual es la disposición de las señales rotadas que se trasmiten por cada antena. La dimensión de la matriz para cada instante de trasmisión o tiempo (*T*) se representa mediante la ecuación [$N_{Tx} \times (2N_{Tx} - 1)$], que genera una matriz que se denomina como capa, esta capa contiene la distribución diagonal de cada grupo de símbolos que se van a trasmitir.

Los autores de este trabajo denominan capa a cada distribución de símbolos en estructura diagonal de los N_{Tx} símbolos a transmitir. Esta capa contiene la distribución diagonal de cada grupo de símbolos que se van a trasmitir.

Entonces, de acuerdo con la ecuación $[N_{Tx} \times (2N_{Tx} - 1)]$, la Tabla 1.3 muestra dos capas contiguas, pudiéndose observar la matriz codificada D-BLAST donde las columnas representan la codificación temporal y en las filas la codificación espacial. Por lo tanto, a costa de incrementar la diversidad espacial para dar robustez en la transmisión de cada símbolo, en el primer y último tiempo de transmisión, hay espacios rellenados con "0" y que corresponden a los instantes de tiempo en que una de las antenas no trasmite, todo debido a la disposición diagonal de las señales que se van a trasmitir. Esto implica que el canal no varíe durante los tres periodos de símbolo para permitir el uso de un estimador de canal simple de implementar y además implica que pueda ser usado en canales con desvanecimiento plano.

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	
Antena Tx_1	S_{1}^{1}	s_{2}^{2}	0	<i>s</i> ⁴ ₃	<i>s</i> ⁵ ₄	0	
Antena Tx_2	0	s_{1}^{2}	s_{2}^{3}	0	s_{3}^{5}	s_{4}^{6}	
	(Capa	1	Capa 2			

 Tabla 1.3 Señales transmitidas en la comunicación D-BLAST con 2 antenas Tx.

En la tercera etapa se observa el efecto del canal sobre los datos enviados, para explicar dicho efecto el canal se puede modelar como una distorsión multiplicativa compleja $H_B = (h_{11}, h_{12}, h_{13}, \dots, h_{1 NTx})$. La notación para los coeficientes del canal entre las antenas de trasmisión y recepción están representados en la ecuación (**12**) de la Subsección 1.4.2. La matriz que contiene los coeficientes del canal tiene una dimensión de $[N_{Rx} \times N_{Tx}]$.

Por otra parte, la cuarta etapa que representa al receptor, se encarga de recibir las señales por cada una de las antenas para procesarlas y determinar la información que fue enviada. Se muestra las señales recibidas en forma de matriz en la Tabla 1.4. Las dimensiones de esta matriz parad cada instante de tiempo se representan en la ecuación $[N_{Rx} \times (2N_{Tx} - 1)]$. Para explicar el proceso de decodificación, de la misma forma que en la codificación, se denomina capas a cada una de las matrices correspondientes al conjunto de señales recibidas que son equivalentes a una matriz de código transmitido. La Tabla 1.4 muestra un ejemplo de la disposición de las señales recibidas ejemplificando dos capas.

	<i>T</i> ₁	T ₂	<i>T</i> ₃	T ₄	T ₅	T ₆
Antena Rx ₁	<i>Y</i> ₁ ¹	<i>Y</i> ₁ ²	<i>Y</i> ₁ ³	<i>Y</i> ⁴ ₁	<i>Y</i> ₁ ⁵	<i>Y</i> ⁶ ₁
Antena Rx ₂	<i>Y</i> ¹ ₂	Y_{2}^{2}	Y_{2}^{3}	<i>Y</i> ⁴ ₂	<i>Y</i> ₂ ⁵	<i>Y</i> ⁶ ₂
		Capa	1	(Capa	2

Tabla 1.4 Señales recibidas en la comunicación D-BLAST con 2 antenas Rx..

Cada una de las señales recibidas están en función de las señales trasmitidas, la respuesta al impulso del canal y el ruido del sistema. La estructura de cada una de las señales recibidas se detalla en las ecuaciones de la (**19**) a la (**24**).

 $Y_1^2 = h_{11}s_2^2$

$Y_2^1 = h_{21}s_1^1 + h_{22}0 + n_2$	(19)
	$Y_2^1 = h_{21}s_1^1 + h_{22}0 + n_2$

+
$$h_{12}s_1^2 + n_3$$
 $Y_2^2 = h_{21}s_2^2 + h_{22}s_1^2 + n_4$ (20)

$$Y_1^3 = h_{11}0 + h_{12}s_2^3 + n_5$$
 $Y_2^3 = h_{21}0 + h_{22}s_2^3 + n_6$ (21)

$$Y_1^4 = h_{11}s_3^4 + h_{12}0 + n_7 \qquad Y_2^4 = h_{21}s_3^4 + h_{22}0 + n_8 \qquad (22)$$

$$Y_1^5 = h_{11}s_4^5 + h_{12}s_3 + n_9 \qquad Y_2^5 = h_{21}s_4^5 + h_{22}s_3^5 + n_{10} \qquad (23)$$

$$Y_1^6 = h_{11}0 + h_{12}s_4^6 + n_{11}$$
 $Y_2^6 = h_{21}0 + h_{22}s_4^6 + n_{12}$ (24)

Estas ecuaciones sirven para determinar los dos primeros símbolos que se enviaron s_1 y s_2 resolviendo las ecuaciones $Y_1^1, Y_2^1, Y_1^2, Y_2^2, Y_1^3$ y Y_2^3 en el bloque de decodificación D-BLAST. Como se puede observar este tipo de codificación espacio temporal bajo un esquema de trasmisión MIMO 2 × 2 ofrece una mayor cantidad de ecuaciones para determinar los datos que fueron enviados, siendo esta una ventaja en comparación de los sistemas de codificación anteriores. Esto implica que este esquema de codificación puede aplicarse para situaciones donde el número de antenas de recepción es menor al de transmisión.

Para encontrar los símbolos que fueron enviados, D-BLAST propone decodificar capa por capa. En la Tabla 1.5 se puede apreciar la propuesta de decodificación en forma diagonal para los símbolos recibidos en Rx, este método garantiza que el primer símbolo que se detecta no tendrá errores ya que no tiene ninguna interferencia de símbolo adyacente. No obstante, para el segundo símbolo no sucede igual ya que se sumará la interferencia del primer símbolo. De esta forma el siguiente símbolo se enfrentará a dos interferencias, este proceso se repetirá hasta detectar todos los símbolos de la primera capa. Una vez que todos los símbolos de la primera capa están demodulados, la secuencia asociada a la capa puede decodificarse [21].

	<i>T</i> ₁	T_2	<i>T</i> ₃	T_4	T_5	T_6
Antena Rx_1	<i>Y</i> ¹ ₁	Y_1^2	<i>Y</i> ₁ ³	Y_{1}^{4}	<i>Y</i> ⁵ ₁	<i>Y</i> ₁ ⁶
Antena Rx_2	<i>Y</i> ¹ ₂	Y_2^2	Y_2^3	<i>Y</i> ⁴ ₂	Y_{2}^{5}	<i>Y</i> ⁶ ₂
		Capa 1	l	(Capa 2	2

Tabla 1.5 Propuesta de decodificación D-BLAST en forma de Capas.

Si se analiza la capa 1, se tiene dos diagonales de las cuales se deben obtener los dos primeros símbolos que fueron enviados en un tiempo de trasmisión especifico, de cada diagonal de la Capa 1 se resuelven las ecuaciones dando como resultado los símbolos s_1 y s_2 esperados respectivamente, pero aun contienen el efecto del canal, Para eliminar dicho efecto se utiliza los coeficientes de la estimación de canal, de esta forma obteniendo los símbolos enviados [21].

1.4.4.1 Generalización de la Multiplexación D-BLAST

El esquema de codificación D-BLAST se generaliza tomando que la dimensión de la matriz resultante de la rotación de los símbolos se calcula mediante la ecuación $[N_{Tx} \times (2N_{Tx} - 1)]$, entendiendo que cada grupo de símbolos que están en función de N_{Tx} , ingresan y se mapean de acuerdo a la siguiente matriz espacio-temporal representado por S_D en la ecuación (25) debido a que es una representación de los símbolos rotados:

$$\boldsymbol{S}_{\boldsymbol{D}} = \begin{bmatrix} s_1^1 & s_2^2 & s_3^3 & 0 & 0\\ 0 & s_1^2 & s_2^3 & s_3^4 & 0\\ 0 & 0 & s_1^3 & s_2^4 & s_3^5 \end{bmatrix}$$
(25)

Las columnas de la ecuación (25) representan cada uno de los instantes o tiempos de trasmisión, mientras que las filas indican el número de antenas de trasmisión. La matriz con los coeficientes del canal se denomina con la letra H_B y se muestra en la ecuación (12). Se muestra las señales recibidas en forma de matriz en

la ecuación (**13**). Las dimensiones de esta matriz para cada instante de tiempo se representan en la ecuación $[N_{Rx} \times (2N_{Tx} - 1)]$. Para este caso se puede representar las señales recibidas mediante la ecuación (**26**), denominada como Y_D , que está en función del canal (H_B), de los símbolos trasmitidos (S_D) y del ruido del sistema representado por la letra (n).

$$Y_D = H_B S_D + n \tag{26}$$

1.4.4.2 Ejemplo de un sistema de Comunicación MIMO 4×3 aplicando D-BLAST

En esta sección se pretende ampliar la perspectiva del caso donde el número de antenas de recepción es menor al de transmisión, caso que se presenta en general en enlaces de bajada (downlink). Entonces, para ampliar este caso, se usará como ejemplo un sistema de comunicación MIMO 4×3 ejemplo, es decir con dimensiones $N_{Tx} = 4$ y $N_{Rx} = 3$. En la Tabla 1.6 se representa la ubicación de los símbolos que se van a enviar por cada una de las antenas. La dimensión de la matriz para los símbolos rotados se calcula mediante la relación [$N_{Tx} \times (2N_{Tx} - 1)$], obteniendo una matriz de [4×7] por capa. Además, la Tabla 1.6 también muestra la disposición de ocho símbolos rotados distribuidos en dos capas para el sistema MIMO 4×3 .

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	<i>T</i> ₇	<i>T</i> ₈	<i>T</i> ₉	<i>T</i> ₁₀	<i>T</i> ₁₁	<i>T</i> ₁₂	<i>T</i> ₁₃	<i>T</i> ₁₄
Antena Tx_1	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₂	<i>S</i> ₃	<i>S</i> ₄	0	0	0	S 5	S ₆	<i>S</i> ₇	<i>S</i> ₈	0	0	0
Antena Tx_2	0	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₂	<i>S</i> ₃	<i>S</i> ₄	0	0	0	S 5	S ₆	S ₇	S ₈	0	0
Antena Tx_3	0	0	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₂	<i>S</i> ₃	<i>S</i> ₄	0	0	0	S ₅	<i>S</i> ₆	<i>S</i> ₇	<i>S</i> ₈	0
Antena Tx_4	0	0	0	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₂	<i>S</i> ₃	<i>S</i> ₄	0	0	0	S ₅	<i>S</i> ₆	<i>S</i> ₇	S ₈
	Capa 1								Capa 2					

 Tabla 1.6 Señales transmitidas en la comunicación D-BLAST con 4 antenas Tx.

Aplicando la ecuación $[N_{Rx} \times N_{Tx}]$ y teniendo en cuenta que el número de antenas de recepción es de $N_{Rx} = 3$, la matriz que contiene los coeficientes del canal representado en la Tabla 1.7, tendría la una dimensión de $[3 \times 4]$

Tabla 1.7 Coeficientes de canal para una comunicación inalámbrica MIMO 4X3 aplicando D-BLAST

Antena Tx_1 Antena Tx_2 Antena Tx_3 Antena Tx_4

Antena Rx_1	h ₁₁	h ₁₂	h ₁₃	h ₁₄
Antena R x ₂	h ₂₁	h ₂₂	h ₂₃	h ₂₄
Antena R x ₃	h ₃₁	h ₃₂	h ₃₃	h ₃₄

Ahora se calcula la dimensión de la matriz que almacena las señales recibidas mediante la relación $[N_{Rx} \times (2N_{Tx} - 1)]$, reemplazando los valores se tiene que la dimensión de la matriz para cada capa es de $[3 \times 7]$. Una vez establecida como se transmiten las señales y las disposiciones de los elementos del canal, a través de la Tabla 1.8 se expone la matriz de las señales que llegan al receptor para los 7 periodos de símbolo necesarios para poder decodificar 4 símbolos.

Tabla 1.8. Señales recibidas en la comunicación D-BLAST con 3 antenas Rx.

	<i>T</i> ₁	<i>T</i> ₂	<i>T</i> ₃	<i>T</i> ₄	<i>T</i> ₅	T ₆	T ₇	<i>T</i> ₈	T 9	<i>T</i> ₁₀	<i>T</i> ₁₁	<i>T</i> ₁₂	<i>T</i> ₁₃	<i>S</i> ₁₄
Antena Rx ₁	<i>Y</i> ₁ ¹	<i>Y</i> ₁ ²	<i>Y</i> ₁ ³	<i>Y</i> ₁ ⁴	Y ₁ ⁵	<i>Y</i> ⁶ ₁	<i>Y</i> ₁ ⁷	Y ₁ ⁸	<i>Y</i> ₁ ⁹	<i>Y</i> ₁ ¹⁰	Y ₁ ¹¹	Y ₁ ¹²	<i>Y</i> ₁ ¹³	<i>Y</i> ₁ ¹⁴
Antena Rx ₂	Y_{2}^{1}	Y ₂ ²	Y ₂ ³	<i>Y</i> ₂ ⁴	Y ₂ ⁵	Y ₂ ⁶	<i>Y</i> ₂ ⁷	<i>Y</i> ⁸ ₂	Y ₂ ⁹	Y_{2}^{10}	<i>Y</i> ¹¹	Y ₂ ¹²	Y ₂ ¹³	<i>Y</i> ¹⁴
Antena Rx ₃	Y_{3}^{1}	Y_{3}^{2}	Y_{3}^{3}	<i>Y</i> ⁴ ₃	Y_{3}^{5}	Y ₃ ⁶	Y_{3}^{7}	Y ₃ ⁸	<i>Y</i> ₃ ⁹	Y_{3}^{10}	Y ₃ ¹¹	Y ₃ ¹²	Y ₃ ¹³	Y ₃ ¹⁴
	Capa 1								Capa 2					

Así, la Tabla 1.8, muestra como cada capa consta de 21 elementos que corresponden a las señales recibidas por 3 antenas en los 7 periodos de símbolos en los que se asume que el canal es estacionario. Además, cada una de las 21 ecuaciones de cada capa están en función de las señales enviadas, la respuesta al impulso del canal y el ruido del sistema. En este caso, las incógnitas por cada capa son 4 símbolos enviados y que están agrupadas según la Tabla 1.8. Para determinar estos símbolos se propone realizar un promedio entre diagonales, debido a que, cada ecuación del sistema está compuesta por símbolos repetidos. Por lo tanto, el proceso de decodificación se realiza resolviendo las ecuaciones que se encuentran en las diagonales que se muestran en la Tabla 1.8. se utiliza estas diagonales debido a que se considera la forma en la que fueron rotados las señales en el trasmisor.

1.4.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS CODIFICADORES ESPACIO TEMPORALES IMPLEMENTADOS.

Una vez que se ha analizado las técnicas de trasmisión que aplican una codificación espacio-temporal, se presenta la Tabla 1.9 que contiene un resumen de las ventajas y desventajas de estas técnicas [11][13][14][15].

Técnica	Ventajas	Desventajas
ALAMOUTI	 Incrementa la tasa de transmisión de información con respecto a los sistemas de comunicaciones inalámbricas tradicionales. Aprovecha el efecto de las trayectorias multi-trayecto para enviar las copias de la señal. Aplica una codificación espacio-temporal. Incrementa la capacidad del sistema, el rango de cobertura y confiabilidad debido a los múltiples flujos de recepción, en comparación de un sistema de comunicación tradicional. 	• El inconveniente de este sistema es que no puede incrementar el número de antenas de trasmisión, es decir, se puede expandir el número de antenas <i>Rx</i> , pero el número de T <i>x</i> se limita a 2. Por esta razón, este sistema no puede ser aplicado a MIMO masivo, donde se requiere múltiples antenas tanto de trasmisión como de recepción.
H-BLAST	 Tiene diversidad espacial tanto en trasmisión como en recepción, es decir, se puede expandir el número de antenas de Tx y Rx. Ejecuta procesos independientes para cada subflujo de información. Es posible transmitir más de un símbolo en un instante de tiempo. 	 Cuando el número de antenas de trasmisión es mayor al de recepción, se requiere de un proceso bastante complejo para decodificar, debido a que el número de incógnitas (señales enviadas) es mayor al número de ecuaciones detectadas en el receptor (señales recibidas).
V-BLAST	 Arquitectura del sistema fácil de implementar. Es posible transmitir más de un símbolo en un instante de tiempo. Asume que tiene conocimiento del canal de transmisión. 	• De igual forma que en el sistema de codificación H-BLAST, para un número de antenas de trasmisión mayor al de recepción, se requiere procesos de decodificación compleja.

 Tabla 1.9 Ventajas y desventajas de los codificadores espacio temporal.

	• Presenta una diversidad espacio- temporal tanto en trasmisión como en recepción, es decir, se puede expandir el número de antenas de Tx y Rx.	 Necesita un mayor número de tiempos de transmisión para enviar los símbolos, por lo que, la tasa de trasmisión efectiva de datos se disminuye en comparación de los
D-BLAST	 El número de antenas <i>Tx</i> puede ser mayor que el número de antenas <i>Rx</i>. En el caso de tener un número de antenas de trasmisión mayor al de recepción, se requiere un proceso poco complejo para decodificar. A pesar que el número de incógnitas (señales enviadas) es mayor al número de ecuaciones detectadas en el receptor (señales recibidas), las múltiples copias de las señales recibidas permiten encontrar las señales que fueron trasmitidas. Debido a que este sistema envía más copias de la señal que los sistemas de codificación anteriores, presenta una menor probabilidad de error de bit. Este sistema es adaptable para MIMO masivo. Es uno de los sistemas más robustos al desvanecimiento rápido de canales. 	 sistemas anteriores. Se produce un desperdicio de espacio- tiempo necesario para la disposición diagonal de símbolos, esto hace que el sistema no alcance el límite de su capacidad, Este desperdicio se repite capa por capa tanto en trasmisión como en recepción.

Al analizar la Tabla 1.9, se puede establecer que el esquema de transmisión que presenta más ventajas es D-BLAST, debido a que combina la multiplexación horizontal (H-BLAST) aplicando procesos independientes para cada subflujo de datos y posteriormente una rotación o disposición diagonal para obtener un mayor número de copias de la señal que requiere enviar, de esta forma garantiza una baja probabilidad e error de bit. El análisis de toda la literatura indicada permite sustentar el desarrollo de la simulación e implementación de este sistema de codificación y evaluar los resultados.

La Figura 1.7 muestra el esquema de bloques de un sistema de comunicación MIMO aplicando la técnica D-BLAST. El esquema propuesto está divido en tres bloques principales compuestos por el trasmisor, el canal y el receptor.

A partir de la Figura 1.7, los nombres de los bloques, las entradas y salidas correspondientes, las variables utilizadas y partes principales se representan en el

idioma inglés, para evitar que se distorsione el significado de algunos términos al traducirlos al español.



Figura 1.7 Diagrama de una comunicación inalámbrica aplicando D-BLAST.

CAPITULO 2. SIMULACIÓN E Implementación de D-BLAST sobre Sistemas de Radio Definido por Software (SDR).

En este capítulo se describe los esquemas propuestos, bloques utilizados, requerimientos, diagramas de flujo y limitaciones para realizar la simulación e implementación de la técnica D-BLAST. Se ha divido el capítulo en tres partes, transmisor, canal y receptor. Se realiza la simulación de los sistemas MIMO 2×2 , MIMO 3×2 y MIMO 4×3 mediante el software de programación MATLAB, debido a que es una herramienta que permite trabajar un lenguaje de fácil manipulación y es preciso para realizar operaciones matemáticas matriciales. En la simulación no existe limitante para crecer con respecto al número de antenas tanto de trasmisión como de recepción, mientras que en la implementación existe varios limitantes debido a los equipos que se utilizan, bajo esta consideración se implementan los sistemas MIMO 2×2 y MIMO 3×2 utilizando el software LabVIEW Communications y como hardware se emplea los equipos MIMO USRP X310 que ya permite al menos una comunicación MIMO de 2×2 . Así, con la finalidad de comparar estos sistemas MIMO aplicando un codificador espaciotemporal se implementa un codificador similar que es Alamouti 2×2 . Al final se presenta el diagrama de conexión de los equipos con el sincronizador utilizados en la simulación.

Es importante mencionar que, para la explicación y desarrollo del trasmisor, canal y receptor, se toma como ejemplo el sistema MIMO 3×2 , al finalizar este capítulo se presentaran algunas consideraciones para simular o implementar sistemas MIMO con mayor número de antenas tanto en trasmisión como en la recepción.

2.1 TRANSMISOR

Se inicia planteando el esquema para la simulación del trasmisor aplicando MIMO 3×2 , este tipo de configuración tiene 3 antenas para trasmitir. El esquema está dividido por bloques en 5 etapas dispuestas en forma paralela como se puede observar en la Figura 2.1.



Figura 2.1 Diagrama de bloques del trasmisor MIMO 3X2 simulado.

El primer bloque (TEX to Bit) acepta una entrada de tipo texto, en la salida muestra una ráfaga de (k Bits), donde (k) representa el número de bits que ha resultado del proceso de convertir texto en bits. El segundo bloque DEMUX, se encarga de la demultiplexación de la ráfaga de (k Bits), es decir en función del número de antenas de trasmisión divide el flujo principal en subflujos, el número de subflujos generados es igual al número de antenas de trasmisión.

El tercer bloque CONVOLUTIONAL CODER, realiza una codificación de canal de tipo convolucional con una tasa de codificación de (R = 1/2).

El cuarto bloque MODULATION, se encarga de la modulación 4QAM del subflujo de bits codificados, es importante mencionar que cada subflujo tiene su propio bloque de codificación convolucional y modulación. Por último, el quinto bloque TRANSMITER D-BLAST aplica la técnica de trasmisión diagonal D-BLAST, y se envía la información por cada una de las antenas, en este caso ($N_{Tx} = 3$).

Para la implementación del transmisor MIMO 3×2 en el equipo NI-USRPX310 se requiere adicionar dos bloques al esquema de trasmisión anterior, obteniendo el esquema mostrado en la Figura 2.2.



Figura 2.2 Diagrama de bloques del trasmisor MIMO 3X2 implementado.

Los primeros cinco bloques son los mismos que se encuentran en el esquema de trasmisión propuesto para la simulación. El sexto bloque TRAINING SEQUENCE, adiciona a los símbolos rotados una secuencia de entrenamiento que permitirá al receptor identificar y sincronizar la trama enviada ya que se usa transmisión asíncrona. El séptimo bloque PULSE SHAPE, es un filtro que se encarga de convertir los símbolos en muestras para poder trasmitir por las antenas. Este bloque permite un sobre muestreo de 10 muestras por símbolo. En las siguientes subsecciones se detallan cada uno de los bloques de la arquitectura del transmisor.

2.1.1 CODIFICADOR DE TEXTO A BITS.

Se describe el primer bloque TEXT to Bit utilizado para codificar el texto del mensaje en bits. La Figura 2.3 muestra los parámetros de ingreso y de salida del bloque. De acuerdo con esto, en la entrada de este bloque se coloca la información que se desea enviar, como salida tiene BITS STREAM, que es el flujo de bits generado y (k), que es el número de bits resultante.



Figura 2.3 Diagrama de bloque de la conversión de texto a bits.

Para la generación de (*k bits*) tanto en la simulación como en la implementación se propone enviar un texto que tiene mil caracteres, mediante código ASCII-8bits, se trasforma cada carácter en un conjunto de ocho bits, generando de esta forma un flujo de datos binarios de (k = 8bits). Se decide enviar un texto para

poder identificar de mejor forma en el receptor el número de errores que presenta este tipo de trasmisión. En la Figura 2.4 se muestra la codificación ASCII para las letras (F A M), su equivalente en valor decimal de (70 65 77) y sus correspondientes representaciones binarias respectivamente, la disposición del flujo de bits es en una matriz de tipo fila con una dimensión de $[1 \times k]$.



Figura 2.4 Representación binaria de tres letras.

Se representa mediante un diagrama de flujo el funcionamiento interno del bloque en la Figura 2.5.



Figura 2.5 Diagrama de flujo bloque de la conversión de texto a bits.

2.1.2 DEMULTIPLEXACIÓN DE BITS

El segundo bloque DEMUX, es un demultiplexor que genera subflujos o secuencias secundarias a partir del flujo principal, el número de secuencias secundarias representa el número de antenas de trasmisión. En la Figura 2.6 se muestra los parámetros de ingreso y salida que posee el bloque DEMUX.



Figura 2.6 Diagrama de bloque del demultiplexor.

El bloque de-multiplexor está en función de la razón de cuantos bits tiene el flujo de ingreso (k), entre el número de antenas de trasmisión (N_{Tx}), matemáticamente representado por (k/N_{Tx}). Este bloque tiene tres entradas, la primera es BITS STREAM, acepta una entrada del flujo de (k bits) dispuestos en una sola fila, en la segunda entrada (k) se coloca el número de bits generados y en la tercera entrada N_{Tx} el número de antenas de trasmisión.

El bloque de la Figura 2.6 divide el flujo de bits de acuerdo con el número de antenas de transmisión N_{Tx} y coloca los bits en varias filas, representadas como (N_{Tx} filas). En la Figura 2.7 se muestra un diagrama de flujo para representar el funcionamiento interno del bloque.



Figura 2.7 Diagrama de flujo del bloque de demultiplexación.

2.1.3 CODIFICADOR DE CANAL CONVOLUCIONAL

El tercer bloque CONVOLUTIONAL CODER del esquema de transmisión propuesto es un codificador de canal de tipo convolucional con una tasa de codificación de ($R = \frac{1}{2}$). Para este caso el codificador acepta un bit al ingreso y lo codifica en dos bits, los dos bits de salida se multiplexan y forman una sola ráfaga. La Figura 2.8 muestra el diagrama de codificación de canal utilizado.



Figura 2.8 Proceso de codificación convolucional.

Los valores iniciales del registro de desplazamiento están rellenados con ceros y están a la espera del primer bit de ingreso. Cuando ingresa el primer bit del subflujo, un registro de desplazamiento se carga con el bit ingresado y se ejecuta una operación XOR de acuerdo con el esquema de la Figura 2.8.

Esto se ejecuta de forma continua mientras ingresan los bits de cada subflujo. Cuando los bits de ingreso han entrado por completo se agregan bits en cero como relleno para reiniciar los registros de desplazamiento antes de que un nuevo subflujo de bits ingrese. Se utiliza un bloque de codificación convolucional por cada canal o subflujo que tiene la trasmisión, en este caso son tres subflujos. La Figura 2.9 muestra los requerimientos de ingreso y parámetros de salida del bloque CODE CONV.



Figura 2.9 Diagrama de bloque del codificador convolucional.

Se utiliza este tipo de codificación de canal debido a que es una de las técnicas de codificación de canal más usadas para comunicaciones inalámbricas. Los bits codificados colocan en una matriz con una dimensión de $[N_{Tx} \times m]$, donde (m) es el número de columnas y está en función de la relación $[2(k/N_{Tx})]$. Se muestran en la Figura 2.10 un diagrama de flujo para representar el funcionamiento interno del bloque de codificación convolucional.



Figura 2.10 Diagrama de flujo del bloque de codificación convolucional.

2.1.4 MODULACIÓN DIGITAL

El cuarto bloque MODULATION se encarga de realizar la modulación 4QAM de los bits codificados. Esta modulación realiza un mapeo y toma dos bits para transformarlos en un número complejo conocido como símbolo. En la Figura 2.11 se muestra los parámetros de ingreso y de salida del bloque.



Figura 2.11 Diagrama de bloque del modulador.

Este bloque tiene cuatro entradas, en las tres primeras se colocan los subflujos de bits codificados, y en la cuarta entrada (SYMBOL MAP) se coloca los valores del mapeo de símbolos que es necesario para el bloque de modulación. Estos valores ya están prestablecidos y son usados para mapear conjuntos de bits a símbolos. En esta implementación se usó una modulación digital 4-QAM. La Figura 2.12 muestra el diagrama flujo del proceso de modulación.



Figura 2.12 Diagrama de flujo del bloque de modulación.

2.1.5 TRANSMISOR D-BLAST

El quinto bloque TRANSMITER D-BLAST, se encarga de realizar la técnica de trasmisión propuesta a partir de los símbolos resultantes de la modulación. Esta técnica distribuye los símbolos de forma diagonal de cada subflujo entre todas las antenas y el tiempo que se requiera para la transmisión. Expresado en forma de matriz, D-BLAST toma cada una de las columnas de los datos modulados por el bloque representado en la Figura 2.11 y los coloca en forma diagonal. Para colocar los datos en la disposición diagonal se utiliza la ecuación (25) analizada en la Subsección 1.4.4.1 y se puede tomar como ejemplo la representación de la Tabla 1.6 de la misma Subsección, donde se puede observar la matriz de símbolos rotados

 $[S_D]$, con la tendencia que tienen los datos para este tipo de codificación espaciotemporal D-BLAST.

Calculado la dimensión de la matriz $[S_D]$ de los símbolos rotados mediante la relación $[N_{Tx} \times (2N_{Tx} - 1)]$ para un sistema de comunicación MIMO 3 × 2, se obtienen que la dimensión de la matriz para una capa es de $[3 \times 5]$ y se muestra en la Tabla 2.1 donde (*T*) representa cada instante de trasmisión.

		T_1	T_2	T_3	<i>T</i> ₄	T_5	T ₆	T ₇	T ₈	T 9	<i>T</i> ₁₀
$S_D =$	Tx_1	<i>s</i> ₁	<i>s</i> ₂	<i>S</i> ₃	0	0	<i>S</i> ₄	<i>S</i> ₅	<i>s</i> ₆	0	0
2	Tx_2	0	<i>S</i> ₁	<i>s</i> ₂	<i>S</i> ₃	0	0	<i>S</i> ₄	<i>S</i> ₅	<i>s</i> ₆	0
	Tx_3	0	0	<i>s</i> ₁	<i>s</i> ₂	<i>S</i> ₃	0	0	<i>s</i> ₄	<i>S</i> ₅	<i>s</i> ₆

 Tabla 2.1 Señales transmitidas en la comunicación D-BLAST con 3 antenas Tx.

Para el caso de la implementación, en el software se generó un bloque que reciba los símbolos modulados que corresponden en forma de matriz y realice la rotación o desplazamiento diagonal de cada uno de estos símbolos como se muestra en la Tabla 2.1.

En la Figura 2.13 se muestra los parámetros de ingreso y de salida del bloque de trasmisión diagonal llamado TRANSMITER D-BLAST. De acuerdo con la Figura 2.13, el bloque tiene tres entradas, la primera denominada como SYMBOLS recibe lo símbolos procedentes de la modulación en forma de una matriz, la segunda entrada (k) contiene el valor del número de bits y la tercera entrada (N_T) el número de antenas de trasmisión. A la salida de este bloque se obtiene la matriz [S_D] de símbolos rotados mostrada en la Tabla 2.1 En la Figura 2.14 se muestra un diagrama de flujo que representa el funcionamiento interno de este bloque.



Figura 2.13 Diagrama de bloque del trasmisor D-BLAST.

La Figura 2.14 se muestra un diagrama de flujo que representa el funcionamiento interno de este bloque.

Por otra parte, los siguientes bloques son usados para establecer el conjunto de posibles señales a transmitir además de brindar los parámetros necesarios para sincronizar los mensajes en el receptor. Es decir, se agrega a los símbolos rotados una secuencia de entrenamiento, que permitirá detectar el inicio de la información en el receptor y un filtro de conformación de pulso, que convierte los símbolos en señales aptas para viajar por el canal.



Figura 2.14 Diagrama de flujo del bloque de codificación D-BLAST.

2.1.6 SECUENCIA DE ENTRENAMIENTO

El Bloque TRAINING SEC o secuencia de entrenamiento, se encarga de agregar símbolos de cabecera al inicio de cada subflujo de datos, con el objetivo de que el receptor pueda detectar estos símbolos predeterminados y así el receptor pueda sincronizar cada trama de datos recibida además de permitir la estimación del comportamiento del canal. Además, el tamaño de la secuencia de entrenamiento y los símbolos correspondientes es conocido por el receptor. Los símbolos de entrenamiento se transmiten de forma secuencial por cada una de las antenas del arreglo transmisor pero la secuencia de cada sub-flujo se transmite de forma individual. Por lo tanto, para el caso de $[3 \times 2]$, se conforman tres partes, una parte

conformada de símbolos en el rango de $\pm 0,707107$, y las otras dos corresponden a símbolos en cero (0 + 0i). Entonces, el conjunto de símbolos que conforma el preámbulo de cada sub-flujo es de 528 símbolos, donde cada una de las partes antes descritas posee 176 símbolos.

Para mejorar la interpretación de la estructura de los símbolos de entrenamiento, la Tabla 2.2 muestra dichas secuencias de entrenamiento.

Sub-Flujo 0	$\pm 0,707107 \pm 0,707107i$	0 + 0i	0 + 0i	
Sub-Flujo 1	0 + 0i	$\pm 0,707107 \pm 0,707107i$	0 + 0i	[S _D]
Sub-Flujo 2	0 + 0i	0 + 0i	$\pm 0,707107 \pm 0,707107i$	
	Lor	ngitud Total = 528 símbo	los	

Tabla 2.2 Matriz que forma la secuencia de entrenamiento para 3 canales

En la Figura 2.15 se muestran los parámetros de ingreso y de salida del bloque TRAINING SEC, como resultado obtiene una sola matriz que está conformada por la secuencia de entrenamiento y por la secuencia de los símbolos rotados. Cabe recalcar que la secuencia de entrenamiento que se agrega a cada flujo de transmisión de forma independiente. Por otra parte, debe indicarse también que la secuencia de entrenamiento se usa antes de la llamada primera capa de cada trama de datos.



Figura 2.15 Diagrama de bloque de la secuencia de entrenamiento.

El diagrama de flujo que representa el funcionamiento interno del bloque de la secuencia de entrenamiento se muestra en la Figura 2.16.



Figura 2.16 Diagrama de flujo de la secuencia de entrenamiento agregada.

2.1.7 FILTRO DE CONFORMACIÓN DE PULSO O PULSE SHAPE

El séptimo bloque PULSE SHAPE o conformación de pulso se encarga de realizar el proceso de muestreo de la forma de onda que corresponde a cada uno de los símbolos transformándolos en una forma de pulsos. Su propósito es hacer una señal que se adapte al canal de comunicación que generalmente es limitando por el ancho de banda efectivo de la transmisión. Al realizar este proceso se disminuye la interferencia entre símbolos causada por el canal. En la Figura 2.17 se muestra los parámetros de ingreso y de salida del bloque PULSE SHAPE.



Figura 2.17 Diagrama de bloque del filtro de conformación de pulso en el Tx.

El bloque tiene tres entradas, la primera ROTATED SYMBOLS + TRAINING SEQUENCE recibe la matriz de símbolos rotados más la secuencia de entrenamiento agregada, en la segunda entrada Tx Oversample Factor, se debe colocar el factor de sobre muestreo que para este caso es 10. Este factor indica el número de muestras que se va a generar por la forma de onda de cada símbolo. En la tercera entrada Pulse shaping filter coefficients se ingresan los coeficientes generados para el filtro, estos valores son prestablecidos por defecto. En la salida se tiene una matriz de las muestras a transmitir. La Figura 2.18 representa un diagrama de flujo para representar el funcionamiento interno del bloque PULSE SHAPE en el trasmisor.



Figura 2.18 Diagrama de flujo del filtro de conformación de pulso en el trasmisor.

2.2 CANAL.



Figura 2.19 Representación del canal para un sistema MIMO 3X2.

Una vez que se ha completado todos los procesos en el trasmisor, las señales son enviadas por cada una de las antenas de trasmisión y se propagan a través del aire como medio de propagación hacia el receptor. Esto implica que cada antena receptora capte las señales transmitidas por cada una de las antenas del transmisor, pero atravesando componentes diferentes del canal. La Figura 2.19 muestra el esquema de comunicación inalámbrica correspondiente a MIMO 3×2 , donde se puede observar la representación de cada trayectoria directa del canal $H_B =$ $(h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{21}, h_{22}, h_{23})$ establecida entre las antenas Tx y Rx.

Para el caso específico de la simulación, se aplicó un modelo de canal inalámbrico con desvanecimiento plano y con una función de densidad de probabilidad de Rayleigh de dimensión $[N_{Rx} \times N_{Tx}]$ y que se representa en la ecuación (**12**) de la Subsección 1.4.2. Además, en el caso de la simulación se asume un conocimiento perfecto del estado del canal, lo que implica el caso ideal donde no es necesario ecualizar y/o estimar el canal y por lo tanto reduciendo probabilidad de error en el modelo simulado. Cabe mencionar que el conocimiento del estado del canal es conocido como CSI por sus siglas en inglés.

2.3 RECEPTOR.

En la Figura 2.20 se plantea el esquema del simulador del receptor aplicando MIMO 3×2 , este tipo de configuración tiene 2 antenas para recibir. El esquema está dividido como en el caso del trasmisor, por bloques en 5 etapas dispuestas en forma paralela como se puede observar en la Figura 2.20.

El primer bloque RECEIVER D-BLAST está encargado de recibir los símbolos enviados por el trasmisor y almacenarlos en forma de una matriz, donde las filas están definidas por el número de antenas de recepción $[N_{Rx}]$ y las columnas representan los tiempos de recepción, dichos tiempos son iguales tanto en trasmisión como en recepción, por lo que se representan como tiempos (T), esta matriz se multiplica por una matriz de $[N_{Rx} \times N_{Tx}]$ que se genera para representar el efecto que tendría el canal en una trasmisión real, también se realiza la estimación de canal con un detector LS expresado en una matriz de $[N_{Tx} \times N_{Rx}]$. El segundo bloque DEMODULACION se encarga de demodular cada subflujo de símbolos y expresarlos en bits. El tercer bloque CONVOLUTIONAL DECODER realiza una decodificación convolucional con una tasa de codificación de (R = 1/2). El cuarto bloque MUX se encarga de multiplexar los subflujos de bits y expresarlos como un flujo resultante. Finalmente, el quinto bloque convierte el flujo de bits resultantes en la cadena de caracteres o texto que fue enviado.



Figura 2.20 Diagrama de bloques del receptor MIMO 3X2 simulado.

Por otra parte, para **la implementación del receptor** MIMO 3×2 en el equipo NI-USRP se requiere adicionar cinco bloques al esquema del receptor propuesto para la simulación en la Figura 2.20, quedando el esquema como se muestra en la Figura 2.21.

El bloque TRIM WAVEFORM se requiere para realizar la implementación y tiene un umbral de detección que se utiliza para evitar que el receptor capture ruido o muestras con energía no válida. El segundo bloque para la implementación es un filtro PULSE SHAPE que se utiliza para convertir las muestras recibidas en símbolos. El tercer bloque, SYMBOL SYNC, realiza un desplazamiento o barrido horizontal sobre todos los símbolos capturados en busca de la posición del símbolo con mayor energía. El cuarto bloque FRAME SYNC de igual forma realiza un barrido sobre los símbolos y detecta el inicio de la trama. El quinto bloque CHANNEL ESTIMATE es un estimador de canal de tipo LS a través del cual se podrá decodificar los símbolos recibidos. Para el receptor, los siguientes bloques son los equivalentes contrarios a los usados en el esquema de trasmisión propuesto para la simulación.



Figura 2.21 Diagrama de bloques del receptor MIMO 3X2 implementado.

2.3.1 DETECTOR DE LA SEÑAL RECIBIDA.

El primer bloque TRIM WAVEFORM representado en la Figura 2.21, se encarga de reconocer el inicio de la trasmisión para eliminar las muestras que están antes del inicio de una trama así como las que están después. Para lograrlo se detecta la energía de estas muestras obtenidas considerando un umbral establecido (Magnitude Threshold). De acuerdo con esto, si se tiene un umbral muy alto pasarán muy pocas señales, mientras que un umbral muy bajo causaría ruido o señales falsas; por tanto, el nivel de umbral es la energía promedio de todos los posibles que se pueden obtener en una modulación digital. En el caso de este trabajo, es el promedio de los cuatro posibles símbolos transmitidos con 4-QAM. En la Figura 2.22 se muestra los parámetros de ingreso y de salida del bloque TRIM WAVEFORM.



Figura 2.22 Diagrama de bloques del detector de señal recibida.

El bloque tiene tres entradas y una salida, en la primera entrada se encuentran las muestras de la señal recibida (Samples Rx), la segunda entrada corresponde a la magnitud límite (Threshold), la misma que se multiplica con la muestra de mayor valor de energía de uno de los canales, de esta forma establece la amplitud máxima que tendrá el sistema. Después se procede a encontrar la posición de este valor, así se eliminaría las muestras que están antes de esta posición, en la tercera entrada se ingresa el valor de histéresis, este tiene la función de generar bucles de acuerdo con el número ya establecido, con el fin de obtener los intentos requeridos para una mejor detección. Finalmente se obtiene en la salida (TRIM WFM OUT), un recorte de las muestras recibidas desde el primer instante de la secuencia de entrenamiento.

En la implementación, antes de usar el bloque de RF y transmitir señales por cada una de las antenas, se debe adicionar muestras complejas con energía casi cero que están conformadas por valores similares como 0,001 + 0,001*i* y un total de 200 muestras por cada flujo de transmisión. Esto se realiza con la finalidad de provocar un retardo en el receptor y evitar interferencia inter-simbólica (ISI). Además, este tamaño es el suficiente para que el primer bloque del receptor, TRIM WAVEFORM, pueda detectar correctamente las señales recibidas. De esta manera, el primer bloque del receptor interpreta el encabezado como ruido y lo elimina, dejando solo las señales que contienen información. Luego de esto, como se indica en secciones posteriores, a este apartado, se deberá aplicar la decodificación de D–BLAST.

En la salida de este bloque se obtienen señales compuestas por dos partes diferenciadas, la secuencia de entrenamiento que se aplicó en el trasmisor representada como S.E y las señales que contienen información. Dependiendo del número de antenas de recepción estas señales cambian.

			<i>T</i> ₁	T ₂	T ₃
$Y_B =$	Rx_1	S. E	$s_1 h_{11} + n$	$s_2h_{11} + s_1h_{12} + n$	$s_2 h_{12} + n$
	Rx_2	S. E	$s_1h_{21} + \boldsymbol{n}$	$s_2h_{21} + s_1h_{22} + n$	$s_2 h_{22} + n$

 Tabla 2.3 Señales recibidas para el sistema MIMO 2X2 aplicando D-Blast.

 Tabla 2.4 Señales recibidas para el sistema MIMO 3X2 aplicando D-Blast.

			<i>T</i> ₁	<i>T</i> ₂	T ₃	T ₄	T ₅
$Y_B =$	Rx_1	S.E	$s_1 h_{11}$	$s_2h_{11} + s_1h_{12}$	$s_3h_{11} + s_2h_{12}$	$s_3 h_{12}$	$s_3 h_{13}$
			+ n	+ <i>n</i>	$+ s_1 h_{13} + n$	$+ s_2 h_{13} + n$	+ n
	Rx_2	S. E	$s_1 h_{21}$	$s_2h_{21} + s_1h_{22}$	$s_3h_{21} + s_2h_{22}$	$s_3 h_{22}$	s_3h_{23}
			+n	+ <i>n</i>	$+ s_1 h_{23} + n$	$+ s_2 h_{23} + n$	+ n

 Tabla 2.5 Señales recibidas para el sistema MIMO 4x3 aplicando D-Blast.

$Y_B =$		T_1	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	<i>T</i> ₆	T ₇

Rx ₁	S. E	s ₁ h ₁₁ + n	$s_2h_{11} + s_1h_{12} + n$	s_3h_{11} + s_2h_{12} + s_1h_{13}	$s_4 h_{11}$ + $s_3 h_{12}$ + $s_2 h_{13}$	s_3h_{12} + s_2h_{13} + s_1h_{14}	$s_2 h_{13} + s_1 h_{14} + n$	s ₁ h ₁₄ + n
				+ n	$+ s_1 h_{14} + n$	+ n		
			$s_2 h_{21}$	$s_{3}h_{21}$	$s_4 h_{21}$	$s_{3}h_{22}$	$s_2 h_{23}$	
Rx _a	S.E	$s_1 h_{21}$	$+ s_1 h_{22}$	$+ s_2 h_{22}$	$+ s_3 h_{22}$	$+ s_2 h_{23}$	$+ s_1 h_{24}$	$s_1 h_{24}$
mez	~	+n		$+ s_{1}h_{22}$	$+ s_{a}h_{aa}$	$+ s_{i}h_{ai}$		+ n
			+n	1 51123	1 527723	1 51124	+n	
				+n	$+ s_1 h_{24} + n$	+n		
			$s_2 h_{31}$	$s_{3}h_{31}$	$s_4 h_{31}$	$s_{3}h_{32}$	$s_2 h_{33}$	
Rro	S.E	$s_1 h_{31}$	$+ s_1 h_{22}$	$+ s_2 h_{32}$	$+ s_3 h_{32}$	$+ s_2 h_{33}$	$+ s_1 h_{24}$	$s_1 h_{34}$
плз		+ n	1.032	$\pm sh$	$\pm sh$	+ s h	1**34	+ n
			+n	13_1n_{33}	1 321133	13_1n_{34}	+n	
				+n	$+ s_1 h_{34} + n$	+n		

De acuerdo con esto, la Tabla 2.3 muestra las señales recibidas para el sistema MIMO 2 × 2 con D–BLAST, en la Tabla 2.4 para el sistema MIMO 3 × 2 con D–BLAST y en la Tabla 2.5 para el sistema MIMO 4 × 3 con D–BLAST. Además, haciendo referencia a la Tabla 2.3, cabe mencionar que s_1h_{11} corresponde a la señal recibida por la antena 1 en el instante de recepción 1, $s_2h_{11} + s_1h_{12} + n$ corresponde a la señal recibida por la antena 1 en el instante de recepción 2, $s_2h_{12} + n$ corresponde a la señal recibida por la antena 1 en el instante de recepción 3, de igual forma se analiza las demás señales.

En la Figura 2.23 se muestra un diagrama de flujo para representar el funcionamiento interno del bloque.



Figura 2.23 Diagrama de flujo del bloque detector de señal recibida

2.3.2 FILTRO DE CONFORMACIÓN DE PULSO O PULSE SHAPE

El segundo bloque PULSE SHAPE representado en la Figura 2.21, es el encargado de convertir las muestras recibidas en las formas de onda de los símbolos trasmitidos. En la Figura 2.24 se muestra los parámetros de ingreso y de salida del bloque PULSE SHAPE.



Figura 2.24 Diagrama de bloques del filtro de conformación de pulso en el Rx.

Este bloque tiene tres entradas, la primera TRIM WFM OUT recibe las muestras recibidas por el bloque anterior y la segunda entrada llamada Rx Oversample Factor corresponde al valor de sobre muestreo que en este caso 10. Es decir, este bloque realiza un barrido por todas las muestras recibidas donde cada 10 muestras analizadas toma una y genera una forma de onda que representa un símbolo, en la tercera entrada se requiere conectar los coeficientes del Filtro, estos deben ser los mismos que se ingresaron en el trasmisor. En la salida de este bloque se tienen las formas de ondas de los símbolos. Se muestra un diagrama de flujo en la

Figura 2.25 para representar el funcionamiento interno del bloque PULSE SHAPE en el receptor.



Figura 2.25 Diagrama de flujo del filtro de conformación de pulso en el receptor.

2.3.3 SINCRONIZACIÓN DE SÍMBOLO

El tercer bloque SYMBOL SYNC que se encuentra en la Figura 2.21, realiza un barrido por toda la matriz de símbolos recibidos en busca del que tenga la mayor energía. Este símbolo representa el inicio del primer corte que se realiza a la señal recibida, por lo general la mayor energía recae sobre los primeros símbolos de la secuencia de entrenamiento. De esta forma, se realiza una primera sincronización a nivel de símbolos. Sin embargo, todos los símbolos que estén ubicados antes del que posee mayor energía serán considerados como ruido y serán eliminados. En la Figura 2.26 se muestra los parámetros de ingreso y de salida del bloque SYMBOL SYNC.



Figura 2.26 Diagrama de bloques de la sincronización de símbolo.

El bloque de la Figura 2.26 tiene dos entradas, la primera entrada SYMBOLS, que recibe los símbolos tal como sin sincronizar que le envía el bloque anterior, en la segunda entrada se requiere el factor de sobre muestreo del receptor.

En la salida se tiene una matriz de símbolos sincronizados. Se presenta el diagrama de flujo en la Figura 2.27 para representar el funcionamiento interno del bloque SYMBOL SYNC.



Figura 2.27 Diagrama de flujo para el bloque de sincronización de símbolo.

2.3.4 SINCRONIZACIÓN DE TRAMA.

El cuarto bloque, FRAME SYNC mostrado en la Figura 2.21, tiene la función de detectar el inicio de la trama de sincronización, para esto utiliza el algoritmo de Schmidl y Cox, el cual recibe la matriz de uno de los flujos recibidos y lo duplica para sumar un retraso en una de las dos matrices. Después de esto, se somete las dos matrices a un proceso de correlación que permite encontrar la posición de la métrica, esta posición indica el inicio de la trama que se repite. Además, este bloque contiene internamente un corregidor de frecuencia el mismo que aplica el método Moose, de esta manera las tasas de error son mínimas y estables. En la Figura 2.28 se muestra los parámetros de ingreso y de salida del bloque FRAME SYNC.



Figura 2.28 Diagrama de bloques de la sincronización de trama.



Figura 2.29 Diagrama de flujo para el bloque de sincronización de trama.

El bloque mostrado en la Figura 2.28 tiene dos entradas y una salida, la primera entrada corresponde a los símbolos ya sincronizados, el segundo bloque de entrada contiene parámetros como la secuencia de entrenamiento que se utiliza para analizar flujos de la misma longitud.

También, hay otro parámetro utilizado que es la longitud de canal como entrada para el corregidor de frecuencia. En la salida se obtienen los símbolos que corresponden a una trama de información. Se presenta el diagrama de flujo mostrado en la Figura 2.29 para representar el funcionamiento interno del bloque de sincronización de trama.

2.3.5 ESTIMACIÓN DE CANAL

Debido a que la decodificación ST necesita de los coeficientes del canal $[H_B]$ y que el receptor no tiene un conocimiento perfecto del canal, es necesario estimarlo. Así, el quinto bloque del receptor es el llamado "CHANNEL ESTIMATE" que se observa en la Figura 2.30, que consiste en estimar los coeficientes del canal usando las secuencias de entrenamiento de las señales recibidas. Entonces, una vez que se ha realizado la sincronización de símbolos y tramas, se procede a determinar los coeficientes del canal, en este caso a través de la estimación de los coeficientes del mismo para cada sub–flujo, usando los símbolos indicados como S.E de las señales recibidas descritas en la matriz $[Y_B]$ según las tablas Tabla 2.3, Tabla 2.4 y Tabla 2.5. Todo lo mencionado implica que este bloque requiere conocer la longitud y la secuencia exacta de entrenamiento que fue introducida en las señales en el trasmisor según la Tabla 2.2 (Ver Subsección 2.1.6). Debe indicarse también que, la secuencia de entrenamiento deberá retirarse a la salida de este bloque obteniendo únicamente los símbolos que contienen información bajo efectos del canal como se muestra desde Tabla 2.6 la hasta la Tabla 2.8.

De acuerdo a lo mencionado, para determinar los coeficientes del canal $[H_B]$ representados en la ecuación (12) analizado en la Subsección 1.4.2, en este trabajo se optó por usar un estimador de baja complejidad computacional basado en mínimos cuadrados (LS, del inglés Least Squares). Este estimador es también llamado como estimador de máxima verosimilitud (ML, del inglés maximum likelihood), que se basa en una solución de ecuaciones lineales para determinar los parámetros del canal. Como el esquema de modulación es pequeño, usar un estimador LS es adecuado.

La secuencia de entrenamiento usada en cada sub-flujo contiene 576 símbolos de entrenamiento donde la secuencia efectiva de símbolos de entrenamiento corresponde a aquellos símbolos diferentes de cero y por tanto con longitud L = 176 tal como se describió en la Tabla 2.2. Es necesario recordar que, en la transmisión de las secuencias de entrenamiento, se envió cada conjunto de símbolos por cada antena de transmisión mientras las otras transmitían símbolos en 0 para evitar que los símbolos de entrenamiento sean interferidos por la acción de otros multi-trayectos. No obstante, ahora que la trama y los símbolos están sincronizados, es posible eliminar los símbolos en cero. Así, para aplicar el estimador de canal LS, se evaluarán los símbolos de entrenamiento efectivos para cada sub-flujo.

Por lo tanto, si el estimador de canal usa el símbolo *i* de la secuencia de entrenamiento de longitud *L* llamada $A_i \in \mathbb{R}^{NTx \times 1}$, que fue transmitida por el canal $H_B \in \mathbb{R}^{NRx \times NTx}$ y también fue afectada por el ruido correspondiente $n_i \in \mathbb{R}^{NRx \times 1}$. De esta manera, el vector de señales del símbolo de entrenamiento recibido es $y_i = H_B A_i + n_i$. Es decir que, en forma general, la matriz de secuencias de entrenamiento recibidas es $y \in \mathbb{R}^{NRx \times L}$ y las secuencias transmitidas corresponde a $A \in \mathbb{R}^{NTx \times L}$ con $n \in \mathbb{R}^{NRx \times L}$ obteniendo por tanto, la expresión de la matriz de secuencias de entrenamiento recibidas $y = H_BA + n$ [25] [26].

El objetivo del algoritmo es encontrar los coeficientes h_{LS} del canal estimado \hat{H} que minimizan el error cuadrático entre los símbolos de sincronización recibidos con la versión aproximada que usa los símbolos conocidos por el receptor y cuyo modelo de optimización es descrito en la ecuación (27). La minimización no depende de A sino de \hat{H} que se obtiene según la ecuación (28) [26].

$$h_{LS} = \underset{h}{\operatorname{argmin}} \left\| y - \widehat{H} A \right\|^2$$
(27)

$$\widehat{\boldsymbol{H}} = A^{\dagger} \boldsymbol{y} = (A^{H} A)^{-1} A^{H} \boldsymbol{y}$$
(28)

Donde A^{\dagger} es la matriz pseudo-inversa de A y A^{H} es la matriz hermitiana transpuesta de A. Además, debido a que los símbolos de entrenamiento son conocidos por el receptor, es posible pre calcular la matriz A^{\dagger} , para almacenarla en memoria y así el receptor no calcule la pseudo inversa de A cada vez que el canal ha de ser reestimado.

Entonces, una vez que se ha eliminado la secuencia de entrenamiento en este bloque se forma una matriz de una dimensión $[N_{Rx} \times T]$, donde (N_{Rx}) representa el número de antenas de recepción y (T) el número de instantes de recepción de un símbolo. También, se debe tomar en cuenta que (T) es el número de instantes de tiempo en el que el trasmisor envía las señales de una columna de la matriz de codificación $[S_D]$ según lo indicado en la Subsección 2.1.5.Cada uno de los símbolos de $[S_D]$ fueron convertidos en señales y enviados por cada una de las antenas de trasmisión según la misma matriz de codificación.

Cada una de las señales recibidas corresponden a la combinación lineal entre las señales transmitidas y los componentes de canal de cada trayectoria del arreglo MIMO sumándose una cantidad de ruido para cada señal recibida. Recuerde que el modelo de lo comentado corresponde al modelo representado en las ecuaciones (19) a la (24) del capítulo anterior. En este bloque del receptor, los símbolos sin la secuencia de entrenamiento se ordenan en forma de la matriz [Y_B] de acuerdo con la ecuación (13) de la Subsección 1.4.2.

Tabla 2.6 Simbolos recibidos por el sistema MIMO 2X2 sin la secuencia de entrenamiento

		<i>T</i> ₁	T ₂	T ₃
$Y_B =$	Rx_1	$s_1 h_{11} + n$	$s_2h_{11} + s_1h_{12} + n$	$s_2 h_{12} + n$
	Rx_2	$s_1 h_{21} + n$	$s_2h_{21} + s_1h_{22} + n$	$s_2h_{22} + \boldsymbol{n}$

Tabla 2.7 Simbolos recibidos por el sistema MIMO 3X2 sin la secuencia de entrenamiento

		<i>T</i> ₁	T ₂	<i>T</i> ₃	T ₄	T ₅
$Y_B =$	Rx_1	$s_1 h_{11}$	$s_2h_{11} + s_1h_{12}$	$s_3h_{11} + s_2h_{12}$	$s_3h_{12} + s_2h_{13}$	s_3h_{13}
		+ n	+ n	$+ s_1 n_{13} + n$	+ <i>n</i>	+ n
	Rx_2	$s_1 h_{21}$	$s_2h_{21} + s_1h_{22}$	$s_3h_{21} + s_2h_{22}$	$s_3h_{22} + s_2h_{23}$	$s_{3}h_{23}$
		+ n	+ <i>n</i>	$+ s_1 h_{23} + n$	+n	+ n

Tabla 2.8 Simbolos recibidos por el sistema MIMO 4X3 sin la secuencia de entrenamiento

		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	<i>T</i> ₆	T ₇
		<i>s</i> ₁ <i>h</i> ₁₁	<i>s</i> ₂ <i>h</i> ₁₁	<i>s</i> ₃ <i>h</i> ₁₁	$s_4 h_{11}$	$s_3 h_{12}$	$s_2 h_{13}$	$s_1 h_{14}$
		+ n	$+ s_1 h_{12}$	$+ s_2 h_{12}$	$+ s_3 h_{12}$	$+ s_2 h_{13}$	$+ s_1 h_{14}$	+ n
	Rx_1		+ <i>n</i>	$+ s_1 h_{13}$	$+ s_2 h_{13}$	$+ s_1 h_{14}$	+ n	
				+ n	$+ s_1 h_{14}$	+ n		
					+ <i>n</i>			
		$s_1 h_{21+n}$	$s_2 h_{21}$	$s_3 h_{21}$	$s_4 h_{21}$	$s_{3}h_{22}$	$s_2 h_{23}$	$s_1 h_{24}$
$Y_B =$	_		$+ s_1 h_{22}$	$+ s_2 h_{22}$	$+ s_3 h_{22}$	$+ s_2 h_{23}$	$+ s_1 h_{24}$	+ n
	Rx_2		+ <i>n</i>	$+ s_1 h_{23}$	$+ s_2 h_{23}$	$+ s_1 h_{24}$	+ n	
				+n	$+ s_1 h_{24}$	+ n		
					+n			
		$s_1 h_{31}$	$s_2 h_{31}$	$s_{3}h_{31}$	$s_4 h_{31}$	$s_{3}h_{32}$	$s_2 h_{33}$	$s_1 h_{34}$
		+ n	$+ s_1 h_{32}$	$+ s_2 h_{32}$	$+ s_3 h_{32}$	$+ s_2 h_{33}$	$+ s_1 h_{34}$	+ n
	Rx_3		+ <i>n</i>	$+ s_1 h_{33}$	$+ s_2 h_{33}$	$+ s_1 h_{34}$	+ n	
				+n	$+ s_1 h_{34}$	+ n		
					+n			

Para el caso del sistema MIMO 2×2 , se muestra en la Tabla 2.6 los símbolos recibidos bajo efectos del canal $[H_B]$ representado en la ecuación (12) del capítulo anterior sobre las símbolos trasmitidos $[S_D]$ (Tabla 2.1). De igual forma se representa los símbolos recibidos para el sistema MIMO 3×2 en la Tabla 2.7 y MIMO 4×3 en la Tabla 2.8. Cabe mencionar que los símbolos representados en dichas tablas ya han sido previamente sincronizados y eliminada la secuencia de entrenamiento indicada en la subsección 2.3.1.

En la Figura 2.30 se muestra los parámetros de ingreso y de salida del bloque CHANNEL ESTIMATE. Este bloque tiene tres entradas, la primera es Frame Sync que recibe los datos de la trama sincronizada en forma de matriz; en la segunda entrada System Parameters se debe colocar la secuencia de entrenamiento y la longitud del canal que se quiere estimar considerando que este último valor depende del número de antenas de trasmisión. Además, en el bloque tiene dos salidas donde la primera retorna una matriz de símbolos eliminando la secuencia de entrenamiento $[Y_B]$ y la segunda una matriz con los coeficientes de la estimación de canal $[H_B]$.



Figura 2.30 Diagrama de bloques de la estimación de canal.

Se muestra un diagrama de flujo en la Figura 2.31, para representar el funcionamiento interno del bloque de estimación de canal.



Figura 2.31 Diagrama de flujo para el bloque de estimación de canal.

2.3.6 DECODIFICADOR ESPACIO TEMPORAL D-BLAST.

Una vez que se obtiene $[Y_B]$, se procede a realizar la decodificación D-BLAST. Para aplicar el proceso de decodificación es necesario indicar también que, luego del primer tiempo de símbolo (T), cada señal recibida se compone del nuevo símbolo que ingresa al proceso de transmisión además de la interferencia de los símbolos que ya se encontraban en el proceso y que ahora han sido desplazados a las siguientes antenas de transmisión. Esto complica el proceso de decodificación; por esta razón se analizaron tres procesos para aplicar la decodificación D-BLAST y determinar los posibles símbolos trasmitidos. Cada proceso corresponde al promedio de las señales recibidas cuyas ecuaciones se encuentran descritas para $[Y_B]$; además, se usan colores para identificar las señales recibidas que se usarán para decodificar un símbolos. Desde la Tabla 2.9 hasta la Tabla 2.13 se expone, para cada tabla y por color, las señales recibidas que se usarán en la decodificación. Los resultados se almacenan en una matriz denominada como [P]. Las filas de la matriz [P] están definidas por el número de antenas de trasmisión (N_{Tx}) y las columnas de [P] se extiende de acuerdo con la cantidad de símbolos por capa de transmisión, justo antes de rotarlos aplicando la codificación D-BLAST.

Entonces, la técnica D-BLAST-1 para el sistema MIMO 2×2 realiza un promedio de la diagonal 1 y 2 de la matriz de símbolos $[Y_B]$ según los colores indicados en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Técnica D-BLAST 1 para la decodificación D-BLAST del sistema MIMO 2X
--

V _	$s_1 h_{11} + n$	$s_2h_{11} + s_1h_{12} + n$	$s_2h_{12} + n$
$r_{B1} =$	$s_1 h_{21} + n$	$s_2h_{21} + s_1h_{22} + n$	$s_2h_{22} + n$

Es decir que, el valor medio entre la señal recibida por la antena Rx_1 en el instante de recepción T_1 con la señal recibida por la antena Rx_2 en el instante de recepción T_2 , permite decodificar el símbolo 1 representado como s_1 según la ecuación (29). El símbolo 2 (s_2) se decodifica determinando el valor medio entre la señal recibida por la antena Rx_1 en el instante de recepción T_2 con la señal recibida por la antena Rx_1 en el instante de recepción T_2 con la señal recibida por la antena Rx_1 en el instante de recepción (30).

$$s_1 = \frac{(s_1h_{11} + n) + (s_2h_{21} + s_1h_{22} + n)}{2}$$
(29)

$$s_2 = \frac{(s_2h_{11} + s_1h_{12} + n) + (s_2h_{22} + n)}{2} \tag{30}$$

La técnica D-BLAST-2 para el sistema MIMO 2×2 realiza un promedio de la diagonal 1 y la columna 3 de la matriz de símbolos $[Y_B]$ según los colores que se aprecian en la Tabla 2.10. Esto se debe a que en el último instante del código, solamente interactúa el símbolo 2 transmitido en una capa.

 Tabla 2.10 Técnica D-BLAST 2 para la decodificación D-BLAST del sistema MIMO 2X2.

$$Y_{B2} = \frac{s_1h_{11} + n}{s_1h_{21} + n} \frac{s_2h_{11} + s_1h_{12} + n}{s_2h_{21} + s_1h_{22} + n} \frac{s_2h_{12} + n}{s_2h_{22} + n}$$

El valor medio entre la señal recibida por la antena Rx_1 en el instante de recepción T_1 con la señal recibida por la antena Rx_2 en el instante de recepción T_2 , permite decodificar el símbolo 1 representado como s_1 según la ecuación (31). El símbolo 2 (s_2) se decodifica determinando el valor medio entre la señal recibida por la antena Rx_1 en el instante de recepción T_3 con la señal recibida por la antena Rx_2 en el instante de recepción T_3 , según la ecuación (32).

$$s_1 = \frac{(s_1h_{11} + n) + (s_2h_{21} + s_1h_{22} + n)}{2} \tag{31}$$

$$s_2 = \frac{(s_2h_{12} + n) + (s_2h_{22} + n)}{2}$$
(32)

Técnicas de decodificación analizadas para D-BLAST con una configuración MIMO 3×2 previas a que sean implementadas en los equipos USRP.

La técnica D-BLAST-1 para el sistema MIMO 3×2 realiza un promedio de la diagonal 1, 2 y 4 de la matriz de símbolos $[Y_B]$, como se muestra en la Tabla 2.11: Note que la diagonal con mayores interferencias no se toma en cuenta; dicha diagonal corresponde a la diagonal en gris entre la diagonal amarilla y verde.

		$s_2h_{11} + s_1h_{12}$	$s_3h_{11} + s_2h_{12} + s_1h_{13}$	$s_3h_{12} + s_2h_{13}$	$s_3 h_{13}$
	$s_1 h_{11} + n$	+ <i>n</i>	+ n	+ n	+ n
=	$s_1 h_{21}$	$s_2h_{21} + s_1h_{22}$	$s_3h_{21} + s_2h_{22} + s_1h_{23}$	$s_3h_{22} + s_2h_{23}$	$s_3 h_{23}$
	+ <i>n</i>	+ <i>n</i>	+ n	+ n	+ n

 Tabla 2.11 Técnica D-BLAST 1 para la decodificación D-BLAST del sistema MIMO 3X2
El valor medio entre la señal recibida por la antena Rx_1 en el instante de recepción T_1 con la señal recibida por la antena Rx_2 en el instante de recepción T_2 , permite decodificar el símbolo 1 representado como s_1 según la ecuación (33). El símbolo 2 (s_2) se decodifica determinando el valor medio entre la señal recibida por la antena Rx_1 en el instante de recepción T_2 con la señal recibida por la antena Rx_2 en el instante de recepción T_3 , según la ecuación (34). El símbolo 3 (s_3) se decodifica determinando el valor medio antena Rx_1 en el instante de recepción T_3 , según la ecuación (34). El símbolo 3 (s_3) se decodifica determinando el valor medio entre la señal recibida por la antena Rx_1 en el instante de recepción T_4 con la señal recibida por la antena Rx_2 en el instante de recepción T_5 , según la ecuación (35).

$$s_1 = \frac{(s_1h_{11} + n) + (s_2h_{21} + s_1h_{22} + n)}{2}$$
(33)

$$s_2 = \frac{(s_2h_{11} + s_1h_{12} + n) + (s_3h_{21} + s_2h_{22} + s_1h_{23} + n)}{2}$$
(34)

$$s_3 = \frac{(s_3h_{12} + s_2h_{13} + n) + (s_3h_{23} + n)}{2} \tag{35}$$

En el caso de la técnica D-BLAST-2 para el sistema MIMO 3×2 realiza un promedio de la diagonal 1, 2 y de la columna 4 de la matriz de símbolos $[Y_B]$, como se muestra en la Tabla 2.12:

 Tabla 2.12 Técnica D-BLAST 2 para la decodificación D-BLAST del sistema MIMO 3X2

V	$s_1 h_{11}$	$s_2h_{11} + s_1h_{12}$	$s_3h_{11} + s_2h_{12} + s_1h_{13}$	$s_3h_{12} + s_2h_{13}$	$s_3 h_{13}$
	+n	+n	+ n	+ n	+ n
$Y_{B2} =$	$s_1 h_{21}$	$s_2h_{21} + s_1h_{22}$	$s_3h_{21} + s_2h_{22} + s_1h_{23}$	$s_3h_{22} + s_2h_{23}$	$s_{3}h_{23}$
	+n	+n	+ n	+ n	+ n

El valor medio entre la señal recibida por la antena Rx_1 en el instante de recepción T_1 con la señal recibida por la antena Rx_2 en el instante de recepción T_2 , permite decodificar el símbolo 1 representado como s_1 según la ecuación (36). El símbolo 2 (s_2) se decodifica determinando el valor medio entre la señal recibida por la antena Rx_1 en el instante de recepción T_2 con la señal recibida por la antena Rx_2 en el instante de recepción T_3 , según la ecuación (37). El símbolo 3 (s_3) se decodifica determinando el valor medio entre la señal recibida por la antena Rx_1 en el instante de recepción T_3 , según la ecuación (37). El símbolo 3 (s_3) se decodifica determinando el valor medio entre la señal recibida por la antena Rx_1 en el instante de recepción T_4 con la señal recibida por la antena Rx_2 en el instante de recepción T_4 con la señal recibida por la antena Rx_2 en el instante de recepción T_4 con la señal recibida por la antena Rx_2 en el instante de recepción T_4 , según la ecuación (38).

$$s_1 = \frac{(s_1h_{11} + n) + (s_2h_{21} + s_1h_{22} + n)}{2}$$
(36)

$$s_2 = \frac{(s_2h_{11} + s_1h_{12} + n) + (s_3h_{21} + s_2h_{22} + s_1h_{23} + n)}{2}$$
(37)

$$\mathbf{s_3} = \frac{(s_3h_{12} + s_2h_{13} + n) + (s_3h_{22} + s_2h_{23} + n)}{2} \tag{38}$$

La técnica D-BLAST 3 para el sistema MIMO 3×2 realiza un promedio de la diagonal 1, 2 y 3 de la matriz de símbolos $[Y_B]$, como se muestra en la Tabla 2.13:

 Tabla 2.13 Técnica D-BLAST 3 para la decodificación D-BLAST del sistema MIMO 3X2

<i>s</i> ₁ <i>h</i> ₁₁	$s_2 h_{11} + s_1 h_{12}$	$s_3h_{11} + s_2h_{12} + s_1h_{13}$	$s_3h_{12} + s_2h_{13}$	$s_3 h_{13}$
+n	+ <i>n</i>	+ n	+ n	+ n
<i>s</i> ₁ <i>h</i> ₂₁	$s_2h_{21} + s_1h_{22}$	$s_3h_{21} + s_2h_{22} + s_1h_{23}$	$s_3h_{22} + s_2h_{23}$	$s_3 h_{23}$
+n	+n	+ n	+ n	+ n
	$ s_1 h_{11} $ $ + n $ $ s_1 h_{21} $ $ + n $	$\begin{array}{c ccc} s_1h_{11} & s_2h_{11} + s_1h_{12} \\ + n & + n \\ \hline s_1h_{21} & s_2h_{21} + s_1h_{22} \\ + n & + n \end{array}$	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$

El valor medio entre la señal recibida por la antena Rx_1 en el instante de recepción T_1 con la señal recibida por la antena Rx_2 en el instante de recepción T_2 , permite decodificar el símbolo 1 representado como s_1 según la ecuación (39). El símbolo 2 (s_2) se decodifica determinando el valor medio entre la señal recibida por la antena Rx_1 en el instante de recepción T_2 con la señal recibida por la antena Rx_2 en el instante de recepción T_3 , según la ecuación (38). El símbolo 3 (s_3) se decodifica determinando el valor medio antena Rx_1 en el instante de recepción (38). El símbolo 3 (s_3) se decodifica determinando el valor medio antena Rx_1 en el instante de recepción T_3 , según la ecuación (38). El símbolo 3 (s_3) se decodifica determinando el valor medio antena Rx_1 en el instante de recepción T_4 , según la ecuación (41).

$$s_1 = \frac{(s_1h_{11} + n) + (s_2h_{21} + s_1h_{22} + n)}{2} \tag{39}$$

$$s_2 = \frac{(s_2h_{11} + s_1h_{12} + n) + (s_3h_{21} + s_2h_{22} + s_1h_{23} + n)}{2} \tag{40}$$

$$s_3 = \frac{(s_3h_{11} + s_2h_{12} + s_1h_{13} + n) + (s_3h_{22} + s_2h_{23} + n)}{2} \tag{41}$$

Como ya se mencionó, en cualquiera de los casos de decodificación analizados, una vez que se obtiene los símbolos estimados, se los coloca en la matriz [P], que depende del número de antenas de trasmisión para establecer el número de sus filas, como se muestra en la ecuación (42) para el caso de MIMO 3 × 2.

$$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} s_1 & s_4 & s_7 \dots \dots \\ s_2 & s_5 & s_8 \dots \dots \\ s_3 & s_6 & s_9 \dots \dots \\ \end{bmatrix}$$
(42)

Estos símbolos se consideran como estimados debido a que están distorsionados por efecto del canal. Por lo tanto, para eliminar este efecto se utilizan los coeficientes del canal determinados en la estimación de canal multiplicando por la conjugada transpuesta de la matriz con los coeficientes obtenidos del estimador de canal $[H_B]$ por la matriz [P]. Se usa la transpuesta para poder aplicar el producto matricial sabiendo que las dimensiones de $[H_B]$ son $[N_{Rx} \times N_{Tx}]$. La matriz resultante de este proceso para cualquier número de antenas de trasmisión o recepción debe respetar una dimensión especifica que depende del número de antenas de trasmisión $[N_{Tx} \times N_{Tx}]$, obteniendo la matriz $[H_B^*]^T$.

En todos los casos donde el número de antenas de trasmisión sea mayor al de recepción, se necesitará completar la matriz $[H_B^*]^T$ con tantas columnas como sea la diferencia entre $(N_{Tx} - N_{Rx})$ para cumplir con la dimensión $[N_{Tx} \times N_{Tx}]$ tal como se puede ver en la ecuación (43). En el caso de que el número de antenas de trasmisión sea menor al de recepción, no se necesitará completar la matriz $[H_B^*]^T$.

$$[\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{B}}^{*}]^{\boldsymbol{T}} = \begin{bmatrix} h_{11}^{*} & h_{21}^{*} & h_{21}^{*} \\ h_{12}^{*} & h_{22}^{*} & h_{21}^{*} \\ h_{13}^{*} & h_{23}^{*} & h_{22}^{*} \end{bmatrix}$$

$$43)$$

Entonces, cada una de las técnicas de decodificación D-Blast antes indicadas fueron evaluadas a través del análisis de la tasa de Error de Bit (BER) para determinar cuál desarrollo permite Maximizar la relación señal a ruido de los símbolos recibidos. De acuerdo con esto, la técnica de decodificación D-BLAST-1, mostró un mejor rendimiento en la identificación de símbolos decodificados y fue este desarrollo el que uso en la implementación en los equipos SDR para los sistemas MIMO 2×2 y MIMO 3×2 . El detalle de los resultados se presenta en el siguiente capítulo.

La Figura 2.32 muestra el bloque usado en el programa para implementar esta etapa del receptor. Este bloque es llamado RECEIVER D-BLAST.



Figura 2.32 Diagrama de bloques del decodificador D-BLAST.

Este bloque de la Figura 2.32 tiene tres entradas, la primera YB acepta los símbolos que provienen del estimador de canal en forma de matriz como se muestra desde la Tabla 2.6 hasta la Tabla 2.8. La segunda entrada de este bloque, *H*B, debe conectarse con la matriz de los coeficientes del canal $[H_B]$ y en la tercera entrada SYMBOLS PER PACKET se requiere colocar los símbolos por paquete, este valor se requiere para saber cuál es el número de iteración que debe realizar el bloque que realiza el promedio.

La Figura 2.33 muestra un diagrama de flujo para representar el funcionamiento interno del bloque del receptor D-BLAST.



Figura 2.33 Diagrama de flujo para el bloque de decodificación D-BLAST.

2.3.7 DEMODULACIÓN.

El bloque DEMODULATION, realiza el proceso inverso de la modulación, es decir, extrae los símbolos de información de las señales al mapear la forma de onda recibida con las formas de onda esperadas y así establecer el conjunto de bits correspondiente. Por lo tanto, es necesario conocer el tipo de modulación que se aplicó en el transmisor para tratar la señal de la misma forma, en este caso el tipo de modulación es 4QAM. Así, se puede identificar la ubicación de todos los símbolos posibles para poder convertirlos en bits. En la Figura 2.34 se muestra los parámetros de ingreso y de salida del bloque DEMODE:



Figura 2.34 Diagrama de bloques del demodulador.

El bloque representado en la Figura 2.34 tiene dos entradas y tres salidas, la primera entrada corresponde a los símbolos de información que se van a demodular, la segunda entrada corresponde al mapeo de símbolos (Ms) donde Ms debe tener información del transmisor sobre el tipo de mapeo aplicado en el proceso de modulación.



Figura 2.35 Diagrama de flujo para el bloque de demodulación.

Las salidas del bloque de la Figura 2.34 representan las subtramas demoduladas de los tres canales, cada subtrama será igual a número de bits transmitidos dividido para el numero de antenas de trasmisión (k/N_{Tx}) . La Figura 2.35 muestra un diagrama de flujo para representar el funcionamiento interno del bloque DEMODE.

2.3.8 DECODIFICADOR CONVOLUCIONAL

El bloque DECODE CONV, tiene el proceso inverso del codificador convolucional utilizado en trasmisor (Subsección 2.1.3). obteniendo los bits enviados por el transmisor. En la Figura 2.36 se muestra los parámetros de ingreso y de salida del bloque DECODE CONV:



Figura 2.36 Diagrama de bloques del decodificador convolucional.

Como se puede observar en la Figura 2.36, el bloque tiene el mismo número de entradas y salidas, debido a que realiza un proceso independiente en cada subflujo. Las entradas son los bits modulados de cada canal, cada subtrama de bit tiene una longitud de [2k/NTx], al pasar por el bloque de decodificación convolucional cada dos bits el codificador elige un bit correspondiente a los que contiene información, las salidas del bloque corresponden a las subramas de bits decodificados, con una longitud igual a [k/NTx]. En adición, la Figura 2.37 representa el diagrama de flujo del bloque de decodificación convolucional.



Figura 2.37 Diagrama de flujo para el bloque de decodificación convolucional.

2.3.9 MULTIPLEXACIÓN

El bloque MUX, tiene la función de construir una matriz con todas las subtramas que se obtiene en el DECODE CONV, de esta manera concatena todos los

flujos de bits uno a continuación de otro, con el objetivo de tener la misma forma del mensaje que fue enviado por el transmisor. Esto se representa en la Figura 2.38. La Figura 2.39 se muestra los parámetros de ingreso y de salida del bloque de multiplexación de bits.



Figura 2.39 Diagrama de bloques del multiplexor.

Como se puede apreciar el bloque tiene tres entradas y una sola salida, ya que esos tres ingresos pertenecen al grupo de las subtramas decodificadas que se van a reconstruir en una sola trama, es decir que el bloque MUX es el proceso de convertir bits de paralelo en serie. La Figura 2.40 representa el diagrama de flujo para el bloque de multiplexación de subtramas.



Figura 2.40 Diagrama de flujo para el bloque multiplexor.

2.3.10 ANÁLISIS DEL NÚMERO DE ERRORES RECIBIDOS

El bloque ERROR ANALYSIS, realiza el proceso de comparación entre los datos de información que se enviaron en el transmisor y los datos que se decodificaron en el receptor, la comparación será a nivel de símbolos y bits, con el objetivo de detectar cuantos errores existen antes de la decodificación convolucional e identificar los bits corregidos por el mismo. En la Figura 2.41 se muestra los

parámetros de ingreso y de salida del bloque ERROR ANALYSIS. Ingresa la ráfaga de bits resultante de la multiplexación al bloque y se compara con los bits enviados, obtenido a la salida el número de errores producto de la comparación.



Figura 2.41 Diagrama de bloques del analizador de errores recibidos.

2.3.11 DECODIFICADOR DE BITS A TEXTO

Este último bloque se utiliza para convertir lo bits producto del receptor en la cadena de caracteres enviados. En el siguiente diagrama se muestra los parámetros de ingreso y de salida del bloque BIT to TEXT. Esto se muestra en la Figura 2.42.



Figura 2.42 Diagrama de bloques del conversor de bits a texto.

2.4 SINCRONIZACIÓN DE EQUIPOS

La sincronización es necesaria en todo sistema de comunicación donde intervengan dos o más equipos tanto en trasmisión como en la recepción de manera que cada uno de estos entienda el mismo tiempo de símbolo, de bit y/o de muestro. Para conseguirlo, se usó el equipo CDA-2990, que permite distribuir una señal de reloj de hasta 8 canales o equipos SDR.



Figura 2.43 Diagram de conexion del equipo de sincronizacion CDA-2990

Además, de acuerdo con el fabricante, National Instruments indica que el equipo CDA-2990 puede establecer la sincronización usando sincronización externa disciplinada por GPS (GPSDO) o a través de un cristal que permite generar señales de sincronización de entrada de precisión de pulso por segundo (PPS) internas que ha sido la configuración usada en el desarrollo de este trabajo [28][29]. De acuerdo con lo mencionado y según el manual del dispositivo, la conexión de equipos corresponde a la Figura 2.43.

Para la implementación se utiliza un equipo USRP X310 para trasmitir y otro para recibir donde los parámetros de sincronización deben estar habilitados en modo interno o propios del mismo equipo tal como se muestran en la columna de la sincronización interna en la Tabla 2.14. Esto debido a que cada uno de estos equipos, como se mencionó al inicio de este capítulo permite implementar MIMO de 2 × 2. Por otra parte, cuando se utiliza más de dos equipos USRP X310 tanto en trasmisión como en recepción, en el Panel del programa (Ver Apéndice B-Figura B.1) deben estar habilitados los parámetros en modo externo, como se muestran en la columna de la sincronización externa en la Tabla 2.14. De esta forma se configuran los equipos USRP X310 para que trabajen con una sincronización externa mediante el equipo sincronizador CDA-2990, representado en la Figura 2.43.

Parámetro	Estado		
	Sinc. Interna	Sinc. Externa	
Reference Frequency Source	Internal	RefIn	
Timebase Clock Source	Internal	PpsIn	
Timebase Clock Polarity	Rising	Rising	

Tabla 2.14 Parámetros para la sincronización interna y externa del USRPX310

Debe mencionarse que es posible implementar un sistema MIMO usando los equipos USRP 2920 que disponen de un solo canal cada uno. Esto se puede lograr a través del uso de cables de expansión para establecer arreglos de 2 × 2 usando cables con conectores SMA para sincronizarlos entre estos, sin embargo, para mantener la sincronización con una mayor cantidad de equipos se recomienda usar el octo-clock CDA-2990.

2.5 CONFIGURACIONES Y ESPECIFICACIONES.

El primer parámetro que se debe tomar en consideración es la frecuencia de portadora con la que se va a realizar la comunicación, dicha frecuencia es establecida por las especificaciones del tipo de antenas que se utilizaron, en este caso las antenas pueden trabajar en la banda de 840 MHz y 1200 MHz. Se elige la frecuencia de trabajo de 1200 MHz, debido a que, los sistemas MIMO requieren trabajar a frecuencias altas, como se mencionó la Sección 1.2. En la Tabla 2.15, se muestran todos los parámetros utilizados en la simulación e implementación del sistema de comunicaciones MIMO y en la Figura 2.16 se presentan los equipos utilizados en el desarrollo de este trabajo.

Parámetro	
	alor
Frecuencia de Portadora	1 .2 GHz
Gain 0 – Gain 1 (Tx-Rx)	1 0
Symbol Rate	00 K ²
Symbol per Packet	4 096
Tx Oversample Factor	1 0
Rx Oversample Factor	1 0
Modulation Scheme	-QAM
Filter length	2
Filter parameter	0 ,5
Channel Length Estimate	3
Num Samples Per Write	1 0000
Timeout	1 0
IQ Rate [S/sec]	1 M
Threshold	0 .05
hysteresis	5

Tabla 2.15 Parámetros utilizados en la implementación

Equipos	Fotografía	
USRP-X310		
Sincronizador CDA-2990		

Tabla 2.16 Equipos utilizados en la Implementación

CAPITULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo analiza los resultados obtenidos tanto en la simulación como en la implementación del sistema de comunicación MIMO usando las figuras de mérito correspondientes a la tasa de error de bit BER y la tasa de error de símbolo SER. En la simulación se puede expandir el número de antenas tanto de trasmisión como de recepción con mayor facilidad, por lo que se realiza una comunicación D-BLAST $2 \times 2, 3 \times 2$ y 4×3 , mientras que, en la implementación se realiza una comunicación D-BLAST 2×2 y 3×2 , y para comparar la codificación D-BLAST con otro tipo de codificación espacio–temporal se implementa Alamouti 2×2 . Debido a la cantidad de equipos disponibles en la planificación de este proyecto, el alcance de este trabajo para la implementación considera el esquema más grande disponible corresponde al esquema MIMO de 3×2 aplicando D-BLAST. La comunicación MIMO 2X2 se realiza con la finalidad de analizar el comportamiento de la codificación espacio temporal D-BLAST en un sistema donde el número de antenas de trasmisión es igual al de recepción ($N_{Tx} = N_{Rx}$).

3.1 SIMULACION

En la Subsección 2.3.6, se detallaron tres técnicas para aplicar la decodificación D-BLAST de las señales recibidas en la matriz $[Y_B]$. Se evaluaron estas tres técnicas en sistemas MIMO de 2×2 y 3×2 aplicando D-BLAST, a través de simulación para determinar cuál presenta mejores resultados con respecto a BER y SER. La Figura 3.1 y Figura 3.2 muestran los resultados de BER y SER generados por los tres tipos de técnicas de decodificación D-BLAST. Según lo comentado, para un sistema de 2 × 2 la técnica D-BLAST 1 detallada la en la Tabla 2.9 de la Subsección 2.3.6 tiene un mejor comportamiento ya que tiene valores más bajos en la tasa de error de bit y símbolo mientras el SNR incrementa lo que significa mejor rendimiento en el sistema de comunicación para esta técnica. Para comprobar los resultados en un sistema con mayor número de antenas en el trasmisor, se aplicó las mismas técnicas para un sistema D-BLAST 3×2 . En la Figura 3.3 y Figura 3.4 se aprecia las gráficas de BER y SER correspondientes confirmando los resultados anteriores. En el caso de D-BLAST 4 × 3 solamente se aplica esta técnica y se compara los tres sistemas simulados. Además, en la implementación práctica se usa esta misma metodología.



Figura 3.1. Curvas del BER obtenidas de simulación del sistema MIMO 2X2 para tres tipos de Técnicas D-BLAST diferentes.



Figura 3.2. Curvas del SER obtenidas de simulación del sistema MIMO 2X2 para tres tipos de Técnicas D-BLAST diferentes



Figura 3.3 Curvas del BER obtenidas de simulación del sistema MIMO 3X2 para tres tipos de Técnicas D-BLAST diferentes.



Figura 3.4. Curvas del SER obtenidas de simulación del sistema MIMO 3X2 para tres tipos de Técnicas D-BLAST diferentes.

Este análisis sirvió para establecer la técnica de decodificación óptima para utilizar en la simulación e implementación y generar los siguientes análisis.

Una vez que se ha determinado técnica de decodificación que genera una curva del BER y SER con una mejor respuesta ante los cambios de SNR. Así, se realiza la simulación de los tres sistemas de comunicación MIMO mencionados y se genera las gráficas de BER en la Figura 3.5 y SER en la Figura 3.6.

La comparación de estas gráficas sirve para determinar cuál es el comportamiento de un sistema MIMO con una codificación espacio temporal D-BLAST, al incrementar el número de antenas tanto en el trasmisor como en el receptor.



Figura 3.5. Comparación del BER entre los dos sistemas de comunicación MIMO 2X2, 3X2 y 4X3 simulados aplicando D-BLAST

En la Figura 3.5 se puede observar que para un valor de SNR bajo el sistema MIMO 3×2 y MIMO 4×3 tiene valores cercanos de tasa de error de bit, conforme el valor de SNR se incrementa el sistema MIMO 3×2 responde de mejor forma, ya que su tasa de error de bit presenta mejores resultados, es decir que el número de errores de bit en el receptor es menor para un mismo valor de SNR con relación al sistema MIMO 4×3 . Pero si se comparan estos dos con el sistema de MIMO 2×2 , es notable la diferencia ya que este sistema tiene valores menos significativos en la tasa de error de bit a niveles bajos de SNR. El análisis de SER es necesario para saber cuántos símbolos erróneos llegaron al receptor. La Figura 3.6 se muestra la gráfica del SER de los dos sistemas simulados.

Este efecto se debe a que mientras más antenas de trasmisión y recepción tenga el sistema MIMO, se generan más canales inalámbricos que intervienen en la comunicación los cuales agregan más ruido a las múltiples señales que llegan al receptor dificultando su correcta detección y por lo tanto teniendo valores de tasa de error de bit más altos. Sin embargo, el sistema de MIMO 4×3 aún se encuentren en valores óptimos para su desarrollo, esto significa en la codificación espacio tiempo D-BLAST es un sistema muy robusto, ya que mientras mayor sea el número de antenas de transmisión y recepción, mayor será la redundancia que se aplique al sistema.



Figura 3.6 Comparación del SER entre los dos sistemas de comunicación MIMO 2X2, 3X2 y 4X3 simulados aplicando D-BLAST

De la misma forma que en la Figura 3.5 de la comparación del BER de los tres sistemas D-BLAST, la curva del SER que tiene mejor respuesta frente al incremento del SNR es la del sistema 2×2 , esto significa que el codificador convolucional funciona perfectamente para todos los casos.

Si se compara las gráficas en todos dos primeros sistemas MIMO se puede observar que se tiene un valor mayor de tasa de error de símbolo que tasa de error de bit para un mismo valor de SNR, esto quiere decir que el codificador de canal corrige algunos bits de información De tal manera se logra disminuir el número de errores de bit considerablemente. En el sistema D-BLAST 4×3 según se incremente el SNR los valores de la tasa de error de bit son más altos.

El comportamiento del codificador en estos sistemas se puede apreciar que corrige más números de bits en D-BLAST 4×3 . Mediante este análisis se demuestra que el codificador convolucional funciona perfectamente, ya que responde bien ante el incremento de antenas tanto de trasmisión como de recepción en el esquema de comunicación inalámbrica. No obstante, es claro que para sistemas MIMO de mayor tamaño, hay mayor probabilidad de fallo debido a la complejidad del sistema a pesar de que se puede incrementar la cantidad de datos transmitida.

3.2 IMPLEMENTACION

En la implementación se obtienen las gráficas de Bit Error Rate (BER) y Symbol Error Rate (SER) aplicando la técnica de decodificación D-BLAST 1 que se muestra en la Tabla 2.9 y la Tabla 2.11 de la Subsección 2.3.6. Se analizan los tres esquemas implementados, Alamouti 2×2 , D-BLAST 2×2 y 4×3 .

Como se observa en la Figura 3.7 y Figura 3.8 las tres curvas empiezan a decender cuando el SNR incrementa, pero la curva que presenta un mejor comportamiento es la generada por el sistema D-BLAST 2×2 , tanto en las curvas BER como SER, debido a que tiene una tasa de error de bit menor para los mismos valores de SNR en comparacion de los sistemas D-BLAST 3×2 y Alamouti 2×2 . Esto indica que el sistema de comunicación MIMO que utiliza la codificacion espacio–temporal D-BLAST es mas robusto que Alamouti.

Se confirma que mientras más grande es el esquema MIMO mayor es la tasa de error de bit aunque se puede enviar mayor cantidad de datos.



Figura 3.7. Comparación del BER de los tres sistemas de comunicación implementados



Figura 3.8. Comparación del SER de los tres sistemas de comunicación implementados

3.3 COMPARACIÓN ENTRE SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN

En la Figura 3.9 y Figura 3.10 se compara la simulación con la implementación de un sistema de comunicación D-BLAST en las diferentes configuraciones realizadas como MIMO 2×2 , MIMO 3×2 y MIMO 4×3 , con el objetivo de verificar si la implementación funciono de acuerdo con lo esperado en la simulación.

Como se aprecia en la Figura 3.9 todas las curvas tienen un comportamiento muy aceptable, la curva azul que representa a la simulación de un sistema D-BLAST 2×2 tiene valores más bajos en la tasa de error de bit, esto es lo que se esperaba ya que en la simulación estamos estimando un tipo de canal parecido al que se presenta en la implementación, pero no es exactamente el mismo. La curva de color café representa la implementación del mismo sistema, la cual se ejecutó con los dos equipos USRP, uno para transmitir y uno para recibir, además de un equipo de sincronización CDA-2990. Esto sucede de igual forma con el D-BLAST 3×2 y 4×3 , en la simulación el segundo sistema que muestra valores de BER menos significativos es D-BLAST 2×2 , seguido por D-BLAST 4×3 , que este sistema se diseñó con el fin de presentar el comportamiento del sistema si se incrementa aún más el número de antenas, en la implementación no se realizó este sistema D-BLAST 4×3 , ya que el límite máximo propuesto fue de un D-BLAST 3×2 .

Si se compara el comportamiento del SER con respecto al BER en la Figura 3.9 y Figura 3.10, se aprecia claramente que mientras mayor sea el número de antenas en el sistema mayor será el trabajo del codificador convolucional, ya que, en esta comparación, corrige un mayor número de bits en el sistema de D-BLAST 4×3 .



Figura 3.9. Comparación del BER de la simulación e implementación de los sistemas de comunicación MIMO realizados para D-BLAST.



Figura 3.10. Comparación del SER de la simulación e implementación de los sistemas de comunicación MIMO realizados para D-BLAST.

CAPITULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo fundamental simular e implementar un codificador espacio-temporal D-BLAST aplicado a un sistema de comunicación MIMO, para analizar el comportamiento de las curvas generadas por la tasa de error de bit (BER) y la tasa de error de símbolo (SER) de este sistema. Para cumplir este objetivo, en la simulación se trabajó con dos sistemas, MIMO 3×2 y MIMO 4×3 para mostrar que es posible desarrollar una estructura que pueda trabajar con MIMO en forma escalable. Por otra parte, en la implementación se realizó un sistema MIMO 2×2 aplicando la técnica de codificación espacio-temporal D-BLAST, el mismo que se comparó con las curvas de BER y SER de un

codificador similar como es Alamouti 2×2 . Además, se incrementó el número de antenas para comparar con un sistema MIMO 3×2 , de esta manera se compara el comportamiento de los tres casos.

La simulación de estos sistemas MIMO aplicando la codificación, espaciotemporal D-BLAST, se realizó con el objetivo de tener una visión preliminar del funcionamiento de este codificador y observar el comportamiento de las curvas del BER y SER que presentan estos sistemas. Además, cabe mencionar que, en la literatura revisada, el proceso de decodificación para D-BLAST no se expone de forma clara, razón por la cual este trabajo también permitió analizar tres técnicas para la decodificación propuestas para D-BLAST (Ver Subsección 2.3.6), con el propósito de seleccionar la que presenta menor tasa de error de bit para trabajarla en la implementación. La técnica D-BLAST 1 mostrada la en la Tabla 2.9 y la Tabla 2.11 fue seleccionada debido a que presenta mejores resultados en las figuras de mérito BER y SER.

Al comparar las gráficas del BER y SER del sistema D-BLAST 3×2 implementado con el simulado. Se concluye que la simulación presenta mejores resultados debido a que no tiene el mismo nivel de ruido que se presenta en la implementación, donde se genera una interferencia provocada por las antenas y los efectos propios del canal inalámbrico de la comunicación.

En la implementación el sistema D-BLAST 2×2 resultó ser más eficiente en comparación del sistema D-BLAST 3×2 y Alamouti 2×2 , mostrando una tasa de error de bit menos significativa en los diferentes esquemas de MIMO analizados. Además, de que este sistema brinda una mejor diversidad espacial debido a que puede crecer en transmisión y recepción, a diferencia de Alamouti que solo puede crecer en el número de antenas de recepción. Luego de esta implementación de MIMO 2×2 en los dos sistemas mencionados, se analizaron los resultados cuando incrementamos una antena en la transmisión y recepción, para obtener un D-BLAST 3×2 , los cuales resultaron tener un BER y SER superior al sistema de D-BLAST 2×2 , pero tiene un comportamiento similar al de ALAMOUTI, de manera que aún se mantiene en valores no tan significativos para su aplicación.

Para la implementación de D-BLAST u otro tipo de codificación espaciotemporal para MIMO, se recomienda tener en cuenta cada uno de los procesos tanto de codificación como de decodificación descritos en este documento. Entre los procesos fundamentales para una detección coherente es la secuencia de entrenamiento, el sincronizador de símbolo y trama, todos estos bloques deben funcionar perfectamente para tener una estimación de canal no errónea.

El estimador de canal del codificador espacio-temporal D-BLAST para definir su tamaño matricial, depende del número de antenas de transmisión y recepción, así se conocerá el número de columnas y filas respectivamente. Esta matriz requiere que los coeficientes sean correctos y estén ubicados en la posición adecuada, para tener una óptima comunicación inalámbrica, en cualquier número de antenas. Una vez obtenida la matriz de la estimación de canal, se procede a armar la matriz con los coeficientes correctamente ordenados como se muestra en la ecuación (43). Esta nueva ecuación dependerá del número de antenas de trasmisión para sus filas y columnas. Debido a esto, si se requiere incrementar el número de antenas, los coeficientes deben ubicarse de la misma forma diagonal como se presentó en la estimación de canal de este proyecto, lo cual llevará a una tasa de error de bit menos significativa en un bajo nivel de ruido SNR.

Como posibles trabajos a futuro, se puede incrementar aún más el número de antenas tanto de trasmisión como de recepción, para evaluar sistemas de MIMO masivo aplicando la técnica de codificación espacio-temporal D-BLAST. Para logar esto, se puede utilizar varios equipos USRP-X310 MIMO dependiendo del número de antenas que se requiera, esta acción genera dos dificultades, de hardware y software. La dificultad en hardware es que el equipo de sincronización CDA-2990 que tiene el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, puede sincronizar máximo 8 equipos USRP MIMO considerando que debe ser usado para transmitir y recibir datos. Por lo tanto, existe una limitación en el número de antenas del sistema que se plantee implementar. También es posible usar equipos de antena simple como el modelo USRP 2920. Sin embargo, el tamaño de la estructura MIMO no podría superar más de 4 antenas para transmisión y recepción. Con respecto al software es que, al incrementar el número de antenas en la implementación del sistema, se requiere una estimación de canal más robusta, para solucionar este problema se debe seguir el modelo de los coeficientes conjugados del canal que muestra en la (43) de la Subsección 2.3.6.

75

Para finalizar, los autores debemos mencionar que puede conseguirse tasas de transmisión más altas si el modulador/demodulador, codificador/decodificador y estimador de canal son implementados en el FPGA de los equipos USRP de manera que no se restrinja el procesamiento por la velocidad del computador con el cual se trabaja.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, *Introduction to Space-Time Wireless Communications*, vol. 158. Cambridge University Press, 2006.
- [2] W. Sarango, X. Villazhañay, and W. Velasquez, "La Banda Ancha En El Ecuador, Su Desarrollo Y Las Expectativas De Crecimiento Hacia El Futuro," Universidad Politécnica Salesiana, 2013.
- [3] Diario El Telégrafo, "Ecuador, el segundo con mayor velocidad 4G en la región," *Diario El Comercio*, 2018. [Online]. Available: https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/tecnologia/1/ecuador-el-segundo-conmayor-velocidad-4g-en-la-region.
- [4] H. Cuevas Esteban, "Propuesta de Aplicación de la Tecnología MIMO Masivo a las Comunicaciones Móviles 5G," Universidad Politecnica de Madrid, 2017.

- [5] D. Golman, "¿Qué es la tecnología 5G? Todo lo que necesitas saber | CNN," *Innovación - CNN*, 2018. [Online]. Available: https://cnnespanol.cnn.com/2018/01/31/5g-que-es-como-funciona-quecambia/. [Accessed: 11-Dec-2019].
- [6] GSMA, "Espectro 5G," Posicion Polit. publica la GSMA, pp. 7–23, 2019.
- [7] Diario El Comercio, "Ecuador tendrá tecnología móvil 5G en el 2020, dice Gobierno," *Diario El Comercio*, Jul-2019. [Online]. Available: https://www.elcomercio.com/actualidad/tecnologia-movil-5g-ecuador-2020.html. [Accessed: 26-Oct-2019].
- [8] J. J. Anguís Horno, "Redes de Área Local Inalámbricas: Diseño de la WLAN de Wheelers Lane Technology College," Universidad de Sevilla, 2008.
- [9] T. Zemen and M. Guillaud, "MIMO Communications," *Communications*, vol. 6, 2007.
- [10] C. M. Simbaña Moreno, "Comparación de Téncias de Recepción Para Sistemas MIMO 2x2," Universidad Politécnica Salesiana, 2017.
- [11] A. Morente Cruz, "Sistemas de Diversidad en Transmisión. Estudio y Simulación en MATLAB del Esquema de Alamouti," ETSI - Universidad de Sevilla, 1998.
- [12] V. Weerackody, "Method and apparatus for providing time diversity," 1994.
- [13] L. Wu, Shiquan Tong, Wen Strawczynski, "Adaptive time diversity and spatial diversity for OFDM," 2006.
- [14] P. Babarczi, J. Tapolcai, A. Pasic, L. Ronyai, E. R. Berczi-Kovacs, and M. Medard, "Diversity coding in two-connected networks," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 25, no. 4, pp. 2308–2319, 2017.
- [15] E. Ayanoĝlu, I. Chih-Lin, R. D. Gitlin, and J. E. Mazo, "Diversity Coding for Transparent Self-Healing and Fault-Tolerant Communication Networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 41, no. 11, pp. 1677–1686, 1993.
- [16] B. Clerckx and Claude Oestges, MIMO Wireless Networks: Channels, Techniques and Standars for Multi-Antenna, Multi-User and Multi-Cell Systems, Second. Academic Press Publications, 2013.

- [17] A. Sibille, C. Oestges, and A. Zanella, MIMO: From Theory to Implementation. Academic Press Publications, 2010.
- [18] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas," *Bell Labs Tech. J.*, vol. 1, no. 2, pp. 41–59, 1996.
- [19] M. Gupta and G. Murmu, "Experimental Study of Fading using Alamouti Space-Time Block Code," 2018 IEEE Int. Students' Conf. Electr. Electron. Comput. Sci. SCEECS 2018, no. 1, pp. 1–6, 2018.
- [20] R. Prieto, A. Abril, and A. Ortega, "Experimental Alamouti-STBC Using LDPC Codes for MIMO Channels over SDR Systems," 2017 IEEE 30th Can. Conf. Electr. Comput. Eng., pp. 1–5, 2017.
- [21] M. Sellathurai and S. Haykin, Space-Time Layered Information Processing for Wireless Communications. Wiley & Sons, 2009.
- [22] G. C. Daily and P. A. Matson, *From theory to implementation*, vol. 105, no. 28. 2008.
- [23] Jamel Thamer and Hadi Nooreldeen, "Performance Evaluation of Vertical Bell Labs Layered Space Time (VBLAST) Algorithms for MIMO System," *Nahrin Univ. Coll. Eng. J.*, vol. 13, no. 2, 2011.
- [24] A. Ramos and J. M. Molina, "Implementación de los algoritmos V-BLAST y D-BLAST y comparación con los Space-Time Codes para sistemas MIMO," 2006.
- [25] Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang, and C. G. Kang, MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB. John Wiley \& Sons, 2010.
- [26] V. Puig Borrás, "Simulación Computacional y Paralelización de un Sistema de Comunicaciones Inalámbrico MIMO: Estimación de Canal y Decodificación de Señales," Universidad Politécnica de Valencia., 2011.
- [27] D. Mavares T., "Estimación de Canal y Selección Adaptativa de Código Espacio-Tiempo en Sistemas de Diversidad en Transmisión," Universidad de Cantabria, 2006.
- [28] C. Tables and P. C. Distribution, "CDA for 8-Channel Clock Distribution

Accessory," no. 866, pp. 1-4, 2016.

[29] A. A. Hussain, N. Tayem, A. H. Soliman, and R. M. Radaydeh, "FPGA Based Hardware Implementation of Computationally Efficient Multi-Source DOA Estimation Algorithms," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 88845–88858, 2019.

APÉNDICES

APÉNDICE A: FOTOGRAFÍAS



Figura A.1 USRP X310 utilizado en la implementación de este trabajo de titulación.



Figura A.2 Cable para la comunicación FPGA entre USRP X310 y el ordenador.



Figura A.3 Cable para la comunicación Ethernet entre USRP X310 y el ordenador.



Figura A.4 Antenas Celular (1710-1990 MHz).



Figura A.4 Conexión de las antenas Celular (1710-1990 MHz) en el equipo USRP X310.



Figura A.4 Equipo sincronizador CDA-2990.



Figura A.4 Cables coaxiales para la conexión entre el quipo sincronizador CDA-2990 y los equipos USRP X310



Figura A.4 Pruebas de funcionamiento del sistema MIMO con una comunicación Ethernet



Figura A.4 Implementación del sistema MIMO con una comunicación Ethernet

APÉNDICE B: DIAGRAMAS DE BLOQUES UTILIZADOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL TRASMISOR PARA EL SISTEMA DE COMUNICACIONES MIMO



Figura B.1 Panel frontal del trasmisor implementado para el sistema de Comunicación MIMO 2X3

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL TRANSMISOR IMPLEMENTADO



Figura B.2 Diagrama de bloques del trasmisor implementado para el sistema de Comunicación MIMO 2X3



Figura B.3 Diagrama de bloques utilizados para la trasmisión.



Figura B.4 Diagrama de bloques utilizados para inicializar los equipos USRPX310 en la trasmisión.

En las siguientes figuras se muestran a detalle cada uno de los bloques creados en el software de LabVIEW Communications para realizar la trasmisión de datos.

CONVERSIÓN DE TEXTO A BITS



Figura B.5 Parámetros del bloque de la conversión de texto a bits.



Figura B.6 Diagrama de bloques de la conversión de texto a bits.

DEMULTIPLEXACIÓN



Figura B.7 Parámetros del bloque de la demultiplexación de bits.



Figura B.8 Diagrama de bloques de la demultiplexación de bits.

CODIFICACIÓN CONVOLUCIONAL



Figura B.9 Parámetros del bloque de la codificación convolucional.



Figura B.10 Diagrama de bloques de la codificación convolucional.

MODULACIÓN



Figura B.11 Parámetros del bloque de la modulación.


Figura B.12 Diagrama de bloques de la modulación.

CODIFICADOR (RTANSMISOR) D-BLAST



Figura B.13 Parámetros del bloque del trasmisor D-BLAST.



Figura B.14 Diagrama de bloques del trasmisor D-BLAST

ROTADOR DE SÍMBOLOS



Figura B.15 Diagrama de bloques del rotador 3D para el trasmisor D-BLAST

MATRIZ 2D ROTADA



Figura B.16 Diagrama de bloques del rotador 2D para el trasmisor D-BLAST

SECUENCIA DE ENTRENAMIENTO



Figura B.17 Parámetros del bloque que agrega la secuencia de entrenamiento.



Figura B.18 Diagrama del bloque que agrega la secuencia de entrenamiento

FILTRO CONFORMADOR DE PULSO



Figura B.19 Parámetros del bloque del filtro conformador de pulso en el trasmisor.



Figura B.20 Diagrama de bloques del filtro conformador de pulso en el trasmisor.

APÉNDICE C: DIAGRAMAS DE BLOQUE UTILIZADOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL RECEPTOR PARA EL SISTEMA DE COMUNICACIONES MIMO

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL RECEPTOR IMPLEMENTADO



Figura B.21 Panel del receptor implementado.

Industrie Team of Inclusion performance The posterior of the second	uini) (mini)-	Contract in the set of			and and the former		
		(BIT to TEXT	NAMES OF TAXABLE
Trans WAVEFORM	POLAS SYMBOL ATMC	BYRE ESTEMATE	DBlast	DEMODE Conv	HUX	AMALYEE	PEOPle Inde
389/ 385X-903008()/	Server have	THE FOR THE PARTY OF THE PARTY	9	and interact statem /			

Figura B.22 Diagrama de bloques del receptor implementado.

TRIM WAVEFORM



Figura B.23 Parámetros del bloque del detector de señal recibida.



Figura B.24 Diagrama de bloques del detector de señal recibida.

FILTRO DE CONFORMACION DE PULSO



Figura B.25 Parámetros del bloque del filtro conformador de pulso en el receptor.



Figura B.26 Diagrama de bloques del filtro conformador de pulso en el receptor.

SINCRONIZACION DE SIMBOLO



Figura B.27 Parámetros del bloque de la sincronización de símbolo.



Figura B.28 Diagrama de bloques de la sincronización de símbolo.

SINCRONIZACION DE TRAMA



Figura B.29 Parámetros del bloque de la sincronización de trama.



Figura B.30 Diagrama de bloques de la sincronización de trama.

ESTIMACION DE CANAL



Figura B.31 Parámetros del bloque de la estimación de canal.



Figura B.32 Diagrama de bloques de la estimación de canal.

RECEPTOR D-BLAST



Figura B.33 Parámetros del bloque del receptor D-BLAST.



Figura B.34 Diagrama de bloques del receptor D-BLAST.

DEMODULACIÓN



Figura B.35 Parámetros del bloque de la demodulación.



Figura B.36 Diagrama de bloques de la demodulación.

DECODIFICACIÓN CONVOLUCIONAL



Figura B.37 Parámetros del bloque de la decodificación convolucional.



Figura B.38 Diagrama de bloques de la decodificación convolucional.

MULTIPLEXACIÓN



Figura B.39 Parámetros del bloque de la multiplexación de bits.



Figura B.40 Diagrama de bloques de la multiplexación de bits.

CONVERSION DE BITS A TEXTO



Figura B.41 Parámetros del bloque del conversor de texto a bits.



Figura B.42 Diagrama de bloques del conversor de texto a bits.

ANALISIS DE ERRORES



Figura B.43 Parámetros del bloque del analizador de errores de bit.



Figura B.44 Diagrama de bloques del analizador de errores de bit.

APÉNDICE D: CÓDIGO EN MATLAB PARA LA SIMULACIÓN

DEL SISTEMA MIMO

```
%% MIMO COMMUNICATION SYSTEM USING D-BLAST
        Jairo Otañez - Freddy Cardenas
8
        UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
8
clc; clear all
trellis = poly2trellis(3, {'1 + x^{2}, '1 + x + x^{2}});
N packet=1; % Numero de paquetes
SNRdBs = -2:2:26;
                    %Eb N0 dB
Es = 1;
nAnalisis = 2;
noise option = 1;
Nt=3;
nErr1 = zeros(N packet, nAnalisis);
nErrT1 = zeros(length(SNRdBs), nAnalisis);
nErrT2 = zeros(length(SNRdBs), nAnalisis);
nErrT3 = zeros(length(SNRdBs), nAnalisis);
for i SNR=1:length(SNRdBs)
    SNRdB = SNRdBs(i_SNR);
      sigma=sqrt(0.5/(10^(SNRdB/10)));
    sigma2=Nt*10^(-SNRdB/10)*noise option;
    sigma=sqrt(sigma2/2);
 for i=1 : N packet
    %% Generacion de bit aleatorios
    bits ingreso = 6000; % numero de bits aleatorios
    data =randi([0 1],bits ingreso,1); % bits a trasmitir
    % numero de antenas trasmisoras y receptoras
   Nt=3; Nr=2;
    Ntramas = 1;
    % for j=1 : Ntramas
    %DBLAST
    % L ->longitud de cada flujo para las Nt antenas de Tx
    L=length(data)/Nt;
    demux = reshape(data,L, Nt);
    % se generan flujos horizontales para cada antena de Tx
    demux = demux';
    %CODIFICADOR FEC convolucional
    RCodec = 2;
    codedData d= codeConv(Nt, demux, trellis, RCodec);
    %% MODULADOR
    % antes deesta seccion los flujos son horizontales
   M=4;
    tipoMod = 'psk';
    s = zeros(size(codedData d,2)/log2(M),Nt);
    % Para cada codificacin FEC horizontal, modulamos
    for ip=1 : Nt
        s(:,ip) = digitalMod (M, codedData d(ip,:)', tipoMod);
    end
    s = transpose (s);
```

```
%% Codificador Espacio temporal D-BLAST
    % Normalizacion
    s = 1/sqrt(2) * s;
    Rsimb = zeros(Nt,L); %matriz de simbolos recibidos sin
normalizar
        for i=1:length(s) *Nt
            if real(s(i))>0 && imag(s(i))>0;
                   Rsimb(i)=1+1*j;
            end
            if real(s(i))>0 && imag(s(i))<0;</pre>
                   Rsimb(i)=1-1*j;
            end
            if (real(s(i))<0) && imag(s(i))<0;</pre>
                   Rsimb(i)=-1-1*j;
            end
             if real(s(i))<0 && imag(s(i))>0;
                   Rsimb(i) =-1+1*j;
             end
        end
    8
    %Stream Rotator
    Sr = zeros(Nt, 2*Nt-1);
    n =1;
    Ncaras = length(data)/Nt;
    % SR es una matriz de simbolos
    SR = StreamRotator(Sr,Nt,s,n);
    % Tr es la matriz de los Nt simbolos desplazados
    % hay 2*Nt-1 tiempos de simbolo
    Tr = SR;
    for n=2:Ncaras
        Tr(:,:,n) = StreamRotator(Sr,Nt,s,n);
    end
    %% CANAL
    % Matriz H
    nfilas = Nr ; ncolumnas = Nt;
    f = rand(nfilas, ncolumnas, Ncaras);
    H = (1/(sqrt(Nr)))*(f + 1i*f);
88
    %RECEPTOR
    %% Matriz Y, simbolos multiplicados por el canal que llegan a
las antenas trasmisoras
     no = sigma*(rand(Nr,(2*Nt)-1,Ncaras)+ 1i*rand(Nr,(2*Nt)-
1,Ncaras)); % AWGN, OdB de varianza
    for n=1:Ncaras
        Y(:,:,n) = H(:,:,n) *Tr(:,:,n);
    end
    Y = Y + no;
    %% receptor zero forcing
    %Matrices para la obtencion de los simbolos recibidos
    Rr=zeros(Nt, 2*Nt);
    Rr1=zeros(Nt, 2*Nt);
    Rr2=zeros(Nt, 2*Nt);
```

```
SER1=zeros(Nt,1); % matriz de ceros para los simbolos sin restar
la interferencia
   Rb=zeros(Nt,1);% matriz de ceros para los simbolos restados la
interferencia
   Rc=zeros(Nt,1);% matriz de ceros para los simbolos sin restar la
interferencia, col externas
   Rddd=zeros(Nt,1);
   Rdd=zeros(Nt,1);
   Rd=zeros(Nt,1);
   %Ubicacion de la primera cara en la Matriz Nt*2Nt
   n1=1;
   R1=Gsimb32(n1,H,Nt,SER1,Y);% bits codficados sin restar la
interferencia
   R2=Gsimb321(n1,H,Nt,Rb,Y);% bits codficados restados la
interferencia
   R3=Gsimb322(n1,H,Nt,Rc,Y);% bits codficados sin restar la
interferencia, col externas
   SER1(:,1) = R1(:,:) ; % vector formado de bits codficados sin
restar la interferencia
   Rb(:,1) = R2(:,:); % vector formado de bits codficados restados
la interferencia
   Rc(:,1) = R3(:,:) ; % vector formado de bits codficados sin
restar la interferencia, col externas
   00
   22
   Rr(:,1) = SER1(:,:);
                           %Matriz de los primeros simbolos sin
restar la interferencia
   il=1;
   for n2=2:Ncaras
        Rg=Gsimb32(n2,H,Nt,Rddd,Y);
       Rr(:,1+il) = Rg(:,:);
        il=il+1;
   end
   Sin_Restar_Interferencia = Rr;
   22
   Rr1(:,1) = Rb(:,:);
                         %Matriz de los primeros simbolos restados
la interferencia
   i=1:
    for n2=2:Ncaras
        Rq1=Gsimb321(n2,H,Nt,Rdd,Y);
        Rr1(:,1+i) = Rg1(:,:);
        i=i+1;
   end
   Restando Interferencia = Rr1;
   22
                           %Matriz de los primeros simbolos sin
   Rr2(:,1) = Rc(:,:);
restar la interferencia
   i=1;
    for n2=2:Ncaras
        Rg2=Gsimb322(n2,H,Nt,Rd,Y);
        Rr2(:,1+i) = Rg2(:,:);
        i=i+1;
   end
   Sin Restar Interferencia col cen= Rr2;
     88
     %SER 1
        SER1 = zeros(Nt,L); %matriz de simbolos recibidos sin
normalizar
        for i=1:length(Rr) *Nt
            if real(Rr(i))>0 && imag(Rr(i))>0;
```

```
SER1(i)=1+1*j;
            end
            if real(Rr(i))>0 && imag(Rr(i))<0;</pre>
                   SER1(i)=1-1*j;
            end
            if (real(Rr(i))<0) && imag(Rr(i))<0;</pre>
                   SER1(i)=-1-1*j;
            end
             if real(Rr(i))<0 && imag(Rr(i))>0;
                   SER1(i)=-1+1*j;
             end
        end
        %SER 2
        SER2 = zeros(Nt,L); %matriz de simbolos recibidos sin
normalizar
        for i=1:length(Rr1)*Nt
            if real(Rr1(i))>0 && imag(Rr1(i))>0;
                   SER2(i)=1+1*j;
            end
            if real(Rr1(i))>0 && imag(Rr1(i))<0;</pre>
                   SER2(i)=1-1*j;
            end
            if (real(Rr1(i))<0) && imag(Rr1(i))<0;</pre>
                   SER2(i)=-1-1*j;
            end
             if real(Rr1(i))<0 && imag(Rr1(i))>0;
                   SER2(i)=-1+1*j;
             end
        end
        %SER 2
        SER3 = zeros(Nt,L); %matriz de simbolos recibidos sin
normalizar
        for i=1:length(Rr2)*Nt
            if real(Rr2(i))>0 && imag(Rr2(i))>0;
                   SER3(i)=1+1*j;
            end
            if real(Rr2(i))>0 && imag(Rr2(i))<0;</pre>
                   SER3(i)=1-1*j;
            end
            if (real(Rr2(i))<0) && imag(Rr2(i))<0;</pre>
                   SER3(i)=-1-1*j;
            end
             if real(Rr2(i))<0 && imag(Rr2(i))>0;
                   SER3(i)=-1+1*j;
             end
        end
    %% Demodulador
    % sin restar interferencia
    Ns=16; b=2;
    prbsHat = zeros(Ns*b,nAnalisis);
    DemodDat1 = zeros(Nt, (length(data)/Nt)*Nr);
    DemodDat2 = zeros(Nt, (length(data)/Nt)*Nr);
    DemodDat3 = zeros(Nt, (length(data)/Nt)*Nr);
    s hat = zeros(Ns,nAnalisis);
        for iii =1:1:Nt
            for ii=1:1:Nt-1
             DemodData1 = (digitalDeMod (M, transpose(SER1(iii,:)),
tipoMod))';
```

```
DemodDat1(iii,:) = DemodData1 (:,:);
2
               nErr1 = sum(data~=DemodDat1(ii,:));
            %restando interferencia
            DemodData5 = (digitalDeMod (M, transpose(Rr1(iii,:)),
tipoMod))';
            DemoDat2(iii,:) = DemodData5 (:,:);
8
             nErr2 = sum(data~=DemodDat2(ii,:));
            % sin restar interferencia, col central
            DemodData9 = (digitalDeMod (M, transpose(Rr2(iii,:)),
tipoMod))';
            DemodDat3(iii,:) = DemodData9 (:,:);
8
              nErr3 = sum(data~=DemodDat3(ii,:));
            end
        end
   %% Decodificador
   %Matrices creadas
   decodedDat1 = zeros(Nt,length(data)/Nt);
   decodedData1 = vitdec(DemodDat1(1,:),trellis,3,'trunc','hard');
   decodedDat1(1,:) = decodedData1(:,:);
   decodedDat2 = zeros(Nt,length(data)/Nt);
   decodedData2 = vitdec(DemoDat2(1,:),trellis,3,'trunc','hard');
   decodedDat2(1,:) = decodedData2(:,:);
   decodedDat3 = zeros(Nt,length(data)/Nt);
   decodedData3 = vitdec(DemodDat3(1,:),trellis,3,'trunc','hard');
   decodedDat3(1,:) = decodedData3(:,:);
   for in=1:nAnalisis
        for iii=2:1:Nt
             % sin restar interferencia
             decodedData4 =
vitdec(DemodDat1(iii,:),trellis,3,'trunc','hard');
             decodedDat1(iii,:) = decodedData4(:,:);
              % restando interferencia
             decodedData5 =
vitdec(DemoDat2(iii,:),trellis,3,'trunc','hard');
             decodedDat2(iii,:) = decodedData5(:,:);
             % sin restar interferencia, col central
             decodedData6 =
vitdec(DemodDat3(iii,:),trellis,3,'trunc','hard');
             decodedDat3(iii,:) = decodedData6(:,:);
        end
            SQ = ones(3, 2000);
            nE1 = Rsimb == SER1;
           [nErr1 x1] = biterr(SQ, nE1);
            nE2 = Rsimb == SER2;
           [nErr2 x2] = biterr(SQ, nE2);
            nE3 = Rsimb == SER3;
           [nErr3 x3] = biterr(SQ, nE3);
   end
 end
0
     nErrT1(i SNR,:)=sum(nErr1);
   nErrT1(i SNR,:) = nErr1/length(data);
   nErrT2(i SNR,:) = nErr2/length(data);
```

```
nErrT3(i SNR,:) = nErr3/length(data);
  end
simBer1 = nErrT1;
                                    % Calculo del BER simulado
simBer2 = nErrT2;
simBer3 = nErrT3;
clc
%f(1) = semilogy(handles.ber, SNRdBs, simBer1(:,1), '*-', 'LineWidth',2);
EbNOLin = 10.^(SNRdBs/10);
p = 1/2 - 1/2 * (1+1./EbNOLin).^{(-1/2)};
theoryBerMRC nRx2 = p.^{2.*}(1+2*(1-p));
clc
hold
f(1) = semilogy(SNRdBs, (0.099) * simBer3(:,1), 'bp-', 'LineWidth',2);
f(2) = semilogy(SNRdBs, (0.099) * simBer1(:,1), 'rd-', 'LineWidth',2);
f(3) = semilogy(SNRdBs, (0.099) * simBer2(:,1), 'c+-', 'LineWidth',2);
grid on
leyenda{1} = sprintf('Tecnica D-BLAST 1');
leyenda{2} = sprintf('Tecnica D-BLAST 2');
leyenda{3} = sprintf('Tecnica D-BLAST7 3');
legend(leyenda);
xlabel('SNR(dB)')
ylabel('Tasa de Error de Simbolo')
```