

2015

Universidad Carlos III de Madrid

Memoria Trabajo Final de Grado

Alumno: Alejandro Delgado Serrano

Tutora: Ana García Armada



Universidad
Carlos III de Madrid

[IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ANTENAS MIMO 2X2 EN LABVIEW]

A lo largo la memoria de este TFG se estudiará y analizará cómo funciona un sistema de antenas MIMO 2x2 y se expondrá su implementación en la plataforma de desarrollo basado en un lenguaje gráfico LabVIEW mediante los dispositivos transceptores USRP-2920 de National Instruments.

Agradecimientos

La realización de este proyecto ha supuesto para mí alcanzar una meta que hace no mucho parecía muy lejana, la culminación de varios años de esfuerzo y sacrificio para llegar hasta aquí.

Durante este camino han aparecido numerosas personas que han sido participes, en mayor o menor medida, de haberlo conseguido. Algunas de ellas siguen siéndolo y otras no. Pero todas han tenido un papel importante.

Por ello, quería agradecerles en primer lugar a la Universidad Carlos III y a todos los profesores que he tenido a lo largo de la carrera que me hayan dado la oportunidad de aprender, no sólo lo necesario para ser un buen ingeniero de telecomunicaciones, sino también para saber que con esfuerzo y trabajo puedo conseguir lo que me proponga. Mención especial merece mi tutora durante este proyecto, Ana García Armada, que ha puesto a mi disposición todo lo necesario para realizarlo, tanto a nivel de conocimientos como de recursos.

Otro pilar fundamental en mi experiencia en la universidad han sido todos mis compañeros a lo largo de estos años. Algunos simplemente como compañeros en el día a día, ayudándome cuando lo necesitaba y haciendo que clases, prácticas, exámenes e interminables horas de biblioteca hayan sido un poco menos duros. Otros como verdaderos amigos, que es en lo que se han convertido después de todo este tiempo, personas que me alegro de haber conocido y de que hayan pasado a formar parte de mi vida.

No me puedo olvidar de mi familia, mis padres, que han puesto a mi disposición en la vida todo lo que he necesitado para alcanzar esta meta y me han dado una educación que no podría haber sido mejor. Tampoco de mis amigos, que han estado siempre ahí y siguen estándolo, y de mi pareja, que me ha apoyado y ayudado en todos los buenos y malos momentos.

Es gracias a cada uno de ellos que este proyecto ha podido tomar forma y llegar a lo que es. Gracias a todos.

Resumen

Introducción a los sistemas de antenas MIMO

Las telecomunicaciones han avanzado a un ritmo vertiginoso a lo largo de los últimos años y, debido a las necesidades cada vez más grandes de unos usuarios cada vez más exigentes, tendrán que seguir haciéndolo en las próximas décadas para continuar ofreciendo unos servicios que satisfagan tales necesidades.

Es en este punto donde ha tomado un papel fundamental la ciencia sobre la que va a tratar esta memoria, la tecnología MIMO o de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (*Multiple-Input Multiple-Output*) que, como su propio nombre indica, se basa en el uso de múltiples antenas tanto en la transmisión como en la recepción de señales.

Mediante el uso de múltiples antenas se puede mejorar la diversidad espacial de un sistema, lo cual resulta imprescindible para disminuir su desvanecimiento multitrayecto, el cual es producido por los ecos recibidos en una antena a partir de una señal en diferentes instantes de tiempo. De esa manera, se puede conseguir una comunicación más eficiente en diversos aspectos como la tasa de envío de datos o la disminución del error en la señal recibida.

Con tales características, MIMO se ha convertido a lo largo de los últimos años en una alternativa más que atractiva para el desarrollo de los medios de transmisión inalámbricos. De esta forma, ha pasado a formar parte de los estándares de diversas e importantes tecnologías donde se pueden distinguir LTE (*Long Term Evolution*) o Wi-Fi entre otras. Además, es de suponer una constante evolución en los próximos años que haga de ella una opción incluso mejor para incorporarse progresivamente a más tipos de redes.

Vista como una simple combinación de numerosas antenas de transmisión y de recepción, la tecnología MIMO puede parecer algo sencillo. Sin embargo, los beneficios ya explicados son el resultado de diversas y complejas técnicas que, combinadas de la manera adecuada, tienen como consecuencia la obtención de tales beneficios.

La Modulación OFDM

Para comenzar, uno de los pilares básicos de MIMO es la Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales o modulación OFDM (*Orthogonal Frequency*

Division Multiplexing). En esta modulación grandes cantidades de información son divididas en pequeños subcanales o subportadoras ortogonales, equiespaciadas entre sí y moduladas paralelamente mediante, por ejemplo, QAM o PSK. Puede producirse de esta manera la transmisión de grandes cantidades de datos, lo que le otorga al sistema una elevada eficiencia espectral. Dichas características suponen ciertas ventajas frente a los esquemas de modulación tradicionales más allá de una mejor eficiencia, como son la protección frente al desvanecimiento selectivo en frecuencia, la inmunidad frente a la interferencia entre portadoras o ICI gracias a la ortogonalidad entre ellas o la sencillez de implementación mediante el uso de la FFT y IFFT, la transformada rápida de Fourier y su inversa.

Además, OFDM posee ciertos mecanismos que hacen de ella una modulación muy robusta. Uno de ellos es la incorporación del llamado prefijo cíclico, gracias al cual es posible prevenir los efectos del desvanecimiento multitrayecto. El prefijo cíclico consiste en introducir al principio de un símbolo OFDM, en un espacio destinado para ello, una reproducción de la parte final del propio símbolo. Esta parte del símbolo será descartada en su llegada al receptor y, si posee el tamaño suficiente para las condiciones del canal por el que es transmitido, permitirá evitar en gran medida los efectos de la interferencia intersimbólica o ISI. Como aspecto negativo, se debe indicar que la introducción de un prefijo cíclico en los símbolos OFDM reduce en cierta medida la eficiencia de la transmisión.

Otro aspecto negativo a destacar en la modulación OFDM es su alta sensibilidad ante errores en el sincronismo. Dichos errores se pueden producir en el tiempo, en la frecuencia de portadora y en la frecuencia de muestreo, donde un pequeño desplazamiento en cualquiera de estos tres factores puede tener un efecto muy negativo si no es corregido adecuadamente.

Codificación espaciotemporal: el esquema de Alamouti

Junto a la modulación OFDM, otra parte fundamental para el buen funcionamiento de MIMO son los códigos de bloque. Estos códigos son los que realizan la codificación espaciotemporal de los datos a enviar y permiten la obtención de beneficios como la ganancia por diversidad espacial o la ganancia de array.

Dentro de la variedad de códigos de bloque existentes, uno que goza de gran importancia es el del esquema de Alamouti. Alamouti presentó un modelo en el que, mediante el uso de varias antenas en la transmisión y varias en la recepción, se podía incrementar la ganancia por diversidad sin necesidad de realimentación ni de aumentar la potencia. Y todo ello sin requerir una gran complejidad computacional. De

esta forma, se consigue aumentar la eficiencia de los sistemas de transmisión siguiendo la ecuación $M \times N$, donde M representa el número de antenas de transmisión y N el de recepción.

En la codificación de Alamouti, dos antenas transmisoras envían en dos instantes de tiempo dos secuencia ortogonales entre sí que, tratadas de la forma correcta en el receptor, producirán un aumento en la diversidad espacial, mejorando las prestaciones del sistema.

Como es posible imaginar, un diseño de antenas MIMO puede presentar gran cantidad de opciones combinando de diferente manera el número de antenas de entrada y de salida. Para el desarrollo de este proyecto se ha estudiado concretamente un modelo basado en dos antenas de transmisión y dos de recepción, el llamado por simplicidad MIMO 2x2. Dentro de los posibles beneficios de MIMO se ha explotado el de la ganancia por diversidad espacial donde, enviando a través de ambas antenas la misma información, esta llegará de manera redundante al bloque receptor para reducir la posibilidad de que la información llegue de manera incorrecta. Frente a esta opción, se podría haber elegido un modelo en el que las antenas transmisoras envíen información independiente para, de esa manera, aumentar la capacidad del sistema.

Implementación de un modelo real basado en LabVIEW y los dispositivos USRP-2920

Para analizar en mayor profundidad tanto la complejidad de los sistemas MIMO 2x2 como los beneficios que de estos se obtienen, se ha decidido implementar una aplicación en la que se recree un escenario real de transmisión entre varias antenas para poder estudiar sus propiedades. Para ello se ha hecho uso de dos herramientas principalmente, ambas proporcionadas por la empresa National Instruments. Por un lado el entorno de desarrollo LabVIEW, que permite programar el esquema de envío de datos, y por otro los equipos de transmisión de señales USRP-2920, que se encargarán de la propia transmisión de las señales a nivel físico.

LabVIEW constituye una plataforma de desarrollo destinada especialmente a un uso científico y experimental. Para ello, se basa en un lenguaje de programación gráfico y pone a disposición del usuario una serie de herramientas y recursos para que, mediante el diseño de diagramas de bloques, se puedan implementar avanzadas aplicaciones con distintos fines, en este caso para el desarrollo y análisis de transmisión de señales.

Para ello es imprescindible algún tipo de dispositivo que se pueda encargar de la propia transmisión. De ello se encargarán los equipos USRP-2920, unos transceptores que, controlados por un ordenador, permiten la transmisión y recepción de señales en RF gracias a unas antenas acopladas a ellos. De esta forma se implementará un esquema formado por un bloque transmisor y otro receptor en el que pueda tener lugar el envío de señales. Ambos extremos del sistema estarán compuestos de la misma forma por un ordenador conectado a un USRP-2920, mediante un cable Ethernet, y este a su vez conectado a otro USRP-2920 mediante un cable MIMO que permita la sincronización entre ambos.

De esta forma quedaría compuesto el sistema MIMO 2x2 y llegaría el momento de desarrollar el programa en LabVIEW para simular la transmisión. Este programa ha sido implementado en base a otro diseñado anteriormente por el alumno de la Universidad Carlos III Madrid Daniel Pérez Vaquero que, durante la realización de su proyecto, diseñó un sistema de antenas MIMO 2x1 haciendo uso también de LabVIEW. A partir del código proporcionado por la tutora del proyecto, Ana García Armada, ha sido posible evolucionar el trabajo hecho por Daniel integrando una nueva antena de recepción.

De igual manera que el esquema formado por los equipos USRP-2920 estaba compuesta por dos bloques dedicados a la transmisión y a la recepción, la aplicación desarrollada también deberá estar constituida por dos partes que trabajen en cada uno de los ordenadores de forma paralela.

Desarrollo de la aplicación en LabVIEW

La función principal de la aplicación consistirá en la transmisión de un ordenador a otro de un texto introducido por el usuario o un archivo seleccionado por el mismo. Por ello, ha sido necesario implementar en ambos extremos una interfaz gráfica mediante la cual el usuario pueda configurar la transmisión introduciendo estos parámetros, así como los referentes a la modulación OFDM o a la configuración de los equipos USRP-2920.

Para que la transmisión se pueda realizar de una forma satisfactoria, ha sido necesario programar las diferentes funciones que componen un sistema MIMO tanto en el transmisor como en receptor.

➤ Funciones del bloque transmisor

De esta forma, el transmisor se ha de ocupar en primer lugar de configurar los USRP-2920 con los parámetros indicados por el usuario a través de la interfaz gráfica.

Una vez hecho esto, se obtendrán los bits correspondientes al texto o archivo a transmitir, a los que se debe incluir un par de secuencias destinadas a la sincronización y a indicar la longitud de la trama, lo cual requiere 32 y 96 bits en cada uno de los casos. Una vez obtenidos los bits deben ser mapeados en símbolos mediante las posibles modulaciones: 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM o 64-QAM. A los símbolos les serán adheridos una serie de pilotos que sirvan para realizar una estimación del canal y, tras esto, se realizará la codificación de Alamouti sobre ellos para obtener dos cadenas de símbolos ortogonales entre ellos. Posteriormente, para poder realizar la modulación OFDM, los símbolos y sus pilotos serán reorganizados dejando libre una portadora central y unas bandas de guarda para realizar la IFFT sobre ellos e insertar los prefijos cíclicos que combatan la ISI. De esta forma, los símbolos OFDM serán introducidos en paquetes tras generar y adherir unas secuencias de sincronismo. Una vez hecho esto, las dos cadenas de paquetes pasarán a formar parte de un array bidimensional para ser enviadas a través de las antenas de ambos USRP-2920 hacia los receptores.

➤ **Funciones del bloque receptor**

En el receptor, tras la configuración que se realiza de los USRP-2920 de la misma forma que se hace en el transmisor, tiene lugar el proceso inverso al que se desarrolló en este. Tras la llegada de los paquetes son extraídas las secuencias de sincronismo que permiten realizar la sincronización de los símbolos OFDM en tiempo y frecuencia. Una vez sincronizados los símbolos, se les son retirados los prefijos cíclicos para realizar sobre ellos la FFT y organizarlos sin considerar la portadora central y las bandas de guarda. Tras ello, para poder realizar la decodificación de Alamouti, son extraídos los bits de estimación del canal, gracias a los cuales se puede realizar dicha decodificación mediante la combinación lineal de los símbolos recibidos y las estimaciones. Una vez decodificados los símbolos son demapeados para obtener los bits que, tras ser procesados mediante el tratamiento adecuado de las secuencias de sincronización y longitud, darán lugar al texto o archivo que fue enviado en el transmisor.

Obtención y comparación de los resultados

Tras el desarrollo de esta aplicación se ha procedido a comprobar su correcto funcionamiento mediante el envío de textos y archivos variando los parámetros de configuración de transmisión como los bit/símbolo de la modulación QAM o el número de símbolos OFDM a utilizar, para comprobar cómo se comporta el sistema en cada caso.

Una vez que se ha comprobado el correcto funcionamiento del sistema, se ha procedido a comparar las prestaciones del diseño original con una única antena receptora con el recién implementado con dos antenas para este cometido.

Para realizar tal comprobación, en primer lugar se han visualizado las constelaciones de cada uno de los dos diseños, mostradas a través de la interfaz de usuario, para todas las modulaciones implementadas en el programa. En ellas se puede apreciar como los símbolos recibidos en el sistema de dos antenas se encuentran más próximos a donde deberían estar que en el de una antena. Esto sucede independientemente del número de bits por símbolo que se usen en la modulación y, cuanto mayor sea este valor, más grave resultará la distorsión por la proximidad de los símbolos y, por lo tanto, mejores serán las prestaciones con dos antenas.

Pero como la comprobación a través de las constelaciones puede resultar complicada y no suficientemente objetiva por la cantidad de símbolos recibidos y la cercanía entre ellos, se ha realizado una comprobación adicional que permite comparar los bits a transmitir con los recibidos para ambos casos. De esa forma, tras exportar como un archivo Excel la totalidad de los bits enviados y los recibidos tras un periodo de tiempo, estos pueden ser comparados para obtener la probabilidad de error por bit en cada uno de los casos. Una vez más, esta probabilidad ha sido menor con dos antenas receptoras para las diferentes modulaciones posibles.

Como era de esperar gracias a los estudios teóricos, las prestaciones del sistema evolucionado con dos antenas receptoras mejoran en eficiencia al de una sola antena desde el que se partió.

Sin embargo, todavía sería posible de cara a un futuro mejorar la aplicación desarrollada mediante la incorporación de nuevas antenas receptoras o, incluso, añadiendo mecanismo de predicción de canal, prevención de errores o de modulación adaptativa para hacerlo incluso más eficiente.

Abstract

Introduction to MIMO antenna systems

Telecommunications have progressed immensely through the last years and due to the ever growing need of ever growing demanding users they would have to continue doing so during the next decades, in order to offer services that satisfy said needs.

Is right now when the technology mentioned in this article, the MIMO technology (Multiple-Input Multiple-Output), has become very relevant; as the name suggests, it's a technology based on multiple antennas used for signal transmission and reception.

Thanks to the use of multiple antennas we can improve a system's spatial diversity, which is vital to achieve multipath fading lowering, produced by the signal echoes received by the antenna in different time stamps. This way, we can achieve a more efficient communication in several aspects as the send data rate or the decrease of the error in the received signal.

With these characteristics, MIMO has become through the last years in an alternative more than attractive for the development of wireless transmission systems. This way, this technique has become a part of the standards of several important technologies, such as LTE (Long Term Evolution) or Wi-Fi, among others. Moreover, we can wait for a constant evolution in the coming years, an evolution that will make out of this technology an even better option to progressively incorporate it into new types of networks.

Seen as a simple combination of numerous transmission and reception antennas the MIMO technology may look as something easy. However, the already commented benefits are direct consequence of multiple complex techniques which mixed in a proper way produced said profits.

OFDM modulation

To start up, one of the basic foundations of the MIMO technology is the Orthogonal Frequency Division Multiplexing or OFDM modulation. In this kind of modulation great amounts of information are divided in small orthogonal subcarriers or subchannels, equally spaced between them and modulated in a parallel way by, for example, QAM or PSK, achieving the transmission of big amounts of data and giving

the system a high spectral efficiency. Said characteristics imply some perks against traditional modulation schemes beyond a better efficiency, such as protection against frequency-selective fading, immunity against intercarrier interference or ICI thanks to the orthogonality in them or the simplicity of the implementation using FFT and IFFT, the Fast Fourier Transform and its inversed.

Moreover, OFDM has certain mechanisms which make out of it a very sturdy modulation. One of them is the incorporation of the so called Cyclic Prefix, or CP, which allows preventing the effects of multipath fading. The Cyclic Prefix consists in introducing at the beginning of an OFDM symbol, in a space destined to that end, a reproduction of the ending part of the same symbol. This part of the symbol will be ruled out at its arrival to the receptor and, if it has enough size for the conditions of the channel in which it's being transmitted, it will avoid in its majority the effects of the Inter Symbol Interference, or ISI. As a negative aspect, we must indicate that the introduction of a Cyclic Prefix in the OFDM symbols somewhat decreases the transmission's efficiency.

Another negative aspect to highlight in the OFDM modulation is its high sensitivity to synchronism errors. Said errors can be produced in time, in carrier frequency and in sampling frequency, where a minimum offset in any of this three parameters can induce a very negative effect if not corrected properly.

Spatiotemporal codes: the Alamouti scheme

Besides OFDM modulation, another key part to achieve the optimal functionality of the MIMO technology is the block codes. These codes are in charge of space-temporal sending data codification and allow the achievement of profits such as spatial diversity gain or array gain.

Inside the diversity of existing block codes, one of the most important is the Alamouti scheme. Alamouti presented a model in which, by using several antennas for transmission and reception, you could increase diversity gain without needing feedback or an increment in power. And all this without requiring an extreme computational complexity. This way, we can achieve the increase of transmission systems efficiency, following the $M \times N$ equation, where M represents the number of transmission antennas and N the number of reception antennas.

In the Alamouti codification, two transmission antennas send in two time stamps two orthogonal sequences which, treated in the correct way in the receptor, will generate as a consequence a spatial diversity increase, bettering the system performance.

As you can imagine, a MIMO antennas design may present a great diversity of options by combining input and output antennas number in different ways. For the development of this project we have specifically studied a model based on two transmission and two reception antennas, the so called for simplicity MIMO 2x2. Among the possible benefits of MIMO we have taken advantage of the spatial diversity gain one where, sending through both antennas the same information, it will reach redundantly the receiving block to reduce the possibility of the information arriving in an incorrect way. In the other hand, we could have chosen a model in which transmission antennas sent independent information in order to increase the system's capacity.

Implementation of a real model based on LabVIEW and the USRP-2920 devices

To analyze more deeply the MIMO 2x2 system's complexity and the benefits obtained from them, we have decided to implement an application where we can recreate a real scenario in which several antennas transmit in order to determinate its properties. For that instance we used principally two tools, both of them supplied by National Instruments: the LabVIEW development environment, which allows the programming of the data send scheme, and the signal transmission equipment USRP-2920, responsible for the physical signal transmission.

LabVIEW is a development platform specially destined to a scientific and experimental use. For that reason, it is based in a visual programming language, granting the user several tools and resources to implement, through block diagram design, advanced applications with different aims; development and analysis of signal transmission in this case.

To do that, some kind of equipment in charge of signal transmission is essential. And that's why we have the USRP-2920 equipment, transceiver that, controlled by a computer, allows signal transmission and reception in RF thanks to antennas coupled to them. This way a scheme formed by a transmitter block and a receiver block will be implemented, allowing signal sending. Both system blocks will constitute in the same way: a computer connected by an Ethernet wire to a USRP-2920 connected to another USRP-2920 by a MIMO wire which allows synchronization between both devices.

Now that we have built our MIMO system, we can move forward and develop the LabVIEW program to simulate the transmission. This program has been implemented based on the design of a previous student of the Carlos III University, Daniel Pérez Vaquero, who, during the making of his project, designed a MIMO 2x1 antennas

system, also using LabVIEW. Also thanks to the code provided by this project's tutor, Ana García Armada, it's been possible to evolve the previous works of Daniel, integrating a new reception antenna.

In the same way that the USRP-2920 scheme was formed by two blocks dedicated to transmission and reception, the developed application will also be formed by two parts working in each computer.

Development of the application on LabVIEW

The main function of this application will consist in the transmission from one computer to another of a text or an archive introduced by the user. Because of that it's been necessary to implement in both blocks a visual interface by which the user can configure the transmission introducing these parameters, and also the OFDM modulation ones or the configuration of the USRP-2920 devices.

For the transmission to be satisfying it's been necessary to program the different functions that form a MIMO system, in its transmitter and its receptor.

➤ Functions of the transmitter block

This way the transmitter first is occupied configuring the USRP-2920 devices with the indicated parameters by the user through the visual interface. Once we've done this, we will obtain the bits corresponding to the text or the archive that we want to transmit, to which we have to add a couple of sequences destined to the indication of the frame length and synchronization. Once obtained, the bits must be mapped in symbols through possible modulations: 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM or 64-QAM. To these symbols we will add a series of pilots that will do channel estimation; then we will implement the Alamouti codification to obtain two orthogonal symbols' chains. Later on, in order to be able to do de OFDM modulation, the symbols and their pilots will be reorganized letting a DC carrier and guard bands free in order to perform the IFFT in them, and inserting then the cyclic prefixes to battle the ISI. This way the OFDM symbols will be introduced in packages after generating and adding synchronism sequences. Once we've done this, the two package chains will become a part of a bidimensional array to be sent through the antennas of both USRP-2920 to the receptors.

➤ Functions of the receiver block

In the receptor, after the configuration of both USRP-2920 devices, and in the same way as in the transmitter, takes place the process inverse to that developed in the

transmitter. After the arrival of packages, the synchronism sequences are extracted, allowing the synchronization in time and frequency of the OFDM symbols. Once the symbols are synchronized, we remove the cyclic prefixes in order to perform the FFT over said symbols and organize them without taking into account the DC carrier and the guard bands. After that, in order to do the Alamouti decoding, the channel estimation bits are extracted, and thanks to them we can perform said decoding through lineal combination of the received symbols and estimations. Once decoded, the symbols are demapped to obtain the bits that, after being processed by the adequate treatment of synchronization and length sequences, will generate the text or archive that was sent by the transmitter.

Obtaining and comparison of results

After developing this application we have proceeded to check if the system works properly, sending texts and archives, varying the transmission configuration parameters, such as bit/symbol of QAM modulation or the number of OFDM symbols enabled to check how the system behaves in each case.

Once we have checked the correct working of the system, we proceeded to compare the performance of the original design with a single receiver antenna with the newly implemented with two antennas for this purpose.

To make such checks, first we have displayed constellations each of the two designs, shown through the user interface, for all modulations implemented in the program. Thus, we can see as the received symbols in the system with two antennas are closer to where it should be than the system with one antenna. This happens regardless of the number of bits per symbol used in modulation and, the higher the value, the more severe distortion resulting from the proximity of the symbols and, therefore, the better the performance with two antennas.

But as checking through the constellations can be complicated and not sufficiently objective for the number of symbols received and the closeness between them, we have made an additional check for comparing the received bits with the transmitted both cases. Thus, after exporting as an Excel file all the bits sent and received after a period of time, these can be compared to obtain the probability of bit error in each of the cases. Again, this probability was less with two receiving antennas for different possible modulations.

As we expected, due to theoretical studies, the profits of the two-receptor antenna system improve the efficiency of the one-antenna system which served as a base to this project.

However, looking to the future, it is possible to improve the developed application incorporating more reception antennas, or even adding a channel prediction mechanism, prevention errors of adaptive modulation that would make the system even more efficient.

Índice

Contenido

Agradecimientos	2
Resumen.....	3
Abstract	9
Índice	15
CAPÍTULO 1: Introducción y objetivos del proyecto	17
1.1. Introducción: analizando el marco actual de las telecomunicaciones.....	18
1.2. Objetivos del proyecto	19
1.3. Estado del arte	21
1.4. Organización de la memoria	23
CHAPTER 1: Introduction and objectives of the project	24
1.1. Introduction: analyzing the current telecommunications framework.....	25
1.2. Objectives of the project.....	26
1.3. State of the art	28
1.4. Organization of the paper	30
CAPÍTULO 2: Fundamentos teóricos de un sistema de comunicaciones MIMO.....	31
2.1. Introducción a los sistemas MIMO.....	32
2.1.1. ¿Qué es la tecnología MIMO?	32
2.1.2. Los beneficios de la tecnología MIMO	34
2.1.3. Diagrama de bloques de los sistemas MIMO.....	36
2.1.4. Modelado de los canales de transmisión MIMO	36
2.2. Modulación OFDM	38
2.2.1. El funcionamiento de la modulación OFDM	39
2.2.2. La importancia del prefijo cíclico y la sincronización	41
2.3. Codificación de Alamouti	45
CAPÍTULO 3: Desarrollo de la aplicación en LabVIEW	49
3.1. El uso de LabVIEW y USRP-2920	50
3.1.1. El entorno de desarrollo LabVIEW	50
3.1.2. Los dispositivos USRP-2920.....	51
3.2. Diseñando el sistema MIMO 2x2 en LabVIEW	55
3.3. Bloque transmisor.....	56
3.3.1. La interfaz gráfica en el transmisor	56
3.3.2. Configuración de los USRP-2920	57

3.3.3.	Inicialización de los valores	58
3.3.4.	Obtención de los bits.....	58
3.3.5.	Almacenamiento de los bits enviados en un array	59
3.3.6.	Mapeo de los bits en forma de símbolos	59
3.3.7.	Inserción de pilotos y codificación de Alamouti	59
3.3.8.	Modulación OFDM	60
3.3.9.	Generación de paquetes	60
3.3.10.	Transmisión de paquetes	60
3.4.	Bloque receptor.....	61
3.4.1.	La interfaz en el bloque receptor	61
3.4.2.	Configuración de los USRP-2920	62
3.4.3.	Inicialización de los valores	63
3.4.4.	Recepción de Paquetes	63
3.4.5.	Sincronización	63
3.4.6.	Demodulación OFDM	64
3.4.7.	Extracción de pilotos y decodificación de Alamouti	64
3.4.8.	Demapeo	65
3.4.9.	Almacenamiento de los bits enviados en un array	65
3.4.10.	Extracción y procesado de los bits en la cola/referencia	66
	CAPÍTULO 4: Comprobación y comparación de los resultados obtenidos.....	68
	CAPÍTULO 5: Conclusiones y futuras líneas de investigación.....	74
5.1.	Conclusiones.....	75
5.2.	Futuras líneas de investigación	77
5.3.	Conclusions	79
5.4.	Future research	81
	CAPÍTULO 6: Planificación y presupuesto del proyecto	83
6.1.	Planificación del proyecto	84
6.2.	Presupuesto del proyecto	86
	Anexo: Referencias y bibliografía.....	87

CAPÍTULO 1:

Introducción y objetivos

del proyecto

1.1. Introducción: analizando el marco actual de las telecomunicaciones

A lo largo de las últimas décadas, las comunicaciones inalámbricas han sufrido una notable evolución acorde a las cada vez mayores exigencias de los consumidores y en consonancia con las innovaciones tecnológicas que se han desarrollado durante los últimos años.

A la hora de analizar esta situación, es importante tener en cuenta como las comunicaciones móviles se han convertido recientemente en un elemento fundamental en nuestras vidas, brindándonos una serie de servicios hace no mucho tiempo impensables, como son la tecnología Wi-Fi, Bluetooth o LTE (*Long Term Evolution*) que nos permiten compartir gran cantidad de información de una manera muy rápida y sencilla.

Es por ello que, en busca de la satisfacción de un consumidor cada vez más exigente, la necesidad de comunicaciones más avanzadas, tanto en lo referente a calidad de la transmisión como a cantidad de la información transmitida, se hace mucho mayor con el paso del tiempo. Sin embargo, según la tecnología va avanzando y superando dificultades, van surgiendo nuevos problemas que deben ser investigados y solucionados para seguir ofreciendo nuevos avances.

Actualmente, las líneas de investigación en el terreno de las telecomunicaciones avanzan en torno a la búsqueda de mayores tasas de transmisión, uno de los principales escollos de las tecnologías inalámbricas frente a las tecnologías cableadas, y al aprovechamiento del espectro radioeléctrico, un recurso imprescindible y cada vez más escaso debido a la cantidad de nuevas tecnologías que ocupan las bandas de frecuencia aprovechables para las comunicaciones.

En la búsqueda de soluciones para estos problemas es donde aparece la tecnología sobre la que se va a basar este proyecto, los sistemas de antenas MIMO, o lo que es lo mismo, Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (*Multiple-Input Multiple-Output*) que, haciendo uso de varias antenas tanto para la transmisión como para la recepción de señales, han permitido un avance muy importante en el mundo de las telecomunicaciones.

1.2. Objetivos del proyecto

Las tecnologías MIMO constituyen el progreso en el diseño de redes de comunicaciones inalámbricas y se encuentran ya en el núcleo de gran cantidad de estándares en cuanto a este tipo de comunicaciones. Haciendo uso de la mejora de la eficiencia que permite la utilización de diversas antenas, las técnicas MIMO ofrecen mejoras significativas en el rendimiento en lo que se refiere a tasas de transmisión de datos y la reducción de la interferencia.

Para empezar a definir los objetivos de este proyecto, se intentará hacer una minuciosa introducción al análisis y el diseño de los sistemas MIMO. En ellos, gracias a la mejora de la diversidad espacial, se conseguirán diversas ventajas, que serán presentadas y detalladas, así como ciertas desventajas que también son importantes remarcar.

Como se explicará a lo largo de la memoria, existen diversos tipos de sistemas MIMO; aquí abordaremos concretamente el estudio de los sistemas 2x2 compuestos, como su propio nombre indica, por dos antenas transmisoras y dos receptoras.

Para realizar este análisis y suponiendo el núcleo de la práctica, se va a desarrollar un sistema de comunicaciones en el software LabVIEW, una plataforma de desarrollo basada en un lenguaje de programación gráfico. De esta manera, gracias a LabVIEW se podrá diseñar una aplicación de transmisión-recepción en la que, mediante el uso de dos antenas de transmisión y dos de recepción, se podrán transmitir texto o archivos haciendo uso de las técnicas que son habituales en la tecnología MIMO. El desarrollo de este programa permitirá analizar minuciosamente la complejidad que hay detrás de esta tecnología y los beneficios que de ella se obtienen. Para que todo este trabajo sea posible, se utilizarán los dispositivos de National Instruments USRP-2920, un hardware que, manejado mediante un ordenador y el programa que hemos diseñado, permite la transmisión de las señales que se modularán a partir de las instrucciones recibidas por parte del usuario.

Llegados a este punto es necesario remarcar que la realización de este TFG se ha apoyado directamente en el proyecto realizado en el año 2014 por el también alumno de esta universidad, Daniel Pérez Vaquero, el cual elaboró en LabVIEW un software de comunicación basado en MIMO 2x1, con dos antenas transmisoras y una receptora. El objetivo que se ha perseguido es la evolución del sistema creado por Daniel para poder incorporar una antena receptora adicional que permitiese mejorar las prestaciones del sistema y, de esa manera, realizar una comunicación más eficiente. Para ello, se han

añadido nuevas funcionalidades al programa que se explicarán durante el desarrollo de esta memoria.

De esta forma, el objetivo perseguido es que, una vez desarrollada la aplicación, se pueda comprobar la mejora esperada al añadir una antena receptora al diseño del que se partía mediante resultados obtenidos a partir de un entorno real.

Algo fundamental para entender todas las ideas desplegadas durante la memoria es comprender diversos conceptos teóricos imprescindibles en las tecnologías MIMO. Uno de los conceptos más importantes y en los que se hará mayor hincapié será el de la codificación de Alamouti, que supone uno de los posibles esquemas de codificación espaciotemporal y que hemos elegido por su relativa sencillez comparada con su notable eficiencia. También se prestará especial atención a la modulación OFDM donde múltiples subportadoras de poca capacidad y ortogonales en frecuencia se combinan en el transmisor para formar un compuesto de alta capacidad.

Con todo esto, se pretende que con la lectura de esta memoria, el lector sea capaz de comprender de una manera precisa cómo funciona y qué ventajas supone un sistema de antenas MIMO 2x2.

1.3. Estado del arte

En los últimos años, la necesidad de comunicaciones inalámbricas cada vez más rápidas y eficientes ha aumentado considerablemente, hasta el punto de que hoy en día se realizan enormes inversiones dirigidas tanto a la investigación como al despliegue de tecnologías que cubran tales necesidades. Es en este punto donde la tecnología MIMO ha adquirido recientemente, gracias a unas prestaciones primordiales para dicho objetivo, un papel fundamental, convirtiéndose en uno de los pilares de las telecomunicaciones y evolucionando a un ritmo considerable en los últimos años.

Como es de imaginar, las grandes empresas de telecomunicaciones buscan realizar inversiones que den lugar a grandes beneficios por lo que, en este punto, resulta fundamental hablar del coste que supone la investigación y el despliegue de redes basadas en MIMO. Esta tecnología está basada en una serie de técnicas que no requieren excesiva capacidad computacional y la mayor inversión que requiere su despliegue se basa en la ampliación del número de antenas instaladas. Por ello, el gasto que se debe hacer para incorporar la tecnología MIMO a las redes actuales no es elevado, lo que la convierte en una opción muy atractiva para las compañías de telecomunicaciones.

De esta forma, numerosas tecnologías han incorporado esta técnica a sus estándares, permitiéndolas así mejorar sus especificaciones para hacerlas más eficientes. Por ello, MIMO ha pasado a formar parte de los estándares de diversas tecnologías inalámbricas WLAN, WMAN y redes de comunicación móvil 3G y 4G.

Para comenzar, en la tecnología 802.11, más comúnmente conocida como Wi-Fi, la incorporación de las técnicas MIMO a partir de su estándar 802.11n ha permitido el envío de cuatro flujos de datos mediante sistemas de dos antenas de transmisión y dos de recepción que, con anchos de banda de 20 y 40 MHz, da lugar a tasas de datos de hasta 600Mbps.

WiMAX, a partir de 2005 en su estándar 802.16e, incorporó MIMO para conseguir la diversidad de transmisión y la multiplexación de espacio gracias al uso de 2 o 4 antenas en los dos extremos del sistema. Con ello se han conseguido velocidades de 138 Mbps e incluso, en las versiones más recientes como 802.16m, de hasta 1Gbps de velocidad de bajada.

En cuanto a las redes de comunicación móvil, con el desarrollo de la tecnología LTE dentro del marco del 4G, se adquirieron técnicas basadas en MIMO-OFDM que, al igual que en WiMAX, permitieron diversidad de transmisión y multiplexado espacial para alcanzar velocidades de 300 Mbps en los enlaces de bajada y de 75 Mbps en los de subida. [5]

Las líneas de investigación futuras acerca de MIMO están orientadas básicamente en la búsqueda de mayores tasas de envío y el aumento de la cobertura y el rango en la transmisión. Es principalmente en el sector de las comunicaciones móviles (en el actual 4G y el venidero 5G) donde se debe explotar el potencial de esta tecnología, sobretodo en el ámbito multiusuario (MU MIMO), donde varios usuarios puedan acceder a la red compartiendo sus recursos y mejorando enormemente su eficiencia espectral global.

Un aspecto fundamental de la progresiva incorporación de MIMO a diversas tecnologías como se ha explicado, es que no impone ningún tipo de restricción en lo que se refiere a aspectos como la frecuencia, el ancho de banda o la potencia utilizada. Es decir, las tecnologías que la incorporen podrán hacerlo sin modificar sus características y seguir cumpliendo con la normativa establecida por los diferentes organismos reguladores.

En lo que respecta a la aplicación que se va a desarrollar durante este proyecto, como ya se ha mencionado en el apartado anterior, se parte de un diseño realizado por otro alumno para su proyecto.

La aplicación implementada en LabVIEW por este alumno englobaba una serie de funciones que permitían el envío de textos y archivos entre dos ordenadores mediante dos antenas para la transmisión y una para la recepción, es decir, formando un esquema MIMO 2x1. A partir de este modelo se intentará evolucionar sus prestaciones añadiendo una antena receptora adicional.

1.4. Organización de la memoria

Al comienzo de la memoria, se hará una breve introducción sobre las motivaciones del proyecto, haciendo un repaso del estado del arte de las tecnologías MIMO y de la aplicación de envío de datos de la que se partía, para presentar los objetivos del proyecto.

En segundo lugar, en el capítulo 2, se presentarán los conceptos básicos de la tecnología MIMO, así como de la modulación OFDM y de la codificación de Alamouti, prestando especial atención a los sistemas 2x2.

A continuación, se explicará detalladamente en el capítulo 3 cómo se ha desarrollado la aplicación de transmisión MIMO 2x2 en LabVIEW, haciendo primero una introducción sobre el funcionamiento de este programa y los dispositivos USRP-2920.

Complementando el capítulo anterior, en el capítulo 4 se comprobará el correcto funcionamiento de la aplicación y gracias a ella se compararán las prestaciones del diseño MIMO basado en dos antenas receptoras con el de una sola desde el que se partía.

Posteriormente, en el Capítulo 5, se extraerán conclusiones de los estudios realizados y se presentarán futuras líneas de investigación en lo que se refiere a la tecnología MIMO y a la aplicación desarrollada.

Por último, en el capítulo 6 se mostrará la planificación que se ha seguido a lo largo de la realización del proyecto detallando el tiempo empleado en cada una de las tareas y se desglosará el presupuesto invertido en él, tanto en gastos de material como de personal.

CHAPTER 1:

Introduction and objectives of the project

1.1. Introduction: analyzing the current telecommunications framework

Over recent decades, wireless communications have exhibited a remarkable evolution following the growing demands of consumers and in line with the technological innovations that have been developed over recent years.

When analysing this situation, it is important to consider how mobile communications have recently become a key element in our lives, giving us a range of services unthinkable not so long ago, such as Wi-Fi, Bluetooth or LTE (Long Term Evolution) technologies which allow us to share lots of information very quickly and easily.

That is why, in search of the satisfaction of increasingly demanding number of consumers, the need for more advanced communication in the information emitted, both in terms of transmission quality and quantity, becomes tougher as time goes by. However, as technology is advancing and overcoming difficulties, new problems arise that need to be investigated and resolved to continue offering new developments.

Currently, the research areas in the field of telecommunications are moving around, seeking for higher transmission rates, one of the major pitfalls of wireless technologies facing wired technologies, and the utilization of radio spectrum, a vital resource which is becoming more and more restricted due to the number of new technologies which occupy the usable frequency bands for communications.

When studying solutions to these problems, the technology that is the base of this project appears. MIMO antenna systems, i.e. Multiple Input Multiple Output, allow the usage of multiple antennas for both transmission and reception of signals. They have enabled an important progress in the world of telecommunications.

1.2. Objectives of the project

The MIMO technologies constitute progress in the design of wireless communication networks and they are nowadays the basis of many standards for this type of communications. By taking advantage of the improved efficiency which allows the usage of different antennas, MIMO techniques offer significant improvements in data transmission rates and a reduction in interferences.

To start defining the objectives of this project, a detailed introduction to the analysis and design of MIMO systems will be accomplished. In them, thanks to the improvement of spatial diversity, different advantages will be obtained, which will be presented and detailed, as well as some disadvantages that it is also important to note.

As it will be explained throughout the memory, there are different types of MIMO systems; here we will deal specifically with the study of 2x2 systems composed of, as its name suggests, two transmitting antennas and two receiving ones.

To perform this analysis, assuming the core of the practice, a communications system in LabVIEW software will be designed, which is a development platform based on a graphical programming language. Thus, thanks to LabVIEW we may design an transmission-reception application in which, by using two transmission and two reception antennas, text or files can be transmitted by using techniques which are standards in the technology MIMO. The development of this program will allow an analysis of the complexity behind this technology and its benefits. To make all this work possible, we will use the National Instruments devices USRP-2920, which is a hardware that handled by a computer and the program that have been designed, allows the transmission of modulated signals generated from the instructions given by the user.

At this point it is necessary to note that the realization of this Undergraduate Thesis is supported in the project developed in 2014 by the student of this university, Daniel Perez Vaquero, who created in LabVIEW communication software based on MIMO 2x1 with two transmitter and one receiver antennas. The goal which has been pursued is the evolution of the Daniel's system to incorporate an additional receiver antenna that allowed improves system performance and, thus, a more efficient communication. For this, we have added new features to the program that will be explained during the development of this report.

Thus, the objective is to check the expected improvement, once the application has been developed, by adding a receiver antenna to the initial design through results from a real environment.

In order to understand all the ideas deployed during this dissertation, different theoretical concepts in MIMO technologies need to be comprehended. One of the most important concepts will be the Alamouti coding, which is one of the possible space-time coding schemes, which has been chosen for its relative simplicity compared with its remarkable efficiency. Special attention is given to OFDM modulation where several subcarriers with small capacity and orthogonal frequency will be combined on the transmitter to form a compound of high capacity.

With those considerations, it is intended that by reading this paper, readers can understand how a MIMO antenna system with two transmitters and two receivers works and get an idea of its benefits.

1.3. State of the art

In recent years, the need for faster and more efficient wireless communications has increased considerably, to the extent that nowadays enormous investments for both the research and the deployment of technologies that meet these needs are accomplished. It is at this point where the MIMO technology has recently been acquired, becoming one of the pillars of telecommunications and evolving at a considerable rate in recent years.

As one can imagine, large telecommunications companies are looking for investments that lead to big profits so, at this point, it is essential to treat the cost related to the research and deployment of networks based on MIMO. This technology is based on a series of techniques that do not require excessive computing capacity and greater investment that required its development. It is based on increasing the number of antennas installed. Therefore, spending should be done to incorporate MIMO technology to existing networks is not so high, making it a very attractive option for telecommunications providers.

Thus, many technologies have incorporated this technique to their standards allowing them to improve their specifications to make them more efficient. Therefore, MIMO has become part of the standards of various wireless technologies as WLAN, WMAN and 3G and 4G networks of mobile communications.

To begin, 802.11 technology, more commonly known as Wi-Fi, incorporating MIMO techniques from its standard 802.11n, has allowed to send four streams of data using systems of two transmitter and two receiver antennas, with bandwidths of 20 and 40 MHz, resulting in data rates up to 600Mbps.

WiMAX, from 2005 in the 802.16e standard, incorporated MIMO to reach transmission diversity and space multiplexing by using 2 or 4 antennas at both ends of the system. This has achieved speeds of 138 Mbps and even, in the most recent versions as 802.16m, up to 1Gbps download speeds.

Regarding mobile communication networks, with the development of LTE technology within the framework of 4G, MIMO-OFDM based techniques were acquired, as in WiMAX, allowing transmission diversity and spatial multiplexing to achieve speeds of 300 Mbps in downlink and 75 Mbps in uplink. [5]

Future lines of research on MIMO are primarily oriented to the search for higher data rates and the increase of coverage and transmission range. It is mainly in the field

of mobile communications (in the current 4G and the coming 5G) where the potential of this technology should be exploited, especially in the multiuser environment (MU MIMO), where multiple users can access the network sharing their resources and greatly improving its overall spectral efficiency.

A key feature for the progressive incorporation of MIMO in various technologies as explained, is that it does not impose any restriction on aspects such as frequency, bandwidth or power used. The technologies that incorporate it, may do so without any required changed in its characteristics, already complying with the regulations established by the various regulatory bodies.

With respect to the application that will be developed during this project, as already mentioned in the previous section, we will start from the design made by another student during his project.

The application implemented in LabVIEW by this student encompassed a number of functions that allow the sending of text and files between two computers using two antennas for transmission and one for reception, that is, forming a 2x1 MIMO scheme. From this model we will try to evolve their performance by adding an additional receiving antenna.

1.4. Organization of the paper

At the beginning of the paper, we will do a brief introduction about the motivations of the project, reviewing the state of the art of the MIMO technologies and the initial application, to present the project's objectives.

Secondly, in Chapter 2, the basic concepts of MIMO technology will be presented, as well as the OFDM modulation and Alamouti code, paying particular attention to the 2x2 systems.

Next, it will be explained in detail in Chapter 3 how the 2x2 MIMO transmission application in LabVIEW have been developed, first with an introduction of the operation of this program and the USRP-2920 devices.

Complementing the previous chapter, chapter 4 deals with the correct execution of the application, which will be checked and thanks to it, we will compare the performance of MIMO design based on two receiving antennas with one from which it was based.

Later, in Chapter 5, conclusions of these studies will be drawn and future researches in relation to the MIMO technology and the developed application will be presented.

Finally, in Chapter 6 we will show the planning that has been followed throughout the project detailing the time spent on each task and we will disaggregate the budget dedicated to it, both in material and personal costs.

CAPÍTULO 2:

Fundamentos teóricos de un sistema de comunicaciones MIMO

2.1. Introducción a los sistemas MIMO

2.1.1. ¿Qué es la tecnología MIMO?

El uso de múltiples antenas para la transmisión y la recepción en las comunicaciones inalámbricas, lo que es comúnmente conocido como tecnología MIMO, ha ganado gran popularidad a lo largo de los últimos años debido a sus prestaciones, que mejoran la llamada diversidad espaciotemporal.

Antes de hablar de la tecnología MIMO, es importante mencionar los sistemas que la precedieron:

- SISO (*Single-Input Single-Output*), donde se realiza una transmisión entre una única antena transmisora y una receptora, los sistemas de transmisión tradicionales.
- MISO (*Multiple-Input Single-Output*), donde es añadida una antena transmisora que permite aumentar el flujo de datos a enviar.
- SIMO (*Single-Input Multiple Output*) donde los datos enviados por una sola antena transmisora son recibidos por varias antenas receptoras.

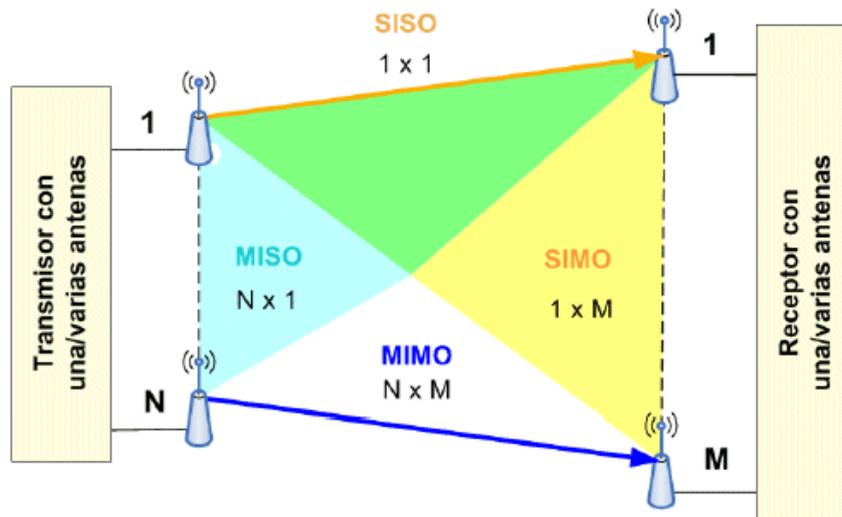


Figura 1: clasificación de los sistemas MIMO

La principal diferencia con respecto a los sistemas de una única antena, es que MIMO permite aprovechar además de las dimensiones temporales y frecuenciales en

la transmisión de señales, las espaciales, dando lugar a la llamada diversidad espaciotemporal. ([1] [2] [3])

De forma introductoria y para comprender a grandes rasgos los beneficios de las tecnologías MIMO, en la siguiente imagen se muestra como mejoraría un sistema mediante el uso de esta tecnología. En ella podemos apreciar cómo, gracias al aumento del número de antenas utilizadas en la transmisión y en la recepción de una señal, mejoraría la tasa de envío de datos. La imagen muestra cómo, para diversos valores de la relación señal/ruido o SNR (*Signal to Noise Ratio*) la tasa de envío aumenta con el incremento del número de antenas. Para un valor determinado de SNR, por ejemplo 30 dB, las tasas de datos se encuentran en unos valores de 0.9 Mbps, 1.75 Mbps y 3.5 Mbps para 1, 2 y 4 antenas de transmisión y recepción respectivamente.

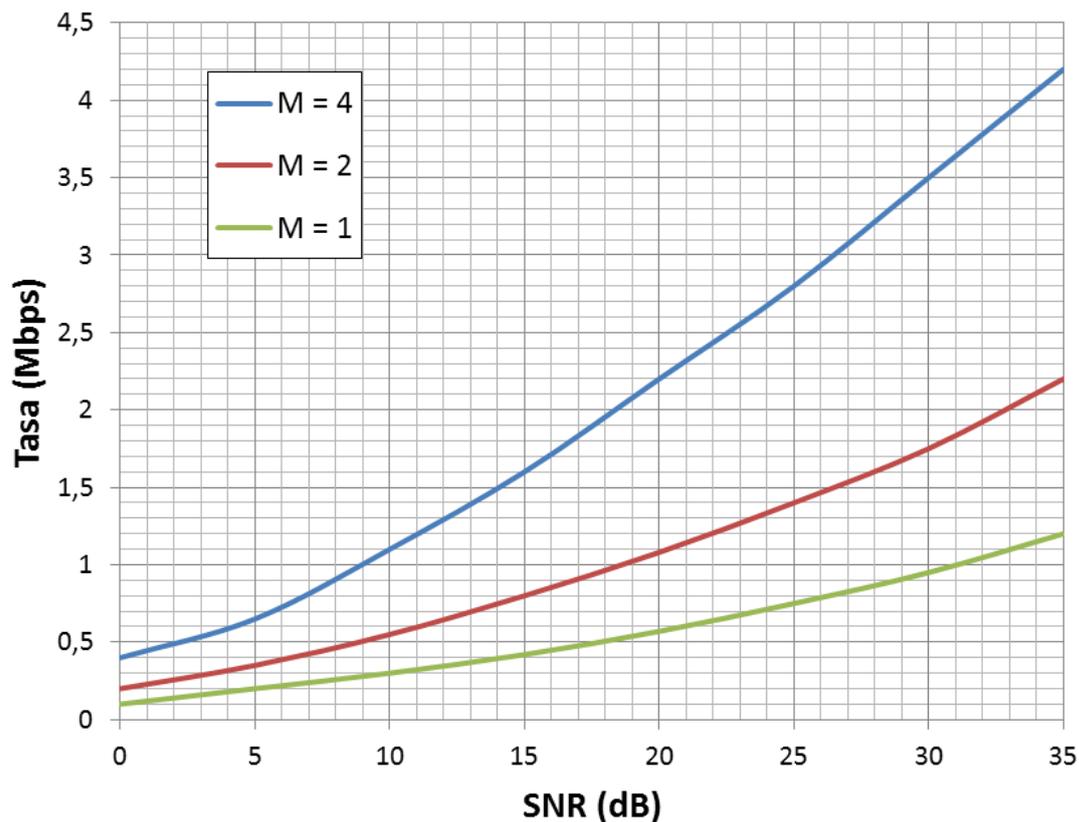


Figura 2: tasa de datos para diferentes números de antenas

Este aumento en la tasa se ha conseguido sin modificar los valores de potencia ni de ancho de banda, lo cual supone que la mejora se debe únicamente al número de antenas utilizadas.

Sin embargo, para hablar de los sistemas MIMO, es importante mencionar su principal enemigo, que supone la mayor limitación a la hora de desarrollarlos. En la transmisión basada en múltiples trayectos y debido a la fluctuación de la señal enviada en el espacio, el tiempo y la frecuencia, aparece el llamado desvanecimiento multitrayecto, que afecta directamente a la calidad de las transmisiones inalámbricas. Además, las limitaciones impuestas por la potencia de transmisión y el ancho de banda utilizado, hacen que diseñar un sistema de comunicaciones MIMO eficiente se convierta en un auténtico desafío.

2.1.2. Los beneficios de la tecnología MIMO

Los beneficios de la tecnología MIMO se pueden clasificar atendiendo al tipo de ganancia que supongan, distinguiéndose de esta manera la ganancia de array, la ganancia por diversidad espacial, la ganancia por multiplexación espacial y la reducción de interferencia.

➤ **Ganancia de array**

La ganancia de array consiste en aumentar la SNR del sistema mediante el uso combinado de las señales en el receptor. Esta combinación se debe realizar mediante el procesado espacial en el array de antenas receptoras y/o un pre-procesado espacial en el array de antenas transmisoras. Esta ganancia supone una mejora en la resistencia ante el ruido que mejora la cobertura y el rango de las comunicaciones inalámbricas.

➤ **Ganancia por diversidad espacial**

Ya se ha hablado antes del desvanecimiento que sufre una señal al ser transmitida por el aire. La ganancia por diversidad espacial ayuda a solucionar este problema mediante la recepción de múltiples copias de la señal transmitida en el espacio, tiempo y frecuencia. Mediante el incremento de copias independientes de la señal recibida, aumenta la probabilidad de que alguna de ellas no haya sufrido en gran medida el efecto del canal, aumentando de esa forma la calidad y fiabilidad del sistema. De esta forma, con M antenas de transmisión y N antenas de recepción, habrá un total de $M \times N$ enlaces independientes, por lo que el orden de diversidad espacial del sistema será de $M \times N$.

En la siguiente imagen se muestra una gráfica en la que se puede apreciar para distintos valores de SNR cómo aumenta la Probabilidad de Error de Símbolo o SER,

dependiendo de si es un sistema sin diversidad o con diversidad gracias a la codificación espaciotemporal de Alamouti 2x2, comparando ambos con un sistema MRC (*Maximun Ratio Combining*).

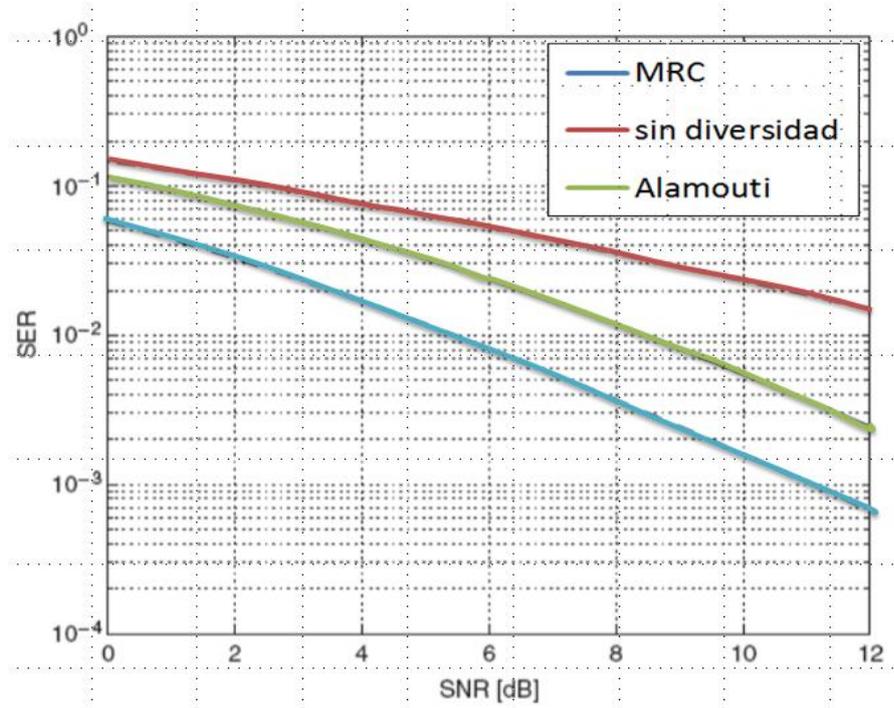


Figura 3: SER para sistemas sin diversidad, con ella y MRC

➤ Ganancia por multiplexación espacial

El multiplexado espacial permite aumentar de forma lineal la tasa de envío de datos transmitiendo múltiples flujos de datos independientes dentro del ancho de banda de transmisión. A través de un canal con las condiciones adecuadas el receptor puede separar estos flujos de datos. Cada flujo experimenta al menos la misma calidad de canal que debería experimentar en una transmisión SISO, mejorándose así la capacidad del sistema mediante la multiplicación del número de flujos por la capacidad del canal único.

➤ Reducción de la interferencia

El uso compartido del medio en tiempo y frecuencia por múltiples usuarios en las comunicaciones inalámbricas da lugar a interferencias. Los sistemas MIMO pueden subsanar este efecto haciendo uso de la diversidad espacial consecuente de la separación entre los usuarios.

2.1.3. Diagrama de bloques de los sistemas MIMO

En un sistema MIMO, se debe distinguir entre el transmisor y receptor para hablar de las funciones que realiza cada uno de ellos pese a que se puede decir que, a grandes rasgos, el funcionamiento de ambos es inverso.

A la entrada del transmisor llega un flujo de información en forma de bits para ser enviado. Para ello, el primer paso a realizar es la codificación del mismo para su posterior mapeado mediante, por ejemplo, la modulación QAM o PSK, dando lugar a símbolos de datos. Estos símbolos llegan a un codificador espaciotemporal del que se obtiene los flujos de datos codificados, que serán procesados y transmitidos por las antenas transmisoras y viajarán por el medio para llegar a las antenas receptoras.

A cada antena receptora llegará una señal para sufrir el proceso inverso del que se realizó en la cadena transmisora, de forma que los datos recibidos son procesados y decodificados espaciotemporalmente, demapeados y decodificados para dar lugar a un flujo de bits semejantes a los enviados previamente.

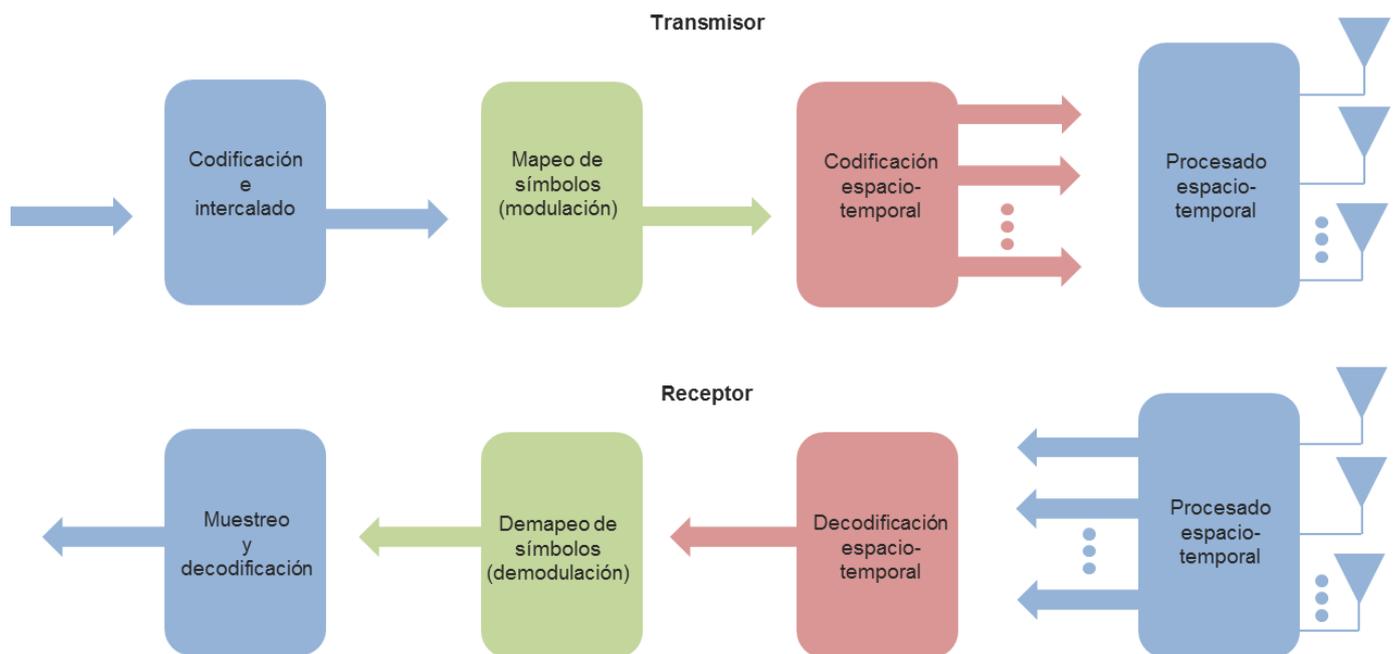


Figura 4: diagrama de bloques de un transmisor y receptor MIMO

2.1.4. Modelado de los canales de transmisión MIMO

Como ya se ha mencionado, en la tecnología MIMO se establecen diversos enlaces entre antenas transmisoras y receptoras que representan el camino por el que viajan las señales que son enviadas. Por ello, es importante diseñar un modelo que permita hacer una abstracción matemática con el objetivo de trabajar con estos sistemas.

Para un sistema con M antenas transmisoras y N antenas receptoras, el canal MIMO para un tiempo dado puede ser representado mediante la siguiente matriz $M \times N$:

$$H = \begin{bmatrix} H_{1,1} & H_{1,2} & \cdots & H_{1,N} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & \cdots & H_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{M,1} & H_{M,2} & \cdots & H_{M,N} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Donde $H_{m,n}$ es el canal SISO establecido la antena transmisora m -ésima y la receptora n -ésima. [4]

2.2. Modulación OFDM

La modulación por división ortogonal de la frecuencia o modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), también llamada generalmente para las tecnologías cableadas modulación por multitono discreto o modulación DMT (*Discrete Multitone Modulation*), se basa en dividir una secuencia de datos en N subcanales o subportadoras de datos paralelos. Cada uno de los subcanales se modula con un símbolo y se multiplexa en frecuencia. Tal generación y detección de un elevado número de portadoras equiespaciadas debería dar lugar a un gran número de moduladores/demoduladores y filtros tanto en el transmisor como en el receptor. Sin embargo, a lo largo del desarrollo de esta tecnología se han diseñado técnicas de procesamiento digital de señales como la transformada rápida de Fourier (IFFT para la modulación y FFT para la demodulación) que simplifica enormemente el proceso.

La modulación OFDM presenta numerosas ventajas que la han convertido en un pilar básico de los sistemas de comunicaciones inalámbricos modernos:

- Alta eficiencia espectral.
- Prevención de la Interferencia Inter Simbólica (ISI) gracias al uso del Prefijo Cíclico (CP).
- Debido a la diversidad en frecuencia, robustez frente la interferencia de banda estrecha (ruido de impulso).
- Simplicidad en la implementación de la FFT (*Fast Fourier Transform*) y baja complejidad en la implementación del receptor.
- Posibilidad de utilizar modulaciones adaptativas que mejoren aún más las prestaciones del sistema.

Sin embargo, como cualquier otra técnica de modulación, OFDM presenta ciertas desventajas que deben ser tenidas en cuenta:

- Las señales OFDM son la suma de varias sinusoides y tiene una relación PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*) alta, lo que puede provocar distorsión no lineal en el transmisor.
- Alta sensibilidad ante errores producidos por la pérdida de sincronización, tanto en tiempo (sincronización de los símbolos OFDM) como en frecuencia (que compromete la ortogonalidad de las subportadoras).

Pese a estos inconvenientes, las ventajas tienen un mayor peso que ha convertido la modulación OFDM en una técnica fundamental en los nuevos sistemas de transmisión por radio.

2.2.1. El funcionamiento de la modulación OFDM

OFDM se basa en la idea principal de dividir el espectro disponible en varios subcanales o subportadoras, que al poseer una banda estrecha tendrán un desvanecimiento plano que facilitará la ecualización. Los canales serán sobrepuestos, lo cual se puede hacer gracias a la ortogonalidad que presentan entre ellos, y esto dará lugar a la gran eficiencia espectral que presenta este modelo. Además, dicha ortogonalidad permite evitar la interferencia entre portadoras ICI (*Inter Carrier Interference*) que aparecería entre las subportadoras si esta no estuviera presente. Este concepto se puede apreciar en la siguiente ecuación:

$$\int_{T_0}^{T_0+t} f_1(t) f_2(t) dt = 0 \quad (2.2)$$

Donde $f_1(t)$ y $f_2(t)$ son las frecuencias de subportadoras, ortogonales durante T . Es importante resaltar que dicha ortogonalidad permite una separación entre las subportadoras de $1/T$, mientras que si no fuese así la separación debería ser de $2/T$ o, explicado en términos de frecuencia, el espaciamiento debe ser de W/N , donde W representa el ancho de banda y N el número de portadoras. Además, la frecuencia de cada subportadora viene dada por:

$$f_n = f_0 + \frac{n}{T_{SOFDM}} = f_0 + \frac{W}{N} n, \quad n = 0, \dots, N - 1 \quad (2.3)$$

Donde el tiempo del símbolo OFDM, $T_{SOFDM} = T_s \cdot N$, con T_s como tiempo de símbolo. [8]

Dicha separación se puede apreciar en la siguiente imagen donde se representa una señal OFDM en el dominio de la frecuencia. [9]

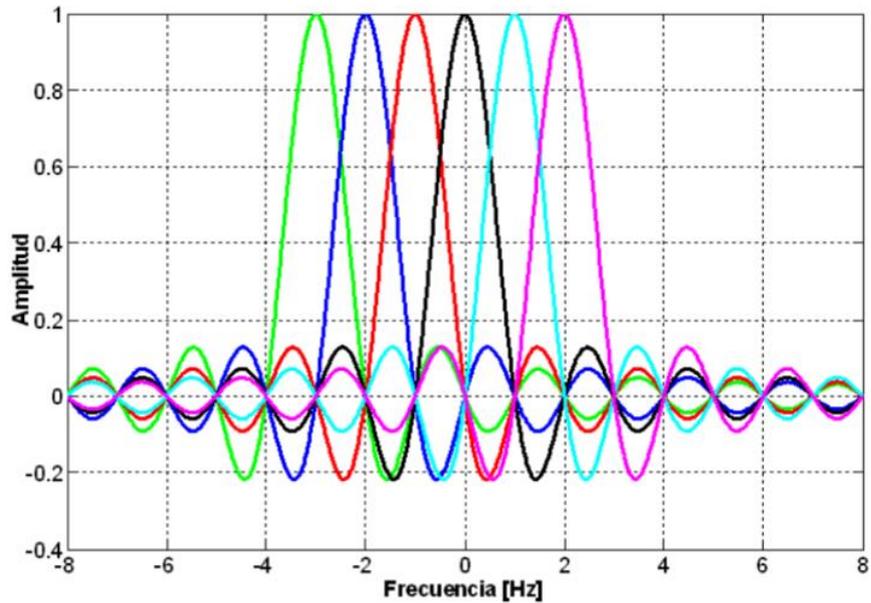


Figura 5: representación frecuencial de la modulación OFDM

A continuación se va a explicar cómo funciona el esquema que se debe seguir en un sistema de modulación OFDM.

El primer paso para construir una señal OFDM consiste en separar los datos a transmitir en N subportadoras o subcanales de datos mediante un conversor serie-paralelo. Una vez hecho esto, los datos serán mapeados mediante esquemas de modulación como M-PSK o M-QAM. A partir de estos mapeadores se obtendrán símbolos a los cuales se les asignará una subportadora mediante la realización de la IFFT de los mismos. De esta manera, cada subportadora transportará una pequeña cantidad de datos, disminuyendo así la velocidad de bit por portadora y, con ello, la ISI. Además, se generan múltiples portadoras ortogonales en frecuencia de forma que el ancho de banda total queda dividido por el número de subportadoras. A la salida del bloque de la IFFT tendremos una serie de datos complejos donde la parte real e imaginaria conformarán la amplitud y fase de cada componente, respectivamente. Llegados a este punto, se introducirá un prefijo cíclico en cada símbolo para eliminar el efecto de la Interferencia Inter Simbólica (ISI) causado por el desvanecimiento multitrayecto y, por último, un conversor digital/analógico producirá una señal análoga en banda base y modulada en radiofrecuencia para ser transmitida. [7]

En la siguiente imagen se puede apreciar mediante un diagrama de bloques todo el proceso de modulación explicado en el último párrafo.

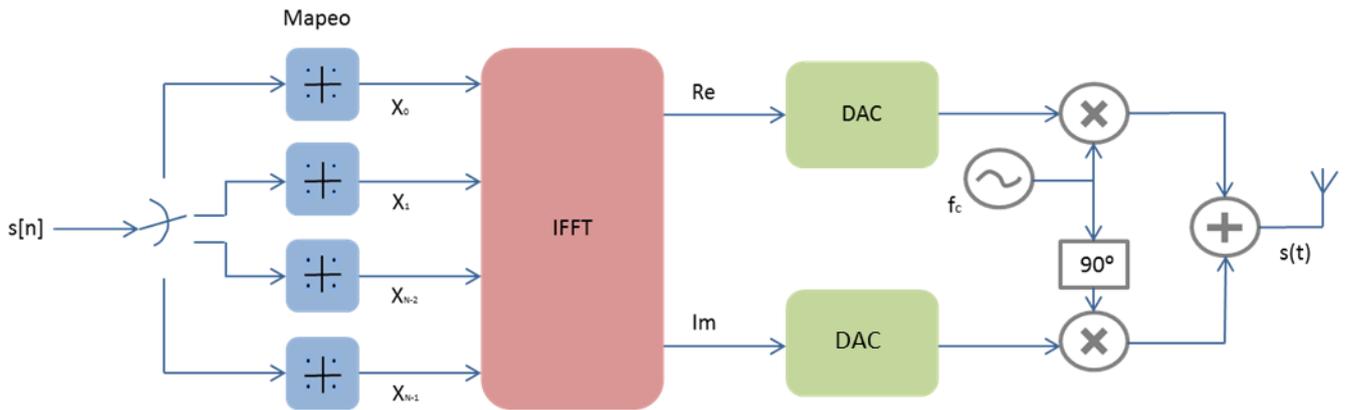


Figura 6: diagrama de bloques del transmisor en la modulación OFDM

Tras realizar dicha modulación, la señal pasará al canal del aire y será transmitida hacia un receptor, sufriendo los efectos del desvanecimiento multitrayecto y el ruido blanco gaussiano aditivo.

Como es lógico, en el receptor se debe realizar el proceso contrario al que se realizó en el transmisor, como se muestra en el siguiente diagrama de bloques y que permita recuperar una estimación adecuada de los bits transmitidos inicialmente.

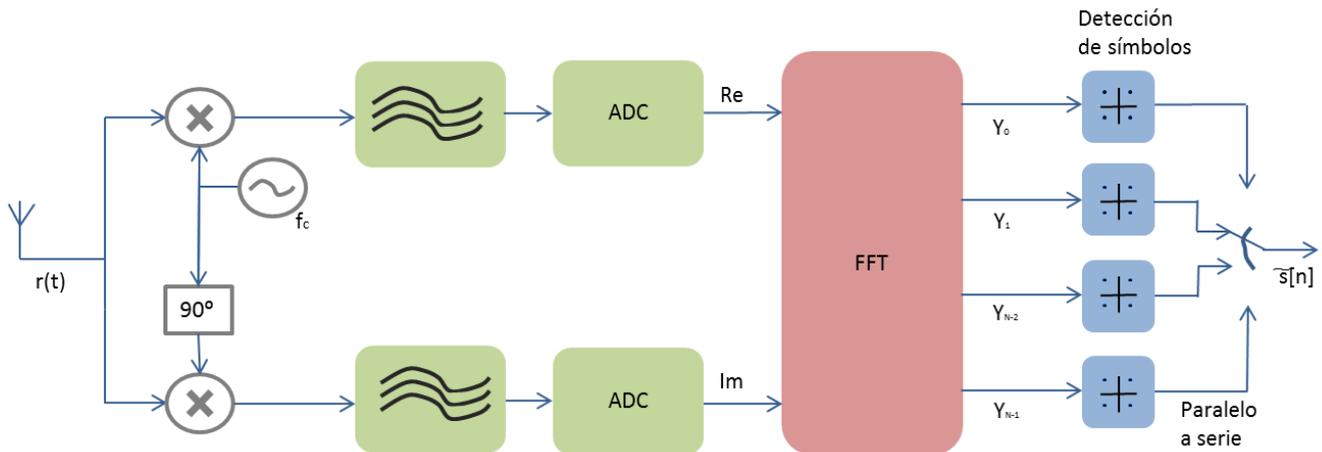


Figura 7: diagrama de bloques del receptor en la modulación OFDM

2.2.2. La importancia del prefijo cíclico y la sincronización

➤ El prefijo cíclico

Ya se ha hablado previamente de que, para combatir la ISI, debe existir al comienzo de cada símbolo OFDM cierta separación entre ellos donde se pueda insertar una pequeña porción de datos conocida como Prefijo Cíclico o CP (*Cyclic Prefix*) que

contiene una réplica de la parte final del símbolo al que pertenece. Este proceso se realiza con el fin de mantener la periodicidad cíclica de dicho símbolo (de ahí su nombre), evitando de ese modo la indeseada ISI.

De esta forma, pueden ser encadenados numerosos símbolos OFDM sin que se resientan debido a la interferencia producida por la dispersión multitrayecto. A continuación, se puede observar una imagen de cómo se construye un símbolo OFDM, previa inserción del prefijo cíclico.

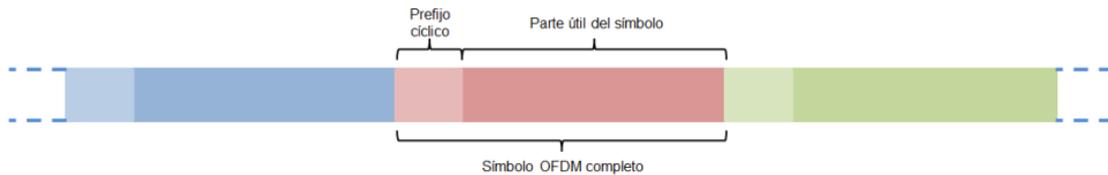


Figura 8: inserción del CP en un símbolo OFDM

Tras la transmisión de los símbolos OFDM en un medio que presente dispersión multitrayecto, el receptor recibirá una señal donde varias réplicas de la señal original se recibirán en distintos intervalos temporales, dando lugar a unos símbolos resultantes donde los prefijos cíclicos y los datos útiles enviados quedarán mezclados indistintamente.

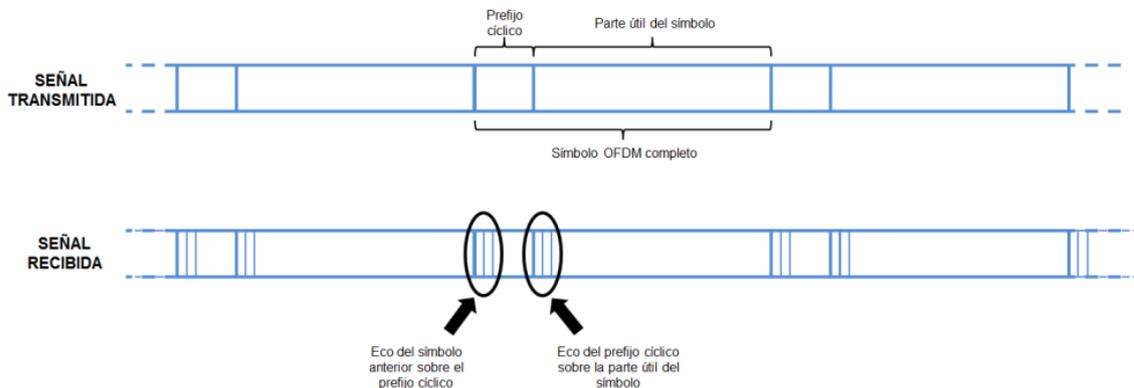


Figura 9: consecuencias de la ISI en un símbolo OFDM con CP

Como se aprecia en la imagen anterior, por un lado, en la parte del prefijo cíclico se solapanán datos útiles del símbolo. Sin embargo, como dicho prefijo es descartado a la llegada al receptor, este efecto no tendrá ninguna consecuencia. Por otro lado, la zona de los datos útiles se verá distorsionada por el solapamiento del prefijo cíclico sobre ella. Esto podría afectar gravemente al símbolo OFDM, pero gracias a las propiedades cíclicas del prefijo cíclico, el símbolo se mantendrá intacto en su llegada al receptor, evitando de esa manera el efecto de la ISI.

Hay que señalar, que cuanto mayor sea el efecto del desvanecimiento multicanal, mayor debe ser la duración del prefijo cíclico, ocupando de esa forma mayor proporción del símbolo OFDM y afectando negativamente a la eficiencia del sistema. [6]

➤ La sincronización

Ya se ha hablado del efecto negativo que la ISI presenta sobre los sistemas OFDM y cómo puede ser este subsanado. Sin embargo, si hay una característica desfavorable en estos sistemas es la dificultad a la hora de realizar la sincronización en tres aspectos: símbolo, frecuencia de portadora y frecuencia de muestreo, siendo el segundo de estos el más sensible a errores.

Para empezar se va a hablar de la sincronización del símbolo, la cual se vuelve más sencilla de resolver debido a la inserción del prefijo cíclico. El error de sincronización da lugar a un desplazamiento de las subportadoras dentro de la constelación. Este error puede ser explicado mediante la siguiente ecuación:

$$z_k = a_k \left[\sum h(i) \cdot e^{-j2\pi ki/N} \right] \cdot e^{-j2\pi kn/N} \quad (2.4)$$

Donde z_k es el símbolo recibido y a_k el transmitido, que se ve afectado por efecto del canal y por la rotación del tiempo, representadas respectivamente por ambas exponenciales.

Si el error de sincronización es lo suficientemente pequeño como para ser contrarrestado mediante el prefijo cíclico, se mantendrá la ortogonalidad. En este caso, la rotación de fase puede predecirse con un estimador de canal y la ISI no afectará a la transmisión.

Por otro lado, el error en la frecuencia de subportadora se debe a diferencias entre los osciladores del receptor y del transmisor, al efecto de canales no lineales y a desplazamientos de Doppler, que pueden provocar la reducción de la amplitud de la señal recibida al no ser muestreadas las señales sinusoidales en sus máximos y la pérdida de ortogonalidad de las subportadoras con la consiguiente aparición de ICI.

En un sistema con desplazamiento en la frecuencia de subportadora, la SNR (Relación Señal-Ruido) se degrada de la siguiente manera:

$$D(db) \approx \frac{10}{3 \ln 10} (\pi \Delta f)^2 \frac{E_s}{N_0} = \frac{10}{3 \ln 10} \left(\pi \frac{N \Delta f}{W} \right)^2 \frac{E_s}{N_0} \quad (2.5)$$

Donde N es el número de subportadoras, W el ancho de banda y Δf el offset frecuencial, que viene dado por la expresión:

$$\Delta f = \frac{\Delta F}{W/N} \quad (2.6)$$

Sin embargo, el efecto del offset en la frecuencia de subportadora puede corregirse mediante el uso de pilotos introducidos en la señal, los cuales, siendo conocidos por el receptor, permiten predecir la rotación de fase para corregir la desincronización. Además, el prefijo cíclico también puede ayudar a corregirlo.

Por último, hay que mencionar que los errores en la sincronización de la frecuencia de muestreo de la señal recibida tienen efectos parecidos a los errores en la frecuencia de portadora, como son la atenuación de la señal y la aparición de ICI. Para evitarlos, la desincronización en la frecuencia de muestreo se puede corregir mediante un algoritmo que procese la señal recibida sin variar la tasa de muestreo o mediante un oscilador de cristal que realice la sincronización entre los relojes de transmisión y recepción. [10]

2.3. Codificación de Alamouti

Ya se ha mencionado en varias ocasiones a lo largo de esta memoria la codificación espaciotemporal o los códigos de bloque que permiten mejorar las características de diversidad de los sistemas MIMO. El esquema más utilizado para esta tecnología por su simplicidad y eficiencia y en el que se va a basar este proyecto es el esquema de codificación de Alamouti.

Siavash Alamouti propuso a finales del siglo pasado un esquema donde, con dos antenas transmisoras y una receptora, sin aumentar el ancho de banda ni la potencia de transmisión y sin realimentación por parte del receptor al transmisor (es decir, sin conocimiento del canal en el transmisor), se conseguía una mejora en la ganancia por diversidad. Dicho esquema fue ampliado posteriormente a dos antenas receptoras, con las que acercaba dicha ganancia a la de un esquema MRRC (*Maximal-Ratio Receiver Combining*). También generalizó el esquema para M antenas receptoras que dieran lugar a una ganancia de $2M$. En este esquema, la redundancia no se consigue a través del tiempo ni de la frecuencia, si no del uso de múltiples antenas, con lo cual el ancho de banda y el tiempo de transmisión no deben ser modificados. Además, la complejidad computacional no es elevada, asemejándose a la de MRRC. [11]

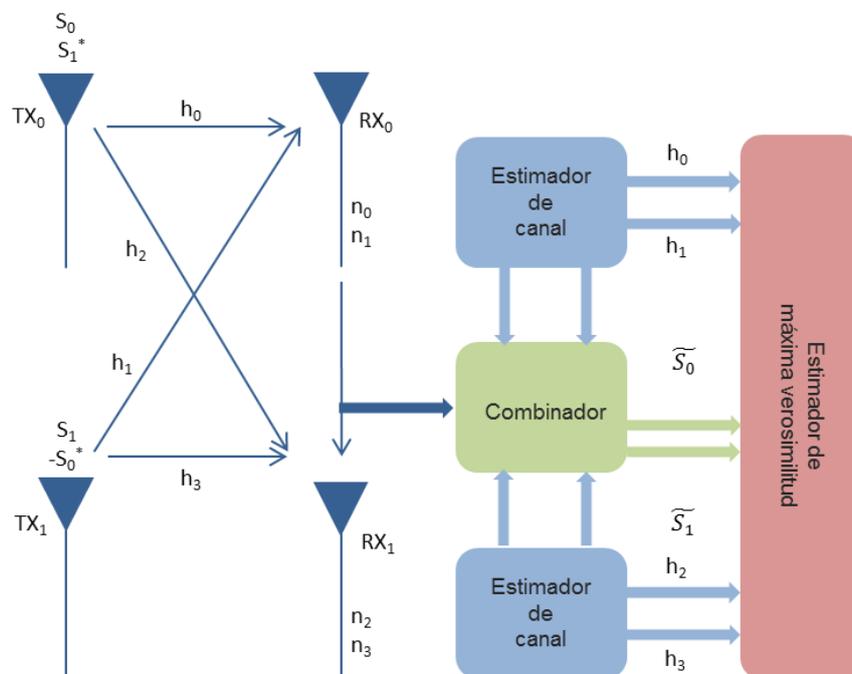


Figura 10: esquema de Alamouti para MIMO 2x2

Como se ha explicado en el párrafo anterior, el número de antenas receptoras puede variar, pero a continuación se va a abordar con mayor profundidad cómo funcionaría la codificación de Alamouti para un sistema 2x2 que daría lugar a una ganancia por diversidad de 4.

En este esquema, las dos antenas envían dos señales simultáneas en un periodo de símbolo establecido. La señal enviada por la primera antena se denomina S_0 y la señal transmitida por segunda antena S_1 . En el primer instante de tiempo ambas señales son transmitidas, enviándose de esa manera un símbolo completo. En el siguiente instante de tiempo, la primera antena enviará $-S_1^*$, mientras que la segunda antena enviará S_0^* . El símbolo * corresponde al conjugado del símbolo y se introduce en la codificación de Alamouti para mantener la ortogonalidad de las señales. Esta transmisión se aprecia de una manera más visual y sencilla en la siguiente tabla:

	TX ₀	TX ₁
t	S_0	S_1
t + T	$-S_1^*$	S_0^*

Donde t corresponde al primer instante de tiempo y $t + T$ al siguiente.

Esta información también se podría expresar mediante dos matrices que faciliten la explicación matemática del modelo.

$$TX_0 = [S_0 \quad -S_1^*] \quad (2.6)$$

$$TX_1 = [S_1 \quad S_0^*] \quad (2.7)$$

Donde $TX_0 \cdot TX_1 = 0$, respetando la ortogonalidad del sistema.

De igual manera que esto se corresponde con una codificación espaciotemporal en dos periodos, se podría realizar una codificación espaciofrecuencial en dos portadoras adyacentes.

Los canales de transmisión se pueden expresar como ya se explicó en el apartado 2.1.4. mediante la matriz:

$$H = \begin{bmatrix} H_0 & H_2 \\ H_1 & H_3 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Por último, al receptor llegan dos señales a cada una de las dos antenas que, igual que se hizo con la parte transmisora, se puede expresar mediante una tabla:

	RX ₀	RX ₁
TX ₀	R_0	R_2
TX ₁	R_1	R_3

Mediante la combinación de las expresiones anteriores de las señales de transmisión y recepción y el canal de transmisión, se pueden diseñar las siguientes ecuaciones donde, además de tenerse estas señales en cuenta, se añadirá el efecto del ruido gaussiano complejo del canal expresado como N_0, N_1, N_2 y N_3 :

$$R_0 = H_0 S_0 + H_1 S_1 + N_0 \quad (2.8)$$

$$R_1 = -H_0 S_1^* + H_1 S_0^* + N_1 \quad (2.9)$$

$$R_2 = H_2 S_0 + H_3 S_1 + N_2 \quad (2.10)$$

$$R_3 = -H_2 S_1^* + H_3 S_0^* + N_3 \quad (2.11)$$

Una vez recibidas estas secuencias, se puede estimar a partir de ellas las señales originales S_0 y S_1 de la siguiente forma:

$$\tilde{S}_0 = H_0^* R_0 + H_1 R_1^* + H_2^* R_2 + H_3 R_3^* \quad (2.12)$$

$$\tilde{S}_1 = H_1^* R_0 - H_0 R_1^* + H_3^* R_2 - H_2 R_3^* \quad (2.13)$$

Este esquema es semejante al de una sola antena receptora con la única diferencia de que hay que sumar las señales combinadas desde todas las antenas receptoras. Este concepto nos permitiría extender el modelo de 2x2 a 2xM, con el número de antenas receptoras que sea necesario.

Además, es importante remarcar que para acercar este modelo matemático a la realidad es pertinente realizar la normalización en la señal estimada. [12]

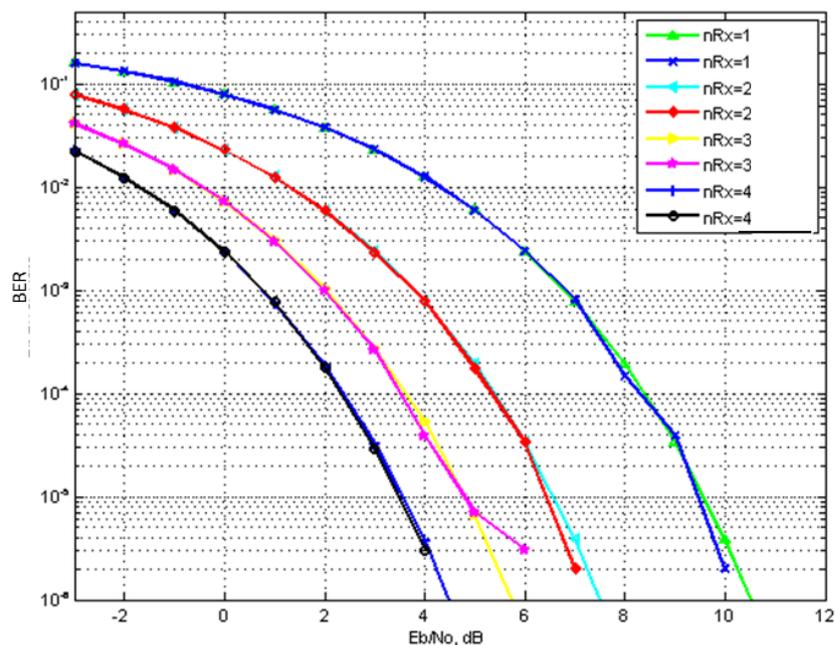


Figura 11: BER en sistemas MIMO con diferente número de antenas

Para acabar de explicar la codificación de Alamouti, en la imagen anterior se muestra como mejora la eficiencia de los sistemas MIMO basados en esta codificación con la introducción de nuevas antenas receptoras.

CAPÍTULO 3:

Desarrollo de la aplicación en LabVIEW

3.1. El uso de LabVIEW y USRP-2920

Una vez se estudió y comprendió cómo funcionaba la tecnología MIMO basada en la modulación OFDM y el esquema de Alamouti, llegó el momento de llevarlo a la práctica y diseñar un sistema real que permitiese comprobar cómo sería su comportamiento más allá de la teoría.

Para ello, se contemplaron múltiples posibilidades tanto a nivel de software como de hardware y, tras hacer un estudio de las diversas opciones posibles, se decidió apostar por usar el material de la empresa National Instruments. Dicha compañía pone a disposición del usuario una serie de herramientas tanto a nivel de software como de hardware para trabajar con señales radioeléctricas y realizar los estudios pertinentes sobre ellas. Estas herramientas engloban por un lado a LabVIEW, una plataforma para el desarrollo de aplicaciones mediante un lenguaje de programación gráfico basado en diagramas de bloques y, por otro lado, los dispositivos NI USRP-2920, unos transceptores que permiten trabajar mediante antenas con señales en RF. Estas dos herramientas, utilizadas de manera conjunta, permitirían desarrollar un sistema MIMO 2x2 como el que se pretendía construir.

Llegados a este punto y antes de entrar en la exposición del proyecto, es necesario indicar que el desarrollo del sistema MIMO 2x2 realizado se ha basado en las investigaciones realizadas por el alumno Daniel Pérez Vaquero que, haciendo uso también de LabVIEW y los equipos USRP-2920, diseñó un sistema de antenas MIMO 2x1 con dos antenas transmisoras y una receptora. Gracias al material con el que trabajó Daniel proporcionado por la tutora del proyecto, Ana García Armada, se ha conseguido evolucionar a partir del MIMO 2x1 al objetivo marcado de añadir una nueva antena receptora para mejorar las prestaciones del sistema. [15]

3.1.1. El entorno de desarrollo LabVIEW

LabVIEW constituye un entorno de desarrollo integrado que, mediante un lenguaje de programación gráfico, el llamado lenguaje G, resulta recomendable para el diseño de sistemas de pruebas, control y diseño, simulados o reales. LabVIEW se basa en la creación y el uso de los llamados Instrumentos Virtuales o VIs, que actúan a modo de funciones tradicionales en otros lenguajes de programación y que, mediante su combinación, permiten la creación de programas para trabajar con numerosos recursos, como en este caso los dispositivos USRP-2920, con el fin de trabajar con señales de RF. De esta forma, LabVIEW ofrece la posibilidad de adquisición y

visualización de datos y señales para realizar análisis y medidas a partir de ellas de una manera sencilla y muy visual.

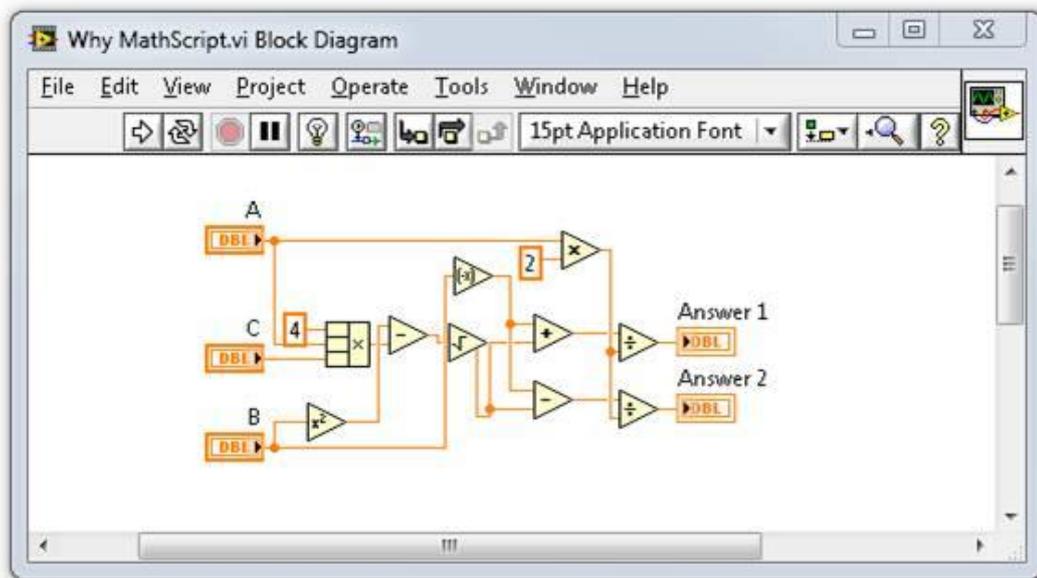


Figura 12: ejemplo de un diagrama de bloques en LabVIEW

A lo largo del proyecto, se ha usado LabVIEW para diseñar una aplicación de transmisión que permita el envío tanto de texto como de archivos. En este sistema y mediante la integración de dos bloques, uno de ellos para la transmisión y otro para la recepción y cada uno de ellos constituido por dos antenas manejadas a través de los USRP-2920, se ha implementado el esquema MIMO 2x2 que suponía el objetivo de este proyecto. En el capítulo 3.2. se explicará con mayor profundidad cómo se ha creado y el funcionamiento de este programa.

3.1.2. Los dispositivos USRP-2920

El USRP-2920 pertenece a la familia de dispositivos NI USRP-29XX, una serie de transceptores que, gracias al hardware Ettus Research que integran, permiten la experimentación en telecomunicaciones en múltiples bandas de frecuencia. Como ya se ha explicado en el apartado anterior, el USRP-2920 se ha utilizado junto con LabVIEW, que constituye la interfaz entre el usuario y dicha instrumentación. Por ello, con la adquisición de los equipos USRP-2920 se incluía el llamado Modulation Toolkit, una serie de librerías que ponen a disposición del usuario los VIs necesarios para trabajar con estos dispositivos, tanto para su configuración como para su manejo. Además, incluía también el módulo LabVIEW MathScript RT, que permite combinar la programación visual con programación textual mediante la inclusión de líneas de

código MATLAB en el desarrollo de los programas, lo cual ha sido necesario en ciertos bloques del programa.

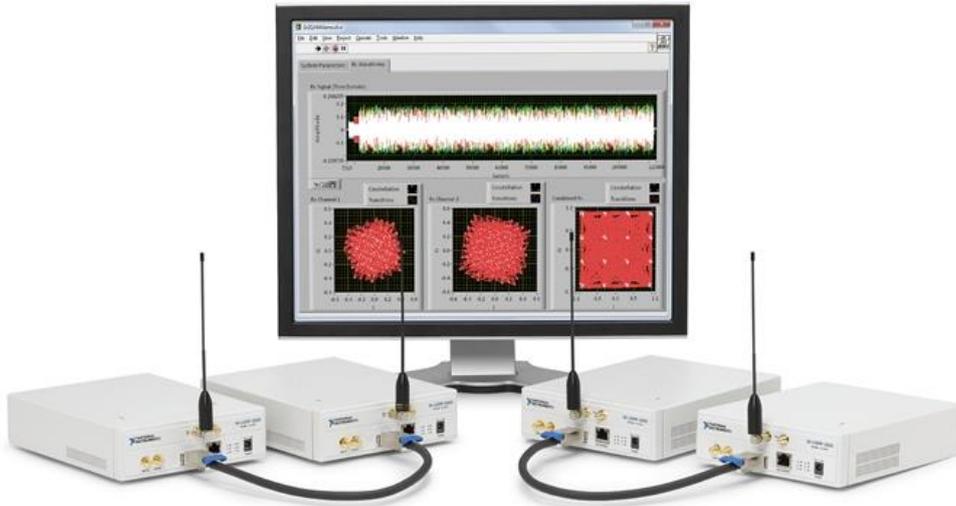


Figura 13: dispositivos USRP-2920 funcionando a través de LabVIEW

Los USRP-2920 poseen unas características, mostradas a continuación, que los convierten en unas herramientas muy versátiles:

- Frecuencia ajustable desde 50 MHz hasta 2.2 GHz cubriendo radio FM, GPS, GSM, radar y bandas ISM
- Hasta 20 MHz de banda base I/Q con transmisión de hasta 25 MS/s para procesamiento basado en servidores con NI LabVIEW
- Rango de ganancia de 0 a 31dB.
- Máxima salida de potencia en transmisión de 70mW (2 GHz).

Para poder ser manejado desde un ordenador, el USRP-2920 posee una serie de conexiones para interactuar con este, además de con otros USRP (característica imprescindible para diseñar un sistema MIMO). En la siguiente imagen se puede apreciar la parte frontal de USRP-2920, donde se pueden ver los diferentes puertos de conexión.

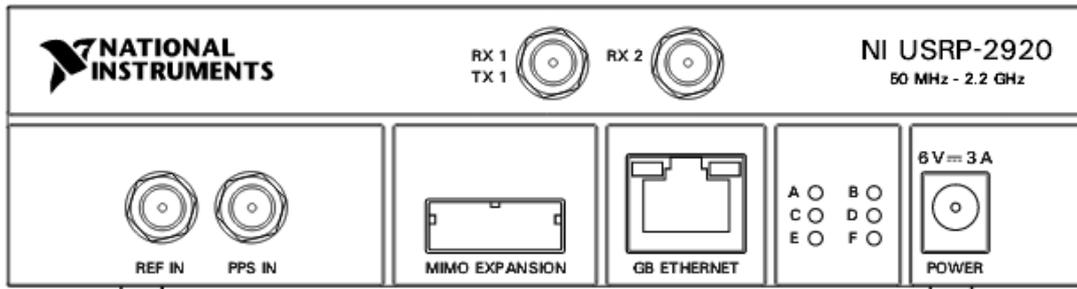


Figura 14: panel frontal del USRP-2920

La primera conexión a la que hay que prestar atención es POWER, la entrada de corriente de 6 V y 3 A de DC y mediante la cual se encenderá el equipo.

En la parte superior se pueden apreciar dos clavijas con nombres RX1/TX1 y RX2. Ambos son unas conexiones de tipo SMA con una impedancia de 50 Ω donde se colocarán las antenas encargadas de transmitir y recibir las señales de RF. La primera de ellas podrá realizar las funciones tanto de transmisión como de recepción, como indica su nombre, mientras que la segunda solo se podrá encargar de lo segundo.

Debajo de estas, se observa la entrada MIMO EXPANSION, que conecta entre sí dos equipos USRP para que compartan información tanto de señalización como de sincronización, lo que convierte esta conexión en esencial para implementar un sistema de varias antenas.

Al lado de esta se halla el puerto GB Ethernet, mediante el cual se realiza la conexión Gigabit Ethernet con el ordenador y que se encargará de la transmisión de la información entre ambos. Dicha conexión pertenece al protocolo Gigabit Ethernet puesto que será necesaria la transmisión de la información a grandes velocidades para evitar el cuello de botella en el sistema, por lo que ordenadores con un puerto Fast Ethernet no podrán ser utilizados con los USRP-2920. Además, como es lógico, los equipos quedarán configurados bajo una dirección IP.

Las conexiones explicadas hasta ahora serán suficientes para implementar nuestro sistema MIMO. Sin embargo se pueden apreciar otros dos conectores SMA con el nombre REF IN y PPS IN y que tienen la función de realizar la sincronización de la frecuencia portadora y la sincronización de nuestro muestro mediante un TTL, respectivamente, con una mayor precisión con la que lo hace el cable MIMO que nosotros hemos usado.

Por último, se puede apreciar una serie de seis LEDs (A, B, C, D, E y F) que indican el estado de la conexión y la transmisión del USRP-2920 en cada momento. [15]

Una vez mostradas las posibles conexiones que se pueden establecer en el USRP-2920, se va a proceder a explicar el esquema de montaje que se debe realizar junto con el ordenador controlador. Como ya se ha insistido, el objetivo del proyecto era diseñar un sistema de transmisión MIMO basado en dos antenas transmisoras y dos receptoras. Por ello, la configuración del montaje debe seguir este patrón. Un posible primer esquema habría sido el de conectar dos de los USRP-2920 a un *switch* mediante dos cables Ethernet y conectar a cada uno de estos otro USRP-2920 mediante el cable MIMO, formando de esa manera dos bloques, el transmisor y el receptor, donde ambos fuesen controlados por un mismo ordenador.

Sin embargo, al disponer de los recursos suficientes para poder usar dos ordenadores distintos y sabiendo que en ocasiones la capacidad computacional necesaria puede ser alta, sobre todo en la recepción de datos, se ha decidido prescindir del *switch* y utilizar un ordenador para cada uno de los bloques. De esa forma, a uno de los ordenadores quedan conectados, mediante un cable Ethernet en uno de ellos, dos USRP-2920 y unidos entre ellos mediante el cable MIMO, formando el bloque transmisor. De la misma manera se conectan los otros dos USRP-2920 y el otro ordenador para formar el bloque receptor. Siguiendo este esquema, se repartirán entre los dos ordenadores los recursos necesarios para computar el tratamiento de los datos y se evitará un posible cuello de botella en este punto. En la siguiente imagen se puede observar el esquema elegido.



Figura 15: esquema de montaje de MIMO 2x2 mediante dispositivos USRP-2920

3.2. Diseñando el sistema MIMO 2x2 en LabVIEW

Como ya se ha mencionado al principio del presente capítulo, este proyecto ha tomado como base el realizado por el alumno Daniel Pérez Vaquero en el año 2014, que desarrolló un programa en LabVIEW que haciendo uso de tres USRP-2920, dos para la transmisión y uno para la recepción, formaba un sistema MIMO 2x1 capaz de enviar textos y archivos.

El objetivo que se ha perseguido durante este proyecto ha sido el de evolucionar del sistema MIMO 2x1 creado por Daniel a un más eficiente y avanzado 2x2 que mejorase la diversidad espacial de su predecesor. Para lograr este cometido, el punto de partida desde el que se comenzó a trabajar consistió en estudiar y comprender el trabajo que realizó Daniel. Una vez comprendido y con el debido conocimiento de la tecnología MIMO se pudieron discernir cuales eran los elementos a modificar, los puntos que mejorar y las directrices a seguir para lograr el objetivo.

Para explicar el desarrollo del programa, se va a dividir el sistema en dos bloques, el transmisor y el receptor. Pese a que ambos tienen un funcionamiento muy parecido, aunque inverso, de esta forma se esquematizará mejor su exposición en las próximas páginas. Debido a que, para añadir una antena receptora adicional, no fue necesario hacer cambios en el esquema transmisor más allá que para incluir ciertas mejoras, su explicación se hará de una manera más escueta, profundizando menos en los detalles. Sin embargo, sí ha sido necesario realizar ciertos cambios en el bloque receptor que se explicarán más detalladamente.

3.3. Bloque transmisor

3.3.1. La interfaz gráfica en el transmisor

El primer paso para la implementación del programa fue crear una interfaz gráfica que permitiese al usuario interactuar con el software y manejarlo a su antojo. A través de esta interfaz, el usuario puede configurar el tipo de función a realizar, la modulación OFDM o los parámetros de configuración de los USRP-2920, así como detener la ejecución del programa si lo desea. También puede ver a través de ella los posibles errores que pueden surgir en la ejecución del programa o, gracias a las nuevas funciones añadidas, el resultado de la constelación generada así como la cadena de bits enviados.

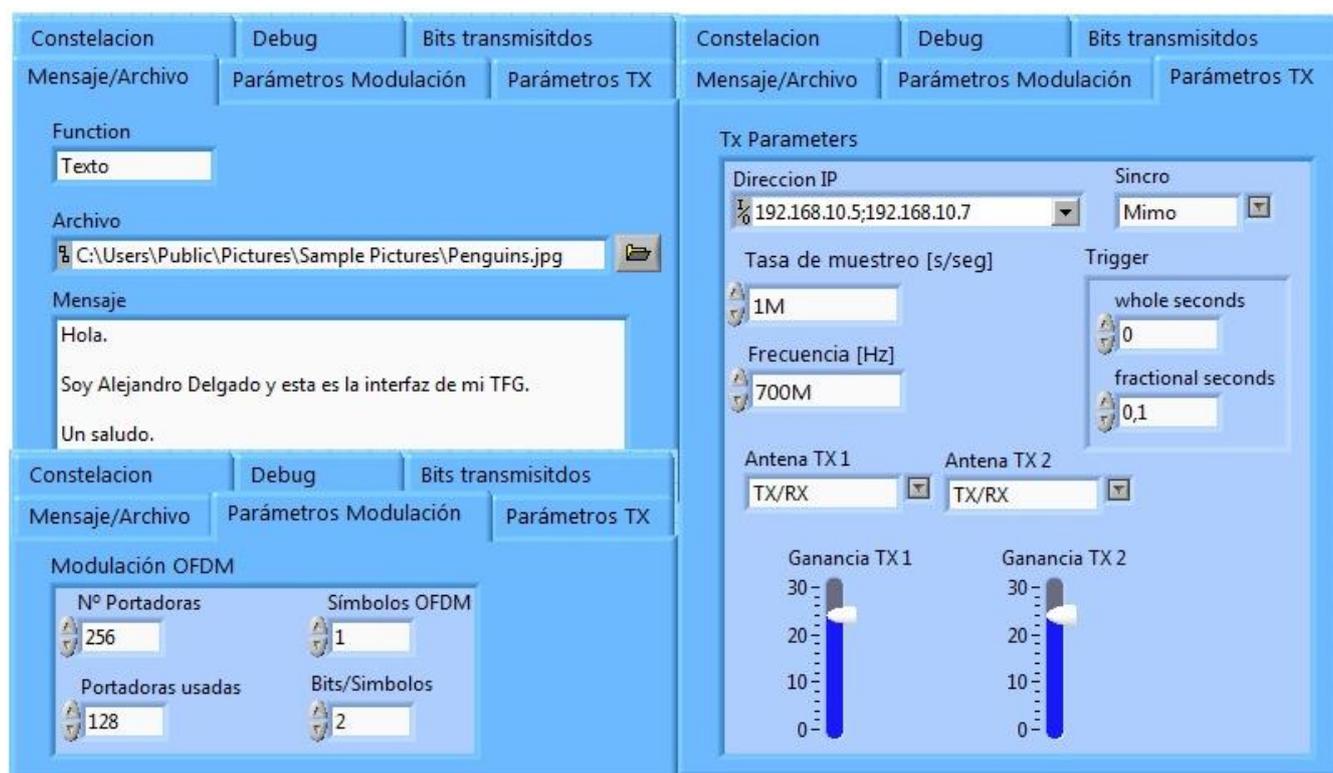


Figura 16: interfaz gráfica del bloque transmisor

Una vez introducidos los parámetros de ejecución del programa, este comenzará a funcionar bajo estos valores y de la manera que se ha diseñado. Para realizar todas las funciones propias de los sistemas MIMO, estas han sido implementadas a través de los diferentes diagramas de bloques integrados en los VIs que conforman la totalidad del sistema transmisor. El resultado de la unión de estos VIs se puede ver en la siguiente imagen.

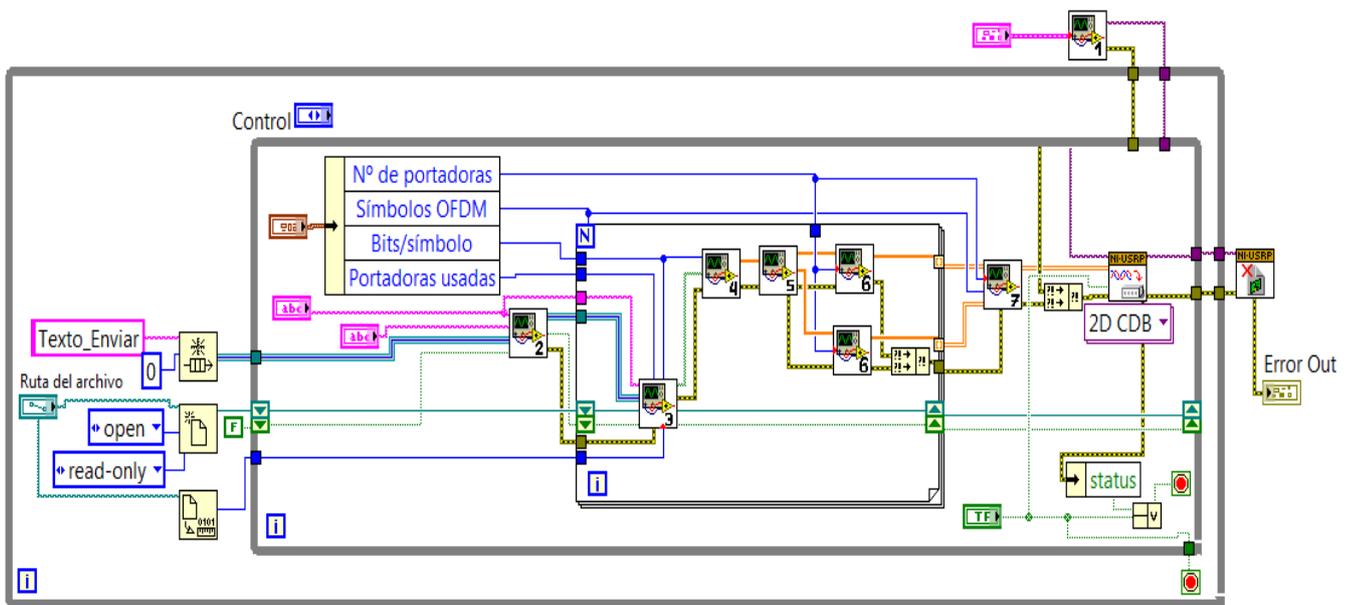


Figura 17: diagrama de bloques de la parte transmisora

Aunque a primera vista pueda parecer un diagrama sin una gran complejidad para encerrar el funcionamiento de toda la aplicación, cada uno de los bloques numerados esconde VIs y estos a su vez subVIs, que aumentan considerablemente la complejidad del programa. Por ello, ya que cada una de las partes del diagrama realiza una de las funciones del bloque MIMO transmisor, analizarlas una a una hará más fácil la comprensión del funcionamiento de la aplicación.

3.3.2. Configuración de los USRP-2920

El primer paso a realizar es la configuración de los dos dispositivos USRP-2920, que resulta imprescindible puesto que son los que llevan a cabo la propia transmisión de las señales. Para realizar esta configuración, en primer lugar hay que iniciar una sesión en ambos equipos mediante la introducción de sus direcciones IP, para posteriormente configurar valores como el *trigger*, las antenas del USRP que serán usadas (recordar que el modelo 2920 posee dos antenas y sólo una permite la transmisión), la ganancia de cada una de las antenas, la tasa de muestreo, la frecuencia de portadora y, lo que es muy importante, señalar que ambos equipos estarán sincronizados mediante el cable MIMO. Todos estos valores serán introducidos en la interfaz de usuario que se ha explicado anteriormente.

3.3.3. Inicialización de los valores

Para poder trabajar tanto con el texto como con los archivos que se desea transmitir, primero deben ser inicializados. Para poder manejar el texto es necesaria la creación de una cola en la que se almacenen su contenido, ya que esto facilitará su tratamiento con respecto a utilizarlo como una cadena de caracteres. Por su parte, para el archivo debe crearse una referencia que será la que se utilice para acceder a él en las siguientes funciones. La salida de esta cola y esta referencia será la que se introduzca en los siguientes VIs para manejar el texto y el archivo.

3.3.4. Obtención de los bits

Llegados a este punto del programa, se ha diseñado una máquina de estados en la que, dependiendo de si se quiere trabajar con un texto o con un archivo, los datos a transmitir son almacenados en forma de bits, incluyendo las cadenas de sincronización y la longitud en la trama de bits.

De esa forma, en la transmisión de texto resulta imprescindible enviar en primer lugar una secuencia de sincronización y la longitud que ocupa el texto, suponiendo cada una de estas secuencias un tamaño de 16 bits, formando un total de 32 bits añadidos. Esto ayudará posteriormente en la recepción para identificar la secuencia recibida de forma adecuada. Tras esto, se debe incluir la secuencia correspondiente a los caracteres, donde se debe diferenciar si se realiza la primera iteración o el texto es tan largo que estamos transmitiendo sólo información sin la cadena de sincronización y longitud. Además, si la longitud del texto no alcanza a ocupar la capacidad del símbolo, este ha de ser ocupado con bits de relleno, ya que el comienzo de un texto solo se realiza al inicio de un símbolo.

Para transmitir archivos el proceso es muy parecido, pero hay que prestar atención a unas pequeñas diferencias. En este caso, la sincronización del archivo cobra mayor importancia, por lo que son necesarios 60 bits para esta función frente a los 16 que se usaban en texto. Por lo general, el tamaño de un archivo (video, imagen, audio, etc.) va a ser mayor que el de un texto, por lo que también son necesarios mayor número de bits para indicarlo, ascendiendo hasta un total de 32. Por último, también se incluyen 4 bits de CRC que se utilizan en el receptor para comprobar que la longitud de archivo enviado es correcta. Al igual que en la transmisión del texto, con los archivos resulta importante diferenciar si se trata de la primera iteración ya que es en ella en la única que es posible transmitir la información referente a la sincronización, longitud y CRC.

3.3.5. Almacenamiento de los bits enviados en un array

Una de las nuevas funciones añadidas y que permitirá posteriormente calcular la probabilidad de error de bit de la transmisión es la que se ha añadido en este punto.

Con el flujo de bits ya formado y antes de proceder a su mapeo en símbolos, estos bits son almacenados en un array de 0s y 1s, además de en una cadena de texto para hacer su visualización más fácil. Dicho array, en el que serán almacenados millones de bits en poco tiempo, podrá ser exportado como un fichero de Excel para compararlo con el mismo array de bits en el receptor y comprobar de esa forma que cantidad de bits llegaron de manera errónea.

3.3.6. Mapeo de los bits en forma de símbolos

Una vez obtenidos los bits a enviar con sus correspondientes secuencias de sincronización y longitud, además del CRC para los archivos, estos deben ser mapeados para formar los símbolos a enviar. Para ello entran en este bloque donde, dependiendo de la modulación introducida como parámetro a través de la interfaz de usuario en forma de bits/símbolo, se realizará un mapeo mediante la modulación elegida entre 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM Y 64-QAM para 2, 3, 4, 5 y 6 bits/símbolo respectivamente.

Además, a la salida de esta función se ha implementado una nueva función que permite visualizar las constelaciones resultantes de los símbolos a enviar a través de la interfaz de usuario.

3.3.7. Inserción de pilotos y codificación de Alamouti

Este es uno de los pasos elementales para el correcto funcionamiento de la aplicación pues, como ya se ha explicado en el capítulo 2, la codificación de Alamouti que se ha implementado será la pieza fundamental a la hora de conseguir la diversidad espacial en un sistema MIMO 2x2. Sin embargo, es en la recepción donde se han tenido que hacer importantes cambios para adaptarlo de una antena a dos, por lo que será en ese punto donde se explicará con más detalle cómo se ha conseguido.

Sí es importante señalar aquí que antes de realizar la codificación de Alamouti se debe introducir en los símbolos una serie de pilotos formando una secuencia de estimación que, conocida tanto por el transmisor como por el receptor, permita hacer una estimación del canal en este último para tratar los símbolos que le lleguen en función de la misma. Una vez realizada la estimación, se procederá con la codificación

de Alamouti, de la que se obtendrán dos cadenas de símbolos con sus correspondientes pilotos.

3.3.8. Modulación OFDM

Otra de las funciones fundamentales en un sistema MIMO es la modulación OFDM que, como ya se ha dicho, con una reducida complejidad permite disminuir el efecto de la ISI mediante la inserción del prefijo cíclico y dando lugar a una elevada eficiencia espectral.

El primer paso para realizar la modulación es dejar libre la portadora central o portadora DC. Además de esto, habrá que añadir unas bandas de guarda donde se insertará el prefijo cíclico para evitar los efectos de la ISI. Una vez configurada la disposición de los símbolos y pilotos, es el momento de realizar la IFFT sobre ellos para obtener los símbolos OFDM que modularán la señal. Con los símbolos obtenidos, es el momento de insertar el prefijo cíclico que tendrá un tamaño de $1/8$ respecto a la totalidad del símbolo OFDM, para asegurarnos de que sea lo suficientemente grande como para eliminar los efectos de la ISI independientemente del canal.

Hay que recordar que esta operación se debe realizar por separado y de forma paralela sobre las dos cadenas de pilotos y símbolos que se obtuvieron a partir de la codificación de Alamouti.

3.3.9. Generación de paquetes

Una vez que se han obtenido los símbolos OFDM, tienen que ser preparados para el envío. Para ello, se deben generar unas cabeceras en las que debe ser introducida una secuencia de sincronismo normalizada y con buenas propiedades de autocorrelación. Dicha cabecera se antepone a los símbolos OFDM en la generación de los paquetes, cuyo tamaño dependerá del número de portadoras y de símbolos. Una vez obtenidos los paquetes con los símbolos de las dos antenas, ambas cadenas formarán un array de dos dimensiones, de forma que la información quede preparada para la transmisión.

3.3.10. Transmisión de paquetes

Obtenidos los paquetes sólo queda que los USRP-2920 realicen la tarea de transmisión, para lo que deben recibir el array bidimensional complejo generado en el paso anterior para que cada uno de ellos envíe una de las cadenas del mismo.

3.4. Bloque receptor

Con todos los procesos recién explicados encadenados de la manera adecuada, se completaría bloque transmisor en el sistema MIMO de dos antenas transmisoras. Una vez enviada la señal, llegaría el momento de realizar la recepción de la misma. Este proceso, como ya se ha indicado, es parecido al recién explicado, pero existen ciertas diferencias que es necesario tener en cuenta. Además, en este bloque se deberán realizar importantes cambios para añadir la nueva antena receptora al esquema desde el que se partió.

3.4.1. La interfaz en el bloque receptor

Como ocurría en el transmisor, también fue necesaria la implementación de una interfaz con la que el usuario pudiese manejar el funcionamiento de la aplicación en el receptor. Por ello, esta interfaz tiene una apariencia y funcionalidad muy similar a la del bloque transmisor. Igualmente permite indicar la función a realizar, dependiendo de si se quiere recibir texto o un archivo. En el primero de los casos aparece un cuadro donde se mostrará el texto recibido y en el segundo, se debe indicar la ruta donde se almacenará el archivo. Para configurar el sistema aparecen también en este caso dos pestañas donde introducir los parámetros de la modulación OFDM y los parámetros para configurar los USRP-2920 receptores, que ahora serán dos y no uno: direcciones IP, ganancias, antenas utilizadas, etc. En este vuelve a ser posible la visualización de la constelación recibida, de los bits recibidos y de los posibles errores en la ejecución del programa, así como la casilla para detener la recepción. Es decir, la única diferencia que se aprecia en la interfaz del bloque receptor con respecto al transmisor es que, en esta ocasión, el texto aparecerá automáticamente una vez recibido en vez de tener que ser introducido y que la ruta indicada será la del archivo donde se guarden los datos en lugar de donde se lean.

Con todos estos parámetros, la interfaz quedaría totalmente configurada y preparada para iniciar la ejecución del programa. Una vez más, dicha ejecución seguirá las funciones establecidas por los diagramas de bloques que han sido diseñados mediante el uso de los VIs programados. El aspecto general del programa sería el que se ve en la siguiente imagen, donde cada uno de los distintos bloques encierra los diversos procesos que se deben realizar en un sistema MIMO 2x2.

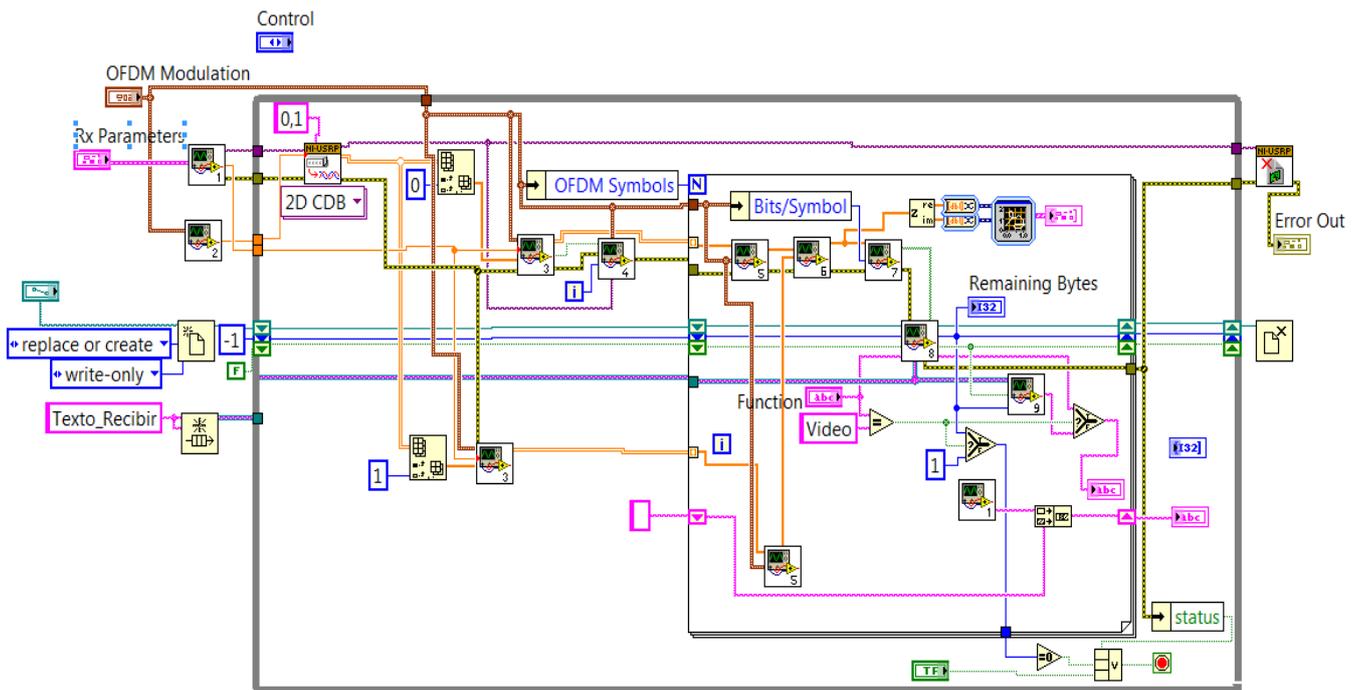


Figura 18: diagrama de bloques de la parte receptora

3.4.2. Configuración de los USRP-2920

El primer paso para poder recibir las señales que se han enviado desde el bloque transmisor y de igual manera que se hizo en este es configurar los USRP-2920 con los parámetros que se introducen a través de la interfaz de la aplicación.

Ya en este bloque se deben realizar cambios respecto al sistema MIMO 2x1 del que se partía, puesto que ahora será necesario configurar dos USRP-2920 en lugar de uno, además de realizar la sincronización entre ellos.

Para realizar dicha configuración es necesario, en primer lugar, iniciar una sesión en ambos equipos. Posteriormente deben ser configurados el *trigger* y los parámetros de los USRP-2920 como son sus direcciones IP, las antenas a utilizar (en la recepción se pueden usar cualquiera de las dos que posee el equipo al contrario de como ocurría en la transmisión), su ganancia y la sincronización entre ellos, que se realizará a través del cable MIMO. El último paso a realizar y que no era necesario en el transmisor, puesto que se hacía de forma automática, es iniciar la adquisición de señales. Una vez hecho esto, los dos USRP-2920 estarán preparados para recibir las señales enviadas a través del bloque transmisor.

3.4.3. Inicialización de los valores

Igual que se hizo en el bloque transmisor, es necesario inicializar una cola y una referencia a un archivo donde se almacenen respectivamente el texto y el archivo recibidos.

3.4.4. Recepción de Paquetes

Tras haber iniciado la sesión en los equipos USRP-2920 y haberlos configurado, recibirán la señal enviada por el transmisor. Por ello, es necesario extraer en forma de array bidimensional los paquetes que llegan a ambos equipos. Cuando se configuró el sistema MIMO para una única antena receptora, lo que se obtenía de este paso era un array unidimensional pues sólo era recibida una cadena de paquetes. Sin embargo, ahora que se trabaja con dos antenas, se reciben dos cadenas y es necesario indicárselo al VI que se encarga de esta función mediante el comando .

A partir de aquí, las dos cadenas que forman el array bidimensional complejo recibido serán separadas y tratadas de forma semejante en procesos paralelos.

3.4.5. Sincronización

En este bloque, al que van llegando los paquetes que se reciben progresivamente, se realiza una de las funciones más importantes del sistema, la sincronización, que cuida de que los paquetes sean recibidos de la manera correcta.

Para ello, en primer lugar, se genera la secuencia de sincronismo de manera semejante a como se hizo en el transmisor, para compararla con la de los paquetes que son recibidos. Esta secuencia nos permite obtener tanto los índices de sincronismo temporal, para ordenar los paquetes obtenidos, como el offset en frecuencia, que nos permite corregir la frecuencia de portadora. Con los índices y el offset, el siguiente paso es ordenar y corregir la trama para obtener los símbolos OFDM de la señal. Es importante recordar que esta función se realiza de forma paralela e independiente para las dos cadenas de paquetes que llegan a los USRP-2920.

Otro función importante que realiza este bloque es la de detectar si el sistema se encuentra inicialmente sincronizado o no, ya que, debido a la componente aleatoria del instante inicial, podría ocurrir que el receptor comenzase a muestrear justo a la mitad de las secuencias de sincronización. En tal caso, si el sistema no se encuentra sincronizado tras un determinado intervalo de tiempo, se supone que ha habido un problema de sincronización en el inicio. Si esto ocurre se descartan las muestras

oportunas para asegurar que las secuencias de correlación son recibidas de forma contigua y sea posible así la sincronización del sistema completo.

3.4.6. Demodulación OFDM

A partir del símbolo OFDM obtenido en el paso anterior, paralelamente una vez más entre los dos flujos de datos y de manera inversa a como se hizo en el transmisor, se recuperan ahora los símbolos mapeados.

El primer paso para ello es eliminar el prefijo cíclico introducido en el transmisor para evitar los efectos de la ISI. Una vez retirado este de la trama, se debe realizar la FFT sobre el símbolo y retirarle también la portadora central para, de esa forma, obtener el símbolo enviado con su correspondiente piloto.

3.4.7. Extracción de pilotos y decodificación de Alamouti

Llegados a este punto, entramos en el que es posiblemente el paso más importante a realizar en la evolución del sistema MIMO 2x1 del que se partía al 2x2 que suponía el objetivo de esta práctica, la codificación de Alamouti. La teoría sobre Alamouti aplicada sobre un sistema como el nuestro ya fue tratada en el apartado 2.3., por lo que a continuación se explicará cómo ha sido puesta en práctica en nuestro programa.

Antes de entrar a realizar la propia codificación, deben ser generados los bits de estimación del canal, para ser comparados con los que se encuentran dentro de los pilotos en los símbolos obtenidos. Aquí es donde se halla la primera diferencia con respecto al MIMO 2x1, puesto que mientras que en este caso se obtenía la estimación de dos canales, ahora se obtendrá la de cuatro (H_0, H_1, H_2, H_3), dos para cada una de las antenas receptoras y correspondientes a los dos caminos que siguen cada una de las señales procedentes de distintas antenas para llegar hasta ellas. Todo este proceso se realiza a partir de las dos señales que fueron recibidas en los USRP-2920, separadas y tratadas a lo largo de los procesos anteriores en dos arrays independientes. Cada uno de los arrays permite obtener dos de las estimaciones del canal.

Cuando las secuencias de estimación son obtenidas, se retiran los pilotos de los símbolos para proceder con la codificación. Como se explicó en el apartado teórico, tras estudiar el modelo de codificación de Alamouti para un sistema MIMO 2x2, el esquema resultante por el que quedarían codificados los bits recibidos sería el siguiente:

$$\tilde{S}_0 = H_0^* R_0 + H_1 R_1^* + H_2^* R_2 + H_3 R_3^* \quad (3.1)$$

$$\tilde{S}_1 = H_1^* R_0 - H_0 R_1^* + H_3^* R_2 - H_2 R_3^* \quad (3.2)$$

De esa forma, mediante los diagramas de bloque con los que se programan los VI en LabVIEW, se debe configurar este nuevo esquema. Se puede apreciar que la incorporación de la nueva antena supone que la estimación de los bits enviados es el resultado de la combinación lineal del esquema de una sola antena con las componentes de los dos nuevos canales y señales recibidas.

Una vez realizada la codificación es obtenida una única cadena de símbolos que, comparada con la que se obtenía antes de mejorar el sistema, aprovecha mejor la diversidad espacial aliviando en mayor medida los efectos del desvanecimiento multitrayecto y, en consecuencia, mejorando la transmisión.

3.4.8. Demapeo

Tras realizar la decodificación de Alamouti, se dispone de los símbolos decodificados y sin las secuencias piloto por lo que, de manera inversa a como se hizo en el transmisor y gracias a las diferentes constelaciones generadas en primer lugar, se debe proceder a demapear dichos símbolos para obtener los bits que conforman el mensaje o el archivo recibido. También en el receptor es indicada a través de la interfaz de usuario que tipo de codificación se desea realizar mediante el parámetro *bits/símbolo*, donde las entradas 2, 3, 4, 5 y 6 corresponderán a las posibles modulaciones 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM y 64-QAM, respectivamente. De esa manera, a la salida de este bloque son obtenidos dichos bits.

Es importante mencionar también que a la entrada de este bloque se han programado unas gráficas donde se muestran las constelaciones de los símbolos obtenidos antes de demapearlos.

3.4.9. Almacenamiento de los bits enviados en un array

Como ya se ha explicado en el transmisor y de la misma forma que se hizo en este, una vez obtenidos los bits recibidos se ha introducido una nueva función que permita almacenarlos en un array de 0s y 1s para poder exportarlos a un fichero Excel. Esto permitirá trabajar con ellos con el fin de compararlos con los bits que se han transmitido y localizar cuantos se han transmitido erróneamente.

3.4.10. Extracción y procesado de los bits en la cola/referencia

El último paso a dar en el complejo proceso de recepción es el de obtener a partir los bits demapeados el mensaje o archivo enviado dependiendo de la función elegida, para lo que se ha diseñado una máquina de estados que realizará unas funciones u otras dependiendo de si se trata de la primera opción o de la segunda.

En el caso de que la opción escogida sea la de texto se comenzarán a recibir los bits para buscar en el inicio de la secuencia la trama de sincronización de 16 bits y de esa forma obtener la longitud del texto, también englobada en 16 bits. Cuando dicha secuencia ha sido encontrada y, por lo tanto, el receptor ha comenzado a recibir el texto, los bits correspondientes se almacenan en una cola. Al igual que ocurría en el transmisor se debe diferenciar si se trata de la primera iteración o el texto es tan largo que viene almacenado en varios símbolos OFDM, caso en el que deben ser descartados los bits innecesarios que fueron introducidos para rellenar los símbolos. Para que todo esto funcione correctamente, es importante realizar un control de los bits que aún faltan por llegar y, mientras tanto, los bits recibidos se almacenarán en la cola hasta que todos hayan sido recibidos. Tras la recepción de la totalidad del texto, este es extraído de la cola para ser convertido a una cadena de caracteres adoptando el formato de texto para poder ser mostrado en la pantalla a través de la interfaz.

En cuanto a la recepción de archivos, el proceso se realiza de manera similar. Sin embargo, debido a la importancia de la sincronización a la hora de recibir un archivo se incluyeron 60 bits para la sincronización y 32 para la longitud, además de los 4 bits adicionales que conforman el CRC para comprobar que la longitud es correcta. En caso de no serlo, el video no se comienza a recibir, y por tanto, es necesario esperar hasta la siguiente transmisión, evitando así que el archivo no se pueda reproducir posteriormente. Al igual que en la transmisión de texto, en este caso resulta importante diferenciar si se trata de la primera iteración, ya que es en ella en la única que se encuentra la información de sincronización, y prestar atención a los bits que quedan por recibir.

Con todo lo explicado a lo largo de este capítulo quedaría diseñada la totalidad de la aplicación para realizar la transmisión de texto o archivos y, si todo se ha configurado correctamente, debería estar preparada para ser utilizada de manera satisfactoria. Sin embargo, si algo falla durante la ejecución, el programa incluye un control de errores donde se puede visualizar en la pantalla a través de la interfaz de usuario cual es el problema que ha tenido lugar y que ha provocado el funcionamiento incorrecto.

Con la nueva antena receptora se espera que el sistema MIMO mejore sus prestaciones añadiendo diversidad espacial, disminuyendo de esa manera el efecto del desvanecimiento multitrayecto y aumentando así su eficiencia reduciendo la probabilidad de que un bit llegue incorrectamente. Por eso, a lo largo del próximo capítulo, se va a hacer una comprobación del correcto funcionamiento del programa y se van a comparar los resultados obtenidos con los del sistema formado por una antena receptora.

CAPÍTULO 4:

Comprobación y comparación de los resultados obtenidos

Tras implementar en LabVIEW las características necesarias para añadir una antena receptora al sistema MIMO es el momento, en primer lugar, de comprobar que la transmisión tanto de vídeo como de texto funciona correctamente.

Para ello, se ha ejecutado el programa bajo unos determinados parámetros de modulación y transmisión para el envío de un texto y un archivo, una imagen concretamente. Los parámetros utilizados han sido los siguientes y en ambos casos la transmisión se produjo de manera satisfactoria:

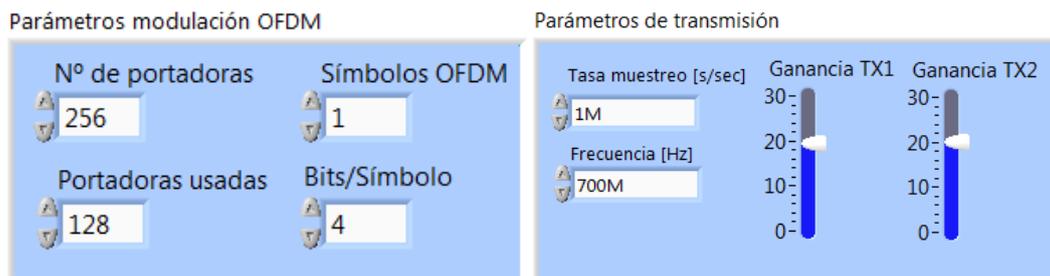


Figura 19: parámetros iniciales de ejecución del programa

Tras comprobar que todo funcionase como se esperaba se procedió a estudiar las características del sistema. De esa forma, mediante la modificación de los parámetros mostrados y con la ayuda de los estudios realizados por Daniel, se pudieron concluir las siguientes afirmaciones:

- El aumento del número de bits/símbolo no atenúa de ninguna manera la señal, pero provocará un acercamiento en la constelación entre los símbolos recibidos que posiblemente derive en la estimación errónea de alguno de ellos, aumentando la probabilidad de error de símbolo del sistema.
- Cuanto mayor es la frecuencia de portadora, mayor es el efecto del offset y, por consiguiente, mayor es la distorsión en los símbolos recibidos.
- El ancho de banda tiene un valor óptimo que ronda entre 750MHz y 1.25GHz. Por debajo de esos valores aparece el efecto de la ICI, debido a la reducida separación entre las portadoras, y por encima se hace cada vez más difícil la estimación del canal debido a que el número de pilotos se mantiene constante y la interpolación se hace más imprecisa.
- Al aumentar el número de portadoras disminuye la separación entre ellas si se mantiene constante el ancho de banda por lo que, como ocurría en el caso anterior, los efectos de la ICI afectan negativamente al sistema.
- La variación del número de símbolos OFDM no produce una variación en las prestaciones del sistema.

Comprobado el correcto funcionamiento de la aplicación, llega el momento de comparar las prestaciones del sistema de dos antenas receptoras con el de una desde el que se partía.

Para ello, en primer lugar, se van a comparar para el envío de un mismo archivo las constelaciones obtenidas de ambos sistemas. De esa manera, se podrá comprobar cuál de las dos constelaciones está menos distorsionada y, por lo tanto, representa al mejor sistema de los dos. Esto se realizará aumentando progresivamente el número de bits/símbolos puesto que, cuanto mayor es este valor, más crítica resulta la distorsión en los símbolos recibidos.

Para la realización de estas comprobaciones se mantendrán constantes el resto de parámetros pues ya se ha contrastado su efecto en la transmisión.

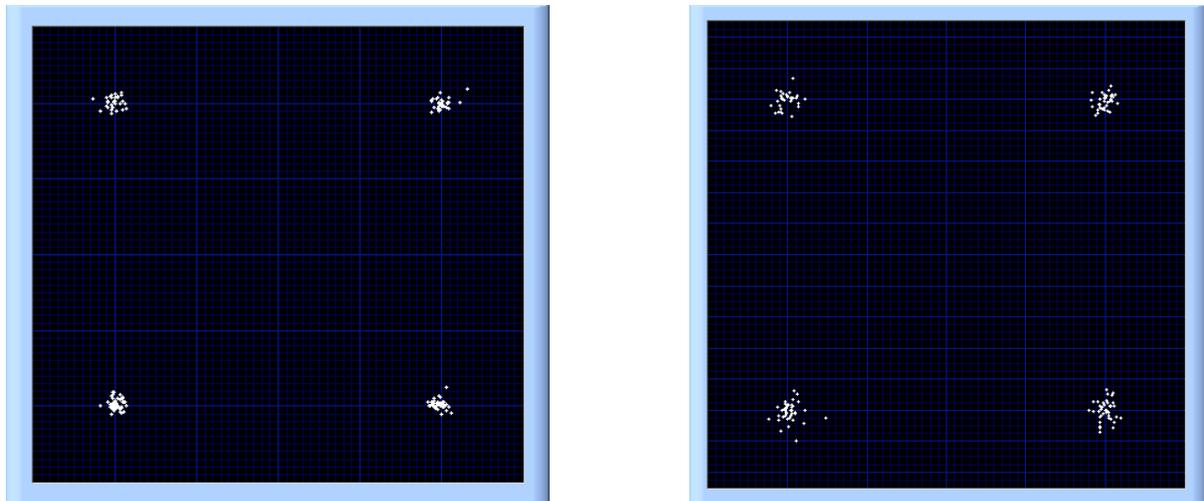


Figura 20: constelación de los símbolos en la modulación 4-QAM para MIMO 2x2 y 2x1

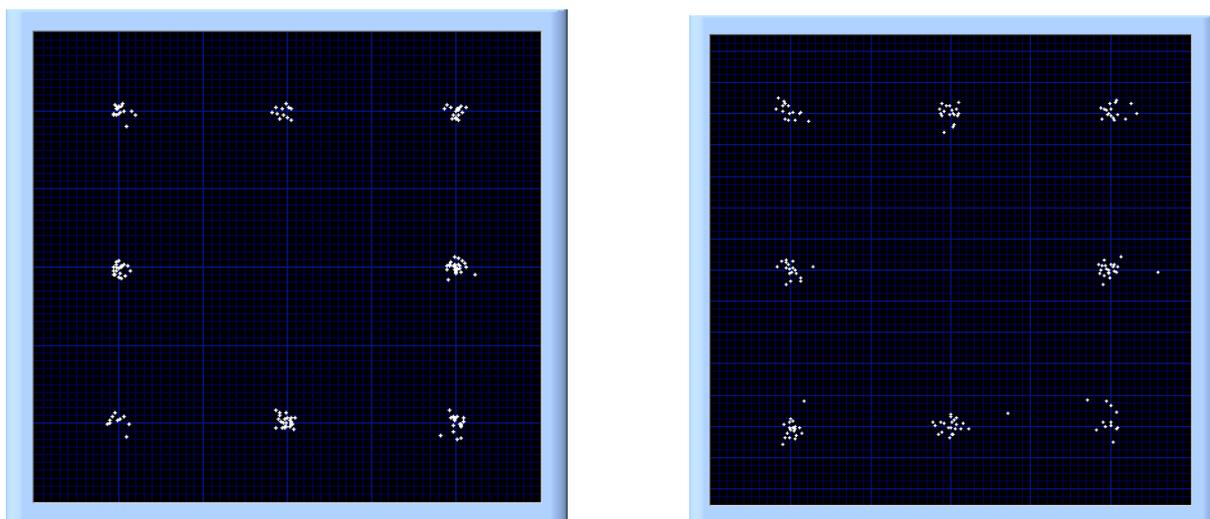


Figura 21: constelación de los símbolos en la modulación 8-QAM para MIMO 2x2 y 2x1

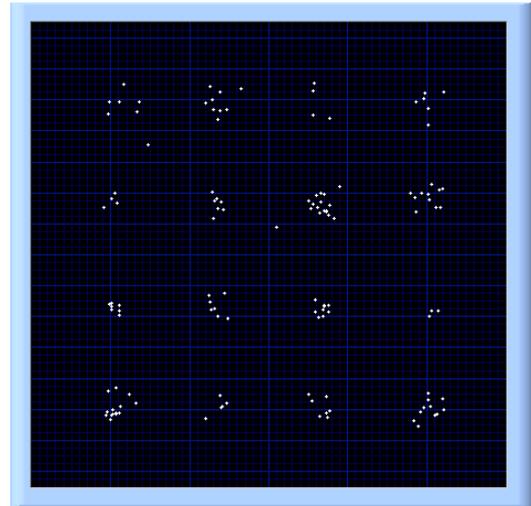
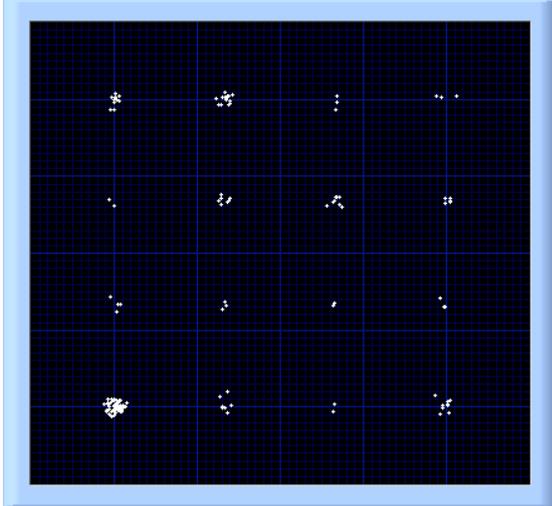


Figura 22: constelación de los símbolos en la modulación 16-QAM para MIMO 2x2 y 2x1

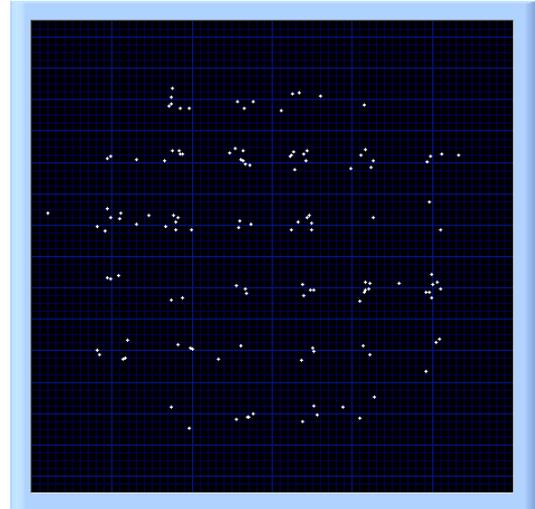
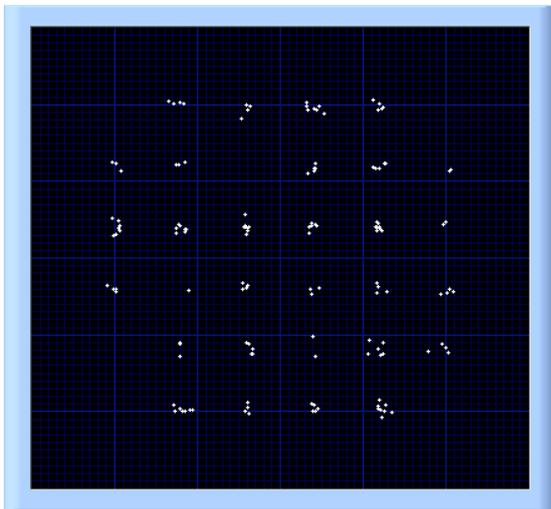


Figura 23: constelación de los símbolos en la modulación 32-QAM para MIMO 2x2 y 2x1

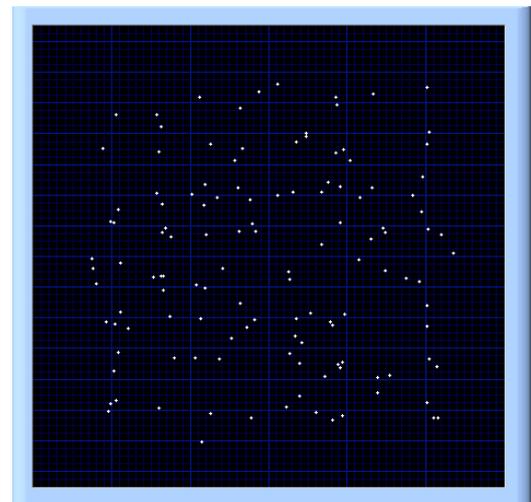
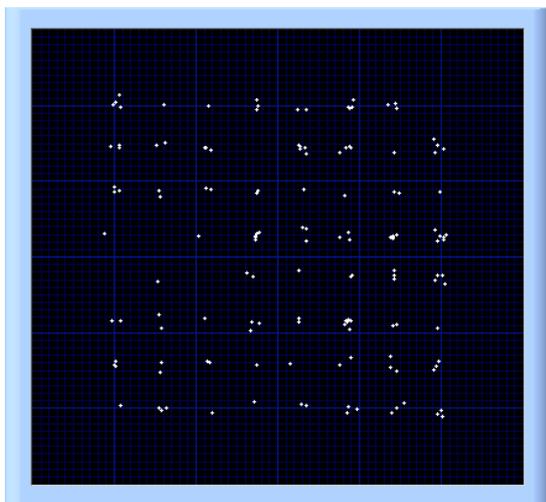


Figura 24: constelación de los símbolos en la modulación 64-QAM para MIMO 2x2 y 2x1

Tras realizar las pertinentes comprobaciones, se han obtenido unos resultados en los que la probabilidad de error de bit para 4-QAM, 8-QAM y 16-QAM está por debajo del valor mencionado de 6×10^{-5} . Esto quiere decir que las prestaciones de ambos sistemas son buenas, ya que dicha probabilidad de que un bit se transmita erróneamente es muy baja y la probabilidad de que la comunicación se produzca de manera satisfactoria es alta. Sin embargo, al no poder obtener un valor concreto para estas modulaciones, no podemos establecer una relación entre el esquema formado por una y dos antenas receptoras.

Sin embargo, para 32-QAM y 64-QAM sí que se obtiene un valor concreto de probabilidad de error de bit, al situarse por debajo de 6×10^{-5} y, por lo tanto, sí que se puede hablar de cuál de los dos sistemas es más eficiente. Para el diseño inicial de una antena receptora se recibieron erróneamente 6 y 12 bits, respectivamente para cada una de las modulaciones, del total de los 16384 analizados. Por su parte, al usar dos antenas esta cifra pasó a ser de 4 y 7 para el mismo número de bits.

Modulación	32-QAM		64-QAM	
MIMO	2x1	2x2	2x1	2x2
Bits erróneos	6	4	12	7
Total bits	16384			
BER	3,66E-04	2,44E-04	7,32E-04	4,27E-04

Figura 26: tabla comparativa entre la BER de MIMO 2x1 y 2x2

Como se puede ver en la figura anterior, la probabilidad de error de bit mejora notablemente al usar dos antenas. Se puede apreciar que los resultados obtenidos se acercan a lo esperado teóricamente por la fórmula $M \times N$ de mejora de la eficiencia que ya se mencionó en el apartado 2.1.2. sobre los sistemas MIMO. Siguiendo nuestro análisis, con dos antenas transmisoras y una y dos receptoras, la eficiencia debería ser el doble en el segundo caso según esta fórmula. Sin embargo, al tratarse de un diseño real y no teórico y considerando que esta fórmula no tiene numerosos factores en cuenta, los resultados no han sido totalmente exactos, pero sí cercanos a lo esperado.

Y con todo esto queda demostrada la mejora en la diversidad espacial, en la probabilidad de error de bit y, con ello, en la eficiencia al añadir una antena receptora adicional al sistema MIMO desde el que se empezó a trabajar, otorgando un resultado satisfactorio a la realización de esta práctica.

CAPÍTULO 5:

Conclusiones y futuras líneas de investigación

5.1. Conclusiones

Tras realizar un meticuloso estudio acerca de la tecnología MIMO, se han podido extraer diversas conclusiones que se van a exponer a continuación.

Para comenzar, se ha observado que esta tecnología ha pasado en los últimos años de ser una posibilidad a ser una realidad. Debido a las cada vez más grandes necesidades en el área de las telecomunicaciones, son fundamentales según pasa el tiempo técnicas de transmisión inalámbrica de datos más avanzadas. MIMO, gracias a sus prestaciones derivadas de las diversas técnicas que la componen, cumple perfectamente con este requisito.

Dichas técnicas engloban, por ejemplo, la modulación OFDM. Este tipo de modulación consiste en dividir los datos a transmitir en una serie de subportadoras equiespaciadas frecuencialmente, siendo posible gracias a la propiedad de ortogonalidad presente en dichas subportadoras. El resultado de ello es una modulación con gran eficiencia espectral y robustez frente al desvanecimiento selectivo de portadora a una frecuencia determinada.

También los códigos de bloque son una parte fundamental de los sistemas MIMO, dentro de los cuales cobra gran importancia debido a su gran eficiencia frente a su reducida capacidad computacional el modelo de Alamouti. El esquema de Alamouti supone una técnica de codificación espaciotemporal en la que, mediante el envío de dos tramas ortogonales entre sí, se puede aumentar de manera considerable la diversidad espacial para, en consecuencia, reducir los efectos del desvanecimiento multitrayecto.

De las características de la codificación de Alamouti se puede deducir que cuantas más antenas se introduzcan en la recepción de señales, mayor será la diversidad espacial y, por lo tanto, más eficiente el sistema. Todas estas afirmaciones se han podido comprobar mediante una aplicación diseñada en el entorno de desarrollo LabVIEW. De esa manera, observando los resultados de la simulación de un sistema MIMO 2x2 mediante dicha aplicación y comparándolos con los de un sistema de una sola antena receptora, se ha podido comprobar que la adición de una antena en el bloque receptor mejora de forma notable los resultados en la transmisión de textos o archivos. Esto se ha conseguido reduciendo la posibilidad de que un bit llegue de manera incorrecta pero también se puede optar por otras mejoras como aumentar la tasa de datos.

Estas notables propiedades de la tecnología MIMO la han convertido, como se indicaba al principio del apartado, en una referencia cada vez más utilizada en numerosos estándares dentro de las telecomunicaciones. De esa forma, han pasado a forma parte de tecnologías como el Wi-Fi, WiMAX o LTE. No es difícil deducir que en los próximos años, tal evolución en los sistemas MIMO no va a frenar, si no que va a seguir avanzando. Para ello, se deben seguir desarrollando aspectos todavía mejorables e incorporando nuevas características todavía por experimentar. Todo ello hará que MIMO expanda su alcance para poder ser incorporada incluso en un mayor número de tecnologías.

5.2. Futuras líneas de investigación

Para hablar de todo aquello que se puede mejorar en los aspectos sobre los que ha tratado este proyecto, se va a abordar el problema desde dos perspectivas diferentes. Primero se va a tratar el futuro de la tecnología MIMO, mencionando qué se puede mejorar en ella y de qué forma se puede aplicar a nuevas tecnologías. Por otro lado, y centrados en el programa que se ha desarrollado para esta práctica, se van a mencionar diversos aspectos que se pueden mejorar en esta aplicación y nuevas funcionalidades que esta podría incorporar.

Como ya se ha explicado, la modulación OFDM presenta una relación PAWR muy alta que puede conllevar efectos muy negativos en un sistema de transmisión. Por ello, el diseño de filtros que reduzcan o eliminen este problema sería una mejora de gran valor para la tecnología MIMO. Igualmente, esta modulación presenta una elevada sensibilidad ante la desincronización tanto en tiempo como en frecuencia, por lo que otra línea de investigación podría trazarse en esta dirección donde, mediante el desarrollo de nuevos algoritmos de sincronización o de un hardware capaz de solucionar estos desplazamientos, se podrían corregir sus consecuencias.

Hasta ahora, la tecnología MIMO se ha explotado mayoritariamente para dar servicio a un único usuario, el llamado SU-MIMO (*Single User MIMO*). De cara al futuro, se debería sacar partido a las posibilidades que ofrece dar servicio a múltiples usuarios simultáneamente, fenómeno conocido como MU-MIMO (*Multiple User MIMO*). Este concepto se puede desarrollar destinado a redes domésticas en las que, por ejemplo, un router con soporte MU-MIMO pueda crear grupos de varios dispositivos a los que brinda un servicio simultáneo mejorando considerablemente las prestaciones de la red. Sin embargo, MU-MIMO también puede ser explotado en una red de comunicaciones móviles donde una única estación base ofrezca un servicio a varios usuarios que comparten recursos.

Una vez comentados los retos que la tecnología MIMO puede afrontar en los próximos años, es el momento de hacer lo propio para la aplicación implementada en LabVIEW para el desarrollo de este proyecto.

Un posible primer aspecto a mejorar es la eficiencia de los paquetes enviados. Dichos paquetes contienen una serie de secuencias como son el prefijo cíclico o los pilotos introducidos en los símbolos OFDM que tienen como objetivo que los datos enviados se puedan reproducir fielmente en el receptor. Es por ello que nunca la totalidad de la trama va a ser destinada a la transmisión del mensaje deseado, si no

que siempre será necesario incluir una serie de bits que controlen que todo funciona bien, restando así capacidad al sistema. Sin embargo, en la aplicación creada, a estos campos se les ha asignado una longitud constante, independientemente del canal por el que vaya a viajar la señal. Por ello, una posible mejora en el sistema podría ser conferirle a estas secuencias un tamaño variable dependiendo de las condiciones del medio para hacer de esa forma la transmisión más eficiente. Para ello podría ser necesario que el transmisor poseyese información acerca de dichas condiciones, lo cual podría realizarse mediante la implementación de una comunicación bidireccional en la que el receptor pudiese informar al transmisor acerca de estas condiciones. Dicha comunicación bidireccional también podría ayudar a desarrollar mecanismos de control de errores, por ejemplo.

Otra mejora evidente podría ser la incorporación de nuevas antenas de recepción. De igual manera que con este proyecto se consiguió mejorar la eficiencia pasando de una antena receptora a dos, la adición de más antenas incrementaría aún más la diversidad espacial y con ello, dicha eficiencia. Además, cómo ya se ha explicado, esta eficiencia se consigue disminuyendo la probabilidad de que un bit llegue de manera incorrecta, por lo que otro posible avance en la aplicación podría ser convertir esta reducción del error en un incremento de la tasa de transmisión, para lo cual las dos antenas deberían enviar tramas totalmente independientes.

Estas son sólo algunas de las mejoras que pueden hacer tanto de la tecnología MIMO como de la aplicación diseñada algo más evolucionado. Sin embargo, con el propio desarrollo de ambas, seguirán surgiendo nuevos aspectos sobre los que continuar trabajando.

5.3. Conclusions

After carrying out a meticulous study about MIMO technology, we've could extract several conclusions that will be exposed next.

To start up, we've observed that this technology has ceased to be a possibility in the last few years to become a reality. Due to the ever growing needs in the telecommunication sector, as the time pass by we need new and more advanced wireless data transmission techniques. MIMO, thanks to its profits derived from the techniques that make it whole, serves perfectly to this purpose.

These techniques include, for example, the OFDM modulation. This kind of modulation consists of dividing transmission data into a series of equally spaced in frequency subcarriers; this is possible thanks to the orthogonality present in this subcarriers. The result is a modulation of a high spectral efficiency and strength against selective carrier fading in a determined frequency.

The block codes are also an essential part to MIMO systems, where they become very important due to its high efficiency against its low computational capacity. The Alamouti scheme implies a space-temporal coding technique in which by sending two orthogonal frames we can considerably increase the spatial diversity and, consequently, decrease the effects of multipath fading.

From the characteristics of the Alamouti coding, we can deduce that the more antennas dedicated to the signal reception, the greater would be the spatial diversity, and, of course, the efficiency of the system. All of this has been proved using a software designed in the LabVIEW develop environment. This way, observing the results of the MIMO 2x2 system simulation using an application created with that tool and comparing them with the ones of a one-antenna system, we've been able to prove that, as expected, the addition of an antenna in the receptor block improves significantly the results in the transmission of texts and archives. This has been possible cutting off the possibility of a bit arriving incorrectly, even though this could've been done by other improvements, such as the increase of data rate.

These notable properties of IMO technology have made of it, as indicated at the beginning of this chapter, a reference of use very expanded within numerous standards in telecommunications. This way, it has become a part of technologies such as Wi-Fi, WiMAX or LTE. It's not difficult to see that in the coming years, the evolution of the MIMO systems is not going to stop, but it will continue to grow. For this to

happen we must continue the development of yet improvable aspects, and incorporate new characteristics yet to be studied. All of this will cause an expansion of the MIMO system, which will lead to it being included in an even larger number of technologies.

5.4. Future research

Now we're going to talk about all that aspects present in this project that can be improved. We're going to face the problem from two different perspectives. First, we'll explain the future of MIMO technology, talking about what we can improve and other technologies in which it can be implemented. On the other hand, revolving around the program developed for this project, we're going to mention several aspects that improve the application and new functionalities that it may incorporate.

As we explained before, the OFDM modulation presents a very high PAWR rate, which can produce very negative effects in a transmission system. That's why the design of filters that reduce or eliminate that problem would be a great step forward in the improvement of the MIMO technology. Equally, this modulation presents a high sensibility to desynchronization in time and in frequency; another line of investigation could be open in following this path, developing new synchronization algorithms or a hardware capable of adjust this shifting in order to correct the consequences.

Until now, the MIMO technology has been mainly used to offer a service to a unique user, the so called SU-MIMO (Single User MIMO). In the future, we'd have to be capable of taking advantage of the possibilities that a simultaneous multiple-user service offers, a phenomenon known as MU-MIMO (Multiple User MIMO). This concept can be developed in order to be applied to domestic networks in which, for example, a MU-MIMO based router could create groups of several devices that allows a better simultaneous service, improving noticeably the functionality of the network. However, MU-MIMO can also be used in a mobile communication network, where a unique base station offers a service to several users sharing resources.

We've already commented on the challenges that the future has in store for the MIMO technology; now it's time to do the same thing with the application implemented in LabVIEW for this project.

A nice first look at the matter would be the improvement of the sent packages efficiency. These packages contain a series of sequences, such as the cyclic prefix or the pilots added to the OFDM symbols, whose objective is for the sent data to be reproduced accurately in the receptor. That's why the totality of the frame will never be destined to the transmission of the desired message; it will always be necessary to include a series of bits that control everything's alright, cutting off in the process the system's capacity. However, in the developed application, we've applied a constant length to these items, independently of the signal travelling channel. An improvement

could be, therefore, apply a variable size to these sequences, depending on the environment condition, to achieve a smoother transmission. To do that, we would need a transmitter which possessed information about this conditions; this could be made implementing a bidirectional communication in which the receptor could inform the transmitter about this conditions. Said bidirectional communication could also develop error control mechanisms, for example.

Another evident improvement could be the incorporation of new reception antennas. In the same way that this project improved the efficiency adding a second reception antenna, the addition of more reception antennas would improve the spatial diversity and the efficiency of the system. Also, as explained before, this efficiency could be improved cutting off the probability of a bit arriving incorrectly. Regarding this, another possible improvement in the application could be to transform this decrease of the error into an increase of the transmission rate. To do this, the two antennas should send totally independent frames.

These are only a few of the best improvements that can be implemented in the MIMO technology and in the application to make them evolve. Nevertheless, with the development of both technologies, new problems will surface, new challenges in which we will have to continue to work on.

CAPÍTULO 6:

Planificación y

presupuesto del proyecto

6.1. Planificación del proyecto

Desde su inicio en abril de 2015 y hasta su finalización en septiembre del mismo año, durante la realización de este proyecto se han seguido diversas etapas en las que se ha invertido distinta cantidad de tiempo y que han conformado la totalidad de la duración necesaria para la elaboración del mismo.

Antes de comenzar el desarrollo del propio proyecto fue necesario el estudio tanto de la tecnología MIMO como del manejo del software LabVIEW. Por ello, la primera de estas etapas consistió en el análisis del funcionamiento y las características de la tecnología MIMO, haciendo especial hincapié en los conceptos de la modulación OFDM y la codificación de Alamouti para un sistema 2x2. Tras ello y todavía sin entrar en el propio desarrollo del proyecto, fue necesario aprender a manejar con soltura LabVIEW junto con los dispositivos USRP-2920. Para ello, se comenzó desde los conceptos más básicos en la programación basada en el lenguaje gráfico y se fue progresivamente avanzando hacia ejemplos cada vez más complejos, hasta adquirir las aptitudes necesarias para poder desarrollar una aplicación con cierta complejidad.

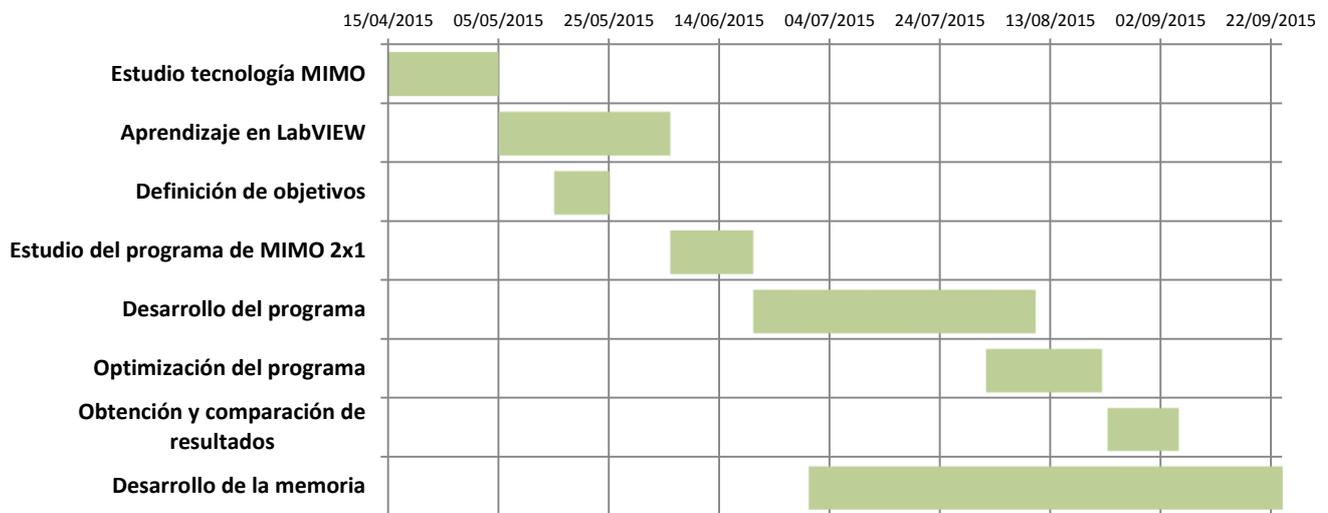
Durante esta etapa se fueron definiendo los objetivos del proyecto enfocados a la comprensión de los sistemas MIMO 2x2 y a la elaboración del programa en LabVIEW a partir del proyecto realizado por otro alumno para incorporar una nueva antena receptora.

Con los objetivos definidos y antes de entrar en el desarrollo de nuestro propio proyecto, fue necesario comprender adecuadamente el funcionamiento del programa realizado por Daniel en LabVIEW para un sistema MIMO 2x1. Tras la comprensión del mismo, llegó el momento de evolucionar este sistema para incorporar la antena receptora adicional. A la vez que se avanzaba en el desarrollo del programa, se comenzó a trabajar en esta memoria incorporando los conocimientos que ya se habían adquirido sobre la teoría de MIMO.

Cuando se finalizó el desarrollo de la aplicación, había que comprobar que los cambios realizados en ella funcionaban correctamente y la transmisión de textos y archivos se seguía produciendo satisfactoriamente. Durante este proceso fue necesaria la optimización del programa para corregir ciertos errores que se producían durante el envío.

Una vez finalizado el programa se procedió a comparar las características del mismo con las del de Daniel contrastando las prestaciones de ambos y obteniendo las consecuentes conclusiones.

Con todos los resultados obtenidos, únicamente quedaba plasmar todo el desarrollo en la memoria.



6.2. Presupuesto del proyecto

La realización de este proyecto ha supuesto un coste formado tanto como por el material empleado durante su desarrollo como por el personal que ha participado en él. Dichos costes se desglosan detalladamente en la siguiente tabla.

	Concepto	Coste/Salario	Cantidad/Tiempo	Coste total
Equipos	Ordenador portátil Dell Inter Core i7 8GB RAM	749,99 €	1 ud.	749,99 €
	Ordenador de sobremesa HP Intel Core	699,99 €	1 ud.	699,99 €
	NI USRP-2920, 50 MHz to 2.2 GHz Software Radio	2.870,00 €	4 uds.	11.480,00 €
	Cable de datos y sincro USRP MIMO , 0.5M	93,00 €	2 uds.	186,00 €
	Cable Ethernet	5,00 €	2 uds.	10,00 €
	Antena tribanda 144 MHz, 400 MHz, 1200 MHz	61,00 €	4 uds.	244,00 €
	LabVIEW y licencia para estudiante (gratis)	0,00 €	1 ud.	0,00 €
	Microsoft Office	120,00 €	1 ud.	120,00 €
Personal	Ingeniero Junior	25,00 €	350 h.	8.750,00 €
	Ingeniero Senior	35,00 €	50 h.	1.750,00 €
				23.989,98 €

Figura27: presupuesto del proyecto

Como se puede apreciar, el coste del proyecto asciende a un total de 23.989,98€.

Anexo: Referencias y bibliografía

[1] Ezio Biglieri, Robert Calderbank, Anthony Constantinides, Andrea Goldsmith, Arogyaswami Paulraj and H. Vincent Poor: MIMO Wireless Communications (Cambridge, 2007)

[2] Claude Oestges and Bruno Clerckx: MIMO Wireless Communications: From Real World Propagation to Space-Time Code Design (Academic Press, 2007)

[3] Arogyaswami Paulraj, Rohit Nabar and Dhananjay Gore: Introduction to Space—Time Wireless Communications (Cambridge, 2003)

[4] Alain Sibille, Claude Oestges and Alberto Zanella: MIMO From Theory to Implementation (Academic Press, 2010)

[5] Análisis de señales MIMO de los estándares WiMAX™, LTE y WLAN:

http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_news_from_rs/203/NEWS_203_spanish_FSQ_MIMO.pdf

Enlace disponible el 23 de septiembre de 2015.

[6] Albentia Systems: Modulación OFDM:

<https://albentia.wordpress.com/2013/09/05/modulacion-ofdm-wimax-madrid/>

Enlace disponible el 23 de septiembre de 2015.

[7] Universidad Distrital Francisco José de Calas: Modulación Multiportadora OFDM:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/2699/3891>

Enlace disponible el 23 de septiembre de 2015.

[8] Victor P. Gil Jiménez: Algoritmos en transmisión y Recepción para OFDM en entornos multiusuario. Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2005.

[9] Grupo de Investigación en Comunicaciones del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Federal de Santa Catarina: Sistemas de Comunicación Inalámbrica MIMO-OFDM:

<http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/ran/v3n4/v3n4a09.pdf>

Enlace disponible el 23 de septiembre de 2015.

[10] Proyecto fin de carrera: Estudio de un sistema CDMA-OFDM
http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11244/fichero/Volumen+I%252F5_MODULACION_OFDM.pdf

Enlace disponible el 23 de septiembre de 2015.

[11] Esquema de Alamouti:

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11831/fichero/Volumen+I%252FCapitulo+3+-+Esquema+de+Alamouti.pdf>

Enlace disponible el 23 de septiembre de 2015.

[12] Space Time Code Blocks:

<http://spacetimecodes.blogspot.com.es/p/alamouti-code.html>

Enlace disponible el 23 de septiembre de 2015.

[13] BER Analysis of Alamouti Space Time Block Coded 2x2 MIMO Systems using Rayleigh Dent Mobile Radio Channel, artículo del IEEE.

[14] Space Time Code for MIMO Systems, Helsinki University of Technology.

http://www.comlab.hut.fi/opetus/333/2004_2005_slides/Space_Time_Codes_for_MIMO.pdf

Enlace disponible el 23 de septiembre de 2015.

[15] Proyecto fin de carrera Daniel Pérez Vaquero: Implementación de sistema MIMO mediante modulación OFDM.

[16] Getting Started Guide : NI USRP-29XX.

[17] Foros sobre USRP Software Radio de National Instruments:

<http://forums.ni.com/t5/USRP-Software-Radio/bd-p/500>

Enlace disponible el 23 de septiembre de 2015.