



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

MANUAL DE PRÁCTICAS PARA SISTEMAS DE COMUNICACIONES
INALÁMBRICAS MIMO DEL LABORATORIO DE TELECOMUNICACIONES DE
LA SEDE CUENCA

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero en Telecomunicaciones

AUTOR: PABLO ANDRES BARBECHO PAUTE
DAYANNA LISSETH NARVÁEZ ARIAS
TUTOR: ING. JUAN PAÚL INGA ORTEGA, MsC.

Cuenca – Ecuador

2024

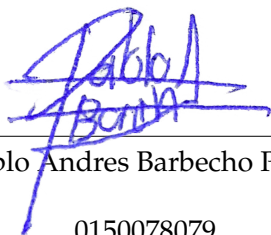
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Pablo Andrés Barbecho Paute con documento de identificación N° 0150078079 y Dayanna Lisseth Narváez Arias con documento de identificación N° 0107345860; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

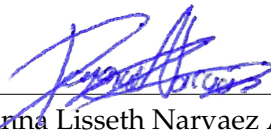
Cuenca, 19 de febrero de 2024

Atentamente,



Pablo Andrés Barbecho Paute

0150078079



Dayanna Lisseth Narvaez Arias

0107345860

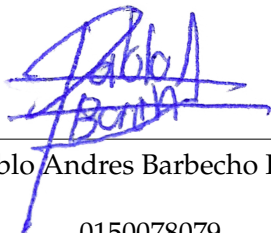
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Pablo Andrés Barbecho Paute con documento de identificación N° 0150078079 y Dayanna Lisseth Narvárez Arias con documento de identificación N° 0107345860, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: "Manual de Prácticas Para Sistemas de Comunicaciones Inalámbricas MIMO del Laboratorio de Telecomunicaciones de la Sede Cuenca", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

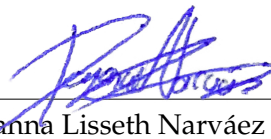
Cuenca, 19 de febrero de 2024

Atentamente,



Pablo Andrés Barbecho Paute

0150078079



Dayanna Lisseth Narvárez Arias

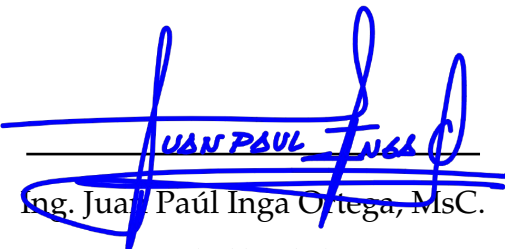
0107345860

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Juan Paúl Inga Ortega con documento de identificación N° 0104166491, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: MANUAL DE PRÁCTICAS PARA SISTEMAS DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS MIMO DEL LABORATORIO DE TELECOMUNICACIONES DE LA SEDE CUENCA, realizado por Pablo Andrés Barbecho Paute con documento de identificación N° 0150078079 y Dayanna Liseth Narváez Arias con documento de identificación N° 0107345860, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 19 de febrero de 2024

Atentamente,


Ing. Juan Paúl Inga Ortega, MsC.
0104166491

AGRADECIMIENTOS

Quisiera comenzar este espacio de gratitud con el más profundo reconocimiento a Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza a lo largo de este arduo camino académico. Su amor incondicional y sus constantes bendiciones han sido el faro que ha iluminado cada paso que he dado en esta travesía hacia la culminación de mi tesis.

A mis padres Pablo y Ligia, mi pilar fundamental, les debo todo lo que soy y todo lo que he logrado. Su inquebrantable apoyo, sacrificio y amor infinito han sido el motor que me ha impulsado a alcanzar mis metas. Sin su constante aliento y orientación, este logro no habría sido posible.

A mis queridas hermanas Valentina e Ivanna, quienes han estado a mi lado en cada momento, brindándome su apoyo incondicional y sus palabras de aliento.

A mi amada novia Dayanna, quien ha sido mi compañera y mi mayor confidente. Su paciencia, comprensión y amor incondicional han sido mi refugio en los momentos de estrés y duda. Gracias por creer en mí y por ser mi más grande motivación para alcanzar mis sueños.

Por último, pero no menos importante, quiero expresar mi sincero agradecimiento a mi tutor Ing. Juan Inga, cuya sabiduría, orientación y apoyo han sido fundamentales en el desarrollo de este trabajo. Su dedicación y compromiso han sido una fuente inagotable de inspiración y aprendizaje para mí.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento. Sin su amor, apoyo y orientación, este logro no habría sido posible.

Que este trabajo sea también un tributo a cada uno de ustedes, quienes han dejado una huella imborrable en mi corazón y en mi camino hacia el conocimiento.

Pablo Andrés Barbecho Paute

Quiero expresar mi mas profundo agradecimiento a Dios y a mis padres Patricio y Catalina por estar siempre a mi lado con un apoyo incondicional a lo largo de mi travesía académica sin su apoyo no hubiera logrado alcanzar mis metas. Sus constantes muestras de amor y aliento han iluminado mi camino guiándome a través de los desafíos y celebrando cada logro a mi lado.

A mis hermanos Alejandro y Bolívar gracias por brindarme sus palabras sabias y sus consejos para que me convierta en una persona mucho mas fuerte, por haberme cuidado, protegido y haberme motivado a que siempre siguiera adelante.

A mis pequeñas sobrinitas Vale y Fiore les agradezco por cada risa que me han sacado, por llenar con mucho cariño el espacio que quedo en mi corazón con la partida del Alejo, se que jamas nos olvidaremos de el y estará siempre en nuestros corazones, les agradezco mis pequeñas por llenarnos de felicidad a todos, gracias por motivarme a que termine mi carrera.

A mi amado novio Andresito gracias por estar a mi lado en cada momento su amor, su apoyo y comprensión me han dado fuerza, confianza y felicidad en abundancia, le agradezco por cada sonrisa compartida y cada gesto de amor que me regala día a día, usted es mi roca, mi mejor amigo y mi gran amor gracias por hacerme sentir tan amada y especial.

Por ultimo quiero extender mi mas sincero agradecimiento al Ing. Juan Inga por su guía y constante motivación que nos ha brindado a lo largo de este viaje. Su compromiso y sabiduría nos ha impulsado a superar obstáculos y alcanzar metas con determinación y entusiasmo, estamos profundamente agradecidos por su generosidad y consideración

Dayanna Lisseth Narvéez Arias

DEDICATORIAS

Dedicatoria de Pablo Andrés Barbecho Paute

A mis padres Pablo y Ligia, cuyo amor y sacrificio han sido mi mayor inspiración, a mis hermanas Valentina y Ivanna por su constante apoyo. A mi novia Dayanna a todos ustedes les dedico este logro, como un testimonio de gratitud por su inquebrantable apoyo y amor.

Dedicatoria de Dayanna Lisseth Narváez Arias

Dedico este trabajo de titulación a mis padres, Patricio y Catalina. A mis hermanos Alejandro y Bolívar. A mis sobrinas Vale y Fiore. A mi novio Andresito y a todas las personas que me han motivado a cumplir con esta meta académica, les estaré agradecida toda mi vida.

Índice general

Agradecimientos	I
Dedicatorias	IV
Índice General	v
Índice de figuras	XIII
Índice de tablas	XIV
Resumen	XV
Abstract	XVI
Antecedentes	1
Justificación	3
Objetivos	5
Introducción	6
1. Fundamentación Teórica	9
1.1. ¿Por qué MIMO?	10
1.2. Comunicaciones MIMO	12
1.2.1. Ganancia de Arreglo	15
1.2.2. Ganancia de Diversidad	16
1.2.3. Reducción de Interferencia	16

1.2.4. El Canal MIMO	17
1.3. Diversidades en los Sistemas MIMO	19
1.3.1. Diversidad espacial	19
1.3.2. Diversidad temporal	21
1.3.3. Diversidad de Polarización	22
1.3.4. Diversidad de Frecuencia	22
1.3.5. Comparación de Diversidades	23
1.4. Multiplexación Espacial	24
1.4.1. Multiplexación espacial D-BLAST	25
1.5. Codificación Espacio-Temporal	30
1.5.1. STBC ALAMOUTI	32
1.6. Modulación Multiportadora: OFDM	36
1.6.1. Como trabaja OFDM con MIMO	44
1.7. OFDM en la práctica: Trama IEEE 802.11a	46
1.8. Estimación de canal	49
1.8.1. Tipos de Estructuras de Pilotos	50
1.8.2. Tipos de Estimadores de Canal Basados en Símbolos de Entrenamiento	53
1.9. SDR	56
2. Implementación y Descripción de Equipos	59
2.1. Implementación de un sistema MIMO 2x2 STBC Alamouti	60
2.2. Implementación de sistema MIMO 2x2 STBC Alamouti OFDM	75
2.3. Implementación de un sistema MIMO transmisor D-BLAST	85
2.4. Equipos Utilizados	87
2.4.1. LabVIEW	87
2.4.2. USRP ETTUS X310	87
2.4.3. OctoClock	91
2.4.4. Antena Doble Banda VERT 2450	92
3. Manual de Prácticas	94
3.1. Implementación de un sistema OFDM-SISO	95

3.2. Estudio de la Codificación Espacio-Temporal de Alamouti	116
3.3. Sistema MIMO 2x2 con STBC Alamouti usando (SDR)	132
3.4. Sistema MIMO 2x2 STBC Alamouti con OFDM sobre SDR	151
3.5. Transmisor MIMO con STM D-Blast	169
4. Conclusiones y Trabajos Futuros	181
5. Anexos	184
Glosario	197
Referencias	202

Índice de figuras

1.1. Multitrayectos para sistemas SISO. Fuente: [20]	11
1.2. Caso de Multitrayectos con diversidad espacial en Recepción (Sistema SIMO). Fuente: [6]	12
1.3. Esquema sistema MIMO. Fuente: Los Autores	18
1.4. Relación entre la diversidad espacial en recepción, la distancia entre antenas y la DEP de un Receptor. Fuente: [23]	21
1.5. Codificación Diagonal con Rotación de Flujo. Fuente: Los Autores	25
1.6. Codificador D-BLAST. Fuente: [4]	26
1.7. Diagrama de bloques Codificador D-BLAST. Fuente: Los Autores	26
1.8. Esquema de un codificador espacio-temporal. Fuente: [5]	31
1.9. Codificador espacio-temporal Alamouti. Fuente: Los Autores	33
1.10. Diagrama de Bloque Codificador espacio-temporal Alamouti. Fuente: Los Autores	34
1.11. Esquema de un Transmisor FDM y su Espectro. Fuente: [35]	37
1.12. Canal Selectivo en Frecuencia frente a un gran BW de Transmisión. Fuente: [36]	38
1.13. Flujo de símbolos serial. Fuente: [13]	41
1.14. Un intervalo de guarda igual al de un tiempo de símbolo insertado en la señal anterior. Fuente: [13]	41
1.15. $N = 6$ símbolos reunidos en un bloque y enviados por N hilos paralelos. Fuente: [13]	41
1.16. Espectro de una señal OFDM con 6 subpotadoras. Fuente: [25]	42
1.17. Símbolos OFDM con Prefijo Cíclico. Fuente: [8]	43

1.18. Diagrama de bloques de un transmisor sistema MIMO-OFDM. Fuente: [39]	45
1.19. Diagrama de bloques de un receptor para sistema MIMO-OFDM. Fuente: [39]	46
1.20. Asignación de las subportadoras DC, piloto, de datos y de guarda en IEEE 802.11a. Fuente: [13]	48
1.21. Preámbulo en el estándar IEEE 802.11a. Fuente: Los Autores	49
1.22. Disposición del Piloto en Estructura Tipo Bloque. Fuente: Los Autores	50
1.23. Disposición del Piloto en Estructura Tipo Peine. Fuente: Los Autores	51
1.24. Disposición del Piloto en Estructura Tipo Red. Fuente: Los Autores	52
1.25. Estimación de canal MMSE. Fuente: [8]	55
1.26. Concepto de SDR. Fuente: [47]	57
2.1. Diagrama de bloques del sistema transmisor MIMO 2×2 STBC Alamouti. Fuente: Los Autores	60
2.2. Bloque que representa el codificador de fuente de información a bits. Fuente: Los Autores	61
2.3. Codificación ASCII. Fuente: Los Autores	61
2.4. Bloque que representa el modulador. Fuente: Los Autores	62
2.5. Diagrama de flujo del Modulador 4-QAM. Fuente: Los Autores	62
2.6. Bloque que representa el codificador de Alamouti. Fuente: Los Autores	63
2.7. Diagrama de flujo del codificador de Alamouti. Fuente: Los Autores	63
2.8. Bloque que representa la Secuencia de Entrenamiento. Fuente: Los Autores	64
2.9. Bloque que representa el Filtro Conformador de Pulsos. Fuente: Los Autores	65
2.10. Diagrama de flujo de Filtro Conformador de Pulsos. Fuente: Los Autores	65
2.11. Diagrama de bloques del sistema receptor MIMO 2×2 STBC Alamouti. Fuente: Los Autores	66
2.12. Diagrama de flujo del detector del preámbulo. Fuente: Los Autores	67
2.13. Bloque que representa el preámbulo. Fuente: Los Autores	67
2.14. Bloque que representa el filtro acoplado. Fuente: Los Autores	68

2.15. Diagrama de flujo del filtro acoplado. Fuente: Los Autores	68
2.16. Bloque que representa la sincronización de símbolos. Fuente: Los Autores	69
2.17. Diagrama de flujo para la sincronización de símbolos. Fuente: Los Autores	69
2.18. Bloque que representa el estimador de canal. Fuente: Los Autores	70
2.19. Diagrama de flujo del estimador de canal. Fuente: Los Autores	70
2.20. Bloque que representa el decodificador de Alamouti. Fuente: Los Autores	71
2.21. Diagrama de flujo del decodificador de Alamouti. Fuente: Los Autores	71
2.22. Bloque que representa la demodulación. Fuente: Los Autores	72
2.23. Diagrama de flujo para la demodulación. Fuente: Los Autores	72
2.24. Bloque que representa el decodificador de fuente. Fuente: Los Autores	73
2.25. Diagrama de bloques del sistema transmisor y receptor MIMO 2×2 STBC Alamouti. Fuente: Los Autores	74
2.26. Sistema MIMO 2×2 STBC Alamouti utilizando los equipos SDR del laboratorio de Telecomunicaciones de la Sede Cuenca. Fuente: Los Autores	75
2.27. Diagrama de bloques del sistema transmisor MIMO 2×2 STBC Alamouti implementado con OFDM. Fuente: Los Autores	76
2.28. Bloque que representa la separación de antenas. Fuente: Los Autores	76
2.29. Diagrama de flujo para la separación de antenas. Fuente: Los Autores	77
2.30. Bloque que representa el modulador OFDM. Fuente: Los Autores	78
2.31. Esquema de construcción de un símbolo OFDM. Fuente: Los Autores	78
2.32. Bloque que representa la secuencia de entrenamiento. Fuente: Los Autores	79
2.33. Bloque que representa el sobremuestreo. Fuente: Los Autores	79
2.34. Diagrama de bloques del sistema receptor MIMO 2×2 STBC Alamouti implementado con OFDM. Fuente: Los Autores	80
2.35. Bloque que representa la sincronización de símbolos. Fuente: Los Autores	81

2.36. Bloque que representa el estimador de canal. Fuente: Los Autores 81

2.37. Bloque que representa el demodulador OFDM con sus entradas y salidas. Fuente: Los Autores 82

2.38. Esquema de trabajo del demodulador OFDM. Fuente: Los Autores . . . 82

2.39. Bloque que representa como eliminar los ceros. Fuente: Los Autores . . . 83

2.40. Bloque que representa el decodificador de Alamouti. Fuente: Los Autores 83

2.41. Diagrama de bloques completo del sistema MIMO 2×2 STBC Alamouti implementado con OFDM. Fuente: Los Autores 84

2.42. Sistema MIMO 2×2 STBC Alamouti implementado OFDM, utilizando los equipos SDR del laboratorio de Telecomunicaciones de la Sede Cuenca. Fuente: Los Autores 85

2.43. Diagrama de bloques sistema Transmisor D-Blast. Fuente: Los Autores . 86

2.44. Bloque que representa la multiplexación D-Blast. Fuente: Los Autores . . 86

2.45. Diagrama de bloque multiplexación D-Blast. Fuente: Los Autores 86

2.46. USRP. Fuente: [51] 88

2.47. Equipos USRP ETTUS X310 del laboratorio de Telecomunicaciones de la Sede Cuenca. Fuente: Los Autores 89

2.48. Panel frontal USRP. Fuente: [51] 89

2.49. Panel Trasero USRP. Fuente: [51] 90

2.50. OctoClock CDA-2990. Fuente: [51] 91

2.51. Distribución OctoClock CDA-2990. Fuente: Los Autores 92

2.52. Diagrama de conexión OctoClock CDA-2990 para ampliar sistemas MIMO. Fuente: Los Autores 92

2.53. Antena Doble Banda VERT 2450. Fuente: [51] 93

5.1. Diagrama de bloques codificador de fuente de información a bits. Fuente: Los Autores 184

5.2. Parámetros del bloque de Modulación. Fuente: Los Autores 185

5.3. Diagrama de bloques del Modulador. Fuente: Los Autores 185

5.4. Parámetros del bloque del Codificador de Alamouti. Fuente: Los Autores 185

5.5. Parámetros del bloque de Modulación OFDM. Fuente: Los Autores . . . 186

5.6. Parámetros del bloque de Multiplexación de D-Blast. Fuente: Los Autores 186

5.7. Parámetros del bloque de separación de antenas. Fuente: Los Autores . . . 186

5.8. Parámetros del bloque del preámbulo. Fuente: Los Autores 186

5.9. Diagrama de Bloques del preámbulo. Fuente: Los Autores 187

5.10. Parámetros del bloque para Agregar la Secuencia de Entrenamiento.
Fuente: Los Autores 187

5.11. Diagrama de Bloques para Agregar la Secuencia de Entrenamiento.
Fuente: Los Autores 187

5.12. Parámetros del bloque del Sobremuestreo. Fuente: Los Autores 188

5.13. Diagrama de Bloques del Sobremuestreo. Fuente: Los Autores 188

5.14. Parámetros del bloque para el Filtro Conformador de Pulsos. Fuente:
Los Autores 188

5.15. Diagrama de Bloques del Filtro Conformador de Pulsos. Fuente: Los
Autores 189

5.16. Parámetros del bloque para la detección del preámbulo. Fuente: Los
Autores 189

5.17. Diagrama de Bloques del Detector de Preámbulo. Fuente: Los Autores . 189

5.18. Parámetros del bloque del Filtro Acoplado. Fuente: Los Autores 190

5.19. Diagrama de Bloques del Filtro Acoplado. Fuente: Los Autores 190

5.20. Parámetros del bloque del Sincronizado de Símbolos. Fuente: Los
Autores 191

5.21. Diagrama de Bloques del Sincronizado de Símbolos. Fuente: Los Autores 191

5.22. Parámetros del bloque Estimador de Canal. Fuente: Los Autores 191

5.23. Parámetros del bloque Mapa de Símbolos. Fuente: Los Autores 192

5.24. Diagrama de Bloques del bloque Mapa de Símbolos. Fuente: Los Autores 192

5.25. Parámetros del bloque Demodulador OFDM. Fuente: Los Autores 192

5.26. Parámetros del bloque para Eliminar los Ceros. Fuente: Los Autores . . 192

5.27. Parámetros del bloque Decodificador de Alamouti. Fuente: Los Autores 193

5.28. Parámetros del bloque del Demodulador. Fuente: Los Autores 193

5.29. Diagrama de bloques del Demodulador. Fuente: Los Autores 193

5.30. Parámetros del bloque de decodificación de fuente de Información a
Bits. Fuente: Los Autores 194

5.31. Diagrama de bloques del Decodificador de Fuente de Información a
Bits. Fuente: Los Autores 194

Índice de tablas

1.1. Tipos de Sistemas Inalámbricos Espacio-Temporales. Fuente: Los Autores	14
1.2. Análisis de Diversidades. Fuente: Los Autores	23
1.3. Subflujo de datos a transmitir por cada antena previo a aplicar D-BLAST. Fuente: Los Autores	27
1.4. Disposición de las señales enviadas en la comunicación D-BLAST utilizando dos antenas de transmisión T_{x1} y T_{x2} . Fuente: Los Autores . .	27
1.5. Disposición de las señales recibidas en la comunicación D-BLAST utilizando dos antenas de recepción R_{x1} y R_{x2} . Fuente: Los Autores . . .	29
1.6. Decodificación D-BLAST en capas. Fuente: Los Autores	30
1.7. Matriz codificador Alamouti. Fuente: Los Autores	34
1.8. Especificaciones de la capa física para el estandar 802.11a. Fuente: [40] .	47
2.1. Tipos de preámbulos disponibles para utilizar al agregar como secuencia de entrenamiento. Fuente: Los Autores	64
2.2. Matriz formada al agregar la secuencia de entrenamiento para dos canales. Fuente: Los Autores	64
2.3. Características Antena VERT 2450. Fuente[52]	93

Resumen

La tecnología MIMO (Multiple Input Multiple Output) ha transformado la comunicación inalámbrica al permitir la transmisión simultánea de múltiples datos por varias antenas. Ofrece mayor velocidad, cobertura y eficiencia en el uso del espectro. Su impacto en redes inalámbricas a través de diversos estándares ha demostrado su versatilidad y capacidad para mitigar efectos multitrayecto y maximizar el uso del espectro de frecuencias. Por tanto, comprender cómo MIMO mejora la velocidad, la cobertura y la eficiencia y dominar los principios de MIMO permite contribuir a la evolución de las redes inalámbricas modernas. Por otro lado, el uso de equipos SDR ha sido vital en el desarrollo de sistemas inalámbricos, permitiendo una mayor flexibilidad, adaptabilidad y reducción de costes en comparación con los enfoques tradicionales. Este tipo de equipos son utilizados en el laboratorio de telecomunicaciones del Campus de Cuenca de la UPS e incluso cuenta con equipos que permite la evaluación de MIMO. Por ello, se realizó este proyecto con el fin de proporcionar una herramienta que nutra el proceso de enseñanza-aprendizaje haciendo uso de los equipos SDR MIMO disponibles en el laboratorio y así promover el análisis de estos sistemas de comunicaciones desde la praxis.

Así, el presente trabajo se centra en desarrollar un manual de prácticas para estudiantes de telecomunicaciones y áreas afines desde un enfoque metodológico estructurado utilizando la ciencia, la tecnología, la ingeniería y las matemáticas (STEM) para ser aplicado en el aula. El manual de prácticas es una herramienta que combina fundamentos teóricos y aspectos prácticos de los sistemas MIMO. Se incluyen ejercicios que permiten a los estudiantes explorar y comprender los conceptos fundamentales de la modulación OFDM, la codificación, la multiplexación espacio-temporal y el uso combinado de dicho esquema en un entorno MIMO.

Palabras clave: MIMO; OFDM ; SDR ; STM ; STBC

Abstract

Multiple Input Multiple Output (MIMO) technology has transformed wireless communication by enabling the simultaneous transmission of multiple data over multiple antennas. It offers high speed, coverage, and spectrum efficiency. Its impact on wireless networks across various standards has demonstrated its versatility and ability to mitigate multipath effects and maximize the use of the frequency spectrum. Therefore, understanding how MIMO improves speed, coverage, and efficiency and mastering its principles can contribute to the evolution of modern wireless networks. In addition, using SDR equipment has been vital in developing wireless systems, allowing greater flexibility, adaptability, and cost reduction compared to traditional approaches. This type of equipment is used in the UPS Cuenca Campus's telecommunications laboratory and even allows the evaluation of MIMO. Therefore, this project was carried out to provide a tool that nurtures the teaching-learning process by using SDR MIMO equipment available in the laboratory, thus promoting the analysis of these communications systems from praxis.

Thus, the present work focuses on developing a practice manual for students of telecommunications and related areas from a structured methodological approach using science, technology, engineering, and mathematics (STEM) to be applied in the classroom. The practice manual is a tool that combines theoretical fundamentals and practical aspects of MIMO systems. Exercises are included that allow students to explore and understand the fundamental concepts of OFDM modulation, coding, spatiotemporal multiplexing, and the combined use of such a scheme in a MIMO environment.

Keywords: MIMO; OFDM ; SDR ; STM ; STBC

Antecedentes

En los sistemas de comunicación inalámbricos tradicionales y, en general, en cualquier sistema de comunicación que use el aire como medio de transmisión, las señales inalámbricas enfrentan obstáculos como paredes, interferencias y atenuación a medida que viajan desde el transmisor al receptor [1], [2]. En consecuencia, surge la necesidad de mejorar el rendimiento de los enlaces de comunicación, especialmente debido al crecimiento exponencial de dispositivos conectados, como teléfonos, tabletas, computadoras además de permitir el paradigma del llamado Internet de las cosas. También, las aplicaciones que operan en estos dispositivos modernos requieren conexiones más rápidas y estables. En este contexto, la demanda de ancho de banda y velocidad ha aumentado en forma significativa gracias a la optimización del espectro [3], [4].

Mediante la utilización de varias antenas de transmisión y recepción (**MIMO**, del inglés *Multiple Input Multiple Output*) multiplica la capacidad de un enlace de radio al explotar la propagación multi-trayecto. Es por ello que se busca mejorar la capacidad y el rendimiento de los sistemas de comunicaciones inalámbricos mediante la utilización de múltiples antenas transmisoras y receptoras. Entonces, con el fin de mejorar el rendimiento de las redes inalámbricas, su cobertura y reducir interferencias, surge el uso de técnicas de múltiples antenas transmisoras y receptoras [1].

La diversidad espacial y temporal que dispone un enlace **MIMO** permite que la capacidad de canal y de usuarios incremente sin tener que incrementar el ancho de banda, además de que produce una menor tasa de error de bit (**BER**, del inglés *Bit Error Rate*) [1]. Entonces, **MIMO** aprovecha y utiliza estos múltiples trayectos para que la información recibida en el receptor llegue desde distintos ángulos garantizando mayor velocidad, además de satisfacer la demanda de velocidades de datos más

altos. Algunas de las tecnologías o estándares que usan MIMO son el estándar WiFi 802.11n y el estándar 802.11ac además de las comunicaciones 4G y 5G. Por lo tanto, utilizar más de una antena en el lado del transmisor y/o del receptor puede aumentar significativamente la velocidad de transferencia de datos en la misma banda del espectro de radio [5].

Así, un sistema MIMO puede ser realizado con multiplexación espacial (SM, del inglés *Space Multiplexing*) o codificación espacio temporal (STBC, del inglés *Space-Time Block Coding*). Además, que los sistemas MIMO también están evolucionando a sistemas más eficientes en cuanto velocidad y fiabilidad del enlace como es el caso de MIMO masivo que se implementa en comunicaciones 5G, también nos encontramos con MU-MIMO, sistemas que representan el futuro hacia donde está proyectado MIMO [4].

La implementación de enlaces MIMO para investigación utiliza sistemas de radio definidos por software (SDR, del inglés *Software Defined Radio*) que permiten implementar modulaciones de capa física y métodos de transmisión [6]-[8]. Esto permite que los SDR tienen la capacidad de recibir y emitir todo tipo de señales [9]. Cabe mencionar que el grupo de investigaciones GITEL ya ha realizado diversos trabajos en la implementación de varias comunicaciones MIMO con equipos de SDR [9]-[12]. Por tanto, se busca que estos trasciendan a la academia a través de este manual de prácticas para el proceso de enseñanza – aprendizaje.

Justificación

La tecnología **MIMO** abre nuevas dimensiones de señalización y mejora la eficiencia espectral y energética ya que transmite señales simultáneas desde varias antenas, lo que corresponde a usar la dimensión espacial en el formato de transmisión. Al aprovechar estas dimensiones espaciales, **MIMO** proporciona un “ancho de banda” adicional sin agregar ancho de banda electromagnético, mejora la velocidad y eficiencia de la transmisión de datos [2].

La adopción de **MIMO** en los estándares de comunicación de redes inalámbricas ha sido generalizada, con su incorporación en los sistemas de acceso inalámbrico fijo IEEE 802.16 y en estándares celulares como 4G **LTE** y 5G. La aplicación comercial de **MIMO** apareció por primera vez en los estándares WLAN IEEE 802.11, lo que pone de manifiesto su versatilidad en diferentes dominios de comunicación [2]. Sin embargo, la implementación y entendimiento de estas redes puede ser compleja y requieren de un conocimiento avanzado del tema. Así, el estudio de los sistemas de comunicación **MIMO** es esencial para comprender y aprovechar las capacidades que ofrece esta tecnología para mejorar el rendimiento de las comunicaciones inalámbricas, aumentar la velocidad de transmisión de datos y mejorar la eficiencia general del sistema.

También, cuando es necesario implementar cualquier sistema de comunicación para evaluarlo, es esencial seleccionar las plataformas de hardware adecuadas, donde una opción típica incluye equipos **SDR** combinados con herramientas computacionales adicionales, siendo las más comunes LabView, MATLAB y GNU Radio [7]. En respuesta a lo mencionado, el laboratorio de telecomunicaciones de la UPS Sede Cuenca, cuenta con equipos **SDR**, de manera específica, el modelo de Periférico Universal de Radio basado en Software (**USRP**, del inglés *Universal Software*

Radio Peripheral) 2940R de National Instruments que permiten trabajar con enlaces inalámbricos MIMO en un arreglo de 2×2 . Sin embargo, no existe un conjunto estructurado de prácticas que faciliten y sobre todo agilicen la implementación de sistemas MIMO para el desarrollo del proceso de enseñanza – aprendizaje.

En este sentido, surge la necesidad de desarrollar un manual de prácticas de redes inalámbricas MIMO que proporcione una guía sobre el funcionamiento e implementación de estos sistemas de comunicación permitiendo al menos explorar las características básicas de la diversidad espacial, codificación espacio – temporal sobre un ambiente real bajo un canal de ambiente interior también conocido como canal interior (en inglés, *indoor channel*). Debe indicarse que se considera que este manual será de gran utilidad y permitirá a los interesados comprender los fundamentos y aplicar los conceptos y técnicas de las redes inalámbricas MIMO en situaciones reales.

Objetivos

Desarrollar un manual de Prácticas MIMO usando los equipos del laboratorio de telecomunicaciones de la sede Cuenca.

Objetivo General

- Desarrollar un manual de Prácticas MIMO usando los equipos del laboratorio de telecomunicaciones de la sede Cuenca.

Objetivos específicos:

- Revisión bibliográfica del modelo matemático de los codificadores espacio – temporales y multiplexación espacial.
- Implementar esquemas de transmisión MIMO basados en codificadores espacio – temporales y multiplexación espacial para identificar de los experimentos las prácticas a evaluar.
- Elaborar el manual de prácticas para el docente y los estudiantes según los formatos establecidos por la universidad.

Introducción

Diversos autores verifican que **MIMO** se ha convertido en una herramienta de alto impacto para mejorar la conectividad de sistemas de comunicaciones inalámbricos, en especial debido al incremento masivo de usuarios que utilizan sus servicios permitiendo aumentar la cobertura y la velocidad inalámbrica [2], [9], [13]-[15]. De hecho, en la actualidad, la mayoría de los routers modernos son compatibles con **MIMO**.

MIMO permite mayor cobertura al emitir señales desde varias antenas aumenta la cobertura en comparación con una sola antena. La generación simultánea de múltiples señales implica que estas pueden rebotar en diversas superficies. **MIMO** aprovecha estos rebotes para mejorar la velocidad inalámbrica y evitar que los efectos de los multitrayectos sean perjudiciales. Es por tanto importante recordar que las señales pueden llegar al destino a través de diferentes caminos. Al aplicar **MIMO**, se potencia el rendimiento de una red inalámbrica, como la red WiFi [2], [16].

En este contexto, la explotación de múltiples antenas transmisoras y receptoras se conoce como diversidad espacial. Esta diversidad establece una ganancia que debe ser aprovechada por los sistemas que utilizan **MIMO** para reducir los efectos del desvanecimiento por múltiples trayectos.

Además, dado que el canal presenta variaciones en el tiempo debido a los múltiples trayectos, para utilizar **MIMO** de manera efectiva, es necesario aplicar técnicas que aprovechen los diferentes caminos tomados por las señales que surgen del transmisor. Así, los sistemas **MIMO** utilizan tanto la diversidad espacial como la diversidad temporal para compensar las dificultades causadas por los desvanecimientos en el canal y maximizar el uso del espectro de frecuencias, que es un recurso limitado en la actualidad [9].

Por otra parte, el uso de equipos **SDR**, han desempeñado un papel vital en el desarrollo de sistemas inalámbricos debido a su flexibilidad, versatilidad y capacidad de adaptarse a las necesidades cambiantes del mundo de las comunicaciones. Esta importancia ha aumentado debido a las bondades como adaptabilidad y reconfigurabilidad, reducción de costos y tiempo de desarrollo para el prototipado y experimentación de sistemas de comunicación inalámbrica sin la necesidad de diseñar circuitos electrónicos específicos para cada aplicación. Por lo cual, en el campo de la investigación y educación, los equipos **SDR** facilitan la exploración de conceptos, desde los más básicos a los más avanzados relacionados con el procesamiento de señales y sistemas de comunicación de radio.

De acuerdo con lo mencionado, la UPS en sus diferentes sedes, ha desarrollado trabajos de titulación relacionados con sistemas **MIMO** [9], [10], [12], [17]. No obstante, estos modelos ya implementados no han trascendido a la academia por lo cual se busca tratar de aprovechar de la mejor manera posible, este conjunto de trabajos de titulación y artículos académicos para la elaboración de un manual de prácticas que al menos permitan evaluar la estructura de un sistema de transmisión común **MIMO** de 2×2 . De acuerdo con esto, este trabajo brinda una guía de prácticas de base para la realización de experimentos prácticos en el campo de las comunicaciones inalámbricas **MIMO** usando codificación espacio-temporal y multiplexación espacio-temporal. Así, el manual de prácticas consta de al menos cinco prácticas, que exploran desde el concepto básico de un sistema de comunicación inalámbrico de Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (**OFDM**, del inglés *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) para repasar los fundamentos principales hasta la exploración de sistemas de múltiples antenas basados codificación espacio-temporal en bloque (**STBC** por sus siglas en inglés, *Space-Time Block Code*) y multiplexación espacio-temporal (**SM** por sus siglas en inglés, *Space Multiplexing*).

Estas prácticas son propuestas para ser simuladas evaluando la conceptualización y luego ser implementadas para verificar su operación en un canal inalámbrico real a través del uso de dispositivos **SDR**. Considerando que el desarrollo de un sistema receptor requiere del desarrollo de bloques de comunicaciones como ecualización, sincronización de portadora, de tiempo de símbolo y de trama a través

de su lenguaje gráfico, que LabView cuenta con bloques de modulación digital y codificación de canal entre otros elementos propios de un sistema de comunicaciones facilitando la programación a través de su lenguaje gráfico y que, la UPS cuenta con la licencia, el software de trabajo en efecto es LabView de la empresa National Instruments.

Una plataforma de hardware SDR versátil es Universal Instruments (NI) – Universal Software Radio Peripheral (USRP), se puede programar fácilmente en LabVIEW para operar en diversos rangos de frecuencias dependiendo del equipo que se desea utilizar así como seleccionar la modulación digital, sus características y el esquema de transmisión como lo es la modulación multiportadora Incluso es factible implementar sistemas de comunicación tanto de antena múltiple como de antena simple [18]. También, cabe mencionar que los distribuidores de equipos SDR destinados para investigación y la academia, son en efecto los equipos USRP y son los equipos con los que cuenta el laboratorio de telecomunicaciones de la sede Cuenca. La marca ETTUS son los desarrolladores de estos equipos y National Instruments es su distribuidora por lo cual, los equipos cuentan con *firmwares* instalados listos para trabajar con LabView.

Con la finalidad de que todas estas prácticas agilicen la implementación de sistemas MIMO para el proceso de enseñanza-aprendizaje, los beneficiarios de este proyecto serán los estudiantes de la Universidad Politécnica Salesiana (Sede Cuenca), afines y principalmente de la Carrera de Telecomunicaciones de la sede Cuenca que serán beneficiarios al desarrollo de este proyecto. Esto debido a que podrían tomar como referencia para futuros proyectos que tengan relación con el presente, además de los beneficiarios indirectos de este manual el Grupo de Investigación en Telecomunicaciones y Telemática (GITEL), que incluye a estudiantes, ingenieros, profesionales y académicos interesados en el tema.

Si bien MIMO contempla la capacidad de transmitir y recibir múltiples flujos de datos simultáneamente utilizando varias antenas, es necesario dejar en claro estos beneficios así como los aspectos que pueden limitar la implementación de esta tecnología y es parte de lo que se busca que el estudiante identifique a través de este trabajo.

Capítulo 1

Fundamentación Teórica

Este capítulo presenta una breve introducción a los problemas que motivan al uso de múltiples antenas en transmisión y recepción. Más adelante se amplía la perspectiva de uso de esta tecnología de múltiple antena y como se estructuran los mensajes para trabajar con el paradigma **MIMO** que es una tecnología que utiliza varias antenas de transmisión y recepción aumentando la capacidad y potencia de los canales inalámbricos. Se examinarán las diversas estrategias de diversidad empleadas en sistemas **MIMO**, evaluando su impacto en la calidad de la señal y en la mitigación de interferencias. Además, se realiza una comparación de las distintas técnicas de diversidad en sistemas **MIMO**, destacando sus ventajas y limitaciones. En este sentido, el análisis se ampliará para abarcar la Multiplexación Espacial, en concreto D-BLAST, una técnica que aprovecha al máximo las capacidades de **MIMO** para lograr una transmisión eficiente y robusta. También, se aborda la Codificación Espacio-Temporal como alternativa a la multiplexación espacial, ya que la literatura relacionada con **MIMO**, la muestra como una estrategia clave para aumentar la confiabilidad de las transmisiones inalámbricas mediante la explotación de la diversidad temporal.

Asimismo, se examinará la integración de **MIMO** con el esquema de transmisión de multiportadora, en concreto con **OFDM**, un estándar que ha tomado alta importancia para la implementación de comunicaciones inalámbricas veloces. Ya que se propone el uso de esta técnica de múltiples portadoras, para darle al estudiante un contexto de operación, se usa la trama IEEE 802.11a, la misma que será objeto de análisis, proporcionando una comprensión profunda de los aspectos clave de este

estándar que ha permitido el despliegue de comunicaciones inalámbricas veloces.

Además, se explora el concepto de los estimadores de canal, elementos esenciales para una comprensión de las variabilidades del canal en entornos dinámicos. Por tanto, este capítulo sirve como guía integral de carácter teórico y simple para comprender las tecnologías emergentes en comunicaciones inalámbricas y **MIMO**, proporcionando una buena base para la investigación y conocimiento continuo de este campo que va en constante evolución. Este capítulo explora en forma breve las comunicaciones **MIMO** y aborda aspectos cruciales que han impulsado la evolución de las redes inalámbricas.

1.1. ¿Por qué MIMO?

Con la proliferación de dispositivos inalámbricos, el objetivo ha pasado de hacer que la comunicación inalámbrica funcione a hacerla más eficiente. Esto se debe a que, con el incremento de dispositivos y un limitado conjunto de recursos de red, sin importar cual es el esquema de comunicación, el número de usuarios que se pueden colocar dentro de un ancho de banda determinado es limitado. Por esto, se identifica que es necesario optimizar los recursos que comparten la red y, al mismo tiempo, aumentar la fiabilidad del enlace de cada usuario con ella [6].

En comunicaciones inalámbricas, a través de mecanismos de propagación como la reflexión, la difracción y la dispersión, los objetos del canal crean múltiples caminos desde el transmisor hasta el receptor. Si el sistema de comunicación opera bajo un esquema de canal de tipo **Una sola entrada - Una Sola Salida (SISO)**, del inglés *Single Input - Single Output*), aunque solo una señal se propague desde el transmisor, al receptor llegan múltiples copias de la señal original debido a los mecanismos de la propagación antes citados. Observando la Figura 1.1, cada trayecto tiene longitudes diferentes y por lo tanto, cada copia llega en instantes de tiempo diferente. Las señales llegan al receptor con amplitudes y en tiempos diferentes que implican fases distintas. Es decir, cada señal se forma cuando la energía transmitida toma un camino diferente desde el transmisor hasta el receptor donde cada elemento radiador de energía ocupa un espacio. Cada señal que captura el receptor corresponde a la suma de la señal por

trayecto directo con las señales que se generan por los múltiples caminos [4]. Ya que cada una de las copias de la señal llegan al receptor con fases diferentes, cada una de estas componentes pueden ser constructivas o destructivas con la señal principal [6], [19]. A esto se le conoce como interferencia multirrayecto.

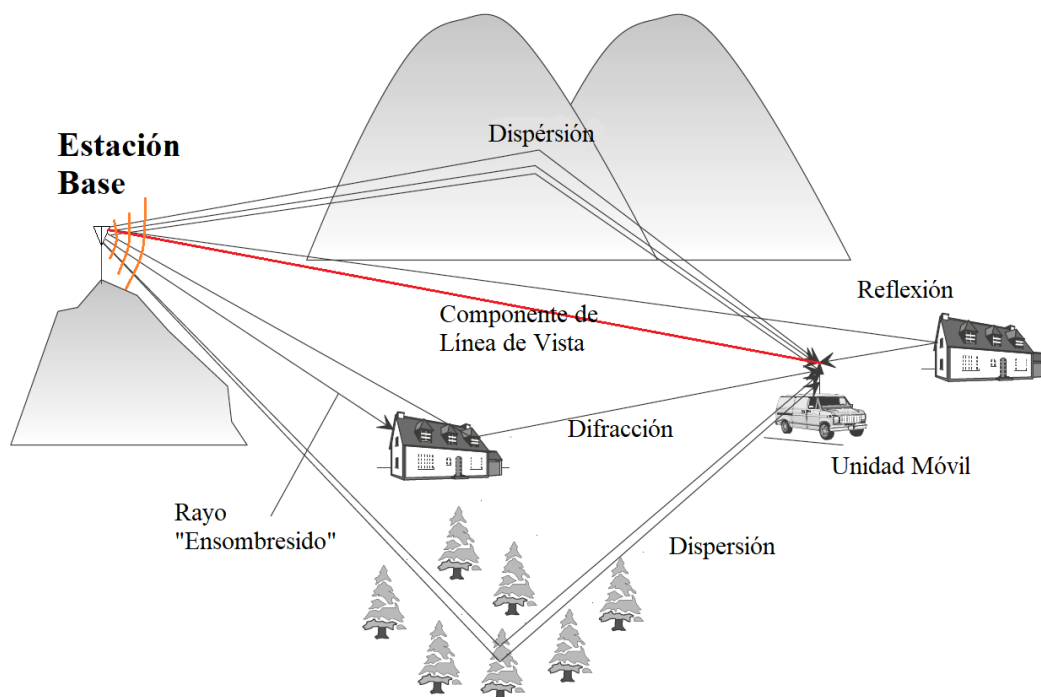


Figura 1.1: Multirrayectos para sistemas SISO. Fuente: [20]

Para combatir los efectos de la interferencia multirrayecto, podemos emplear un conjunto de antenas en el receptor, con cada antena separada por cierta distancia en el espacio, lo que implica una diversidad espacial si hay más de uno [6], [19]. Si se incrementa el número de receptores, como es el caso de la figura 1.2 donde ahora hay dos elementos, se consigue aumentar posibilidades de que al menos una antena del receptor no sufra desvanecimiento multirrayecto.

Es decir, aumentando el número de antenas en el receptor, mejoramos las probabilidades de soportar la interferencia multirrayecto, este es el caso de un canal de tipo **Una sola entrada - Múltiples Salidas (SIMO)**, del inglés *Single Input - Multiple Output*). Además, si se combina la señal de ambas antenas del receptor en forma inteligente, es posible aumentar la intensidad global de la señal en el receptor. A esto se le conoce como diversidad de recepción [6], [19]. También es posible aumentar el

número de antenas en el transmisor para combatir el desvanecimiento multitrayecto; a esto se le conoce como diversidad de transmisión y en cuyo caso corresponde a un canal de tipo **Múltiple Entrada - Única Salida** (**MISO**, del inglés *Multiple Input - Single Output*). En general, las técnicas de diversidad mejoran mucho la intensidad media de la señal recibida en canales multitrayecto [6], [19], [21].

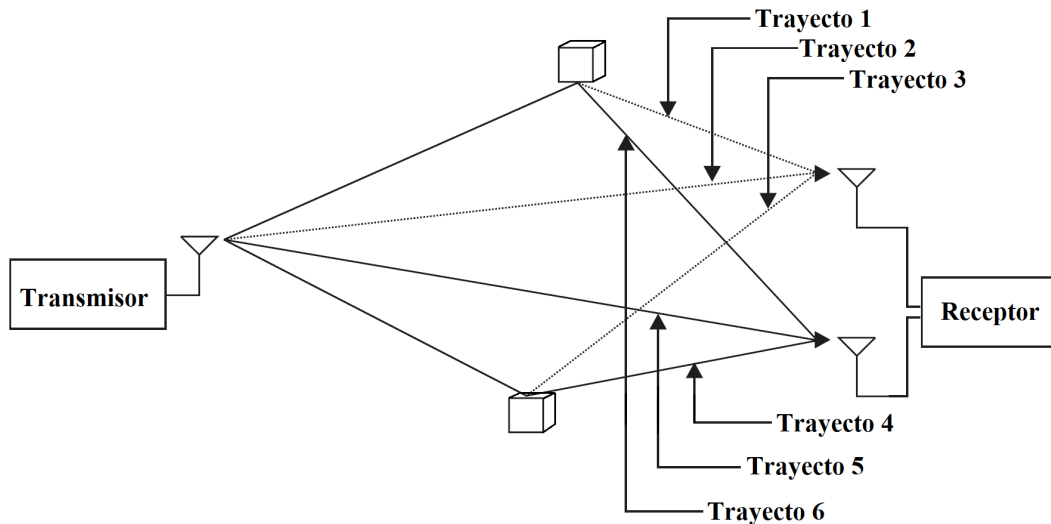


Figura 1.2: Caso de Multitrayectos con diversidad espacial en Recepción (Sistema SIMO). Fuente: [6]

1.2. Comunicaciones MIMO

El uso de múltiples antenas en el transmisor y receptor en un sistema de comunicaciones inalámbrico es también conocido como un sistema de comunicaciones Espacio-Temporal (**ST**, del inglés *Space-Time*). Las antenas inteligentes (*smart antennas*), también usan este concepto de múltiples antenas, no obstante, dicho enfoque no es abordado en este trabajo [1], [4].

En la sección anterior se presentó el caso de tres tipos de sistemas de comunicaciones de antena múltiple basados en el número de antenas. Si el número de antenas de transmisión se define como M_T y el número de antenas de recepción como M_R , se puede identificar diferentes tipos sistemas inalámbricos **ST** como se los resume en la tabla 1.1.

El caso de **MIMO** corresponde al caso en que $M_T \geq 2$ y que $M_R \geq 2$, es decir, se cuenta con diversidad espacial tanto en transmisión como en recepción. El uso de este sistema ha representado un gran avance de las comunicaciones inalámbricas, ofreciendo mejor calidad de transmisión (**BER**), mayores tasas de transferencia de datos de manera simultánea en la misma frecuencia, una mayor área de cobertura, mayor capacidad de usuarios gracias a las múltiples antenas transmisoras y receptoras [22].

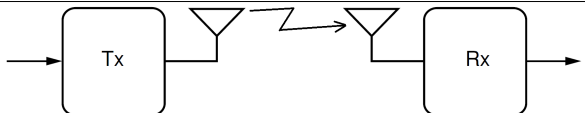
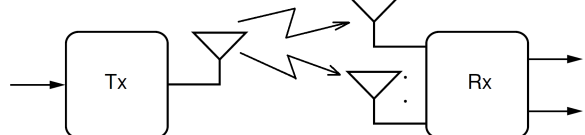
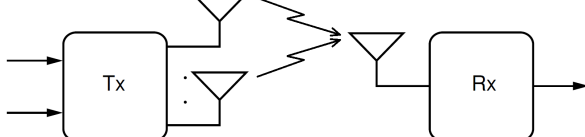
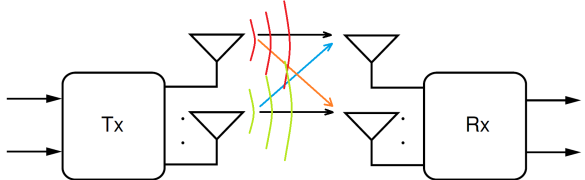
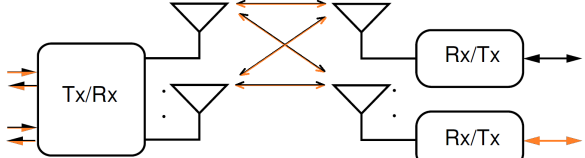
MIMO utiliza la propagación multitrayectoria provocada por la cantidad de antenas con el único propósito de aumentar la eficiencia espectral de los sistemas inalámbricos. Esto se debe a que **MIMO** aprovecha que la información que se transmite rebota en las paredes, techos y otras superficies llegando a la antena transmisora varias veces a través de diferentes ángulos y en tiempos distintos [5]. Para representar cómo **MIMO** aprovecha los múltiples trayectos, en la figura correspondiente a este caso que presenta la tabla 1.1, se han agregado “ondas” en rojo para indicar que es la energía que se propaga desde la antena 1 del transmisor y en verde para el caso de la antena n . Esto significa que la señal que transmite cada antena del transmisor, es recibida por todas las antenas del receptor; por lo tanto, en el receptor se deberá separar las señales para recuperar la información. De acuerdo con esto, la precodificación se utiliza en el transmisor para preprocesar los datos antes de la transmisión, mientras que la postdecodificación se utiliza en el receptor para desentrelazar los datos recibidos y recuperar los flujos de datos originales de los diferentes usuarios. Dicha precodificación y postdecodificación dependerá de la técnica **MIMO** usada, ya sea por codificación espacio temporal por bloque (**STBC**, del inglés *Space-Time Block Code*) o por multiplexación espacial (**SM**, del inglés *Spatial Multiplexing*) [4].

También, en la gráfica de **MIMO** de la tabla 1.1, la línea en color naranja representa que la información transmitida por la antena 1, llega no solo a la antena 1 del receptor sino a todas debido a la propagación inalámbrica, por lo cual, la señal capturada por la antena 1 del receptor corresponde a la combinación lineal de todas las señales transmitidas en un instante de tiempo. Más adelante se amplía el modelo matemático de esto y como lograrlo con al menos una técnica **STBC** y **SM**.

El caso de **MU-MIMO**, lleva el concepto un paso más allá al permitir que

múltiples usuarios transmitan y reciban datos simultáneamente utilizando el mismo espectro de frecuencia y el mismo tiempo. Esto es crucial en entornos de redes inalámbricas donde múltiples usuarios están activos al mismo tiempo y compiten por el ancho de banda limitado disponible. Entonces, para lograr que múltiples usuarios transmitan datos al mismo tiempo, se usan diferentes combinaciones de antenas y esquemas de modulación. Esto se logra mediante el acceso al medio compartido de forma eficiente en el dominio del tiempo y del espacio. Los algoritmos de precodificación y postdecodificación son fundamentales en MIMO multiusuario y poder separar la información de cada usuario en el lado de la estación base y en el caso del equipo móvil, separar la información que le corresponde al usuario propio.

Tabla 1.1: Tipos de Sistemas Inalámbricos Espacio-Temporales. Fuente: Los Autores

Nombre del Sistema Inalámbrico	Tamaño del arreglo de antenas	Configuración del Arreglo
SISO	$M_T = 1, M_R = 1$	
SIMO	$M_T = 1, M_R \geq 2$	
MISO	$M_T \geq 2, M_R = 1$	
MIMO	$M_T \geq 2, M_R \geq 2$	
MIMO-MU	$M_T \geq 2, (M_R \geq 1) \times 2$ o más	

La gráfica de MU-MIMO de la tabla 1.1, se expone con colores la información de cada usuario. Aquí, los algoritmos de precodificación y postdecodificación son fundamentales en MIMO multiusuario y poder separar la información de cada usuario en el lado de la estación base y en el caso del equipo móvil, separar la información

que le corresponde al usuario propio. Tenga en cuenta que en estos sistemas, la comunicación desde la estación base hacia los equipos móviles se da en tal forma que se transmite al mismo tiempo la información de todos los usuarios por todas las antenas.

Ya que hay múltiples usuarios que están transmitiendo simultáneamente en el mismo espectro de frecuencia, es inevitable que se produzca interferencia entre los usuarios. Los algoritmos de cancelación de interferencia en el receptor son necesarios para mitigar estos efectos y mejorar la calidad de la señal recibida.

Este trabajo explora la conceptualización base de las técnicas de precodificación y postdecodificación en el contexto de MIMO y como implementarlas de forma práctica.

1.2.1. Ganancia de Arreglo

La ganancia del conjunto se refiere al incremento promedio de la Relación Señal a Ruido (SNR, del inglés *Signal to Noise Ratio*) en el receptor, como consecuencia de la combinación coherente de múltiples antenas en el receptor, el transmisor o en ambos.

Como ejemplo, un canal SIMO, donde las señales recibidas por las antenas del receptor tienen distintas amplitudes y fases. El receptor puede combinar estas señales de manera coherente para obtener una señal resultante amplificada. La magnitud del incremento promedio de la potencia de la señal en el receptor está directamente relacionada con el número de antenas de recepción [1].

En canales con múltiples antenas en el transmisor (como canales MISO o MIMO), para aprovechar la ganancia del conjunto, es necesario tener conocimiento del canal en el transmisor. Esto implica entender las características de propagación de la señal entre el transmisor y el receptor para optimizar la combinación de señales y así mejorar la calidad de la recepción [4].

Para lograr esto último, un método sencillo es que el transmisor envíe información que el receptor conozca para que este último pueda evaluar como ha cambiado la versión recibida en contraste con la que se esperaba recibir. Esto puede hacerse en dos formas, usando un “preámbulo”, que es colocar esta información conocida como cabecera de una trama de información o distribuir los elementos de

información conocida en ubicaciones conocidas y distribuidas a lo largo de la trama [13], [21].

1.2.2. Ganancia de Diversidad

La potencia de la señal en un canal inalámbrico fluctúa (o se desvanece), por tanto, cuando la potencia de la señal disminuye significativamente, se dice que el canal está en desvanecimiento. Por ejemplo, una antena en una región de desvanecimiento no recibe suficiente señal para la detección. Como ya se indicó antes, la diversidad se utiliza en los canales inalámbricos para combatir el desvanecimiento y que la diversidad de antena en recepción, corresponde a canales SIMO [23].

Las antenas receptoras ven versiones desvanecidas independientes de la misma señal. El receptor combina estas señales para que la señal resultante muestre una variabilidad de amplitud considerablemente reducida (desvanecimiento) en comparación con la señal en cualquier antena. La diversidad se caracteriza por el número de ramas de desvanecimiento independiente, también conocido como orden de diversidad, y es igual al número de antenas receptoras en canales SIMO [4].

1.2.3. Reducción de Interferencia

Las interferencias cocanal se deben a la reutilización de frecuencias en los canales inalámbricos. Por ejemplo, para dos celdas contiguas, habrá una zona de interferencia inalámbrica en la que la energía de las estaciones base de ambas celdas, pueden interferirse entre sí en el caso en que en dicha zona, ambas celdas usen el mismo canal de comunicación [19].

Cuando se utilizan varias antenas, la diferenciación entre las firmas espaciales de la señal deseada y las señales co-canal puede aprovecharse para reducir las interferencias [4], [24]. La reducción de interferencias requiere conocer el canal de la señal deseada. Sin embargo, el conocimiento exacto del canal del interferente puede no ser necesario. La reducción (o evitación) de interferencias también puede aplicarse en el transmisor, donde el objetivo es minimizar la energía de interferencia enviada hacia los usuarios co-canal mientras se entrega la señal al usuario deseado. La reducción de

interferencias permite utilizar factores de reutilización agresivos y mejora la capacidad de la red.

Hay que tener en cuenta que puede que no sea posible explotar todas las ventajas simultáneamente debido a exigencias contradictorias sobre los grados de libertad espaciales (o el número de antenas). El grado de resolución de estos conflictos depende del esquema de señalización y del diseño del receptor [4].

1.2.4. El Canal MIMO

El canal inalámbrico es dinámico debido no solo al desvanecimiento por trayectos múltiples sino también a la dispersión Doppler que es consecuencia de la movilidad que permite el sistema. Estos efectos tienen un impacto negativo en la tasa de error de bit (**BER**, del inglés *Bit Error Rate*) y las deficiencias del canal inalámbrico hacen que la señal en el receptor se distorsione o se desvanezca significativamente en comparación con canales (**AWGN**, del inglés *Additive White Gaussian Noise*) [13].

Otro factor relevante es la velocidad de móvil, ya que al tener un transmisor fijo y un móvil que se desplaza constantemente genera fluctuaciones aleatorias de frecuencia que incluye el desplazamiento Doppler. Esto se debe a que, por la velocidad de los objetos alrededor de la estación base, están en constante movimiento generando desplazamiento Doppler. La consecuencia de este efecto es que el ángulo de llegada α_n , definido por la dirección de llegada de la n -ésima onda incidente y la dirección de movimiento de la estación móvil, determina la frecuencia Doppler (o desplazamiento Doppler) de la n -ésima onda plana incidente según la relación $f_n := f_{max} \cos(\alpha_n)$, donde f_{max} es la frecuencia Doppler máxima y que está directamente relacionada a la velocidad del móvil a través de la velocidad de la luz c , la frecuencia de la portadora f_p y se resumen en la expresión $f_{máx} = \frac{v}{c} f_p$.

El efecto Doppler genera un cambio de frecuencias sobre la señal transmitida, en concreto, una expansión; dicho efecto se llama dispersión de frecuencias. La dispersión de frecuencia aumenta o disminuye dependiendo por sobre todo de la frecuencia Doppler máxima y de las amplitudes de las ondas planas recibidas. En el dominio del tiempo, el efecto Doppler produce que la respuesta al impulso del canal varíe con el tiempo; sin embargo, mantienen su linealidad.

El ancho de banda utilizado para la transmisión no debe exceder el ancho de banda del canal ya que genera interferencia intersimbólica, es decir, las formas de onda de cada símbolo de información se solapa y por tanto distorsiona por la presencia de los símbolos contiguos [5], [8], [13]. Las comunicaciones inalámbricas han mostrado ser una herramienta de conectividad de alto impacto donde la demanda creciente de mayor capacidad, eficiencia espectral y confiabilidad ha llevado al desarrollo y adopción de tecnologías avanzadas.

Considerando un sistema MIMO con M_T antenas transmisoras y M_R antenas receptoras, denotamos respuesta al impulso de la antenna transmisora como $j_{th}(j = 1, 2, 3, \dots, M_T)$ mientras que la respuesta al impulso de la antenna receptora la denotamos como $i_{th}(i = 1, 2, 3, \dots, M_R)$, por lo cual la respuesta al impulso entre las antenas transmisoras y antenas receptoras sería $h_{i,j}(\tau, t)$, donde (τ, t) representan los retardos por los múltiples trayectos y el tiempo respectivamente, en la figura 1.3 un bloque de sistema MIMO [4].

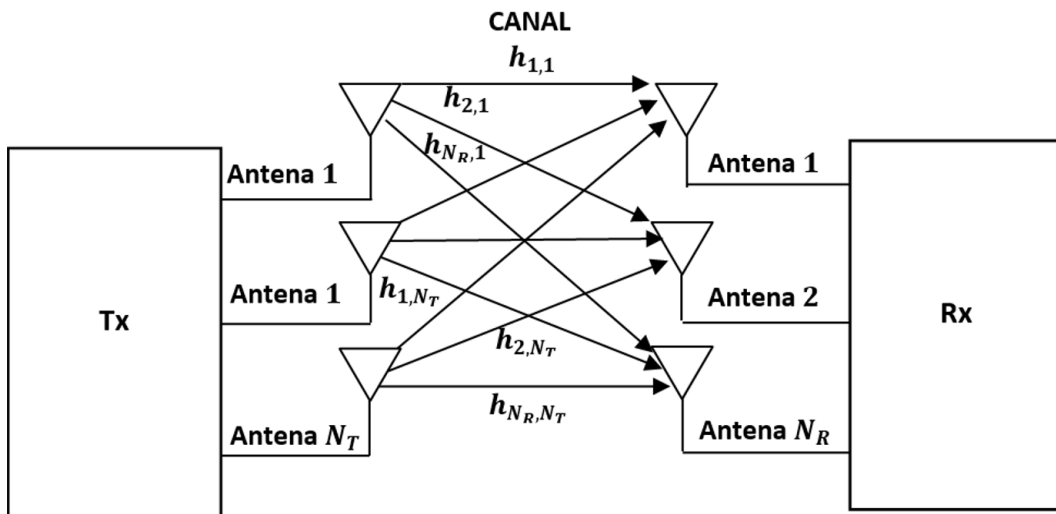


Figura 1.3: Esquema sistema MIMO. Fuente: Los Autores

El canal MIMO $H(\tau, t)$ viene dado por la matriz de $M_R \times M_T$.

$$H(\tau, t) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(\tau, t) & h_{1,2}(\tau, t) & \cdots & h_{1,M_T}(\tau, t) \\ h_{2,1}(\tau, t) & h_{2,2}(\tau, t) & \cdots & h_{2,M_T}(\tau, t) \\ \cdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_R,1}(\tau, t) & h_{M_R,2}(\tau, t) & \cdots & h_{M_R,M_T}(\tau, t) \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

1.3. Diversidades en los Sistemas MIMO

Los trabajos en sistemas de diversidad condujeron a la creación de los sistemas MIMO. En canales con multitrayectoria rica, aumenta la probabilidad de que tengamos más de un trayecto independiente. Esta independencia es la clave de los sistemas de diversidad; si un trayecto muestra un desvanecimiento profundo, la multitrayectoria rica garantiza que la probabilidad de que los demás trayectos lo hagan en el mismo instante sea pequeña. Tener la capacidad de resolver trayectorias independientes en el canal también implica que podemos aumentar la cantidad de información que transmitimos enviando múltiples señales al canal dentro del mismo ancho de banda. De este modo, los sistemas MIMO añaden otro grado de libertad y pueden cambiar la fiabilidad por un aumento de la capacidad del enlace; mientras que los sistemas de diversidad utilizan el multitrayecto para aumentar la fiabilidad de un enlace [1], [4].

El desvanecimiento inducido por trayectos múltiples y las amplitudes fluctuantes en la señal recibida son responsables de la disminución de la calidad de la señal dentro de los sistemas de comunicaciones inalámbricas. La diversidad se esfuerza por compensar los desafíos que plantea el desvanecimiento del canal, podemos encontrarnos con varios tipos de diversidades como la diversidad de antenas o mejor conocida como diversidad espacial, diversidad de tiempo, diversidad de polarización y diversidad de frecuencia, en este apartado se analizó la definición de cada una de ellas además de analizar las ventajas y desventajas que presentan individualmente.

1.3.1. Diversidad espacial

En secciones anteriores ya se conceptualizó que la diversidad espacial conocida como la diversidad de antenas, se refiere a las numerosas antenas transmisoras y receptoras instaladas a cierta separación adecuada entre sí mismas. Al momento que se propaga la señal transmitida empieza a desvanecerse por motivos inevitables como lo son el espacio, tiempo y frecuencia creando a su paso múltiples trayectos para enviar la información, es por ello que la diversidad espacial tiene como objetivo la

transmisión de múltiples versiones de la misma señal en distintos trayectos [25].

Pero, además de identificar que la distancia requerida en las antenas está determinada por la frecuencia de la señal portadora y la dispersión local del medio, la diversidad espacial nos indica que mientras mayor sea el número de antenas M_T y M_R se obtendrán mejores resultados, resumidamente la diversidad espacial ofrece al receptor rutas independientes de la misma señal transmitida [10].

Esto se puede verificar al analizar la densidad espectral de potencia (DEP) recibida que está distribuida según la distancia entre las antenas del arreglo de antenas de recepción. Por ejemplo, en la figura 1.4a se observa la DEP de un receptor de tres antenas que reciben una señal de baja potencia y con respecto al eje horizontal, se muestra un referencia del nivel de potencia que captura cada antena con respecto a la señal recibida. Ya que las antenas están muy juntas, estas carecen de suficiente diversidad espacial (separación) para tener una de las antenas en una región de alta potencia de señal. La diversidad espacial aumenta al agregar más antenas o poniendo más espacio entre las antenas existentes. Esto se muestra en la figura 1.4b, donde se demuestra que el aumento de la distancia de separación de las antenas sitúa al menos a una de ellas en una zona con mayor potencia de señal [23]. Dentro de la diversidad espacial se puede aplicar la diversidad de selección para elegir la antena que ha capturado la señal más potente de entre N señales recibidas en un conjunto de antenas. Por ejemplo, la antena situada más a la izquierda en la figura 1.4b recibe la mayor potencia de señal, por lo que se selecciona como antena activa mientras que las otras dos se ignoran.

Cuando las señales multitrayecto proceden de todas las direcciones, una separación de antenas entre $0,5\lambda$ y $0,8\lambda$ da lugar a canales independientes (descorrelacionados) [23]. Por lo tanto, es importante guardar una separación de antenas adecuada para garantizar que MIMO pueda operar, caso contrario, el concepto de “Conformador de Ases”, en inglés *beamforming*, sería el adecuado por aplicar en el arreglo de antenas. Además, la diversidad espacial requiere una separación de antenas significativa en las bandas de VHF y UHF inferior, porque la eficacia de la separación de antenas depende de λ .

Recuerde que la baja potencia de la señal puede deberse a que hay algunas

regiones presentan desvanecimiento, reduciendo así la potencia captada por la antena. Una antena en una región de desvanecimiento no recibe suficiente señal para la detección, por lo tanto, el nivel de potencia de la señal en ese caso, no será la suficiente para detectar un mensaje a pesar de la ganancia que pueda tener la antena [23].

El concepto de diversidad de espacio también se utiliza en el diseño de estaciones base en donde en cada sitio celular se utilizan múltiples antenas receptoras de estaciones base para proporcionar recepción de la diversidad [19].

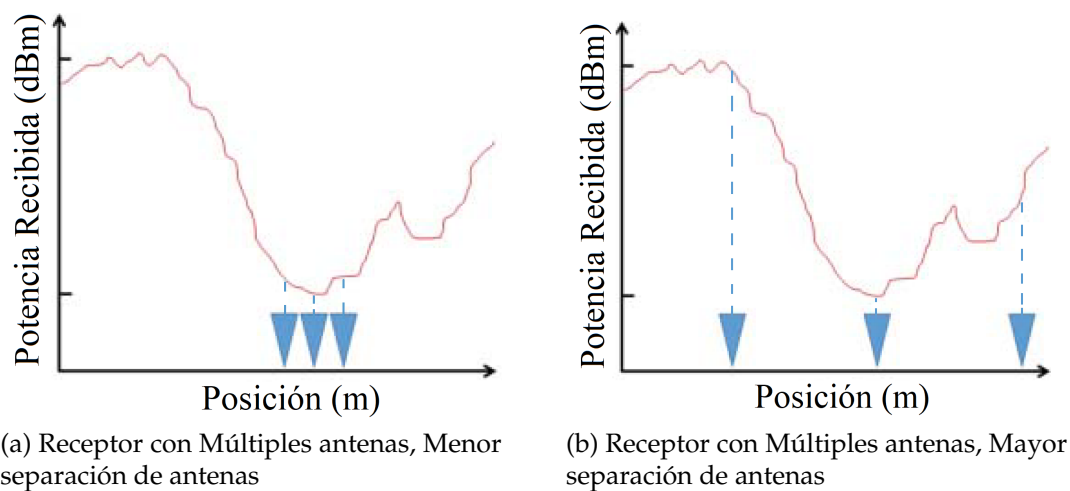


Figura 1.4: Relación entre la diversidad espacial en recepción, la distancia entre antenas y la DEP de un Receptor. Fuente: [23]

1.3.2. Diversidad temporal

La diversidad temporal es la razón por la que se transmiten múltiples versiones de la misma señal en diferentes momentos, a diferencia de la diversidad espacial. La dispersión de estos intervalos da como resultado un tiempo de coherencia, que permite un desvanecimiento independiente de las señales recibidas y las mantiene invariantes en el tiempo, entonces mientras mayor sea el tiempo en el que se transmiten varias versiones de la misma señal, la tasa de transmisión se reduce, consecutivamente disminuyendo la tasa de error de bit (BER) [19].

Un caso adicional de implementación moderna de la diversidad temporal implica el uso del receptor RAKE para CDMA de espectro ensanchado, en donde el canal multitrayecto proporciona redundancia en el mensaje transmitido [19].

1.3.3. Diversidad de Polarización

La diversidad de polarización se genera con dos polarizaciones ortogonales entre sí en donde flujos de señales provenientes del transmisor se transmiten por antenas diferentes, en la cual la portadora de radiofrecuencia se propaga con polarización vertical y polarización horizontal respectivamente. En entornos celulares donde se puede enviar información redundante para reducir la probabilidad de degradación de la señal de recepción, se puede enviar información de diversidad de polarización para dos polarizaciones ortogonales [26], [27].

La diversidad de polarización se utiliza comúnmente en enlaces de microondas con línea de visión, como por ejemplo para admitir a dos usuarios. Debido a que este canal no experimenta muchos cambios en el enlace, hay una baja probabilidad de interferencia de polarización cruzada [19].

1.3.4. Diversidad de Frecuencia

La diversidad de frecuencia transmite información en más de una frecuencia portadora, las frecuencias separadas no experimentan el mismo fenómeno de desvanecimiento. Con la diversidad de frecuencia se puede transmitir el mismo símbolo de información a través de distintas frecuencias, estas deberán estar separadas lo suficiente para garantizar que los desvanecimientos sean independientes para cada frecuencia, para garantizar aquello la separación de las frecuencias deberá ser de varios tiempos de coherencia del canal [19].

En otras palabras se puede transmitir la señal por distintos canales disminuyendo la probabilidad de que algunos o todos sean afectados de igual forma en consecuencia incremento el ancho de banda. La diversidad de frecuencia se utiliza en conexiones de microondas con línea de visión que transportan múltiples canales mediante la técnica de multiplexación por división de frecuencia (FDM, del inglés *Frequency Division Multiplexing*) [19].

1.3.5. Comparación de Diversidades

A continuación la tabla 1.2 presenta una comparación entre diferentes tipos de diversidad exponiendo las ventajas y desventajas que presentan individualmente cada una de ellas. Es importante entender como aprovechar las ventajas que presentan cada uno de los tipos de diversidades al momento de armar un sistema de comunicación inalámbrico MIMO.

Tabla 1.2: Análisis de Diversidades. Fuente: Los Autores

Tipos de Diversidades	Ventajas	Desventajas
Diversidad Espacial	<ul style="list-style-type: none"> - Facilita la mejora de la calidad de la conexión inalámbrica al proporcionar al receptor varias copias de la señal idéntica, lo que reduce al mínimo los efectos de desvanecimiento. - Aprovecha la característica aleatoria de las señales y la independencia que llegan a tener los trayectos, gracias a aquellos se tiene una baja correlación cruzada. - Mejora la confiabilidad de la comunicación. 	<ul style="list-style-type: none"> - En las estaciones base la diversidad espacial es menos practica que en la estación móvil debido al estrecho ángulo de los campos incidentes. - Requieren grandes espaciamientos entre antena. - Utilizar diversidad espacial implica un costo mas elevado que utilizar otro tipo de diversidades.
Diversidad de Tiempo	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción de la probabilidad de interferencias. - No se incrementa ancho de banda ya que el proceso se genera dentro del mismo ancho de banda. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere de una sincronización precisa. - Implica mayor consumo de recursos computacionales.
Diversidad de Polarización	<ul style="list-style-type: none"> - Usualmente, la diversidad de polarización se logra utilizando dos polarizaciones que son ortogonales entre sí, lo que permite duplicar la ganancia mediante la diversidad. - Posee una correlación baja, lo que a menudo conduce a tamaños reducidos de antenas. - Uso eficiente del espectro radioeléctrico. 	<ul style="list-style-type: none"> - Al aumentar el ancho de banda, la afectación del canal se manifestará de manera distinta.
Diversidad de Frecuencia	<ul style="list-style-type: none"> - La diversidad de frecuencia nos garantiza que las frecuencias separadas por mas del ancho de coherencia del canal, no experimentan los mismos desvanecimientos. - Los canales no estarán correlacionados garantizando que los desvanecimientos sean diferentes para cada canal. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere de un mayor ancho de banda. - Requiere que existan tantos receptores como canales utilizados para la diversidad de frecuencia. - Desaprovechamiento del escaso espectro radioeléctrico.

1.4. Multiplexación Espacial

La ventaja de utilizar sistemas inalámbricos de comunicaciones **MIMO** es que permite incrementar la capacidad del enlace que se puede proporcionar, caracterizándose como ganancia de multiplexación y surgen gracias a que el canal **MIMO** es capaz de transmitir múltiples flujos de datos de manera simultánea sobre el mismo ancho de banda para cada tiempo de símbolo, separados espacialmente como se explico en el apartado 1.3 donde se habla de diversidad espacial, es por ello que se lo conoce como multiplexación espacial (**SM**) [5].

La multiplexación espacial (**SM**) es un protocolo inalámbrico **MIMO** que permite el incremento de cantidad de antenas de transmisión y recepción M_R, M_T enviando señales de datos o transmisiones separadas entre antenas para mejorar el rendimiento o la funcionalidad de la señal inalámbrica, es un tipo de diversidad espacial encargada de aumentar la tasa de transmisión y capacidad para el mismo ancho de banda sin gasto adicional de potencia. Para sistemas con dos antenas para transmisión M_T y dos antenas de recepción M_R .

Los datos a transmitir se dividen en dos flujos de velocidad media y se modulan antes de transmitirse simultáneamente desde cada antena de transmisión. Cuando el receptor tiene conocimiento del canal, puede distinguir entre las dos señales coexistentes en el mismo canal. Luego, se realiza la demodulación para recuperar los flujos originales, que se combinan para reconstruir los datos originales. Es por eso que la multiplexación espacial aumenta la velocidad de transmisión en proporción al número de pares de antenas transmisoras y receptoras [4].

Existen varios tipos de codificadores como los codificadores espacio-temporal por bloque **STBC**, los codificadores **STTC**, y los codificadores espacio-temporal de múltiples antenas llamados **V-BLAST**, **H-BLAST** o **D-BLAST**, reciben esta denominación porque transforman la información en símbolos y la codifican, ya sea verticalmente en el caso de **V-BLAST**, horizontal en el caso de **H-BLAST** o diagonal con el caso de **D-BLAST**, estos últimos tres codificaciones son mejor mente conocidos como multiplexación espacial utilizados como codificadores espacio-temporal **ST**, todos ellos aprovechan la diversidad espacial, en el siguiente apartado se analizó la multiplexación espacial **D-BLAST** [10].

1.4.1. Multiplexación espacial D-BLAST

D-BLAST fue la primera forma de multiplexación espacial propuesta en los laboratorios Bell, es una estructura MIMO multicapa, como su nombre lo indica es conocido como esquema diagonal, el enfoque diagonal implica que la señal asignada a los elementos de antena consecutivos se retrasan en tiempo, es capaz de someter los componentes retrasados de la señal de un símbolo espacio-temporal a un desvanecimiento mas independiente generando ganancia de diversidad, la señal D-BLAST a travesa un procesamiento lineal de baja complejidad para decodificar las señales recibidas[5], [28]. En la codificación diagonal, el flujo de datos entrantes se somete primero a la codificación horizontal (HE, del inglés *Horizontal Encoding*) que se indica en la figura 1.5. Cada palabra de código se divide en subflujos que atraviesan un rotador de tramas que las gira de modo que la conexión entre el flujo de bits y la antena se repite periódicamente, el hecho de que la palabra clave sea lo suficientemente grande garantiza que la palabra clave de cualquier flujo demultiplexado se transmita a través de las M_T antenas, la técnica de transmisión D-BLAST sigue este tipo de estrategia de codificación el cual incluye un bloque triangular inicial desperdiciado como se observa en la figura 1.6, en este no hay ninguna transmisión pero este desperdicio es necesario para permitir una decodificación óptima, la tasa espacial es M_T y la tasa de señalización es $q_{r_t} M_T$ [bits/transmisión], además que los números representan capas que pertenecen a la misma palabra clave. Los esquemas D-BLAST pueden lograr una diversidad $M_R M_T$ completa si la codificación temporal con rotación de flujo es óptima [4].

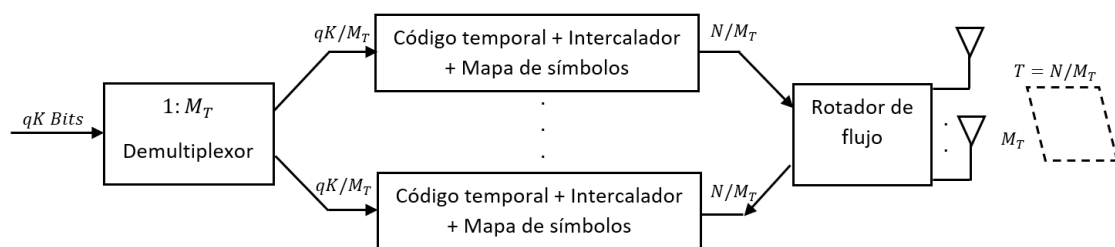


Figura 1.5: Codificación Diagonal con Rotación de Flujo. Fuente: Los Autores

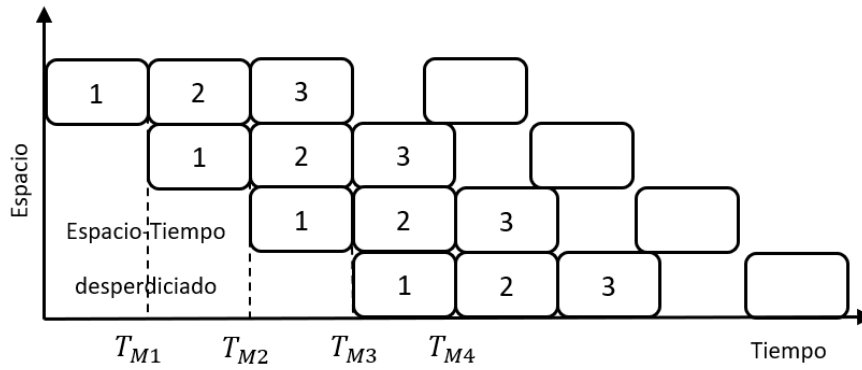


Figura 1.6: Codificador D-BLAST. Fuente: [4]

Supongamos un caso de comunicación MIMO 2×2 como se muestra en la figura 1.7, en primer lugar ingresa un flujo de datos en el demultiplexor de acuerdo con N_{Tx} , posteriormente pasa por el bloque de codificación (FEC, del inglés *Forward Error Correction*) y por el bloque de modulación, de esta manera los códigos FEC se separan en tramas de símbolos como se indica en la tabla 1.3 en la que se presenta como estará la disposición de los datos representados en una matriz y la dimensión que tendrá $[N_{Tx} \times \frac{kBits}{N_{Tx}}]$ antes de pasar por el rotador [10], [29].

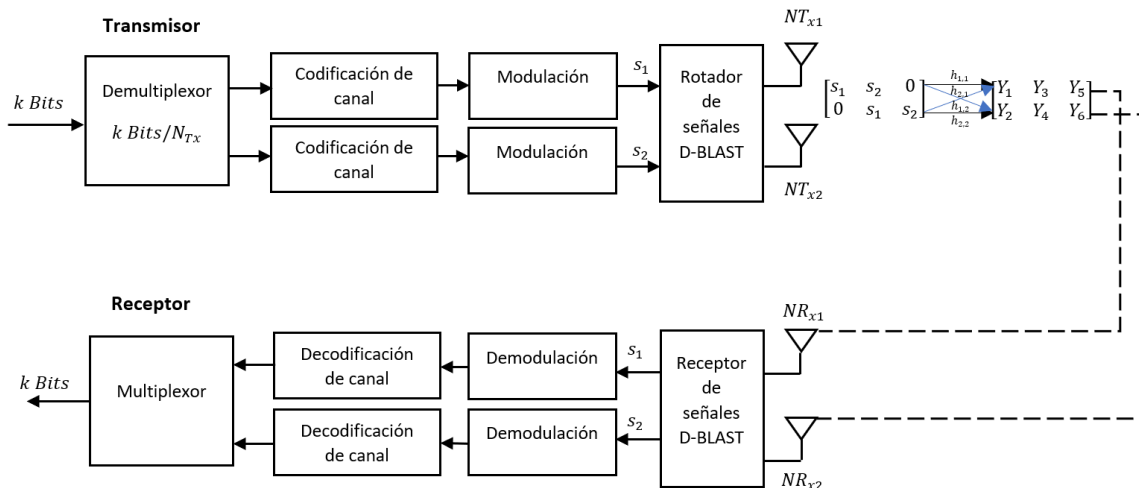


Figura 1.7: Diagrama de bloques Codificador D-BLAST. Fuente: Los Autores

Tabla 1.3: Subflujo de datos a transmitir por cada antena previo a aplicar D-BLAST. Fuente: Los Autores

	Tiempo T	Tiempo (T+1)
Antena T_{x1}	s_1	s_3
Antena T_{x2}	s_2	s_4

A continuación, el flujo de datos pasa a través de un dispositivo denominado rotador, el cual, tal como sugiere su nombre, gira los datos. En este proceso, cada símbolo temporal (T) se dispone diagonalmente de manera que cada símbolo tenga una posición específica en relación con cada antena en cada instante de tiempo de transmisión, esto se muestra en la tabla 1.4 en la que se especifica cómo quedarían las señales rotadas transmitidas por cada antena. En forma general, el símbolo i -ésimo en el j -ésimo tiempo de símbolo sería s_i^j ; por lo tanto, para el segundo símbolo en el tercer tiempo símbolo, se lo puede representar como s_2^3 . El tamaño de la matriz para cada momento de transmisión se describe mediante la siguiente ecuación [10].

$$[N_{Tx} \times (2N_{Tx} - 1)] \quad (1.2)$$

Tabla 1.4: Disposición de las señales enviadas en la comunicación D-BLAST utilizando dos antenas de transmisión T_{x1} y T_{x2} . Fuente: Los Autores

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
Antena T_{x1}	s_1^1	s_2^2	0	s_4^3	s_5^4	0
Antena T_{x2}	0	s_1^2	s_2^3	0	s_3^5	s_4^6
		Capa 1		Capa 2		

En base a la ecuación 1.2 se genera la matriz llamada capa en la que estará contenida la distribución diagonal de los grupos de símbolos, utiliza el concepto de estratificación con códigos FEC independiente aplicados a cada capa, en la tabla 1.3 se indica las dos capas adyacentes de la matriz codificada de D-BLAST. En esta representación, las columnas denotan la codificación temporal, mientras que las filas indican la codificación espacial [10], [30]. En vez de incrementar la diversidad espacial para asegurar la fiabilidad de la transmisión, se insertan espacios llenos de "0"s para

indicar los momentos en los que una de las antenas no transmitirá, siguiendo la diagonal de la señal para la cual están destinadas. Esto resulta en la transmisión del producto de una disposición lineal. Esta disposición implica que el canal permanece constante durante tres períodos de símbolo, lo que facilita el uso de estimadores de canal que son sencillos de implementar [31].

Cabe mencionar que al ser un sistema de comunicaciones inalámbrico existirán afectaciones provenientes del canal sobre los datos transmitidos, el efecto del canal se puede modelar como una distorsión multiplicativa compleja $H_B = (h_{11}, h_{12}, h_{13}, \dots, h_{1NT_x})$ [31]. La ecuación 1.3 describe la representación utilizada para expresar los coeficientes del canal entre las antenas emisoras y receptoras, las cuales están restringidas de la siguiente manera $N_{R_x} \times N_{T_x}$ por la cantidad de antenas transmisoras N_{T_x} y la cantidad de antenas receptoras N_{R_x} [30].

$$H_B = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & \cdots & h_{1NT_x} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \cdots & h_{2NT_x} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & \cdots & h_{3NT_x} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ h_{NR_{x1}} & h_{NR_{x2}} & h_{NR_{x3}} & \cdots & h_{NR_xNT_x} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Para finalizar, cada una de las antenas de recepción obtienen las señales transmitidas y afectadas por el canal y se realiza el proceso para determinar la información original [10]. En la tabla 1.5 se exhiben las señales recibidas en forma matricial, ilustrando dos capas, donde el tamaño de la matriz para los distintos instantes de tiempo se expresa mediante la ecuación 1.4.

$$[N_{R_x} \times (2N_{T_x} - 1)] \quad (1.4)$$

Tabla 1.5: Disposición de las señales recibidas en la comunicación D-BLAST utilizando dos antenas de recepción R_{x1} y R_{x2} . Fuente: Los Autores

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
Antena R_{x1}	Y_1^1	Y_1^2	Y_1^3	Y_1^4	Y_1^5	Y_1^6
Antena R_{x2}	Y_2^1	Y_2^2	Y_2^3	Y_2^4	Y_2^5	Y_2^6
	Capa 1			Capa 2		

Los flujos recibidos se muestran en las ecuaciones 1.5 a la 1.10, cada flujo recibido está determinado por los flujos transmitidos, y la respuesta al impulso del canal se especifica en la ecuación 1.3 y el ruido que se adhiere al sistema [31].

$$Y_1^1 = h_{11}s_1^1 + h_{12}0 + n_1 \quad Y_2^1 = h_{21}s_1^1 + h_{22}0 + n_2 \quad (1.5)$$

$$Y_1^2 = h_{11}s_2^2 + h_{12}s_1^2 + n_3 \quad Y_2^2 = h_{21}s_2^2 + h_{22}s_1^2 + n_4 \quad (1.6)$$

$$Y_1^3 = h_{11}0 + h_{12}s_2^3 + n_5 \quad Y_2^3 = h_{21}0 + h_{22}s_2^3 + n_6 \quad (1.7)$$

$$Y_1^4 = h_{11}s_3^4 + h_{12}0 + n_7 \quad Y_2^4 = h_{21}s_3^4 + h_{22}0 + n_8 \quad (1.8)$$

$$Y_1^5 = h_{11}s_4^5 + h_{12}s_3^5 + n_9 \quad Y_2^5 = h_{21}s_4^5 + h_{22}s_3^5 + n_{10} \quad (1.9)$$

$$Y_1^6 = h_{11}0 + h_{12}s_4^6 + n_{11} \quad Y_2^6 = h_{21}0 + h_{22}s_4^6 + n_{12} \quad (1.10)$$

Para hallar los símbolos enviados, en el proceso de decodificación D-BLAST, se descifran los símbolos recibidos en las antenas receptoras de manera diagonal, capa por capa. Esto garantiza que el primer símbolo detectado esté libre de errores y no sufra interferencia de símbolos adyacentes. Sin embargo, para el segundo símbolo, se lleva a cabo un proceso similar, pero ahora se suma la interferencia del primer símbolo. Este mismo procedimiento se aplica para el tercer símbolo, pero ahora se suma la interferencia de los dos símbolos anteriores, y así sucesivamente para cada

símbolo hasta alcanzar los de la primera capa. Una vez que se obtienen los símbolos demodulados de la primera capa, se puede proceder con su decodificación según se indica en la tabla 1.6.

En la tabla 1.6 se pueden identificar dos diagonales de las cuales se obtiene los dos primeros símbolos enviados en un tiempo de transmisión específico. Al resolver cada diagonal de la capa 1, se pueden obtener las ecuaciones que permiten hallar el resultado de los símbolos s_1 y s_2 [30], [31].

Tabla 1.6: Decodificación D-BLAST en capas. Fuente: Los Autores

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
Antena R_{x1}	Y_1^1	Y_1^2	Y_1^3	Y_1^4	Y_1^5	Y_1^6
Antena R_{x2}	Y_2^1	Y_2^2	Y_2^3	Y_2^4	Y_2^5	Y_2^6
	Capa 1			Capa 2		

El método de multiplexación espacial, también llamado D-BLAST, posibilita que el receptor opere en un entorno MIMO, donde el número de antenas de transmisión puede ser mayor que el número de antenas receptoras. Sin embargo, esto conlleva una mayor complejidad en el diseño tanto del transmisor como del receptor. En este proceso, los símbolos atraviesan una demultiplexación en varias capas, siendo transmitidas de manera independiente en cada una de ellas.

1.5. Codificación Espacio-Temporal

Los códigos espacio-temporales surgen tras intentar alcanzar la diversidad de transmisión, es la generalización de un código convencional como un código de corrección de errores hacia adelante (FEC), a este tipo de códigos lo definimos como un conjunto o libro de códigos C de M secuencias distintas de símbolos usualmente binarios y en las transmisiones inalámbricas, los símbolos son obtenidos de la constelación que es creada mediante la modulación.

Para un código espacio-temporal estos símbolos se convierten en vectores de valores complejos de longitud n , que representan las señales moduladas transmitidas en cada antena transmisora, son nombrados como símbolos vectoriales

espacio-temporales, las secuencias de código se convierten en matrices de símbolos de modulación complejos, los codificadores espacio-temporales se pueden definir en bloque y convolucionales [5], en la figura 1.8 se pueden visualizar los elementos constitutivos de un codificador espacio-temporal, en el que se comienza con un bloque de k_{bin} que ingresa a ser modulado y conjuntamente se codifican utilizando un código FEC o esquema de modulación codificada obteniendo a la salida los k_{sym} símbolos modulados luego se aplica el mapeador espacio-tiempo que los mapea a una palabra de código espacio-temporal representado como una matriz de $n_T \times n_w$ de los símbolos de modulación [5].

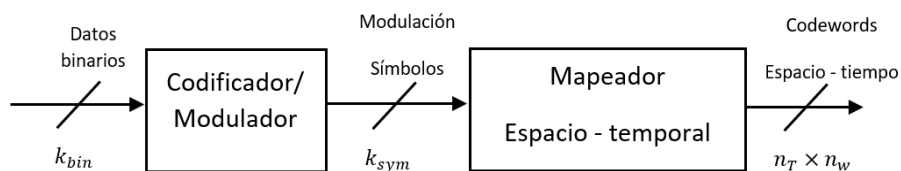


Figura 1.8: Esquema de un codificador espacio-temporal. Fuente: [5]

Para lograr alcanzar la máxima ganancia de multiplexación con un codificador espacio-temporal el codificador/modulador debe ser adaptativo escogiendo un esquema de modulación y codificación en base al SNR del canal, de forma que se alcance el objetivo de BER en el lado del receptor [5]. El rendimiento del BER depende de las propiedades de distancia del código ya que el canal MIMO es aleatorio también lo son las propiedades de distancia, esto quiere decir que el BER es una función del canal aleatorio [5].

El codificador espacio-temporal emplea la diversidad espacial ofrecida por la interferencia de múltiples trayectos para permitir al receptor distinguir entre los símbolos de información recibidos, los cuales pueden mezclarse durante la transmisión a través del canal. Cada símbolo puede entonces recibir energía de una o más antenas receptoras, siempre y cuando el número de antenas receptoras R_x sea igual o mayor que el número de antenas transmisoras T_x [10].

Los códigos de bloque espacio-temporales STBC fueron diseñados para combatir los desvanecimientos del canal, incrementando la ganancia por diversidad conjuntamente mejorando la fiabilidad del enlace [17].

Un objetivo común para los códigos espacio-temporales es lograr una diversidad total, considerada como la diversidad máxima disponible desde el canal, es decir $n_T n_R$ (aunque en presencia de múltiples rutas restringidas, la diversidad real disponible puede ser menor). Requiere que la matriz de codeword tenga un rango completo n_T , además de que se requiere que la longitud del codeword n_w sea de al menos n_T símbolos espacio-temporales [5].

Tarok presentó dos variantes de codificadores espacio-temporales. El primero es el codificador espacio-temporal trellis (STTC, del inglés *Space-Time Trellis Coding*), que amplía los códigos convolucionales tradicionales a las matrices de transmisión de múltiples antenas. Estos códigos tienen una estructura definida de enrejado. El segundo es la codificación de bloque espacio-temporal STBC, que permite la transmisión de varios flujos de datos a través de un conjunto específico de antenas.

La diferencia entre ambos es que en la salida del codificador espacio-temporal de Trellis no es solo en función de los bits de entrada, sino también del estado del codificador relacionado con los bits de entrada anteriores, ambos con el objetivo de lograr la mayor diversidad posible, aunque en la práctica el más utilizado es el codificador espacio-temporal de Alamouti, este se analizó de mejor manera en el siguiente apartado [1], [5], [10].

1.5.1. STBC ALAMOUTI

Los códigos espacio-tiempo en bloque por su nombre nos indican que este se basa en bloques y no en enrejados como en el caso del codificador STTC, los STBC disponen de un decodificador de máxima verosimilitud, adoptan el esquema mostrado en la figura 1.8 y consisten en un esquema que asigna símbolos modulados a las antenas de transmisión.

El primer código espacio-temporal por bloques fue descrito por Alamouti es por ello que obtiene ese nombre, es un código espacio-temporal ortogonal complejo solamente para 2 antenas transmisoras y N_{Rx} antenas receptoras, se encarga de proporcionar diversidad completa sobre dos antenas de transmisión además de ser capaz de transmitir a tasa completa lo que quiere decir que un símbolo de modulación por símbolo de espacio-tiempo [5], [8].

El codificador permite emplear más ecuaciones que incógnitas en el análisis del canal, dependiendo de la cantidad de antenas receptoras que se utilicen, como se indica en la ecuación 1.11. En esta ecuación, para el término $h_{i,j}$, la coordenada i corresponde a cada una de las antenas receptoras, mientras que la coordenada j pertenece a una de las dos antenas transmisoras [5], [10].

$$H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \\ \vdots & \vdots \\ h_{i,1} & h_{i,2} \\ \vdots & \vdots \\ h_{NRx,1} & h_{NRx,2} \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

En el codificador de Alamouti dos símbolos consecutivos s_1 y s_2 se codifican mediante la siguiente matriz de codificación espacio-temporal [8].

$$S_A = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

En la figura 1.9 se muestra como la señal codificada Alamouti se transmite desde las dos antenas de transmisión a lo largo de dos periodos de símbolo, durante el primer periodo de símbolos s_1 y s_2 son transmitidos simultáneamente desde las dos antenas de transmisión, durante el segundo periodo de símbolos, estos símbolos se transmiten de nuevo, donde $-x_2^*$ se trasmite desde la primera antena transmisora [8], [10].

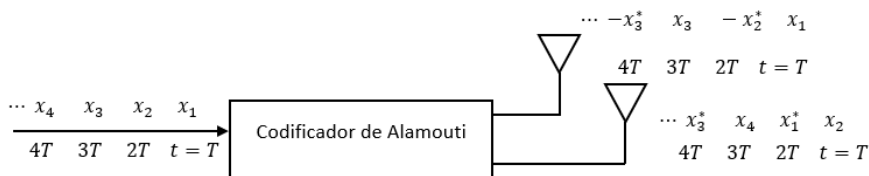


Figura 1.9: Codificador espacio-temporal Alamouti. Fuente: Los Autores

Supongamos el caso de un sistema MIMO de 2×2 antenas transmisoras y receptoras respectivamente como se muestra en la figura 1.10, tienen la intención de

enviar las señales al mismo tiempo durante un único periodo de símbolo denominado T_M . Para el caso de Alamouti, ingresan al codificador dos símbolos s_1 y s_2 . La señal transmitida por la antena T_{x1} es s_1 , en cambio la señal transmitida por la antena T_{x2} es s_2 . Para el segundo periodo de símbolo representado como un tiempo $(T + 1)$ la antena T_{x1} envía la señal s_2^* y la antena T_{x2} envía la señal $-s_1^*$, (*) representa la versión de complejo conjugado. Tras representar la tabla 1.7 por instantes de tiempo en el que cada instante de tiempo T_M corresponda a un tiempo de símbolo quedaría indicado de mejor manera en la tabla 1.7. En esta representación, las columnas simbolizan la codificación temporal, mientras que las filas denotan la codificación espacial [4], [10].

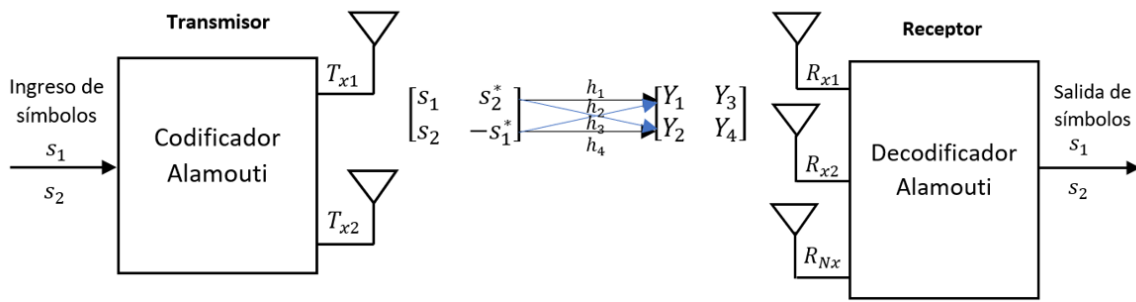


Figura 1.10: Diagrama de Bloque Codificador espacio-temporal Alamouti. Fuente: Los Autores

Tabla 1.7: Matriz codificador Alamouti. Fuente: Los Autores

	Tiempo T	Tiempo (T+1)
Antena T_{x1}	s_1	s_2^*
Antena T_{x2}	s_2	$-s_1^*$

Posteriormente al proceso de transmitir los símbolos es importante tener presente que al ser un sistema inalámbrico habrán efectos del canal sobre los símbolos codificados, para el caso de la figura 1.10 existirán 4 componentes del canal $H = h_1, h_2, h_3, h_4$ en donde $h1 = h_{1,1}, h2 = h_{1,2}, h3 = h_{2,1}, h4 = h_{2,2}$, una vez que se ha tenido en cuenta el canal para cada intervalo de tiempo T_M y $(T + 1)$, puede ser expresado como una compleja distorsión multiplicativa haciendo uso de los coeficientes del canal (h_1, h_2, h_3, h_4) como se indico en la ecuación 1.11, en donde las señales recibidas en el

conjunto de antenas receptoras durante períodos de símbolo consecutivos son y_1 y y_2 son representadas mediante las ecuaciones 1.13 y 1.14, [4], [10].

$$y_1 = \sqrt{\frac{E_s}{2}} \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

$$y_2 = \sqrt{\frac{E_s}{2}} \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -s_2^* \\ s_1^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_3 \\ n_4 \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

En las ecuaciones 1.13 y 1.14 las variables n_1, n_2, n_3, n_4 representan el ruido aditivo en el tiempo T y $T + 1$ respectivamente. En donde la energía disponible en el transmisor se divide uniformemente entre las antenas de transmisión en donde el receptor forma un vector de señal y como se indica en la ecuación 1.15, esto implica que en el segundo periodo de símbolo de Alamouti ST , se envían las versiones conjugadas de los dos primeros símbolos [4].

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2^* \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

Esta puede ser expresada de la siguiente manera:

$$y = \sqrt{\frac{E_s}{2}} \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \\ h_{1,2}^* & -h_{1,1}^* \\ h_{2,2}^* & -h_{2,1}^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3^* \\ n_4^* \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

$$y = \sqrt{\frac{E_s}{2}} H_{eff} s + n \quad (1.17)$$

En donde $s = [s_1 \ s_2]^T$ y $n = [n_1 \ n_2 \ n_3^* \ n_4^*]^T$

Principalmente se utiliza en la decodificación de los símbolos transmitidos utilizando H_{eff} donde es ortogonal independientemente de la realización del canal, para el caso de Alamouti se tiene que $H_{eff}^H H_{eff} = \|H\|_F^2 I_2$ [4], [10].

$$z = H_{eff}^H y \quad (1.18)$$

$$z = \sqrt{\frac{E_s}{2}} \|H\|_F^2 I_2 s + n \quad (1.19)$$

Las principales ventajas que hemos encontrado al utilizar el codificador espacio-temporal son una mayor velocidad de transmisión de información en comparación con los sistemas de comunicación inalámbricos tradicionales y la capacidad de transmitir múltiples copias de un flujo a través de múltiples antenas. La desventaja en comparación con otros métodos es que las antenas de transmisión están limitadas ya que solo están disponibles dos antenas de transmisión y N_{R_x} antenas de recepción, entonces no se podría utilizar este sistema para el caso de MIMO masivo ya que este requiere de múltiples antenas tanto de transmisión como de recepción[10], [8].

1.6. Modulación Multiportadora: OFDM

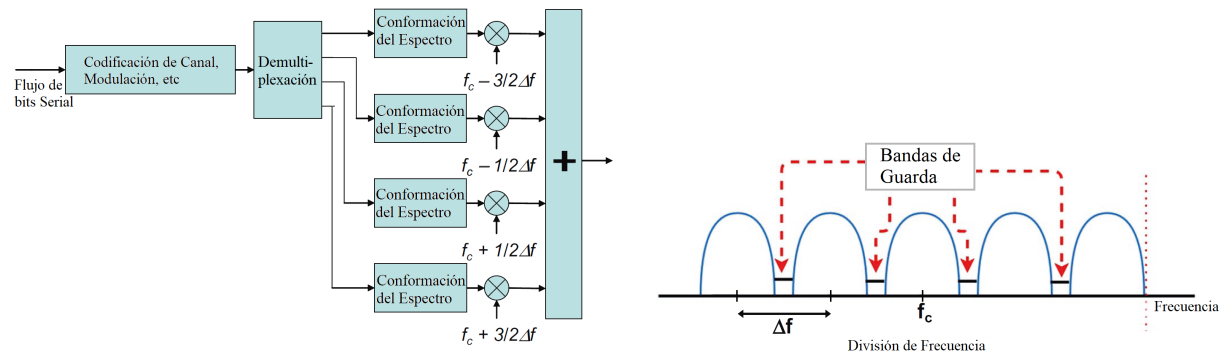
En los sistemas de comunicaciones modulados en banda pasante, se usan símbolos donde cada uno es representado por una forma de onda y que son modulados por los pulsos de información. El uso de pulsos ortogonales puede ser de interés para aprovecharlo en el receptor en tal forma que pueda identificarse la contribución de cada uno en la señal recibida para poder identificarlos. Recuerde que, para dos señales que son ortogonales entre sí, el área bajo la curva del producto entre estas señales será 0 o tenderá a 0; es decir la correlación de dos señales ortogonales es 0. Por lo tanto, el uso de señales ortogonales para cada símbolo de información, permitirá obtener una correlación diferente de cero solamente si dicha correlación corresponde al símbolo recibido y su versión esperada según el mapa de símbolos [32], [33]. También se puede obtener una correlación cero si dos señales periódicas poseen frecuencias diferentes.

Por otra parte, no hay nada que impida emplear exponenciales complejas como formas de onda de pulsos básicos en lugar de señales tipo coseno [32]. Esto se debe a que en la modulación por cuadratura, es posible usar señales complejas.

El uso de exponenciales complejas que están separadas por un múltiplo de $\frac{2\pi}{T_M}$ [rad/seg], siendo T_M el periodo de símbolo, permite crear un conjunto de pulsos

ortogonales entre si. Esto permitiría usar un espectro dividido en múltiples frecuencias para un solo usuario, lo que corresponde al uso de multiplexación por división de frecuencias (**FDM**, del inglés *Frequency Division Multiplexing*) para dicho usuario [32], [34].

En el caso de **FDM** aplicado a un usuario único, todo el ancho de banda BW en $[rad/seg]$ se dividiría en N subcanales con ancho de banda BW/N en $[rad/seg]$ por lo que se transmite la información empleando una modulación por amplitud de pulso (**PAM**, en inglés *Pulse Amplitude Modulation*) de tipo pasa banda en cada subcanal. El ancho de banda del usuario se dividiría usando N filtros en paralelo para que cada pulso se module en banda pasante con su propia subportadora; esto se puede verificar en la figura 1.11a. La división en múltiples frecuencias se logra al pasar de serie a paralelo una cantidad de N pulsos, es decir, se multiplexa la información. El ancho de banda resultante corresponde a la figura 1.11b, es decir, se obtiene una transmisión multiportadora de banda ancha. Sin embargo, en **FDM** es necesario dejar bandas de guarda entre cada subcanal para evitar interferencia entre subportadoras (**ICI**, del inglés *intercarrier interference*) [35].



(a) Esquema de un transmisor de banda ancha con FDM

(b) Espectro de FDM

Figura 1.11: Esquema de un Transmisor FDM y su Espectro. Fuente: [35]

En el receptor **FDM**, es necesario el uso de N muestreadores, uno para cada subcanal, para luego convertir la información de paralelo a serie, que es lo contrario al transmisor. En cuanto a la velocidad de transmisión, suponga que N/T baudios es la velocidad de símbolo a la entrada del conversor de la figura 1.11a, entonces la velocidad de cada subcanal será $1/T$ baudios. Si la señal se transmite por un canal lineal, no habrá interferencia intersimbólica entre los símbolos de subcanales

diferentes. Sin embargo, si es posible que exista interferencia entre los símbolos de un mismo subcanal [32].

Pero, dividir en N subcanales un ancho de banda para que sólo un usuario lo use no es óptimo en el uso del ancho de banda, no obstante hay una relación conceptual entre FDM y un sistema de multiportadora. Además, para un único usuario, sería necesario el uso de filtros ideales para separar en bandas lo más exactas para evitar que exista interferencia entre las subportadoras además del uso de las bandas de guarda para asegurar que esto no se de.

Por otra parte, en el caso de sistemas de comunicación inalámbricos con canales con desvanecimiento selectivo en frecuencia, frente a la transmisión de un gran ancho de banda, que corresponde a una alta tasa de transmisión, el resultado será una gran pérdida de datos, haciendo que no se consiga recibir en forma correcta el mensaje. Esto se debe a que el canal tiene una banda de coherencia f_0 mucho menor que el ancho de banda del mensaje transmitido. Esto se puede observar en la figura 1.12

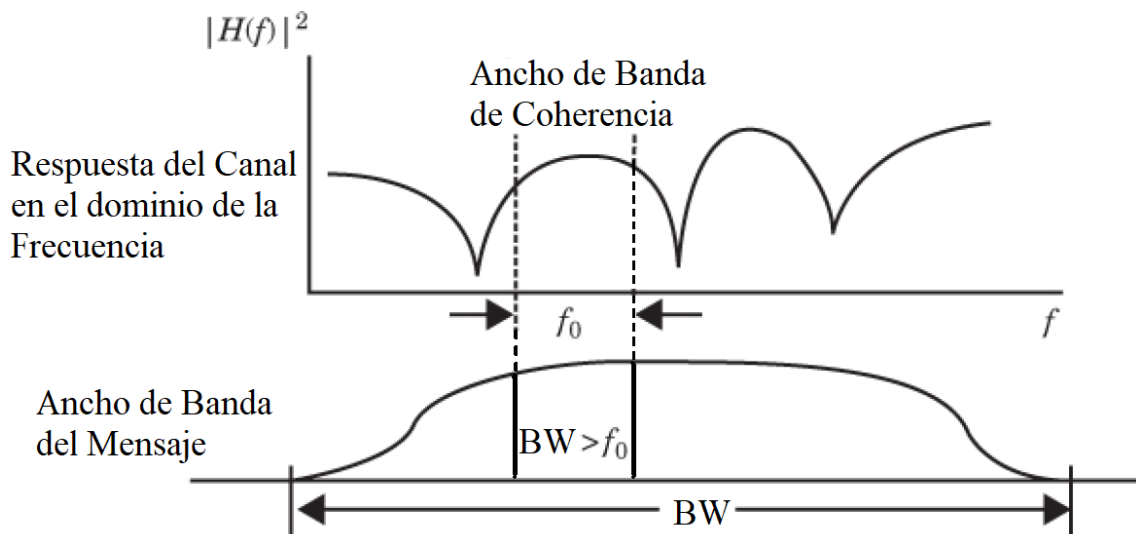


Figura 1.12: Canal Selectivo en Frecuencia frente a un gran BW de Transmisión. Fuente: [36]

De acuerdo con lo antes mencionado en esta sección, la técnica de Modulación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM, del inglés Orthogonal Frequency Division Multiplexing), se emplea en sistemas inalámbricos para transmitir señales de banda ancha y en especial sobre canales con desvanecimiento selectivo en frecuencia.

Se puede decir también que OFDM es una versión FDM con subportadoras solapadas en tal forma que se garantice una ortogonalidad entre cada sub ancho espectral. De acuerdo con [34], la técnica de modulación con multiportadoras solapadas, se alcanza un ahorro al rededor del 50% del ancho de banda. Sin embargo, para garantizar independencia entre cada una, es necesario conseguir ortogonalidad entre las distintas subportadoras, de allí el nombre de OFDM.

El esquema multiportadora OFDM consiste en usar múltiples portadoras ortogonales superpuestas para enviar datos a través de canales inalámbricos. Este método divide el flujo de bits de entrada en N subcanales de datos paralelos, cada uno operando a una velocidad de R_s/N símbolos por segundo. Cada subcanal modula una subportadora, y la velocidad de transmisión total del sistema se iguala a la de una subportadora individual.

La ortogonalidad es una propiedad que permite que varias señales de información se transmitan perfectamente por un canal común y se detecten sin interferencias. La pérdida de ortogonalidad provoca una distorsión entre estas señales de información y la degradación del canal de comunicación. En el dominio de la frecuencia, la mayoría de los sistemas FDM son ortogonales, ya que cada una de las señales transmitidas por separado está bien espaciada en frecuencia para evitar interferencias.

Para evitar interferencias, las frecuencias de las subportadoras utilizadas deben estar separadas por un valor mayor que el ancho de banda de cada subportadora, como se indica en la ecuación 1.20 [37].

$$\Delta f > BW_{sp}; \Delta f > \frac{BW_s}{N}; \Delta f > 2R_m \quad (1.20)$$

En la ecuación 1.20, BW_{sp} denota el ancho de banda utilizado por una subportadora, mientras que R_M representa la tasa de señalización de esa subportadora. La definición de BW_s se expresa a través de la siguiente ecuación.

$$BW_s = \frac{R_b}{\log_2(M)}(1 + \alpha) = R_s(1 + \alpha) \quad (1.21)$$

R_b representa la tasa de bits requerida para asegurar la calidad del servicio,

mientras que M indica el orden de la modulación, por ejemplo una modulación 4-QAM corresponderá a $M=4$, R_s es la velocidad de salida del modulador en tanto la fase como la cuadratura, mientras que α se refiere al factor de caída del filtro de Nyquist empleado, en donde $\alpha = 0$ representa un comportamiento de un filtro cuadrado ideal, un $\alpha = 1$ representara a un filtro con comportamiento relajado y $\alpha = 0,5$ es un filtro con comportamiento intermedio [37].

Cuando hablamos de la modulación OFDM, el transmisor OFDM asigna los bits del mensaje a una secuencia de símbolos bajo una modulación por amplitud y cuadratura (QAM, del inglés *Quadrature Amplitude Modulation*) o por desplazamiento de fase (PSK, del inglés *Phase Shift Keying*) que posteriormente se convertirán en N flujos paralelos. Cada uno de los N símbolos de la conversión de serie a paralelo (S/P) lo realiza una sub-portadora diferente por medio de la IFFT.

Supongamos el ejemplo del puerto paralelo de una impresora en donde el diseñador del sistema posee el acceso a una serie de cables paralelos en el aire que no se interfieren entre si. En el caso de incluirse N de estos cables paralelos en el diseño el tiempo de símbolo aumenta de manera proporcional al factor N , en donde el nuevo tiempo de símbolo considerado tiempo de bloque puede ser NT_M sin sacrificar el rendimiento general del sistema.

Para entender de mejor manera se presenta se presenta un ejemplo en donde la duración del bloque sera de $NT_M = 6T_M$, en donde cada flujo de símbolos en serie es de $+1s$ y $-1s$, estos a su vez son mapeados en flujos de símbolos paralelos y enviados por hilos separados en el aire [21]. La figura 1.13 ilustra una secuencia de datos en serie con una longitud de símbolos T_M , este se segmenta en bloques de $N = 6$ símbolos seguidamente se inserta un intervalo de guarda dentro de cada bloque como se observa en la figura , aquel intervalo de guarda se encarga de proteger el bloque siguiente de interferencias por trayectos múltiples acarreadas del bloque anterior [21].

Posterior a este proceso indicado en la figura 1.13 y 1.14 cada símbolo de un bloque de $N = 6$ símbolos se envía por un conjunto de $N = 6$ hilos paralelos, este proceso podemos observarlo en la figura 1.15 en el que cada hilo es $N = 6$ veces mas largo que la duración del símbolo T_M , lo que nos indica que al existir el paralelismo entre los cables no hay interferencia dentro de los símbolos de datos en conjunto.

Además, siempre que la longitud del canal sea inferior al intervalo de guarda este se encarga de impedir que el multitrayecto de un bloque se traslade al siguiente.

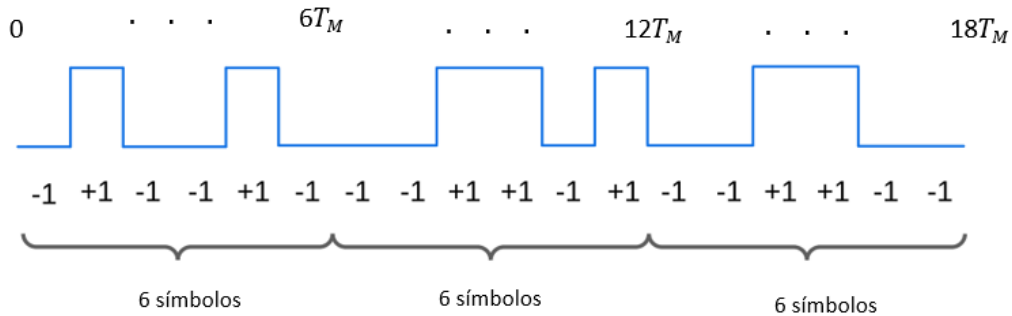


Figura 1.13: Flujo de símbolos serial. Fuente: [13]

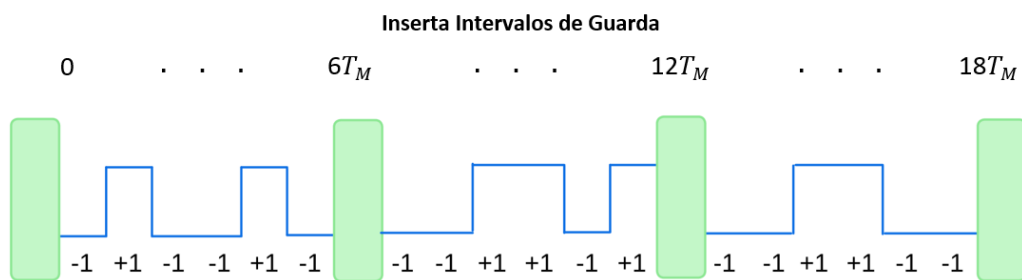


Figura 1.14: Un intervalo de guarda igual al de un tiempo de símbolo insertado en la señal anterior. Fuente: [13]

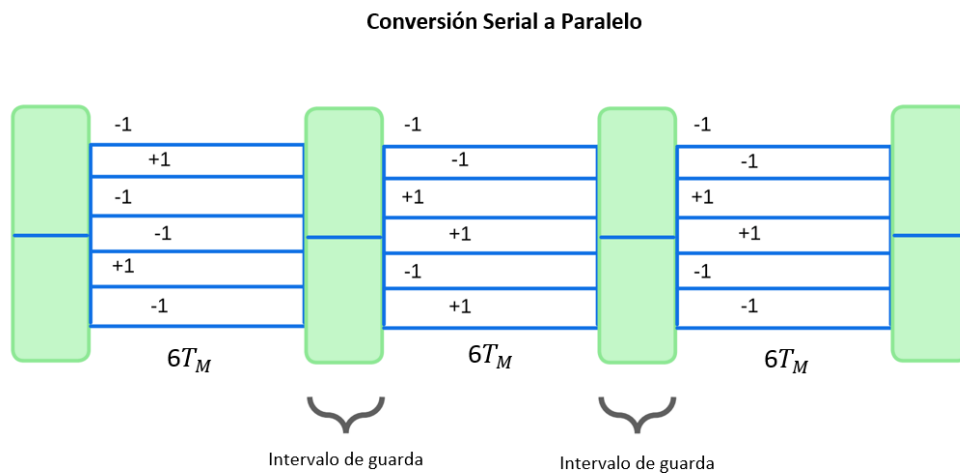


Figura 1.15: $N = 6$ símbolos reunidos en un bloque y enviados por N hilos paralelos. Fuente: [13]

Solo una pequeña cantidad de los datos originales son transportados en cada sub-portadora dando como resultado que la velocidad de bit por portadora disminuya y se reduzca drásticamente la interferencia intersimbólica (ISI, del inglés *Inter-symbol Interference*) [8]. La IFFT divide del ancho de banda disponible entre el número N que representa la cantidad de subportadoras de esta manera se generan las múltiples portadoras a distintas frecuencias ortogonales, la (IFFT, del inglés *Fast Fourier Transform*) convierte el vector de símbolos correspondientes a los valores complejos de longitud N en una señal en el dominio del tiempo 1.16 [9], [37].

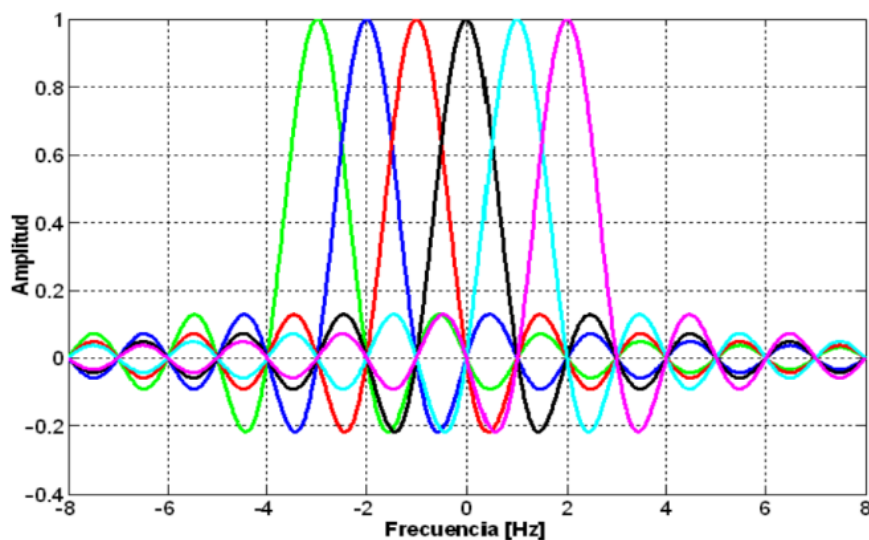


Figura 1.16: Espectro de una señal OFDM con 6 subpotadoras. Fuente: [25]

OFDM utiliza el espectro de manera eficiente porque cada símbolo se transmite en una subportadora. Esto reduce el ancho de banda utilizado debido a la propiedad de ortogonalidad que divide el canal en subcanales de banda N, así como al solapamiento entre subcanales. Cuanto más estrecho sea, más resistente será al desvanecimiento selectivo en frecuencia [9].

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_N \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Cada una de las N subportadoras forma un símbolo OFDM. El modelo de la señal recibida se puede ver en la ecuación 1.22, donde y corresponde al flujo recibido, h es el canal y w es el ruido [9].

Posteriormente al proceso de la IFFT se inserta el prefijo cíclico (CP), este se puede insertar a través de dos maneras, el primer método es a través del relleno de ceros (ZP, del inglés *Zero Padding*), este procedimiento implica la inclusión de ceros tanto antes como después de la portadora de información para completar el intervalo de guarda y luego aplicar el intervalo de guarda al prefijo cíclico correspondiente al conjunto de portadoras de energía cero, el segundo es mediante una extensión cíclica del símbolo OFDM en donde tomo un pedazo del final de mi mensaje y lo adiciono al inicio [9].

Dado T_G como la longitud del prefijo cíclico en términos de muestras, T_{sub} corresponde a la duración efectiva de un símbolo OFDM sin intervalo de guarda entonces los símbolos OFDM extendidos con el segundo método tendrán la duración de $T_{sym} = T_{sub} + T_G$ como se indica en la figura 1.17 [8].

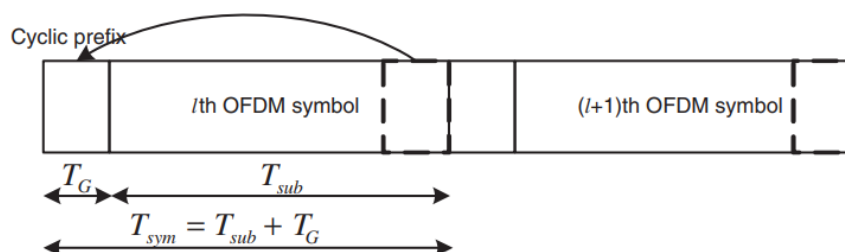


Figura 1.17: Símbolos OFDM con Prefijo Cíclico. Fuente: [8]

Si establecemos la longitud del intervalo de guarda en un valor igual o mayor al retraso máximo del canal de multipropagación, se controla el efecto de la Interferencia entre Símbolos (ISI) del símbolo OFDM en el siguiente símbolo. En consecuencia, el intervalo de guarda evita que la Transformada Rápida de Fourier (FFT) del siguiente símbolo OFDM se vea afectada, lo que garantiza la ortogonalidad entre las subportadoras [8]. En cambio si se establece un intervalo de guarda mas corto que el retardo máximo de un canal multitrayecto, la cola de un símbolo OFDM afectará a la cabecera del siguiente símbolo dando a lugar al ISI [9], en general se dice que la

longitud de un prefijo cíclico debe ser igual a la longitud máxima esperada del canal [13].

OFDM es la tecnología empleada en varios sistemas de alta velocidad como lo son WiFi (del estándar IEEE 802.11a,g,n,ac), WiMAX (del estándar IEEE 802.16), la tecnología 4G, la tecnología (LTE, del inglés *Long Term Evolution*) y sistemas de comunicación móvil 5G [13]. En la sección del capítulo 1 se analizó que el estándar 802.11a utiliza OFDM para la modulación de los paquetes a nivel de capa física.

1.6.1. Como trabaja OFDM con MIMO

La combinación de MIMO y OFDM colaboran para abordar los desafíos inherentes a los canales inalámbricos, garantizando una transmisión eficiente.

Las comunicaciones MIMO proporcionan una ganancia de diversidad para combatir los desvanecimientos de una señal mediante técnicas de diversidad, el rendimiento del sistema MIMO depende del conocimiento de como se comporta el canal, por ello necesita una estimación de canal precisa. Los problemas de frecuencias selectivas existentes en los sistemas inalámbricos se puede resolver con ayuda de la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM). Es por ello que MIMO-OFDM al incorporar ambas técnicas es importante para los actuales sistemas de comunicaciones inalámbricas [38].

Podemos considerar que MIMO-OFDM se centra en el ámbito de la frecuencia para aprovechar la diversidad de frecuencias ya que OFDM tiene por objeto transformar el canal selectivo en frecuencia en una sucesión de canales paralelos con desvanecimiento plano. Para lograrlo se deberá convertir la matriz del canal en una matriz circulante añadiendo el prefijo cíclico a la secuencia transmitida. Una vez agregado el prefijo cíclico, obtendremos la matriz circulante la cual su matriz de vectores izquierdo y derecho son respectivamente matrices (DFT, del inglés *Discrete Fourier Transform*) y matrices (IFFT), es por ello que una multiplicación por una matriz IFFT en el transmisor y por la matriz DFT en el receptor, su tarea es convertir el canal selectivo en frecuencia en una matriz diagonal, donde los elementos coinciden con los de la matriz circulante.

Gracias a este proceso es que se logra que el canal de frecuencia selectiva

en el dominio del tiempo se transforme a un conjunto de canales paralelos con desvanecimientos planos en el dominio de la frecuencia de esta forma se reduce la complejidad que pueda tener el ecualizador [1].

MIMO-OFDM combina las características de multiplexación espacial y la diversidad de un sistema inalámbrico **MIMO** con la facilidad de ecualización cuando se utiliza modulación **OFDM**. Consideremos un sistema **MIMO-OFDM** transmisor y receptor respectivamente como se muestran en las figuras 1.18, consideremos el lado del transmisor en donde el flujo de símbolos (originado en el dominio de a frecuencia) se denomina $s[n]$, el vector de símbolos $N_t \times 1$ como $s[n]$ y los subsímbolos correspondientes a la anterior antena j como $s_j[n]$. Después de la operación multiplexación espacial, cada flujo de subsímbolos se pasa a una operación del transmisor **SISO-OFDM** el cual realiza la operación serie a paralelo $1 : N$ seguidamente se realiza una N -IDFT, luego se agrega el prefijo cíclico de longitud L_c [1], [38], [39].

Sea $w[n]$ la salida vectorial en el dominio del tiempo $N_t \times 1$ del bloque donde se agrega el prefijo cíclico y $w_j[n]$ las muestras que se enviaran en la antena j_{th} de transmisión. La operación de multiplexación espacial se realiza previo a los procesos de operación del transmisor **OFDM**, a la salida de cada modulador **OFDM** obtenemos formas de pulso las cuales se convierte a tiempo continuo para seguidamente realizar el proceso de sobremuestreo [39].

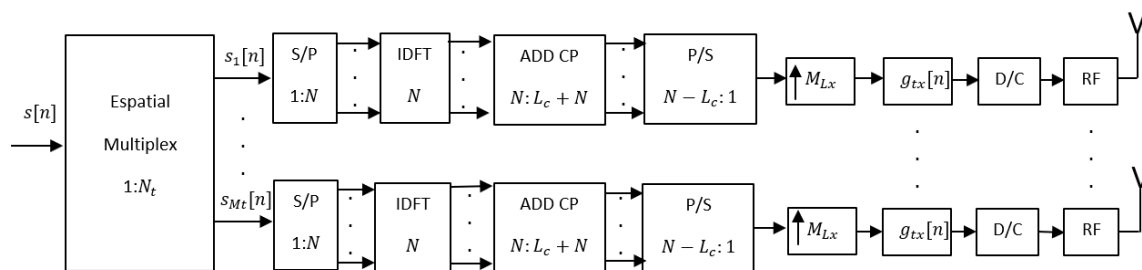


Figura 1.18: Diagrama de bloques de un transmisor sistema MIMO-OFDM. Fuente: [39]

La figura 1.19 muestra el diagrama de bloques de un receptor para un sistema **MIMO-OFDM** que es el proceso inverso del transmisor para volver a tener el mensaje

originalmente transmitido.

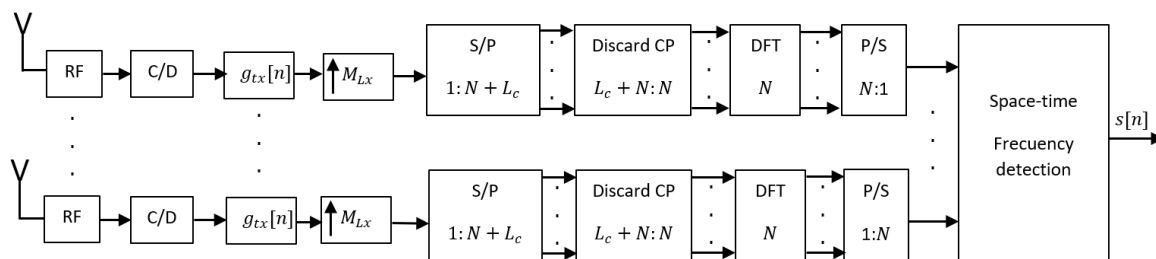


Figura 1.19: Diagrama de bloques de un receptor para sistema MIMO-OFDM. Fuente: [39]

Las opciones de ecualización que puede utilizar **MIMO-OFDM** es el detector de máxima verosimilitud el cual se resolvería para $k = 0, 1, \dots, N - 1$, donde los vectores de símbolos candidatos se multiplicarían por $\mathbf{H}[k]$ que corresponde a la respuesta matricial, que es diferente para cada portadora, dificultando el calculo previo de todos los posibles vectores de símbolos distorsionados debido a que necesita un mayor requerimiento de almacenamiento [39].

1.7. OFDM en la práctica: Trama IEEE 802.11a

Los estándares para redes de acceso local inalámbrico (**WLAN**, del inglés *Wireless Local Area Network*) han sido desarrollados dentro del grupo de trabajo del protocolo IEEE 802.11. Del mismo modo para las redes inalámbricas de área metropolitana (**WMAN**, del inglés *Wireless Metropolitan Area Network*) y redes inalámbricas de área extensa (**WWAN**, del inglés *Wireless Wide Area Network*), han sido desarrolladas bajo el mismo protocolo que se basan en la Capa Física de control de acceso al medio y de las capas 1 y 2 del modelo (**OSI**, del inglés *Open Systems Interconnection*). Por ejemplo, el estándar 802.11a es un protocolo para comunicaciones derivado del principal protocolo 802.11 el cual proporciona velocidades de datos aun mayores utilizando la tecnología **MIMO** combinado con **OFDM**, posee una variación de frecuencias de 5.2GHz y puede alcanzar una velocidad de datos de comunicación

de 6 hasta de 54Mbps (UNII, del inglés *Unlicensed National Information Infrastructure*), este estándar posee sus propias especificaciones de la capa física como se observa en la tabla 1.8.

Tabla 1.8: Especificaciones de la capa física para el estándar 802.11a. Fuente: [40]

Parametros	Especificaciones
Bandas de Frecuencia	5,725 - 5,825 GHz
Ancho de Banda del Canal	20 MHz
Numero de Canales por Bandas	4
Sensibilidad	-82 dBm para 6 Mbps -81 dBm para 9 Mbps -79 dBm para 12 Mbps -77 dBm para 18 Mbps -74 dBm para 24 Mbps -70 dBm para 36 Mbps -66 dBm para 48 Mbps -65 dBm para 54 Mbps
Figura de Ruido	<10 dB

Con el objetivo de optimizar el desempeño del sistema en el canal, el estándar 802.11a utiliza la modulación OFDM de esta manera mejora la utilización del canal de frecuencia, además de que nos ayuda a repeler la interferencia multirrayectoria de forma efectiva [39]-[41].

En el estándar 802.11a hay N=64 subportadoras que pueden escalarse mediante los símbolos de modulación, de hecho solo 48 de las 64 subportadoras se utilizan para la transmisión de datos [13].

$$k = \{-26, \dots, -22, -20, \dots, -8, -6, \dots, -1, +1, \dots, +6, +8, \dots, +20, +22, \dots, +26\} \quad (1.23)$$

De las 16 subportadoras restantes 4 se utilizan como símbolos piloto para fines de sincronización y propósitos de seguimiento de canal y las restantes se completan con símbolos de valor de 0. La subportadora 0 no se utiliza debido a los problemas de compensación DC, mientras que 6 subportadoras a la izquierda y 5 subportadoras a la derecha se utilizan como banda de guarda para facilitar los requisitos espectrales y de filtrado. Las subportadoras de datos modulados son las siguientes: -21,-7,+7,+21 se

usan para insertar subportadoras piloto como se muestra en la figura 1.20 [13].

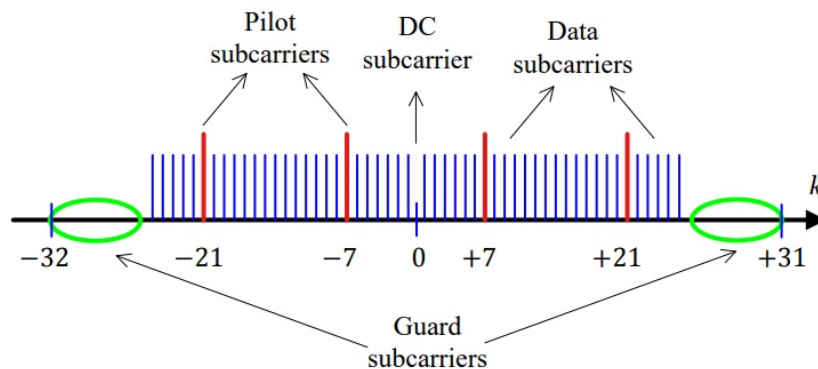


Figura 1.20: Asignación de las subportadoras DC, piloto, de datos y de guarda en IEEE 802.11a. Fuente: [13]

Después del mapeo se pasa por la **IFFT** para convertir a las subportadoras al dominio del tiempo, se inserta un prefijo cíclico y finalmente la forma de onda resultante se trunca a una única longitud de símbolo **OFDM**. Cabe mencionar que el estándar 802.11a posee su propia estructura de preámbulo en la que consta de un campo de entrenamiento corto (**STF**, del inglés *Short Training Field*) con 10 repeticiones idénticas, también consta de un campo de entrenamiento largo (**LTF**, del inglés *Long Training Field*) con 2 repeticiones iguales mayormente utilizado como campo de estimación de canal, como se indica en la figura 1.21 donde se exhibe la disposición de la trama según lo estipulado en la normativa 802.11a en la que **S** indica el **STF**, este se utiliza para la detección de señal, selección de diversidad y sincronización de frecuencia gruesa, en cambio **LTF** consta de dos mitades idénticas que se utilizan para la sincronización de frecuencia fina, o como campo para la estimación de canal (**CEF**, del inglés *Channel Estimation Field*), cada campo tiene una duración de 2 símbolos **OFDM** de ($8\mu\text{s}$) [13], [39]. El procedimiento de convergencia de la capa física (**PLPC**, del inglés *Physical Layer Convergence Procedure*) se utiliza para designar los símbolos de entrenamiento adicionales insertados para facilitar la sincronización [39].

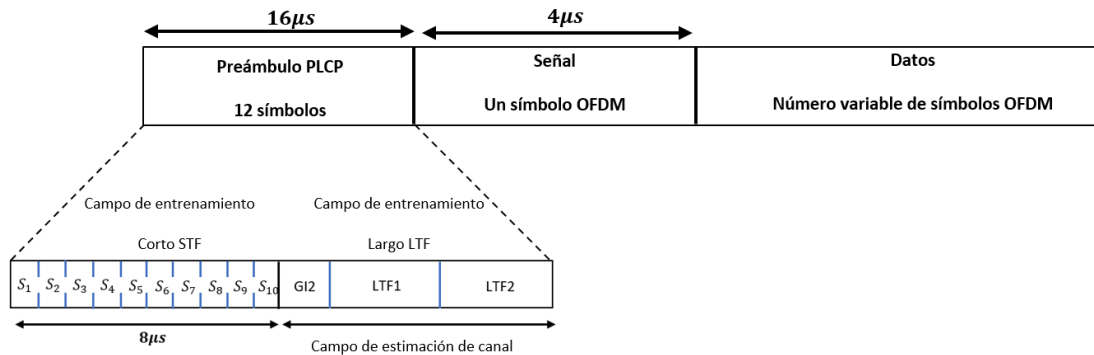


Figura 1.21: Preámbulo en el estándar IEEE 802.11a. Fuente: Los Autores

El protocolo MAC compatible con el estándar 802.11a conjuntamente con capacidad **MIMO** ofrece un mejor uso que un sistema **SISO** con 802.11, con el uso de extensiones (**MiMAX**, del inglés *MIMO for Maximum Reliability and Performance*), se puede lograr un mayor rendimiento de datos para paquetes de datos mas grandes [42].

1.8. Estimación de canal

Como se analizó en el apartado 1.6.1 el emisor es responsable de convertir el flujo de bits del mensaje en símbolos mediante la modulación, seguidamente realiza la **IFFT** de los símbolos para pasarlos a señales en el dominio del tiempo y poder enviarlos por medio del canal inalámbrico que seria el aire, esta señal suele estar perturbada por las características del canal.

La comprensión del canal facilita la estimación de la información transmitida por el transmisor a partir de los datos recibidos por el receptor. Esto se hace con el fin de minimizar los errores durante la recepción [13]. En el caso de **MIMO-OFDM** siempre que se mantenga la ortogonalidad entre las subportadoras, cada subportadora se trata como un canal separado, siempre y cuando se mantenga la ortogonalidad entre ellas. Esta ortogonalidad permite describir cada componente de subportadora de la señal recibida como la multiplicación entre la señal transmitida y la respuesta en frecuencia del canal en esa subportadora [8].

1.8.1. Tipos de Estructuras de Pilotos

En el caso de utilizar los símbolos pilotos para estimar el canal se debe mencionar que existen 3 tipos de estructuras que se pueden utilizar entre ellos están la estructura tipo bloque, tipo peine y tipo red, todas estas se analizaron en el siguiente apartado.

Estructura Tipo Bloque

Un ejemplo de disposición de pilotos en bloque se puede observar en la figura 1.22, en el cual los símbolos OFDM con pilotos en todas las subportadoras se transmiten de manera periódica para la estimación del canal, utilizando estas pilotos se realiza una estimación del canal a lo largo del eje temporal, en la figura 1.22 se nota que las subportadoras utilizadas por los símbolos piloto están marcadas en negro, mientras que las subportadoras que transportan información se representan en blanco. El período de estos símbolos piloto S_t , se calculará según el tiempo de coherencia y se describe en la ecuación 1.24 [9], [8].

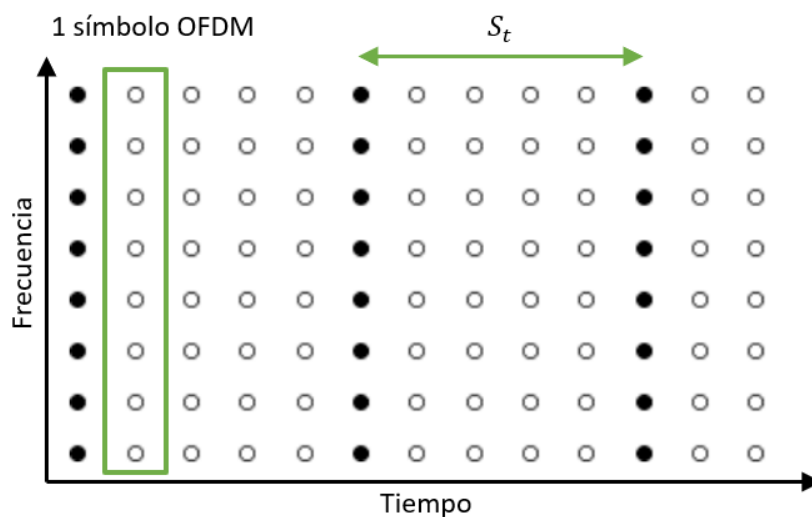


Figura 1.22: Disposición del Piloto en Estructura Tipo Bloque. Fuente: Los Autores

$$S_t \leq \frac{1}{f_{Doppler}} \quad (1.24)$$

Se emplea interpolación para aproximarse al canal entre bloques de estimación en el dominio temporal. Este enfoque de clasificación con pilotos tipo bloque se emplea específicamente para canales que presentan selectividad en frecuencia [9].

Estructura Tipo Peine

En este tipo de estructura cada símbolo OFDM tiene símbolos piloto en las subportadoras colocadas periódicamente, de esta manera, las subportadoras se reservan exclusivamente para la transmisión de símbolos piloto en todos los bloques OFDM, podemos observar este tipo de estructura para la estimación del canal en la figura 1.23 [9], [8].

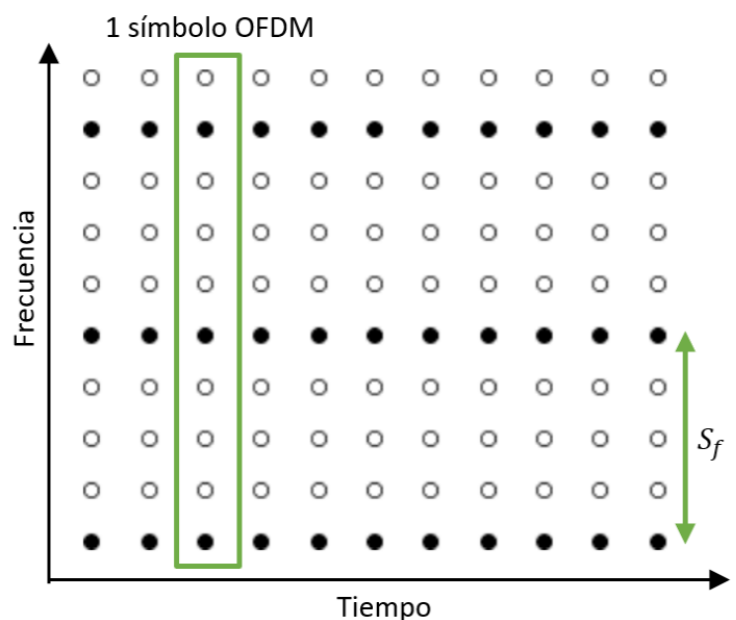


Figura 1.23: Disposición del Piloto en Estructura Tipo Peine. Fuente: Los Autores

Es importante destacar que los símbolos piloto deben ser posicionados con una frecuencia equivalente al ancho de banda de coherencia para mantener las características del canal selectivo en frecuencia, es por ello que el periodo en frecuencia de los símbolos pilotos S_f debe satisfacer la siguiente ecuación:

$$S_t \leq \frac{1}{\sigma_{max}} \quad (1.25)$$

Este tipo de estructura tipo peine para la estimación del canal se utiliza en canales con desvanecimiento rápido (fast-fading) y en escenarios como la emisión de vídeo en alta definición, la transmisión de audio de alta calidad y velocidad, así como la transferencia de datos de alta velocidad [9], [43].

Estructura Tipo Red

Esta disposición fusiona los aspectos de las dos estructuras previas, ya que en este caso, los símbolos piloto se insertan tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia con intervalos específicos. La figura 1.24 ilustra el diseño de una red para la estimación del canal [8].

Esta estructura debe satisfacer los periodos de los símbolos piloto tanto en tiempo y frecuencia como se indica en la ecuación 1.26.

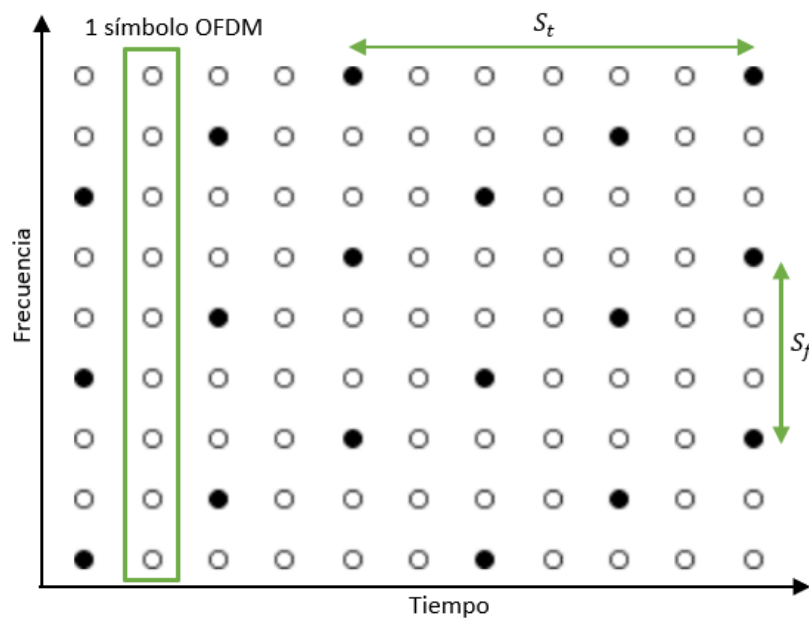


Figura 1.24: Disposición del Piloto en Estructura Tipo Red. Fuente: Los Autores

$$S_t \leq \frac{1}{f_{\text{Doppler}}} \quad y \quad S_f \leq \frac{1}{\sigma_{\text{max}}} \quad (1.26)$$

Se utiliza este tipo de estructura en red en canales selectivos en frecuencia y canales con desvanecimiento rápido (fast-fading)[10].

1.8.2. Tipos de Estimadores de Canal Basados en Símbolos de Entrenamiento

Otra manera de estimar el canal es mediante los símbolos de entrenamiento los cuales ofrecen un buen rendimiento. En el caso de **MIMO-OFDM** es necesario partir de la representación matemática matricial mostrada en la ecuación 1.27, en donde X representa a los datos transmitidos, Y representan los símbolos recibidos, H corresponde al canal que se dese estimar y W corresponde al ruido AWGN presente del canal [19].

$$Y = HX + W \quad (1.27)$$

$$\begin{bmatrix} Y_1^N \\ Y_2^N \\ \vdots \\ Y_{n_t}^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}^N & H_{12}^N & \cdots & H_{1n_t}^N \\ H_{21}^N & H_{22}^N & \cdots & H_{2n_t}^N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n_r1}^N & H_{n_r2}^N & \cdots & H_{n_r n_t}^N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1^N \\ X_2^N \\ \vdots \\ X_{n_r}^N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1^N \\ W_2^N \\ \vdots \\ W_{n_r}^N \end{bmatrix} \quad (1.28)$$

En la ecuación 1.28 n_t corresponde la cantidad de antenas T_x , n_r pertenece a la cantidad de antenas R_x y N es la cantidad de subportadoras **OFDM**. Estos estimadores de canal basados en secuencias de entrenamiento se clasifican en algoritmos de estimadores por Mínimos Cuadrados (**LS**, del inglés *Least-Square*) y Mínimo Error Medio Cuadrático (**MMSE**, del inglés *Minimum Mean Square Error*), ambas técnicas se analizaron en el siguiente apartado [9], [8], [19].

Estimador de Canal por Mínimos Cuadrados LS

El método más comúnmente empleado para estimar los coeficientes del canal es el de mínimos cuadrados, esta técnica es la mas antigua empleada en todo tipo de campos científicos, fue descubierto por Legendre y Gauss a principio del siglo XIX [13], [43]. Son más fáciles de implementar en las practicas, pero no proporciona el mejor rendimiento del canal, permitiéndonos alcanzar respuestas aproximada a canales con mínimo retraso entre transmisiones y descubrir información en el destinatario, este método se encarga de encontrar la estimación de canal H

minimizando la función de coste que se indica en la ecuación 1.29 [9], [8].

$$J(\hat{H}) = \|Y - X\hat{H}\|^2 \quad (1.29)$$

$$J(\hat{H}) = (Y - X\hat{H})^H(Y - X\hat{H}) \quad (1.30)$$

$$J(\hat{H}) = Y^H Y - Y^H X\hat{H} - \hat{H}^H X^H Y + \hat{H}^H X^H X\hat{H} \quad (1.31)$$

En la que $(Y)^H$ corresponde a la matriz Hermitiana de Y , (\hat{H}) significa una estimación de la matriz H y $\|Y - X\hat{H}\|$ es la norma de operación que se empleará, seguidamente se deriva la función de costo igualándola a cero para encontrar la aproximación al valor verdadero [8].

$$\frac{\partial J(\hat{H})}{\partial H} = -2(X^H Y)^* + 2(X^H X\hat{H})^* = 0 \quad (1.32)$$

Dado que $X^H X\hat{H} = X^H Y$ podemos encontrar la solución de la función de estimación utilizando el método de mínimos cuadrados LS como se indica en la ecuación 1.33.

$$\hat{H}_{LS} = (X^H X)^{-1} X^H Y \quad (1.33)$$

Al denotar cada componente del estimador de canal LS \hat{H}_{LS} por $\hat{H}_{LS}[k]$ en donde $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$, se supone que X es diagonal debido a la condición de ausencia de ICI, la estimación de canal LS \hat{H}_{LS} para cada subportadora se indica en la ecuación 1.34 [9], [13], [8].

$$\hat{H}_{LS}[k] = \frac{Y[k]}{X[k]} \quad K = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (1.34)$$

En la ecuación 1.35 se muestra el error cuadrático medio (MSE) de la estimación de canal LS.

$$\begin{aligned} MSE_{LS} &= E \{ (H - \hat{H}_{LS})^H (H - \hat{H}_{LS}) \} \\ &= E \{ (H - X^{-1}Y)^H (H - X^{-1}Y) \} \\ &= E \{ (X^{-1}Z)^H (X^{-1}Z) \} \\ &= \frac{\sigma_Z^2}{\sigma_X^2} \end{aligned} \quad (1.35)$$

Dada la ecuación del error cuadrático medio (**MSE**, del inglés *Mean Square Error*) 1.35 significa que el estimador **LS** es inversamente proporcional al SNR, sin embargo, la transmisión la hace más precisa en condiciones de bajo ruido. Debido a su simplicidad, es el método de estimación de canales más utilizado [9], [8].

Estimador de Canal por Mínimo Error Medio Cuadrático MMSE

Este tipo de estimador persigue obtener la estimación lineal óptima que minimice el Error Cuadrático Medio **MSE**. Considere la solución de la ecuación 1.33, $\hat{H}_{LS} = X^{-1}Y \cong \tilde{H}$ entre el canal de estimación y el canal de recepción. Usamos la matriz de pesos W , que se define como $\hat{H} \cong W\tilde{H}$, corresponde a la estimación **MMSE**, y el **MSE** de la estimación del canal es como se muestra en la se muestra en la figura 1.25 [8].

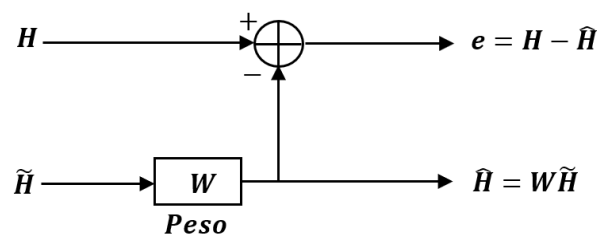


Figura 1.25: Estimación de canal MMSE. Fuente: [8]

De tal manera el método **MMSE** para la estimación del canal podría estimar linealmente de mejor manera en términos de W en donde el **MSE** de la ecuación 1.36 se minimice.

$$J(\hat{H}) = E \left\{ \|e\|^2 \right\} = E \left\{ \|H - \hat{H}\|^2 \right\} \quad (1.36)$$

En la estimación de canal **MMSE** se utiliza la matriz de correlación de canal, además de que las variaciones del ruido de la señal recibida también se considera en la estimación **MMSE**.

La estimación **MMSE** viene dada por la ecuación 1.37 [9], [44].

$$\hat{H}_{MMSE}[n] = R_{HH} (R_{HH} + \sigma^2 (X^H[n]X[n])^{-1})^{-1} \cdot \hat{H}_{LS}[n] \quad (1.37)$$

Donde R_{HH} es la autocorrelación del canal, σ^2 es la variación del ruido, $X[n]$ son los datos transmitidos y $\hat{H}_{LS}[n]$ son los coeficientes del canal estimado de mínimos cuadrados [44]. Por lo tanto el error cuadrático medio viene dado por la ecuación 1.38.

$$MSE = E[|H(n, k) - \hat{H}(n, k)|^2] \quad (1.38)$$

El estimador **MMSE** utiliza información previa sobre las estadísticas del canal, por lo cual otra manera de representar la estimación **MMSE** en el dominio de la frecuencia del canal para un vector en el dominio del tiempo distribuido gaussiano h no correlacionado con el ruido viene dado por la ecuación 1.39 [45].

$$H_{P,MMSE} = F_N^H R_{HY} R_{YY}^{-1} Y_P \quad (1.39)$$

Donde F_N es la matriz de $P \times P$ $[F_N]_{p,p} = e^{j2\pi(p-1)(p-1)/P}$, en cambio $R_{HY} = E\{h_P Y_P\} = R_{HH} F_N X_P^H$ es el vector de la señal recibida, Y_P es la matriz de covarianza cruzada y h_P corresponde al vector de canal en el dominio del tiempo. $R_{YY} = E\{Y_P Y_P^H\} = X_P F_N^H R_{HH} F_N X_P^H + \sigma^2 I_P$ es el vector del flujo receptado y Y_P es la matriz de autocovarianza [8], [45].

En cambio R_{HH} es la matriz de autocovarianza para el vector del canal h en el dominio del tiempo, además σ^2 representa la varianza del ruido. Puede escribirse de la siguiente forma $H_{P,MMSE} = F_N^H M_{MMSE} F_N X_P^H Y_P$.

En la ecuación 1.40 obtenemos el estimador de canal por mínimo error medio cuadrático [45].

$$M_{MMSE} = R_{HH} [(F_N X_P^H X_P F_N^H)^{-1} \sigma^2 + R_{HH}]^{-1} (F_N X_P^H X_P F_N^H)^{-1} \quad (1.40)$$

1.9. SDR

Los equipos de radio definida por software **SDR** es un paradigma del diseño de dispositivos de comunicación inalámbrica. Su creador, Joseph Mitra, lo definió a principios de la década de 1990 como un dispositivo con un software reprogramable y reconfigurable cuyos componentes físicos son solo una antena que cuenta con un

transformador de señales analógicas a digitales (*ADC*, del inglés *Analog-to-Digital Converter*), el receptor cuenta con un convertidor de señales digitales a analógicas (*DAC*, del inglés *Digital-to-Analog Converter*) cuyas características restantes están gestionadas por un procesador reprogramable [46].

La radio definida por software tiene como objetivo reemplazar a los componentes de radio que tradicionalmente se realizaban con circuitos integrados de hardware dedicados (*LNA*, mezcladores, amplificadores, etc). Ahora se implementan con comunicaciones por radio que poseen un software programable que puede ser gestionado en una computadora para una comunicación multibanda/multi estándar, algunas actualizaciones se pueden gestionar desde el mismo hardware para adaptarse a diferentes estándares y aplicaciones inalámbricas.

En los equipos *SDR*, la señal se procesa en modo digital en lugar de modo analógico como se realiza en la radio convencional. La digitalización se realiza mediante un convertidor de señal analógica a digital (*ADC*). La figura 1.26 da una vista del significado de *SDR*, en donde el *ADC* ocurre después del circuito RF Front-End, este se utiliza para la conversión de una señal a la frecuencia menor nombrada frecuencia intermedia (*IF*, del inglés *Intermediate Frequency*). El *ADC* se encarga de digitalizar la señal y pasarla al procesador que se encuentra en banda base para procesos como: demodulación, codificación de fuentes, etc. Es por ello que el *SDR* en comparación con equipos de radio convencionales, es mas fácil de reconfigurar, ofreciendo flexibilidad para conmutaciones multi formato y adaptar el desarrollo y evolución de la tecnología [47].

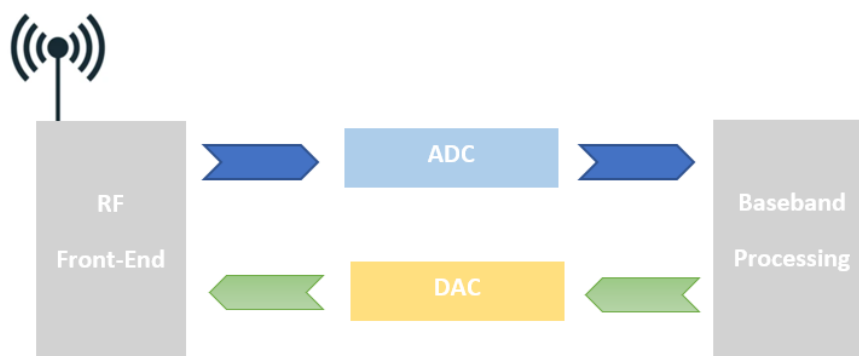


Figura 1.26: Concepto de SDR. Fuente: [47]

La radio definida por software presenta muchas ventajas en cuanto a la eficiencia en la velocidad en que ejecuta los programas y el consumo de energía. GNU Radio utiliza principalmente el (USRP) a través de una interfaz USB 2.0, un FPGA y un conjunto de convertidores del mundo analógico a el mundo digital y del mundo digital a el mundo analógico de alta velocidad RF front-end, combinados con software libre reconfigurable. Su ancho de banda de muestreo y síntesis es mil veces mayor que el de las tarjetas de sonido, lo que permite un funcionamiento de banda ancha [47], [48].

Entonces, los equipos NI USRP SDRs combinan un procesador basado en host, FPGA y RF con el objetivo de diseñar, crear prototipos e implementar rápidamente sistemas inalámbricos [47]. Los SDR se pueden utilizar para reemplazar analizadores de espectro voluminosos y costosos para mediciones de campo RF [49]. Ofrece plataformas de comunicaciones digitales flexibles y reconfigurables [48]. Los SDR se han adaptado a una amplia variedad de sistemas de comunicación inalámbrica en donde el sistema 802.11a es uno de los protocolos inalámbricos utilizados como punto de referencia para evaluar su eficiencia [50].

Los sistemas de comunicaciones inalámbricos actuales utilizan altas frecuencias para comunicarse, la conversión descendiente debe utilizarse para muestrear y transferir esas altas frecuencias a la implementación del SDR. Universal Software Radio Peripheral (USRP) es una familia de hardware dentro de una computadora, para ello se utilizo una plataforma flexible y de bajo costo desarrollada por Matt Ettus para crear la conexión entre el mundo RF y la PC. Este dispositivo USRP esta compuesto por la placa base USRP, junto a varias placas hijas, en donde los bloques individuales de un USRP típico se divide en dos partes, la primera una placa que funciona como base con un FPGA del procesamiento de señales de alta velocidad y una o mas placas hijas se encargan de cubrir diferentes rangos de frecuencia además de ser intercambiables, al momento de combinarlos se logra obtener datos de bits desde la antena a la computadora host receptora o desde la computadora host a la antena transmisora. Gracias a estas placas hijas el USRP abarca todo el rango de DC hasta 5,9 GHz cubriendo todas las frecuencias desde radio AM hasta el estándar 802.11 [47].

Capítulo 2

Implementación y Descripción de Equipos

Después de revisar los fundamentos teóricos del capítulo anterior, este segundo presenta la aplicación práctica de las tecnologías **MIMO**, tomando como base los conceptos discutidos y dando una comprensión concreta de su funcionamiento en entornos reales de comunicación inalámbrica. En este viaje específico de la aplicación, nos centramos en tres configuraciones básicas: 2×2 **MIMO** con Alamouti, 2×2 **MIMO** y Alamouti implementados con **OFDM** y 2×2 **MIMO** con D-Blast.

Se presenta en detalle la implementación 2×2 **MIMO** de Alamouti, conocida por su simplicidad y eficiencia, destacando cómo este sistema utiliza la codificación espacio-temporal para mejorar la confiabilidad de las transmisiones inalámbricas. Ejemplos prácticos y análisis de rendimiento exploran los beneficios y limitaciones de esta configuración en escenarios del mundo real.

Se transita hacia una perspectiva más amplia, considerando la implementación del método 2×2 **MIMO** con Alamouti con **OFDM**. Esta combinación es altamente eficaz para abordar los retos asociados a la transmisión de datos a alta velocidad en ambientes inalámbricos. Se analizó cómo esta sinergia entre **MIMO** y **OFDM** optimiza la eficiencia e inmunidad del espectro, brindando una solución completa a los requisitos de las redes inalámbricas modernas.

La tercera parte de nuestra investigación práctica se centra en 2×2 **MIMO** con D-Blast, una técnica que tiene como objetivo maximizar la multiplexación espacial

para mejorar el rendimiento del canal. A través de escenarios de implementación y análisis comparativos con otras configuraciones, evaluamos la efectividad de D-Blast en términos de rendimiento y adaptación a las condiciones cambiantes de comunicación.

2.1. Implementación de un sistema MIMO 2×2 STBC Alamouti

En la figura 2.1 se muestra el diagrama de bloques que contiene la parte de transmisión del sistema 2×2 STBC Alamouti.

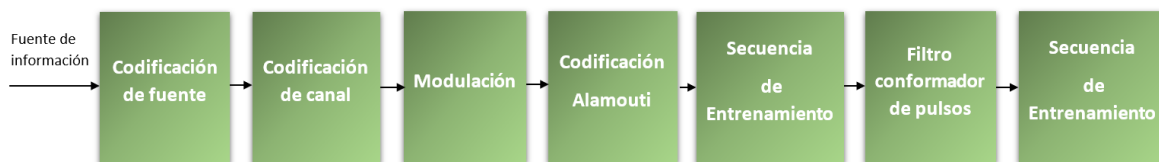


Figura 2.1: Diagrama de bloques del sistema transmisor MIMO 2×2 STBC Alamouti. Fuente: Los Autores

En el primer bloque del diagrama, representa la codificación de fuente en el cual convertiremos la información a transmitir en bits. Las opciones que dispone son de señal a bits, texto, imagen y secuencia PRBS. El segundo bloque es la codificación de canal, el cual tomará como entrada el flujo de bits de la codificación de fuente y aplicará una codificación de canal dependiendo del caso que se elija se podrá elegir entre una codificación Convolutiva, BCH, Reed-Solomon y Hamming.

El tercer bloque es el encargado de la modulación del flujo de bits. De los anteriores bloques se podrá elegir entre distintos tipos de modulaciones, en las prácticas que se realizaron, están enfocadas exclusivamente en el uso de dos técnicas de modulación: QAM y PSK. En el cuarto bloque se aplica la codificación de Alamouti en el que se construye la matriz de codificación a partir de los símbolos modulados. El quinto bloque agrega una secuencia de entrenamiento a cada flujo de símbolos. El sexto bloque consiste en un filtro que convierte los símbolos en muestras para su transmisión por cada antena, permitiendo un sobremuestreo de los símbolos. En

el séptimo bloque, se repite la función del quinto bloque. Las próximas secciones proporcionarán detalles sobre cada uno de los bloques en el esquema de transmisión.

Codificador de Fuente de Información a Bits

Se describe el primer bloque, Codificador de Fuente de Información a Bits, el cual se utiliza para codificar la fuente de información seleccionada para transmitir. Según lo representado en la Figura 2.2, se describen los parámetros de entrada y salida del bloque. A partir de esto, en la entrada se define el tipo de información a ser enviada como: Texto, Imagen, Señal o PRBS, y en la salida se obtienen los bits codificados y el número de bits a transmitir (k).

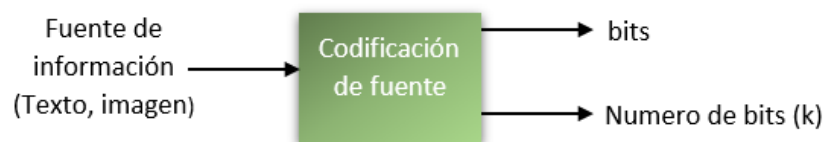


Figura 2.2: Bloque que representa el codificador de fuente de información a bits. Fuente: Los Autores

Para producir una secuencia de K bits, se puede transmitir información usando una longitud de n caracteres utilizando el código ASCII de 8 bits. Cada caracter se convierte en un conjunto de 8 bits, creando de esta manera un flujo de datos binarios. La Figura 2.3 exhibe la codificación ASCII para las letras (QAM), sus valores decimales (81, 65, 77) y su representación binaria respectivamente. La disposición del flujo de bits es una matriz de fila con una dimensión de $[1 \times k]$.

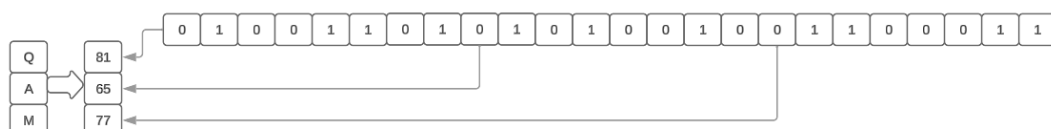


Figura 2.3: Codificación ASCII. Fuente: Los Autores

Modulación

El bloque de Modulación toma la segunda entrada de la Figura 2.4, que especifica el tipo de modulación. La modulación seleccionada efectúa un mapeo que convierte los bits en un número complejo, conocido como símbolo. En la Figura 2.4 se detallan los parámetros de entrada y salida de este bloque.

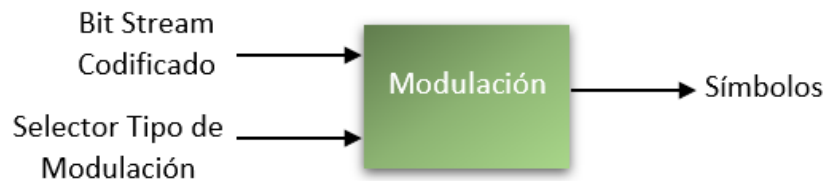


Figura 2.4: Bloque que representa el modulador. Fuente: Los Autores

En la figura 2.5 se observa un ejemplo de como sería un proceso de modulación 2.5.

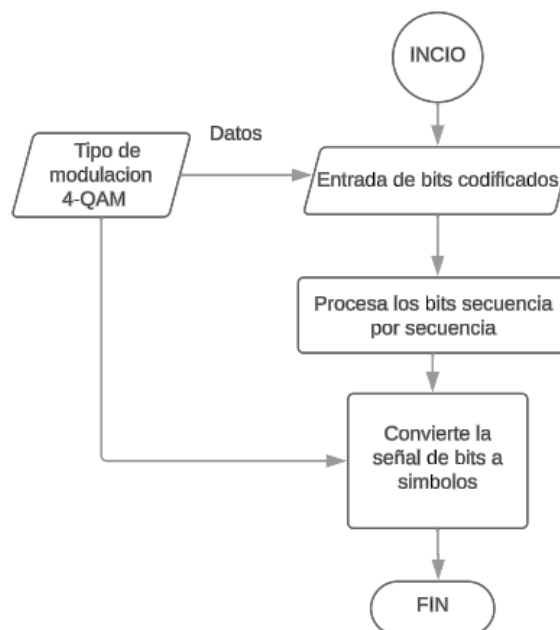


Figura 2.5: Diagrama de flujo del Modulador 4-QAM. Fuente: Los Autores

Codificador Alamouti

El bloque de Codificación Alamouti toma 2 símbolos de la entrada, como se observa en la Figura 2.6. Al primer símbolo lo negará y al segundo lo conjugará, luego acomodará los 4 símbolos en una matriz de 2×2 . Este proceso se repetirá para todos los símbolos que ingresen al bloque de codificación.



Figura 2.6: Bloque que representa el codificador de Alamouti. Fuente: Los Autores

Este bloque posee una entrada y dos salidas, como se muestra en la figura 2.7. La primera entrada serán los símbolos modulados del bloque anterior. La primera salida será la matriz codificada de Alamouti y la segunda salida será la longitud de la matriz Alamouti que se generó en el codificador.

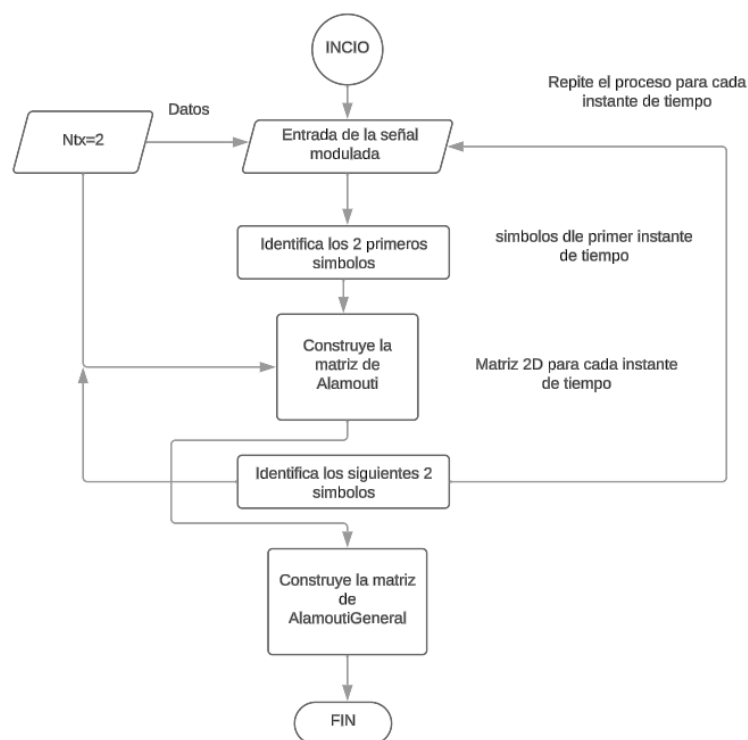


Figura 2.7: Diagrama de flujo del codificador de Alamouti. Fuente: Los Autores

Secuencia de Entrenamiento

Este bloque se responsabilizará de incluir en cada flujo de datos una secuencia denominada símbolos de entrenamiento o preámbulo. Esto se hace para permitir que el sistema receptor identifique la secuencia previamente conocida y sea capaz de utilizar la sincronización de trama y estimación del canal, podremos escoger entre diferente tipos de secuencias de entrenamiento como se indica en la tabla 2.1, estas secuencias son conocidas por tener una alta correlación, el preámbulo sera agregado de forma intercalada como se indica en la tabla 2.2.

Tabla 2.1: Tipos de preámbulos disponibles para utilizar al agregar como secuencia de entrenamiento. Fuente: Los Autores

Tipos de preámbulo a utilizar
Barker 11 Binaria
Barker 13 Binaria
Barker 11 Cuaternaria
Barker 13 Cuaternaria
Frank 16
Zadoff-Chu
Neuman Hoffman Binaria

Tabla 2.2: Matriz formada al agregar la secuencia de entrenamiento para dos canales. Fuente: Los Autores

Matriz formada por la secuencia de entrenamiento		
Sub-Flujo 0	preámbulo	$0+0i$
Sub-Flujo 1	$0+0i$	preámbulo

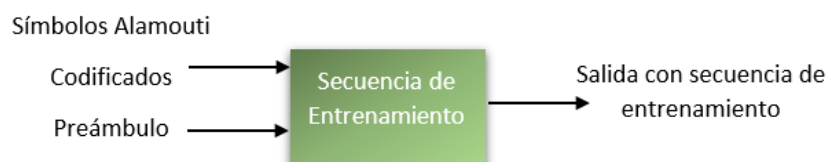


Figura 2.8: Bloque que representa la Secuencia de Entrenamiento. Fuente: Los Autores

El bloque tiene como primer entrada los símbolos codificados de Alamouti, una segunda entrada que sera el control que nos permite elegir entre los diferentes tipos de secuencia de entrenamiento y la salida sera la matriz codificada de Alamouti agregada los símbolos de entrenamiento.

Filtro Conformador de Pulsos

El bloque de Filtro Conformador de Pulsos ilustrado en la figura en la figura 2.9 convierte el flujo de símbolos en muestras representadas en formas de onda. El proceso que este realiza se representa en la figura 2.10 mediante un diagrama de flujo en la figura 2.9 se presentan los parámetros de entrada y salida del bloque filtro conformador de pulsos.



Figura 2.9: Bloque que representa el Filtro Conformador de Pulsos. Fuente: Los Autores

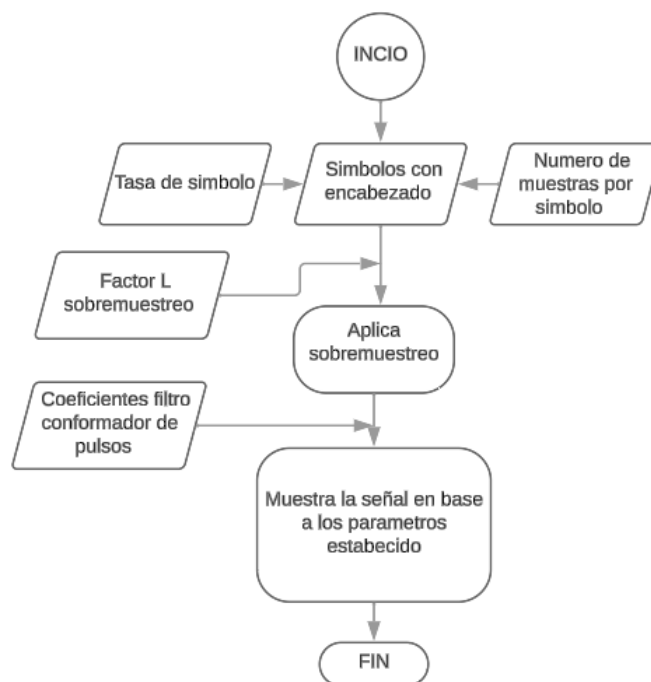


Figura 2.10: Diagrama de flujo de Filtro Conformador de Pulsos. Fuente: Los Autores

Diagrama de bloques del sistema receptor MIMO 2 × 2 STBC Alamouti. Fuente: Los Autores

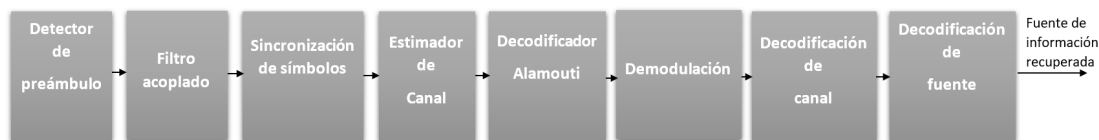


Figura 2.11: Diagrama de bloques del sistema receptor MIMO 2 × 2 STBC Alamouti. Fuente: Los Autores

En la figura 2.11 muestra la conformación del sistema receptor implementando MIMO 2 × 2, este esquema se divide como en el transmisor en un bloques de 8 etapas como se observa en la figura 2.11.

Se comienza con el bloque Detector de preámbulo, es el encargado de detectar los símbolos de la segunda secuencia de entrenamiento enviados por el transmisor. El segundo bloque, Filtro acoplado, es el encargado de minimizar el SNR de la transmisión y además eliminar las componentes de frecuencia no deseadas en la recepción. El tercer bloque, Sincronización de símbolos, toma la primera secuencia de símbolos de entrenamiento y aplica la sincronización de símbolos mediante una correlación cruzada entre los símbolos recibidos y los símbolos de preámbulo. El cuarto bloque, Estimador de canal, utiliza los símbolos de preámbulo para construir una matriz de coeficientes y mediante el uso del estimador LS, se podrá decodificar los símbolos recibidos. El quinto bloque, Decodificador Alamouti, se encarga de reconstruir los subflujos de datos en un solo flujo de datos. El sexto bloque, Demodulación, convierte los símbolos a bits dependiendo de la modulación escogida. El séptimo bloque realiza la decodificación de canal basada en la codificación elegida en el transmisor. El octavo bloque decodifica los bits para reconstruirlos a la información enviada.

Detector Preámbulo

El bloque Detector de preámbulo indicado en la figura 2.12 detecta el inicio de la transmisión y así desechar muestras no deseadas en el receptor. Para lograr

esta detección Implementa el algoritmo basado en la Identidad de Cauchy-Schwartz para identificar patrones en una señal,el bloque detecta la energía de las señales resaltando los máximos de las correlaciones más importantes y a las otras las hace negativas,identifica el argumento del máximo de todas las comparaciones de la secuencia preámbulo calculadas con el producto interno y así detecta el2.13 se observa las entradas y salidas necesarias para el funcionamiento del bloque.

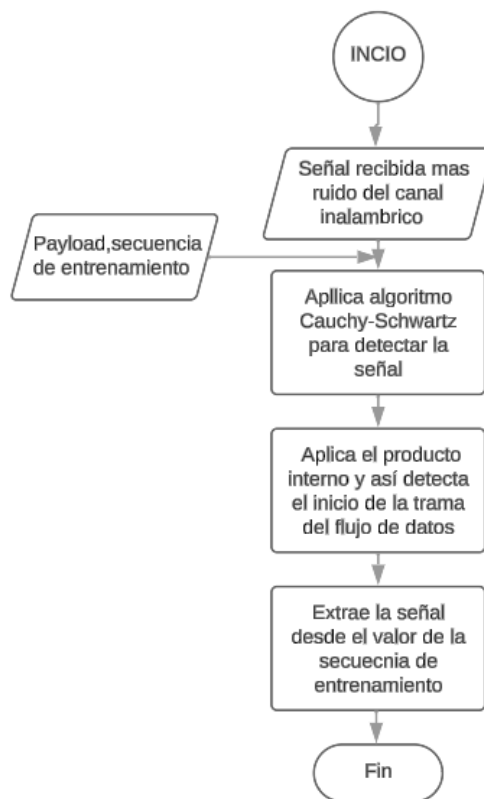


Figura 2.12: Diagrama de flujo del detector del preámbulo. Fuente: Los Autores

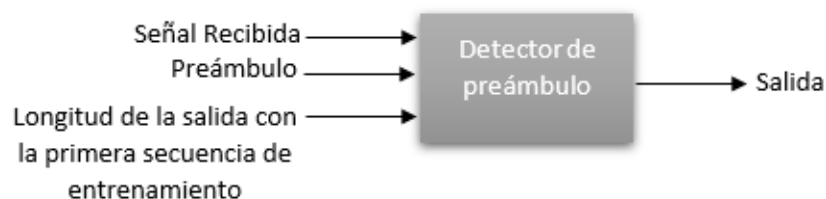


Figura 2.13: Bloque que representa el preámbulo. Fuente: Los Autores

Filtro acoplado

El segundo bloque, el Filtro Acoplado, mostrado en la figura 2.14, realiza un escaneo por todas nuestras recibidas, donde cada conjunto de L muestras genera una forma de onda que se representa mediante un símbolo. Este proceso se visualiza en la figura 2.15. En la figura 2.14, se puede notar que tiene tres entradas, las cuales deben coincidir con las configuradas en la parte de transmisión en el bloque de Filtro Acoplado.

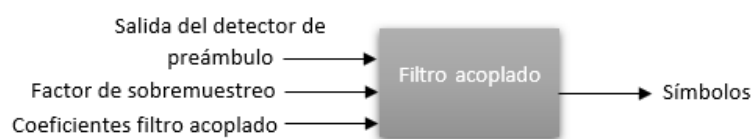


Figura 2.14: Bloque que representa el filtro acoplado. Fuente: Los Autores

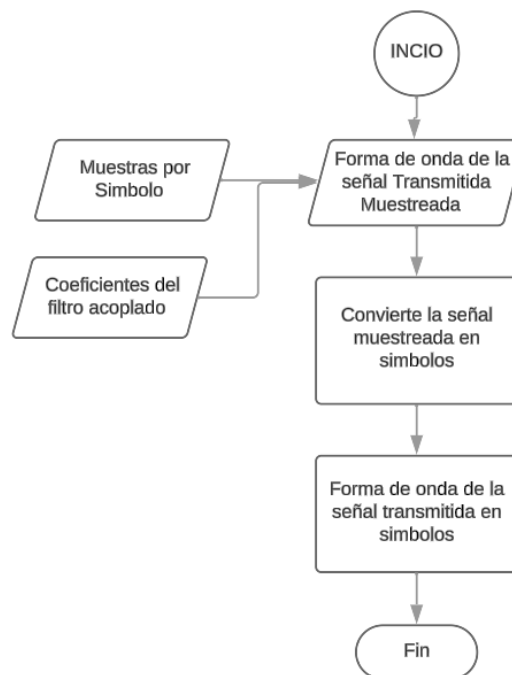


Figura 2.15: Diagrama de flujo del filtro acoplado. Fuente: Los Autores

Sincronización de símbolos

En el bloque sincronización de símbolos representado de la figura 2.16 tiene como propósito identificar el comienzo de la trama en la secuencia de datos recibidos,

el bloque toma los datos compara la energía de las señales recibida con las secuencia de símbolos de entrenamiento y así con una correlación cruzada detecta el inicio de la trama del flujo de datos recibidos, además realizara el proceso de downsampling en donde eliminara los símbolos agregados en cero por un factor L este proceso se observa en la figura 2.17 representado mediante un diagrama de flujo.

El bloque representado en la figura 2.16 cuenta con tres entradas y una salida. La primera entrada se refiere a los símbolos producidos por el filtro acoplado, la segunda entrada corresponde a los símbolos preámbulo utilizados en la detección de la señal y la tercera entrada factor de sobre muestreo corresponde al factor L ya mencionado.

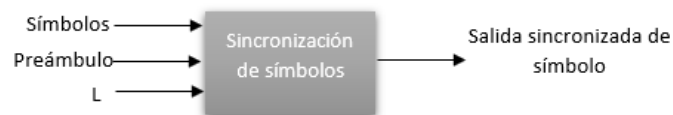


Figura 2.16: Bloque que representa la sincronización de símbolos. Fuente: Los Autores

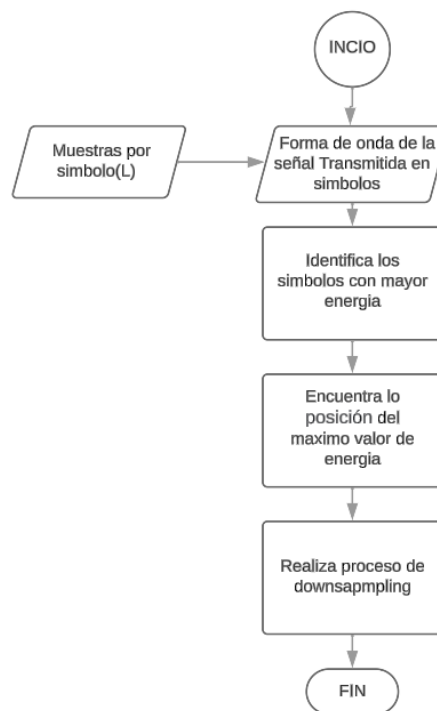


Figura 2.17: Diagrama de flujo para la sincronización de símbolos. Fuente: Los Autores

Estimador de Canal

El bloque Estimador de Canal es el encargado encontrar los coeficientes del canal para así decodificar los subflujos de información recibidos, utiliza la secuencia de símbolos de entrenamiento para armar una matriz de coeficientes llamada matriz de toepliz que los elementos de cada fila son iguales a los elementos de la fila inmediatamente anterior, desplazados una posición hacia la derecha para así utilizar el algoritmo LS empleado para calcular los coeficientes del canal de comunicación, fundamentado en la idea de minimizar los errores cuadráticos entre los valores observados y los valores predichos, con el fin de obtener la estimación del canal.



Figura 2.18: Bloque que representa el estimador de canal. Fuente: Los Autores

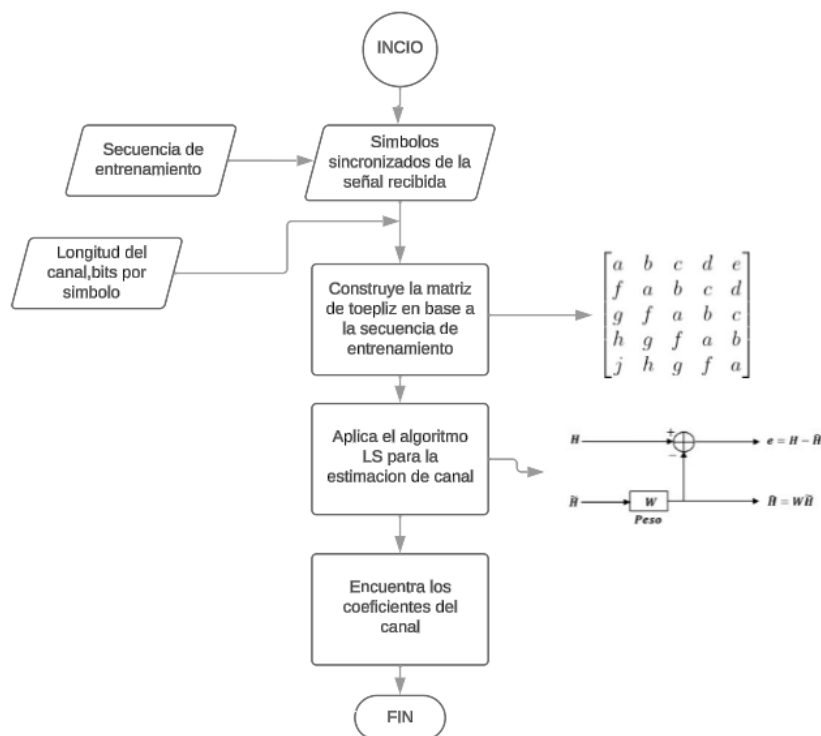


Figura 2.19: Diagrama de flujo del estimador de canal. Fuente: Los Autores

Decodificador de Alamouti

El bloque Decodificador de Alamouti es el encargado de recuperar la información del canal estimado, el decodificador de Alamouti reconstruye la información original transmitida. Este proceso se basa en la matriz de coeficientes obtenida durante la transmisión. La matriz de coeficientes se utiliza para formar combinaciones lineales de las señales recibidas, lo que permite recuperar los símbolos originales transmitidos.



Figura 2.20: Bloque que representa el decodificador de Alamouti. Fuente: Los Autores

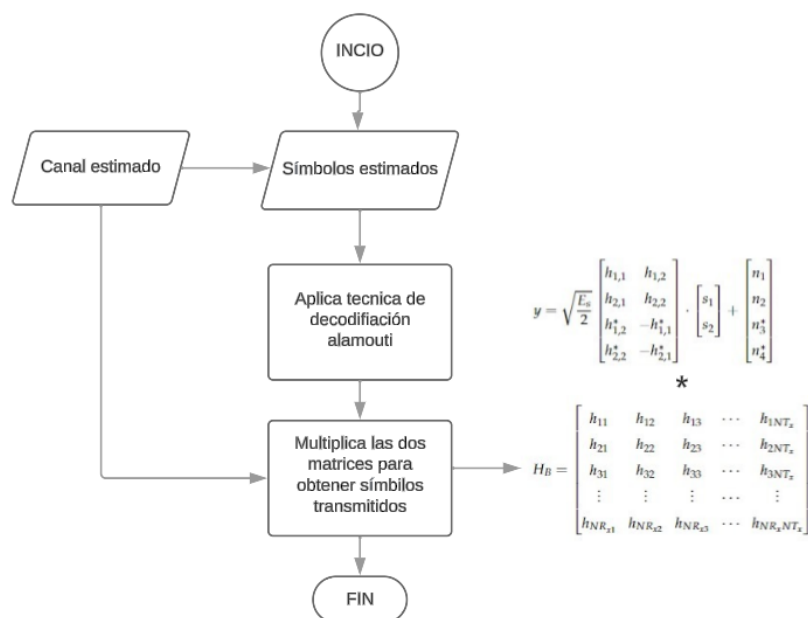


Figura 2.21: Diagrama de flujo del decodificador de Alamouti. Fuente: Los Autores

Demodulación

El bloque de demodulación es el encargado de realizar un proceso contrario a la modulación, utiliza los parámetros de la modulación utilizados en la transmisión así podrá identificar la ubicación de los posibles símbolos para así convertirlos en bits. El bloque de demodulación de la figura 2.22 posee tres entradas y una salida, en la primer entrada estarán el flujo de símbolos decodificados de Alamouti, en la segunda entrada tendremos un control de demodulación que será el mismo que en el bloque de modulación de transmisión y en el tercer bloque tendremos un factor L para el proceso de recuperación de los bits.

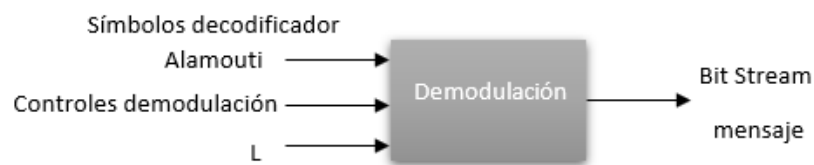


Figura 2.22: Bloque que representa la demodulación. Fuente: Los Autores

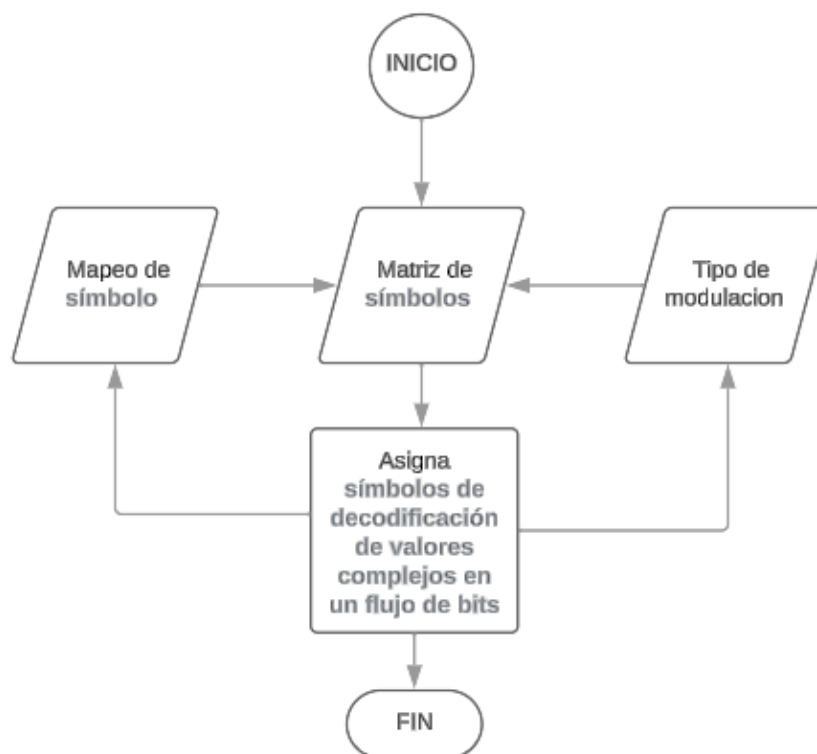


Figura 2.23: Diagrama de flujo para la demodulación. Fuente: Los Autores

Decodificador de Fuente

El bloque de decodificación de fuente se encargara de decodificar los bits a la información transmitida ya sea Señal, Texto, Imagen o PRBS. En la Figura 2.24 nos indica dos entradas y una salida, en la primera entrada estarán los bits ya demodulados en el anterior bloque, en la segunda entrada manipularemos el tipo de información enviada y en la salida obtendremos los bits decodificados enviados en la transmisión.

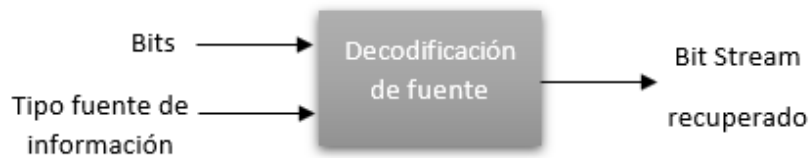


Figura 2.24: Bloque que representa el decodificador de fuente. Fuente: Los Autores

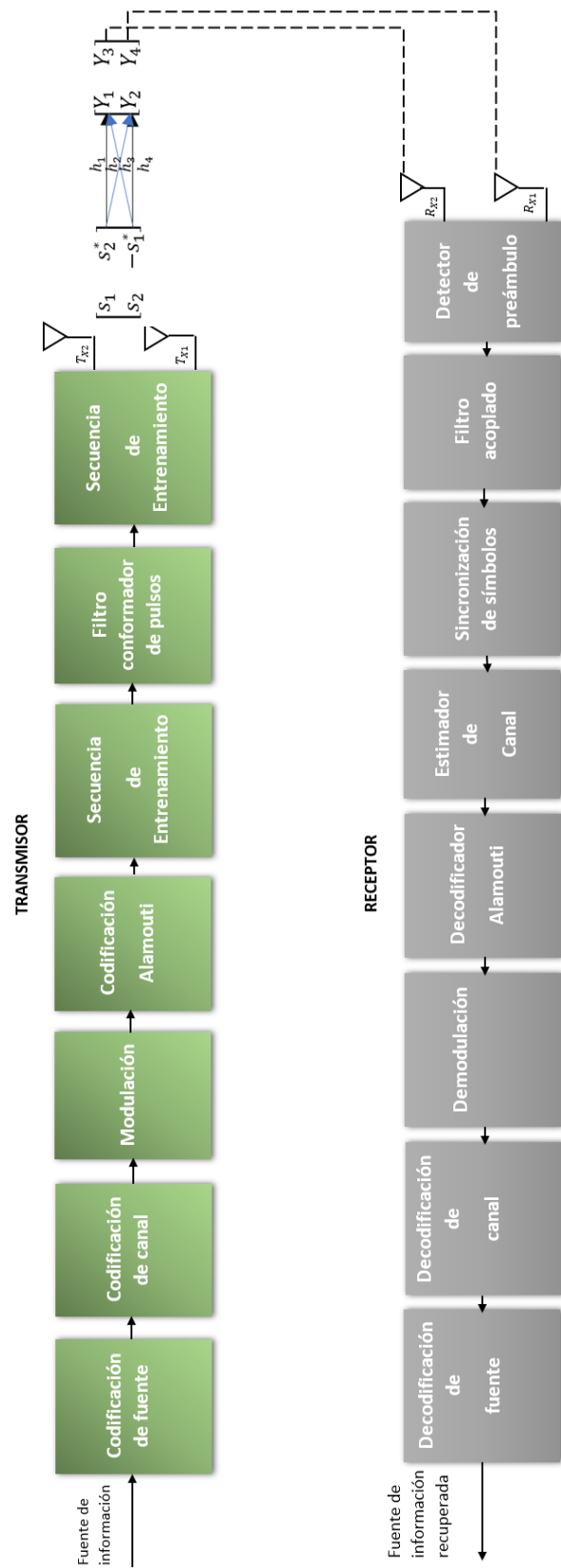


Figura 2.25: Diagrama de bloques del sistema transmisor y receptor MIMO 2 × 2 STBC Alamouti. Fuente: Los Autores

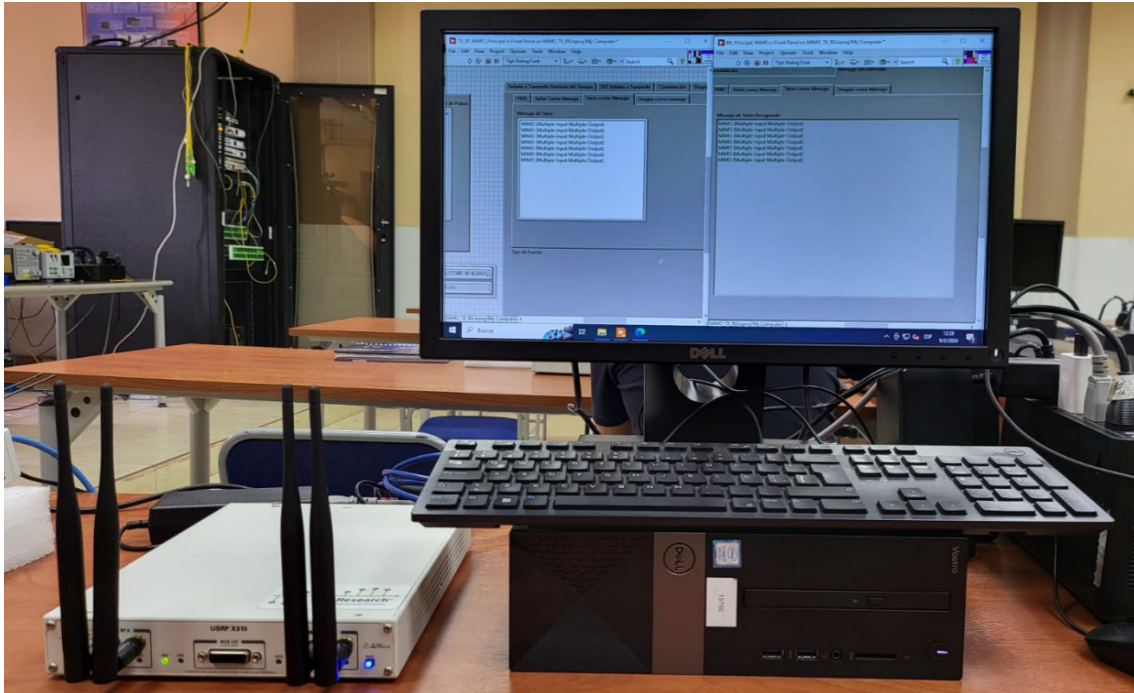


Figura 2.26: Sistema MIMO 2×2 STBC Alamouti utilizando los equipos SDR del laboratorio de Telecomunicaciones de la Sede Cuenca. Fuente: Los Autores

2.2. Implementación de sistema MIMO 2x2 STBC Alamouti OFDM

En la figura 2.27 se ilustra el diagrama de bloques del bloque de un sistema de comunicación inalámbrica MIMO-OFDM el primer bloque del diagrama tenemos la codificación de fuente en el cual convertiremos las información a transmitir en bits las opciones que dispone son señal a bits, texto, imagen y secuencia PRBS. El segundo bloque es la codificación de canal el cual tomara como entrada el flujo de bits de la codificación de fuente y aplicara una codificación de canal dependiendo del caso que se elija entre una codificación Convolutacional, BCH, Reed Solomon y Hamming. El tercer bloque es el encargado de la modulación del flujo de bits de los anteriores bloques se podra elegir entre distintos tipos de modulaciones pero por cuestiones de practica se utilizara QAM y PSK.

En el cuarto bloque, se implementa la técnica de codificación de Alamouti,

la cual segmenta el flujo de símbolos de información en dos subflujos de símbolos de información, asignando uno a cada antena transmisora. El quinto bloque es el encargado de dividir la matriz de codificación de Alamouti en 2 subflujos de información. La tarea del sexto bloque consiste en llevar a cabo la modulación OFDM. El séptimo bloque es el encargado de añadir una secuencia de entrenamiento a cada flujo de símbolos. El octavo bloque realiza la etapa de sobremuestreo para evitar la interferencia de símbolos. El noveno bloque realiza el mismo proceso que el séptimo bloque.

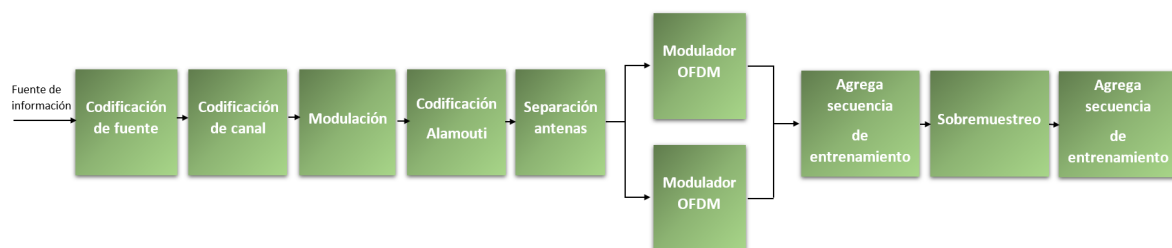


Figura 2.27: Diagrama de bloques del sistema transmisor MIMO 2×2 STBC Alamouti implementado con OFDM. Fuente: Los Autores

Separación Antenas

El bloque de Separación de antenas separa el flujo de datos en dos subflujos de datos que representa las dos antenas transmisoras la figura 2.28 indica la entrada y las salidas, la entrada sera la matriz codificada de Alamouti y las salidas representara las antenas transmisoras.

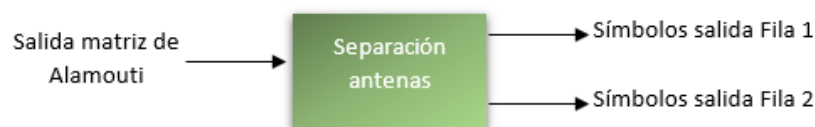


Figura 2.28: Bloque que representa la separación de antenas. Fuente: Los Autores

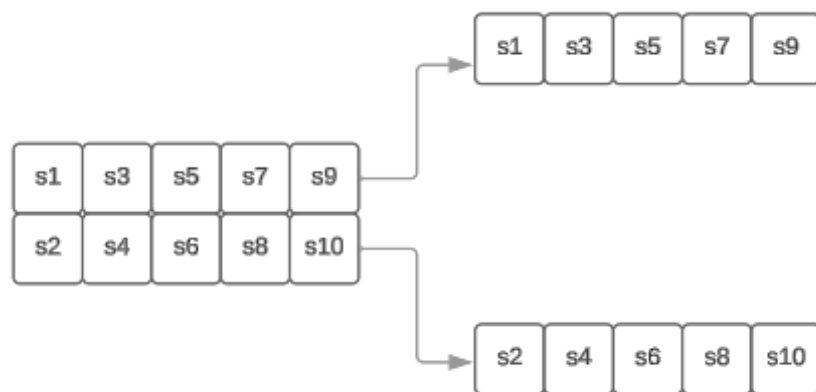


Figura 2.29: Diagrama de flujo para la separación de antenas. Fuente: Los Autores

Modulador OFDM

En la figura 2.31 se observa el esquema de construcción del modulador OFDM en donde en la primera etapa del mismo se prepara datos necesarios para la modulación como número de portadoras, número de portadoras pilotos, porcentaje de símbolos de guarda y porcentaje de prefijo cíclico, en la segunda etapa se realiza el proceso de cambio de serie a paralelo el flujo de datos entrante en base al número de portadoras a utilizar además de añadir los símbolos de guarda o conocidos también como símbolos pilotos estos serán seleccionados en base a la modulación seleccionada tomara ciertos símbolos en base al mapa de símbolos de la modulación a ocupar, en la tercera etapa hace el proceso de aplicar la transformada de Fourier y añade el prefijo cíclico al final de todo el flujo de datos de las subportadoras.

La figura 2.30 muestra las entradas y salidas del bloque de modulación OFDM en la primera entrada ingresarán los subflujos de datos representados como antenas, en la segunda entrada tendremos los controles de la modulación que se mencionaron en la primera etapa del bloque de modulación OFDM, la tercera entrada se podrá seleccionar la modulación que se utilizara para el proceso de agregación de símbolos de guarda y en la salida se tendrá los símbolos modulados que han sido sometidos a todas las etapas ya mencionadas.



Figura 2.30: Bloque que representa el modulador OFDM. Fuente: Los Autores

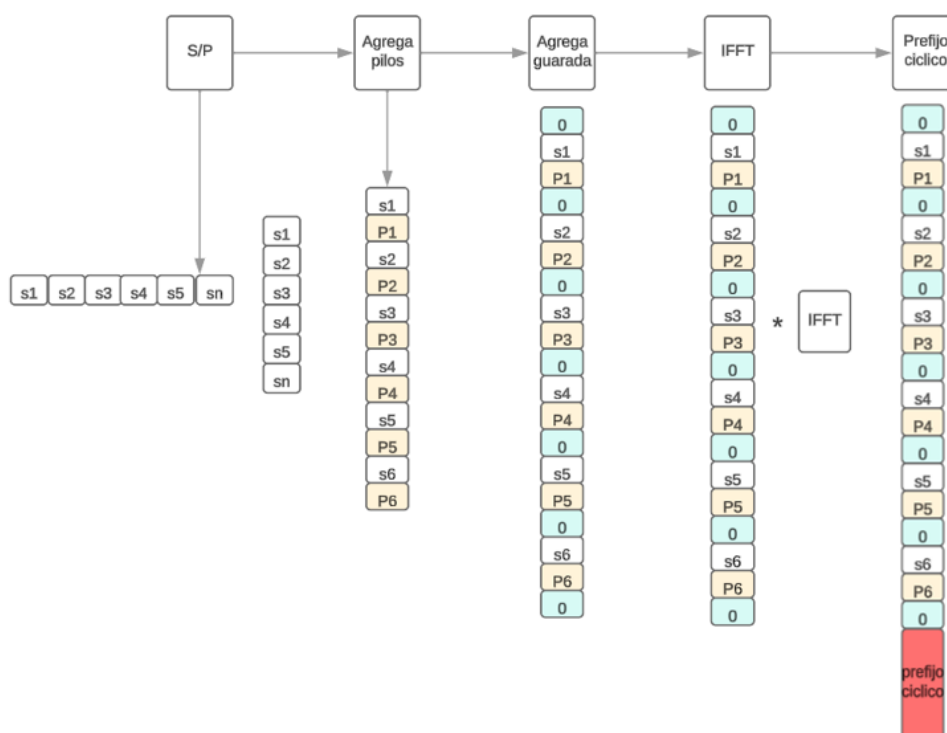


Figura 2.31: Esquema de construcción de un símbolo OFDM. Fuente: Los Autores

Agrega secuencia de entrenamiento

Este bloque será responsable de incluir una secuencia llamada símbolos de entrenamiento o preámbulo en cada flujo de información. Su propósito es permitir que el receptor detecte esta secuencia conocida y utilice la sincronización de trama y la estimación del canal, podremos escoger entre diferente tipos de secuencias de entrenamiento como se indica en la tabla 2.1, estas secuencias son conocidas por tener una alta correlación, en la tabla 2.2 se observa como el preámbulo sera agregado de forma intercalada 2.2.



Figura 2.32: Bloque que representa la secuencia de entrenamiento. Fuente: Los Autores

Sobremuestreo

Este bloque se encarga de añadir un flujo de datos entre cada símbolo con un valor de cero de una longitud de L , esto se realiza con el fin de prevenir la Interferencia entre Símbolos *ISI* durante la transmisión de información. En la figura 2.33 se observa los requerimientos de ingreso y salida del bloque, el primer ingreso sera le secuencia modulada de la salida del anterior bloque de modulación *OFDM*, en la segunda entrada sera el factor L ya mencionado y la salida entregara el flujo de datos ya aplicado el proceso de sobre muestreo.



Figura 2.33: Bloque que representa el sobremuestreo. Fuente: Los Autores

Diagrama de bloques del sistema receptor MIMO 2x2 STBC Alamouti implementado con OFDM

En la figura 2.34 se observa el planteamiento del sistema receptor aplicando *MIMO-OFDM 2X2*, este esquema se divide como en el bloque transmisor en 9 etapas.

El primer bloque Detector de preámbulo es el detecta los símbolos de la segunda secuencia de entrenamiento enviados por el transmisor. El segundo bloque sincronización de símbolos toma la primera secuencia de símbolos de entrenamiento y aplica la sincronización de símbolos aplicando una correlación cruzada entre los símbolos recibidos y los símbolos preámbulo. El tercer bloque

Estimador de canal utiliza los símbolos preámbulo para construir una matriz de coeficientes y mediante el uso de el estimador LS se podrá decodificar los símbolos recibidos. El cuarto bloque demodula los símbolos OFDM recibidos. El quinto bloque elimina símbolos en cero agregados para completar las subportadoras en la etapa de modulación OFDM del transmisor. El sexto bloque Decodificador Alamouti se encargada de reconstruir los subflujos de datos codificados de Alamouti a un solo flujo de datos. El séptimo bloque Demodulación convierte los símbolos a bits dependiendo de la modulación escogida en el transmisor. EL octavo bloque realiza la decodificación de canal en base al codificación elegida en el transmisor. El noveno bloque decodifica los bits para reconstruirlos a la información enviada.

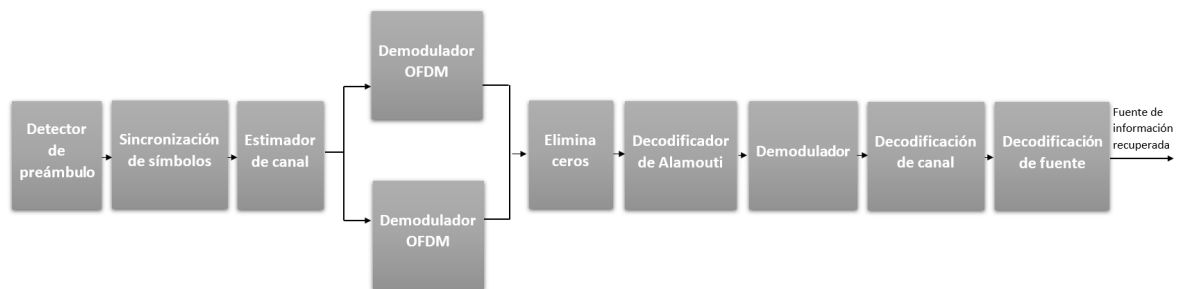


Figura 2.34: Diagrama de bloques del sistema receptor MIMO 2×2 STBC Alamouti implementado con OFDM. Fuente: Los Autores

Sincronización de símbolos

En el bloque sincronización de símbolos que se observa en la figura 2.35 tiene como objetivo detectar el inicio de la trama en el flujo de datos recibidos, el bloque toma los símbolos y compara la energía de las señales recibida con las secuencia de símbolos de entrenamiento y así con una correlación cruzada detecta el inicio de la trama del flujo de datos recibidos, además realiza el proceso de downsampling en donde eliminara los símbolos agregados en cero por un factor L como se indico en la figura 2.33 de los esquemas de transmisión.

El bloque mostrado en la figura 2.35 tiene tres entradas y dos salidas la primera corresponde a los símbolos de salida del filtro acoplado, la segunda entrada corresponde a los símbolos preámbulo utilizados en la detección de la señal, la tercera

entrada factor de sobre muestreo corresponde al factor L ya mencionado, en la primera salida obtendremos el subflujo de información ya sincronizado y en la segunda salida el retraso de muestras de las antenas.

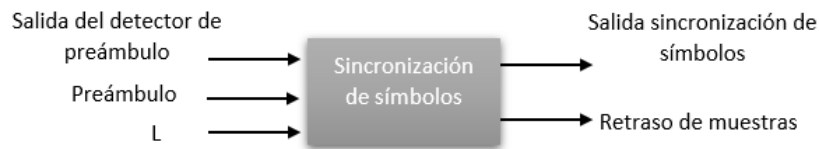


Figura 2.35: Bloque que representa la sincronización de símbolos. Fuente: Los Autores

Estimador de Canal

El bloque Estimador de Canal funciona de la misma manera que en la figura 2.18 es el encargado de encontrar los coeficientes del canal para así decodificar los subflujos de información recibidos, utiliza la secuencia de símbolos de entrenamiento para armar una matriz de coeficientes llamada matriz de toeplitz que los elementos de cada fila son iguales a los elementos de la fila inmediatamente anterior, desplazados una posición hacia la derecha para así utilizar el algoritmo LS que es un método utilizado para estimar los coeficientes del canal de comunicación basado en el principio de minimización de los errores cuadrados entre los valores observados y los valores predichos. para así lograr la estimación de canal. El bloque que se observa en la figura 2.36 tiene cuatro entradas y tres salidas, la primera entrada será los símbolos ya sincronizado del anterior bloque, la segunda entrada será la longitud de la matriz de toeplitz ya mencionada, la tercera entrada será los bits por símbolo ocupados en la modulación, en la cuarta entrada encontraremos la entrada preámbulo de la secuencia de entrenamiento en las salidas obtendremos el canal estimado y las salidas estimadas de los subflujos de símbolos.



Figura 2.36: Bloque que representa el estimador de canal. Fuente: Los Autores

Demodulador OFDM

El bloque de demodulación OFDM observado en la figura 2.38 comienza eliminando el prefijo cíclico agregado al final de las subportadoras enviadas en el transmisor, en la segunda etapa aplica la transformada de Fourier y elimina los símbolos de guarda agregados en el modulador y en una última etapa extrae los símbolos piloto y así obtendremos los símbolos demodulados para así seguir a la siguiente etapa. En la figura 2.37 se observa las dos entradas y una salida del bloque demodulador OFDM, en la primera entrada obtendremos el flujo de símbolos a demodular, en la segunda entrada se solicitará los controles de demodulación OFDM y en la salida se tendrá los símbolos ya demodulados.



Figura 2.37: Bloque que representa el demodulador OFDM con sus entradas y salidas. Fuente: Los Autores

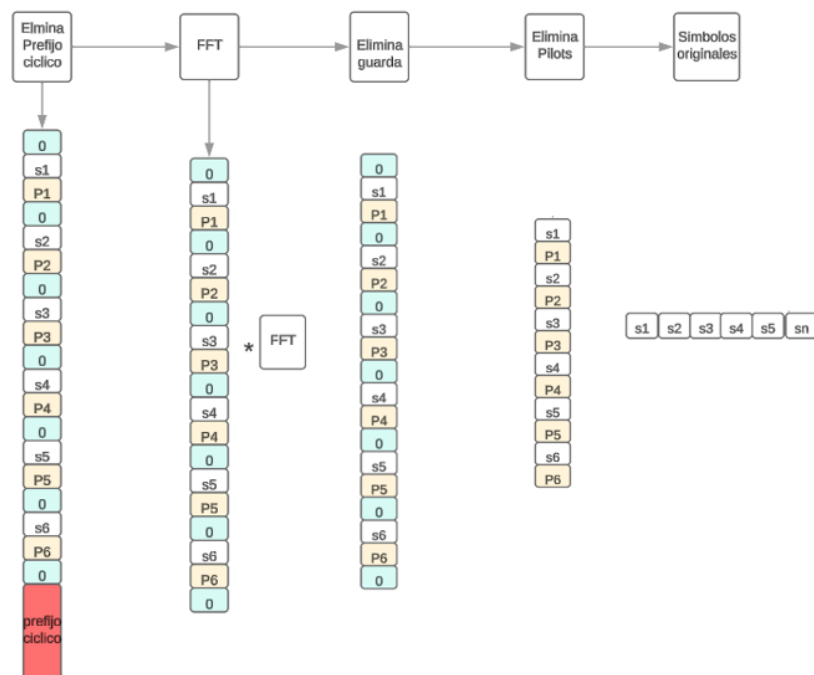


Figura 2.38: Esquema de trabajo del demodulador OFDM. Fuente: Los Autores

Elimina Ceros

El bloque que se observa en la figura 2.39 eliminara los ceros agregados al final de las subportadoras utilizados para que el flujo de símbolos sea congruente con las suportaras utilizadas en el transmisor. En la figura 2.39 se observa las entradas y salida ,en las entradas se tiene los símbolos demodulados del anterior bloque y en la salida obtendremos los símbolos sin los cero agregados.

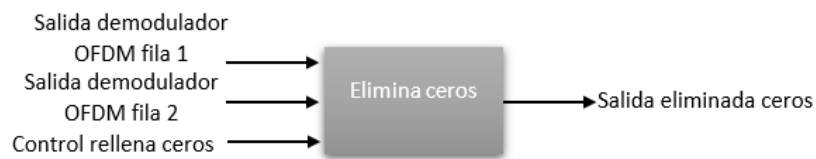


Figura 2.39: Bloque que representa como eliminar los ceros. Fuente: Los Autores

Decodificador de Alamouti

El bloque Decodificador de Alamouti es el encargado de recuperar la información del canal estimado, el decodificador de Alamouti reconstruye la información original transmitida. Este proceso se basa en la matriz de coeficientes obtenida durante la transmisión. La matriz de coeficientes se utiliza para formar combinaciones lineales de las señales recibidas, lo que permite recuperar los símbolos originales transmitidos.



Figura 2.40: Bloque que representa el decodificador de Alamouti. Fuente: Los Autores

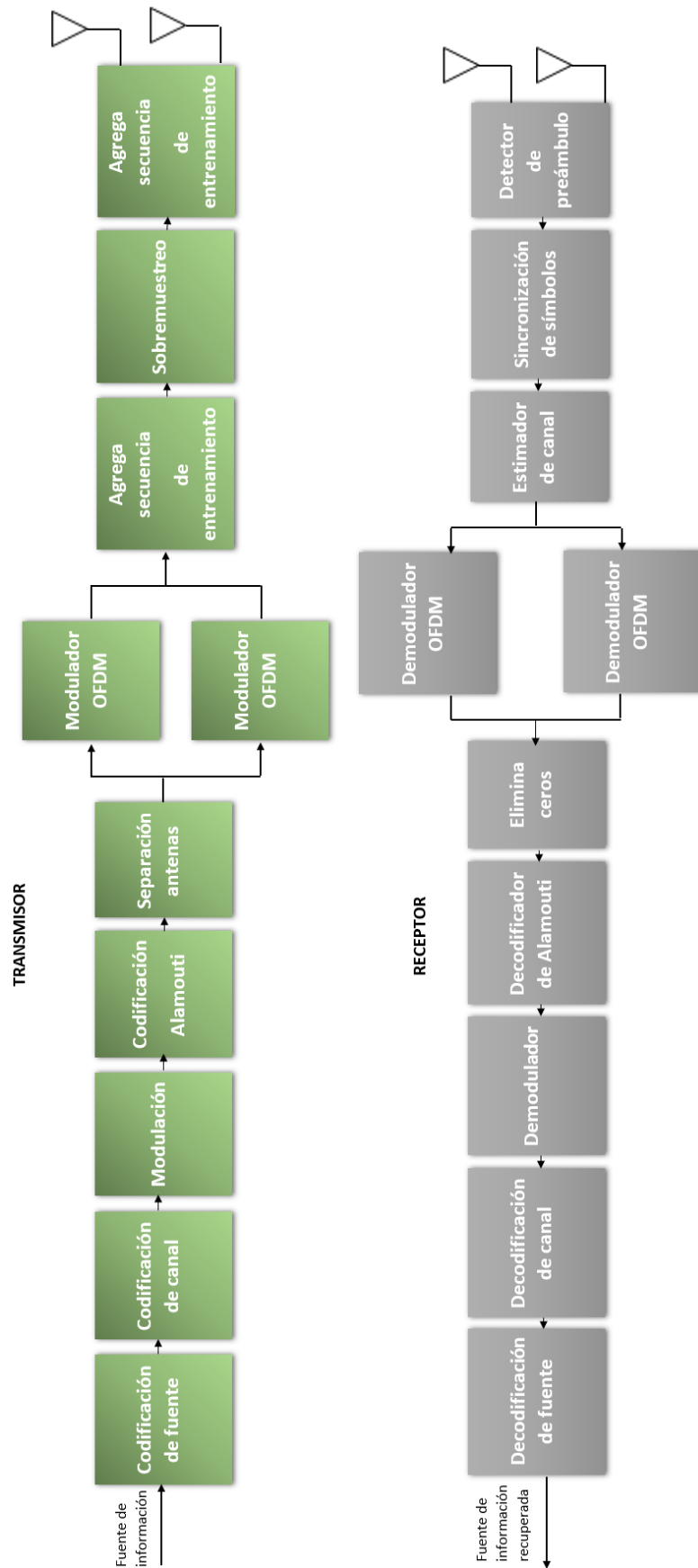


Figura 2.41: Diagrama de bloques completo del sistema MIMO 2×2 STBC Alamouti implementado con OFDM. Fuente: Los Autores

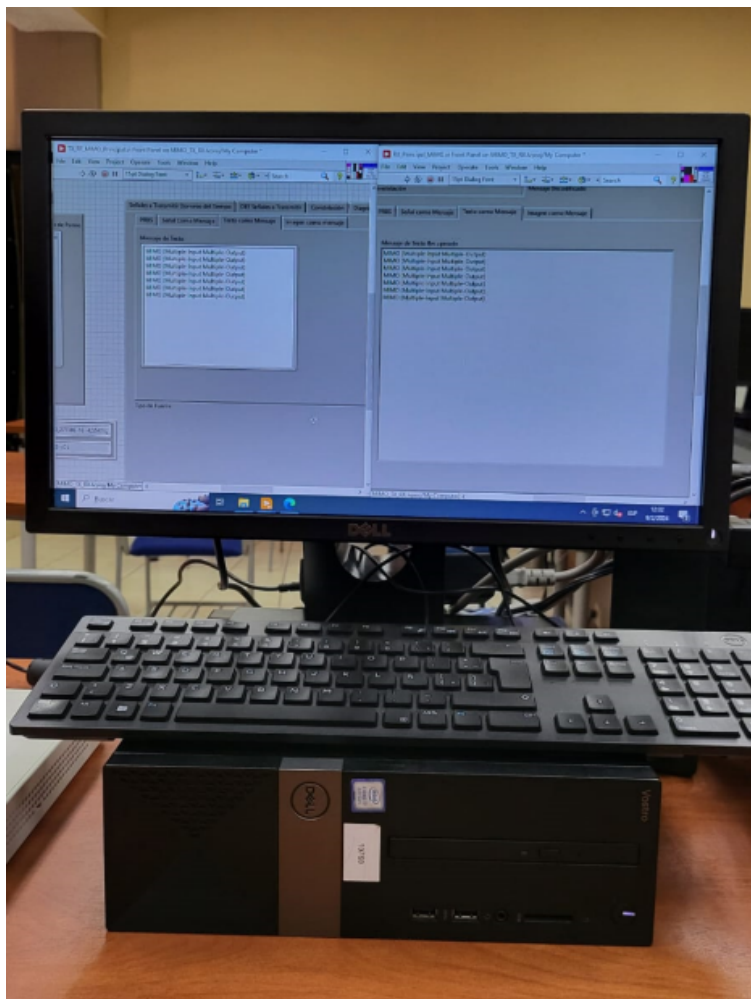


Figura 2.42: Sistema MIMO 2×2 STBC Alamouti implementado OFDM, utilizando los equipos SDR del laboratorio de Telecomunicaciones de la Sede Cuenca. Fuente: Los Autores

2.3. Implementación de un sistema MIMO transmisor D-BLAST

La figura 2.43 indica el diagrama de bloques del bloque de un sistema transmisor D-BLAST, el primer bloque del diagrama tenemos la codificación de fuente en el cual convertiremos la información a transmitir en bits las opciones que disponen son señal a bits, texto, imagen y secuencia PRBS. El segundo bloque es el encargado de la modulación del flujo de bits de los anteriores bloques se podrá elegir entre distintos tipos de modulaciones de los cuales solo se utilizará QAM y PSK, el tercer bloque

aplica la codificación espacial D-BLAST, El cuarto bloque es el encargado de añadir una secuencia de entrenamiento a cada flujo de símbolos.

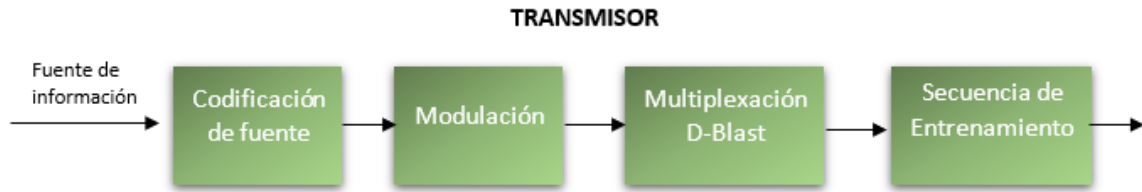


Figura 2.43: Diagrama de bloques sistema Transmisor D-Blast. Fuente: Los Autores

Multiplexor D-Blast

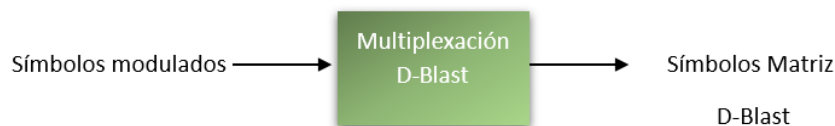


Figura 2.44: Bloque que representa la multiplexación D-Blast. Fuente: Los Autores

El bloque D-Blast implementa la estrategia de transmisión propuesta utilizando los símbolos ya modulados. Esta técnica distribuye los símbolos modulados de manera diagonal, representándolos en una matriz. Toma cada columna de los datos modulados y los dispone diagonalmente, tal como se ilustra en la figura 2.45.



Figura 2.45: Diagrama de bloque multiplexación D-Blast. Fuente: Los Autores

2.4. Equipos Utilizados

En relación con la implementación de los sistemas **MIMO** (múltiple entrada, múltiple salida) y **OFDM** (multiplexación por división de frecuencia ortogonal), se utilizaron varios dispositivos básicos. Estos dispositivos juegan un papel crucial en la exploración y la evolución de tecnologías inalámbricas de última generación.

Los principales dispositivos utilizados son LabVIEW y **USRP** ETTUS X310. LabVIEW, una herramienta de software de National Instruments, este permite simular, diseñar y construir sistemas de comunicación utilizando bloques programables. Por otro lado, el **USRP** ETTUS X310 ofrece la flexibilidad necesaria para la implementación eficiente de sistemas **MIMO** y **OFDM**, Gracias a su sofisticada infraestructura de hardware y su capacidad para adaptarse a diversas frecuencias y modalidades de interconexión.

Además, se utilizó una antena de doble banda VERT 2450, que proporciona 3 dBi de ganancia y cobertura en múltiples frecuencias y es adecuada para aplicaciones WLAN, Bluetooth, IEEE 802.11a/b/g/n y ZigBee. Estos equipos representan la infraestructura técnica clave que se utilizó para llevar a cabo la implementación de los sistemas mostrados en los apartados 2.1, 2.2 y 2.3. En la sección siguiente, se detallarán las características y el papel de cada uno de estos dispositivos.

2.4.1. LabVIEW

Es un software de simulación creado por National Instruments (NI), que facilita la simulación, planificación y construcción de sistemas de comunicación mediante el uso de bloques de programación. Su renombre se debe a su amplio conjunto de características y herramientas para manipular matemáticas, modulación y tratamiento de señales.

2.4.2. USRP ETTUS X310

La estructura de hardware **USRP** de Ettus Research integra dos ranuras de placa secundaria de gran ancho, abarcando desde la banda base de CC hasta 6 GHz a 160 MHz. También ofrece múltiples opciones de conectividad de alta velocidad (como

PCIe, 10 GigE dual, 1 GigE dual) y un Kintex grande programable por el usuario. Junto con su hardware de primera calidad, la arquitectura de código abierto del X310 permite la compatibilidad con controladores UHD multiplataforma, lo que le otorga adaptabilidad con varios marcos de desarrollo, arquitecturas de referencia y proyectos de código abierto [51].



Figura 2.46: USRP. Fuente: [51]

Características

- Xilinx Kintex-7 XC7K410T FPGA
- ADC de 14 bits y 200 MS/s
- DAC de 16 bits y 800 MS/s
- Rango de frecuencia: CC - 6 GHz con placa secundaria adecuada
- Hasta 160 MHz de ancho de banda por canal
- Dos ranuras de placa hija de RF de ancho de banda ancho
- GPS DO opcional
- Múltiples interfaces de alta velocidad (Dual 10G, PCIe Express, ExpressCard, Dual 1G)



Figura 2.47: Equipos USRP ETTUS X310 del laboratorio de Telecomunicaciones de la Sede Cuenca. Fuente: Los Autores

Panel Frontal

En la 2.48 se muestra el panel frontal de un USRP ETTUS X310.

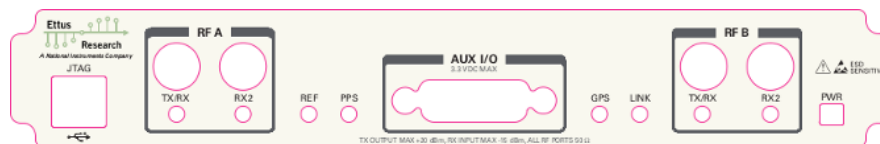


Figura 2.48: Panel frontal USRP. Fuente: [51]

JTAG: Conector USB para el programador USB-JTAG integrado.

Grupo RF A

LED TX/RX: Indica que los datos se están transmitiendo en el canal TX/RX en la placa secundaria A.

LED RX2: Indica que los datos se transmiten en el canal RX2 en la placa secundaria A.

E/S AUX: Conector GPIO del panel frontal.

PPS: Indica una señal PPS válida pulsando una vez por segundo.

REF: Indica que el Reloj de Referencia externo está bloqueado.

GPS: Indica que la referencia GPS está bloqueada.

ENLACE: Indica que la computadora host se está comunicando con el dispositivo (Actividad).

Grupo RF B

LED TX/RX: Indica que los datos se están transmitiendo en el canal TX/RX en la placa secundaria B.

LED RX2: Indica que los datos se transmiten en el canal RX2 en la placa secundaria B.

PWR: interruptor de encendido.

Panel Trasero

En la 2.49 se muestra el panel frontal de un USRP ETTUS X310.

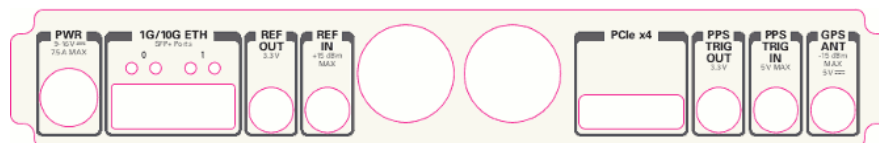


Figura 2.49: Panel Trasero USRP. Fuente: [51]

PWR: Conector para la fuente de alimentación de la serie USRP-X.

1G/10G ETH: Puertos SFP+ para interfaces Ethernet.

REF OUT: Puerto de salida para el reloj de referencia exportado.

REF IN: Entrada de reloj de referencia.

PCLe x4: Conector para enlace PCI Express por cable.

PPS/TRIG

OUT: Puerto de salida para la señal PPS.

GPS: Conexión para la antena GPS.

2.4.3. OctoClock

El OctoClock CDA-2990 es un dispositivo de distribución de reloj de ocho canales diseñado para sistemas **MIMO** con más de 2×2 antenas de transmisión y recepción. Su función principal es garantizar que todos los **USRPs** reciben el mismo reloj de referencia, lo que asegura la sincronización entre ellos y evita cualquier discrepancia de tiempo.



Figura 2.50: OctoClock CDA-2990. Fuente: [51]

El OctoClock facilita la creación de sistemas de múltiples canales sincronizados, utilizando una fuente de sincronización compartida. Puede recibir una señal de referencia de 10 MHz de una fuente externa, así como un pulso cada segundo 1(PPS, del inglés *Pulse Per Second*).

Modo de conexión para ampliar MIMO

Para entender de que manera se conecta el OctoClock para ampliar **MIMO** deberá entender la distribución del OctoClock indicada en la figura 2.51 , en la cual se enmarco con números las entradas y salidas del OctoClock. La entrada representada con el número "1" entrega la tarjeta de sincronismo por lo cual esta entrada coge el

reloj de 10 MHz, la entrada “3” toma el PPS de 1 Hz proveniente del USRP, la salida representada con el numero “2” proporciona los relojes de 10 MHz y de la salida “4” se proporciona los PPS de 1MHz proveniente del USRP, ambas salidas “2” y “4” distribuyen el reloj a todos los USRPs, para finalizar la salida “5” corresponde a la fuente de alimentación.

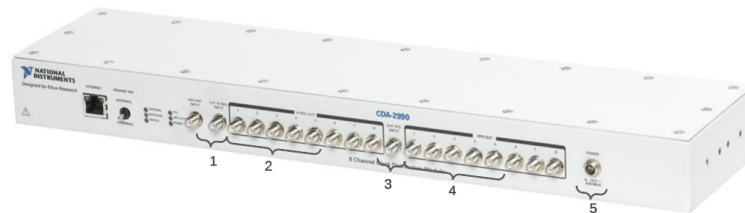


Figura 2.51: Distribución OctoClock CDA-2990. Fuente: Los Autores

En la figura 2.52 se puede observar el diagrama de conexión del OctoClock con los equipos USRP.

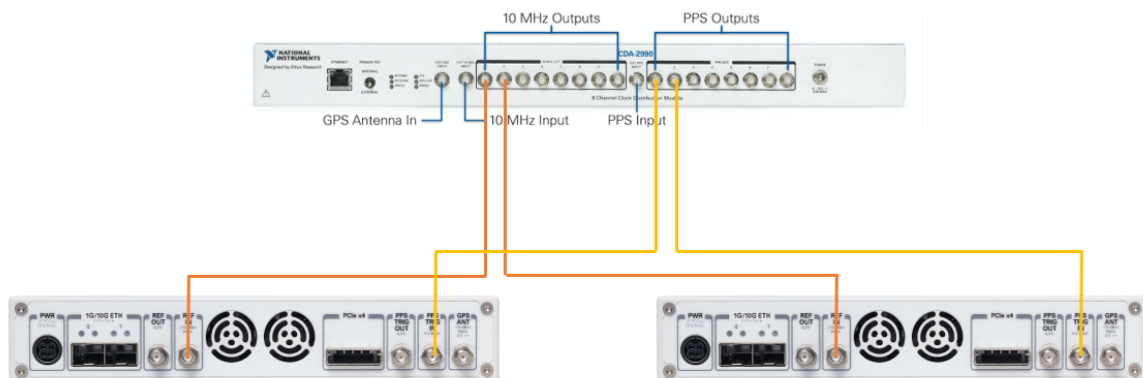


Figura 2.52: Diagrama de conexión OctoClock CDA-2990 para ampliar sistemas MIMO. Fuente: Los Autores

2.4.4. Antena Doble Banda VERT 2450

La antena VERT 2450 indicada en la figura 2.53 admite aplicaciones IEEE 802.11a/b/g/n, Bluetooth, WLAN y ZigBee y se puede utilizar para múltiples

aplicaciones de rango de frecuencia predefinido. Tiene un diseño multidireccional aceptable para transmisión multipunto, ganancia 3dBi, excelente transmisión y recepción entre gateways y dispositivos remotos en WLAN (Red de Área Local Inalámbrica). Puede cubrir frecuencias entre 2,4 GHz y 2,5 GHz, 4,9 GHz y 5,3 GHz y 5,7 GHz y 5,8 GHz, en la tabla 2.3 se muestran las características que poseen las antenas VERT 2450 [52].



Figura 2.53: Antena Doble Banda VERT 2450. Fuente: [51]

Tabla 2.3: Características Antena VERT 2450. Fuente[52]

Antena VERT 2450	Características
Ganancia	3 dBi
Frecuencia	2.4 a 2.48 GHz y 4.9 a 5.9 GHz
Impedancia	50 ohm
Ancho de haz horizontal	360
Polarizacion	Vertical

Capítulo 3

Manual de Prácticas

En el Capítulo 3 de este manual, se presentan una serie de prácticas diseñadas para que los estudiantes de la materia de redes inalámbricas adquieran experiencia práctica en diversos aspectos dentro del campo de redes inalámbricas que se encuentra en constante evolución. La primera práctica se centra en la implementación de un sistema **OFDM-SISO**) utilizando equipos (**SDR**). Esta práctica plantea a los estudiantes la oportunidad de familiarizarse con la tecnología **SDR** y comprender los principios básicos de la modulación **OFDM**.

La segunda práctica aborda el estudio de la Codificación Espacio-Temporal de Alamouti para una transmisión inalámbrica **MIMO**. Los estudiantes explorarán los conceptos de codificación espacial y temporal mediante simulaciones y análisis de datos. La tercera práctica se enfoca en la implementación de un sistema **MIMO** 2×2 con Alamouti en un entorno de pruebas real, utilizando el equipo **USRP X310** del laboratorio de Telecomunicaciones. Esta práctica permite a los estudiantes trabajar con hardware real y entender los desafíos prácticos asociados con la implementación de sistemas **MIMO STBC ALAMOUTI**.

La cuarta actividad implica llevar a cabo la configuración de un sistema **MIMO** 2×2 utilizando la codificación espacio-temporal de Alamouti y la técnica de Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (**OFDM**) en un entorno real de pruebas, utilizando el equipo **USRP X310** disponible en el laboratorio de Telecomunicaciones. El objetivo de esta práctica es que los estudiantes adquieran una comprensión más profunda sobre cómo combinar las técnicas de Alamouti y

OFDM para mejorar el rendimiento de los sistemas de comunicación inalámbrica.

Por último, la última actividad se enfoca en diseñar e implementar un Sistema D-Blast de 2 Antenas para Transmisión utilizando LabVIEW. En donde se plantea que los estudiantes aprendan a utilizar la herramienta LabVIEW para diseñar sistemas de comunicación avanzados y explorarán el concepto de transmisión D-Blast.

El propósito de este manual de ejercicios es brindar a los estudiantes la posibilidad de emplear los conceptos teóricos aprendidos en clase en situaciones prácticas del entorno real, preparándolos para enfrentar desafíos y contribuir al desarrollo continuo de las redes inalámbricas, este manual se desarrollo de acuerdo al formato de practicas de la Universidad Politécnica Salesiana, no se incluirá todas las carpetas de los programas ya que se evaluara a los estudiantes en torno a ellas. Todas las practicas están diseñadas específicamente para ser utilizadas con equipos de radio definido por software (SDR), lo que permite una mayor flexibilidad y control en el diseño y la simulación de sistemas de comunicaciones.

3.1. Implementación de un sistema OFDM-SISO



La presente práctica tiene como objetivo principal la implementación y evaluación de sistemas OFDM en un entorno simulado SISO, con el propósito de explorar sus capacidades y desafíos en el contexto de las comunicaciones inalámbricas.

Para lograr este objetivo, se han establecido objetivos específicos que buscan proporcionar al estudiante una comprensión integral de los fundamentos teóricos y prácticos de la técnica de OFDM, así como desarrollar habilidades prácticas en el diseño e implementación de sistemas de comunicaciones inalámbricas utilizando herramientas de software definido por radio (SDR).

Se planteo la evaluación del rendimiento del sistema mediante la medición de la tasa de error de bits (BER) con el fin de analizar la capacidad de recuperación de datos del sistema OFDM y su eficacia en la transmisión de información en condiciones realistas de canal.

Esta práctica se justifica en la importancia de proporcionar a los estudiantes una experiencia práctica significativa que les permita adquirir habilidades técnicas

relevantes y una comprensión profunda de los conceptos fundamentales de las comunicaciones inalámbricas, preparándolos así para enfrentar los desafíos del campo de las telecomunicaciones.

		FORMATO DE GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO / TALLERES / CENTROS DE SIMULACIÓN – PARA DOCENTES
CARRERA: TELECOMUNICACIONES		ASIGNATURA: COMUNICACIONES INALAMBRICAS
NRO. PRÁCTICA:	1	TÍTULO PRÁCTICA: Implementación de un sistema OFDM-SISO
OBJETIVO GENERAL: Implementar la multiplexación por división de frecuencias ortogonales OFDM para un escenario de simulación SISO OBJETIVOS ESPECÍFICOS: <ol style="list-style-type: none"> 1. Familiarizarse con los principios básicos de las comunicaciones inalámbricas y los desafíos asociados a OFDM. 2. Comprender los fundamentos teóricos de la Modulación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM). 3. Adquirir habilidades prácticas en el diseño e implementación de sistemas OFDM utilizando SDR bajo entorno de LabVIEW. 4. Analizar el rendimiento del sistema OFDM en términos de BER 		
INSTRUCCIONES	1. Estudie los siguientes conceptos y defina las características más importantes de cada uno <ol style="list-style-type: none"> a) Descripción del concepto de OFDM <ul style="list-style-type: none"> • Defina OFDM y explique su funcionamiento básico. • Detalle como OFDM divide el flujo de datos en múltiples subportadoras ortogonales. b) Tabla Comparativa de Ventajas y Desventajas de OFDM <ul style="list-style-type: none"> • Elabore una tabla que enumere las ventajas y desventajas de OFDM en comparación con otros esquemas de modulación. c) Aplicaciones de OFDM <ul style="list-style-type: none"> • Enumere y describa las diversas aplicaciones de OFDM en las comunicaciones inalámbricas, en los ejemplos de aplicaciones incluya Wi-Fi, LTE, 5G, DAB (Digital Audio Broadcasting), DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial). 	
	2. OFDM BAJO ENTORNO DE SIMULACION PARA UN CANAL AWGN, IDEAL, LTI SISO <p>2.1. Construcción modulador OFDM Construya el modulador OFDM</p> <p>Recibirá un archivo con el nombre "OFDM_SISO_practica1_Estudiante" dentro de este se encontrará el proyecto "OFDM_SISO", abra el proyecto ya mencionado encontrará la carpeta "Simulacion_MIMO_OFDM" y dentro de esta se encontrará el vi "SISO_OFDM_Simulador" dentro del diagrama de bloques ingresaremos al bloque de la Figura 1.</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;"><i>Figura 1 Sub VI modulador OFDM</i></p>	

Dentro de este bloque encontraremos los diversos diagramas de bloques que contiene el sub VI modulator OFDM como se indica en de la Figura 2.

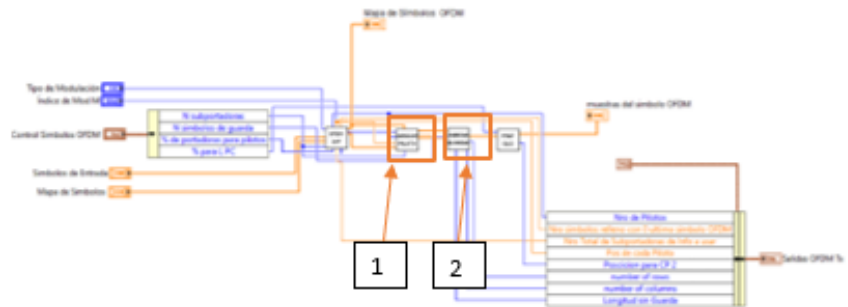


Figura 2 Sub VI contenidos en el modulator OFDM

Ingresa al sub VI 1 encerrado en la Figura 2, lo encontrara como se observa en la Figura 3.

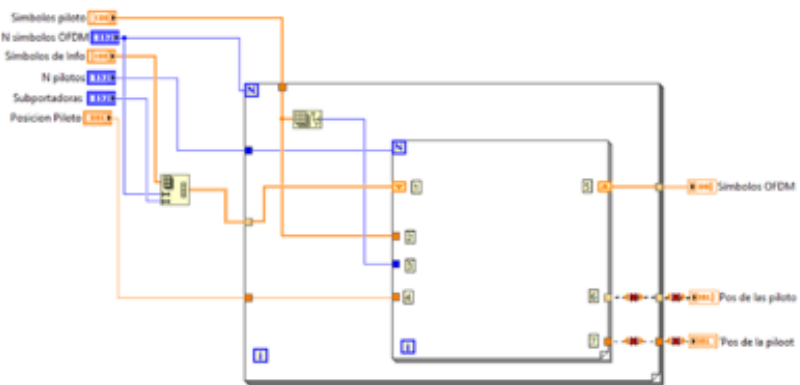


Figura 3 sub VI agregar pilotos

Construiremos la parte faltante dentro del ~~for loop~~ para agregar los símbolos pilotos al modulator OFDM. Los bloques que utilizaremos para la construcción se indican en la Tabla 1.

Tabla 1 Bloques a utilizar para sub VI agregar pilotos

<p>Insert into Array</p>
<p>Index Array</p>
<p>Quotient & Remainder</p>
<p>Multiply</p>
<p>Increment</p>

De la entrada 1 conectaremos a la primer entrada del bloque insert into Array, en la segunda entrada del bloque insert into array conectaremos la salida del bloque multiply, en la tercer entrada del bloque insert into Array conectaremos

la salida de index array y la salida de insert into array conectaremos a 5, la primer entrada de index array se conectara a 2 ,la segunda entrada a 3.La primer entrada del bloque multiply conectaremos a 4,la segunda entrada ira conectada a la salida del bloque increment,la entrada del bloque Increment ira conectada al índice i del bucle for y la salida 6 y 7 irán conectadas a la salida del bloque multiply.

Ahora se construirá el sub VI 2 de la Figura 2.

Se entregará un sub VI cómo se indica en la Figura 4.

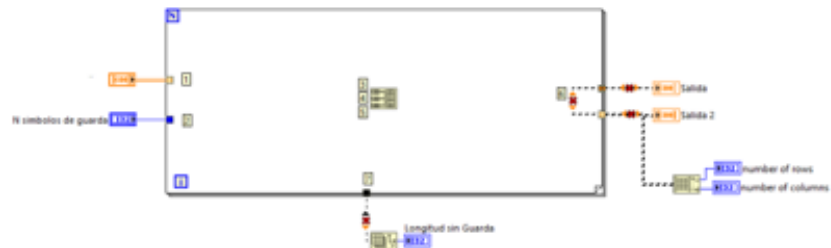


Figura 4 sub VI agregar símbolos de guarda

Los bloques que se utilizaran se indican en la Tabla 2.

Tabla 2 Bloques a utilizar para sub VI agregar símbolos de guarda

Initialize Array
Divide
Delete from Array
Inverse FFT Y la Complex

Para construir este bloque conectaremos 1 a 4 ,luego conectaremos 2 a la segunda entrada del bloque initialize array, en la primer entrada crearemos una constante de valor 0 y que sea representada en formato CDB, conectaremos la primer entrada de Divide a 2 y la segunda entrada creamos una constante con el valor de 0 que será representado en formato I32, conectaremos la salida del bloque initialize array a la primer entrada del bloque delete from array y la segunda entrada ira conectada a la salida del bloque divide ,la primer salida de delete from array ira conectada a 3 y la segunda salida a 5,conectaremos 4 a 7 ,añadiremos el bloque Inverse FFT y conectaremos la entrada a la salida de 3,4,5 y la salida del bloque Inverse FFT a 6

2.2. Construcción demodulador OFDM

Construya el demodulador OFDM en base a las siguientes instrucciones:

Ingresaremos al sub VI indicado en la Figura 5



Figura 5 sub VI Demodulador OFDM

Dentro de este bloque encontrara el siguiente diagrama de bloques que se observa en la Figura 6, una vez abierto el programa siga los pasos para completar el vi.

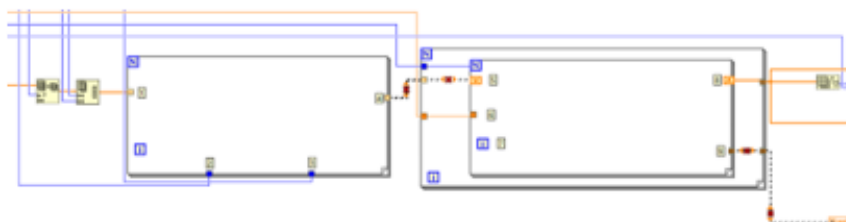


Figura 6 Diagrama de bloques contenido en el demodulador OFDM

Los bloques a utilizar se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3 Bloques a utilizar en el demodulador OFDM

FFT.vi
Divide
Array Subset
Increment
Multiply
Equal?
Subtract
Select
Delete From Array

En el primer bloque for loop colocaremos el bloque FFT la entrada ira conectada a 1 y la salida a la primera entrada del bloque Array subset, la segunda entrada a la salida del bloque Divide y la tercera entrada a 3, la primera entrada del bloque Divide conectaremos a 2 y la segunda a una constante de valor 2 por último, la salida del bloque Array subset ira conectado a 4.

En el segundo for loop la primer entrada del bloque Delete from array ira conectada a 5, la segunda entrada ira conectada a una constante de valor 1, la tercer entrada ira conectada a la salida del bloque Select, la primer entrada del bloque select ira conectado a la salida de multiply, la primer entrada del bloque multiply ira conectada a 6 y la segunda entrada a la salida del bloque Increment, la entrada del bloque increment ira conectada a 7, la segunda entrada del bloque Select ira conectado a la salida del bloque Equal?, la primer entrada del bloque Equal? Ira conectada a la salida del bloque multiply y la segunda entrada a 6, la tercer entrada ira conectada a la salida del bloque

Subtract, la primera entrada del bloque Subtract ira conectada a la salida del bloque Multiply, la segunda entrada ira conectada a 7, la primera salida del bloque Delete from Array ira conectado a 8 y la segunda salida a 9.

3. Consideraciones para usar el archivo principal de simulación

3.1. Diagrama de bloques del sistema

En la Figura 7 se presenta el diagrama de bloques que conforman el sistema SISO OFDM, a partir de aquello seguiremos las instrucciones para poder abrir y utilizar el simulador.



Figura 7 Diagrama de bloques completo sistema SISO OFDM

Ingrese dentro de la carpeta principal de simulación llamado "Programas_MIMO_Estudiantes Folder" como se indica en la Figura 8



Figura 8 practica 1

Dentro de este de doble clic en el proyecto principal con el nombre "Programas_MIMO_Estudiantes" como en indica enmarcado de rojo en la Figura 9.

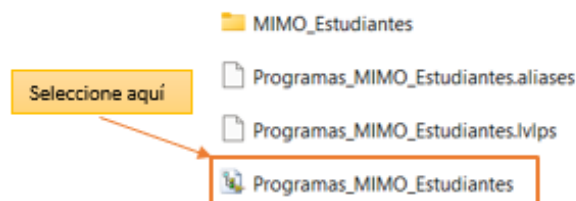


Figura 9 Instrucción abra el proyecto principal

Al abrir el proyecto principal lo llevará al simulador de LabVIEW y se abrirá la pestaña del proyecto principal, en la cual se encontrará con diferentes carpetas de simulación, para esta práctica se utilizará la carpeta con el nombre "1_Simulador_SISO_OFDM_Simulador" como se enmarca de rojo en la Figura 10.

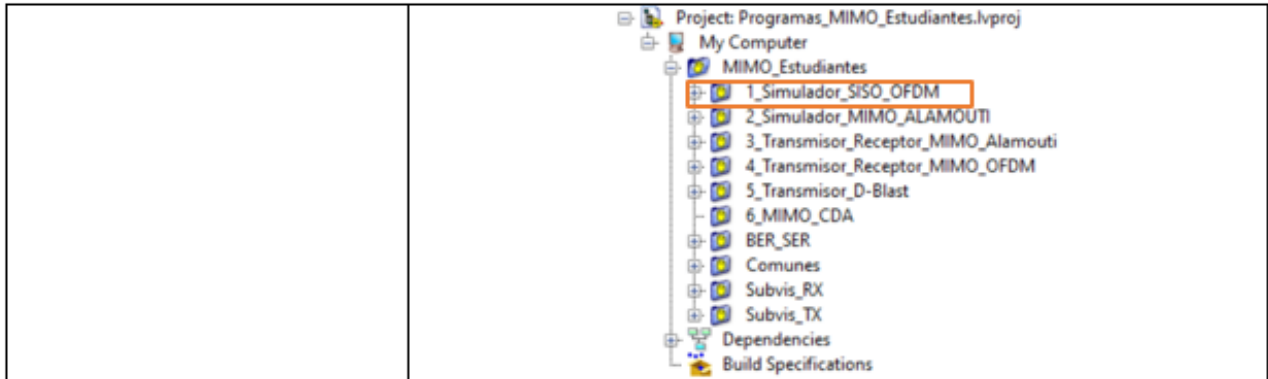


Figura 10 Pestaña proyecto principal

Al desplegarse las opciones de capetas del proyecto principal, deberá dar clic en la nombrada "1_Simulador_SISO_OFDM" como se indica enmarcado de rojo en la Figura 11, dentro de esta misma de clic en + y seleccione el VI SISO_OFDM_Simulador.vi como se muestra enmarcado de rojo en la Figura 12.

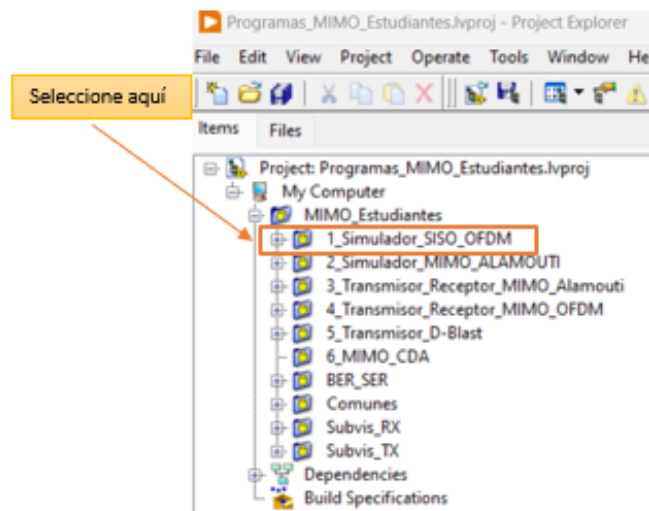


Figura 11 Seleccione la carpeta 1_Simulador_SISO_OFDM

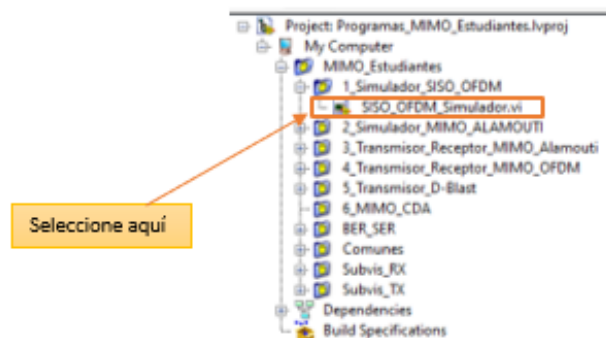


Figura 12 Seleccione el VI SISO_OFDM_Simulador.vi

Al seleccionar el VI de la Figura 12 finalmente se abrirá el simulador como se indica en la Figura 13

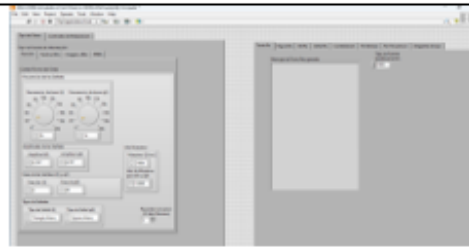


Figura 13 Simulador listo para utilizar

4. Evaluación del sistema

4.1. Configuraciones para evaluar el sistema

- **TRANSMISOR**

Dentro de la pestaña tipo de Datos en el transmisor seleccione como fuente de información "Texto a Bits" como se indica en la figura 1

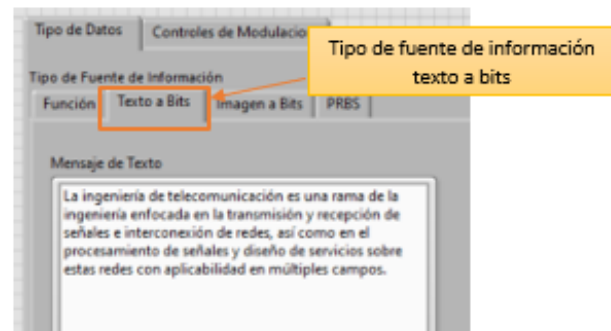


Figura 14 Configuración control "Tipo de Datos"

En la pestaña Controles de modulación ajuste los "controles de modulación" como se indica en la Figura 15, ajuste los "controles para símbolos OFDM" como se indica en la Figura 16, ajuste las configuraciones para los "controles del preámbulo" como se indica en la Figura 17 , ajuste las configuraciones para los "controles del canal" como se indica en la Figura 18, mientras que en la pestaña de indicadores "Salidas OFDM Tx" mostrada en la Figura 19 nos indica los resultados que obtenemos del proceso de modulación OFDM como lo son el número de pilotos utilizadas, la posición de inserción para cada piloto, la posición para el prefijo cíclico, entre otros indicadores.

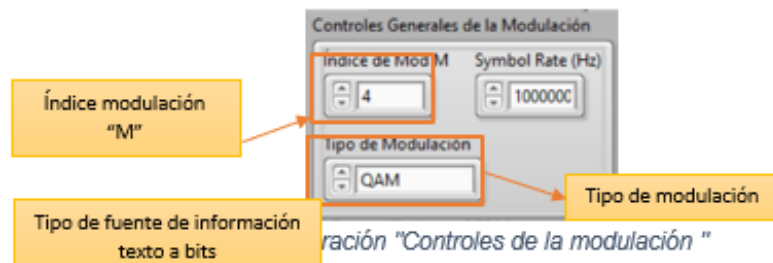


Figura 15 Configuración "Controles de la modulación "

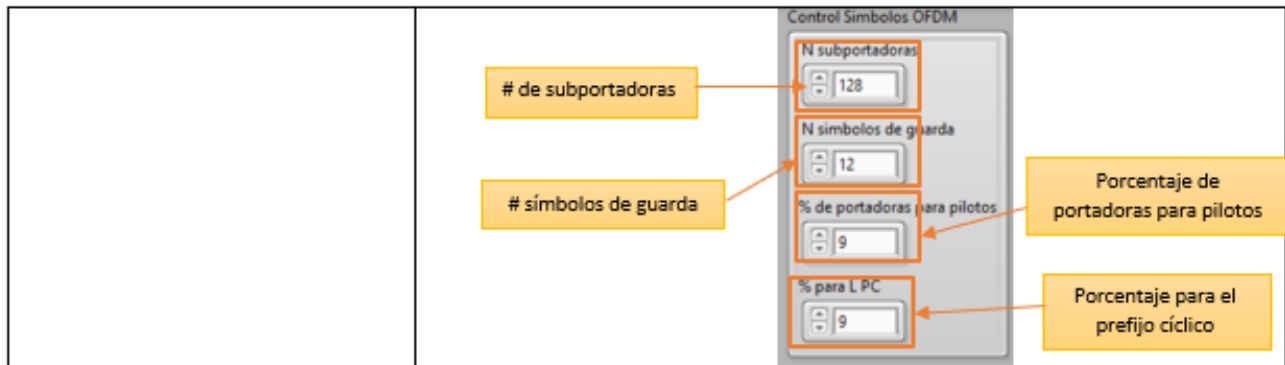


Figura 16 Configuración "Controles Símbolos OFDM"

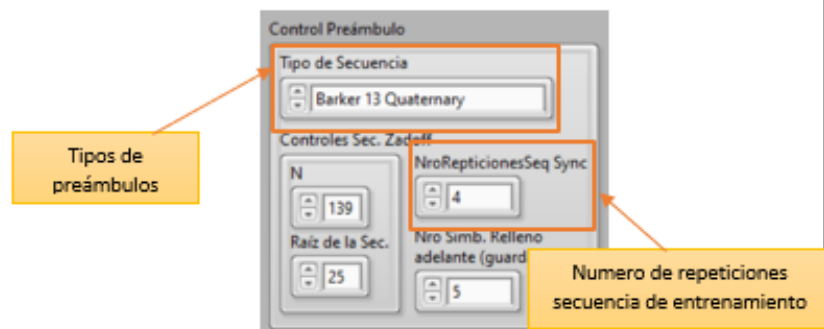


Figura 17 Configuraciones "Control preámbulo"

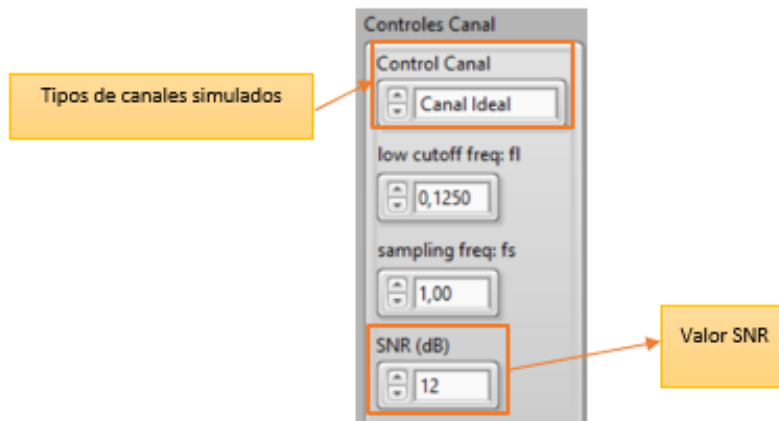


Figura 18 Configuraciones "Controles para el canal"

Figura 19 Indicadores Salidas OFDM

• RECEPTOR

Ingrese en la pestaña "Texto Rx" y seleccione el texto como información a recuperar como se indica en la Figura 20.

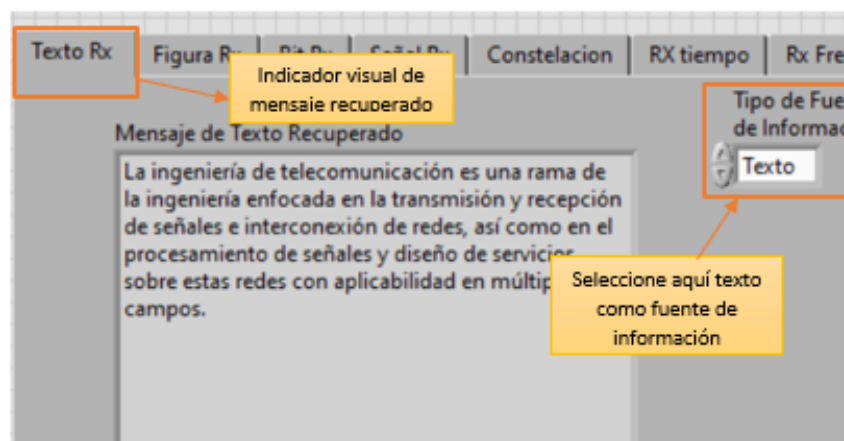


Figura 20 Configuraciones en el receptor

Dentro de los indicadores del receptor se incluyen las constelaciones transmitidas en las antenas t_{x1} y t_{x2} y las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2} , también podrá observar el diagrama de ojo transmitido y recibido también se puede evaluar la señal recibida en el tiempo y el espectro de la señal recibida, como se indica en la Figura 21.

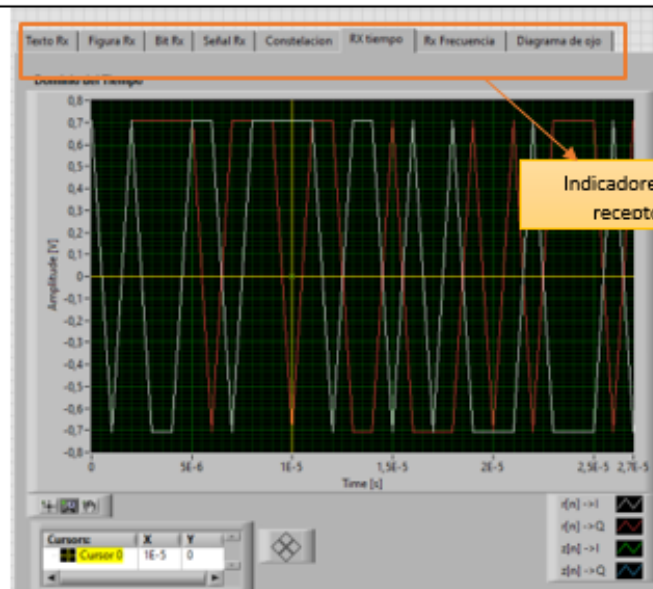


Figura 21 Indicadores en el receptor

4.2. Verificación del espectro

Analiza el espectro de la trama recibida para la cantidad de subportadoras indicadas más abajo. Puedes usar el analizador de espectros para el USRP.

- 64 subportadoras
- 128 subportadoras
- 256 subportadoras

4.3. Tabule y compare resultados

En base a las pruebas solicitadas en el punto 4.2 complete la Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6.

4.4. Evalúe el posicionamiento de los pilotos, símbolos de guarda y prefijo cíclico en un símbolo OFDM en base al punto 4.2

Mediante un gráfico muestre donde inserto los pilotos, los símbolos de guarda y el prefijo cíclico en un símbolo OFDM, indique un cuarto gráfico en donde usted indique como queda distribuido todo en conjunto en un símbolo OFDM. Responda: ¿Cuál es el propósito de agregar símbolos de guarda en un sistema OFDM y cómo afecta esto a la transmisión de datos? ¿Por qué es necesario agregar pilotos en un sistema OFDM y qué información proporcionan durante la transmisión? ¿Qué papel juega el prefijo cíclico en un símbolo OFDM y cómo contribuye a mitigar el efecto de la interferencia intersímbolo (ISI)?

4.5. Repita las configuraciones del punto 4.1 y evalúe su comportamiento para los diferentes tipos de canal simulados

Dentro de la pestaña controles de canal seleccione el tipo de canal como se indica en la Figura 18, deberá realizar las pruebas con el CANAL IDEAL, AWGN y LTI, deberá ajustar el valor de SNR a 5, 15, 24 y 35 como se indica en la figura 9 para simular condiciones de canal diferentes.

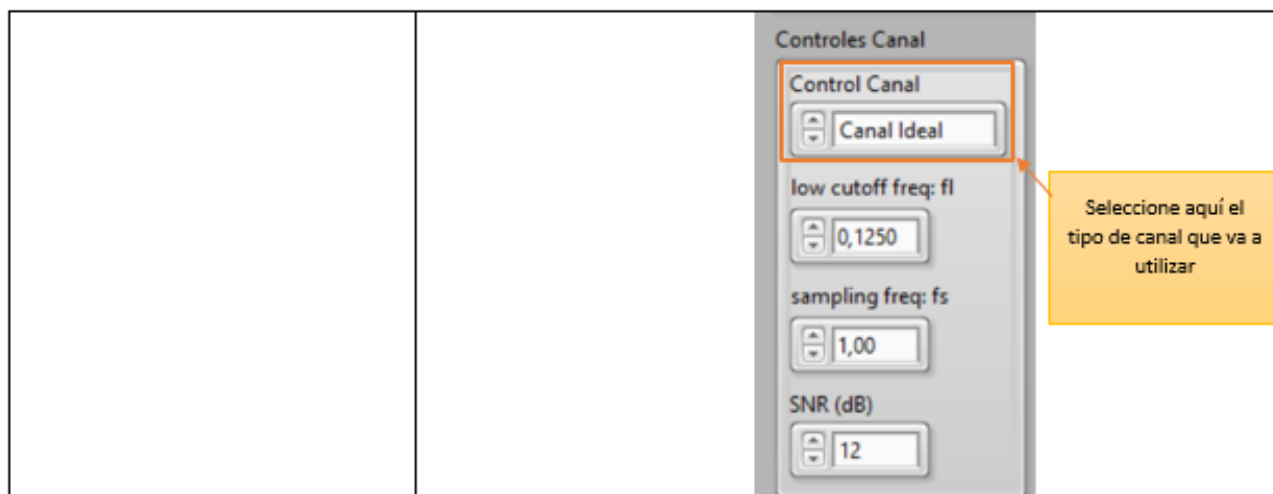


Figura 22 Editar Tipos de canal

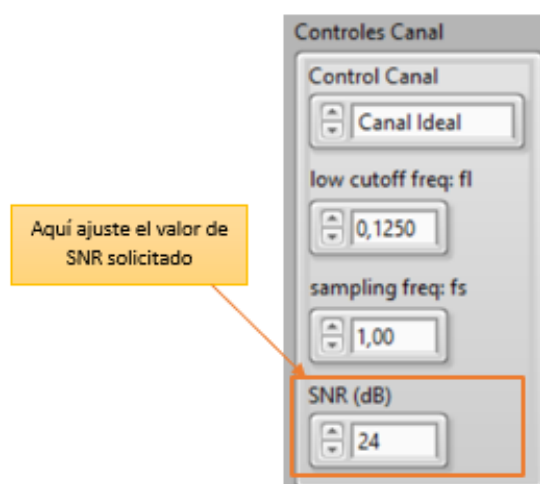


Figura 23 Editar valor SNR a lo solicitado

4.6. Tabule y compare resultados

En base al punto 4.3 complete la Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10 para el **Canal LTI**, la Tabla 11, Tabla 12, Tabla 13 y Tabla 14 para el **Canal Ideal** y la Tabla 15, Tabla 16, Tabla 17 y Tabla 18 para el **Canal AWGN**, compare los resultados con base a las gráficas del transmisor.

4.7. En base al punto 4.4 complete las siguientes preguntas

Responda: **CANAL IDEAL** ¿Qué diferencias observaste entre la señal transmitida y la recibida en el canal ideal? ¿Hubo alguna distorsión o pérdida de información durante la transmisión en el canal ideal? ¿Cómo afectaría la presencia de un canal no ideal a la calidad de la señal recibida? **CANAL AWGN** ¿Qué nivel de SNR se necesita para lograr que el mensaje transmitido sea igual al recibido en el sistema OFDM? **CANAL LTI** ¿Qué efecto tuvo la respuesta al impulso del canal en la señal recibida? ¿Cómo afectó la forma y la duración de la respuesta al impulso del canal a la calidad de la señal? ¿Qué conclusiones puedes sacar sobre la robustez del sistema OFDM frente a canales con diferentes características de respuesta al impulso?

4.8. Adecuar el sistema original para graficar la tasa de error de bit (BER)

Para este punto su simulador debe funcionar correctamente, una vez lo tenga implementado deberá modificar su programa tal cual como lo observa en la Figura 24.

En la carpeta "BER_SER" del proyecto tendrá los bloques encerrados



Figura 24 Adecuación del simulador para que halle el BER

Colocar una captura del sub VI con los cambios realizados para que halle el BER

4.9. Grafique el BER para las diferentes subportadoras

Para la evaluación del BER se deberá seguir la configuración mostrada en el punto 4.1, calcule el BER modificando el número de subportadoras a 64, 128 y 256.

4.10. Tabule y compare resultados del punto 4.9

Complete la tabla y compare los resultados. Responda: ¿Qué observo al variar el número de subportadoras en la evaluación del BER? ¿Hubo alguna tendencia específica en los resultados del BER al cambiar el número de subportadoras? ¿Identifico alguna subportadora que mostrara un mejor rendimiento en términos de BER en comparación con otras? ¿Cómo afectó la variación del número de subportadoras a la calidad general de la transmisión?

4.10. Reto

Implementa un sistema SISO OFDM que integre el esquema de acceso múltiple por división ortogonal de frecuencia (OFDMA). Diseña dos fuentes de información: una para transmitir texto y otra para transmitir formas de onda. Asigna las portadoras pares para la transmisión de información de texto y las portadoras impares para la transmisión de formas de onda. Asegúrate de que los datos sean correctamente modulados, transmitidos y demodulados en cada extremo del enlace de comunicación. Finalmente, evalúa el desempeño del sistema, analizando la calidad de la transmisión y la capacidad para manejar múltiples tipos de datos simultáneamente.

	5. Genere conclusiones y recomendaciones a partir del análisis de los resultados obtenidos.
--	--

ACTIVIDADES POR DESARROLLAR

1. MARCO TEORICO

De acuerdo con el punto 1 de la sección anterior, realice el marco teórico de cada uno de los ítems indicados.

- a. Descripción del concepto de OFDM
 - Defina OFDM y explique su funcionamiento básico.
 - Detalle como OFDM divide el flujo de datos en múltiples subportadoras ortogonales.
- b. Tabla Comparativa de Ventajas y Desventajas de OFDM
 - Elabore una tabla que enumere las ventajas y desventajas de OFDM en comparación con otros esquemas de modulación.
- c. Aplicaciones de OFDM
 - Enumere y describa las diversas aplicaciones de OFDM en las comunicaciones inalámbricas, en los ejemplos de aplicaciones incluya Wi-Fi, LTE, 5G, DAB (Digital Audio Broadcasting), DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial).

Puede guiarse de las siguientes fuentes bibliográficas (Barbecho Paute & Naváez Arias, 2024; Clerckx & Oestges, 2013; Heath, 2017; Paulraj et al., 2003; Yong et al., 2010).

2. EXPERIMENTACIÓN

2.1. Ajuste el sistema con las configuraciones del punto 4.1, realice las instrucciones del punto 4.2

Complete la tabla solicitada en el punto 4.3 y compare los resultados

Tabla 4 Prueba espectro recibido con 64 sub portadoras

Receptor	
Espectro señal recibida	Coloque aquí captura del espectro recibido
Número de subportadoras	Coloque aquí el número de subportadoras que utilizo

Tabla 5 Prueba espectro recibido con 128 subportadoras

Receptor	
Espectro señal recibida	Coloque aquí captura del espectro recibido
Número de subportadoras	Coloque aquí el número de subportadoras que utilizo

Tabla 6 Prueba espectro recibido con 256 subportadoras

Receptor	
Espectro señal recibida	Coloque aquí captura del espectro recibido
Número de subportadoras	Coloque aquí el número de subportadoras que utilizo

Comente si en alguno de los casos aumenta el espectro recibido, Explique porque se da aquello

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

2.2. En base a las pruebas realizadas en el punto 2.1 realice las instrucciones del punto 4.4

Coloque aquí grafico que indique en donde se están agregando los pilotos en un símbolo OFDM.

Coloque aquí grafico que indique en donde se están agregando los símbolos de guarda en un símbolo OFDM.

Coloque aquí grafico que indique en donde se están agregando el prefijo cíclico en un símbolo OFDM.

Coloque aquí grafico indicador de cómo se distribuyen en conjunto los pilotos, los símbolos de guarda, y el prefijo cíclico en un símbolo OFDM.

Responda

- ¿Cuál es el propósito de agregar símbolos de guarda en un sistema OFDM y cómo afecta esto a la transmisión de datos?
- ¿Por qué es necesario agregar pilotos en un sistema OFDM y qué información proporcionan durante la transmisión?
- ¿Qué papel juega el prefijo cíclico en un símbolo OFDM y cómo contribuye a mitigar el efecto de la interferencia intersímbolo (ISI)?

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

2.3. Con las configuraciones del punto 4.1, realice las pruebas solicitadas en el punto 4.5

Complete las tablas solicitadas en el punto 4.6 y compare los resultados con base a las gráficas del transmisor.

- **CANAL LTI**

Tabla 7 Pruebas con CANAL LTI, SNR=5

Canal LTI	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque una captura de la constelación transmitida	Coloque una captura de la constelación recibida
Diagrama de ojo	Coloque una captura del diagrama de ojo en la transmisión	Coloque una captura del diagrama de ojo en la recepción
Espectro señal recibida	Coloque una captura del espectro recibido	
Valor SNR	5	

Tabla 8 Pruebas con CANAL LTI, SNR=15

Canal LTI	Transmisor	Receptor
-----------	------------	----------

Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque una captura de la constelación transmitida	Coloque una captura de la constelación recibida
Diagrama de ojo	Coloque una captura del diagrama de ojo en la transmisión	Coloque una captura del diagrama de ojo en la recepción
Espectro señal recibida	Coloque una captura del espectro recibido	
Valor SNR	15	

Tabla 9 Pruebas con CANAL LTI, SNR=24

Canal LTI	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque una captura de la constelación transmitida	Coloque una captura de la constelación recibida
Diagrama de ojo	Coloque una captura del diagrama de ojo en la transmisión	Coloque una captura del diagrama de ojo en la recepción
Espectro señal recibida	Coloque una captura del espectro recibido	
Valor SNR	24	

Tabla 10 Pruebas con CANAL LTI, SNR=35

Canal LTI	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque una captura de la constelación transmitida	Coloque una captura de la constelación recibida
Diagrama de ojo	Coloque una captura del diagrama de ojo en la transmisión	Coloque una captura del diagrama de ojo en la recepción
Espectro señal recibida	Coloque una captura del espectro recibido	
Valor SNR	35	

- **CANAL IDEAL**

Tabla 11 Pruebas con CANAL IDEAL, SNR=5

Canal IDEAL	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque una captura de la constelación transmitida	Coloque una captura de la constelación recibida
Diagrama de ojo	Coloque una captura del diagrama de ojo en la transmisión	Coloque una captura del diagrama de ojo en la recepción
Espectro señal recibida	Coloque una captura del espectro recibido	

Valor SNR	5
-----------	---

Tabla 12 Pruebas con CANAL IDEAL, SNR=15

Canal IDEAL	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque una captura de la constelación transmitida	Coloque una captura de la constelación recibida
Diagrama de ojo	Coloque una captura del diagrama de ojo en la transmisión	Coloque una captura del diagrama de ojo en la recepción
Espectro señal recibida	Coloque una captura del espectro recibido	
Valor SNR	15	

Tabla 13 Pruebas con CANAL IDEAL, SNR=24

Canal IDEAL	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque una captura de la constelación transmitida	Coloque una captura de la constelación recibida
Diagrama de ojo	Coloque una captura del diagrama de ojo en la transmisión	Coloque una captura del diagrama de ojo en la recepción
Espectro señal recibida	Coloque una captura del espectro recibido	
Valor SNR	24	

Tabla 14 Pruebas con CANAL IDEAL, SNR=35

Canal IDEAL	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque una captura de la constelación transmitida	Coloque una captura de la constelación recibida
Diagrama de ojo	Coloque una captura del diagrama de ojo en la transmisión	Coloque una captura del diagrama de ojo en la recepción
Espectro señal recibida	Coloque una captura del espectro recibido	
Valor SNR	35	

- **CANAL AWGN**

Tabla 15 Pruebas con CANAL AWGN, SNR=5

Canal AWGN	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido

Constelación	Coloque una captura de la constelación transmitida	Coloque una captura de la constelación recibida
Diagrama de ojo	Coloque una captura del diagrama de ojo en la transmisión	Coloque una captura del diagrama de ojo en la recepción
Espectro señal recibida	Coloque una captura del espectro recibido	
Valor SNR	5	

Tabla 16 Pruebas con CANAL AWGN, SNR=15

Canal AWGN	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque una captura de la constelación transmitida	Coloque una captura de la constelación recibida
Diagrama de ojo	Coloque una captura del diagrama de ojo en la transmisión	Coloque una captura del diagrama de ojo en la recepción
Valor SNR	15	

Tabla 17 Pruebas con CANAL AWGN, SNR=24

Canal AWGN	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque una captura de la constelación transmitida	Coloque una captura de la constelación recibida
Diagrama de ojo	Coloque una captura del diagrama de ojo en la transmisión	Coloque una captura del diagrama de ojo en la recepción
Espectro señal recibida	Coloque una captura del espectro recibido	
Valor SNR	24	

Tabla 18 Pruebas con CANAL AWGN, SNR=35

Canal AWGN	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque una captura de la constelación transmitida	Coloque una captura de la constelación recibida
Diagrama de ojo	Coloque una captura del diagrama de ojo en la transmisión	Coloque una captura del diagrama de ojo en la recepción
Espectro señal recibida	Coloque una captura del espectro recibido	
Valor SNR	35	

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

2.4. En base a los resultados del punto 2.3 complete las instrucciones del punto 4.7

Responda:

CANAL LTI

- ¿Qué efecto tuvo la respuesta al impulso del canal en la señal recibida?
- ¿Cómo afectó la forma y la duración de la respuesta al impulso del canal a la calidad de la señal?
- ¿Qué conclusiones puedes sacar sobre la robustez del sistema OFDM frente a canales con diferentes características de respuesta al impulso?

CANAL IDEAL

- ¿Qué diferencias observaste entre la señal transmitida y la recibida en el canal ideal?
- ¿Hubo alguna distorsión o pérdida de información durante la transmisión en el canal ideal?
- ¿Cómo afectaría la presencia de un canal no ideal a la calidad de la señal recibida?

CANAL AWGN

- ¿Qué nivel de SNR se necesita para lograr una BER aceptable en el sistema OFDM?

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

2.5. Siga las instrucciones del punto 4.8 y adecue el sistema original para que calcule el BER

Coloque aquí una captura de los cambios realizados en el sistema original

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

2.6. En base al desarrollo del punto 4.8, realice lo solicitado en el punto 4.9 y 4.10

Complete las tablas y compare los resultados

Tabla 19 Calculo del BER con diferentes subportadoras

	Grafica del BER	Valor del SNR
64 subportadoras	Coloque aquí grafica del BER con 64 subportadoras	Ingrese aquí valor del SNR
128 subportadoras	Coloque aquí grafica del BER con 128 subportadoras	Ingrese aquí valor del SNR
256 subportadoras	Coloque aquí grafica del BER con 256 subportadoras	Ingrese aquí valor del SNR

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

2.7. Realice el reto base a las instrucciones del punto 4.13

Indique aquí los cambios que realizo en el programa original para lograr lo solicitado en la instrucción 4.8

Comente cual fue su solución para lograr cumplir el reto


<p>Análisis de Resultados de la sección: Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección</p>	
<p>CONCLUSIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 	
<p>RECOMENDACIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 	
<p>REFERENCIAS</p> <p>Barbecho Paute, P. A., & Narváez Arias, D. L. (2024). <i>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA TUTOR [DEGREE THESIS]</i>. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.</p> <p>Clerckx, B., & Oestges, C. (2013). <i>MIMO Wireless Networks</i> (Academic Press is an imprint of Elsevier, Ed.; Second).</p> <p>Heath, R. (2017). <i>Introduction to Wireless Digital Communication</i>.</p> <p>Paulraj, Arogyaswami, Nabar, Rohit, & Gore, Dhananjay. (2003). <i>Introduction to space-time wireless communications</i>. Cambridge University Press.</p> <p>Yong, S. C., Jaekwon, K., Won, Y. Y., & Chung-Gu, K. (2010). <i>MIMO-OFDM WIRELESS COMMUNICATIONS WITH MATLAB 0</i>. IEEE PRESS.</p>	
<p>Autor1:</p>	<p>Autor2:</p>
<p>Autor3:</p>	<p>Autor4:</p>

3.2. Estudio de la Codificación Espacio-Temporal de Alamouti

La segunda práctica tiene como objetivo central el estudio y la implementación de la codificación espacio-temporal de Alamouti en el contexto de sistemas de comunicación inalámbrica **MIMO**. La codificación de Alamouti es una técnica ampliamente utilizada para mejorar la confiabilidad de la transmisión en sistemas **MIMO** al aprovechar la diversidad espacial.

Con este propósito en mente, se han establecido objetivos específicos que abordan aspectos clave de la implementación y comprensión de la codificación Alamouti. Estos incluyen el entendimiento de los principios fundamentales de la codificación espacio-temporal, la familiarización con los conceptos básicos de los canales **MIMO** y la implementación práctica de la técnica de Alamouti en el entorno de programación LabVIEW.

A través de esta práctica, los estudiantes tendrán la oportunidad de explorar y documentar cada fase del proceso de transmisión de datos, lo que les permitirá adquirir habilidades prácticas y teóricas en el ámbito de la codificación espacio-temporal y los sistemas **MIMO**.

		FORMATO DE GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO / TALLERES / CENTROS DE SIMULACIÓN – PARA DOCENTES
CARRERA: TELECOMUNICACIONES		ASIGNATURA: COMUNICACIONES INALAMBRICAS
NRO. PRÁCTICA:	2	TÍTULO PRÁCTICA: Estudio de la Codificación Espacio-Temporal de Alamouti para una transmisión inalámbrica MIMO
OBJETIVO GENERAL: Estudiar la Codificación Espacio-Temporal de Alamouti para una transmisión inalámbrica MIMO OBJETIVOS ESPECÍFICOS: <ol style="list-style-type: none"> 1. Comprender los principios básicos de la codificación y decodificación espacio-temporal (STBC) de Alamouti. 2. Familiarizarse con los conceptos básicos de canales de comunicaciones inalámbricas MIMO. 3. Implementar en LABVIEW una función que use la técnica de codificación Alamouti. 4. Documentar y describir cada una de las fases del proceso de transmisión de datos. 		
INSTRUCCIONES	1. Estudie los siguientes conceptos y defina las características más importantes de cada uno <ol style="list-style-type: none"> a) MIMO <ul style="list-style-type: none"> • Especifique cuales son los coeficientes de canal en una transmisión MIMO $N_t \times N_r$, siendo N_t el número de antenas de transmisión y N_r el número de antenas de recepción • Indique cuales son las ventajas y desventajas de utilizar múltiples antenas en la transmisión y recepción. b) Diversidad <ul style="list-style-type: none"> • Diversidad Espacial • Diversidad Temporal • Realice una tabla comparativa con las ventajas y desventajas que presentan cada una de ellas. c) Codificación espacio – temporal Alamouti <ul style="list-style-type: none"> • Identifique cuál es la matriz de codificación de Alamouti. • Escriba la ecuación de las señales recibidas para un canal MIMO. • Identifica las limitaciones en las dimensiones de un bloque de codificación espacio-temporal de Alamouti • Mencione cuales son las ventajas y desventajas de utilizar la codificación espacio – temporal de Alamouti. 	
	2. STBC Alamouti bajo entorno de simulación para un canal AWGN MIMO <ol style="list-style-type: none"> 2.1. Construcción Codificador de Alamouti Construya la matriz de codificación Alamouti en base a las siguientes instrucciones: 	

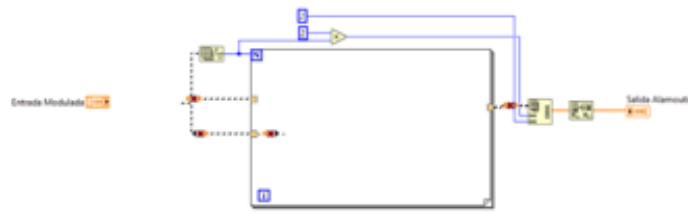


Figura 1 codificador de Alamouti por completar

Usaremos el bloque Decimate 1D Array mostrado en la Figura 2 el cual dividirá el vector de entrada intercaladamente en 2 nuevos vectores así tomaremos los símbolos para armar la matriz de la codificación de Alamouti.

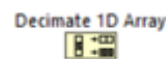


Figura 2 Bloque Decimate 1D Array

Usaremos un for loop el cual tendrá las entradas indexadas que enumeraremos como 1 y 2 mostrado en la Figura 3, estas estarán conectadas a las salidas del bloque Decimate 1D Array.



Figura 3 Sub VI codificador de Alamouti ~~incompleto~~

Dentro del for loop colocaremos los bloques mostrados en la

Tabla 1 Bloques utilizados para el codificador de Alamouti

Vi	Cantidad de veces
Build Array 	3
Complex Conjugate 	2
Negate 	1

Conectaremos el primer bloque Build Array a las entradas indexadas 1 y 2, en la entrada 2 conectaremos el bloque Negate y Complex Conjugate, en la entrada 1 conectaremos el bloque complex conjugate al final obtendremos 2 salidas estas 2 salidas irán conectadas a el bloque Build array y la salida de esta ira conectada en conjunto al primer bloque Build Array de las entradas indexadas a un tercer Build Array que ira conectada a la salida del for loop.

2.2. Construcción Canal MIMO 2x2

Identifique como simula el canal MIMO 2x2 y construya los coeficientes del canal a partir de las siguientes instrucciones

Se entregará el VI _____ el cual se encontrará de la siguiente manera como se muestra en la Figura 4

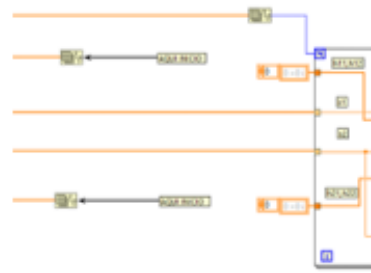




Figura 4 sub VI Canal MIMO incompleto

Los bloques a ocupar para el Canal MIMO se indican en la Tabla 2

Tabla 2 Bloques a utilizar en el Canal MIMO

vi	Cantidad
Gaussian White Noise.vi 	4
Re/Im To Complex 	2

Colocaremos 2 bloques de Gaussian White Noise que en la entrada Samples ira conectado como se indica en la Figura 4, en la entrada del bloque Standard deviaton colocaremos una constante con el valor de 0,67 que es un valor que se obtuvo en varias simulaciones del canal en Matlab, la salida de los bloques irán conectados a el bloque Re/Im To Complex ya que tenemos que afectar con ruido tanto a la parte real e imaginaria, eliminaremos las constantes de las la entrada del for loop h_{11} y h_{12} y conectaremos las salida del vi Re/Im To Complex , repetiremos los mismos pasos para la entrada h_{21} y h_{22} .

2.3. Construcción Decodificador Alamouti

Analice como se construye el decodificador a partir de las siguientes instrucciones

Se le entregará el VI indicado en la Figura 5

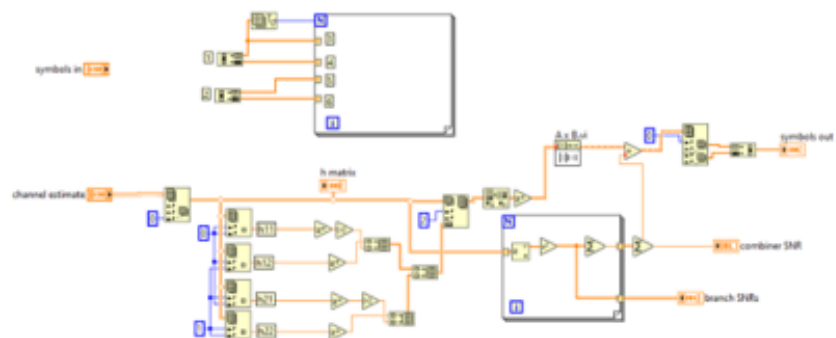
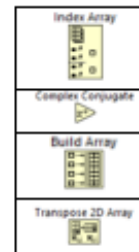


Figura 5 sub VI Decodificador de Alamouti incompleto

Los bloques necesarios se indican en la Tabla 3

Tabla 3 Bloques necesarios para completar el Decodificador de Alamouti



Colocaremos el bloque Index Array la primer entrada ira conectada a symbols in, la segunda entrada tendrá una constante de valor 2, la primer salida a 1 y la segunda salida conectaremos a 2, conectaremos 3 a la primer entrada de Build Array, la segunda entrada del bloque build array a 5, la tercer entrada será conectada a la salida de un primer bloque Complex Conjugate y la entrada de este ira conectada a 4, la cuarta entrada del bloque Build Array, colocaremos el bloque Transponse 2D array a la salida del bloque for loop, conectaremos la entrada de este a la salida del bloque Build array y la salida del bloque Transponse 2D array a la segunda entrada del bloque AxB.vi.

3. Consideraciones para usar el archivo principal de simulación

3.1. Diagrama de bloques del sistema

En la Figura 6 se presenta el diagrama de bloques que conforman el sistema MIMO 2x2 STBC Alamouti, a partir de aquello seguiremos las instrucciones para poder abrir y utilizar el simulador.

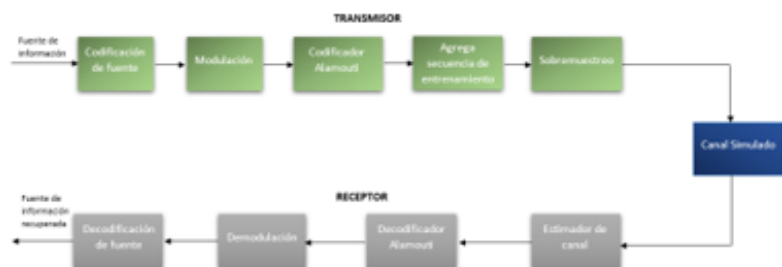


Figura 6 Diagrama de bloques sistema MIMO 2x2 STBC Alamouti

Ingrese dentro de la carpeta del proyecto nombrado "Programas_MIMO_Estudiantes Folder" como se indica en la Figura 7.



Figura 7 practica 2

Dentro de este de doble clic en el proyecto principal con el nombre "Programas_MIMO_Estudiantes" como en indica enmarcado de rojo en la Figura 8.

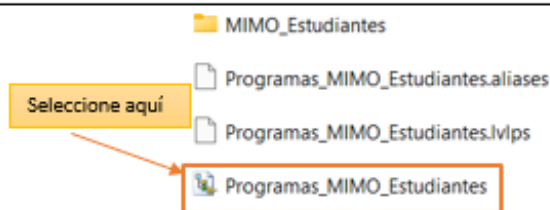


Figura 8 Instrucción abra el proyecto principal

Al abrir el proyecto principal lo llevará al simulador de LabVIEW y se abrirá la pestaña del proyecto principal, deberá dar clic encima del signo + al lado del nombre "2_Simulador_MIMO_ALAMOUTI" como se enmarca de rojo en la Figura 9.

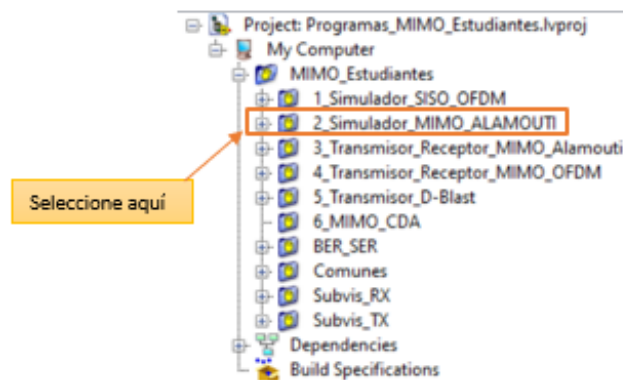


Figura 9 Pestaña proyecto principal

Al desplegarse las opciones de capetas del proyecto, deberá dar clic en el VI nombrado "Simulador_Alamouti_TX_RX_V1.vi" como se indica enmarcado de rojo en la Figura 10

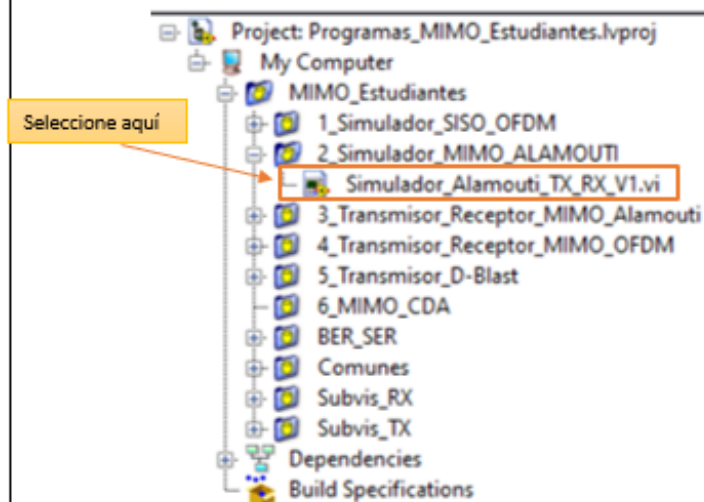


Figura 10 Seleccione el VI Simulador_Alamouti_TX_RX_V1.vi

Al seleccionar el VI de la Figura 10 finalmente se abrirá el simulador como se indica en la Figura 11

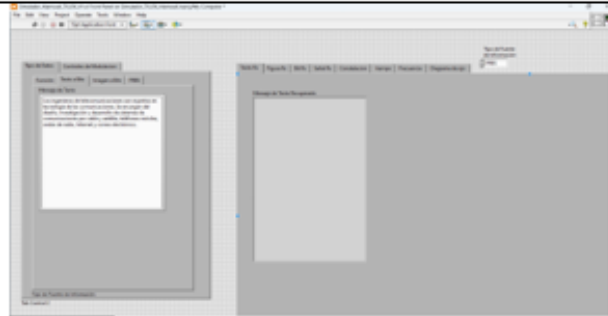


Figura 11 Simulador listo para utilizar

4. Evaluación del sistema

4.1. Configuraciones para evaluar el sistema

- **TRANSMISOR**

Ingrese a la pestaña Tipo de Datos y seleccione "Texto a Bits" como fuente de información a enviar como se muestra en la Figura 12.

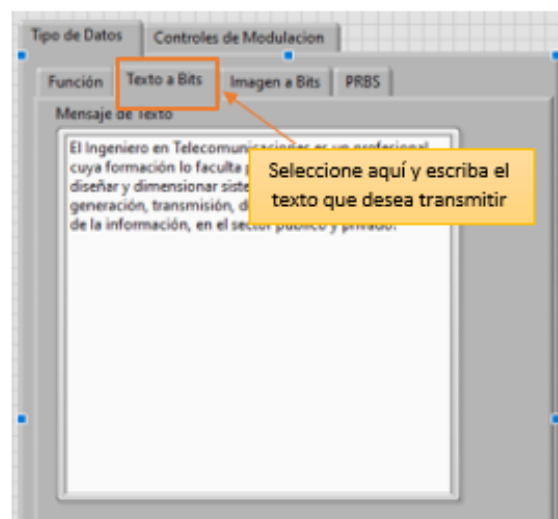


Figura 12 Configuración fuente de información a transmitir

Posteriormente seleccione la pestaña nombrada controles de modulación, dentro de esta deberá ajustar los "Controles generales de la modulación" como se indica en la Figura 13, también se deberá ajustar la cantidad de "bits/símbolo", el valor del "SNR" y la "Channel Length Estimate" como se indica en la Figura 14, por último se debe configurar los "controles de preámbulo" como se indica en la figura Figura 15, el resultado deberá verse como se muestra en la Figura 16.

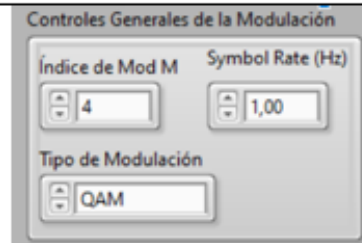


Figura 13 Configuración controles generales de modulación

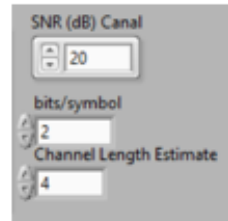


Figura 14 Configuraciones transmisor

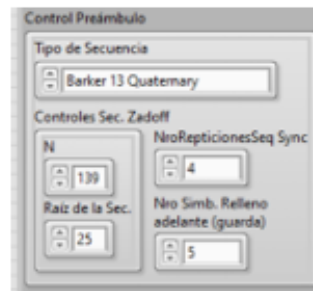


Figura 15 Configuraciones tipos de preambulo

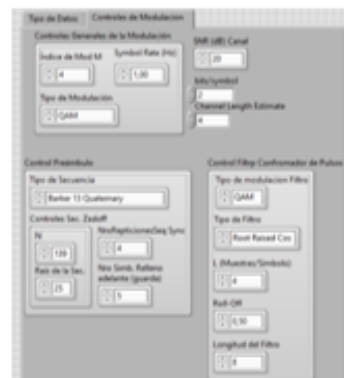


Figura 16 Ajustes generales sistema transmisor

- RECEPTOR

Ingrese a la pestaña Datos recibidos y en el control “**Tipo de Fuente de Información**” selecciones texto, dentro de esta ventana se visualizará el mensaje recuperado, las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2} y las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2} , el diagrama de ojo transmitido y recibido como se indica en la Figura 17.

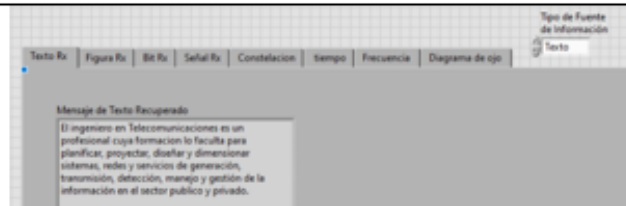


Figura 17 Indicadores de fuente de información recuperada

4.2. Verificación de recuperación de mensaje

Analice si el texto recuperado es igual al mensaje transmitido originalmente, para los diferentes valores de SNR mostrados más abajo.

- 5
- 10
- 20
- 30
- 35

(Nota: Realice las pruebas con el preámbulo indicado en las configuraciones 4.1)

4.3. Tabule y compare resultados

En base a las pruebas solicitadas en el punto 4.2 complete la Tabla 4, Tabla 5, Tabla 6, Tabla 7 y Tabla 8 y compare los resultados con base a las gráficas del transmisor

4.4. En base a los resultados del punto 4.2 complete las siguientes preguntas.

Responda: ¿Qué observaste al comparar el texto recuperado con el mensaje original para cada valor de SNR? ¿Hubo algún valor de SNR que produjo una recuperación del mensaje más precisa y fiable en comparación con otros valores? ¿Consideras que hay un umbral de SNR a partir del cual la recuperación del mensaje se vuelve más confiable y menos propensa a errores?

4.5. Repita el punto 4.2 evaluándolo para diferentes tipos de preámbulo

Analice si el texto recuperado es igual al mensaje transmitido originalmente, para los diferentes tipos de preámbulo que se indican más abajo

- Zadoff-Chu
- Barker 11 binaria
- Barker 13 binaria
- Barker 11 Cuaternaria
- Barker 13 Cuaternaria
- Frank 16

4.6. Tabule y compare resultados

En base a las pruebas solicitadas en el punto 4.5 complete la Tabla 9, Tabla 10, Tabla 11, Tabla 12, Tabla 13 y Tabla 14, compare los resultados con base a las gráficas del transmisor

4.7. En base a los resultados del punto 4.2 complete las siguientes preguntas.

Responda: ¿Cómo cree que la elección del preámbulo puede influir en la capacidad del receptor para decodificar correctamente

los símbolos transmitidos en un sistema MIMO 2x2 con codificación de Alamouti?
 ¿Qué aspectos de la codificación de Alamouti podrían afectar la efectividad de los diferentes tipos de preámbulos en la recuperación del mensaje original?
 ¿Cree que ciertos preámbulos podrían ser más compatibles o complementarios con la técnica de codificación de Alamouti? Explique ¿Por qué?, ¿Qué implicaciones tiene la elección del preámbulo en la detección de la señal y la separación de los símbolos transmitidos en un sistema MIMO 2x2 con codificación de Alamouti? ¿Hay alguna relación entre la longitud o complejidad del preámbulo y su capacidad para ayudar al receptor a sincronizarse y decodificar los símbolos en un sistema MIMO 2x2 con codificación de Alamouti?

4.8. Adecuar el sistema original para graficar la tasa de error de bit (BER)

Para este punto su simulador debe funcionar correctamente, una vez lo tenga implementado deberá modificar su programa tal cual como lo observa en la Figura 18.

En la carpeta "BER_SER" del proyecto tendrá los bloques encerrados



Figura 18 Adecuación del simulador para que halle el BER

Colocar una captura del sub VI con los cambios realizados para que halle el BER

4.9. Repita el punto 4.5 y evalúe el SER

Grafique el BER para cada uno de los preámbulos indicados en el punto 4.5 e indique el valor del SNR. Agregue una captura de la gráfica del BER obtenida para cada uno de los valores de SNR mencionados y compare los resultados.

4.10. En base a los resultados obtenidos en el punto 4.9, responda las siguientes preguntas

Responda: ¿Hubo algún preámbulo que mostrara una mejora significativa en el rendimiento del sistema en términos de BER a medida que aumentaba el SNR? ¿Pudo identificar algún patrón o tendencia común en la relación entre el tipo de preámbulo y el BER en función del SNR? ¿Considera que ciertos preámbulos son más efectivos que otros para mejorar la calidad de la comunicación en condiciones de baja y alta relación señal-ruido? ¿Cómo podría utilizar estos resultados para optimizar la configuración del sistema y mejorar su capacidad para recuperar correctamente el mensaje transmitido en un sistema MIMO 2x2 con codificación de Alamouti? ¿Cree que la

	<p>elección del preámbulo podría afectar la capacidad del sistema para aprovechar la diversidad espacial proporcionada por la codificación de Alamouti? ¿Por qué?</p> <p>4.11. Reto Modifique el programa existente para que sea completamente automatizado y tenga la capacidad de configurar un sistema MIMO con un número variable de antenas de recepción, permitiendo al usuario especificar la cantidad deseada de antenas receptoras en lugar de estar limitado a un sistema MIMO 2X2 con Alamouti. Esta tarea requerirá una comprensión profunda de los principios fundamentales de la comunicación MIMO, así como habilidades avanzadas de programación. Su objetivo será diseñar e implementar una solución que permita una configuración flexible y dinámica del sistema, lo que aumentará su versatilidad y capacidad de adaptación a una variedad de escenarios de comunicación.</p>
	<p>5. Genere conclusiones y recomendaciones a partir del análisis de los resultados obtenidos.</p>

ACTIVIDADES POR DESARROLLAR

1. MARCO TEORICO

De acuerdo con el punto 1 de la sección anterior, realice el marco teórico de cada uno de los ítems indicados. Además, incluya información sobre las modulaciones del tipo M-QAM y sus constelaciones.

- a. Comunicaciones MIMO
 - Especifique cual es la matriz para un canal MIMO
- b. Diversidad
 - Diversidad Espacial
 - Diversidad Temporal
 - Realice una tabla comparativa con las ventajas y desventajas que presentan cada una de ellas.
- c. Codificación espacio – temporal Alamouti
 - Identifique cual es la matriz de codificación de Alamouti.
 - Indique matemáticamente como se obtienen los símbolos recibidos.
 - Mencione cuales son las ventajas y desventajas se presentan al utilizar la codificación espacio – temporal de Alamouti.

Puede utilizar las siguientes fuentes bibliográficas ([Barbecho Paute & Narváez Arias, 2024](#); [Clerckx & Oestges, 2013](#); [Heath, 2017](#); [Paulraj et al., 2003](#); [Yong et al., 2010](#))

2. EXPERIMENTACIÓN

2.1. Ajuste el sistema con las configuraciones del punto 4.1, realice las instrucciones del punto 4.2

Complete la tabla solicitada en el punto 4.3 y compare los resultados

Tabla 4 Pruebas con SNR=5

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido

Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque la captura del diagrama de ojo transmitido	Coloque la captura del diagrama de ojo recibido

Tabla 5 Pruebas con SNR=10

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque la captura del diagrama de ojo transmitido	Coloque la captura del diagrama de ojo recibido

Tabla 6 Pruebas con SNR=20

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque la captura del diagrama de ojo transmitido	Coloque la captura del diagrama de ojo recibido

Tabla 7 Pruebas con SNR=30

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque la captura del diagrama de ojo transmitido	Coloque la captura del diagrama de ojo recibido

Tabla 8 Pruebas con SNR=35

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque la captura del diagrama de ojo transmitido	Coloque la captura del diagrama de ojo recibido

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

2.2. Lee las instrucciones del punto 4.4 y responda en base a los resultados obtenidos del punto 2.1

Responda:

- ¿Qué observaste al comparar el texto recuperado con el mensaje original para cada valor de SNR?
- ¿Hubo algún valor de SNR que produjo una recuperación del mensaje más precisa y fiable en comparación con otros valores?
- ¿Consideras que hay un umbral de SNR a partir del cual la recuperación del mensaje se vuelve más confiable y menos propensa a errores?

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

2.3. Complete las tablas solicitadas en el punto 4.6 en base a las instrucciones del punto 4.5

Complete la tabla solicitada y compare los resultados

Tabla 9 Pruebas realizadas con secuencia Zadoff-Chu

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque la captura del diagrama de ojo transmitido	Coloque la captura del diagrama de ojo recibido

Tabla 10 Pruebas realizadas con secuencia Barker 11 binaria

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque la captura del diagrama de ojo transmitido	Coloque la captura del diagrama de ojo recibido

Tabla 11 Pruebas realizadas con secuencia Barker 13 binaria

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque la captura del diagrama de ojo transmitido	Coloque la captura del diagrama de ojo recibido

Tabla 12 Pruebas realizadas con secuencia Barker 11 Cuaternaria

	Transmisor	Receptor
--	-------------------	-----------------

Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque la captura del diagrama de ojo transmitido	Coloque la captura del diagrama de ojo recibido

Tabla 13 Pruebas realizadas con secuencia Barker 13 Cuaternaria

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque la captura del diagrama de ojo transmitido	Coloque la captura del diagrama de ojo recibido

Tabla 14 Pruebas realizadas con secuencia Frank 16

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque la captura del diagrama de ojo transmitido	Coloque la captura del diagrama de ojo recibido

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

2.4. En base a los resultados obtenidos en el punto anterior, realice las instrucciones del punto 4.7

Responda:

- ¿Cómo cree que la elección del preámbulo puede influir en la capacidad del receptor para decodificar correctamente los símbolos transmitidos en un sistema MIMO 2x2 con codificación de Alamouti?
- ¿Qué aspectos de la codificación de Alamouti podrían afectar la efectividad de los diferentes tipos de preámbulos en la recuperación del mensaje original?
- ¿Cree que ciertos preámbulos podrían ser más compatibles o complementarios con la técnica de codificación de Alamouti? Explique ¿Por qué?
- ¿Qué implicaciones tiene la elección del preámbulo en la detección de la señal y la separación de los símbolos transmitidos en un sistema MIMO 2x2 con codificación de Alamouti?
- ¿Hay alguna relación entre la longitud o complejidad del preámbulo y su capacidad para ayudar al receptor a sincronizarse y decodificar los símbolos en un sistema MIMO 2x2 con codificación de Alamouti?

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

2.5. Implemente las instrucciones dadas en el punto 4.8

Coloque aquí una captura de los cambios realizados en el sistema original

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

2.6. En base al desarrollo del punto 4.8, cumpla las instrucciones solicitadas en el punto 1.8

Complete la tabla y analice los resultados

Inserte captura de la gráfica del BER para la secuencia Zadoff-Chu

Inserte captura de la gráfica del BER para la secuencia Barker 11 binaria

Inserte captura de la gráfica del BER para la secuencia Barker 13 binaria

Inserte captura de la gráfica del BER para la secuencia Barker 11 Cuaternaria

Inserte captura de la gráfica del BER para la secuencia Barker 13 Cuaternaria

Inserte captura de la gráfica del BER para la secuencia Frank 16

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

2.7. En base a los resultados obtenidos de las gráficas del SBR del punto anterior, responda las preguntas solicitadas en el punto 4.10

Responda:

- ¿Hubo algún preámbulo que mostrara una mejora significativa en el rendimiento del sistema en términos de BER a medida que aumentaba el SNR?
- ¿Pudo identificar algún patrón o tendencia común en la relación entre el tipo de preámbulo y el BER en función del SNR?
- ¿Considera que ciertos preámbulos son más efectivos que otros para mejorar la calidad de la comunicación en condiciones de baja y alta relación señal-ruido?
- ¿Cómo podría utilizar estos resultados para optimizar la configuración del sistema y mejorar su capacidad para recuperar correctamente el mensaje transmitido en un sistema MIMO 2x2 con codificación de Alamouti?
- ¿Cree que la elección del preámbulo podría afectar la capacidad del sistema para aprovechar la diversidad espacial proporcionada por la codificación de Alamouti? ¿Por qué?

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

2.8. Complete el reto en base a las instrucciones dadas en el punto 2.11

Indique aquí los cambios que realizó en el programa original para automatizar el sistema para un número flexible de antenas receptoras.

<p>Comente cual fue su solución para lograr una configuración flexible y dinámica del sistema.</p> <p>Análisis de Resultados de la sección: Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección</p>	
<p>CONCLUSIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 	
<p>RECOMMENDACIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 	
<p>REFERENCIAS</p> <p>Barbecho Paute, P. A., & Narváez Arias, D. L. (2024). <i>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA TUTOR [DEGREE THESIS]</i>. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.</p> <p>Clerckx, B., & Oestges, C. (2013). <i>MIMO Wireless Networks</i> (Academic Press is an imprint of Elsevier, Ed.; Second).</p> <p>Heath, R. (2017). <i>Introduction to Wireless Digital Communication</i>.</p> <p>Paulraj, Arogyaswami, Nabar, Rohit, & Gore, Dhananjay. (2003). <i>Introduction to space-time wireless communications</i>. Cambridge University Press.</p> <p>Yong, S. C., Jaekwon, K., Won, Y. Y., & Chung-Gu, K. (2010). <i>MIMO-OFDM WIRELESS COMMUNICATIONS WITH MATLAB 0</i>. IEEE PRESS.</p>	
<p>Autor1:</p>	<p>Autor2:</p>
<p>Autor3:</p>	<p>Autor4:</p>


3.3. Sistema MIMO 2x2 con STBC Alamouti usando (SDR)

Esta practica ofrece a los estudiantes una oportunidad para explorar en profundidad los fundamentos y aplicaciones prácticas de los sistemas de comunicaciones inalámbricas avanzadas.

El objetivo general de esta práctica es llevar a cabo la implementación de un sistema **MIMO** 2×2 con Alamouti en un entorno de pruebas real, aprovechando el potencial del equipo **USRP** X310 del laboratorio de telecomunicaciones de la Sede Cuenca. Este objetivo busca no solo proporcionar una experiencia práctica valiosa, sino fomentar la comprensión profunda de los sistemas **MIMO** y las técnicas de codificación espacial.

A través de una serie de objetivos específicos, los estudiantes se sumergirán en el proceso de configuración y operación del equipo **USRP** X310, adquiriendo habilidades prácticas fundamentales en el manejo de tecnologías de vanguardia en comunicaciones. Asimismo, desarrollarán competencias en el diseño e implementación de sistemas **MIMO** 2×2 utilizando la técnica de codificación Alamouti en el entorno de desarrollo LabVIEW.

La importancia de esta práctica radica en la combinación de teoría y práctica, permitiendo a los estudiantes no solo comprender los conceptos fundamentales detrás de los sistemas **MIMO** y las técnicas de codificación espacial, sino también aplicar este conocimiento en un entorno realista y relevante. Al finalizar la práctica, los estudiantes habrán mejorado su comprensión de los desafíos y oportunidades en las comunicaciones inalámbricas modernas, preparándolos para futuras investigaciones y desarrollos en este campo en constante evolución.

		FORMATO DE GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO / TALLERES / CENTROS DE SIMULACIÓN – PARA DOCENTES
CARRERA: TELECOMUNICACIONES		ASIGNATURA: COMUNICACIONES INALAMBRICAS
NRO. PRÁCTICA:	3	TÍTULO PRÁCTICA: Implementación de un sistema MIMO 2x2 STBC Alamouti en un entorno de pruebas real utilizando equipos de Radio Definida por Software (SDR)
OBJETIVO GENERAL: Implementar un sistema MIMO 2x2 con Alamouti para un escenario de pruebas real, utilizando equipo USRP X310 del laboratorio de telecomunicaciones		
OBJETIVOS ESPECÍFICOS: <ol style="list-style-type: none"> 1. Configurar el equipo USRP X310 para la transmisión y recepción de señales en un entorno de pruebas real. 2. Desarrollar e implementar el sistema MIMO 2x2 con la técnica de codificación Alamouti en LabVIEW. 3. Analizar los resultados obtenidos al implementar STBC Alamouti en un entorno de pruebas real. 		
INSTRUCCIONES	1. Estudie los siguientes conceptos y defina las características más importantes de cada uno <ol style="list-style-type: none"> a) Defina que es un SDR y cuáles son sus aplicaciones. b) Introducción al USRP X310 <ul style="list-style-type: none"> • Describa que es el USRP X310 y su función en sistemas de comunicación. • Defina las características clave del USRP X310, como su capacidad de operación en frecuencias RF y su flexibilidad para implementar diferentes esquemas de modulación y demodulación. c) Conceptos Básicos de MIMO <ul style="list-style-type: none"> • Defina MIMO y su importancia en sistemas de comunicación inalámbrica. • Describa de qué manera MIMO puede mejorar la capacidad y la confiabilidad de la transmisión de datos mediante el uso de múltiples antenas en el transmisor y receptor. d) Codificación Alamouti <ul style="list-style-type: none"> • Explique el principio detrás de la codificación Alamouti, que implica la transmisión de dos símbolos a través de dos antenas en dos periodos de tiempo consecutivos. • Enumera las ventajas de utilizar la codificación Alamouti en sistemas MIMO 2x2, como la robustez frente a interferencias y la mejora del rendimiento en entornos con desvanecimiento selectivo de canal. • Discute las limitaciones y consideraciones prácticas al implementar Alamouti MIMO. 	
	2. MIMO 2x2 STBC Alamouti bajo entorno de pruebas real <ol style="list-style-type: none"> 2.1. Construcción sistema MIMO 2x2 implementando Alamouti Identifique como se arma el sistema completo ya uniendo todos los sub VI necesarios 	

Identifique como se arma el sistema completo ya uniendo todos los sub VI necesarios

Para el uso del sistema MIMO 2x2 Alamouti será necesario el uso de VI's adicionales en comparación al simulador Alamouti

Los VI's adicionales correspondientes al filtro conformador de pulso y el filtro acoplado se indican en la Figura 1 adicional del sub VI para la segunda secuencia de entrenamiento como se indica en la Figura 2:



Figura 1 sub VI filtro conformador de pulsos/filtro acoplado



Figura 2 sub VI segunda secuencia de entrenamiento

Los bloques que tendremos que realizar las conexiones de las siguientes instrucciones son los de la Figura 3 y Figura 4.

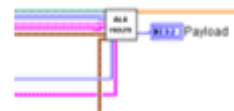


Figura 3 conexiones que deberán ser realizadas en el codificador de Alamouti

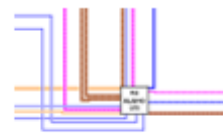


Figura 4 conexiones que deberán ser realizadas en el decodificador de Alamouti

Necesitaremos conectar los VI's como lo indica la Figura 5 y Figura 6 de referencia.

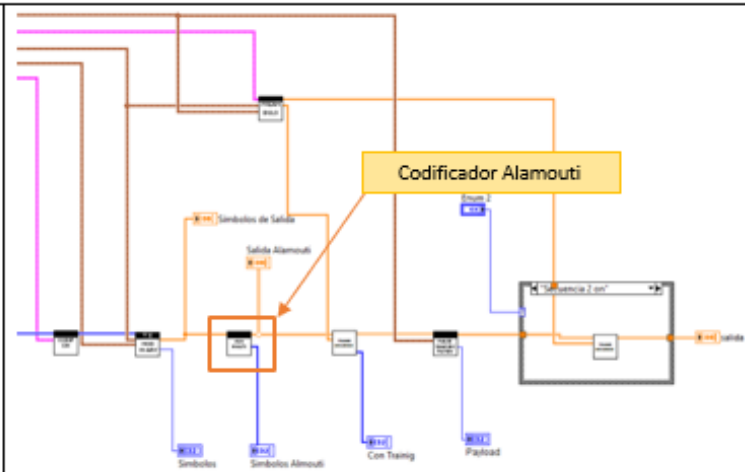


Figura 5 Ubicación para conectar el sub VI codificador de Alamouti

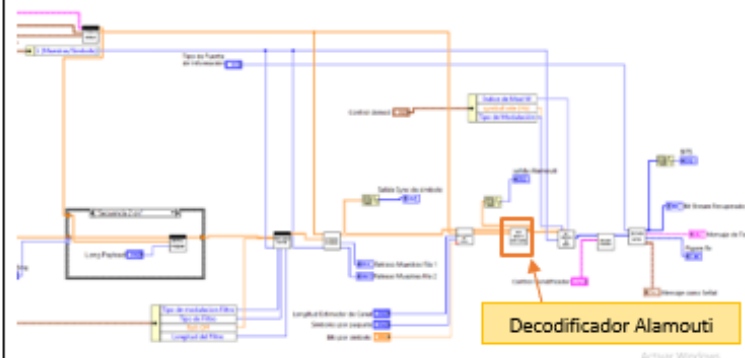


Figura 6 Ubicación para conectar el sub VI decodificador de Alamouti

Tener en cuenta que tanto el Codificador y decodificador Alamouti deberá agregarlos en base a la practica 2 dichos bloques son señalados en la Figura 5 y Figura 6

3. Consideraciones para usar el archivo principal de simulación

3.1. Diagrama de bloques del sistema

En la Figura 7 se presenta el diagrama de bloques que conforman el sistema MIMO 2x2 STBC Alamouti para utilizarlo con el equipo USRP ETTUS X310, a partir de aquello seguiremos las instrucciones para poder abrir y utilizar el simulador.



Figura 7 Diagrama de bloque completo de sistema MIMO 2X2 implementado con Alamouti

Ingrese dentro de la carpeta del proyecto nombrado "Programas_MIMO_Estudiantes Folder" como se indica en la Figura 8



Figura 8 Practica 3

Dentro de este de doble clic en el proyecto principal con el nombre "Programas_MIMO_Estudiantes" como en indica enmarcado de rojo en la Figura 9

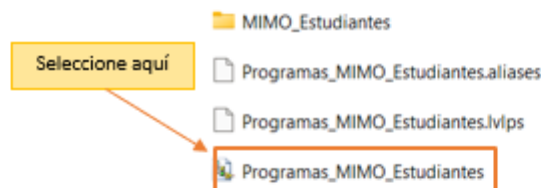


Figura 9 Instrucción abra el proyecto principal

Al abrir el proyecto principal lo llevará al simulador de LabVIEW y se abrirá la pestaña del proyecto principal, deberá dar clic encima del signo + al lado del nombre "3_Transmisor_Receptor_MIMO_Alamouti" como se enmarca de rojo en la Figura 10.

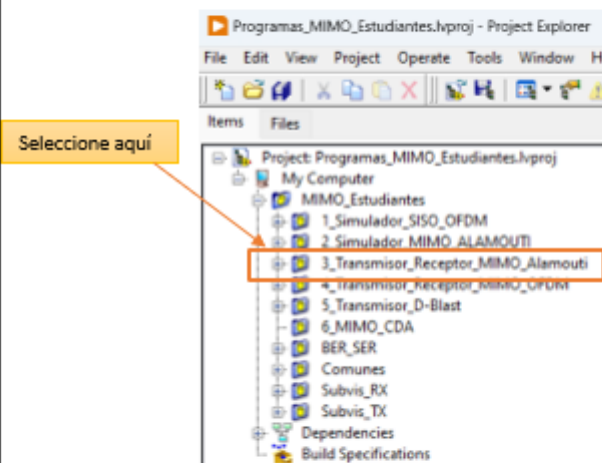


Figura 10 Pestaña proyecto principal

Al dar clic + se desplegará las opciones de carpetas "RX" y "TX", para el caso de RX deberá dar clic en el VI nombrado "RX_Principal_MIMO" como se indica enmarcado de rojo en la Figura 11 y en el caso de TX deberá dar clic en el VI nombrado "TX_RF_MIMO_Principal" como se indica enmarcado de rojo en la Figura 12.

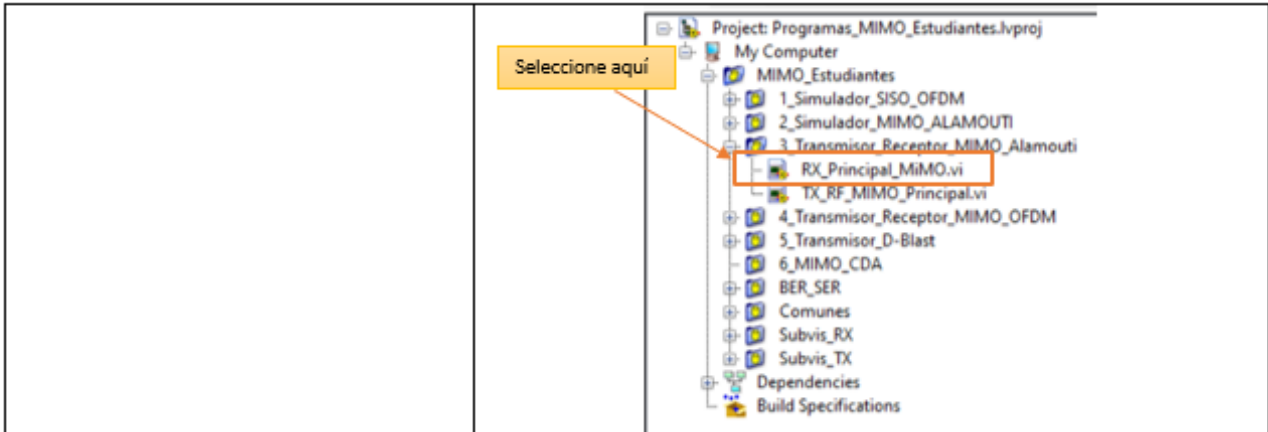


Figura 11 Seleccione el VI RX_Principal_MIMO.vi

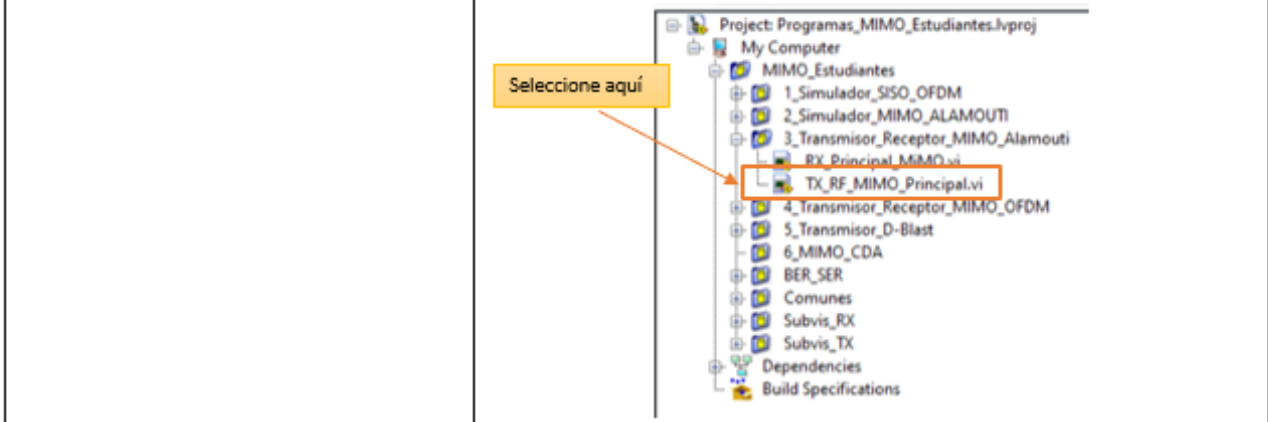


Figura 12 Seleccione el VI TX_RF_MIMO_Principal.vi

Al seleccionar el VI de la Figura 11 y Figura 12 finalmente se abrirá el simulador como se indica en la Figura 13 y Figura 14.



Figura 13 Simulador transmisor listo para utilizar



Figura 14 Simulador receptor listo para utilizar

3.2. Guía de Conexión: Configuración Óptima del Equipo USRP y Antenas

Con base en la Figura 15 realice las conexiones pertinentes utilizando el equipo USRP X310 del laboratorio de telecomunicaciones, cabe mencionar que este equipo utiliza antenas de doble banda y no son compatibles con los otros modelos de antenas utilizados en el laboratorio.

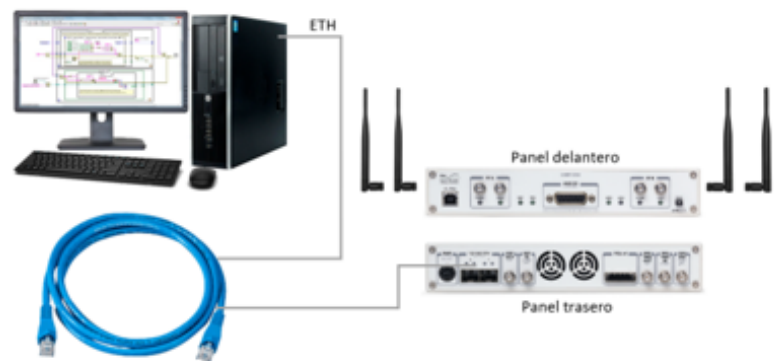


Figura 15 Diagrama de conexión del equipo USRP X310 para el desarrollo de la práctica.

Asegúrese de la correcta conexión de los equipos con el cable ethernet, asegurándose de que suene la pestaña de seguridad al momento de conectar el cable ethernet a la computadora y de igual manera del cable ethernet al equipo USRP. Conecte el USRP a la corriente el transformador pertinente usando las fuentes del laboratorio exclusivas para este dispositivo USRP X310.

3.3. Configuración USRP X310

En comparación a un sistema SISO este sistema MIMO utiliza configuraciones adicionales para el uso del dispositivo SDR las cuales se mencionan a continuación:

Tendremos un vi encargado de iniciar los parámetros iniciales del sistema transmisor MIMO que se observa en la Figura 16



Figura 16 VI que inicia los parámetros iniciales del sistema MIMO

El diagrama de bloques del sistema se indica en la figura Figura 17.

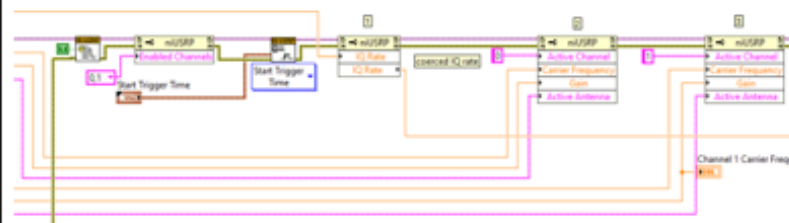


Figura 17 Sistema para inicializar el USRP en modo MIMO

Unas consideraciones a tener en cuenta son las siguientes

- En 1 se establecerá los atributos comunes a todos los canales.
- En 2 se establecerá los atributos específicos del canal 0.
- En 3 se establecerá los atributos específicos del canal 1.
- Los canales hacen alusión a la antena 1 y antena 2.

4. Evaluación del sistema

4.1. Configuraciones para evaluar el sistema

• TRANSMISOR

En la pestaña nombrada Parámetros Hardware In configure la dirección IP del computador para su conexión con el USRP, ajuste los valores de ganancia para la antena T_{x1} y T_{x2} , se deberá ajustar la frecuencia de muestreo y los demás parámetros como se indica en la Figura 18.

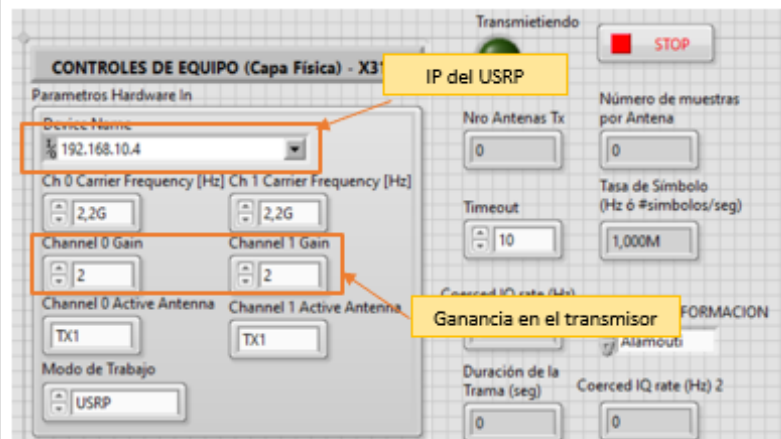
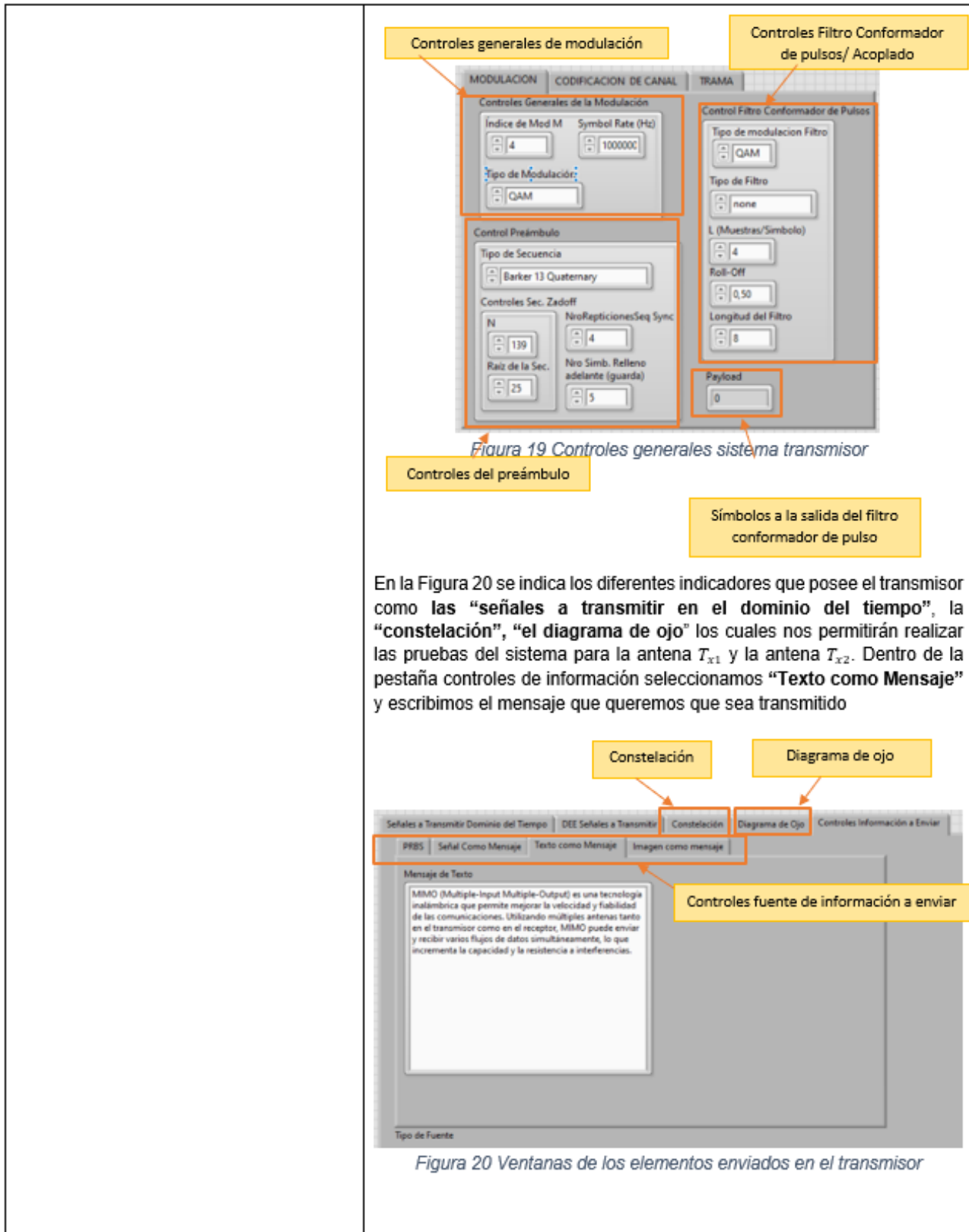


Figura 18 Controles de equipo transmisor, para establecer conexión con el USRP X310

En la Figura 19 se muestra como deberá configurar los controles de modulación, los controles para el preámbulo y los controles para el filtro conformador de pulso



• RECEPTOR

Dentro de los controles del Hardware configure la dirección IP en receptor para que establezca comunicación con el USRP, ajuste la ganancia que deberán tener las antenas receptoras R_{x1} y R_{x2} , las configuraciones restantes deberán ser las mismas que se muestra en la Figura 21.



Figura 21 Controles de equipo receptor, para establecer conexión con el USRP X310

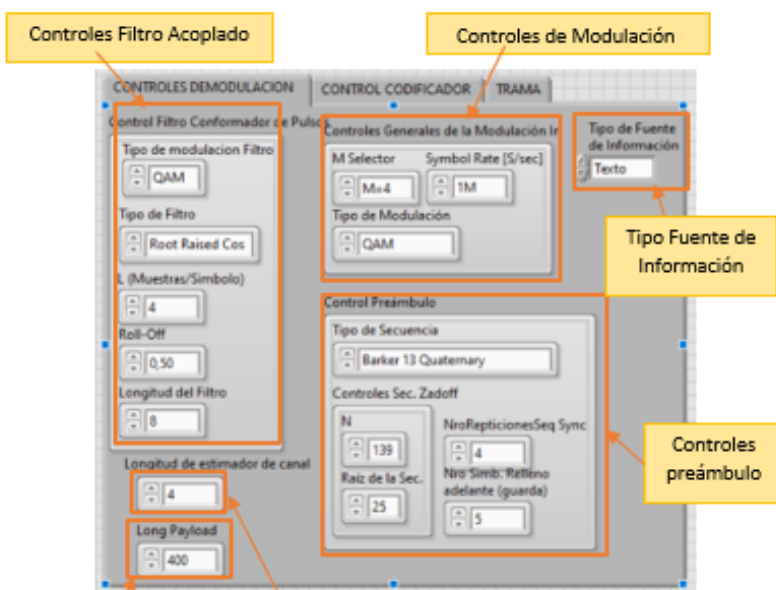


Figura 22 Controles generales sistema receptor

Longitud estimador de canal

Longitud de la salida con la primera secuencia de entrenamiento

La Figura 22 muestra como deberán estar ajustados todos los parámetros de control en el receptor como lo son los "controles necesarios para la demodulación", los "controles para el filtro acoplado", los "controles para el preámbulo", la longitud que debe ser ajustada para el estimador del canal, la longitud del Payload para el proceso de detección del preámbulo y el tipo de fuente de información que deseamos visualizar en el receptor, ya

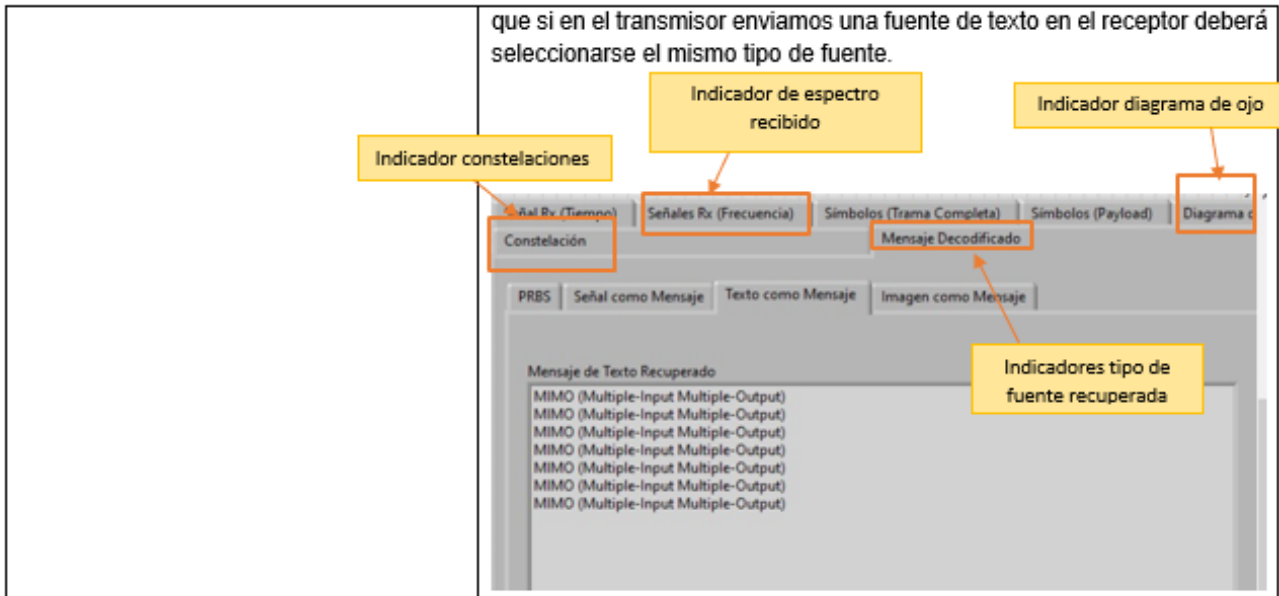


Figura 23 Indicadores receptor

En la Figura 23 se muestran los diferentes indicadores que deberá utilizar en el receptor para comprobar el funcionamiento de nuestro sistema como las constelaciones recibidas para la antena R_{x1} y R_{x2} , las señales recibidas en el dominio del tiempo, el espectro recibido, entre otros. Deberá seleccionar la pestaña "Mensaje decodificado" y elegir "Texto como Mensaje"

4.2. Verificación de recuperación de mensaje

Analice si el texto recuperado es igual al mensaje transmitido originalmente, para los diferentes tipos de preámbulo que se indican más abajo, para cada secuencia de entrenamiento, modifique el valor del número de repeticiones del preámbulo a 4, 9 y 16.

- a) Zadoff-Chu
- b) Barker 11 binaria
- c) Barker 13 binaria
- d) Barker 11 Cuaternaria
- e) Barker 13 Cuaternaria
- f) Frank 16

4.3. Tabule y compare resultados

En base a las pruebas solicitadas en el punto 4.2 complete la Tabla 1 hasta la Tabla 6 para un valor de 4 repeticiones, complete la Tabla 7 hasta la Tabla 12 para un valor de 9 repeticiones por ultimo complete la Tabla 13 hasta la Tabla 18 para un valor de 16 repeticiones, compare los resultados con base a las gráficas del transmisor

4.4. En base a los resultados del punto 4.2 complete las siguientes preguntas.

Responda: ¿Qué impacto tiene el cambio en el número de repeticiones del preámbulo en la recuperación del texto transmitido? ¿Se observa alguna diferencia significativa en la calidad de la recuperación del texto entre los diferentes tipos de

	<p>preámbulos? ¿Cuál es el preámbulo que muestra el mejor desempeño en la recuperación del texto, y por qué crees que es así? ¿Cómo afecta el uso de diferentes secuencias de entrenamiento en la precisión de la recuperación del texto?</p> <p>4.5. Reto Adapte el sistema MIMO STB para que utilice Orthogonal Space-Time Block Coding (OSTBC). En el sistema actual, STBC se emplea para mejorar la fiabilidad de la comunicación inalámbrica en un entorno MIMO 2x2. Sin embargo, se ha identificado la necesidad de explorar otras técnicas de codificación espacial, como OSTBC, para evaluar su desempeño y eficacia en comparación con STBC. Deberá investigar y comprender los principios de funcionamiento de Orthogonal Space-Time Block Coding (OSTBC), incluyendo su estructura y propiedades, es por ello deberá realizar las modificaciones necesarias en el diseño del sistema MIMO para adaptarlo al esquema de codificación OSTBC. Responda: ¿Cuáles son las principales diferencias entre Space-Time Block Coding (STBC) y Orthogonal Space-Time Block Coding (OSTBC) en términos de principios de codificación y funcionamiento? ¿Cómo afecta la ortogonalidad de los símbolos transmitidos en OSTBC en comparación con la correlación de símbolos en STBC? ¿Qué ventajas ofrece OSTBC sobre STBC en términos de complejidad de decodificación y eficiencia espectral?</p>
	<p>5. Genere conclusiones y recomendaciones a partir del análisis de los resultados obtenidos.</p>
ACTIVIDADES POR DESARROLLAR	
<p>1. LISTADO DE HERRAMIENTAS Y MATERIALES Herramientas y Materiales</p> <ul style="list-style-type: none"> • USRP X310. • Antenas doble banda. • Cable ethernet cat 6. • Software Labview. • Plugins de Labview: Modulation Toolkit, USRP Toolkit <p>2. MARCO TEÓRICO De acuerdo con el punto 1 de la sección anterior, realice el marco teórico de cada uno de los ítems.</p> <p>a. Defina que es un SDR y cuáles son sus aplicaciones.</p> <p>b. Introducción al USRP X310</p> <ul style="list-style-type: none"> • Describa que es el USRP X310 y su función en sistemas de comunicación. • Defina las características clave del USRP X310, como su capacidad de operación en frecuencias RF y su flexibilidad para implementar diferentes esquemas de modulación y demodulación. <p>c. Conceptos Básicos de MIMO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Defina MIMO y su importancia en sistemas de comunicación inalámbrica. 	

- Describa de qué manera MIMO puede mejorar la capacidad y la confiabilidad de la transmisión de datos mediante el uso de múltiples antenas en el transmisor y receptor.
- d. Técnica de codificación Alamouti
- Explique el principio detrás de la codificación Alamouti, que implica la transmisión de dos símbolos a través de dos antenas en dos periodos de tiempo consecutivos.
 - Enumera las ventajas de utilizar la codificación Alamouti en sistemas MIMO 2x2, como la robustez frente a interferencias y la mejora del rendimiento en entornos con desvanecimiento selectivo de canal.
 - Discute las limitaciones y consideraciones prácticas al implementar Alamouti MIMO, como el aumento de complejidad del hardware y la necesidad de sincronización precisa.

Puede utilizar las siguientes fuentes bibliográficas ([Barbecho Poute & Navárez Arias, 2024](#); [Clerrckx & Oestges, 2013](#); [Heath, 2017](#); [Paukrat et al., 2003](#); [Yong et al., 2010](#))

3. EXPERIMENTACIÓN

3.1. Utilizando las configuraciones del punto 4.1 y las instrucciones del punto 4.2 complete la tabla propuesta en el punto 4.3

Complete las tablas solicitadas en el punto 4.3 y compare los resultados 4

- **Número de repeticiones: 4**

Tabla 1 Pruebas realizadas con secuencia Zadoff-Chu, numero de repeticiones=4

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Señal Transmitida/Recibida	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{x1} y R_{x2}

Tabla 2 Pruebas realizadas con secuencia Barker 11 binaria, numero de repeticiones=4

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Señal Transmitida/Recibida	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{x1} y R_{x2}

Tabla 3 Pruebas realizadas con secuencia Barker 13 binaria, numero de repeticiones=4

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Señal Transmitida/Recibida	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{r1} y R_{r2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{r1} y R_{r2}

Tabla 4 Pruebas realizadas con secuencia Barker 11 Cuaternaria, numero de repeticiones=4

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Señal Transmitida/Recibida	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{r1} y R_{r2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{r1} y R_{r2}

Tabla 5 Pruebas realizadas con secuencia Barker 13 Cuaternaria, numero de repeticiones=4

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Señal Transmitida/Recibida	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{r1} y R_{r2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{r1} y R_{r2}

Tabla 6 Pruebas realizadas con secuencia Frank 16, numero de repeticiones=4

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Señal Transmitida/Recibida	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{r1} y R_{r2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{r1} y R_{r2}

- **Numero de repeticiones: 9**

Tabla 7 Pruebas realizadas con secuencia Zadoff-Chu, numero de repeticiones=9

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Señal Trasmitada/Recibida	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{x1} y R_{x2}

Tabla 8 Pruebas realizadas con secuencia Barker 11 binaria, numero de repeticiones=9

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Señal Trasmitada/Recibida	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{x1} y R_{x2}

Tabla 9 Pruebas realizadas con secuencia Barker 13 binaria, numero de repeticiones=9

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Señal Trasmitada/Recibida	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{x1} y R_{x2}

Tabla 10 Pruebas realizadas con secuencia Barker 11 ~~Quaternaria~~ **Quaternaria**, numero de repeticiones=9

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Señal Trasmitada/Recibida	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}

Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{x1} y R_{x2}
------------------------	--	---

Tabla 11 Pruebas realizadas con secuencia Barker 13 Cuaternaria, numero de repeticiones=9

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Señal Trasmitada/Recibida	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{x1} y R_{x2}

Tabla 12 Pruebas realizadas con secuencia Frank 16, numero de repeticiones=9

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Señal Trasmitada/Recibida	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{x1} y R_{x2}

- **Numero de repeticiones: 16**

Tabla 13 Pruebas realizadas con secuencia Zadoff-Chu, numero de repeticiones=16

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Señal Trasmitada/Recibida	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{x1} y R_{x2}

Tabla 14 Pruebas realizadas con secuencia Barker 11 binaria, numero de repeticiones=16

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Señal Trasmitada/Recibida	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo

Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{x1} y R_{x2}

Tabla 15 Pruebas realizadas con secuencia Barker 13 binaria, numero de repeticiones=16

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Señal Trasmitada/Recibida	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{x1} y R_{x2}

Tabla 16 Pruebas realizadas con secuencia Barker 11 Cuaternaria, numero de repeticiones=16

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Señal Trasmitada/Recibida	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{x1} y R_{x2}

Tabla 17 Pruebas realizadas con secuencia Barker 13 Cuaternaria, numero de repeticiones=16

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Señal Trasmitada/Recibida	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{x1} y R_{x2}

Tabla 18 Pruebas realizadas con secuencia Frank 16, numero de repeticiones=16

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido

Señal Transmitida/Recibida	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{x1} y R_{x2}

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

3.2. En base a los resultados obtenidos del punto 3.1, realice las instrucciones solicitadas en el punto 4.4

Responda:

- ¿Qué impacto tiene el cambio en el número de repeticiones del preámbulo en la recuperación del texto transmitido?
- ¿Se observa alguna diferencia significativa en la calidad de la recuperación del texto entre los diferentes tipos de preámbulos?
- ¿Cuál es el preámbulo que muestra el mejor desempeño en la recuperación del texto, y por qué crees que es así? ¿Cómo afecta el uso de diferentes secuencias de entrenamiento en la precisión de la recuperación del texto?

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

3.3. Siga las instrucciones del punto 4.8 y cumpla con el reto (opcional)

Indique aquí los cambios las adecuaciones que realizó en el programa original para adecuarlo a OSTBC en lugar de STBC

Comente cuál fue su solución

Responda:

- ¿Cuáles son las principales diferencias entre Space-Time Block Coding (STBC) y Orthogonal Space-Time Block Coding (OSTBC) en términos de principios de codificación y funcionamiento?
- ¿Cómo afecta la ortogonalidad de los símbolos transmitidos en OSTBC en comparación con la correlación de símbolos en STBC?
- ¿Qué ventajas ofrece OSTBC sobre STBC en términos de complejidad de decodificación y eficiencia espectral?

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

CONCLUSIONES:

-

RECOMENDACIONES:	
•	
REFERENCIAS	
<p>Barbecho Paute, P. A., & Narváez Arias, D. L. (2024). <i>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA TUTOR</i> [DEGREE THESIS]. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.</p> <p>Clerckx, B., & Oestges, C. (2013). <i>MIMO Wireless Networks</i> (Academic Press is an imprint of Elsevier, Ed.; Second).</p> <p>Heath, R. (2017). <i>Introduction to Wireless Digital Communication</i>.</p> <p>Paulraj, Arogyaswami, Nabar, Rohit., & Gore, Dhananjay. (2003). <i>Introduction to space-time wireless communications</i>. Cambridge University Press.</p> <p>Yong, S. C., Jaekwon, K., Won, Y. Y., & Chung-Gu, K. (2010). <i>MIMO-OFDM WIRELESS COMMUNICATIONS WITH MATLAB</i>. IEEE PRESS.</p>	
Autor1:	Autor2:
Autor3:	Autor4:


3.4. Sistema MIMO 2x2 STBC Alamouti con OFDM sobre SDR

El objetivo general de esta práctica es brindar a los estudiantes una experiencia práctica y teórica integral en el diseño y la implementación de sistemas de comunicación inalámbrica utilizando equipos SDR. Al abordar este desafío, los estudiantes no solo adquieren conocimientos técnicos, sino que también desarrollan habilidades prácticas que son críticas en el campo de las telecomunicaciones.

Los objetivos específicos están cuidadosamente diseñados para proporcionar a los estudiantes una comprensión profunda de los conceptos clave involucrados en la práctica. Por ejemplo, al explorar los fundamentos de MIMO, la codificación Alamouti y la modulación OFDM, los estudiantes desarrollan una base sólida que les permite comprender mejor el funcionamiento de los sistemas de comunicación inalámbrica modernos.

La implementación de algoritmos de codificación Alamouti y esquemas de modulación OFDM no solo mejora la confiabilidad de la transmisión, sino que también permite a los estudiantes experimentar directamente con técnicas cruciales en el campo de las comunicaciones. Esto les brinda la oportunidad de aplicar conceptos teóricos en un entorno práctico, lo que fortalece su comprensión y habilidades técnicas.

En última instancia, esta práctica es importante porque equipa a los estudiantes con las habilidades necesarias para enfrentar desafíos del mundo real en el diseño y desarrollo de sistemas de comunicación inalámbrica. Al combinar teoría y práctica de manera efectiva, los estudiantes emergen de la experiencia con una comprensión más profunda y una confianza renovada en su capacidad para abordar problemas complejos en el campo de las telecomunicaciones.

		FORMATO DE GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO / TALLERES / CENTROS DE SIMULACIÓN – PARA DOCENTES
CARRERA: TELECOMUNICACIONES		ASIGNATURA: COMUNICACIONES INALAMBRICAS
NRO. PRÁCTICA:	4	TÍTULO PRÁCTICA: Implementación de un sistema MIMO 2x2 STBC Alamouti implementado con OFDM en un entorno de pruebas real utilizando equipos de Radio Definida por Software (SDR)
OBJETIVO GENERAL: Implementar y evaluar un sistema de comunicaciones inalámbricas MIMO 2x2 con codificación espacio – temporal Alamouti y Multiplexación por división de frecuencias ortogonales OFDM en un entorno de pruebas real, utilizando el equipo USRP X310 del laboratorio de Telecomunicaciones.		
OBJETIVOS ESPECÍFICOS: <ol style="list-style-type: none"> 1. Explorar y comprender los fundamentos de las comunicaciones inalámbricas, MIMO, la codificación Alamouti y el esquema de modulación OFDM. 2. Familiarizarse con las herramientas y software necesarios para el diseño y simulación de sistemas de comunicación inalámbrica. 3. Utilizar LabVIEW para diseñar un sistema MIMO 2x2 que comprenda la transmisión y recepción de señales inalámbricas. 4. Implementar algoritmo de codificación Alamouti para mejorar la confiabilidad de la transmisión. 5. Implementar el esquema de modulación OFDM para dividir la señal en subportadoras ortogonales. 6. Realizar análisis de desempeño para evaluar la calidad de la señal. 		
INSTRUCCIONES	<ol style="list-style-type: none"> 1. Estudie los siguientes conceptos y defina las características más importantes de cada uno <ol style="list-style-type: none"> a) Introducción a MIMO 2x2 y OFDM: <ul style="list-style-type: none"> • Describa brevemente las tecnologías MIMO 2x2 (Multiple Input Multiple Output) y OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). • Explique cómo MIMO y OFDM se combinan para mejorar el rendimiento y la eficiencia espectral de los sistemas de comunicación inalámbrica. b) Principios de la Codificación Alamouti en un Contexto OFDM: <ul style="list-style-type: none"> • Investigue y defina cómo se puede aplicar la codificación Alamouti en un sistema OFDM para aprovechar las ventajas de la diversidad espacial. • Describe cómo se distribuyen los símbolos codificados en múltiples subportadoras ortogonales en un sistema OFDM. c) Ventajas de la Combinación de MIMO y OFDM: <ul style="list-style-type: none"> • Analice las ventajas de combinar MIMO y OFDM, como la mejora en la capacidad del canal, la mitigación del desvanecimiento selectivo de canal y la eficiencia espectral mejorada. d) Aplicaciones de OFDM: <ul style="list-style-type: none"> • Investigue y defina cómo se implementa OFDM en el estándar IEEE 802.11a (Wi-Fi), indique como trabaja la trama en el estándar 802.11a y cómo se beneficia de las características de OFDM, como la inmunidad al desvanecimiento selectivo de canal y la alta eficiencia espectral. 	

2. Sistema MIMO 2x2 con STBC Alamouti bajo entorno de pruebas real y Multiplexación por división de frecuencias ortogonales OFDM

2.1. Construcción sistema MIMO 2x2 implementando STBC Alamouti y OFDM

Ingrese dentro de la carpeta del proyecto nombrado "Programas_MIMO_Estudiantes Folder" como se indica en la Figura 1



Figura 1 Practica 3

Dentro de este de doble clic en el proyecto principal con el nombre "Ofdm_Mimo" como se indica enmarcado de rojo en la Figura 2

Seleccione aquí

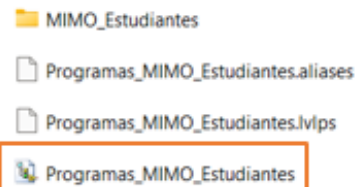


Figura 2 Instrucción abra el proyecto principal

Iniciado el proyecto se nos desplegarán todas las carpetas utilizadas en el proyecto "4_Transmisor_Receptor_MIMO_OFDM" como se observa en la Figura 3

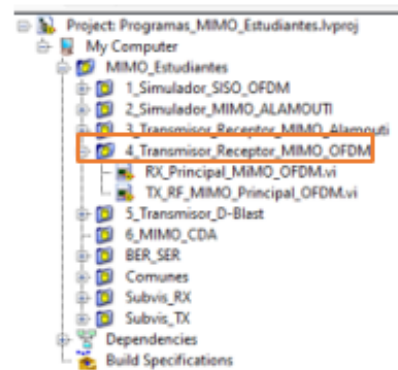


Figura 3 Pestaña proyecto principal 4_Transmisor_Receptor_MIMO_OFDM

Par inicializar el transmisor tendremos que abrir la carpeta señalada en la Figura 3, se nos desplegará varios VI's y ejecutaremos el VI de la Figura 4

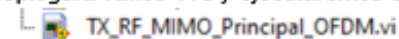


Figura 4 Abra el VI para inicializar el transmisor

Al iniciar el VI encontraremos el bloque de la Figura 5, ingresaremos a este bloque a el área de diagrama de bloques que tendremos que ordenar y agregar los sub VI faltantes, tomar como referencia la Figura 6

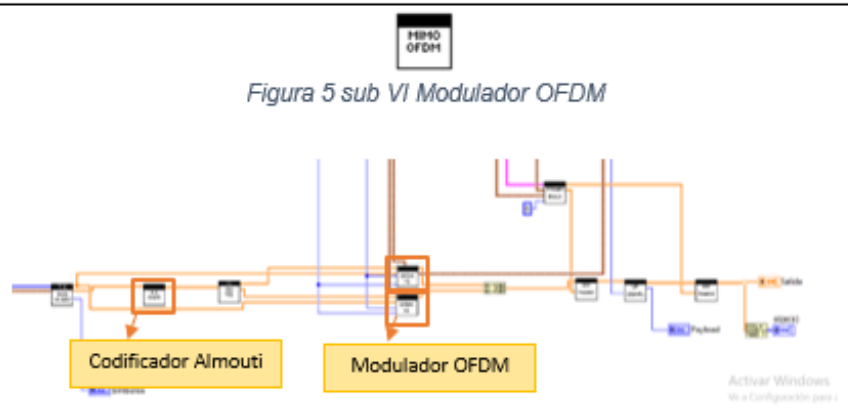


Figura 5 sub VI Modulador OFDM

Tener en cuenta que usted deberá agregar los VI's señalados en la Figura 6 que fueron desarrollados en las practicas 1 y 2.

Para el sistema receptor tendremos que abrir la carpeta señalada en la Figura 7, se nos desplegara varios VI's y ejecutaremos el vi de la Figura 8

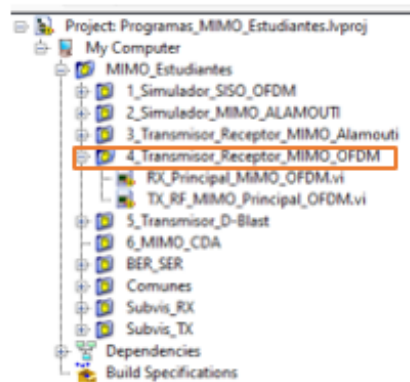


Figura 7 Pestaña proyecto principal 4_Transmisor_Receptor_MIMO_OFDM



Figura 8 Abra el VI para inicializar el receptor

Al ingresar en el diagrama de bloques, abriremos el sub VI de la Figura 9 y nos dirigimos al diagrama de bloques el cual deberemos ordenar y agregar los VI's faltantes desarrollados en la practicas 1 y 2, tomar como referencia la Figura 10 para ordenar el VI.



Figura 9 sub VI demodulador OFDM

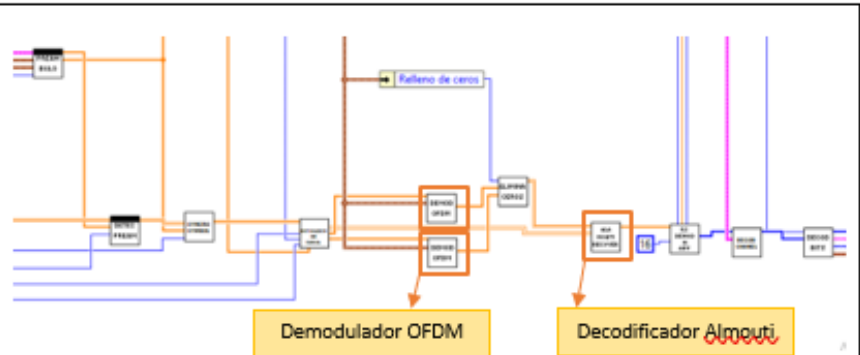


Figura 10 VI's contenidos en el receptor

3. Armado del sistema de comunicaciones

3.1. Diagrama de bloques del sistema

En la Figura 11 se presenta el diagrama de bloques que conforman el sistema MIMO 2x2 STBC Alamouti implementado con OFDM para utilizarlo con el equipo USRP ETTUS X310, seguiremos las instrucciones del punto 3.2



Figura 11 Diagrama de bloque completo sistema MIMO STBC Alamouti implementado con OFDM

3.2. Guía de Conexión: Configuración Óptima del Equipo USRP y Antenas

Con base en la Figura 12 realice las conexiones pertinentes utilizando el equipo USRP X310 del laboratorio de telecomunicaciones, cabe mencionar que este equipo utiliza antenas de doble banda y no son compatibles con los otros modelos de antenas utilizados en el laboratorio.

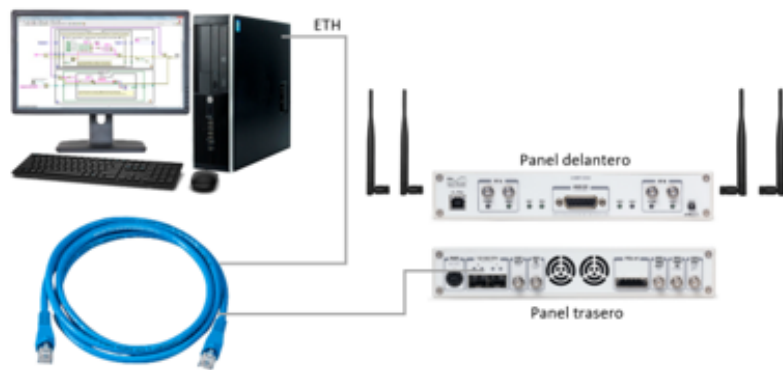


Figura 12 Diagrama de conexión del equipo USRP X310 para el desarrollo de la práctica.

Asegúrese de la correcta conexión de los equipos con el cable ethernet, asegurándose de que suene la pestaña de seguridad al momento de conectar el cable ethernet a la computadora y de igual manera del cable ethernet al equipo USRP. Conecte el USRP a la corriente el transformador pertinente usando las fuentes del laboratorio exclusivas para este dispositivo USRP X310.

3.3. Configuración USRP X310

En comparación a un sistema SISO este sistema MIMO utiliza configuraciones adicionales para el uso del dispositivo SDR las cuales se mencionan a continuación:

Tendremos un vi encargado de iniciar los parámetros iniciales del sistema transmisor MIMO que se observa en la Figura 13



Figura 13 VI que inicia los parámetros iniciales del sistema MIMO

El diagrama de bloques del sistema se indica en la figura Figura 14.

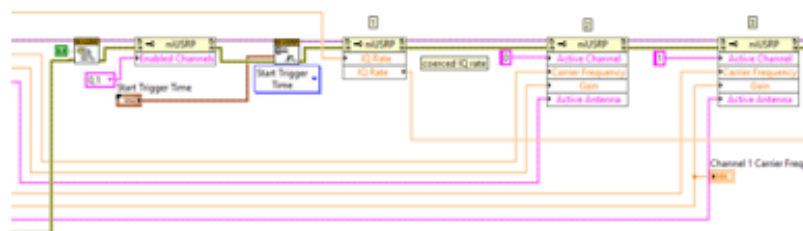


Figura 14 Sistema para inicializar el USRP en modo MIMO

Unas consideraciones a tener en cuenta son las siguientes

- En 1 se establecerá los atributos comunes a todos los canales.
- En 2 se establecerá los atributos específicos del canal 0.
- En 3 se establecerá los atributos específicos del canal 1.

Los canales hacen alusión a la antena 1 y antena 2.

4. Evaluación del sistema

4.1. Configuraciones para evaluar el sistema

- TRANSMISOR

Dentro de la pestaña nombrada Parámetros Hardware In configure la dirección IP del computador para su conexión con el USRP, ajuste los valores de ganancia para la antena T_{x1} y T_{x2} , se deberá ajustar la frecuencia de muestreo y los demás parámetros como se indica en la Figura 15.

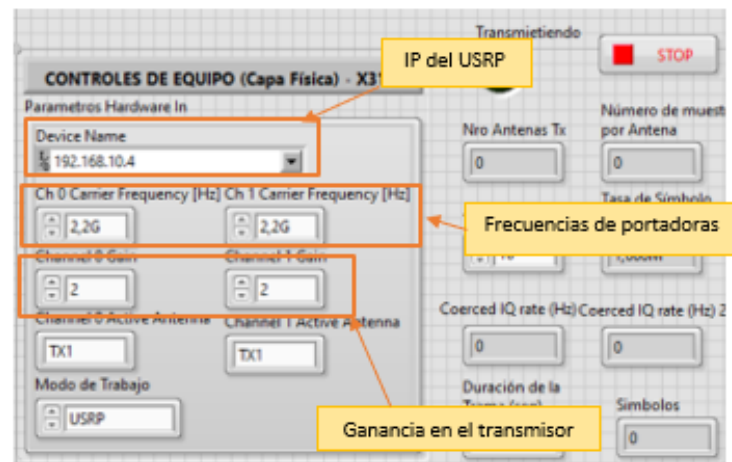


Figura 15 Controles de equipo transmisor, para establecer conexión con el USRP X310

En la Figura 16 se indica las configuraciones que deberá realizar en los controles de modulación en los que se incluyen el índice de modulación, el tipo de modulación, los controles para el preámbulo en el que se incluye el tipo de secuencia de entrenamiento que se desea utilizar, la cantidad de repeticiones del preámbulo, el control para los símbolos OFDM dentro de este se halla el número de subportadoras en ese caso en específico el número de portadoras corresponde a la cantidad de portadoras que utiliza el estándar 802.11 a, pero puede adecuarse para otro tipo de estándares de la familia IEEE 802.11 además de que se puede probar para LTE, también están los números de símbolos de guarda, entre otros

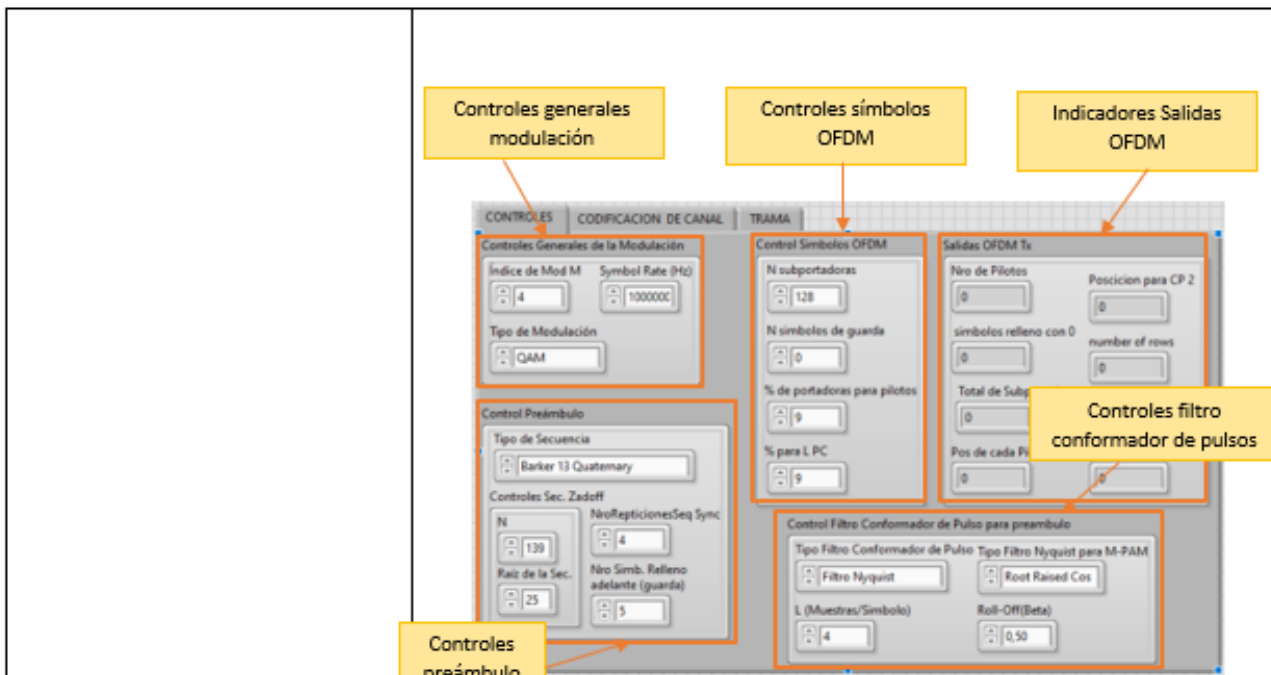


Figura 16 Controles generales sistema transmisor

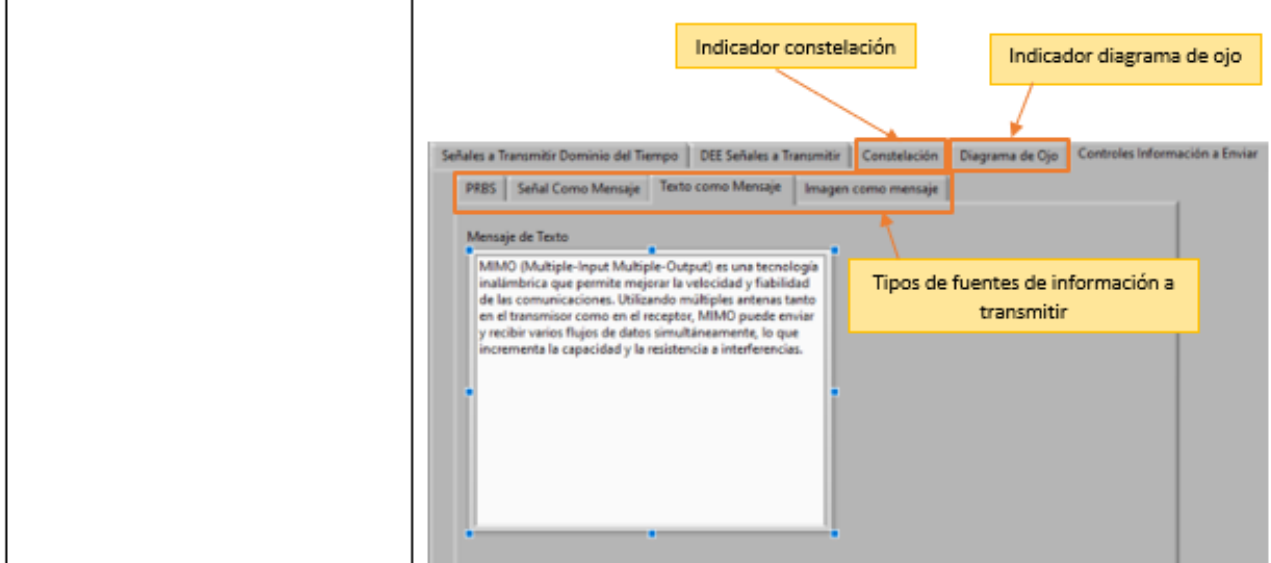


Figura 17 Ventanas indicadoras de tipo de fuente de información a transmitir, constelación, Diagrama de ojo, Señales a transmitir en el dominio del tiempo

En la Figura 17 se muestran las pestañas indicadoras, las cuales deberá seleccionar para evaluar el funcionamiento del sistema deberá observar el mensaje enviando también se puede observar la constelación, el diagrama de ojo, la señal a transmitir en el dominio del tiempo y el espectro transmitido

• RECEPTOR

Dentro de los controles del Hardware configure la dirección IP en receptor para que establezca comunicación con el USRP, ajuste la ganancia que deberán tener las antenas receptoras R_{x1} y R_{x2} , las configuraciones restantes deberán ser las mismas que se muestra en Figura 18.

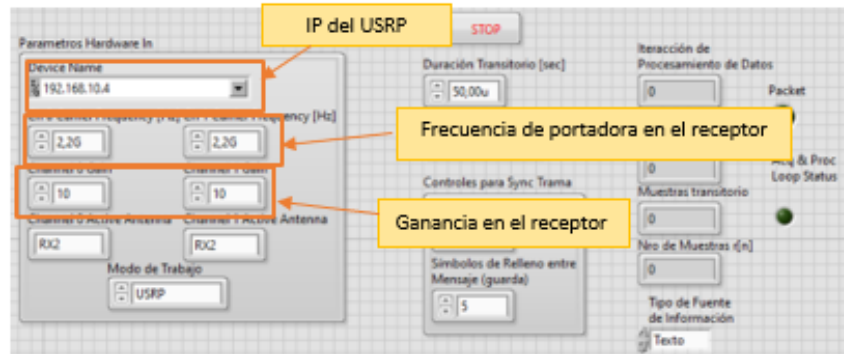


Figura 18 Controles de equipo receptor, para establecer conexión con el USRP X310

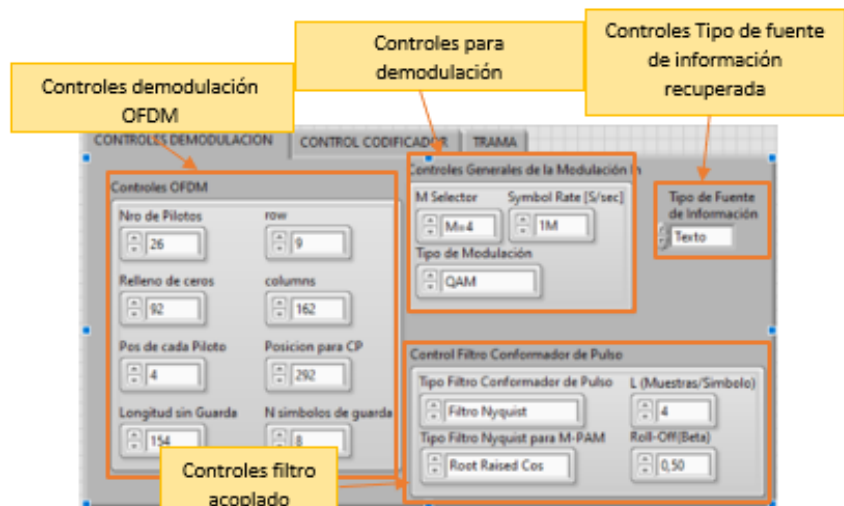


Figura 19 Controles generales sistema receptor

La Figura 19 muestra como deberán estar ajustados todos los parámetros de control en el receptor como lo son los "controles necesarios para la demodulación", los "controles utilizados en la demodulación OFDM", los "controles para el filtro acoplado" y el control del "tipo de fuente de información", por último, deberá el texto como fuente de información a transmitir.

Ingrese a los indicadores y selecciones la pestaña nombrada mensaje decodificado, seleccione el texto como mensaje para visualizar si el texto recibido concuerda con el transmitido, además se muestran los diferentes indicadores que deberá utilizar en el receptor para comprobar el funcionamiento de nuestro sistema como las constelaciones recibidas para la antena R_{x1} y R_{x2} , las señales recibidas en el dominio del tiempo, el espectro recibido, entre otros como se indica en la Figura 20.

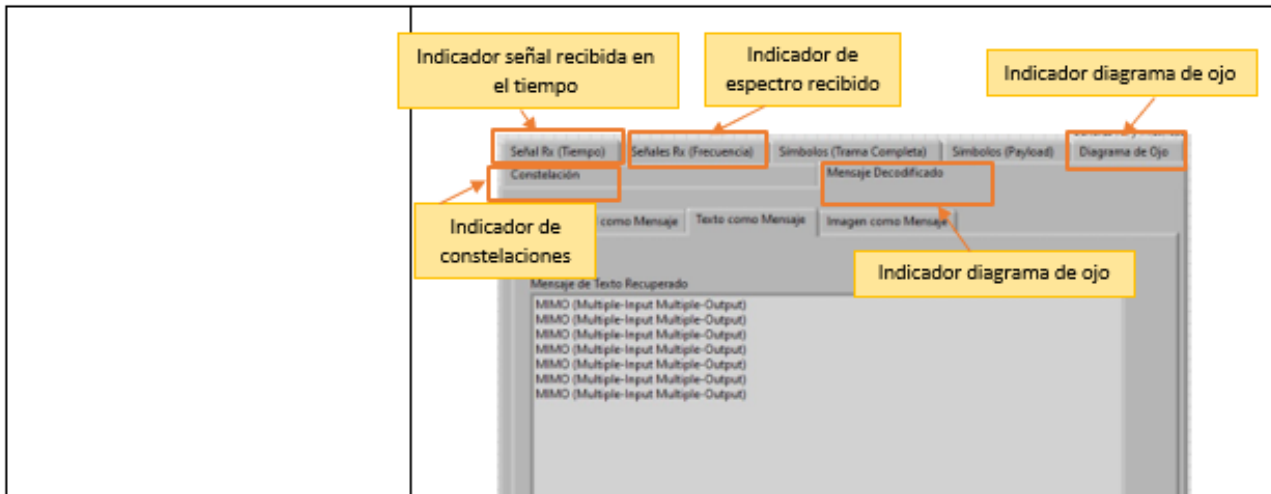


Figura 20 Indicadores en el receptor para evaluar el funcionamiento del Sistema

4.2. Verificación del espectro

Investigue el número de subportadoras que utilizan todos los estándares de comunicaciones inalámbricas ieee 802.11 indicados más abajo, analiza el espectro de la trama transmitida y recibida para cada uno de ellos y verifica el ancho de banda con el analizador de espectros. Puedes usar el analizador de espectros para el USRP.

- a) 802.11
- b) 802.11a
- c) 802.11b
- d) 802.11c
- e) 802.11d
- f) 802.11e
- g) 802.11f
- h) 802.11g

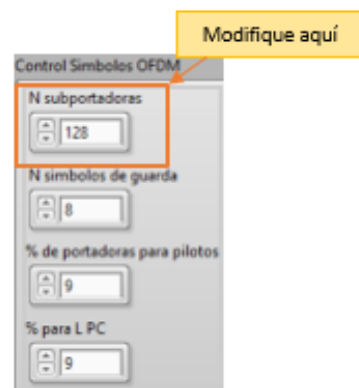


Figura 21 Edición número de subportadoras en base a los estándares ieee 802.11

Lo presentado en la Figura 21 pertenece a la configuración del control de modulación OFDM en el transmisor y receptor, se enmarca en rojo la selección del "Numero de subportadoras" que deberá modificar en base a los solicitado.

4.3. Tabule y compare resultados

En base a las pruebas solicitadas en el punto 4.2 complete la Tabla 1 hasta la Tabla 8, compare los resultados con base a las gráficas del transmisor

4.4. En base a los resultados obtenidos en el punto 4.3 responda las siguientes preguntas

Responda: ¿Qué diferencias observa en el espectro de la trama transmitida y recibida para cada estándar, considerando la implementación de Alamouti y la modulación OFDM? ¿Cómo varía el ancho de banda de las tramas transmitidas y recibidas en cada estándar según lo medido con el analizador de espectros, y qué impacto tiene esto en el diseño del sistema MIMO 2x2 con Alamouti y OFDM? ¿Existe alguna relación entre el número de subportadoras y el ancho de banda de las tramas en los diferentes estándares, y cómo afecta esto a la implementación de Alamouti y OFDM en un entorno real? ¿Qué conclusiones puede sacar al comparar los resultados obtenidos para cada estándar? ¿Cómo cree que estas diferencias entre los estándares podrían impactar en la capacidad de transmisión y recepción del sistema MIMO 2x2 con Alamouti y OFDM en diferentes escenarios de aplicación?

4.5. Repita las configuraciones del punto 4.1 y evalúe el comportamiento del sistema para diferentes valores de repeticiones de la secuencia de entrenamiento y diferentes valores de sobremuestreo

Dentro de la pestaña control de preámbulo modifique el control nombrado "NoRepeticionesSeq Sync" como se indica enmarcado en rojo en la figura se deberá realizar las pruebas con los valores de 9, 12 y 15, también deberá ajustar el valor del sobremuestreo para 6 y 12 como se indica enmarcado en rojo en la figura 9.

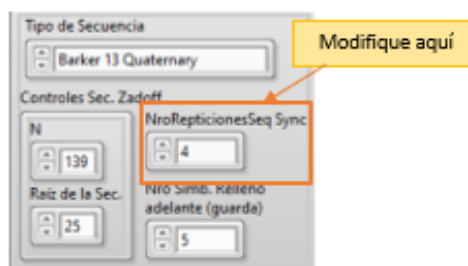


Figura 22 Editar valor número de repeticiones del preámbulo

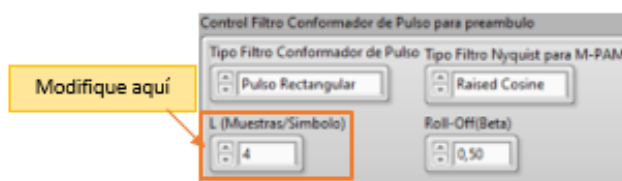


Figura 23 Editar valores de sobremuestreo

4.6. Tabule y compare resultados

En base a las modificaciones solicitadas en el punto 4.5 complete la Tabla 9 hasta la Tabla 14, compare los resultados con base a las gráficas del transmisor

4.7. Responda las preguntas en base a los resultados del punto 4.6

Responda: ¿Cómo afecta el número de repeticiones de la secuencia de entrenamiento al comportamiento del sistema MIMO 2x2 con Alamouti y OFDM? ¿Qué impacto tiene el valor de sobremuestreo en el comportamiento del sistema? ¿Cómo se refleja esta variación en

	<p>las características de la señal transmitida y recibida, y qué consideraciones tendrías en cuenta al seleccionar un valor óptimo de sobremuestreo para el sistema? ¿Qué conclusiones pudo sacar al comparar los resultados obtenidos para diferentes valores de repeticiones de la secuencia de entrenamiento y de sobremuestreo? ¿Qué estrategias propondría utilizar para optimizar el desempeño del sistema MIMO 2x2 con Alamouti y OFDM en función de los resultados obtenidos en estas pruebas?</p> <p>4.8. Reto (Opcional) Implementar al sistema MIMO 2x2 utilizando la técnica de Alamouti en conjunto con OFDM en un entorno con antenas inteligentes y movimiento controlado. El objetivo es evaluar cómo el sistema se comporta cuando las antenas pueden moverse de manera inteligente para adaptarse a las condiciones del canal y optimizar la calidad de la señal. Comente el proceso que realizaría para que sean posibles estos cambios.</p>
	<p>5. Genere conclusiones y recomendaciones a partir del análisis de los resultados obtenidos.</p>
<p>ACTIVIDADES POR DESARROLLAR</p>	
<p>1. LISTADO DE HERRAMIENTAS Y MATERIALES</p> <p>Herramientas y Materiales</p> <ul style="list-style-type: none"> • USRP X310. • Antenas doble banda. • Cable ethernet cat 6. • Software Labview. • Plugins de Labview: Modulation Toolkit, USRP Toolkit <p>2. MARCO TEORICO</p> <p>De acuerdo con el punto 1 de la sección anterior, realice el marco teórico de cada uno de los ítems indicados. Además, incluya información sobre las modulaciones del tipo M-QAM y sus constelaciones.</p> <p>a. Introducción a MIMO 2x2 y OFDM:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Describa brevemente las tecnologías MIMO 2x2 (Multiple Input Multiple Output) y OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). • Explique cómo MIMO y OFDM se combinan para mejorar el rendimiento y la eficiencia espectral de los sistemas de comunicación inalámbrica. <p>b. Principios de la Codificación Alamouti en un Contexto OFDM:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Investigue y defina cómo se puede aplicar la codificación Alamouti en un sistema OFDM para aprovechar las ventajas de la diversidad espacial. • Describe cómo se distribuyen los símbolos codificados en múltiples subportadoras ortogonales en un sistema OFDM. <p>c. Ventajas de la Combinación de MIMO y OFDM:</p>	

- Analice las ventajas de combinar MIMO y OFDM, como la mejora en la capacidad del canal, la mitigación del desvanecimiento selectivo de canal y la eficiencia espectral mejorada.
- d. Aplicaciones de OFDM:
- Investigue y defina cómo se implementa OFDM en el estándar IEEE 802.11a (Wi-Fi), indique como trabaja la trama en el estándar 802.11a y cómo se beneficia de las características de OFDM, como la inmunidad al desvanecimiento selectivo de canal y la alta eficiencia espectral.

Puede utilizar las siguientes fuentes bibliográficas ([Barbecho, Paule & Narváez, 2024](#); [Clerckx & Qasab, 2013](#); [Heath, 2017](#); [Paulraj et al., 2003](#); [Yong et al., 2010](#))

3.1. EXPERIMENTACIÓN

3.1. Siga las instrucciones del punto 4.2 y complete el punto 4.3

Utilizando una fuente de texto a bits con una modulación 4QAM complete el punto 4.3 de las instrucciones investigar y detallar el número de subportadoras para los estándares ieee 802.11.

Tabla 1 Pruebas con estándar 802.11

Estándar 802.11	Transmisor	Receptor
Espectro señal	Coloque aquí captura del espectro transmitido	Coloque aquí captura del espectro recibido
Ancho de banda	Coloque aquí el ancho de banda con el analizador de espectros	
Número de subportadoras que utiliza el estándar	Coloque aquí el número de subportadoras utiliza este estándar	

Tabla 2 Pruebas con estándar 802.11a

Estándar 802.11 a	Transmisor	Receptor
Espectro señal	Coloque aquí captura del espectro transmitido	Coloque aquí captura del espectro recibido
Ancho de banda	Coloque aquí el ancho de banda con el analizador de espectros	
Número de subportadoras que utiliza el estándar	Coloque aquí el número de subportadoras utiliza este estándar	

Tabla 3 Pruebas con estándar 802.11b

Estándar 802.11b	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque aquí captura del espectro transmitido	Coloque aquí captura del espectro recibido
Constelación	Coloque aquí el ancho de banda con el analizador de espectros	
Diagrama de ojo	Coloque aquí el número de subportadoras utiliza este estándar	

Tabla 4 Pruebas con estándar 802.11c

Estándar 802.11c	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque aquí captura del espectro transmitido	Coloque aquí captura del espectro recibido

Constelación	Coloque aquí el ancho de banda con el analizador de espectros
Diagrama de ojo	Coloque aquí el número de subportadoras utiliza este estándar

Tabla 5 Pruebas con estándar 802.11 d

Estándar 802.11d	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque aquí captura del espectro transmitido	Coloque aquí captura del espectro recibido
Constelación	Coloque aquí el ancho de banda con el analizador de espectros	
Diagrama de ojo	Coloque aquí el número de subportadoras utiliza este estándar	

Tabla 6 Pruebas con estándar 802.11e

Estándar 802.11e	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque aquí captura del espectro transmitido	Coloque aquí captura del espectro recibido
Constelación	Coloque aquí el ancho de banda con el analizador de espectros	
Diagrama de ojo	Coloque aquí el número de subportadoras utiliza este estándar	

Tabla 7 Pruebas con estándar 802.11f

Estándar 802.11f	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque aquí captura del espectro transmitido	Coloque aquí captura del espectro recibido
Constelación	Coloque aquí el ancho de banda con el analizador de espectros	
Diagrama de ojo	Coloque aquí el número de subportadoras utiliza este estándar	

Tabla 8 Pruebas con estándar 802.11g

Estándar 802.11g	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque aquí captura del espectro transmitido	Coloque aquí captura del espectro recibido
Constelación	Coloque aquí el ancho de banda con el analizador de espectros	
Diagrama de ojo	Coloque aquí el número de subportadoras utiliza este estándar	

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

3.2. Analice los resultados obtenidos en el punto 3.1 y conteste las preguntas del punto 4.4 de las instrucciones

Responda:

- ¿Qué diferencias observa en el espectro de la trama transmitida y recibida para cada estándar, considerando la implementación de Alamouti y la modulación OFDM?
- ¿Cómo varía el ancho de banda de las tramas transmitidas y recibidas en cada estándar según lo medido con el analizador de espectros, y qué impacto tiene esto en el diseño del sistema MIMO 2x2 con Alamouti y OFDM?
- ¿Existe alguna relación entre el número de subportadoras y el ancho de banda de las tramas en los diferentes estándares, y cómo afecta esto a la implementación de Alamouti y OFDM en un entorno real?
- ¿Qué conclusiones puede sacar al comparar los resultados obtenidos para cada estándar?
- ¿Cómo cree que estas diferencias entre los estándares podrían impactar en la capacidad de transmisión y recepción del sistema MIMO 2x2 con Alamouti y OFDM en diferentes escenarios de aplicación?

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

3.3. Siga las instrucciones del punto 4.5. y complete las tablas solicitadas en el punto 4.6 de las instrucciones

Tabla 9 Mediciones con 9 repeticiones de preambulo y un valor de sobremuestreo de 6

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Señal transmitida/recibida en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Espectro señal	Coloque aquí captura del espectro transmitido	Coloque aquí captura del espectro recibido

Tabla 10 Mediciones con 12 repeticiones de preambulo y un valor de sobremuestreo de 6

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Señal transmitida/recibida en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Espectro señal	Coloque aquí captura del espectro transmitido	Coloque aquí captura del espectro recibido

Tabla 11 Mediciones con 15 repeticiones de preambulo y un valor de sobremuestreo de 6

	Transmisor	Receptor
--	------------	----------

Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Señal transmitida/recibida en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Espectro señal	Coloque aquí captura del espectro transmitido	Coloque aquí captura del espectro recibido

Tabla 12 Mediciones con 9 repeticiones de preambulo y un valor de sobremuestreo de 12

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Señal transmitida/recibida en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Espectro señal	Coloque aquí captura del espectro transmitido	Coloque aquí captura del espectro recibido

Tabla 13 Mediciones con 12 repeticiones de preambulo y un valor de sobremuestreo de 12

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Señal transmitida/recibida en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Espectro señal	Coloque aquí captura del espectro transmitido	Coloque aquí captura del espectro recibido

Tabla 14 Mediciones con 15 repeticiones de preambulo y un valor de sobremuestreo de 12

	Transmisor	Receptor
Fuente de información (texto)	Coloque una captura del texto transmitido	Coloque una captura del texto recibido
Constelación	Coloque las capturas de las constelaciones transmitidas en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de las constelaciones recibidas en las antenas R_{x1} y R_{x2}

Diagrama de ojo	Coloque las capturas de los diagramas de ojo transmitidos en las antenas T_{x1} y T_{x2}	Coloque las capturas de los diagramas de ojo recibidos en las antenas R_{x1} y R_{x2}
Señal transmitida/recibida en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a transmitir en el dominio del tiempo	Coloque una captura de la señal a recibir en el dominio del tiempo
Espectro señal	Coloque aquí captura del espectro transmitido	Coloque aquí captura del espectro recibido

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

3.4. Analice los resultados del punto anterior y conteste las preguntas del punto 4.7 de las instrucciones

Responda:

¿Cómo afecta el número de repeticiones de la secuencia de entrenamiento al comportamiento del sistema MIMO 2x2 con Alamouti y OFDM?

¿Qué impacto tiene el valor de sobremuestreo en el comportamiento del sistema?

¿Cómo se refleja esta variación en las características de la señal transmitida y recibida, y qué consideraciones tendrías en cuenta al seleccionar un valor óptimo de sobremuestreo para el sistema?

¿Qué conclusiones pudo sacar al comparar los resultados obtenidos para diferentes valores de repeticiones de la secuencia de entrenamiento y de sobremuestreo?

¿Qué estrategias propondría utilizar para optimizar el desempeño del sistema MIMO 2x2 con Alamouti y OFDM en función de los resultados obtenidos en estas pruebas?

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

3.5. Lea las instrucciones del punto 4.8 de las instrucciones y complete el reto (Opcional)

Comente el proceso que realizaría para que sean posibles estos cambios

Coloque fotografías del resultado

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

CONCLUSIONES:

-

RECOMMENDACIONES:

-

REFERENCIAS	
Autor1:	Autor2:
Autor3:	Autor4:
RECOMMENDACIONES: •	
REFERENCIAS <p>Barbecho Paute, P. A., & Narváez Arias, D. L. (2024). <i>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA [DEGREE THESIS]</i>. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.</p> <p>Clerckx, B., & Oestges, C. (2013). <i>MIMO Wireless Networks</i> (Academic Press is an imprint of Elsevier, Ed.; Second). Heath, R. (2017). <i>Introduction to Wireless Digital Communication</i>.</p> <p>Paulraj, Arogyaswami, Nabar, Rohit., & Gore, Dhananjay. (2003). <i>Introduction to space-time wireless communications</i>. Cambridge University Press.</p> <p>Yong, S. C., Jaekwon, K., Won, Y. Y., & Chung-Gu, K. (2010). <i>MIMO-OFDM WIRELESS COMMUNICATIONS WITH MATLAB O</i>. IEEE PRESS.</p>	
Autor1:	Autor2:
Autor3:	Autor4:

3.5. Transmisor MIMO con STM D-Blast

El objetivo general de esta práctica es proporcionar a los estudiantes una sólida base teórica y práctica en la técnica de D-Blast. A través de una combinación de estudios teóricos y actividades prácticas, los estudiantes explorarán los principios fundamentales de D-Blast y su papel en la transmisión de datos en sistemas **MIMO**.

Los objetivos específicos están diseñados para guiar a los estudiantes a través de diferentes aspectos de la implementación y evaluación del sistema D-Blast. Desde el diseño del transmisor hasta la implementación de la modulación y multiplexación espacial en LabVIEW, se planea que los estudiantes adquieran habilidades prácticas y técnicas que son esenciales en el campo de las comunicaciones inalámbricas.

Un aspecto crucial de esta práctica es el análisis de la distribución de datos entre las antenas y la generación de señales para la transmisión simultánea en el esquema D-Blast. Esta actividad permite a los estudiantes comprender cómo se distribuyen los datos entre las antenas y cómo se generan las señales para la transmisión simultánea, lo que enriquece su comprensión de la técnica D-Blast en un contexto práctico.

Finalmente, los estudiantes evalúan el rendimiento del sistema D-Blast mediante simulaciones en LabVIEW. Esta evaluación proporciona información valiosa sobre la eficacia y eficiencia del sistema D-Blast de 2 antenas, lo que ayuda a los estudiantes a comprender cómo se comporta la técnica en diferentes condiciones y escenarios.

		FORMATO DE GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO / TALLERES / CENTROS DE SIMULACIÓN – PARA DOCENTES
CARRERA: TELECOMUNICACIONES		ASIGNATURA: COMUNICACIONES INALAMBRICAS
NRO. PRÁCTICA:	5	TÍTULO PRÁCTICA: Estudio de la multiplexación espacial D-Blast para una transmisión inalámbrica MIMO
OBJETIVO GENERAL: Estudiar la multiplexación espacial D-Blast para una transmisión inalámbrica MIMO múltiple.		
OBJETIVOS ESPECÍFICOS: <ol style="list-style-type: none"> 1. Comprender los fundamentos teóricos de la técnica de D-Blast. 2. Diseñar el transmisor para un sistema D-Blast de 2 antenas en LabVIEW. 3. Implementar la modulación y la multiplexación espacial necesarias para el sistema D-Blast utilizando LabVIEW. 4. Analizar la distribución de los datos entre las antenas y la generación de señales para la transmisión simultánea en el esquema D-Blast. 5. Evaluar el rendimiento del sistema D-Blast de 2 antenas mediante simulaciones en LabVIEW 		
INSTRUCCIONES	1. Estudie los siguientes conceptos y defina las características más importantes de cada uno <ol style="list-style-type: none"> a) Multiplexación espacial D-Blast: <ul style="list-style-type: none"> • Describa los fundamentos de la técnica de D-Blast en sistemas MIMO. • Explique cómo D-Blast aprovecha la diagonalización de la matriz de canal para transmitir múltiples flujos de datos simultáneamente. b) Comparación con Alamouti: <ul style="list-style-type: none"> • Compare D-Blast con el esquema de codificación Alamouti, destacando las diferencias en la distribución de los datos y la transmisión simultánea. • Realice una tabla comparativa de las ventajas y desventajas de utilizar Alamouti y D-Blast. c) Distribución de Datos y Asignación de Antenas: <ul style="list-style-type: none"> • Detalle cómo se distribuyen los datos entre las antenas para su transmisión simultánea. d) Beneficios y Aplicaciones: <ul style="list-style-type: none"> • Destaca los beneficios de D-Blast, como el aumento de la tasa de transmisión y la mejora en el rendimiento del sistema en términos de capacidad y confiabilidad. • Menciona las aplicaciones prácticas de D-Blast en sistemas de comunicación inalámbrica, como en redes Wi-Fi y sistemas de comunicación celular avanzados. 	
	2. Multiplexación D-Blast bajo un entorno de simulación para un canal MIMO <ol style="list-style-type: none"> 2.1. Construcción Multiplexor D-Blast Construya la matriz diagonal de D-Blast en base a las siguientes instrucciones: 	

Inicialice el programa "Simulador_D_Blast_Practica5_Estudiante" y siga los pasos del punto 3.1 en donde encontrara el VI de la Figura 1



Figura 1 sub VI D-Blast

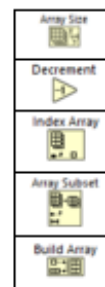
El VI se encontrará de esta manera como se observa en la figura xxx



Figura 2 VI Multiplexor D-Blast incompleto

Los bloques necesarios para armar el bloque de D-Blast se indican en la Tabla 1.

Tabla 1 Bloque utilizados para el multiplexor D-Blast



Comencemos guiándonos de la Figura 2, conectaremos la entrada del bloque Array Size a 1, la salida del bloque Array Size a la entrada del bloque Decrement la salida del bloque Decrement a la segunda entrada del bloque Index Array la primer entrada del bloque Index Array a 1 la salida del bloque Index Array a la primer entrada del bloque Build Array y la segunda entrada del bloque Build Array ira conectada a la salida del bloque Array Subset, la primer entrada del bloque Array Subset ira conectada a 1, la segunda entrada estar conectada a una constante de valor 0, la tercer entrada a la salida del bloque Decrement por último la salida del bloque build array ira conectada a 3.

3. Consideraciones para usar el archivo principal de simulación

3.1. Diagrama de bloques del sistema

En la Figura 3 se presenta el diagrama de bloques que conforman el sistema MIMO 2x2 STBC Alamouti, a partir de aquello seguiremos las instrucciones para poder abrir y utilizar el simulador.



Figura 3 Diagrama de Bloques sistema D-Blast

Ingrese dentro de la carpeta del proyecto nombrado "Programas_MIMO_Estudiantes Folder" como se indica en la Figura 4



Figura 4 practica 2

Dentro de este de doble clic en el proyecto principal con el nombre "Programas_MIMO_Estudiantes" como en indica enmarcado de rojo en la Figura 5.

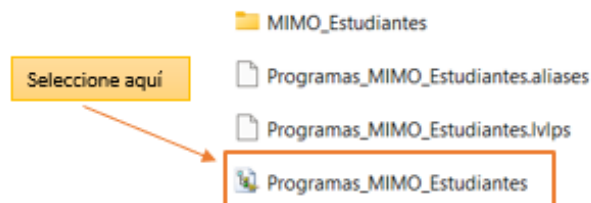


Figura 5 Instrucción abra el proyecto principal

Al abrir el proyecto principal lo llevará al simulador de LabVIEW y se abrirá la pestaña del proyecto principal, deberá dar clic encima del signo + al lado del nombre "5_Transmisor_D-Blast" como se enmarca de rojo en la Figura 6.

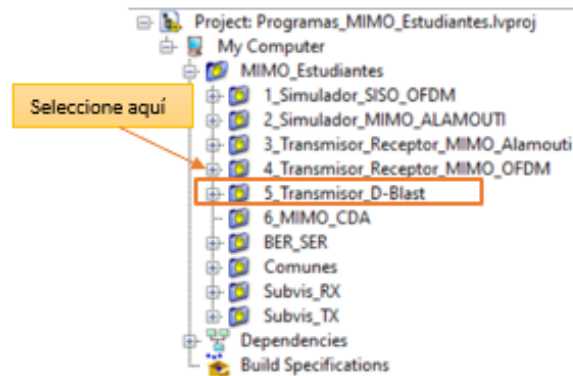


Figura 6 Pestaña proyecto principal

Al desplegarse las opciones de capetas del proyecto principal, deberá dar clic en el VI nombrado "Siimulador_D_Blast_Tx.vi" como se indica enmarcado de rojo en la Figura 7

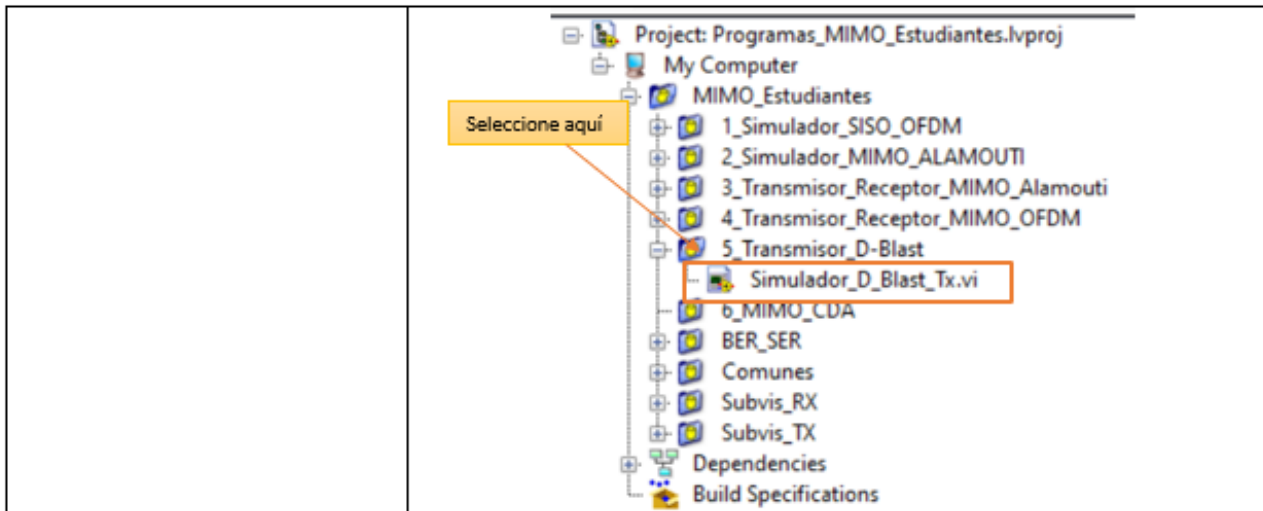


Figura 7 Seleccione el VI Simulador_Alamouti_TX_RX_V1.vi

Al seleccionar el VI de la Figura 7 finalmente se abrirá el simulador como se indica en la Figura 8

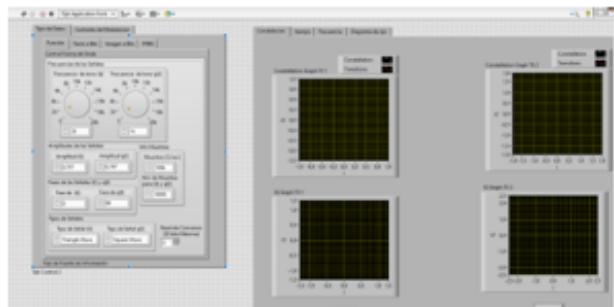


Figura 8 Simulador listo para utilizar

4. Evaluación del sistema

4.1. Configuraciones para evaluar el sistema

- **TRANSMISOR**

Ingrese a la pestaña Tipo de Datos y seleccione "Texto a Bits" como fuente de información a enviar como se muestra en la Figura 9.

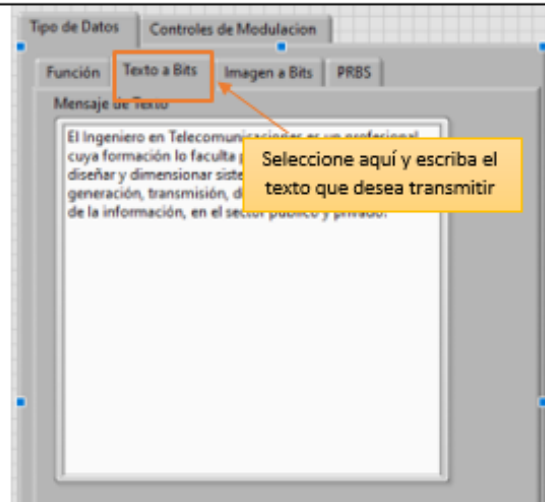


Figura 9 Configuración fuente de información a transmitir

Seguidamente seleccione la pestaña nombrada controles de modulación, dentro de esta deberá ajustar los “**Controles generales de la modulación**” como se indica en la Figura 10 también se deberá ajustar el “**SNR**” como se indica en la Figura 11, por último se debe configurar los “**controles de preámbulo**” como se indica en la Figura 12 , el resultado deberá verse como se muestra en la Figura 13

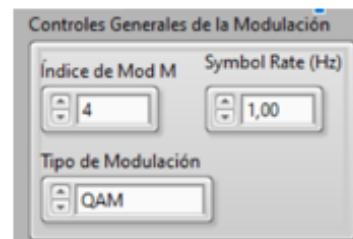


Figura 10 Configuración controles generales de modulación

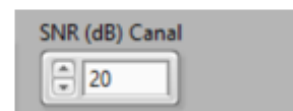


Figura 11 Configuración SNR

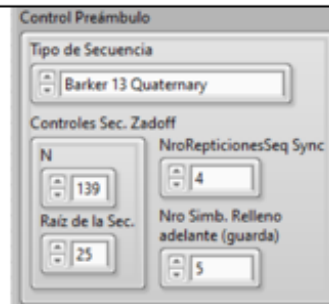


Figura 12 Configuraciones control de preámbulo



Figura 13 Ajustes generales sistema transmisor

4.2. Verificación de matriz diagonal D-Blast

Analice el sistema e identifique la matriz que se forma a la salida del multiplexor D-BLAST.

Inserte una captura de la matriz resultante.

4.3. En base al resultado del punto 4.2 complete las siguientes preguntas

Responda: Explique: Basándose en el marco teórico proporcionado, ¿cómo debería ser la matriz resultante en términos de su estructura y propiedades? ¿Qué similitudes o diferencias observo entre la matriz resultante en la simulación y lo esperado según la teoría analizada en el marco teórico? ¿Qué representa cada fila de la matriz de salida del codificador de D-Blast? Explique cómo se relaciona cada fila de la matriz con los datos transmitidos desde cada antena. ¿Por qué es importante la distribución de los datos en las diferentes filas de la matriz en D-Blast? Analice cómo esta distribución afecta la capacidad del sistema para transmitir múltiples flujos de datos simultáneamente. ¿Cómo se logra la diversidad espacial en D-Blast a través de la matriz de salida del codificador? Describa cómo la configuración de la matriz proporciona diversidad espacial, lo que permite una mejor calidad de la señal y una mayor confiabilidad de la transmisión. ¿Qué significa que la matriz de salida del codificador de D-Blast sea diagonal? Explique cómo esta propiedad permite que los símbolos transmitidos sean ortogonales entre sí, lo que facilita la separación y la detección en el receptor. ¿Cómo afectaría la presencia de elementos fuera de la diagonal en la matriz de salida del codificador de D-Blast a la eficiencia del sistema? Indique cómo la presencia de elementos fuera de la diagonal puede introducir interferencia entre los flujos de datos

	<p>transmitidos, lo que podría afectar negativamente el rendimiento del sistema.</p> <p>4.4. Repita el punto 4.1 evaluándolo para diferentes preámbulos Analice el comportamiento del sistema transmisor, para los diferentes tipos de preámbulo que se indican más abajo.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zadoff-Chu • Barker 11 binaria • Barker 13 binaria • Barker 11 Cuaternaria • Barker 13 Cuaternaria • Frank 16 <p>4.5. Tabule y compare resultados En base a las pruebas solicitadas en el punto 4.5 complete la Tabla 2, Tabla 3, Tabla 4, Tabla 5, Tabla 6 y la Tabla 7, compare los resultados observados de las constelaciones antes y después de atravesar el canal y los espectros transmitidos.</p> <p>4.6. Basándose en los resultados obtenidos del punto 4.5 responda las siguientes preguntas</p> <p>Responda: ¿Cómo varía la constelación de la señal transmitida antes y después de pasar por el canal simulado MIMO? ¿Qué diferencias observa en la distribución de los símbolos en la constelación después de pasar por el canal MIMO en comparación con la constelación original? ¿Cómo influye el tipo de preámbulo utilizado en la modificación de la constelación de la señal transmitida después de pasar por el canal MIMO? ¿Qué papel juega el multiplexor D-Blast en la transmisión de datos en un sistema MIMO y cómo afecta esto a la constelación de la señal? ¿Cómo podría explicar las variaciones en la constelación de la señal observadas después de pasar por el canal MIMO en términos de la estructura de la matriz resultante del multiplexor D-Blast? ¿Qué impacto tendría la presencia de interferencia entre los símbolos transmitidos en la constelación de la señal después de pasar por el canal MIMO, considerando el funcionamiento del multiplexor D-Blast? ¿Qué información proporciona el análisis del espectro transmitido sobre la distribución de energía de la señal en el dominio de la frecuencia? ¿Cuáles son las diferencias observadas en el espectro transmitido al variar los preámbulos y cómo se relaciona esto con la eficiencia de la transmisión? ¿Qué impacto tiene la selección de la secuencia de preámbulo en la ocupación espectral de la señal transmitida?</p> <p>4.7. Reto En base al programa ya realizado, Implementar el receptor de D-Blast en LabVIEW para recibir y decodificar correctamente las señales transmitidas utilizando la técnica de D-Blast en un sistema MIMO. Una vez implementado, el receptor debe ser sometido a pruebas en un entorno de laboratorio para validar su funcionamiento y optimizar su rendimiento.</p>
--	---

	<p>5. Genere conclusiones y recomendaciones a partir del análisis de los resultados obtenidos.</p>
<p>ACTIVIDADES POR DESARROLLAR</p>	
<p>1. MARCO TEORICO</p> <p>De acuerdo con el punto 1 de la sección anterior, realice el marco teórico de cada uno de los ítems indicados.</p> <p>a. Introducción a D-Blast:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Describa los fundamentos de la técnica de D-Blast en sistemas MIMO. • Explique cómo D-Blast aprovecha la diagonalización de la matriz de canal para transmitir múltiples flujos de datos simultáneamente. <p>b. Comparación con Alamouti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Compare D-Blast con el esquema de codificación Alamouti, destacando las diferencias en la distribución de los datos y la transmisión simultánea. • Realice una tabla comparativa de las ventajas y desventajas de utilizar Alamouti y D-Blast. <p>c. Distribución de Datos y Asignación de Antenas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Detalle cómo se distribuyen los datos entre las antenas para su transmisión simultánea. <p>d. Beneficios y Aplicaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Destaca los beneficios de D-Blast, como el aumento de la tasa de transmisión y la mejora en el rendimiento del sistema en términos de capacidad y confiabilidad. • Menciona las aplicaciones prácticas de D-Blast en sistemas de comunicación inalámbrica, como en redes Wi-Fi y sistemas de comunicación celular avanzados. <p>Puede guiarse de las siguientes fuentes bibliográficas (Barbecho Paute & Narváez Arias, 2024; Clerckx & Oestges, 2013; Heath, 2017; Paulraj et al., 2003; Yong et al., 2010)</p>	
<p>2. EXPERIMENTACIÓN</p> <p>2.1. Configure el sistema según lo mostrado en el punto 4.1 y siga las instrucciones del punto 4.2</p> <p>Coloque aquí la captura del resultado de la matriz de D-Blast</p> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div> <p>Análisis de Resultados de la sección: Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección</p> <hr/> <p>2.2. Responda las siguientes preguntas indicadas en el punto 4.3</p> <p>Responda</p> <ul style="list-style-type: none"> • Basándose en el marco teórico proporcionado, ¿cómo debería ser la matriz resultante en términos de su estructura y propiedades? • ¿Qué similitudes o diferencias observo entre la matriz resultante en la simulación y lo esperado según la teoría analizada en el marco teórico? • ¿Qué representa cada fila de la matriz de salida del codificador de D-Blast? Explique cómo se relaciona cada fila de la matriz con los datos transmitidos desde cada antena. 	

- ¿Por qué es importante la distribución de los datos en las diferentes filas de la matriz en D-Blast? Analice cómo esta distribución afecta la capacidad del sistema para transmitir múltiples flujos de datos simultáneamente.
- ¿Cómo se logra la diversidad espacial en D-Blast a través de la matriz de salida del codificador? Describa cómo la configuración de la matriz proporciona diversidad espacial, lo que permite una mejor calidad de la señal y una mayor confiabilidad de la transmisión.
- ¿Qué significa que la matriz de salida del codificador de D-Blast sea diagonal? Explique cómo esta propiedad permite que los símbolos transmitidos sean ortogonales entre sí, lo que facilita la separación y la detección en el receptor.
- ¿Cómo afectaría la presencia de elementos fuera de la diagonal en la matriz de salida del codificador de D-Blast a la eficiencia del sistema? Indique cómo la presencia de elementos fuera de la diagonal puede introducir interferencia entre los flujos de datos transmitidos, lo que podría afectar negativamente el rendimiento del sistema.

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

2.3. Tomando como base las instrucciones del punto 4.4 complete la tabla solicitada en el punto 4.5

Tabla 2 Análisis de constelaciones con preámbulo Zadoff-Chu

	Sin atravesar el canal	Atravesando el canal
Constelación	Coloque aquí captura de la constelación antes de a travesar el canal	Coloque aquí captura de la constelación después de a travesar el canal
Espectro Transmitido	Coloque aquí captura del espectro transmitido	

Tabla 3 Análisis de constelaciones con preámbulo Barker 11 binaria

	Sin atravesar el canal	Atravesando el canal
Constelación	Coloque aquí captura de la constelación antes de a travesar el canal	Coloque aquí captura de la constelación después de a travesar el canal
Espectro Transmitido	Coloque aquí captura del espectro transmitido	

Tabla 4 Análisis de constelaciones con preámbulo Barker 13 binaria

	Sin atravesar el canal	Atravesando el canal
Constelación	Coloque aquí captura de la constelación antes de a travesar el canal	Coloque aquí captura de la constelación después de a travesar el canal
Espectro Transmitido	Coloque aquí captura del espectro transmitido	

Tabla 5 Análisis de constelaciones con preámbulo Barker 11 Cuaternaria

	Sin atravesar el canal	Atravesando el canal
Constelación	Coloque aquí captura de la constelación antes de a travesar el canal	Coloque aquí captura de la constelación después de a travesar el canal
Espectro Transmitido	Coloque aquí captura del espectro transmitido	

Tabla 6 Análisis de constelaciones con preámbulo Barker 13 Cuaternaria

	Sin atravesar el canal	Atravesando el canal
--	-------------------------------	-----------------------------

Constelación	Coloque aquí captura de la constelación antes de a travesar el canal	Coloque aquí captura de la constelación después de a travesar el canal
Espectro Transmitido	Coloque aquí captura del espectro transmitido	

Tabla 7 Análisis de constelaciones con preámbulo Frank 16

	Sin atravesar el canal	Atravesando el canal
Constelación	Coloque aquí captura de la constelación antes de a travesar el canal	Coloque aquí captura de la constelación después de a travesar el canal
Espectro Transmitido	Coloque aquí captura del espectro transmitido	

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

2.4. En base a los resultados del punto 2.4, siga las instrucciones del punto 4.5

Responda:

- ¿Cómo varía la constelación de la señal transmitida antes y después de pasar por el canal simulado MIMO?
- ¿Qué diferencias observa en la distribución de los símbolos en la constelación después de pasar por el canal MIMO en comparación con la constelación original?
- ¿Cómo influye el tipo de preámbulo utilizado en la modificación de la constelación de la señal transmitida después de pasar por el canal MIMO?
- ¿Qué papel juega el multiplexor D-Blast en la transmisión de datos en un sistema MIMO y cómo afecta esto a la constelación de la señal?
- ¿Cómo podría explicar las variaciones en la constelación de la señal observadas después de pasar por el canal MIMO en términos de la estructura de la matriz resultante del multiplexor D-Blast?
- ¿Qué impacto tendría la presencia de interferencia entre los símbolos transmitidos en la constelación de la señal después de pasar por el canal MIMO, considerando el funcionamiento del multiplexor D-Blast?
- ¿Qué información proporciona el análisis del espectro transmitido sobre la distribución de energía de la señal en el dominio de la frecuencia?
- ¿Cuáles son las diferencias observadas en el espectro transmitido al variar los preámbulos y cómo se relaciona esto con la eficiencia de la transmisión?
- ¿Qué impacto tiene la selección de la secuencia de preámbulo en la ocupación espectral de la señal transmitida?

Análisis de Resultados de la sección:

Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección

2.5. Realice el reto planteado en el punto 4.6 de las instrucciones

En base al programa ya realizado, Implementar el receptor de D-Blast en LabVIEW para recibir y decodificar correctamente las señales transmitidas utilizando la técnica de D-Blast en un sistema MIMO. Una vez implementado, el receptor debe ser sometido a pruebas en un entorno de laboratorio para validar su funcionamiento y optimizar su rendimiento.

Coloque aquí las imágenes de los sub VI que realizo para el programa del receptor

Coloque aquí diagrama de bloques utilizado para la generación del receptor de D-Blast.

<p>Análisis de Resultados de la sección: Desarrolle aquí el análisis de resultados y discusión de esta sección</p>	
<p>CONCLUSIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 	
<p>RECOMMENDACIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 	
<p>REFERENCIAS</p> <p>Barbecho Paute, P. A., & Narváez Arias, D. L. (2024). <i>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA [DEGREE THESIS]. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.</i></p> <p>Clerckx, B., & Oestges, C. (2013). <i>MIMO Wireless Networks</i> (Academic Press is an imprint of Elsevier, Ed.; Second).</p> <p>Heath, R. (2017). <i>Introduction to Wireless Digital Communication.</i></p> <p>Paulraj, Arogyaswami, Nabar, Rohit., & Gore, Dhananjay. (2003). <i>Introduction to space-time wireless communications</i> Cambridge University Press.</p> <p>Yong, S. C., Jaekwon, K., Won, Y. Y., & Chung-Gu, K. (2010). <i>MIMO-OFDM WIRELESS COMMUNICATIONS WITH MATLAB</i> Ó. IEEE PRESS.</p>	
Autor1:	Autor2:
Autor3:	Autor4:

Capítulo 4

Conclusiones y Trabajos Futuros

Durante el desarrollo de este proyecto, se exploraron y analizaron diversas técnicas relacionadas con la transmisión inalámbrica **MIMO**. El principal enfoque se centró en la implementación y evaluación del sistema **MIMO** de al menos 2×2 de forma que se pueda identificar las técnicas que permiten obtener la diversidad espacial y/o temporal, es específico usando codificación espacio-temporal Alamouti y multiplexación espacial **D-BLAST**. Se muestra desde el punto de vista de la implementación con SDRs un proceso que permita no solo usar Alamouti, sino también combinarlo con multiplexación por división de frecuencias ortogonales (**OFDM**) para maximizar el uso del espectro, que puede ser verificado por parte del estudiante al desarrollar las prácticas correspondientes propuestas. Así, a través del desarrollo de este trabajo se identificó que establecer un proceso ordenado de operación del sistema de comunicaciones permite o facilita el proceso de entendimiento del mismo.

El proyecto proporcionó una valiosa experiencia práctica en la configuración y operación de equipos de laboratorio, como el **USRP X310** y el analizador de espectros. Se adquirieron habilidades en la configuración de parámetros de transmisión, análisis de espectros y diagnóstico de problemas de comunicación. En general, los objetivos establecidos al inicio del proyecto se lograron satisfactoriamente: Se logró una comprensión sólida de los principios teóricos detrás de las técnicas de **MIMO**, como la diversidad espacial, la multiplexación espacial y la codificación espacial Alamouti. Se diseñó y se implementó con éxito un sistema **MIMO** 2×2 utilizando LabVIEW y

el equipo USRP X310, permitiendo la transmisión y recepción simultánea de datos a través de múltiples antenas. Se diseñó y se implementó con éxito un sistema MIMO 2×2 utilizando LabVIEW y el equipo USRP X310, permitiendo la transmisión y recepción simultánea de datos a través de múltiples antenas.

Con el desarrollo de los experimentos a través del diseño del sistema de comunicaciones, se establece que es importante la configuración adecuada del transmisor y receptor independiente de la plataforma en la que se trabaje. En el caso de este documento, se usó LabVIEW y el equipo USRP X310, lo que permitió la transmisión y recepción de datos de manera simultánea utilizando dos antenas sin tener problemas de sincronización de tiempo de muestra entre los flujos de cada antena ya que se trata de un equipo que permite el arreglo de antena de 2×2 . Además, en la experimentación se puede verificar las características del canal en contraste con un modelo de canal simulado ya que el arreglo de antenas de transmisión y recepción están en el mismo equipo; por lo cual, se reduce la posibilidad de que el canal inalámbrico se comporte como un canal selectivo en frecuencia.

Se realizaron pruebas para evaluar el rendimiento del sistema MIMO implementado. Por lo tanto es importante que en este tipo de evaluaciones de establezcan métricas para discernir en que condiciones el sistema de comunicaciones mejora y en cuáles aspectos lo hace. Por esto, se analizaron métricas como la tasa de error de bit (BER) las características de la constelación y el diagrama de ojo para comprender mejor la eficacia del sistema en diferentes condiciones de canal y configuraciones. En este sentido, también se propone el uso de varios tipos de fuentes de información para que el estudiante identifique como pocos o muchos errores y su distribución en el mensaje recibido pueden afectar a la reconstrucción del mismo.

Se destaca la importancia de evaluar el proceso de simulación como paso previo antes de llevar a cabo pruebas con equipos físicos en el Laboratorio de Telecomunicaciones de la sede Cuenca. Esta evaluación permitió comprender cómo opera el sistema en un entorno controlado y ofrece una perspectiva más clara para abordar casos prácticos con los equipos reales.

Considerando las lecciones aprendidas y los resultados obtenidos durante el proyecto, se sugieren las siguientes sugerencias para investigaciones futuras y posibles

mejoras: Se sugiere investigar y experimentar con técnicas avanzadas de **MIMO**, como la precodificación, la formación de haces y la cancelación de interferencia, para mejorar aún más el rendimiento y la eficiencia del sistema.

Es importante realizar ajustes y optimizaciones en los parámetros del sistema, como la selección de modulación, la asignación de recursos y los algoritmos de detección, para maximizar el rendimiento en condiciones reales de operación. Se recomienda mantenerse actualizado sobre las tendencias y avances en tecnologías emergentes relacionadas con las comunicaciones inalámbricas, como el uso de inteligencia artificial, el internet de las cosas (**IoT**) y las redes 5G, para identificar oportunidades de mejora y expansión del sistema.

Capítulo 5

Anexos

DIAGRAMAS DE BLOQUES UTILIZADOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL TRANSMISOR PARA LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES MIMO

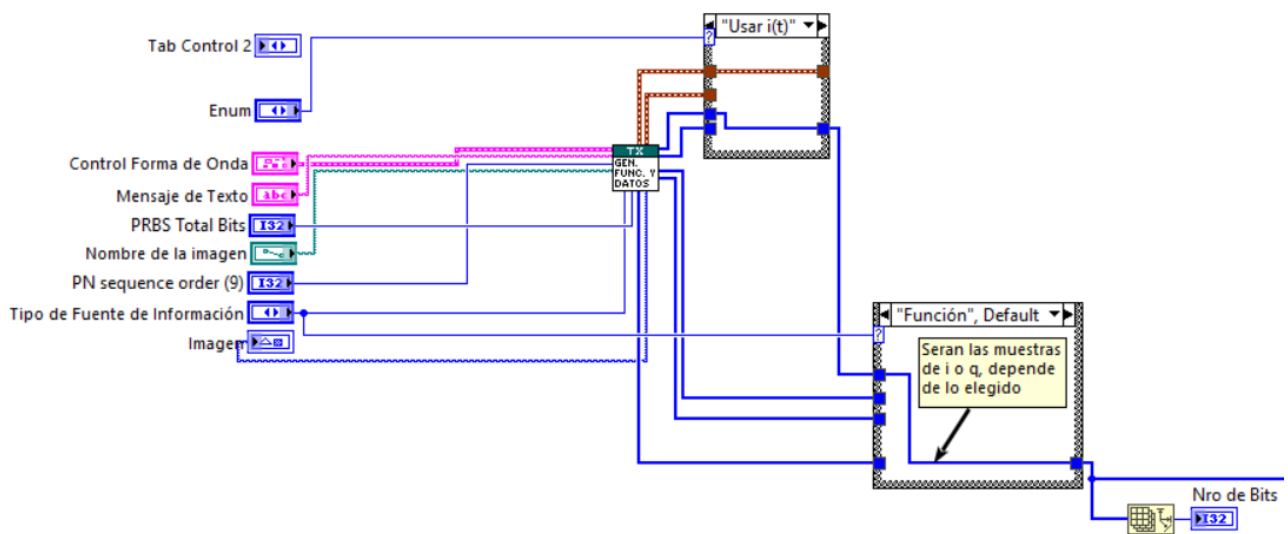


Figura 5.1: Diagrama de bloques codificador de fuente de información a bits. Fuente: Los Autores

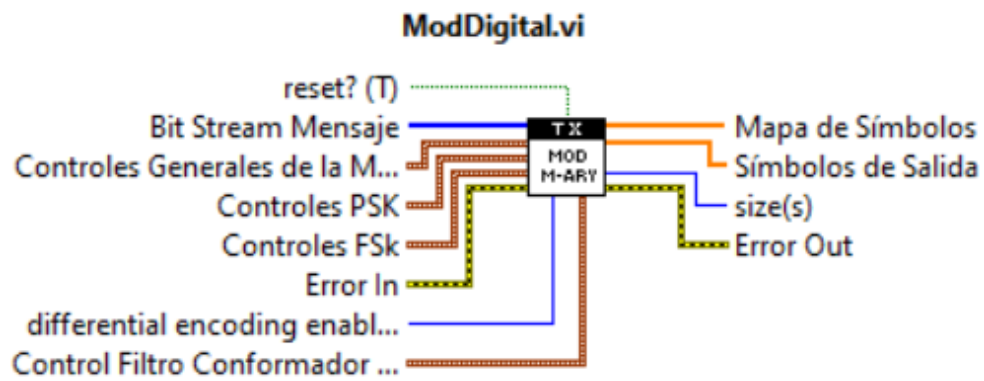


Figura 5.2: Parámetros del bloque de Modulación. Fuente: Los Autores

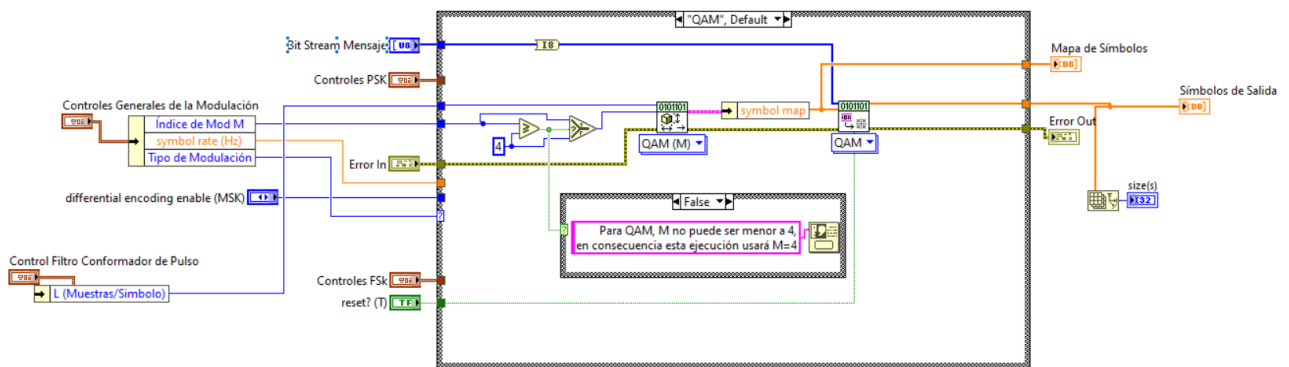


Figura 5.3: Diagrama de bloques del Modulador. Fuente: Los Autores

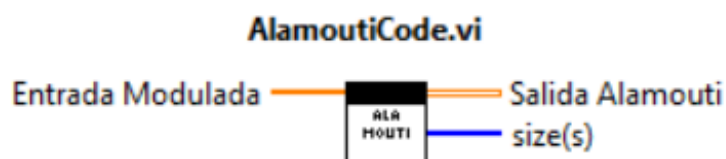


Figura 5.4: Parámetros del bloque del Codificador de Alamouti. Fuente: Los Autores

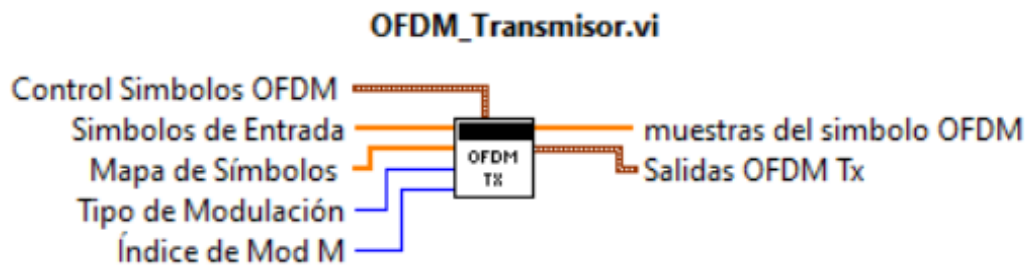


Figura 5.5: Parámetros del bloque de Modulación OFDM. Fuente: Los Autores

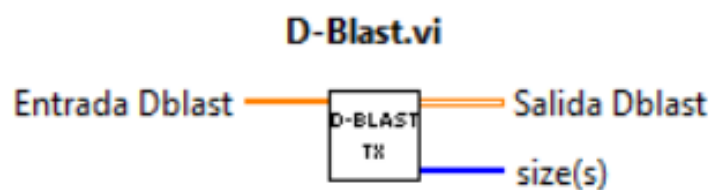


Figura 5.6: Parámetros del bloque de Multiplexación de D-Blast. Fuente: Los Autores



Figura 5.7: Parámetros del bloque de separación de antenas. Fuente: Los Autores

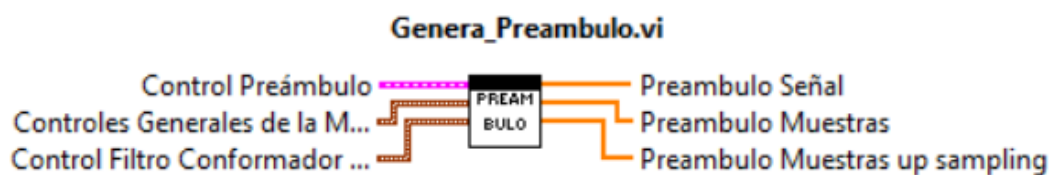


Figura 5.8: Parámetros del bloque del preámbulo. Fuente: Los Autores

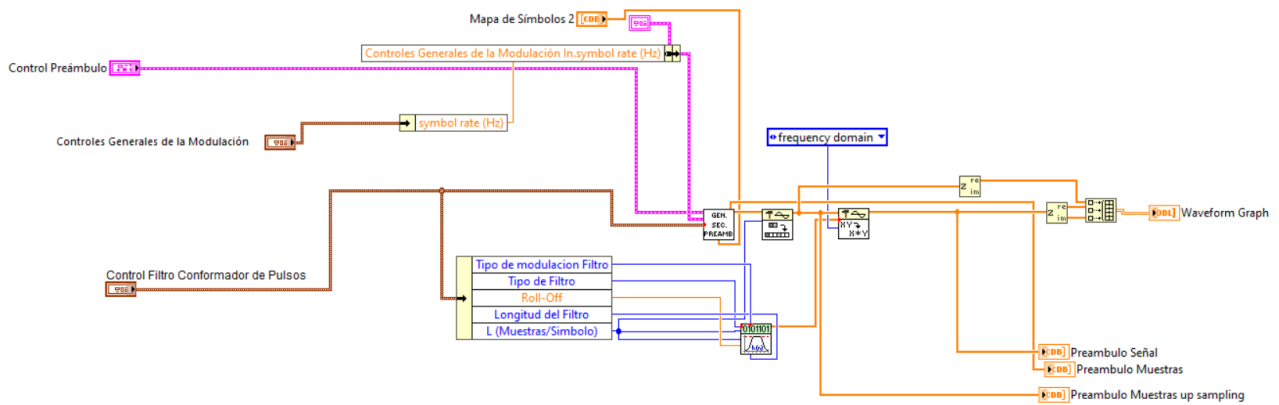


Figura 5.9: Diagrama de Bloques del preámbulo. Fuente: Los Autores



Figura 5.10: Parámetros del bloque para Agregar la Secuencia de Entrenamiento. Fuente: Los Autores

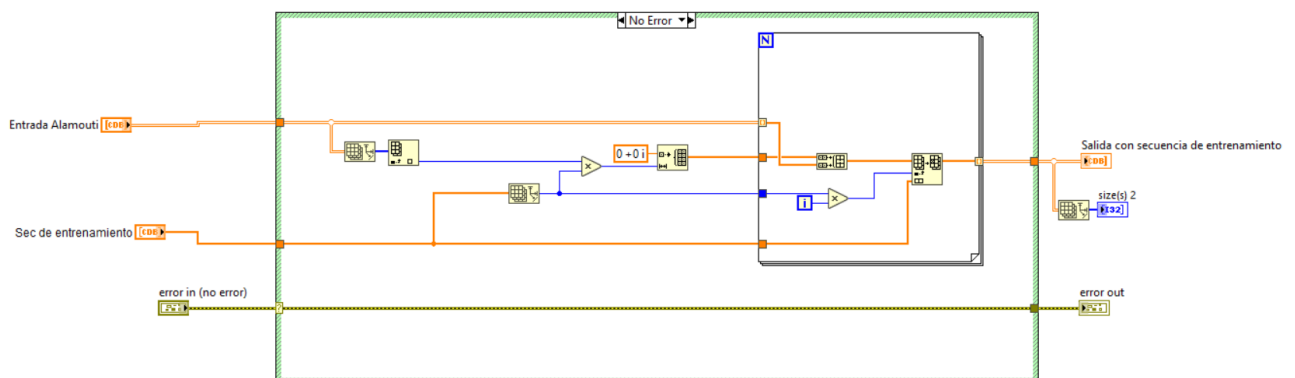


Figura 5.11: Diagrama de Bloques para Agregar la Secuencia de Entrenamiento. Fuente: Los Autores

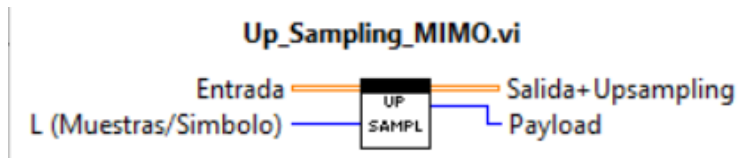


Figura 5.12: Parámetros del bloque del Sobremuestreo. Fuente: Los Autores

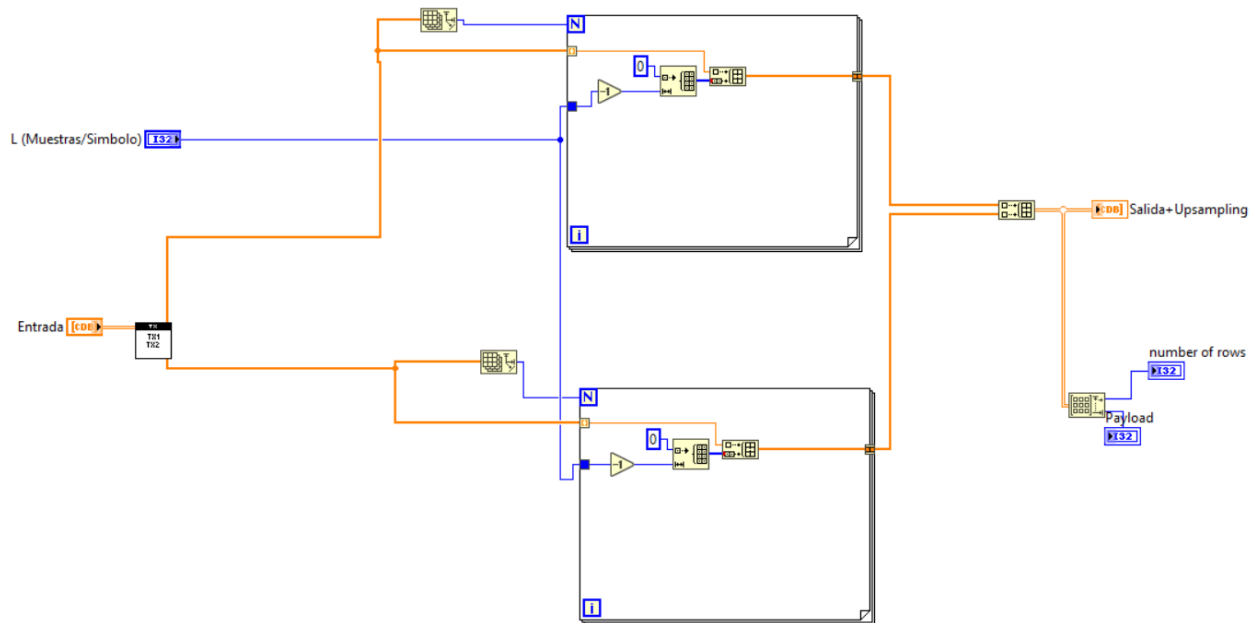


Figura 5.13: Diagrama de Bloques del Sobremuestreo. Fuente: Los Autores

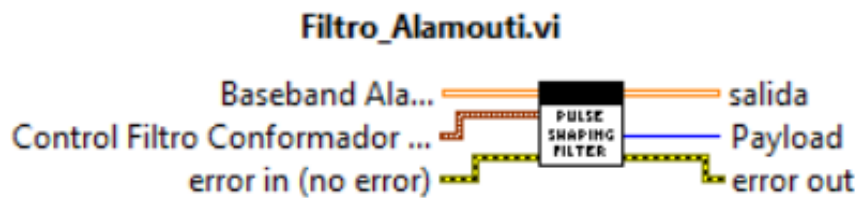


Figura 5.14: Parámetros del bloque para el Filtro Conformador de Pulsos. Fuente: Los Autores

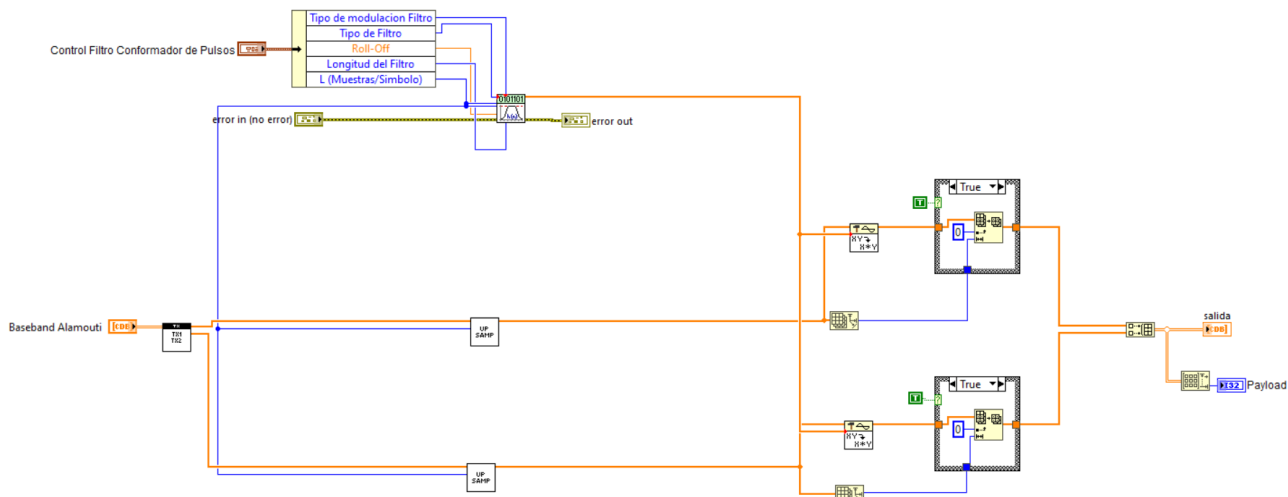


Figura 5.15: Diagrama de Bloques del Filtro Conformador de Pulsos. Fuente: Los Autores

DIAGRAMAS DE BLOQUES UTILIZADOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL RECEPTOR PARA LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES MIMO

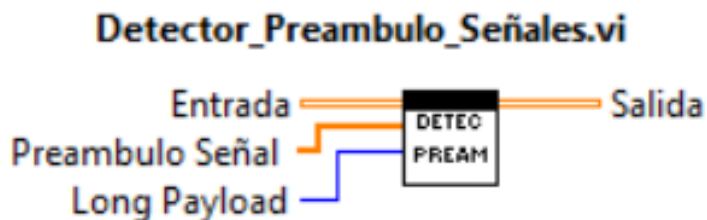


Figura 5.16: Parámetros del bloque para la detección del preámbulo. Fuente: Los Autores

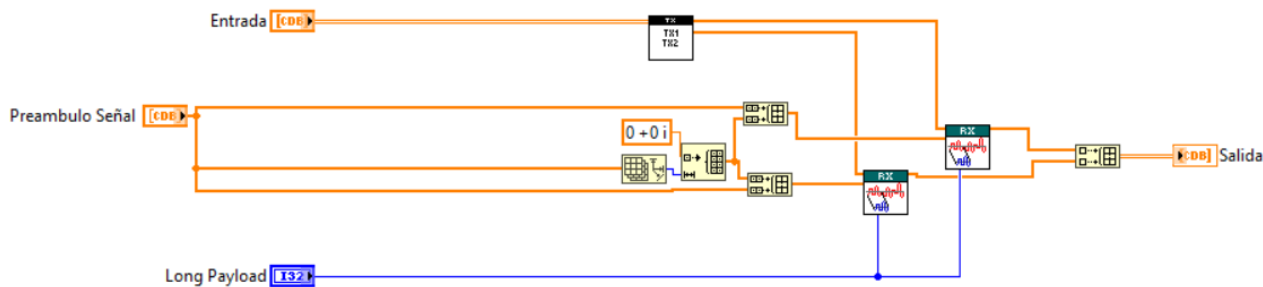


Figura 5.17: Diagrama de Bloques del Detector de Preámbulo. Fuente: Los Autores

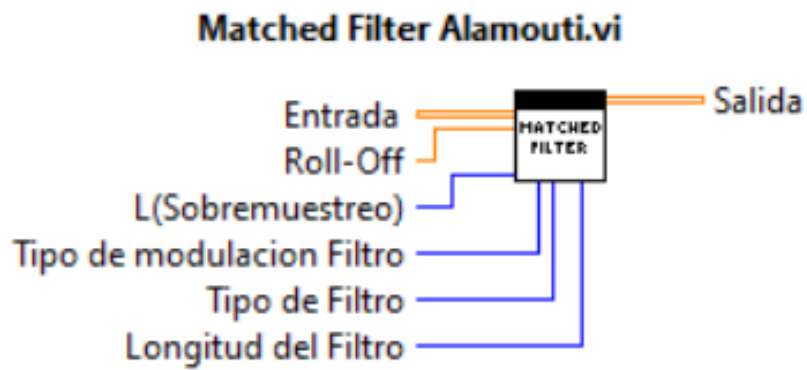


Figura 5.18: Parámetros del bloque del Filtro Acoplado. Fuente: Los Autores

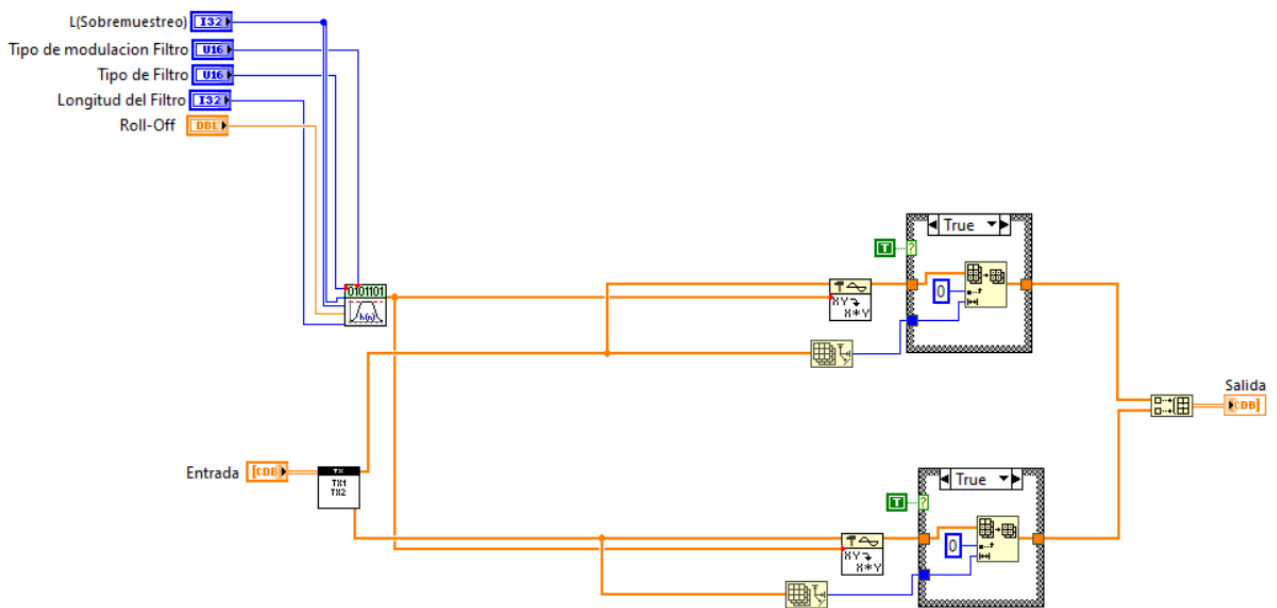


Figura 5.19: Diagrama de Bloques del Filtro Acoplado. Fuente: Los Autores

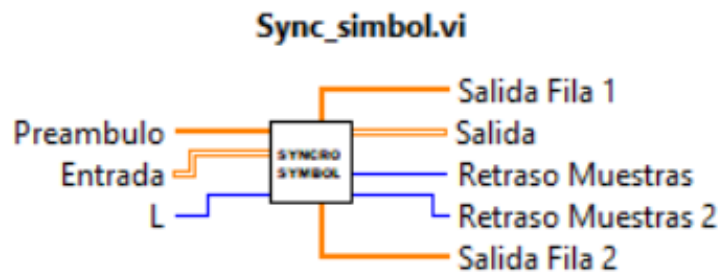


Figura 5.20: Parámetros del bloque del Sincronizado de Símbolos. Fuente: Los Autores

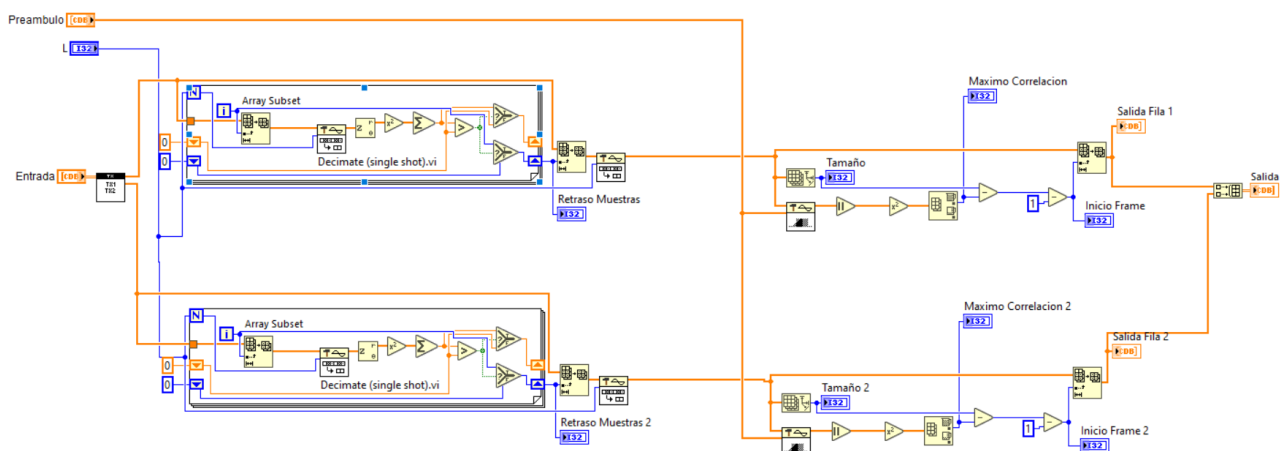


Figura 5.21: Diagrama de Bloques del Sincronizado de Símbolos. Fuente: Los Autores

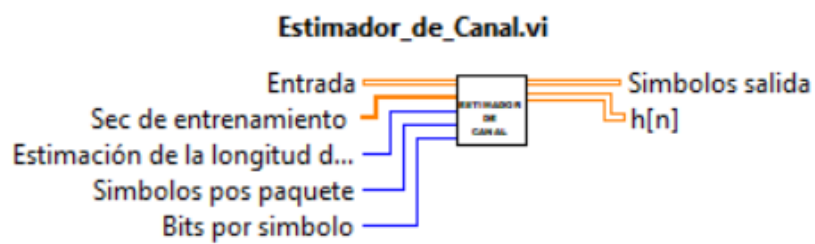


Figura 5.22: Parámetros del bloque Estimator de Canal. Fuente: Los Autores



Figura 5.23: Parámetros del bloque Mapa de Símbolos. Fuente: Los Autores

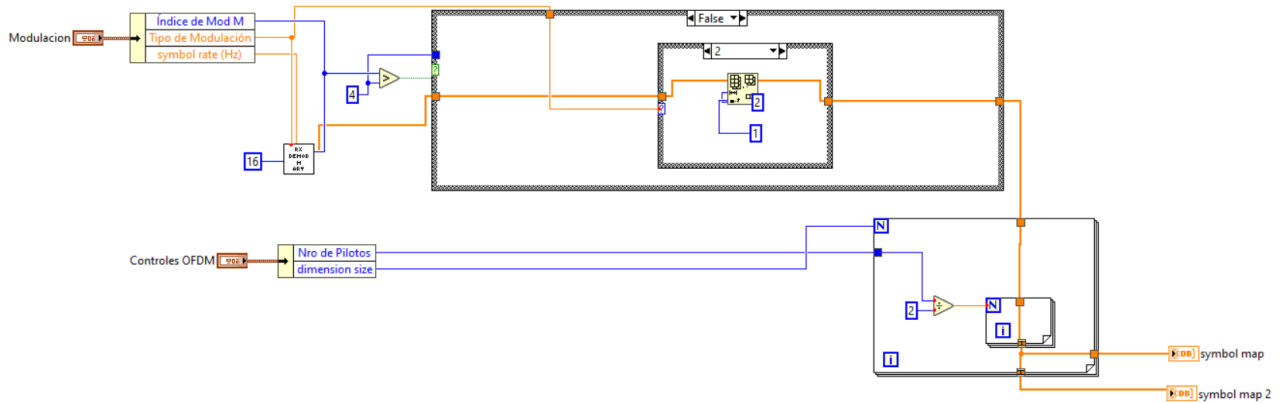


Figura 5.24: Diagrama de Bloques del bloque Mapa de Símbolos. Fuente: Los Autores

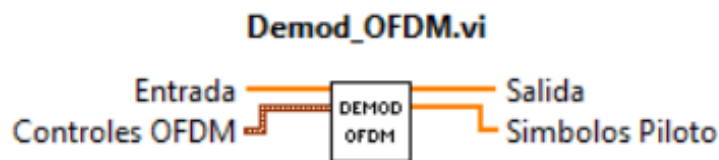


Figura 5.25: Parámetros del bloque Demodulador OFDM. Fuente: Los Autores

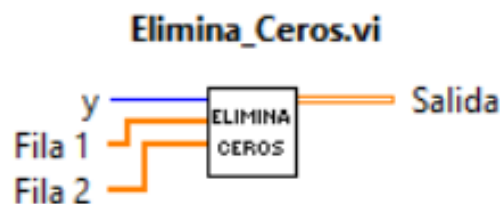


Figura 5.26: Parámetros del bloque para Eliminar los Ceros. Fuente: Los Autores

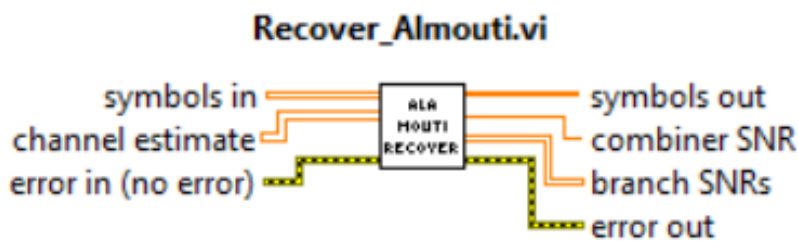


Figura 5.27: Parámetros del bloque Decodificador de Alamouti. Fuente: Los Autores

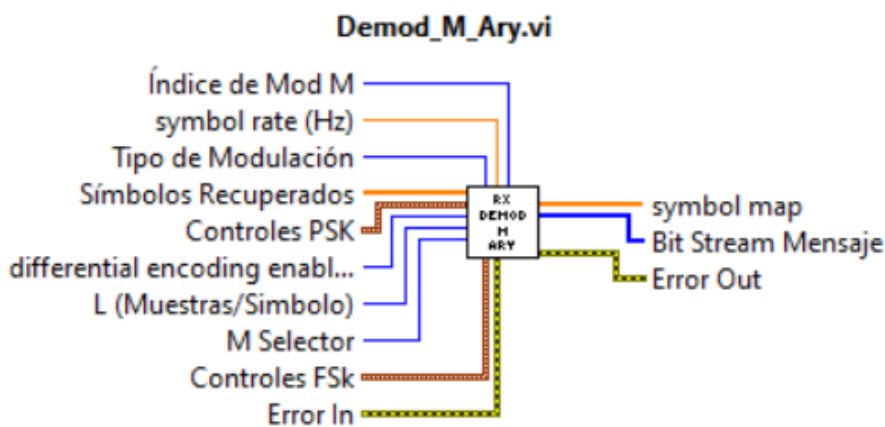


Figura 5.28: Parámetros del bloque del Demodulador. Fuente: Los Autores

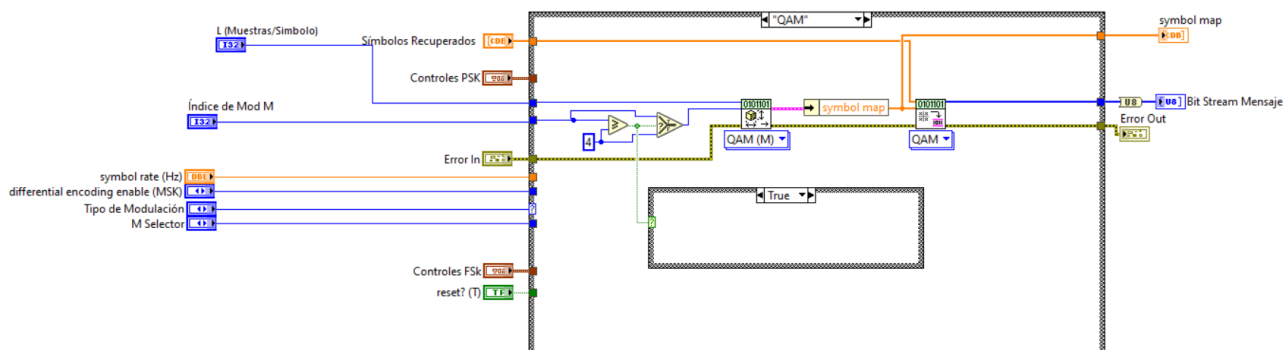


Figura 5.29: Diagrama de bloques del Demodulador. Fuente: Los Autores

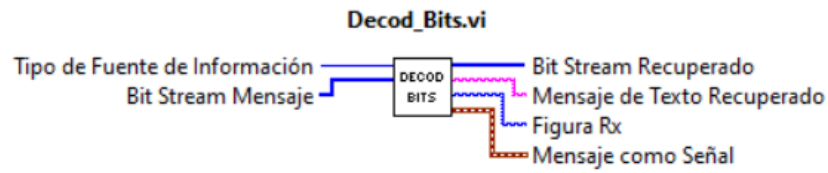


Figura 5.30: Parámetros del bloque de decodificación de fuente de Información a Bits.
Fuente: Los Autores

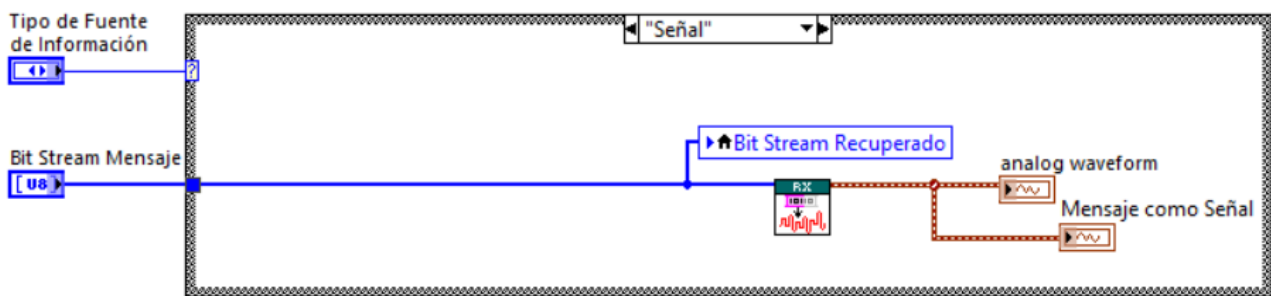


Figura 5.31: Diagrama de bloques del Decodificador de Fuente de Información a Bits.
Fuente: Los Autores

@bookhassan2016multi, title=Multi-carrier communication systems with examples in MATLAB: A new perspective, author=Hassan, Emad, year=2016, publisher=CRC Press, isbn=978-1-4987-3534,

Glosario

ADC Conversor Analógico Digital – Analog-to-Digital Converter.

AWGN Modelo de Canal con Ruido Aditivo Guassiano Blanco – Additive White Gaussian Noise Channel Model.

BER Tasa de Error de Bit – Bit Error Rate.

CDMA Acceso Múltiple por División de Código – Code Division Multiple Access.

CEF campo para la estimación de canal – Channel Estimation Field.

DAC Conversor Digital a Analógico – Digital-to-Analog Converter.

D-BLAST Multiplexación Diagonal por Capas Espacio Temporal de los laboratorios Bell – Diagonal-Bell Labs Layered Space-Time Multiplexing.

DEP Densidad Espectral de Potencia.

DFT Transformada Discreta Fourier – Discrete Fourier Transform.

FDM Multiplexación por División de Frecuencia – Frequency Division Multiplexing.

FEC Corrección de errores hacia adelante – Forward Error Correction.

FFT Transformada Rápida de Fourier – Fast Fourier Transform.

HE Codificación Horizontal – Horizontal Encoding.

ICI Interferencia Intersimbólica – Inter-carrier Interference.

IF Frecuencia Intermedia – Intermediate Frequency.

IFFT transformada rápida de Fourier – Fast Fourier Transform.

IoT Internet de las Cosas – Internet of Things.

ISI Interferencia Intersimbólica – Inter-symbol Interference.

LAN Red de Área Local – Local Area Network.

LNA Amplificador de Bajo Ruido – Low-Noise Amplifier.

LS Mínimos Cuadrados – Least-Square.

LTE Evolución a Largo Plazo – Long Term Evolution.

LTF Campo de Entrenamiento Largo – Long Training Field.

MAN Red de Área Metropolitana – Metropolitan Area Network.

MiMAX MIMO para Máxima Confiabilidad y Rendimiento – MIMO for Maximum Reliability and Performance.

MIMO Múltiples Entradas, Múltiples Salidas – Multiple-input Multiple-output.

MISO Múltiple Entrada Única Salida – Multiple Input Single Output.

MMSE Mínimo Error Medio Cuadrático – Minimum Mean Square Error.

MSE Error Medio Cuadrático – Mean Square Error.

MU-MIMO Múltiple-Usuario MIMO – Multiple-User MIMO.

OFDM Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales – Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

OSI Interconexión de Sistemas Abiertos – Open Systems Interconnection.

PAM Modulación por Amplitud de Pulso – Pulse Amplitude Modulation.

PLPC El Procedimiento de convergencia de Capa Física – Physical Layer Convergence Procedure.

PPS Pulso Por Segundo – Pulse Per Second.

PSK Modulación por desplazamiento de fase – Phase Shift Keying.

QAM Modulación de Amplitud en Cuadratura – Quadrature Amplitude Modulation.

SDR Radio definido por software – Software Defined Radio.

SER Tasa de Error de Símbolo – Symbol Error Rate.

SIMO Entrada Única Múltiple Salida – Single Input Multiple Output.

SISO Entrada Única Salida Única – Single Input Single Output.

SM Multiplexación Espacial – Spatial Multiplexing.

SNR Relación Señal a Ruido – Signal to Noise Ratio.

ST Espacio-Temporal – Space-Time.

STBC Codificación Espacio-Temporal por bloques – Space-Time Block Coding.

STF Campo de Entrenamiento Corto – Short Training Field.

STTC Codificador espacio - temporal Trellis – Space-Time Trellis Coding.

UNII Infraestructura Nacional de Información Sin Licencia – Unlicensed National Information Infrastructure.

USRP Periférico universal de radio por software – Universal Software Radio Peripheral.

WLAN Red Inalámbrica de Área Local – Wireless Local Area Network.

ZP Relleno de ceros – Zero Padding.

Referencias

- [1] B. Clerckx y C. Oestges, *MIMO wireless networks: channels, techniques and standards for multi-antenna, multi-user and multi-cell systems*, Second, A. Press, ed. 2013, ISBN: 978-0-12-385055-3.
- [2] R. W. Heath Jr y A. Lozano, *Foundations of MIMO communication*. Cambridge University Press, 2019, ISBN: 978-0-521-76228-1.
- [3] G. P. Perrino Longo, «Análisis del impacto del uso de técnicas de múltiples antenas en una red móvil LTE con la herramienta de simulación Atoll,» Trabajo de Grado, Ingeniería en telecomunicaciones, Universidad Politécnica de Cataluña, 2013. dirección: <http://hdl.handle.net/2099.1/18251>.
- [4] A. Paulraj, R. Nabar y D. Gore, *Introduction to space-time wireless communications*. Cambridge University Press, 2003, pág. 277, ISBN: 0521065933.
- [5] A. Sibille, C. Oestges y A. Zanella, *MIMO From Theory to Implementation*. 2010, ISBN: 978-0-12-382194-2.
- [6] N. Costa y S. Haykin, *Multiple-input multiple-output channel models: theory and practice*. John Wiley & Sons, 2010, ISBN: 978-0-470-39983-5.
- [7] F.-L. Luo y C. J. Zhang, *Signal processing for 5G: algorithms and implementations*. John Wiley & Sons, 2016, ISBN: 9781119116486.
- [8] S. C. Yong, K. Jaekwon, Y. Y. Won y K. Chung-Gu, *MIMO-OFDM WIRELESS COMMUNICATIONS WITH MATLAB*. IEEE PRESS, 2010, ISBN: 978 Yong, -0-470-82561-7.
- [9] J. Ortiz, «Aplicación de la Teoría de Sensado Compresivo para la Estimación de Canal en Sistemas de Transmisión MIMO usando Radio Definido por Software,» Trabajo de Grado, Ingeniería Electrónica, Universidad Politecnica Salesiana, Cuenca, 2022. dirección: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23009>.

- [10] F. L. Cárdenas y J. L. Otañez, «Simulación e Implementación de un Sistema de Codificación Espacio-Temporal para MIMO usando D-BLAST,» Degree, Universidad Politecnica Salesiana, Cuenca, 2019. dirección: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18304>.
- [11] F. Cárdenas, J. Otañez, J. Inga, E. Inga y A. Ortega, «D-BLAST MIMO Performance Analysis over SDR-USRP,» *Ingenius*, págs. 105-116, 27 ene. de 2022, ISSN: 1390-860X. DOI: 10.17163/ings.n27.2022.10. dirección: <https://ingenius.ups.edu.ec/index.php/ingenius/article/view/27.2022.10>.
- [12] A. Yanza-Verdugo, C. Pucha-Cabrera y J. P. Inga-Ortega, «Compressive Sensing Based Channel Estimator and LDPC Theory for OFDM using SDR,» *Ingenius*, págs. 40-50, 23 ene. de 2020, ISSN: 1390-650X. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n23.2020.07>.
- [13] Q. Chaudhari, *Wireless Communications from the Ground Up: An SDR Perspective*, 1.^a ed. 2018. dirección: <https://wirelesspi.com/book/>.
- [14] L. Zhao, H. Zhao, K. Zheng y W. Xiang, *Massive MIMO in 5G networks: selected applications*. Springer, 2018.
- [15] A. Elgam, Y. Balal e Y. Pinhasi, «Study of 5G-NR-MIMO Links in the Presence of an Interferer,» *Electronics*, vol. 10, n.º 6, pág. 732, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10060732>.
- [16] G. Qiao, Z. Babar, F. Zhou, L. Ma y X. Li, «Low-complexity progressive MIMO-OFDM receiver for underwater acoustic communication,» *Symmetry*, vol. 11, n.º 3, pág. 362, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym11030362>.
- [17] F. D. Rocha Arias y P. G. Túquerrez Corella, «Estudio de un sistema de transmisión digital mimo 4x4 basado en los módulos USRP 2920,» Trabajo de grado, Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2016. dirección: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13093>.
- [18] M. Hernandez, Y. Tchatchoua, T. Q. Nguyen y D. Y. Lie, *A Prototype Novel Zero-IF Non-Contact Respiration Monitor Using Software Defined Radio (SDR)*, 2020. DOI: 10.1109/MWSCAS48704.2020.9184469. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9184469&tag=1>.
- [19] T. S. Rappaport, *Wireless communications: principles and practice*, Second. Cambridge University Press, 2024, ISBN: 978-1-009-48983-6.

- [20] M. Pätzold, *Mobile radio channels*. John Wiley & Sons, 2011, ISBN: 978-0-470-51747-5.
- [21] Q. Chaudhari, *5G Physical Layer: An Easy Guide to Key Technologies*, 1.^a ed. 2021. dirección: <https://wirelesspi.com/5g-phy/>.
- [22] W. B. Hasan, P. Harris, A. D. Doufexi y M. Beach, «Real-Time Maximum Spectral Efficiency for Massive MIMO and its Limits,» *IEEE Access*, vol. 6, págs. 46 122-46 133, ago. de 2018, ISSN: 21693536. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2866094.
- [23] R. L. Haupt, *Wireless Communications Systems: An Introduction*. John Wiley & Sons, 2020, ISBN: 978-1-119-41917-4.
- [24] E. Björnson, J. Hoydis, L. Sanguinetti et al., «Massive MIMO networks: Spectral, energy, and hardware efficiency,» *Foundations and Trends® in Signal Processing*, vol. 11, n.º 3-4, págs. 154-655, 2017.
- [25] J. Mora C., «Contribución a la caracterización espacial de canales con sistemas MIMO-OFDM en la banda de 2,45 Ghz,» 2015. DOI: 10.20868/UPM.thesis.37276. dirección: <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.37276..>
- [26] J. Anguera y A. Pérez, *Teoría de Antenas*, L. Vicent, ed. Universitat Ramon Llull, 2008, ISBN: 9788493566548, 8493566543.
- [27] V. J. Avendaño A., K. A. Gonzaga O. y F. J. Ruiz R., «Análisis técnico de las radiaciones electromagnéticas emitidas por las antenas de las radiobases celulares en la ciudad de Guayaquil,» Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2013. dirección: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/4232>.
- [28] L. Hanzo, O. Alamri, M. El-Hajjar y N. Wu, *Near-capacity multi-functional MIMO systems : sphere-packing, iterative detection and cooperation*. Wiley, 2009, ISBN: 9780470779651.
- [29] Y. Lu, W. Zhang y X. G. Xia, «On diversity and multiplexing tradeoff of two-layer D-BLAST with group zero-forcing detection,» vol. 60, 2012, págs. 2255-2264. DOI: 10.1109/TCOMM.2012.061412.110863.
- [30] M. Garg y M. K. Varanasi, «The optimality of D-BLAST-ZF with antenna order feedback without or with antenna selection,» 2008. DOI: 10.1109/CISS.2008.4558687.
- [31] J. Du e Y. Li, «Channel Estimation for D-BLAST OFDM Systems,» 2002. DOI: 10.1109/GLOCOM.2002.1188096.
- [32] A. R. Antonio y P. G. Fernando, *Comunicaciones Digitales*. Pearson COLLEGE, 2012.

- [33] A. F. Molisch, *Wireless communications*. John Wiley & Sons, 2012, vol. 34, ISBN: 9780470741870.
- [34] M. Schwartz, *Mobile wireless communications*. IET, 2005, vol. 25, ISBN: 978-0-521-84347-8.
- [35] E. Dahlman, S. Parkvall y J. Skold, *4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband*. Academic press, 2013, ISBN: 978-0-12-385489-6.
- [36] B. Sklar y F. Harris, *Digital communications: fundamentals and applications*. Pearson, 2021, ISBN: 978-0-13-458856-8.
- [37] B. G. Ramos Sanchez y O. P. Ramos Cueva, «Análisis del desempeño de sistemas inalámbricos MIMO MXN con multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) para la transmisión de información multimedia usando radio definido por software,» Escuela Politécnica del Litoral (ESPOL), 2017. dirección: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/42122>.
- [38] R. Jeyanthi y N. Malmurugan, «THE OPTIMUM SIGNAL PERTURBATION FREE TRANSMIT SCHEME TO ENHANCE THE CHANNEL ESTIMATION OF MIMO OFDM SYSTEM,» 2012. DOI: 10.1109/ICDCSyst.2012.6188787.
- [39] R. Heath, *Introduction to Wireless Digital Communication*. 2017, ISBN: 978-0-13-443179-6.
- [40] A. Othman, A. Abd Aziz, K. Pongot, N. Shairi y M. Mohd Nor, «Design and sensitivity analysis of direct conversion RF receiver for IEEE 802.11a WLAN system at 5.8 GHz frequency,» 2012. DOI: 10.1109/SCOReD.2012.6518650.
- [41] L. Huan, L. Xu, S. Mei, T. Zhenhui y F. Chen, *An Improved Synchronization Method for IEEE 802.11a*, 2007. DOI: 10.1109/MAPE.2007.4393784.
- [42] E. Miletic, K. Tittelbach-Helmrich y G. Panic, «Performance investigation on an MIMO-capable 802.11a compliant MAC protocol implementation,» 2011, págs. 190-193, ISBN: 9780769546100. DOI: 10.1109/MSN.2011.57.
- [43] P. Piña y J. Aurelio, «Técnicas de estimación de canal para sistemas MIMO-OFDM,» 2008. dirección: <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/179>.
- [44] P. Anupama y S. S. Pillai, «MMSE channel estimation with LMS equalization for SC FDE systems,» 2015. DOI: 10.1109/ICCCCT.2015.7475263.
- [45] L. Ullah Khan y M. Inayatullah Babar, «Robust Modified MMSE Estimator for Comb-Type Channel Estimation in OFDM Systems,» 2013, ISSN: 1738-9445.

- [46] R. Machado y J. Fernández, «Software Defined Radio: Basic Principles and Applications Software Defined Radio: Principios y aplicaciones básicas Software Defined Radio: Princípios e Aplicações básicas,» *Revista Facultad de Ingeniería (Fac. Ing.)*, Enero-Abril, vol. 24, págs. 79-96, 38 2015, ISSN: 2357-5328.
- [47] L. Zhang y C. B. Rodríguez, *Implementation of Wireless Communication based on Software Defined Radio*, 2013.
- [48] M. J. Meeuwsen, O. Sattari y B. M. Baas, *A FULL-RATE SOFTWARE IMPLEMENTATION OF AN IEEE 802.11A COMPLIANT DIGITAL BASEBAND TRANSMITTER*, 2004. DOI: 10.1109/SIPS.2004.1363036.
- [49] D. P. Wright y E. A. Ball, «Highly Portable, Low-Cost SDR Instrument for RF Propagation Studies,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, págs. 5446-5457, 8 ago. de 2020, ISSN: 15579662. DOI: 10.1109/TIM.2019.2959422.
- [50] A. T. Tran, D. N. Truong y B. M. Bass, «A Complete Real-Time 802.11a Baseband Receiver Implemented on an Array of Programmable Processors,» *IEEE*, 2009, ISSN: 1058-6393. DOI: 10.1109/ACSSC.2008.5074384.
- [51] E. Research, *X300X310*, 2014. dirección: <https://kb.ettus.com/X300/X310>.
- [52] S. F. Lascano Aguilar, «Implementación de un Sistema de Compresión, Transmisión y Recepción de Datos Utilizando Dispositivos de Radio Definido por Software (USRP) para Evaluar el Rendimiento de los Radio Enlaces Usados en Medición Eléctrica Inteligente,» Trabajo de Grado para Ingeniero Eléctrico, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2020. dirección: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19135>.