



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias de la Electrónica

**Maestría en Ingeniería Electrónica,
Opción Instrumentación Electrónica**

**Tesis para obtener el grado de
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
TRANSMISIÓN NOMA EN FPGA”**

Presenta:

Rodrigo Cuevas Terrones*

DIRECTORAS:

**Dra. Josefina Castañeda Camacho.
M.C. Ana María Rodríguez Domínguez.**

AGRADECIMIENTOS

A mi amada esposa, Silvia María Martínez Ramírez... a quien amo con todo mi corazón y quien estuvo y ha estado a mi lado en las buenas y en las malas desde el primer momento de la Licenciatura hasta el último momento de la Maestría, y todo el tiempo, día y noche... gracias por tu enorme y total apoyo, en todos los sentidos. Sin él simplemente nada de esto se hubiera logrado.

A mi madre... que nos mira y nos cuida desde el Cielo.

A mi padre y mis hermanos... por su apoyo moral y su enorme paciencia y comprensión.

A mis asesoras, la Doctora Josefina y la Maestra Ana María... por su apoyo permanente en lo académico, en lo práctico y en lo moral.

A la Doctora Olga Guadalupe Félix Beltrán... por sus valiosos consejos, sin los cuales esto no hubiera siquiera comenzado.

A mis compañeros Mauricio, Israel y Jonathan... por su oportuna intervención y su enorme y determinante ayuda.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología... por el apoyo económico otorgado durante el período de agosto de 2018 a julio de 2020.

A la Facultad de Ciencias de la Electrónica... por la invaluable oportunidad de cursar mi Maestría, proporcionando los medios y los recursos necesarios.

Índice

RESUMEN	5
INTRODUCCIÓN	7
Esquemas de acceso multiusuario	8
Objetivos	12
Objetivo general	12
Objetivos particulares	12
Estado del arte.	13
Justificación.	16
Descripción del trabajo.	17
Descripción del documento	19
CAPÍTULO 1. Marco teórico	21
1.1 Definición de esquema de acceso múltiple o multiusuario	22
1.1.1 FDMA-Acceso múltiple por división de frecuencia	23
1.1.2 TDMA-Acceso múltiple por división de tiempo	23
1.1.3 CDMA-Acceso múltiple por división de código	25
1.1.4 OFDMA-Acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales	27
1.1.5 NOMA-Acceso múltiple no ortogonal	28
1.2 Modulación de señales	29
CAPÍTULO 2. Modelado y simulación del sistema	32
2.1 Descripción y modelado matemático de un sistema NOMA de enlace descendente para dos usuarios	33
2.2 Simulación de un modulador QPSK en MATLAB	37
2.3 Simulación en MATLAB de un esquema de acceso NOMA para dos usuarios	43
CAPÍTULO 3. Implementación física del sistema de transmisión NOMA	58
3.1 La tarjeta de desarrollo	59
3.2 El sistema de transmisión NOMA en FPGA	60
CAPÍTULO 4. Validación de la simulación y de la implementación del sistema NOMA propuesto	72
4.1 Descripción del método de validación para la simulación del sistema de transmisión NOMA	73
4.1.1. Etapa de acceso NOMA de dos señales reales	74
4.1.2. Etapa de representación del medio de transmisión	76
4.1.3. Etapa de recepción y recuperación de las señales	78
4.1.4. Conclusiones sobre el proceso de validación de la simulación en MATLAB	79
4.2. Descripción del método de validación para la implementación del sistema de transmisión NOMA en FPGA	81

4.2.1. Etapa de revisión y corrección de los bloques de implementación	82
4.2.2. Etapa de comprobación de las señales moduladas y de los valores adecuados de las fases de inicio de cada símbolo	84
4.2.3. Etapa de prueba con valores de bits correspondientes a una señal real	85
4.2.4. Conclusiones sobre el proceso de validación para la implementación del sistema de transmisión NOMA en FPGA	88
CONCLUSIONES GENERALES	89
REFERENCIAS	92
APÉNDICE A: Artículos escritos	98
APÉNDICE B: Código VHDL del divisor de bits y del multiplexor	100

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla un sistema de transmisión de dos señales distintas que utiliza el esquema de acceso multiusuario conocido como NOMA (*Non-Orthogonal Multiple Access*), cuyo destino previsto es el uso en sistemas de telefonía celular. En este sistema se utiliza la estrategia de modulación digital QPSK, la cual permite realizar el proceso necesario para la aplicación del esquema NOMA, con el objetivo de obtener una sola señal que contenga la información de las señales originales sin pérdidas, corrupciones o interferencias entre sí. Un sistema de modulación QPSK se muestra en el presente trabajo y se simula en MATLAB, y se explican las consideraciones que se tuvieron para utilizarlo con el esquema de acceso NOMA.

El sistema de transmisión NOMA se simula en MATLAB y se desarrolla en lenguaje VHDL para su implementación en FPGA, para lo cual primero se plantea un enlace de transmisión de una estación base en la que se genera información destinada a dos usuarios receptores. En la simulación computacional se muestra de manera gráfica lo que sucede con las señales generadas en la estación base al ser capturadas, digitalizadas, moduladas y finalmente integradas mediante el esquema de acceso NOMA, y su respuesta se utiliza como referencia para comprobar la respuesta del sistema implementado en el FPGA. Los resultados obtenidos en la simulación computacional son satisfactorios, y en la implementación en FPGA se obtienen resultados experimentales muy similares.

Para comprobar la funcionalidad del diseño que se plantea, en la simulación se desarrolló la etapa de recepción y se consideran algunas de las principales condiciones inherentes a una transmisión inalámbrica, como pérdida de señal por trayectoria (que depende de la distancia de usuarios a estación base), pérdida de señal por trayectorias múltiples, y ruido del aire. En la simulación estos elementos fueron aplicados a la señal transmitida, mostrando en gráficas sus efectos sobre la misma. En la etapa de recepción se toma la señal afectada y se lleva a cabo el proceso de separación y recuperación de las señales originales; dicho proceso se desarrolló específicamente para el presente trabajo.

ABSTRACT

In the present work a transmission system of two different signals, which uses the multi-user access scheme known as NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access), whose intended destination is the use in cellular telephone systems, is developed. In this system, a QPSK digital modulation strategy is used, which allows the necessary process to be carried out for the NOMA scheme application, with the aim of obtaining a single signal that contains the information of the original signals without losses,

corruption or interferences between them. A QPSK modulation system is shown in the present work and simulated in MATLAB, and the considerations that took place to use it with the NOMA access scheme are explained.

The NOMA transmission system is simulated in MATLAB and developed in VHDL language for its implementation in an FPGA; a transmission link of a base station is first proposed, and information is generated for two receiving users. The computational simulation shows graphically what happens to the signals generated in the base station when they are captured, digitized, modulated and finally integrated through the NOMA access scheme, and its response is used as a reference to checking the response of the implemented system in the FPGA. Obtained results in the computational simulation are satisfactory, and very similar experimental results are obtained in the FPGA implementation.

In order to verify the correct function of the proposed design, the reception stage was developed in the simulation and some of the main conditions inherent to wireless transmission are considered, such as signal loss per path (which depends on the distance from users to the base station), multipath signal loss, and air noise. In the simulation, these elements were applied to the transmitted signal, showing their effects on it in graphs. In the reception stage, the affected signal is taken and the process of separation and recovery of the original signals is carried out; this process was developed specifically for the present work.

INTRODUCCIÓN

En esta primera parte se describen los objetivos del presente trabajo, la justificación para llevarlo a cabo, y la metodología. Se presenta una lista de algunos de los trabajos ya realizados relacionados con el tema, y se sitúa al lector en el contexto de los esquemas de acceso multiusuario para comunicación inalámbrica y del trabajo de investigación previa a la realización de las simulaciones y las pruebas.

Esquemas de acceso multiusuario

En cualquier sistema de tecnología celular es necesario tener un método o procedimiento que permita a múltiples usuarios acceder a él y usarlo simultáneamente; tal procedimiento es el esquema de acceso multiusuario. A medida que la tecnología celular ha progresado, se han utilizado diferentes esquemas de acceso múltiple; éstos forman el núcleo mismo de la forma en que funciona la tecnología de radio en el sistema celular.

Existen cuatro esquemas de acceso múltiple distintivos que se utilizan en los sistemas celulares. Desde las primeras tecnologías celulares analógicas hasta las tecnologías celulares que se están desarrollando para el futuro, los esquemas de acceso múltiple se conocen como FDMA, TDMA, CDMA y OFDMA. [1]

Un esquema de acceso múltiple debe cumplir los siguientes requisitos:

- Posibilidad de manejar varios usuarios sin interferencia mutua.
- Capacidad para poder maximizar la eficiencia del espectro.
- Debe ser robusto, facilidad de traspaso entre células.

Los actuales avances tecnológicos en materia de comunicación inalámbrica son resultado de una creciente demanda no sólo de la cantidad de dispositivos que estén al alcance de los usuarios, sino también de los servicios cada vez más diversos que dichos dispositivos son capaces de proporcionar, y desde luego, de un número cada vez mayor de usuarios.

En este sentido, así como se ha evolucionado considerablemente en el diseño de los teléfonos celulares, también se ha hecho lo propio en el uso y aprovechamiento de las frecuencias que éstos utilizan para establecer la comunicación inalámbrica; los primeros teléfonos celulares utilizaban los espectros de frecuencia de las transmisiones de radio disponibles, de modo que no se contaba con frecuencias de uso propio, ni con la tecnología para desarrollar redes de uso exclusivo. Posteriormente, los sistemas fueron evolucionando a la par de la tecnología disponible; se dispuso de otros valores y espectros de frecuencia, lo cual se denominó como las "generaciones" de las redes de telefonía celular, que han sido distinguidas por los usos que se les dan y los servicios que dichas redes son capaces de proporcionar a los usuarios (siempre atendiendo a la tecnología disponible de los teléfonos con los que dichas frecuencias serán aprovechadas).

Las mencionadas generaciones son conocidas como 1G, 2G, 2.5G, 3G Y 4G, siendo ésta última la utilizada actualmente, y que cuenta ya con su propia actualización, la 4.5G, cuyo uso ya se alterna con 4G y tiende hacia 5G.

1G.- Fue desarrollada en Japón en la década de los 70's del siglo XX, seguida por un lanzamiento en Europa en 1981, y sólo transmitía voz; su seguridad era nula, ya que las llamadas de voz se reproducían en las torres radiofónicas. Se basaba en una tecnología llamada Advanced Mobile Phone System (AMPS). El sistema AMPS fue de frecuencia modulada y utilizó el esquema de acceso múltiple por división de frecuencia FDMA [2].

2G.- Se desarrolló entre 1980 y 1990; fue la primera en poseer la capacidad de transmisión tanto de voz como de datos digitales. Sus servicios ya incluyeron llamada tripartita, identificador de número y medición del uso del servicio para facturación específica, entre otros. Utilizaba los esquemas FDMA y TDMA [2].

2.5G.- La tecnología mejoró continuamente para proporcionar mejores servicios, lo que llevó a un desarrollo ubicado entre 2G y 3G. Sus avances se dieron en el año 2000, casi a la par de la tercera generación (3G). En la generación 2.5 se introdujo la transferencia de datos y el internet de alta velocidad. Seguía utilizando el esquema TDMA, e introdujo el esquema CDMA [2].

3G.- También avanzó en el año 2000; se caracterizó por el aumento en las tasas de transmisión de datos, facilidad para aplicaciones de internet y disminución del costo de transmisión a alta velocidad (la tecnología original se mejoró para permitir transmisión de datos de hasta 14 Mbps). Sus principales ventajas fueron: acceso fijo inalámbrico a Internet, llamadas de video, TV móvil, mapas de navegación, banca virtual, e información de tráfico y clima en tiempo real. Utilizó el esquema CDMA [2].

4G.- Basada solamente en protocolos de comunicación de internet, fue desarrollada en el año 2010. Su innovación consistió, en consecuencia, en TV móvil en HD, transmisión de video en vivo, TV 3D. 4G ofrece una velocidad de descarga de 100Mbps. Es la utilizada actualmente, y alterna su uso con su actualización, la generación 4.5G. Utiliza los esquemas CDMA y OFDMA [3].

4.5G.- Su manera de trabajar es la evolución y optimización de la generación 4G, lo que da como resultado la nueva posibilidad de transmisión de video *streaming* en 2K y 4K. Utiliza los esquemas CDMA y OFDMA.

Con la próxima generación (5G) se pretende establecer una conexión permanente y compatible entre todos los dispositivos inalámbricos, de modo que los enlaces se puedan realizar desde cualquier red. Esta plataforma sería el soporte para el Internet de las Cosas, así como para brindar conexión permanente y dar múltiples servicios paralelos (por ejemplo, dar información del clima y a la vez recibir llamadas). Utilizaría los esquemas OFDMA y NOMA.

Las redes de telefonía celular, así como la mayoría de los sistemas de transmisión, miden y aprovechan distintos rangos de frecuencias para separar los enlaces de comunicación entre un teléfono y otro; a un enlace de comunicación se le asigna en tiempo real una frecuencia, mientras que a otro enlace se le asigna una frecuencia distinta (FDMA), o se le asigna la misma frecuencia llevando a cabo "turnos" de tiempo entre un usuario y otro (TDMA), lo que se conoce como *multiplexaje*, o se utilizan distintos códigos de enlace entre un usuario y otro (CDMA). Haciendo referencia al concepto del presente trabajo, un sistema NOMA lleva a cabo dicha separación determinando, mediante un factor multiplicativo, distintos niveles de potencia de las señales, y utilizando las diferencias entre dichos niveles para separar los mencionados enlaces, dándonos una nueva forma de proveer esquemas de acceso multiusuario. Entonces, la clave es tener señales que posean diferencias significativas en sus niveles de potencia, de modo que sea posible establecer más de un enlace en un mismo espectro de frecuencia, sólo que aprovechando esas diferencias en las potencias de señal.

Lo anterior puede permitir un mayor rango de posibilidades de conexión inalámbrica, principalmente para poder establecer un mayor número de usuarios, lo que hace también considerar la gran utilidad de implementar el sistema NOMA en la próxima generación de telefonía celular 5G (no implementada a la fecha). Esto se requiere dada la creciente demanda de servicios que hoy por hoy ya existe en materia de Internet inalámbrico e Internet de las Cosas, sin dejar de lado el objetivo original que es la comunicación directa entre usuarios.

En el trabajo que se presenta, la implementación del sistema físico de transmisión con el que se pretende utilizar el esquema NOMA se realizó configurando los circuitos digitales necesarios para tal fin dentro de un FPGA. Esto permite la posibilidad de una evolución sin límites del diseño de nuestro sistema, dado que cualquier cambio en el mismo se lleva a cabo simplemente modificando la descripción de los elementos en las líneas de código.

En el presente trabajo se llevó a cabo el diseño y la implementación de un sistema de transmisión para comunicación que utiliza un esquema de acceso multiusuario

conocido como NOMA (Non Orthogonal Multiple Access, Acceso Múltiple no Ortogonal), cuyo destino pretendido es el uso en sistemas de telefonía celular.

El sistema NOMA está considerado como la base de las comunicaciones 5G y futuros, lo que resulta de gran impacto en el sector industrial en virtud de que las nuevas tecnologías requerirán de esta plataforma. El diseñador de este tipo de sistemas fácilmente podrá trabajar en el sector de las telecomunicaciones de nuestro país dimensionando y eligiendo las mejores opciones para prestar servicios basados en 5G.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de transmisión NOMA en un dispositivo FPGA.

Objetivos particulares

1. Analizar e investigar los principios de funcionamiento de las redes de comunicaciones móviles 1G, 2G, 3G, 4G y 5G.
2. Estudiar el principio de operación de los esquemas de acceso CDMA, OFDMA y NOMA.
3. Analizar la operación básica de un sistema de acceso NOMA.
4. Utilizando MATLAB simular un sistema de acceso NOMA.
5. Implementar el sistema de transmisión NOMA previamente simulado en MATLAB en un FPGA o en un sistema SoC.
6. Validar la simulación e implementación del sistema de transmisión NOMA.

Estado del arte

En la actualidad, los trabajos realizados en referencia a los esquemas de acceso NOMA son en su mayoría pruebas, hipótesis, cálculos, simulaciones.

Hasta ahora el esquema de acceso NOMA es objeto de múltiples estudios y pruebas, que se pueden resumir en lo siguiente:

El sistema NOMA es tomado como base para distintos tipos de dispositivos, no sólo de telefonía celular, sino también de transmisión directa de radio [4]. También se propone para ahorro de energía tanto en transmisiones como en recepciones [5], [6], [7], [8], [9], [10]. Se han realizado estudios de seguridad en comunicaciones [11], [12], [13], [14], [15], así como estudios de mayor aprovechamiento de los recursos [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27]. Se ha propuesto como esquema de acceso en una micro celda de un vehículo aéreo [28]. Con el esquema NOMA se ha propuesto un marco en el que se integren con facilidad el dominio de la potencia con el dominio de código [29]. Con un esquema NOMA también se busca eliminar o disminuir la interferencia entre usuarios de comunicación directa [30], [31], así como entre usuarios de una red [32], [33]. Se ha propuesto un sistema bidireccional con esquema de acceso NOMA [34].

Por su tecnología de medición de potencia de señales, con un esquema NOMA se busca simplificar el proceso de detección de redes [35].

El esquema de acceso NOMA utiliza las diferencias de potencia entre las señales de usuarios, por lo que también nace la necesidad de proponer un algoritmo para compensar una eventual escasez de usuarios [36], [37], así como un método para compensar la pérdida de eficiencia espectral [38]. También se ha desarrollado un método cooperativo para evitar cortes de enlaces [39], y también un método de funcionamiento cooperativo en general [40].

Al ser un esquema de acceso que busca un mayor número de usuarios simultáneos, se estudia la implementación de NOMA en acceso a las nubes de datos [41].

Se pretende que NOMA sea el esquema de acceso más utilizado para 5G, por lo que se busca una eficiencia de recursos para IoT [42], [43], [44].

Propone un sistema híbrido MIMO (*Multiple Input - Multiple Output*) - NOMA. [45].

Busca minimizar interferencia en comunicación vehicular [46]

Propone un sistema de control de acceso al esquema [47].

Busca una optimización de recursos para transmisión de video [48], [49], así como para videojuegos [50].

Se propone la implementación del esquema NOMA para comunicación entre vehículos aéreos [51], [52].

Se propone un sistema de actualización de datos en tiempo real utilizando un esquema de acceso NOMA [53].

Se propone un sistema de retransmisión de datos (para telefonía celular) con esquema de acceso NOMA [54].

Se estudia un sistema de acceso masivo utilizando el esquema NOMA [55].

Se propone una forma para la aplicación de NOMA para IoT [56], [57], [58].

Se busca aplicar el esquema de acceso NOMA en drones y vehículos aéreos para uso en desastres [59].

Se busca optimizar la conmutación en tiempo utilizando un esquema NOMA [60].

Se busca optimizar la transmisión de datos en sistemas cooperativos que usan el esquema de acceso NOMA [61], [62].

Se propone la utilización de NOMA sobre OMA para redes milimétricas multicelda [63].

Se propone un esquema híbrido de acceso [64].

Se compara el uso de un esquema OMA con un esquema NOMA [65], [66], [67], [68], [69], [70].

Se estudia la aplicación de esquema NOMA en una red de sensores inalámbricos [71].

Se estudia el rendimiento del esquema NOMA en diversidad de condiciones [72].

Se busca disminuir la interferencia entre pares de usuarios de un esquema NOMA. [73].

Se propone utilizar NOMA para transmisión de potencia y datos [74].

Se propone la aplicación de NOMA para transmisión robusta de información [75].

Se estudia la eficiencia espectral en redes de usuarios masivos [76], [77].

Se busca el acceso en cualquiera de los niveles de potencia [78].

Se propone la utilización del algoritmo K-means (algoritmo de inteligencia artificial utilizado para clasificación de objetos) para aprendizaje automático y así establecer un buen equilibrio entre el rendimiento y la complejidad computacional [79].

Se propone el uso de la Inteligencia Artificial para detectar interferencias de modulación en modulaciones [80].

Estudiando los trabajos mencionados, podemos observar que no se ha localizado un proyecto que proponga el desarrollo específico de un dispositivo dedicado a controlar el acceso multiusuario no ortogonal mediante asignación de niveles de potencia en un sistema de transmisión inalámbrica que sea implementado en un en FPGA o en SoC. En general, los trabajos realizados consisten en análisis, pruebas, propuestas o demostraciones.

Justificación

En el acceso múltiple no ortogonal (NOMA), se separan los enlaces de comunicación entre un teléfono y otro asignando a cada señal (por medio de un factor multiplicativo) un nivel específico de potencia, dando una nueva forma de proveer esquemas de acceso multiusuario. Entonces, NOMA es una prometedora técnica de acceso múltiple que explota el dominio de la potencia para mejorar la eficiencia espectral de las redes inalámbricas de quinta generación (5G).

Actualmente los esquemas de acceso NOMA se encuentran en pleno proceso de desarrollo y de investigación; su situación hoy en día en el mercado internacional se limita a la existencia de muy pocos prototipos funcionales de sistemas que en breve serán obsoletos. Esto da numerosas posibilidades de diseño, optimización e implementación de sistemas de transmisión con esquema NOMA con una tecnología propia, lo que también nos lleva a aspirar al establecimiento de una industria local para tal fin (con miras a una comercialización en masa). Adicionalmente, la implementación de un sistema con esquema NOMA en un dispositivo programable (tal como un FPGA o un PSoC), hace posible un diseño resistente a la obsolescencia, toda vez que los diseños son realizados mediante descripción de hardware, lo que permite cualquier cambio y actualización del diseño, en cualquier momento, con el simple hecho de modificar el código compilador; la única limitante al respecto sería la capacidad del mencionado dispositivo programable para que le sea configurado un número cada vez mayor de componentes, lo cual se puede prevenir utilizando los dispositivos de mayor capacidad disponible al momento.

Con el presente trabajo se pretende resolver, por un lado, la falta de dispositivos para el desarrollo de la nueva generación de telefonía móvil, y por otro lado, el problema de la obsolescencia, facilitando la actualización inmediata de los circuitos mediante la utilización de un dispositivo digital programable, que en este caso es un FPGA, para la implementación del sistema de comunicación con esquema de acceso NOMA.

En el presente trabajo se diseña y se implementa un sistema de transmisión con esquema de acceso NOMA, dado que actualmente es una tecnología en desarrollo; dicho sistema podrá ser utilizado para diversos tipos específicos de comunicación inalámbrica, y no exclusivamente para telefonía celular. Se busca que este documento también sea una guía para posteriores diseños de nuevos sistemas que utilicen el esquema de acceso NOMA.

Descripción del trabajo

El diseño de esquemas de acceso múltiple es un aspecto extremadamente importante en la planeación de un sistema celular; significa proporcionar los medios para que múltiples usuarios compartan los recursos de radio en un espectro eficiente y de manera rentable. En 1G, 2G y 3G fueron introducidos, respectivamente, el Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA), el Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA) y el Acceso Múltiple por División de Código.

En 4G, se adopta el Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal; esto significa que las frecuencias de las señales subportadoras asignadas a cada usuario presentan ortogonalidad al ser estudiadas y representadas en el dominio de la frecuencia. La ortogonalidad consiste en el hecho de que el nivel de potencia máxima de cada señal coincide, en frecuencia, con el nivel cero inicial de potencia de la siguiente señal, en una diferencia de fase de 90° . Tal diseño tiene el beneficio de que no existe una interrelación mutua entre los usuarios, por lo que se puede lograr un buen rendimiento a nivel del sistema incluso con receptores simplificados. [81]

NOMA-Acceso múltiple no ortogonal

NOMA es una forma adicional de proveer un esquema de acceso multiusuario para comunicaciones inalámbricas; utiliza el dominio de la potencia para separar señales, técnica que no ha sido usada en 1G, 2G, 3G o 4G.

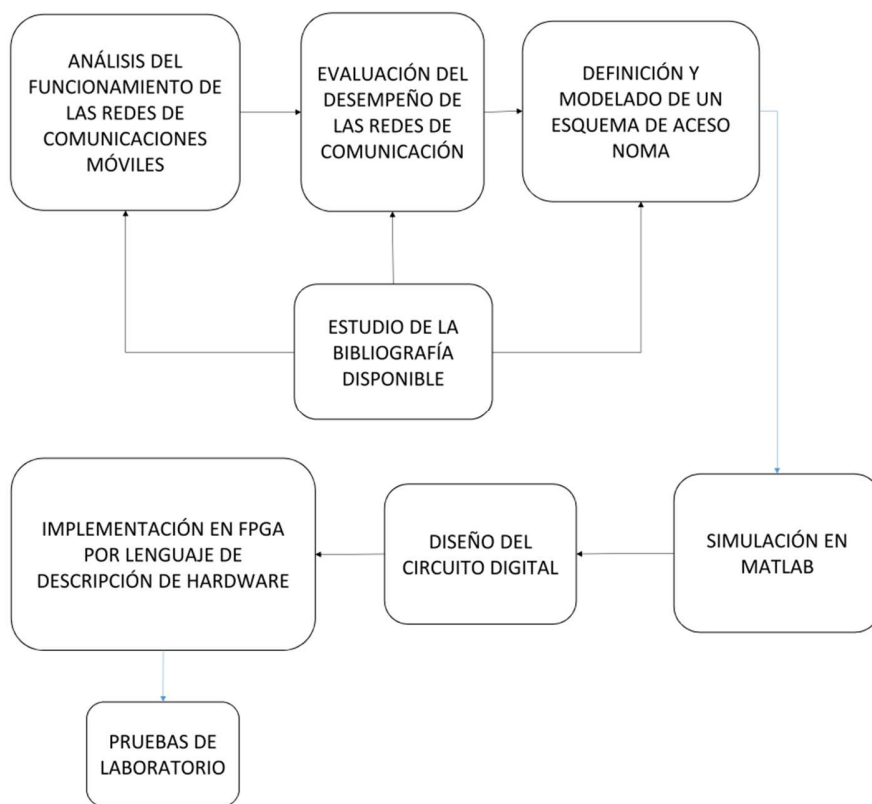
La clave para el acceso múltiple no ortogonal de NOMA es tener señales que posean diferencias significativas en los niveles de potencia; es posible de esta manera aislar totalmente, por ejemplo, una señal de nivel alto en el receptor y luego cancelar su interferencia con otra señal de nivel bajo, lo que da como resultado que ambas señales compartan la misma frecuencia.

En las soluciones no ortogonales, lo que se hace es permitir que todos los usuarios accedan a toda la banda, lo que hace posible que otros usuarios con buena calidad de canal puedan acceder a partes de la banda que antes tendrían vedadas por causa de la “parcelación” entre usuarios antes mencionada, y eso resulta en una mayor eficiencia espectral (la suma de las tasas de bit conseguidas con varios usuarios en esa porción de la banda es mayor que si sólo la utilizase un solo usuario), aunque el usuario con pobres condiciones de canal experimente algo más de interferencia; para conseguir dichas mejoras están siendo estudiados métodos de multiacceso que requieren diseños avanzados de los sistemas receptores para reducir las interferencias inter e

intracelulares; uno de los principales procedimientos para tal fin es la cancelación de interferencia sucesiva (SIC).

En resumen, el sistema de acceso múltiple no ortogonal NOMA permite el acomodo de un mayor número de usuarios complementando algunas de las técnicas previas mediante una estrategia no ortogonal, utilizando el multiplexado en el dominio de la potencia.

Para explicar el proceso que se llevó a cabo en el presente trabajo, se presenta la siguiente metodología del procedimiento:



Metodología del procedimiento llevado a cabo.

Descripción del documento

El presente documento se divide, posterior a la introducción, en los capítulos 1, 2, 3 y 4, y posteriormente la bibliografía.

En la introducción se hace una descripción del concepto de un esquema de acceso multiusuario para telefonía celular, así como de los principales esquemas de acceso utilizados en las diferentes etapas de desarrollo (generaciones) de las tecnologías celulares. Se mencionan los objetivos que se persiguen en el presente trabajo de tesis, el estado del arte, así como la justificación y la descripción del trabajo a realizar, y se incluye la presente descripción de documento.

En el capítulo 1 se definen los conceptos generales que se utilizan en el presente trabajo, como los esquemas de acceso multiusuario utilizados y el concepto de modulación. Esta información brinda un panorama general para comprender el trabajo a realizar.

En el capítulo 2 se lleva a cabo una descripción general de un esquema básico de transmisión con acceso NOMA para dos usuarios, detallando las partes que lo forman y explicando su funcionamiento. También se documenta la simulación en MATLAB de un modulador digital QPSK, así como del esquema NOMA descrito para dos usuarios, haciendo un ejemplo de transmisión y recepción de voz humana (para cada usuario), explicando la manera en la que se procesan sus señales, se representa su acceso, transmisión y recepción, y se reconstruyen las voces para ser finalmente reproducidas.

En el capítulo 3 se describe la implementación del sistema de transmisión con el esquema de acceso NOMA en una tarjeta de desarrollo con FPGA y se observan los resultados mostrando las señales en osciloscopio.

En el capítulo 4 se describe el proceso de validación tanto de la simulación como de la implementación del sistema. Para la simulación se describe el proceso mediante el cual se demuestra su funcionalidad al aplicar las señales de voz. Para la implementación se presenta el acceso de dos señales de texto digitalizado y la señal NOMA entregada por el transmisor visualizada en osciloscopio, comparándola con la misma señal entregada por la simulación al aplicarle las mismas señales de texto digitalizado.

En el capítulo 5 se mencionan las conclusiones generales acerca del presente trabajo, describiendo las posibilidades que nos da el sistema tanto en la etapa de la simulación como en la etapa de la implementación.

Por último, en las referencias se indican las principales fuentes de la información que conciernen a este trabajo, información que incluye el estado actual de la tecnología que es objeto de estudio, la descripción de los esquemas de acceso anteriores y actuales, y los trabajos que actualmente se realizan al respecto.

CAPÍTULO 1

Marco teórico

En este capítulo se describen los conceptos principales utilizados en la presente tesis.

1.1 Definición de esquema de acceso múltiple o multiusuario

Un sistema de telefonía celular implica el acceso de múltiples usuarios a una determinada red de comunicación de manera simultánea sin errores, pérdidas de información o interferencias entre ellos. Esto requiere de un sistema, o de un procedimiento, o de una tecnología que lo facilite, utilizando las frecuencias de radio disponibles; esto último es conocido como *esquema de acceso múltiple o multiusuario*. Se han utilizado distintos esquemas a lo largo de la historia de la telefonía celular, obedeciendo a los avances tecnológicos tanto en materia de transmisiones inalámbricas como en materia de complejidad y capacidad de los dispositivos electrónicos de comunicación con los que se utilizan dichas frecuencias. Los esquemas de acceso multiusuario constituyen la esencia misma del funcionamiento de la tecnología de radio en el sistema celular, dado que en ésta se requiere compartir al máximo el espectro disponible de frecuencias de radio.

Para expresar mejor el concepto, la figura 1.1 muestra el diagrama de bloques básico de un sistema de comunicaciones para varios usuarios, indicando en qué lugar se encuentra ubicado el esquema de acceso múltiple. La información destinada a cada usuario es demodulada y decodificada dentro de cada uno de ellos; la manera de hacerlo depende directamente de la estrategia de modulación y del esquema de acceso utilizados.

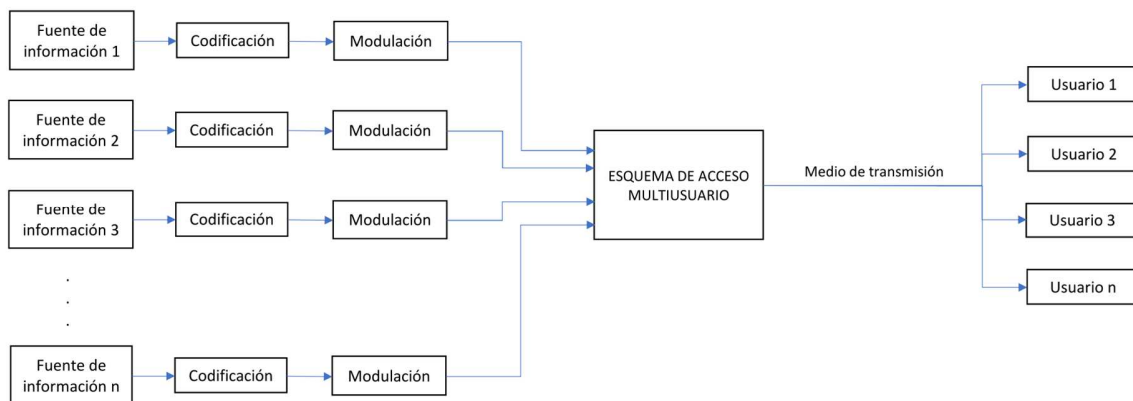


Figura 1.1. Ubicación del bloque de acceso múltiple o multiusuario en un sistema de comunicaciones.

Los esquemas de acceso múltiple permiten a muchos usuarios compartir un mismo espectro de radio. Compartir el ancho de banda eficientemente entre usuarios es uno de los principales objetivos de los esquemas de acceso múltiple.

1.1.1 FDMA-Acceso múltiple por división de frecuencia

FDMA es el más sencillo de los esquemas de acceso múltiple que se han utilizado. La red asigna un canal o una frecuencia a cada usuario, de tal manera que a cada uno de los diferentes suscriptores se asigna una célula diferente para su acceso a la red. Al utilizarse diferentes frecuencias, el sistema se denomina naturalmente acceso múltiple por división de frecuencias. Este esquema fue utilizado por todos los sistemas analógicos.

FDMA separa a los diferentes usuarios utilizando y asignando a cada uno una frecuencia diferente ($\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$). Cada usuario se aísla utilizando un filtro pasabanda. Las señales de varios usuarios se asignan a diferentes frecuencias, al igual que en un sistema analógico. Se proporcionan bandas de guarda de frecuencia entre espectros de señal adyacentes para minimizar la interferencia.

VENTAJAS:

- La capacidad se puede aumentar al reducir la tasa de bits de información.
- Los avances tecnológicos requeridos para la implementación son simples.
- Simplicidad de hardware, ya que los usuarios se aíslan mediante filtros pasabanda.

DESVENTAJAS.

- La mejora en la capacidad depende del funcionamiento a una relación reducida señal/interferencia.
- La tasa de bits máxima por canal es fija y pequeña.
- Uso ineficaz del espectro; si un canal no está en uso, permanece inactivo y no contribuye para mejorar la capacidad del sistema. [82]

1.1.2 TDMA-Acceso múltiple por división de tiempo

El segundo sistema surgió con la transición a esquemas digitales para la tecnología celular. Aquí los datos digitales podrían dividirse en el tiempo y enviarse como "turnos" cuando fuera necesario. A medida que se digitalizaba el habla, podían enviarse en breves secciones de datos; cualquier pequeño retraso causado por el envío de los datos en turnos sería muy corto y no se notaría. De esta manera se hizo posible organizar el sistema de forma que un determinado número de ranuras de tiempo estuviera disponible en una transmisión. A cada suscriptor se le asignaría un intervalo de tiempo diferente en el que pudieran transmitir o recibir datos. Como se asignan diferentes intervalos de tiempo a cada suscriptor para obtener acceso al sistema, a este esquema se le conoce como acceso múltiple por división de tiempo. Obviamente, esto permite que sólo un cierto número de usuarios accedan al sistema. Puede darse acceso

más allá de este esquema, por lo que los sistemas que utilizan TDMA también pueden tener elementos del esquema FDMA como tal $(\omega_1 t_1, \omega_1 t_2, \dots, \omega_1 t_m, \omega_2 t_1, \dots, \omega_n t_m)$.

En el esquema TDMA, cada usuario usa todo el ancho de banda del canal por una fracción de tiempo; éste se divide en intervalos iguales, llamados ranuras. Varias ranuras forman un marco. Se utilizan tiempos de guarda para minimizar la interferencia entre canales. A cada usuario se le asigna una frecuencia determinada y un intervalo de tiempo para transmitir sus datos.

En el enlace de descarga (*downlink*, en el cual el dispositivo móvil recibe la información de la estación base), los datos se transmiten a través de un operador de radio desde una estación base a varios móviles activos. En la dirección inversa (*uplink*, en la cual el dispositivo móvil emite la información hacia la estación base), la transmisión de móviles a las estaciones base se secuencia en el tiempo y se sincroniza en una frecuencia común para TDMA.

En un sistema TDMA, el usuario puede utilizar múltiples ranuras para admitir un rango amplio de tasa de bits, seleccionando la tasa de multiplexación más baja o en múltiplos de la misma. Esto permite admitir una variedad de técnicas de codificación de voz a diferentes velocidades de bits con diferentes calidades de voz; esto permitiría a los clientes solicitar y pagar determinado ancho de banda a pedido. Dependiendo de la velocidad de datos utilizada y del número de ranuras por trama, un sistema puede utilizar todo el ancho de banda o puede emplear un esquema FDD (*frequency division duplex*, sistema en el cual el transmisor y el receptor operan simultáneamente en distintas frecuencias). El resultado es una mezcla de división de frecuencia y división de tiempo. Toda la banda de frecuencia se divide en una serie de canales *duplex*. Estos canales se implementan en un patrón de reuso de frecuencia. Cada canal está configurado en modo TDM (*time division multiplexing*, multiplexado por división de tiempo) para la dirección de enlace descendente y en modo TDMA para la dirección de enlace ascendente.

VENTAJAS.

-TDMA permite una tasa de bits flexible no sólo para múltiplos de la tasa básica, de un solo canal sino también submúltiplos para un tráfico del tipo de transmisión de baja tasa de bits.

-TDMA permite monitorear cuadro por cuadro el error de intensidad/bit para permitir que los móviles o las estaciones base inicien y ejecuten transferencias.

-Cuando se usa exclusivamente TDMA, y no FDMA, se utiliza el ancho de banda de manera más eficiente porque no se requiere una banda de protección de frecuencia entre canales.

-TDMA transmite cada señal con un tiempo de guarda suficiente entre los intervalos de tiempo para adaptarse a imprecisiones provocadas por inestabilidad de reloj, retardo de transmisión por distancia de propagación y las “filas” de pulso de señal provocadas por las respuestas transitorias.

DESVENTAJAS.

-Para teléfonos móviles TDMA exige una potencia alta de pico en el enlace ascendente en el modo de transmisión, lo que acorta la vida útil de la batería.

-TDMA requiere una cantidad sustancial de procesamiento de señal para el filtrado combinado y la detección de correlación para sincronizar con un intervalo de tiempo.

-TDMA requiere de sincronización. Si ésta se pierde, los canales pueden chocar entre sí.

-El tiempo de propagación de una estación móvil a una estación base varía con la distancia a la estación base [83].

1.1.3 CDMA-Acceso múltiple por división de código

CDMA utiliza uno de los aspectos asociados con el uso del espectro de propagación de secuencia directa. Cuando se extraen los datos requeridos de una señal de espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS), mejor conocido como DS-SS (Acceso múltiple por división de código en secuencia directa), es necesario tener y utilizar el código de chip (referente al hardware del sistema de comunicación), mientras todos los demás datos de las fuentes que utilizan diferentes códigos de chips serían rechazados o ignorados. Por lo tanto, es posible asignar diferentes códigos a diferentes usuarios, y usar esto como el medio por el cual los diferentes usuarios tienen acceso al sistema. El esquema CDMA se ha comparado con la situación de encontrarse en una sala llena de personas que hablan diferentes idiomas; aunque el nivel de ruido fuera muy alto, aún es posible entender a alguien que habla en nuestro propio idioma e ignorar los demás. Con CDMA se utilizan diferentes códigos de propagación o de chip. Cuando se genera un espectro ensanchado de secuencia directa, los datos a transmitir se multiplican por el código del chip. Esto amplía el espectro de la señal (por eso es espectro ensanchado), pero solo se puede decidir en el receptor si se multiplica de nuevo con el mismo código de propagación. No se ven todas las señales que utilizan códigos de propagación diferentes y se descartan en el proceso. Por lo tanto, en presencia de una variedad de señales, es posible decodificar sólo la requerida. De esta manera, la estación base asigna códigos diferentes a diferentes usuarios; cuando recibe la señal, utilizará un código determinado para recibir la señal de un móvil y un código distinto para recibir la señal otro móvil. De esta manera, se puede utilizar el mismo canal de frecuencia para dar servicio a varios móviles diferentes.

CDMA es una técnica de ensanchamiento del espectro frecuencial, en donde todos los móviles utilizan un mismo canal radioeléctrico bidireccional de banda ancha. La señal antes de ser transmitida es multiplicada por una secuencia pseudoaleatoria con el objetivo de ensanchar el espectro de la señal a transmitir. Esta secuencia pseudoaleatoria, también llamada código, es específica de cada enlace entre un móvil y la estación base.

Una de las características básicas del CDMA es la inmunidad y diversidad inherentes que presenta frente a las interferencias, lo que la hace especialmente atractiva en entornos limitados por interferencias, como ocurre en los sistemas celulares. Además, en este tipo de sistemas, el plan de reuso de frecuencias se simplifica, y resulta más flexible en comparación con las otras técnicas de acceso. En teoría el mismo conjunto de frecuencias puede ser reutilizado en cada célula, lo que permite un aumento de la eficiencia espectral. Otra de las ventajas que ofrece un sistema con acceso CDMA es la posibilidad de convivir con otros sistemas de banda estrecha ya existentes sin afectarlos sensiblemente, gracias a la expansión de energía que se produce a lo largo del gran ancho de banda disponible.

CDMA también puede combinarse con los anteriores esquemas de acceso, de modo que ahora tenemos frecuencias, tiempos y códigos ($\omega_1 t_1 c_1, \omega_1 t_1 c_2, \dots, \omega_1 t_1 c_o, \omega_1 t_2 c_1, \omega_1 t_2 c_2, \dots, \omega_1 t_m c_o, \dots, \omega_n t_m c_o$), lo cual ha permitido aumentar exponencialmente el número de usuarios simultáneos.

VENTAJAS.

-El sistema no precisa de igualadores de canal al aprovechar de forma constructiva la interferencia intersimbólica (interferencia entre señales moduladas) producida por la propagación multicamino.

-Se requiere un único equipo de radio por estación base o emplazamiento, puesto que todos los usuarios comparten el mismo canal radioeléctrico.

-No precisa asignación ni coordinación de frecuencia al compartir todos los usuarios el mismo radiocanal, lo que simplifica la gestión del mismo.

-Permite un proceso de *handover* "suave" ya que cada célula utiliza idéntica banda de frecuencias (se denomina *handover* o traspaso al sistema utilizado en comunicaciones móviles celulares con el objetivo de transferir el servicio de una estación base a otra cuando la calidad del enlace es insuficiente en una de las estaciones; este mecanismo garantiza la realización del servicio cuando un móvil se traslada a lo largo de su zona de cobertura.)

-Al añadir nuevos usuarios al sistema, las prestaciones se degradan de manera suave, lo que no es posible en el sistema TDMA, en donde un nuevo usuario debería necesariamente interferir a alguno de los usuarios antiguos produciendo un cambio brusco en la calidad del servicio.

-Permite la coexistencia de sistemas analógicos en su misma banda, ya que la señal CDMA es vista por los sistemas analógicos como ruido, mientras que el sistema CDMA percibe la señal analógica como una interferencia de banda estrecha.

-Permite el aprovechamiento del factor de actividad vocal de forma natural, incrementando la capacidad del sistema [84].

1.1.4 OFDMA-Acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales

OFDMA es la forma de esquema de acceso múltiple que se está utilizando para la cuarta generación de tecnologías celulares junto con las evoluciones para los sistemas celulares de tercera generación. Como su nombre lo indica, OFDMA se basa en OFDM. Esta es una tecnología que utiliza un gran número de portadores espaciados cercanos.

OFDM: La división de frecuencias ortogonales multiplex, OFDM, es un formato de señal que utiliza un gran número de portadores espaciados cercanos, cada uno modulado con flujo de datos de baja tasa. Normalmente se espera que las señales espaciadas cercanas interfieran entre sí, pero al hacer las señales ortogonales (en relación de cada una con la siguiente) no hay interferencia mutua. Los datos que se transmiten se comparten entre todos los transportistas y esto proporciona resiliencia contra el desvanecimiento selectivo de los efectos de múltiples rutas.

Para utilizar OFDM como un esquema de multiplexado para la tecnología celular se utilizan dos métodos diferentes, uno para el enlace de subida de datos (*uplink*) y otro para el enlace de bajada (*downlink*). En el enlace de bajada, el dispositivo móvil recibe toda la señal transmitida por la estación base y extrae los datos destinados al móvil en particular. En el enlace de subida uno o más portadores son asignados a cada teléfono, dependiendo, por ejemplo, de los datos que se transmitirán. De esta manera la red celular es capaz de controlar cómo se envían y se reciben los datos.

OFDMA es un método que asigna diferentes grupos de subportadoras (en frecuencia) a diferentes usuarios; de esta manera más de un usuario puede acceder a la interfaz aérea al mismo tiempo (En OFDM todas las subportadoras se utilizan para transportar datos de un solo usuario; OFDM asigna todas las subportadoras a un solo usuario a la vez, y sólo un usuario puede transmitir, y si varios usuarios desean transmitir usando OFDM, deben tomar sus turnos en el tiempo).

En OFDMA, en lugar de asignar secuencialmente símbolos OFDM en tiempo para diferentes usuarios, el sistema asigna directamente subportadoras en frecuencia a los mismos.

Las subportadoras están espaciadas de modo que se superponen en frecuencia, pero son ortogonales porque un símbolo de datos se recupera en el pico de una subportadora. Los símbolos de datos pertenecientes a un usuario son transportados por subportadoras contiguas.

VENTAJAS:

- Posee una baja complejidad de modulación y una mejor eficiencia espectral.
- Puede aprovechar la diversidad de frecuencia a través de subportadoras distribuidas para un solo usuario.
- Puede aprovechar la diversidad multiusuario a través de subportadoras contiguas. El sistema puede mejorar el enlace de un usuario en particular asignándole un conjunto de subportadoras contiguas que experimentan la mejor condición del canal.
- Es eficaz para combatir la ISI (Interferencia entre símbolos).
- Puede ajustar la modulación y la codificación para cada subportadora.
- Tiene una ecualización simple.
- Tiene modulación de baja complejidad que se puede implementar utilizando IDFT/DFT (Y de manera más eficiente utilizando IFFT/FFT).
- Tiene mejor eficiencia espectral. [85]

1.1.5 NOMA-Acceso múltiple no ortogonal

El objeto de estudio de la presente tesis es el esquema de Acceso Múltiple No Ortogonal (*Non Orthogonal Multiple Access*), cuya idea fundamental es tanto aprovechar diferentes características de los esquemas antes mencionados, como utilizar otras características hasta antes no aprovechadas; mientras que en OFDMA las frecuencias son separadas ortogonalmente, es decir, cada subportadora mantiene una diferencia de 90° de diferencia con respecto a cada una de sus adyacentes, NOMA incluye a diferentes usuarios en la misma portadora o subportadora, separándolos mediante los niveles de potencia de sus señales.

Entonces, NOMA es un nuevo esquema de multiacceso que mejora la eficiencia del espectro mediante la utilización de un dominio adicional, el dominio de potencia, que no se ha utilizado suficientemente en los sistemas anteriores.

A diferencia de OMA (en OFDMA), donde la diferencia de ganancia de canal se traduce en ganancias de diversidad multiusuario a través de la programación de dominio de frecuencia, en NOMA la diferencia de ganancia de canal se traduce en ganancias de multiplexación al superponer en el dominio de potencia las señales de transmisión de múltiples usuarios de diferentes ganancias de canal. Al explotar la

diferencia de ganancia de canal en NOMA, los UE (*User Equipment*, equipos de usuarios) tanto de ganancia de canal alta como baja se encuentran en una situación de ganar-ganar. Además, la gran diferencia de potencia asignada a los usuarios del centro de la celda y del borde de la celda también facilita la decodificación exitosa de las señales designadas para ambos UE, al permitir el uso de receptores de complejidad relativamente baja en el lado del receptor. Por otro lado, la multiplexación de usuarios NOMA tiene el potencial de aumentar aún más la capacidad del sistema de una manera similar a la MIMO (*Multiple Input – Multiple Output*) multiusuario (MU-MIMO); esto se da incluso en el caso de que el número de antenas de transmisión y recepción sea el mismo, una característica muy atractiva para los escenarios de implementación con espacio limitado para la instalación de la antena; además, NOMA no depende en gran medida de conocer la información instantánea del estado de canal en el transmisor (CSI). De hecho, con NOMA, SIC (*successive interference cancellation*, cancelación de interferencia sucesiva) se utiliza en el receptor para la demultiplexación del usuario y en el transmisor, principalmente para decidir el emparejamiento del usuario y la asignación de energía de múltiples usuarios. Por lo tanto, se puede esperar una sólida ganancia de rendimiento en implementaciones prácticas de área amplia, independientemente de la movilidad del UE o la latencia de retroalimentación CSI [86].

1.2 Modulación de señales

En las tecnologías para la transmisión inalámbrica de información es necesario modular las señales por diferentes razones:

1) Si todos los usuarios transmiten a la frecuencia de la señal original o moduladora, no será posible reconocer la información contenida en dicha señal, debido a la interferencia entre las señales transmitidas por diferentes usuarios.

2) A altas frecuencias se tiene mayor eficiencia en la transmisión, de acuerdo con el medio que se emplee.

3) Se aprovecha mejor el espectro electromagnético, ya que permite la multiplexación por frecuencias.

4) Las antenas transreceptoras tienen medidas más razonables; para menores frecuencias se requieren mayores dimensiones [87].

5) Las señales digitales carecen de las características físicas adecuadas para su transmisión inalámbrica.

Para los esquemas de acceso multiusuario que se utilizan en telefonía celular se requiere que las señales digitales se encuentren moduladas adecuadamente, es decir, por su funcionamiento, cada esquema de acceso tiene necesidades específicas, por lo que no se utiliza la misma modulación para todos los esquemas. La estrategia de

modulación digital QPSK, cuya simulación fue desarrollada dentro de los trabajos realizados, y cuyo funcionamiento se explica con detalle en el capítulo 2 del presente trabajo, es una de las utilizadas en los sistemas actuales de comunicación inalámbrica, como LTE en 4G y 4.5G. Para NOMA se proponen nuevas estrategias de modulación que aún se encuentran bajo estudio, aunque se comprueba la conveniencia de la utilización de QPSK.

Concepto de modulación. Se denomina modulación a la operación mediante la cual ciertas características de una onda denominada portadora (señal periódica, que en la generalidad de los casos es seno o coseno) se modifican en función de otra onda denominada moduladora (señal generalmente no periódica), que contiene la información de interés, para que esta última pueda ser transmitida. Las características que se modifican pueden ser (principalmente) la amplitud, la frecuencia, la fase, o una combinación de dos de ellas.

Modulación analógica. En una modulación analógica, la señal moduladora es continua en el tiempo. En la figura 1.2 se ilustra, como ejemplo de un proceso de modulación analógica, una señal modulada en amplitud. Se aprecia claramente que cuando la moduladora tiene un valor alto, la amplitud de la señal es máxima, y cuando la moduladora tiene un valor bajo, la amplitud es mínima.

Modulación digital. Se describe la modulación digital como la acción de modificar, como ya se mencionó, algún parámetro de la onda alterna portadora, pero de modo que codifique la variación de una señal moduladora discreta con valores binarios (que por su naturaleza carece de las características apropiadas para ser transmitida en el espacio). En la figura 1.3 se muestra un ejemplo del proceso de modulación de una señal digital, en la que ésta se modula en fase; esto significa que la fase de la portadora cambiará con los cambios de valor de la señal binaria moduladora. En particular, la técnica ilustrada en este ejemplo se denomina QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), que se distingue por contar con cuatro valores posibles de fase (se pueden apreciar los cambios de fase de la señal ya modulada). Cada segmento de señal comprendido dentro de cada tiempo de bit se denomina *símbolo*; con esta notación, los símbolos entregados por un modulador QPSK son llamados *Símbolos QPSK*.

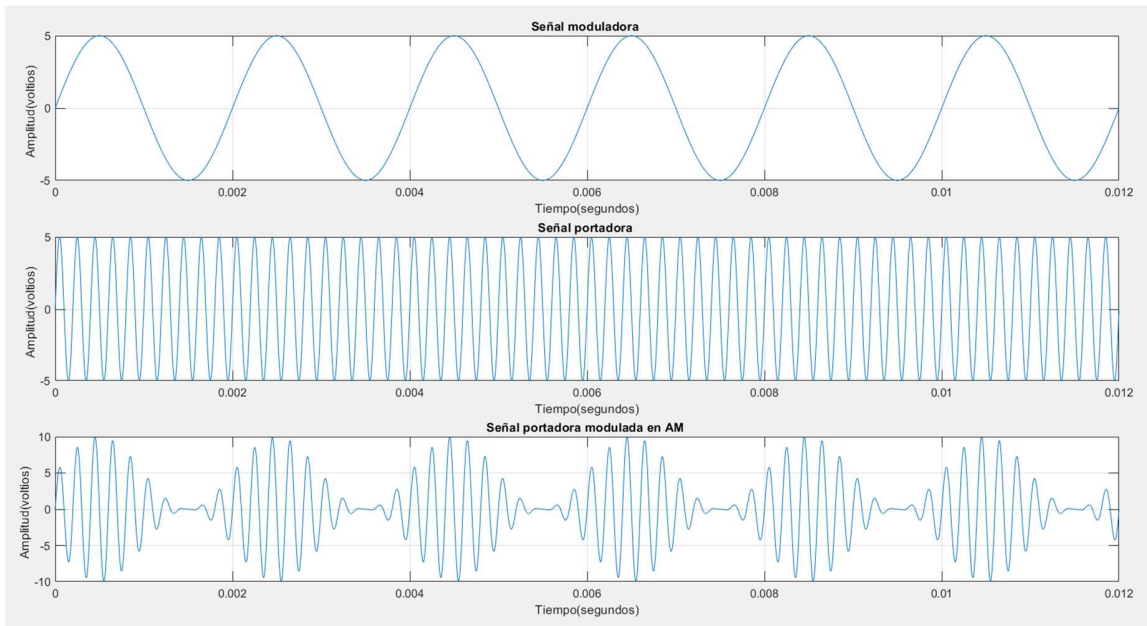


Figura 1.2. Ejemplo de una señal analógica modulada en amplitud.

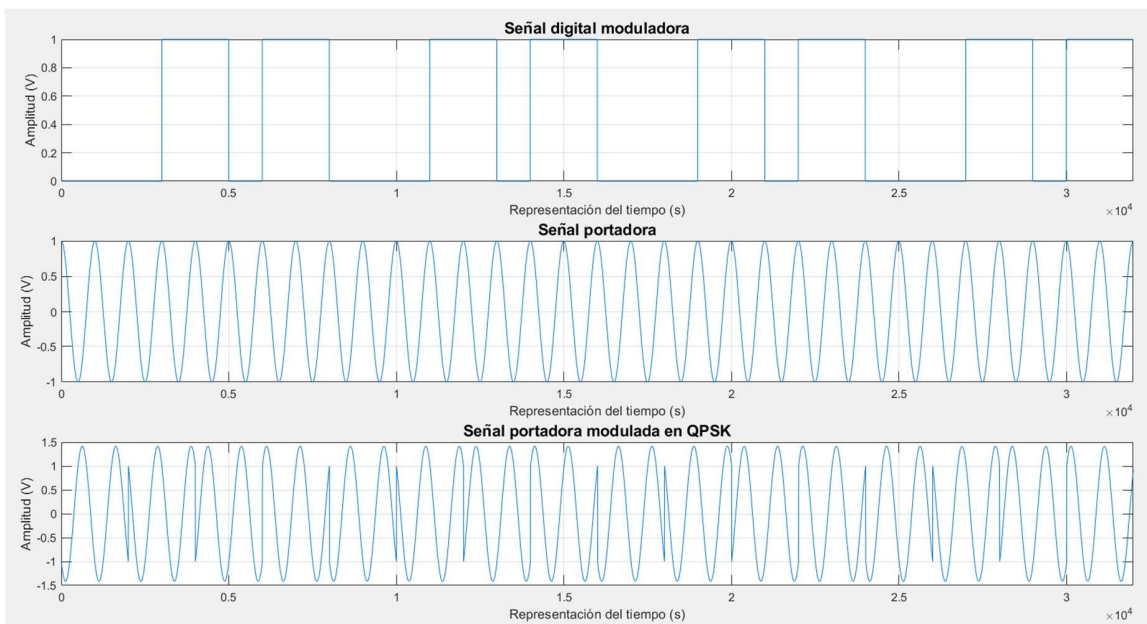


Figura 1.3. Ejemplo de una señal digital modulada en cuadratura de fase (QPSK).

La modulación está presente en prácticamente cualquier transmisión inalámbrica. Todos los esquemas de acceso en telefonía celular implican una adecuada estrategia de modulación, sin la cual las transmisiones inalámbricas se verían enormemente limitadas.

CAPÍTULO 2

Modelado y simulación del sistema

En este capítulo se explica el funcionamiento básico de un esquema de acceso NOMA de enlace descendente para dos usuarios, así como su modelo matemático. También se describe el trabajo de simulación de un modulador QPSK, representando una transmisión y recepción de voz para un usuario. Posteriormente se describe la simulación de un sistema de transmisión y recepción en enlace descendente para dos usuarios, utilizando la estrategia de modulación QPSK y el esquema de acceso NOMA. En ésta última simulación se considera también la etapa de recepción por parte de los usuarios, con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento del sistema de transmisión.

2.1. Descripción y modelado matemático de un sistema NOMA de enlace descendente para dos usuarios

Modelar matemáticamente un sistema de transmisión NOMA específico y construir su diagrama de bloques para describirlo requiere del planteamiento hipotético y el análisis de un esquema de transmisión-recepción; en el modelo que se plantea en el presente trabajo se considera un sistema compuesto por una estación base (BS) y dos usuarios, como se muestra en la figura 2.1. En dicho ejemplo, en los receptores se separan los enlaces mediante el procedimiento de cancelación de interferencia sucesiva (SIC).

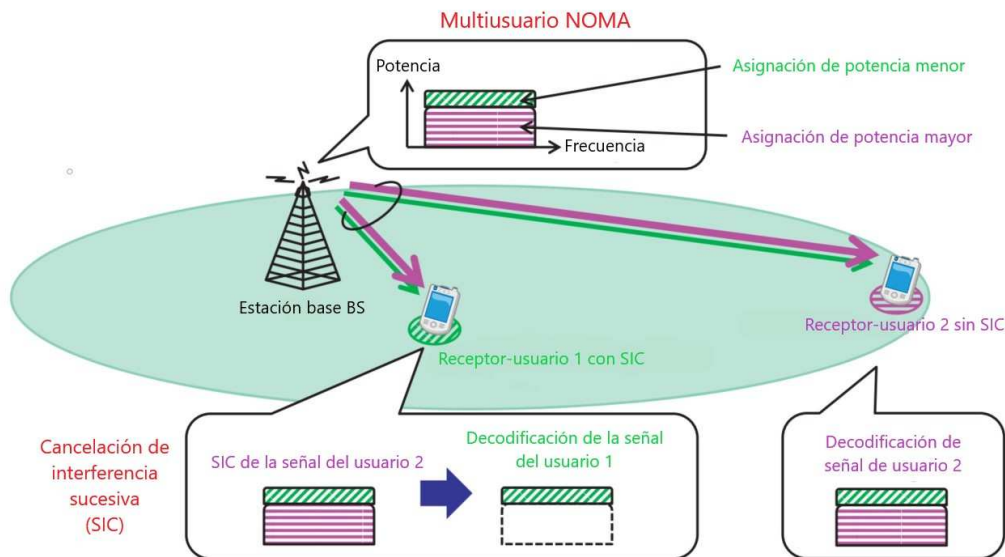


Figura 2.1. Ilustración de NOMA de enlace descendente (transmisión de datos desde la BS) para dos usuarios. Basada en [88].

Con NOMA, la misma estación base puede atender simultáneamente a múltiples usuarios utilizando el mismo canal de frecuencia y/o la misma ranura de tiempo, asignando diferentes potencias de transmisión a los usuarios y aplicando la cancelación de interferencia sucesiva (SIC) en el lado del receptor.

Para ilustrar mejor el concepto de NOMA y SIC, tomamos como ejemplo entonces la transmisión de enlace descendente de NOMA con dos usuarios. Como se muestra en la figura 2.1, la estación base (BS) puede atender a los dos usuarios a igual tiempo/frecuencia, pero con diferentes niveles de potencia. Específicamente, la BS enviará una mezcla superpuesta que contiene los dos mensajes para los dos usuarios, respectivamente.

Particularmente en un sistema NOMA, al mensaje para el usuario con la condición de canal más débil (en este caso, el usuario lejano) se le asigna mayor potencia de transmisión, lo que garantiza que este usuario pueda detectar su correspondiente mensaje directamente al tratar la información del otro usuario como ruido. Por otro lado, el usuario con la condición de canal más fuerte (en este caso, el usuario cercano, al cual se asigna menor potencia de transmisión) necesita detectar primero el mensaje destinado al otro usuario, luego resta este mensaje de su área de observación y finalmente decodifica su propia información. Este procedimiento se llama SIC (*Successive Interference Cancellation* o Cancelación de interferencia sucesiva) [89].

Dicho de otro modo: si hay un usuario de alta ganancia de canal (por conveniencia, este usuario cercano se denomina usuario 1) y otro usuario de baja ganancia de canal (este usuario lejano se denomina usuario 2), la estación base (BS) puede transmitir las dos señales correspondientes a los dos usuarios simultáneamente en la misma banda de frecuencia y/o mismo intervalo de tiempo. La BS generalmente asigna una potencia de transmisión alta al usuario 2 y una potencia de transmisión baja al usuario 1. A partir de esto, en el usuario 1, la señal que es para el usuario 2 puede ya ser decodificable. Por lo tanto, el usuario 1 decodifica primero la señal destinada al usuario 2 y la resta de su área de operación, y luego decodifica su propia señal. En el usuario 2, su señal puede decodificarse sin interferencia significativa de la señal destinada al usuario 1, ya que ésta última podría ser débil y puede ser tomada como ruido. Claramente, en NOMA, al hacer uso de la cancelación de interferencia sucesiva (SIC), es posible lograr una mayor eficiencia espectral que en un acceso múltiple ortogonal (como OFDMA) [90].

Determinación del modelo matemático del sistema propuesto. En la estación base se genera o se procesa la información digitalizada destinada a cada usuario y se hace pasar por el modulador correspondiente antes de ser transmitida. Matemáticamente es necesario determinar el principio y el fin de un símbolo de modulación con respecto al tiempo (asignando intervalos de tiempo), además de que, para efectos de determinación de ganancia de canal, deberá conocerse la distancia entre la estación base y cada uno de los usuarios (la cual se propone en el presente trabajo).

Si se toma en cuenta la distancia entre cada usuario y la estación base para determinar la ganancia de canal, en el presente planteamiento de un sistema NOMA (al considerarse dos usuarios), éstos se denotan como u_f (usuario *farthest* o más lejano) y u_n (usuario *nearest* o más cercano). La estación base realiza la emisión con una determinada potencia general de transmisión P_S , que, a su vez, para cada usuario, es multiplicada por los coeficientes de asignación de potencia α_f y α_n , respectivamente.

Cada uno de los productos se aplica como factor multiplicativo a cada señal correspondiente s_f y s_n . De este modo se desarrolla un esquema NOMA para servir a los usuarios u_f y u_n , y $s_{f,i}$ y $s_{n,i}$ denotan los i -ésimos símbolos transmitidos a los usuarios u_f y u_n , respectivamente. Sea y la señal total transmitida por la estación base, y $y_{v,i}$ los símbolos enviados que recibirán ambos usuarios. Por lo tanto, tenemos:

$$y_{v,i} = \alpha_f P_S(s_{f,i}) + \alpha_n P_S(s_{n,i}) \quad (1)$$

De este modo, la señal total emitida por la estación base estará dada por (1), en donde $v \in \{f, n\}$.

Una vez obtenido el modelo matemático general de la señal emitida por la estación base, para poder expresar correctamente la señal que reciben los usuarios, en el presente trabajo se toman en cuenta tres situaciones: la atenuación de la señal, en la que se toman en cuenta un factor multiplicativo de desvanecimiento por trayectorias múltiples h_v (*fast fading*) y un factor de pérdida por trayectoria (*shadowing* o *slow fading*) (que depende de la distancia del usuario correspondiente a la estación base) $\ell(r_v)$, $v \in \{f, n\}$ de la señal emitida, y un ruido aditivo (ruido blanco Gaussiano) $z_{v,i}$, $v \in \{f, n\}$, el cual se suma a cada uno de los símbolos transmitidos [91]. El desvanecimiento por trayectorias múltiples y la pérdida por trayectoria están implícitos en la transmisión inalámbrica; son fenómenos naturales que afectan a las señales transmitidas, mientras que el ruido aditivo existe en el aire. Dado que los usuarios se encuentran a diferentes distancias de la estación base, los fenómenos mencionados afectan la recepción de la señal de manera distinta a cada uno, por lo tanto, se aplican de manera individual a cada usuario. Ahora se tiene:

$$x_{n,i} = [\alpha_f P_S(s_{f,i}) + \alpha_n P_S(s_{n,i})] h_n \ell(r_n) + z_n \quad (2)$$

$$x_{f,i} = [\alpha_f P_S(s_{f,i}) + \alpha_n P_S(s_{n,i})] h_f \ell(r_f) + z_f \quad (3)$$

Entonces, la señal total x_n que recibe el usuario 1 está dada por (2), mientras que la señal total x_f que recibe el usuario 2 está dada por (3).

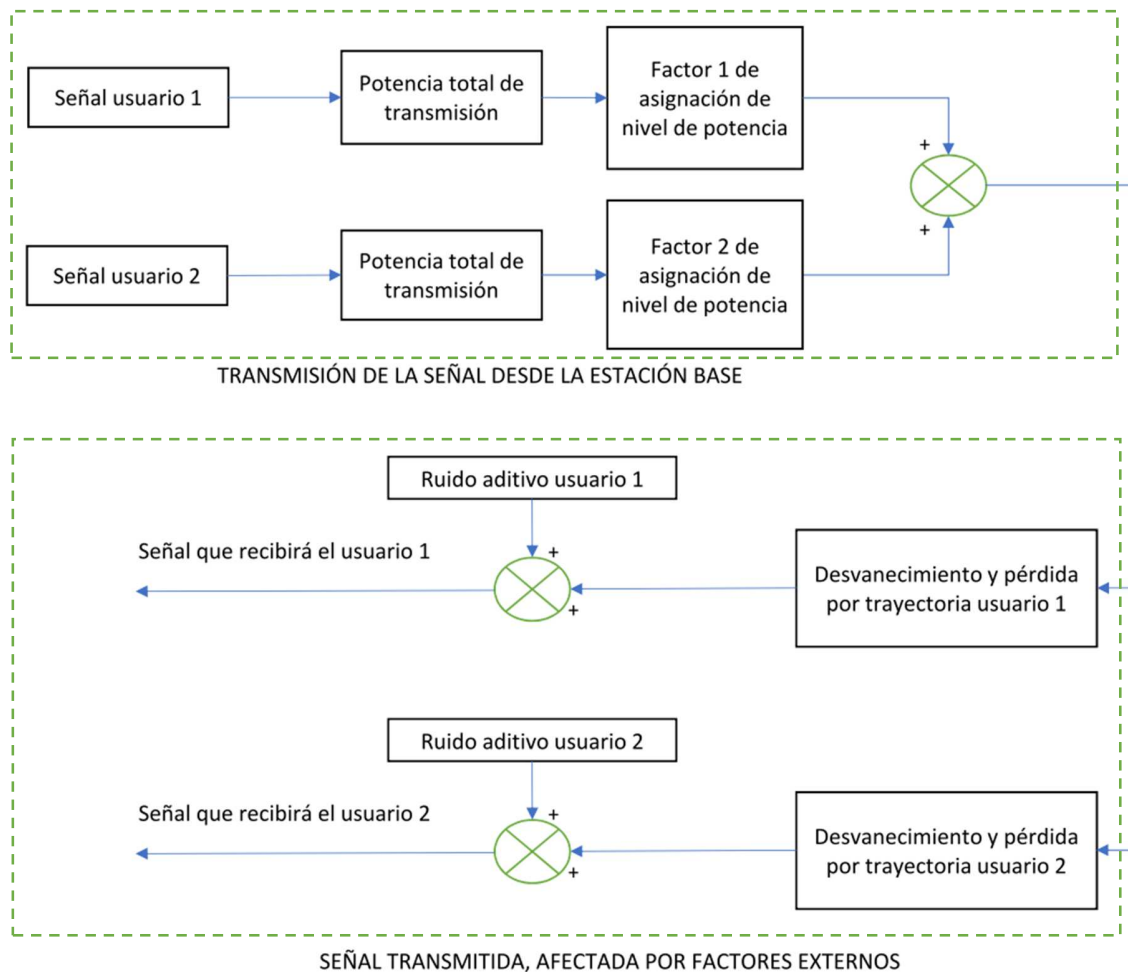


Figura 2.2. Diagrama de bloques propuesto de un sistema de transmisión con esquema de acceso NOMA para dos usuarios.

En la figura 2.2 se muestra el diagrama de bloques de este proceso general propuesto para el sistema de acceso NOMA para dos usuarios. En él se observa el ejemplo del acceso de usuarios 1 y 2. Como se ha descrito anteriormente, la señal de cada usuario es sometida a un factor multiplicativo común de potencia total de transmisión, para posteriormente ser multiplicada por su propio factor de asignación de potencia. Ambas señales, ya con sus niveles de potencia definidos, se suman y se emiten. En la simulación se considera, de manera individual para cada usuario, el desvanecimiento por trayectorias múltiples y la pérdida por trayectoria, así como el ruido blanco Gaussiano aditivo.

Por lo tanto, es de gran importancia aclarar que ambos usuarios reciben la misma señal, dado que en el esquema NOMA la información de ambos fue modulada y

sumada; se menciona a la “señal recibida por el usuario 1” y a la “señal recibida por el usuario 2” porque la misma señal fue afectada de diferente manera por los factores de desvanecimiento y por el ruido; la estación base emite una sola señal, pero ésta no llega igual a los dos usuarios porque sus distancias a la estación base son distintas.

2.2 Simulación de un modulador QPSK en MATLAB

La simulación de un modulador digital QPSK realizada y descrita en el presente capítulo se lleva a cabo sobre un proceso simulado de transmisión y recepción de una señal de voz. En dicho proceso se entrega al modulador la señal digitalizada de voz, con lo cual se simuló una transmisión inalámbrica con modulación digital. El modulador recibe la señal digitalizada y la transforma, la entrega, y es recibida por el demodulador, mismo que reconstruye la señal digital recibida y a su vez la entrega al receptor para que reconstruya la señal original.

En la técnica utilizada para la modulación se modifica y divide la fase de la señal portadora en 4 valores distintos, espaciados 90° cada uno con respecto al anterior, de manera que tenemos 4 valores de fase en cuadratura. De lo anterior proviene el nombre de esta técnica: Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), que se entiende como la modulación de fase en cuadratura, lo que da una capacidad de modulación de valores binarios de dos bits simultáneamente (que dan, a su vez, 4 posibilidades de valores binarios distintos de la señal de entrada). En esta simulación se llevó al cabo dicha modulación y se muestran las señales portadoras ya moduladas en fase y en cuadratura, además de la suma de ambas, lo que da como resultado la gráfica de la señal ya modulada en QPSK.

En la figura 2.3 se muestra la señal de voz capturada, mientras que en la figura 2.4 se muestra la señal digitalizada tal como la entrega el transmisor digital.

Modulador QPSK. La señal entregada por el transmisor digital consiste en una matriz de 40,000 filas por 8 columnas de valores binarios (correspondientes a 40,000 muestras de la señal analógica original, de 8 bits cada muestra). El modulador QPSK requiere un solo vector de valores contiguos, por lo que fue necesario alinear dichos valores en una sola columna. La figura 2.5 muestra los valores en tiempo (una secuencia de 320,000 bits con valores 1 y 0), correspondientes a dicho vector columna, mismos que son entregados a la entrada del modulador QPSK.

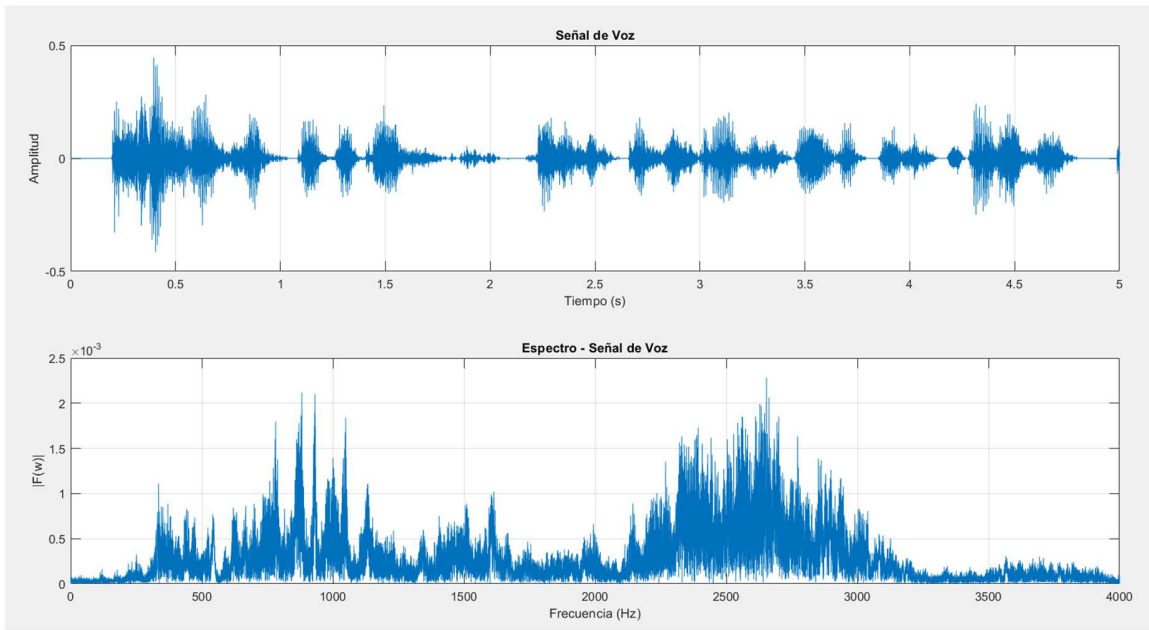


Figura 2.3. Representación en tiempo y frecuencia de la señal capturada.

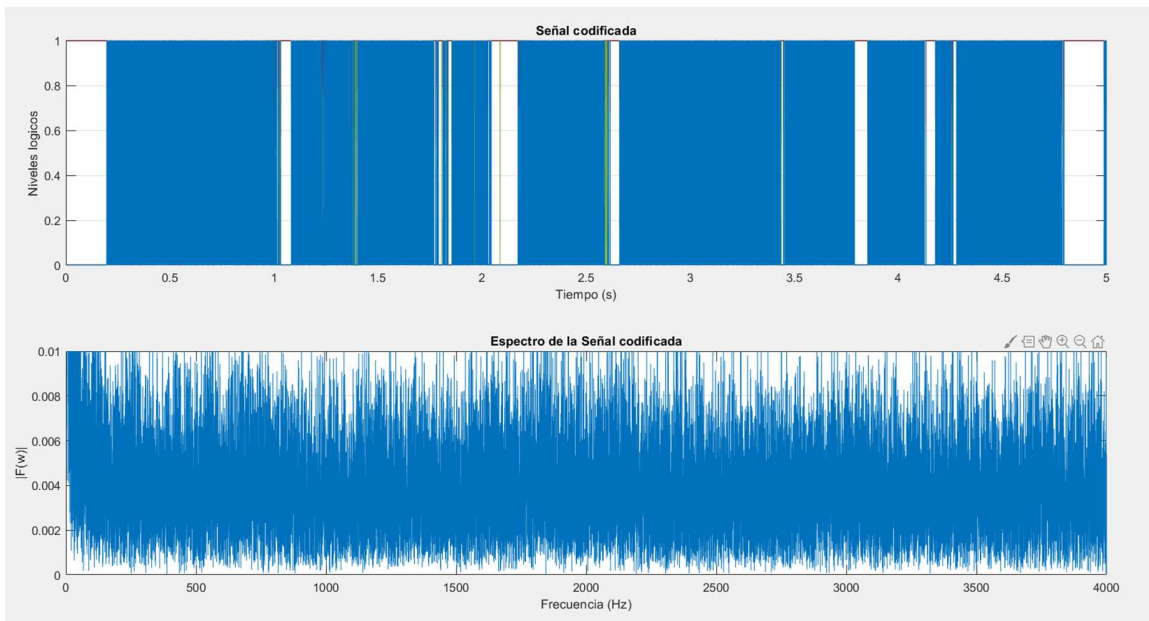


Figura 2.4. Señal digitalizada, representada por series de 0's y 1's.

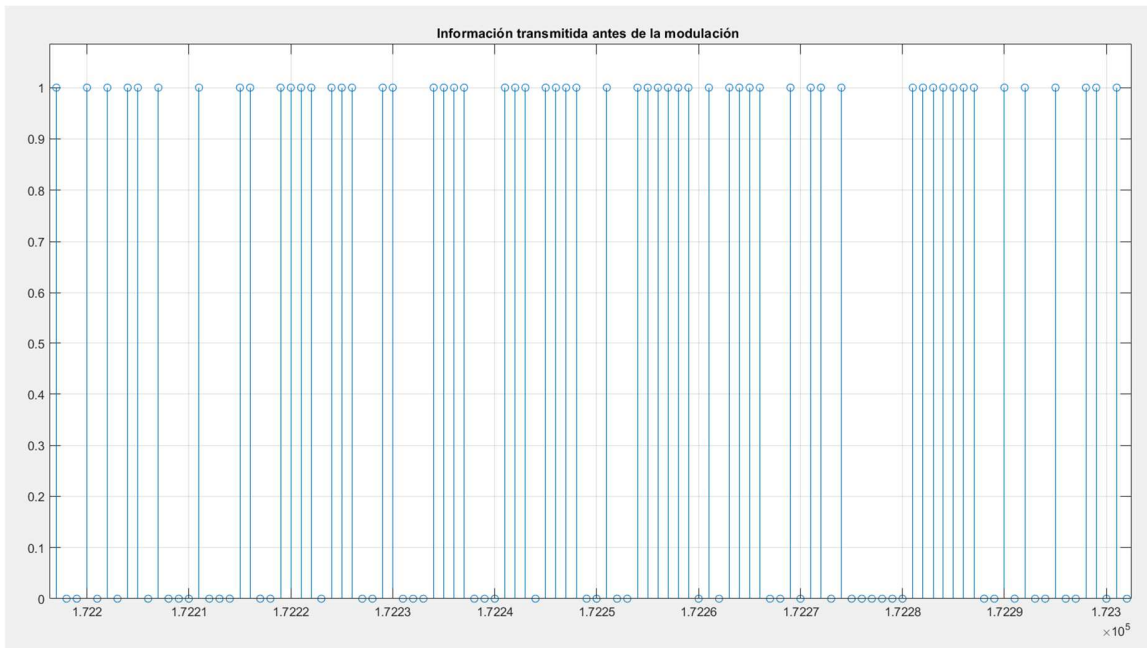


Figura 2.5. Información transmitida antes de la modulación (acercamiento).

La figura 2.6 muestra el diagrama de bloques del modulador QPSK, en el cual se indican los elementos que lo forman. El modulador lleva a cabo el proceso con dos bits a la vez, de manera que ambos se sincronizan en el divisor de bits; después de haber entrado dos bits, uno detrás del otro (en serie), ambos salen en forma simultánea (en paralelo). Un bit se dirige a la rama I (fase) y el otro a la rama Q (cuadratura).

Las salidas de las ramas I y Q dependerán del valor binario de cada bit de entrada. Cuando el bit de entrada tenga un valor binario "1", la rama correspondiente entregará un valor de voltaje de 1V, mientras que cuando el bit tenga un valor binario "0", la rama correspondiente entregará un valor de voltaje de -1V.

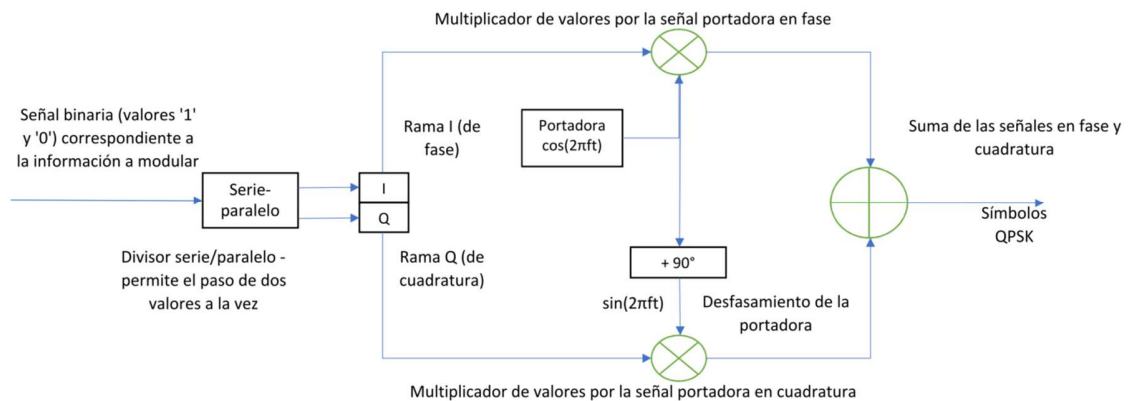


Figura 2.6. Diagrama de bloques del modulador QPSK.

Al hacer pasar cada bit por su correspondiente multiplicador, el bit en I modula a la portadora en fase, mientras que el bit en Q modula la portadora luego de desfasarla 90° . Ésta es la razón por la que al canal Q se le llama “de cuadratura”. Dependiendo del valor del correspondiente bit de entrada, en el multiplicador de la rama I (fase) se tienen dos posibilidades a la salida: $\cos(2\pi ft)$ o $-\cos(2\pi ft)$; de manera similar, dependiendo del valor del correspondiente bit de entrada, en el multiplicador de la rama Q (cuadratura) se tienen dos posibilidades a la salida: $\sin(2\pi ft)$ o $-\sin(2\pi ft)$.

Finalmente, cuando el sumador combina las dos señales (fase y cuadratura), hay cuatro posibles símbolos resultantes, definidos por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} QPSK &= +\sin(2\pi ft) + \cos(2\pi ft) \text{ cuando la entrada es 11,} \\ QPSK &= -\sin(2\pi ft) + \cos(2\pi ft) \text{ cuando la entrada es 10,} \\ QPSK &= +\sin(2\pi ft) - \cos(2\pi ft) \text{ cuando la entrada es 01, y} \\ QPSK &= -\sin(2\pi ft) - \cos(2\pi ft) \text{ cuando la entrada es 00.} \end{aligned}$$

Por conveniencia, todas las funciones tienen amplitud unitaria.

El resultado es una señal senoidal cuya fase cambia cada determinado tiempo (tiempo que corresponde a la duración de cada par de bits de la señal entrante); cada uno de los cambios de fase corresponde al valor binario de cada par de los bits entrantes. En la figura 2.7 se muestran las gráficas que representan un fragmento de las señales en fase y en cuadratura (en color azul), y la suma de ambas (en color rojo). Dicha suma representa la señal modulada, cuyos cambios de fase corresponden a la información que se desea transmitir. La figura 2.8 indica un acercamiento (zoom) que se realizó de las tres gráficas anteriores, con el fin de apreciar mejor las formas de onda.

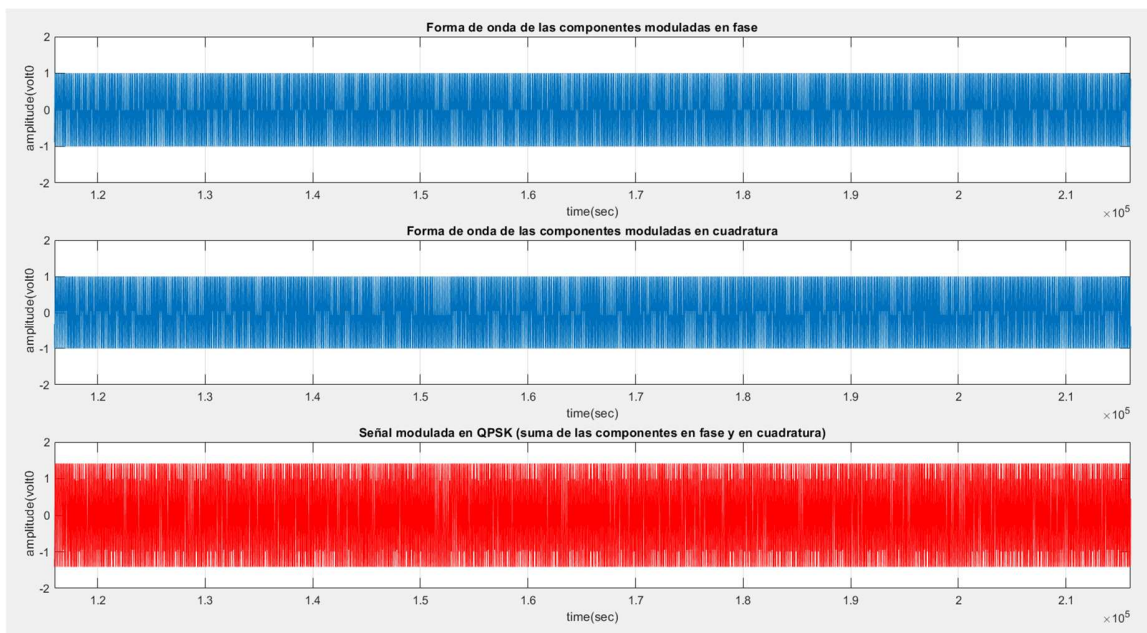


Figura 2.7. Modulación en fase, en cuadratura y la suma de ambas, que es la señal entregada por el modulador QPSK.

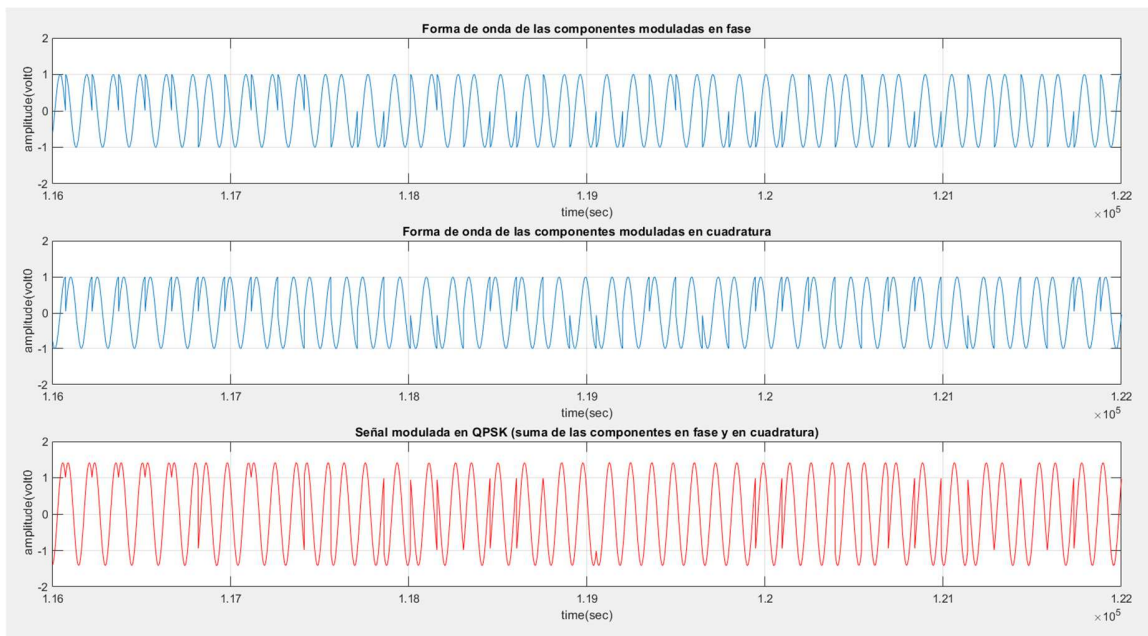


Figura 2.8. Acercamiento de las gráficas de la figura 5.

Demodulador QPSK. Una vez que la señal ha sido modulada se simula su transmisión, entregándola a la entrada del demodulador; la figura 2.9 muestra su diagrama de bloques.

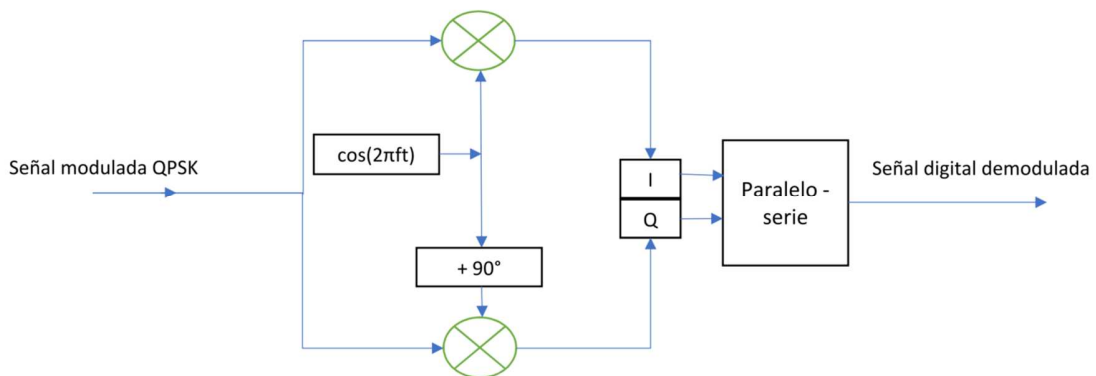


Figura 2.9. Diagrama a bloques del demodulador QPSK.

Para la demodulación de una señal QPSK se requiere recuperar las componentes de las ramas I y Q. Para ello, en el algoritmo utilizado se multiplica (mezcla) la señal QPSK por una portadora en fase y por otra en cuadratura. De esta multiplicación se obtienen valores numéricos que son aplicados a bloques de decisión (o función de activación); en cada resultado, si el valor aplicado es mayor que 0, la salida del bloque será 1, mientras que, si el valor aplicado es 0, la salida del bloque será 0. Lo anterior permite recuperar los datos digitales entregados (dos a la vez en paralelo) por el canal I y por el canal Q.

Posteriormente los pares de valores son aplicados a un convertidor paralelo-serie, el cual entregará la señal como una serie de pulsos que deberá ser idéntica a la señal entregada al modulador por parte del digitalizador de señal. La figura 2.10 muestra la señal entregada por el demodulador.

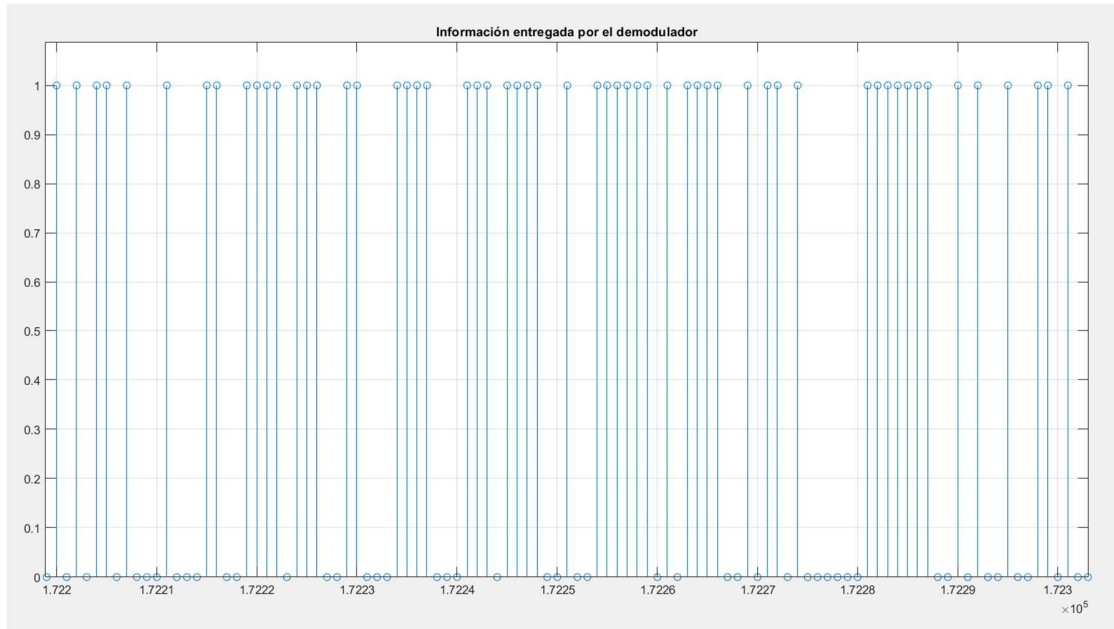


Figura 2.10. Señal entregada por el demodulador (acercamiento).

Ya entregada la señal, se lleva a cabo el proceso de reconstrucción de la señal, que consiste en revertir las etapas del digitalizador, tras lo cual se entrega la señal original ya reconstruida. El proceso se ilustra en la figura 2.11 que muestra la gráfica de la señal de voz tal como se obtuvo en la captura original.

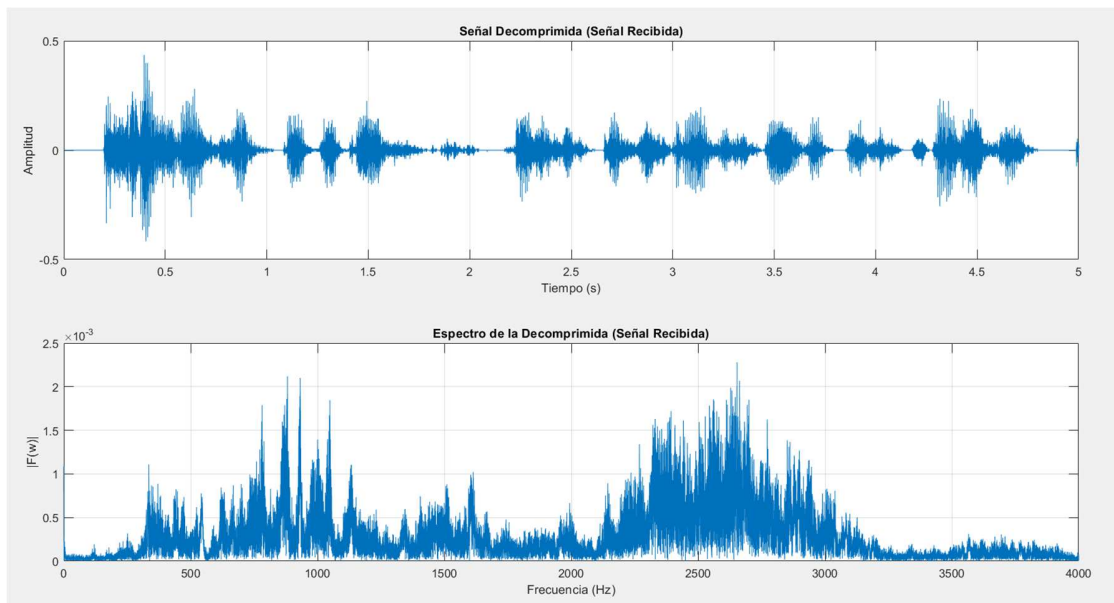


Figura 2.11. Señal entregada por el demodulador, ya decodificada.

Las señales entregadas por un modulador digital son llamadas **símbolos**; en este caso, los símbolos entregados son **símbolos QPSK**.

El modulador QPSK es uno de los principalmente utilizados para el esquema de acceso OFDMA, el cual, a su vez, es el más utilizado en la telefonía celular actual (4G y 4.5G); para NOMA se han propuesto otras estrategias de modulación, por lo cual surge la necesidad de estudiar con detalle las mismas, además de las actuales como QPSK, con el fin de conocer su funcionamiento y determinar la más adecuada. Lo anterior se relaciona directamente con el diseño del sistema NOMA que se propone en el presente trabajo.

Dado que un esquema de acceso NOMA lleva a cabo la separación entre usuarios distinguiendo sus niveles de potencia, el modulador QPSK es una opción adecuada para tal fin, ya que no modifica la frecuencia ni la amplitud de la señal, lo que le da mucha robustez para el objetivo que se persigue.

2.3. Simulación en MATLAB de un esquema de acceso NOMA para dos usuarios

En el presente trabajo se considera el uso de la estrategia de modulación QPSK para un esquema NOMA. Se lleva a cabo la correspondiente simulación en MATLAB, con lo cual se obtiene una representación gráfica de lo que sucede con las señales de ambos usuarios tanto en el proceso de transmisión como en el proceso de recepción.

La etapa de transmisión que se simula en el presente capítulo es la representada en el diagrama de bloques general de la figura 2.12, incluyendo ahora la señal digital y la modulación QPSK de cada usuario.

Para la simulación en MATLAB se utilizan señales de voz, aunque en la práctica puede ser cualquier elemento digitalizado (texto, voz, datos, imagen, video, etc.); por esta razón, en el diagrama de bloques correspondiente el sistema se representa de manera general a partir de la señal digital correspondiente a la información de cada usuario. La figura 2.13 representa la captura de la señal de voz del usuario 1, tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, mientras que la figura 2.14 muestra lo propio para el usuario 2.

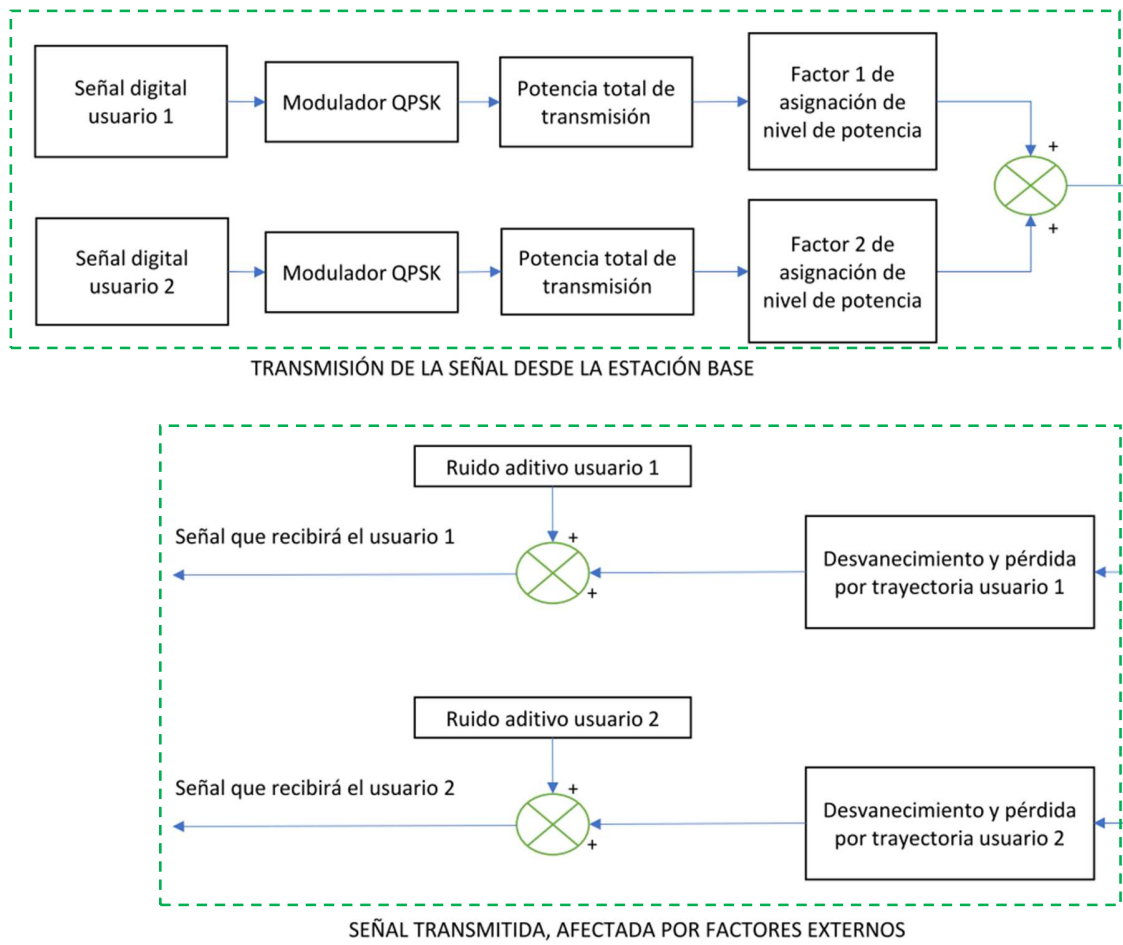


Figura 2.12. Diagrama de bloques, mencionando la señal digital y la modulación QPSK para cada usuario.

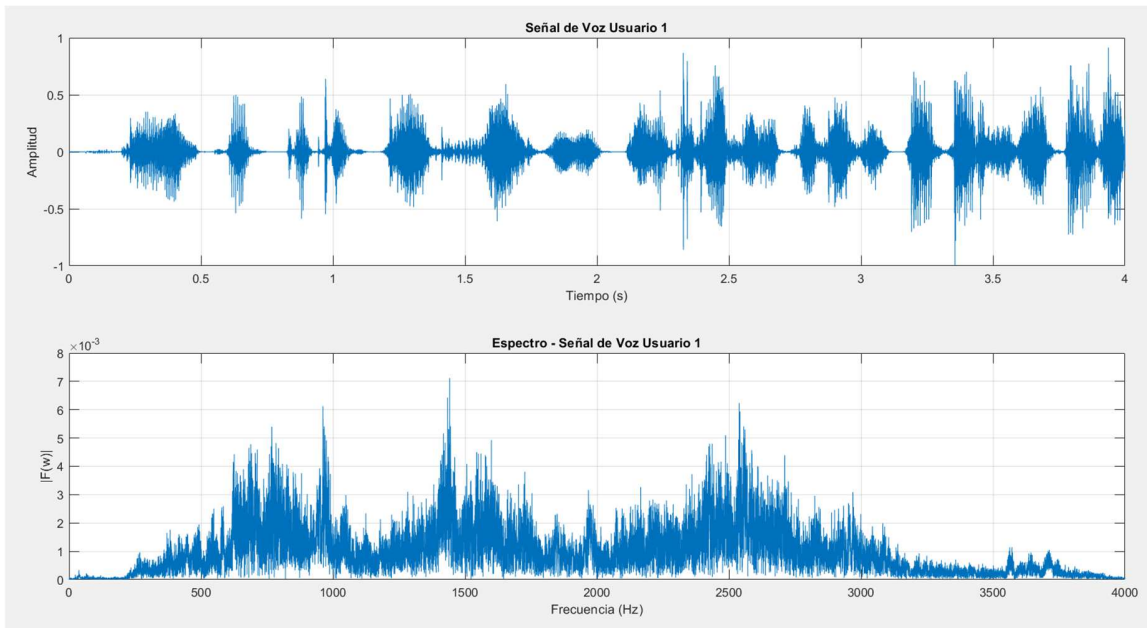


Figura 2.13. Señal de voz del usuario 1, representada en tiempo y frecuencia.

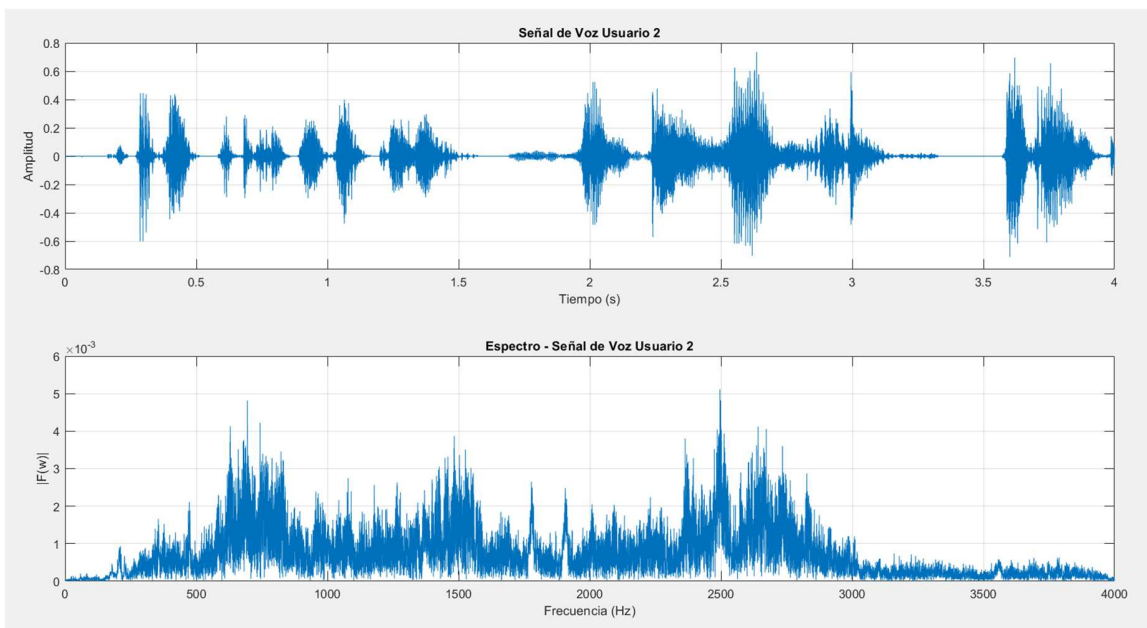


Figura 2.14. Señal de voz del usuario 2, representada en tiempo y frecuencia.

En la figura 2.15 se muestra la secuencia de bits de la señal de usuario 1 ya digitalizada, así como su posterior modulación QPSK; la figura 2.16 muestra lo propio para el usuario 2. Ambas señales se ilustran en la figura 2.17.

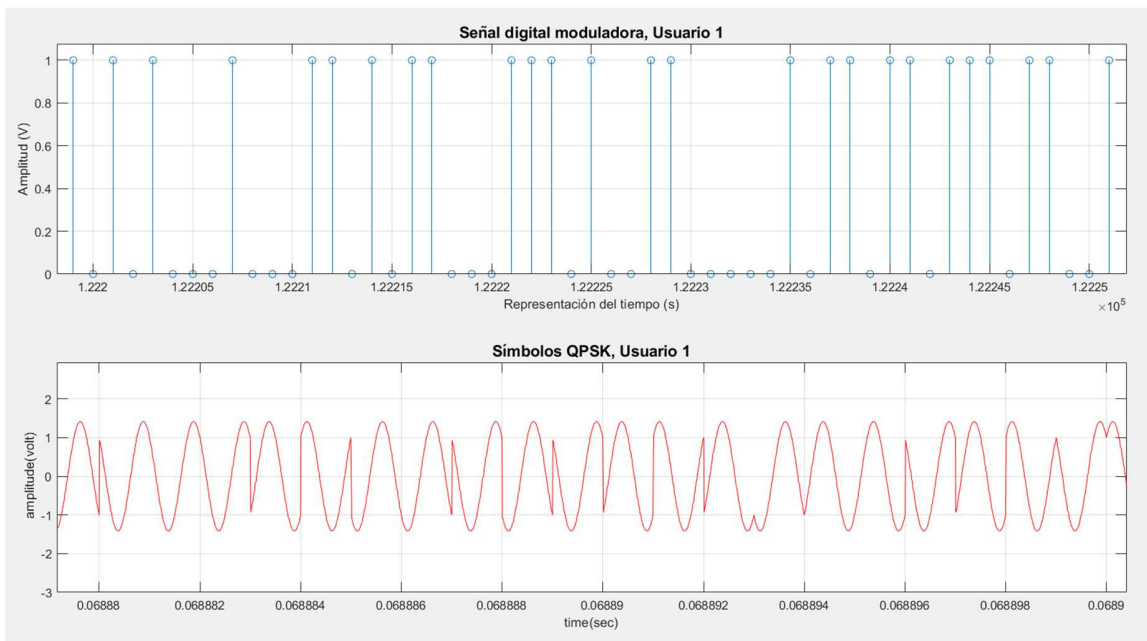


Figura 2.15. Fragmento de la señal de usuario 1 digitalizada y modulada en QPSK.

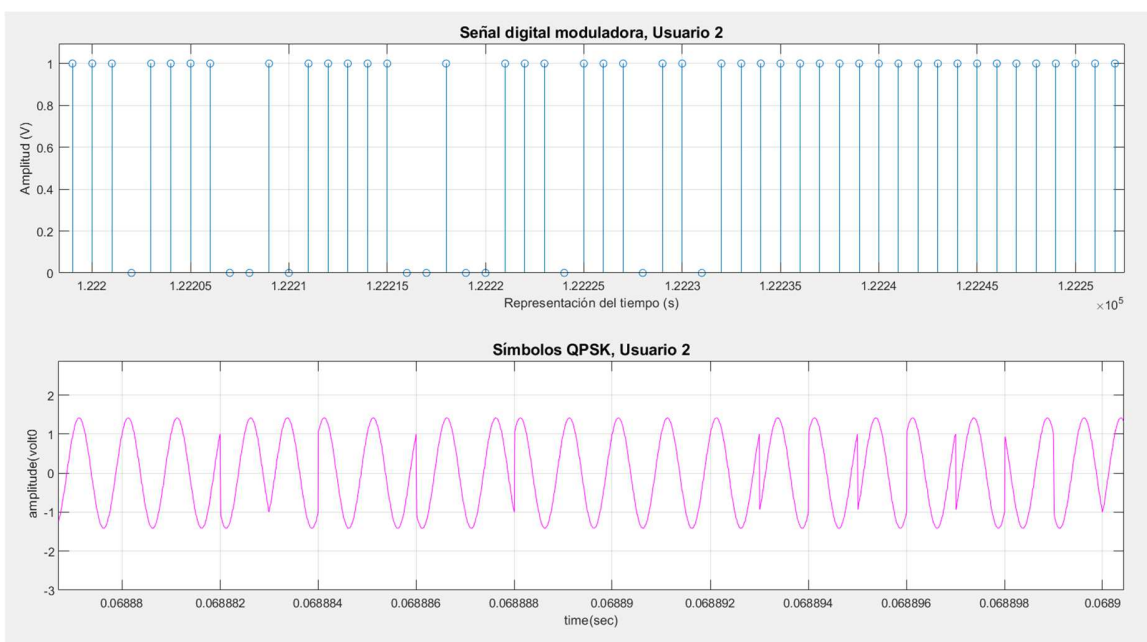


Figura 2.16. Fragmento de la señal de usuario 2 digitalizada y modulada en QPSK.

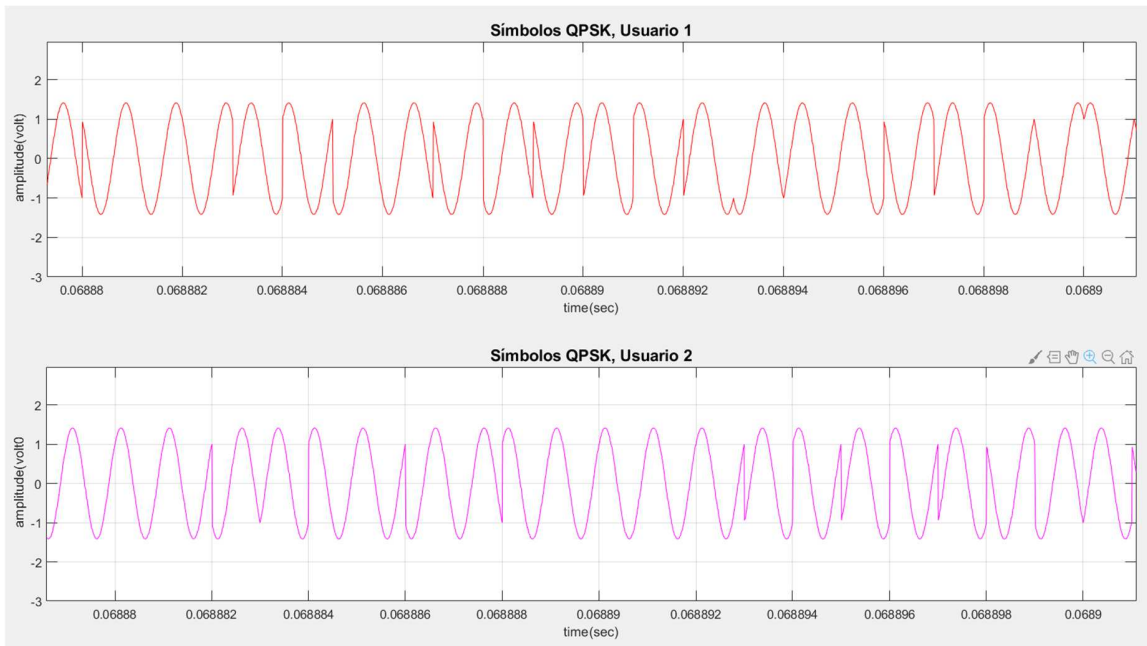


Figura 2.17. Fragmento de las señales de ambos usuarios moduladas en QPSK.

Para propósitos de simulación, y por conveniencia, la potencia asignada de transmisión de la estación base se propone unitaria. Se aplican los coeficientes de asignación de potencia para cada usuario; en el presente trabajo, el usuario cercano es el usuario 1, y el usuario lejano es el usuario 2, por lo que a este último se le asigna el mayor nivel de potencia con respecto al usuario 1; esto se encuentra ilustrado en la figura 2.18, en la que se muestran ambas señales.

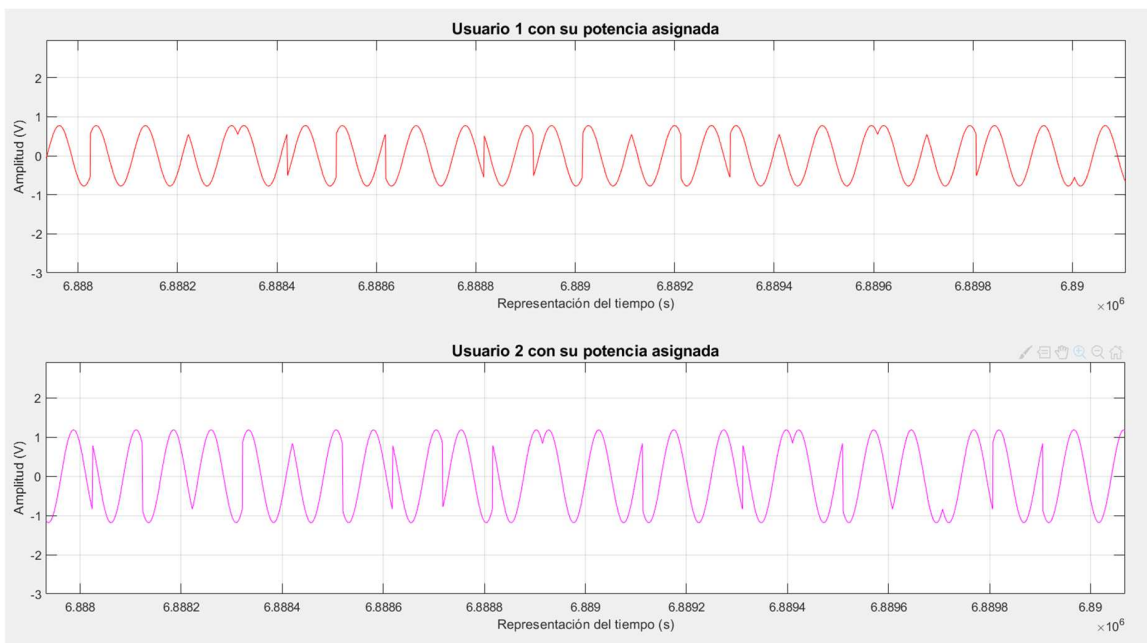


Figura 2.18. Señales de ambos usuarios con su asignación de potencia.

Ahora se suman las dos señales, lo que representa propiamente el esquema de acceso NOMA, en el cual se superponen las señales de ambos usuarios y se transmite una sola señal. Ésta es la señal transmitida por la estación base. En este punto finaliza la etapa de transmisión y la señal se encuentra en el medio correspondiente. Ambas señales y su suma están ilustradas en la figura 2.19.

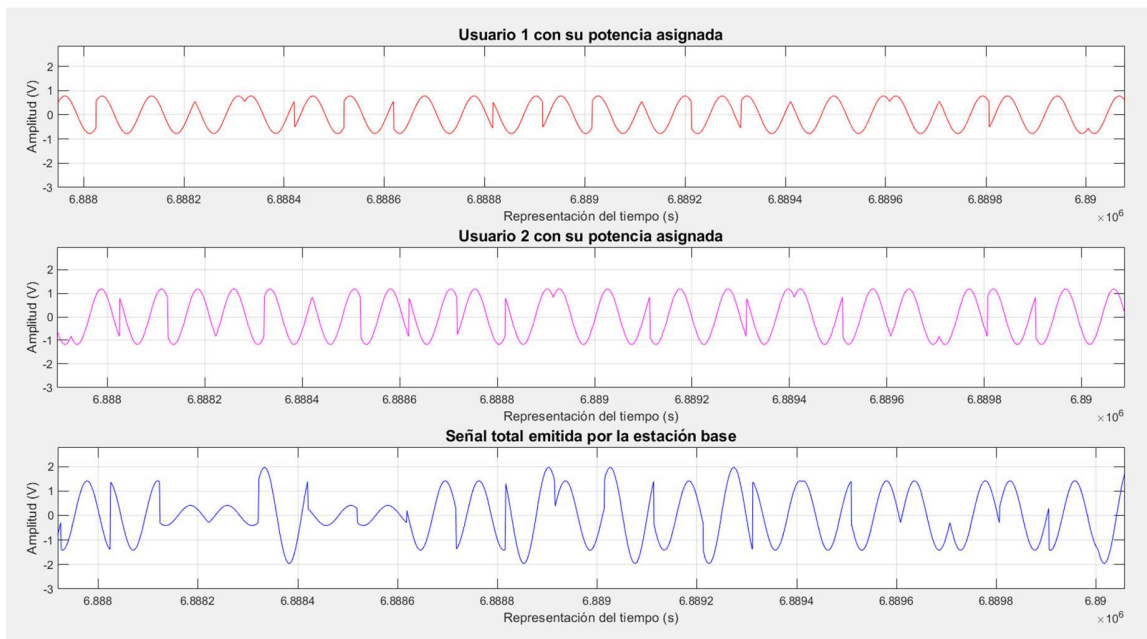


Figura 2.19. Señales de ambos usuarios y señal total emitida por la estación base.

Al encontrarse cada usuario ubicado a una distancia particular de la estación base, a la señal resultante, una vez transmitida, le afectan los factores de deformación y de ruido (pérdida por trayectoria, desvanecimiento y ruido blanco Gaussiano) de manera individual para cada uno.

La figura 2.20 ilustra, en la gráfica superior, la señal tal y como fue emitida por la estación base, mientras que en la gráfica inferior se muestra el efecto de la pérdida por trayectoria de la señal. En la figura 2.21 se muestra, en la gráfica superior, la señal afectada por la pérdida por trayectoria, y la gráfica inferior muestra el efecto tanto de la pérdida por trayectoria como también del desvanecimiento. La figura 2.22 muestra en su gráfica superior, nuevamente, el efecto tanto de la pérdida por trayectoria como también del desvanecimiento, en tanto que la gráfica inferior muestra la señal afectada por la pérdida por trayectoria, el desvanecimiento, y también el ruido blanco aditivo. Estos tres fenómenos quedan ilustrados para la distancia propuesta del usuario 1 a la estación base. El efecto de la pérdida por trayectoria, el desvanecimiento y el ruido blanco aditivo correspondientes a la distancia propuesta del usuario 2 a la estación base se representa en las figuras 2.23, 2.24 y 2.25. El ruido blanco provoca deformación en

la señal, mientras que la pérdida por trayectoria y el desvanecimiento afectan su amplitud.

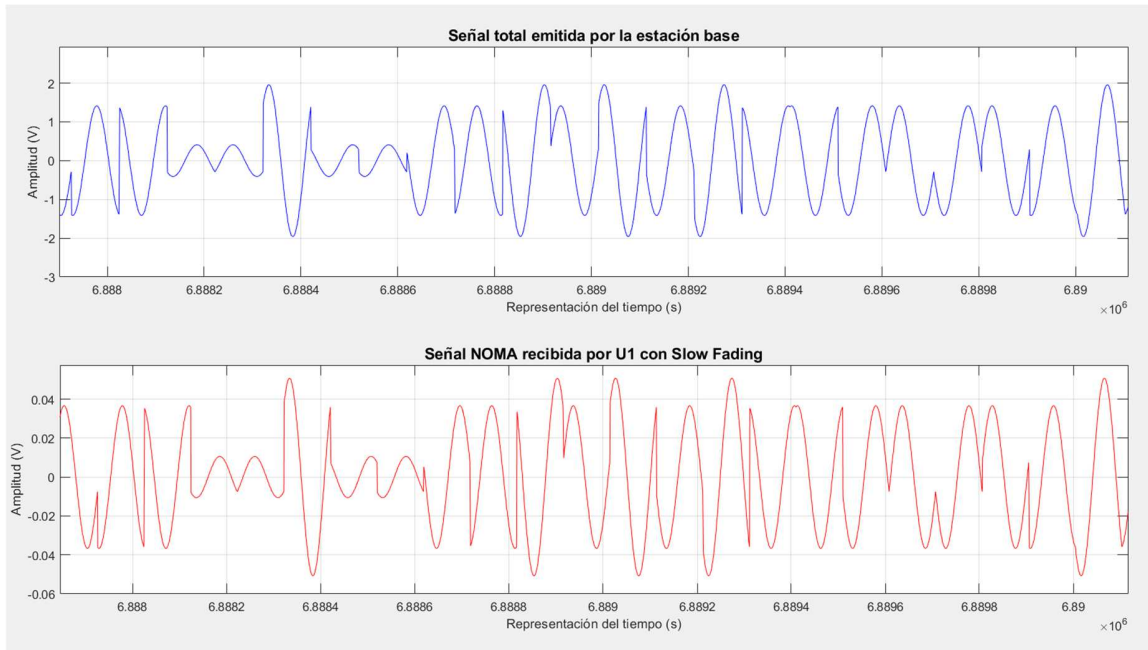


Figura 2.20. Señal total emitida por la estación base, y señal afectada por la pérdida de trayectoria para el usuario 1.

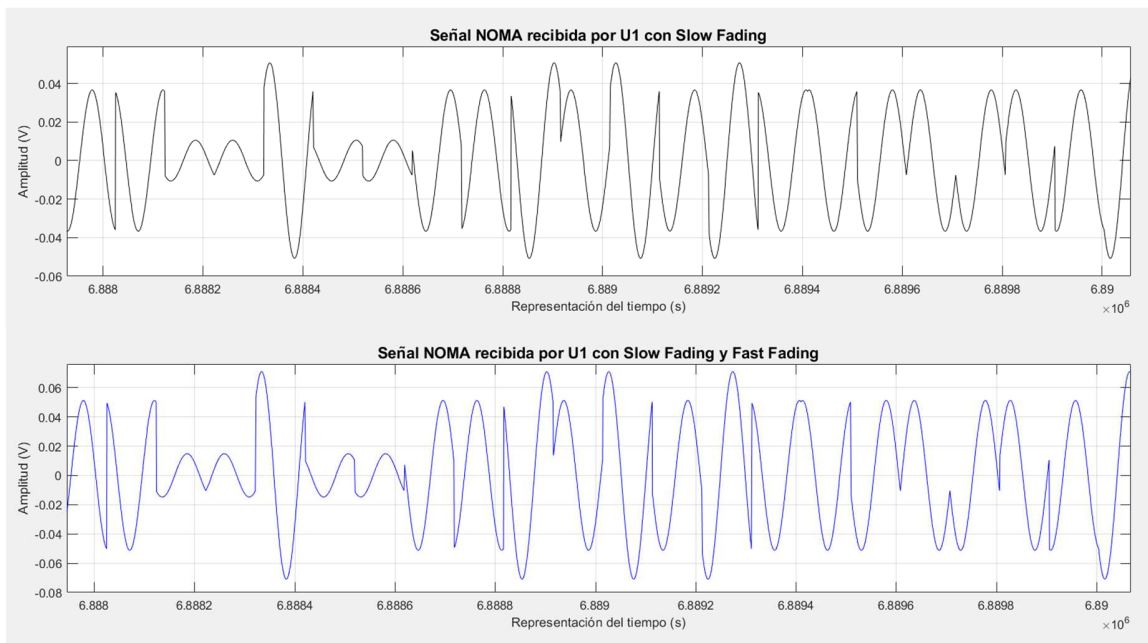


Figura 2.21. Señal del usuario 1 afectada por la pérdida de trayectoria y señal afectada también por el factor de desvanecimiento.

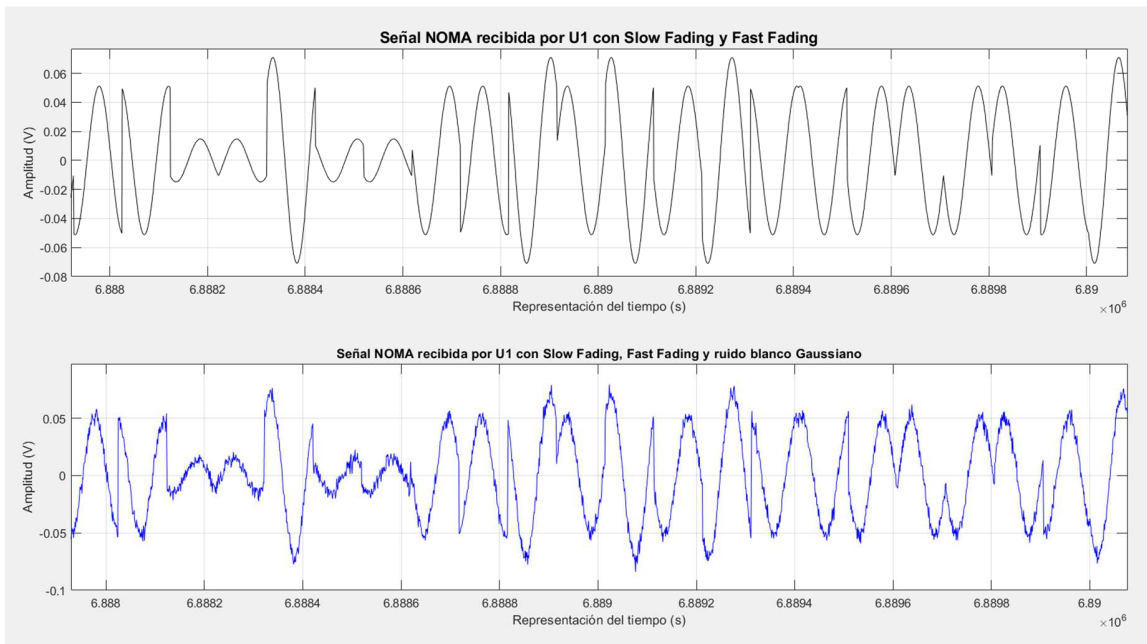


Figura 2.22. Señal del usuario 1 afectada por la pérdida por trayectoria, y el factor de desvanecimiento, y señal afectada por la pérdida por trayectoria, el desvanecimiento y el ruido blanco Gaussiano.

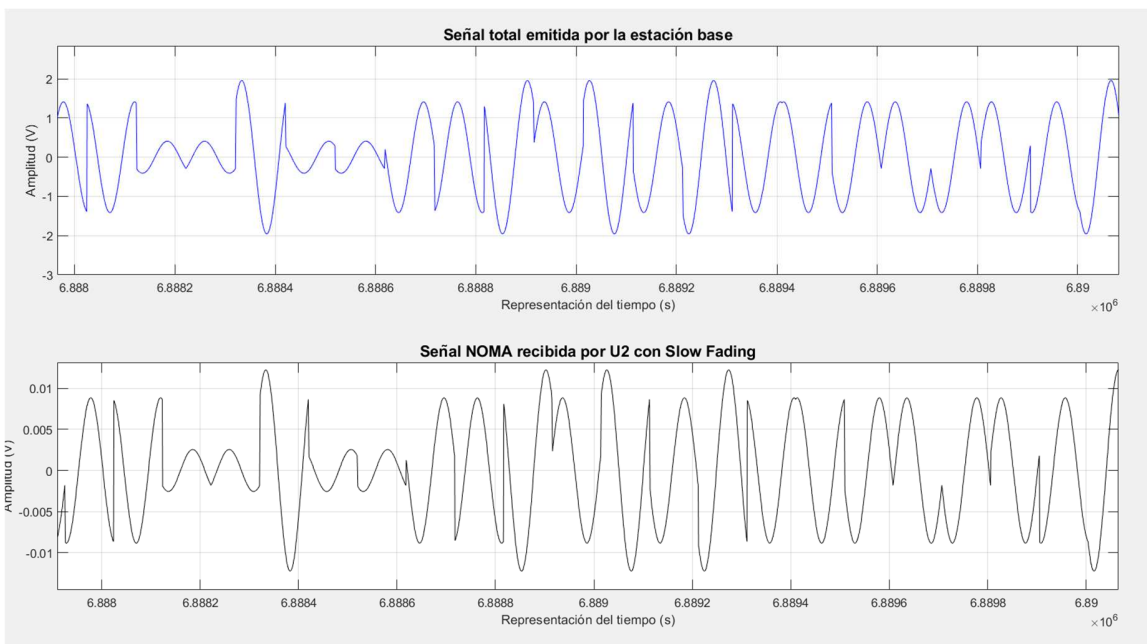


Figura 2.23. Señal total emitida por la estación base, y señal afectada por la pérdida de trayectoria para el usuario 2.

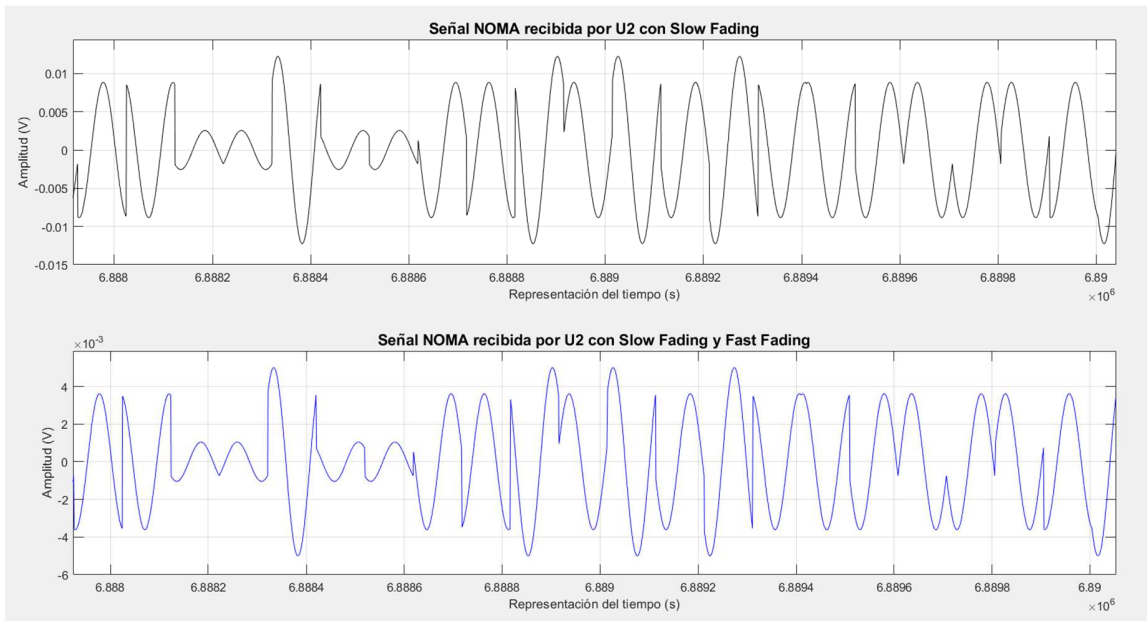


Figura 2.24. Señal del usuario 2 afectada por la pérdida de trayectoria y señal afectada también por el factor de desvanecimiento.

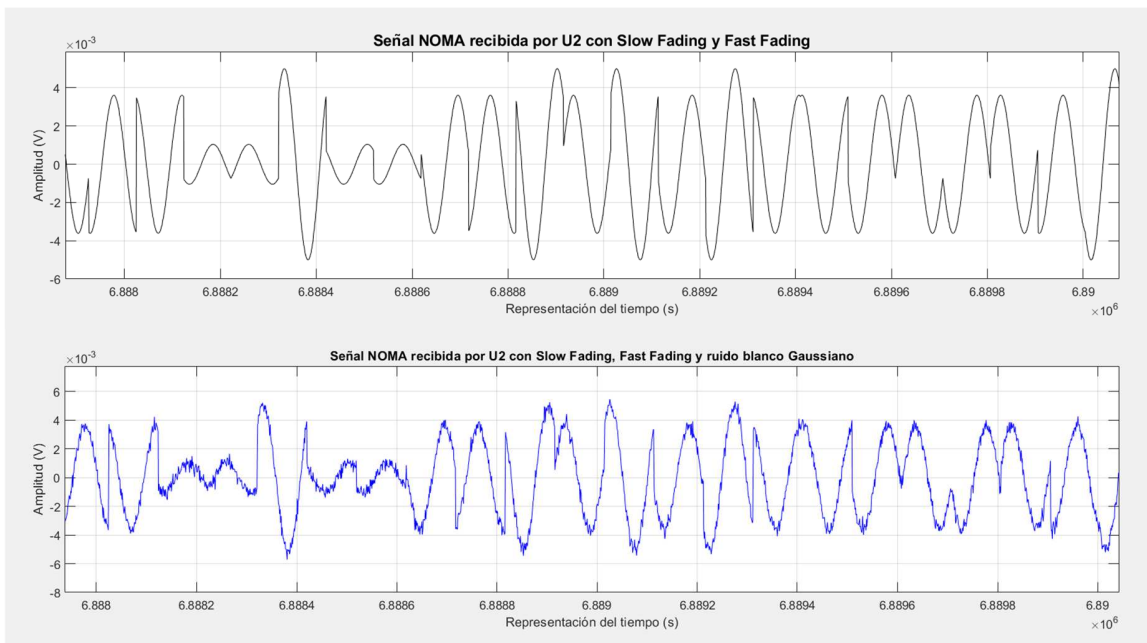


Figura 2.25. Señal del usuario 2 afectada por la pérdida por trayectoria y el factor de desvanecimiento, y señal afectada por la pérdida por trayectoria, el factor de desvanecimiento y el ruido blanco Gaussiano.

Nota importante: Hasta este punto se describe la etapa de transmisión y difusión de la señal. Se hace énfasis en que ambos usuarios reciben la misma señal, dado que en el esquema NOMA los datos digitales a transmitir de los dos usuarios fueron modulados

y después sumados. Se menciona a la “señal recibida por el usuario 1” y a la “señal recibida por el usuario 2” porque la misma señal fue afectada de diferente manera por los factores de desvanecimiento y por el ruido; la estación base emite una sola señal, pero ésta no llega de igual manera a los dos usuarios porque sus distancias a la estación base son distintas.

Aquí comienza la etapa de recepción, la cual es representada en el diagrama de bloques de la figura 2.26. Se describe a continuación el procedimiento llamado cancelación de interferencia sucesiva o SIC, mediante el cual las señales son separadas.

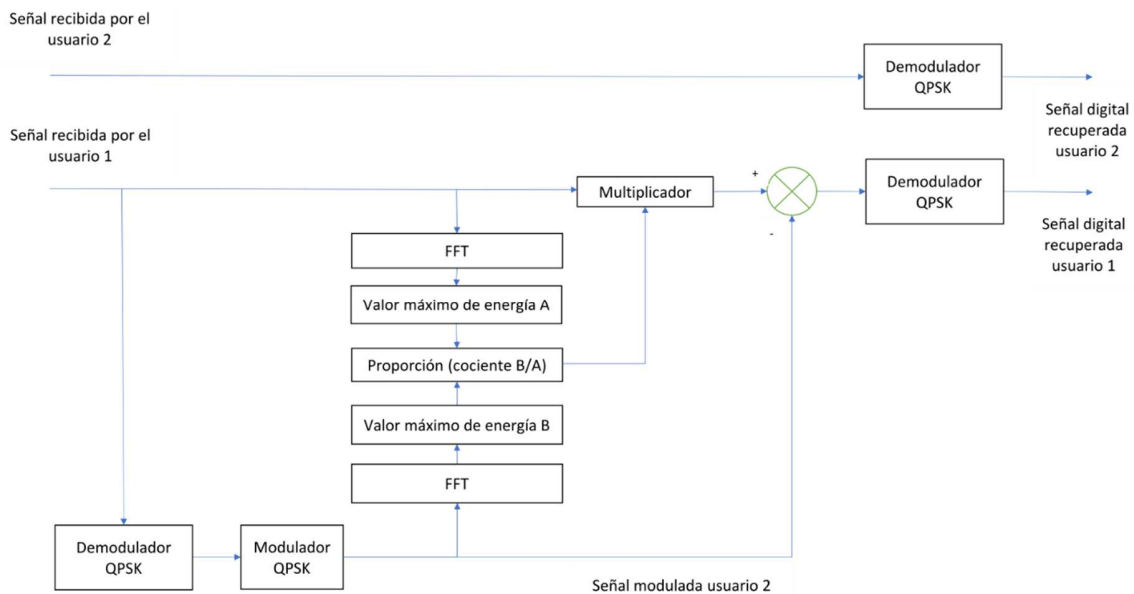


Figura 2.26. Diagrama de bloques de la etapa de recepción, mostrando ambos usuarios.

La señal del usuario 2 tuvo un coeficiente de asignación de potencia mayor que el que tuvo la señal del usuario 1, por lo que ésta última representa una parte muy pequeña del total de la señal y puede ser tratada como ruido. Por lo tanto, la señal digital del usuario 2 se recupera simplemente demodulando la señal total de transmisión, tras lo cual se obtiene la secuencia de bits correspondiente, la cual se muestra en la figura 2.27.

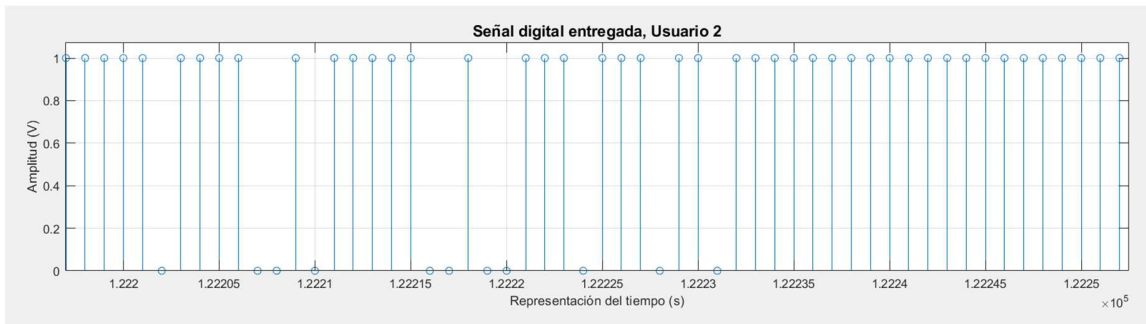


Figura 2.27. Secuencia de bits correspondiente a la señal del usuario 2.

Para recuperar la señal digital del usuario 1, la señal del usuario 2 debe ser restada de la señal total recibida por el usuario 1. Sin embargo, en este punto no se cuenta con la información pura de dicha señal, por lo que dicha información debe ser primero extraída. Para lograrlo, se hace SIC en el usuario 1, procediendo como sigue:

1) Demodular nuevamente la señal recibida por el usuario 1, para recuperar la señal digital del usuario 2.

2) Volver a modular la señal digital del usuario 2 para obtener la correspondiente señal modulada pura, la cual puede ser muy similar a la señal total recibida por el usuario 1, pero no es igual. La diferencia entre ellas es precisamente la señal del usuario 1.

3) La señal recibida por el usuario 1 sufrió los efectos de los canales de desvanecimiento y del ruido blanco Gaussiano, mientras que la señal ya modulada del usuario 2 tiene los niveles de amplitud de la portadora, acordes al proceso reciente de modulación. Es necesario nivelar ambas señales para poder restar la señal del usuario 2 a la señal total recibida por el usuario 1. Esto se logra de la siguiente manera:

a) Ambas señales se deben expresar en el dominio de la frecuencia.

b) Se mide el valor máximo del nivel de energía de la frecuencia de la portadora de cada señal (la frecuencia de la portadora es la misma en ambas señales).

c) Una vez obtenidos los correspondientes valores del máximo nivel de energía, se obtiene la razón de proporción entre ellos determinando el cociente entre el mayor y el menor.

d) Esta razón de proporción entre ambas señales se utiliza como factor multiplicativo para amplificar la señal recibida por el usuario 1; al llevar a cabo la correspondiente multiplicación, ya es posible realizar la resta del usuario 2 a la señal recibida por el usuario 1.

4) Restar la señal del usuario 2 a la señal total recibida por el usuario 1. Con esto se obtiene la señal correspondiente al usuario 1.

Este procedimiento queda ilustrado en las figuras 2.28, 2.29, 2.30 y 2.31.

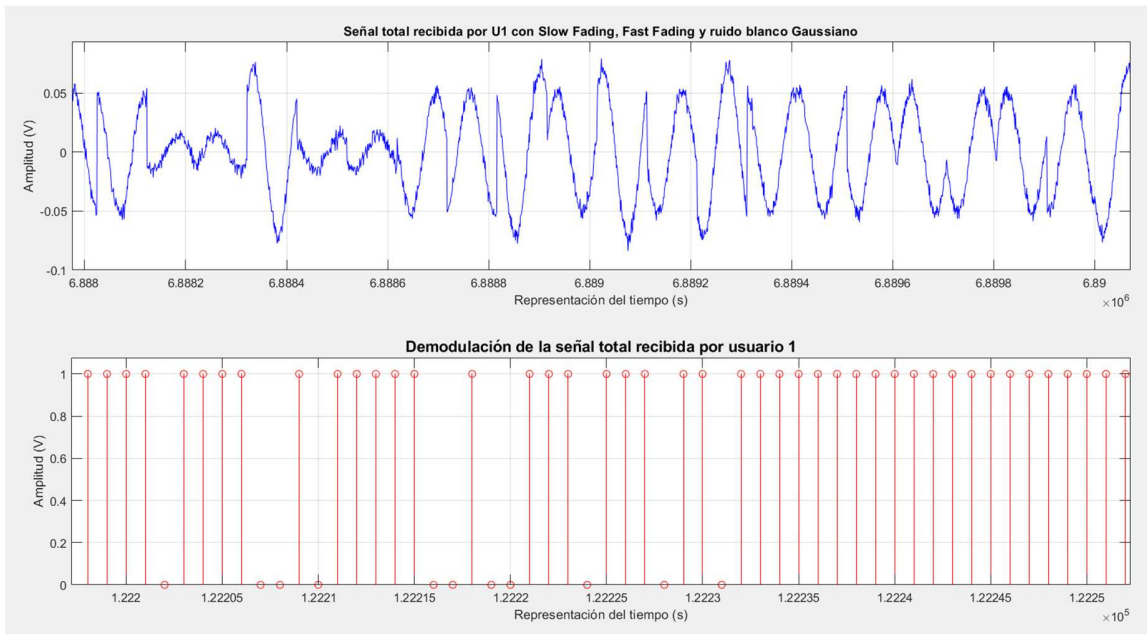


Figura 2.28. Secuencia de bits correspondiente a la señal del usuario 2, obtenida al demodular nuevamente la señal recibida por el usuario 1.

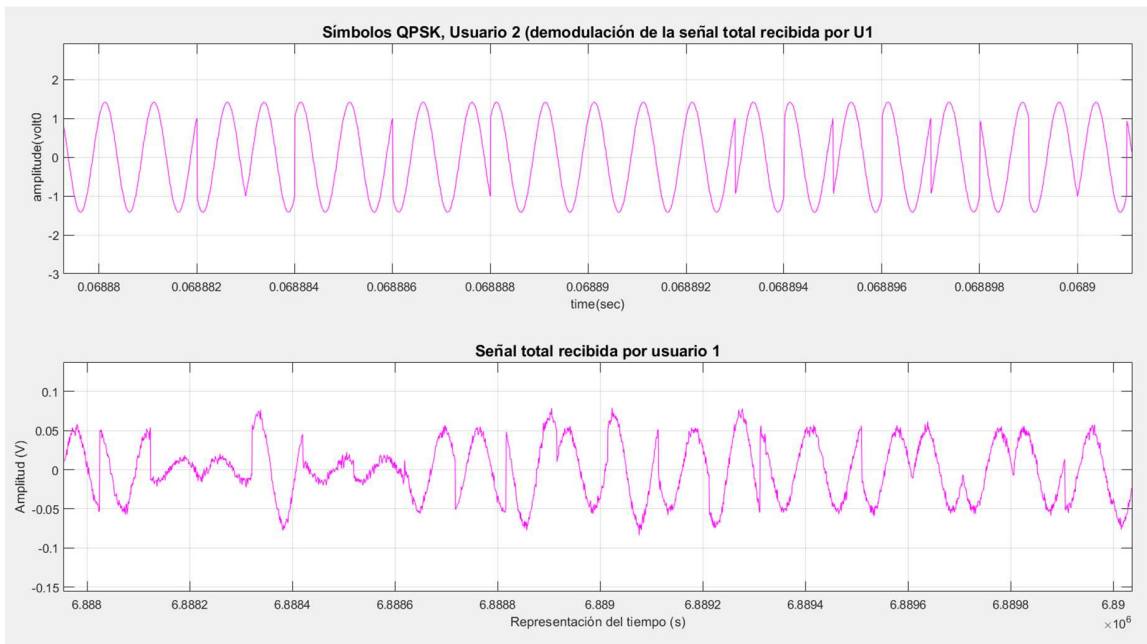


Figura 2.29. Señal del usuario 2, modulada nuevamente. Se muestra la señal total recibida por el usuario 1.

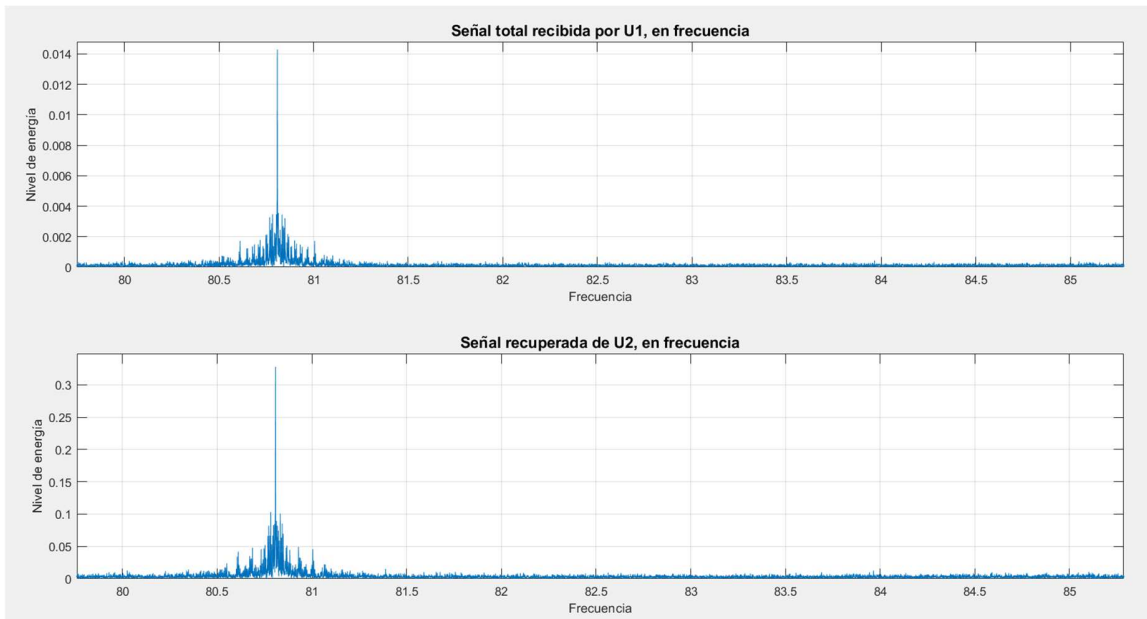


Figura 2.30. Señal de usuario 2 y señal recibida por usuario 1 en el dominio de la frecuencia. Se aprecian las diferencias de sus niveles de energía.

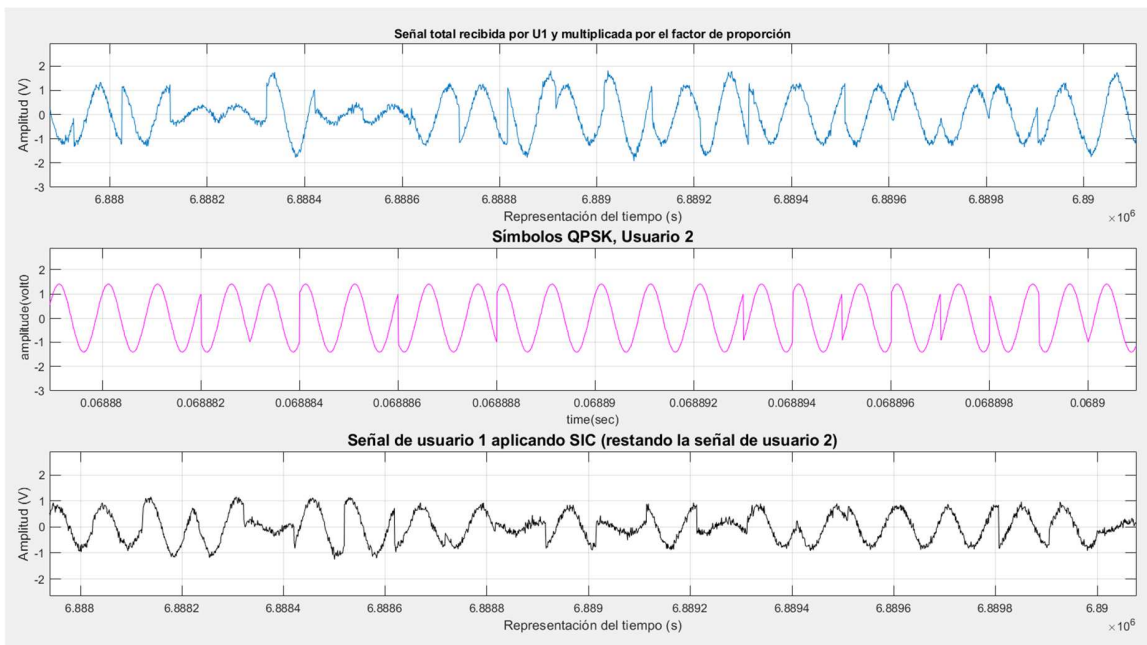


Figura 2.31. Señal recibida por el usuario 1 ya amplificada, señal recuperada de usuario 2 y señal del usuario 1, (que fue obtenida al restarle la señal del usuario 2 a la señal recibida amplificada).

Ahora se demodula la señal ya obtenida correspondiente al usuario 1 para obtener su señal digital; su secuencia de bits está ilustrada en la figura 2.32.

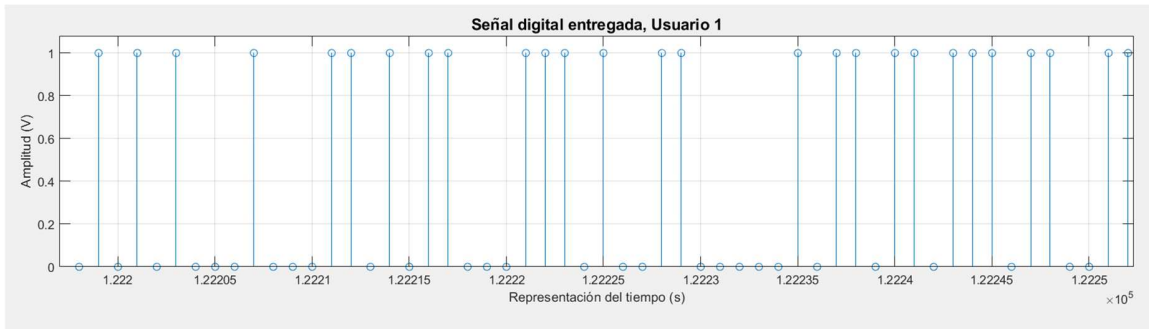


Figura 2.32. Secuencia de bits correspondiente a la señal recuperada del usuario 1.

Finalmente se lleva a cabo el proceso inverso de la digitalización de ambas señales digitales para recuperar las correspondientes señales de voz, las cuales se muestran, tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia en las figuras 2.33 y 2.34.

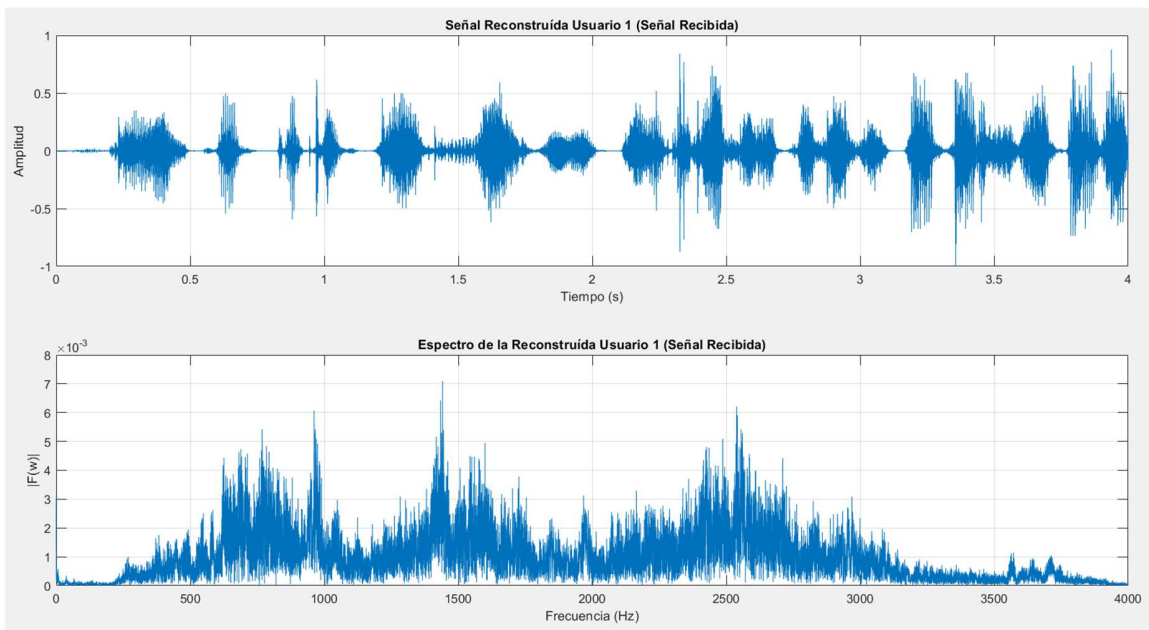


Figura 2.33. Señal recuperada de voz del usuario 1, representada en tiempo y frecuencia.

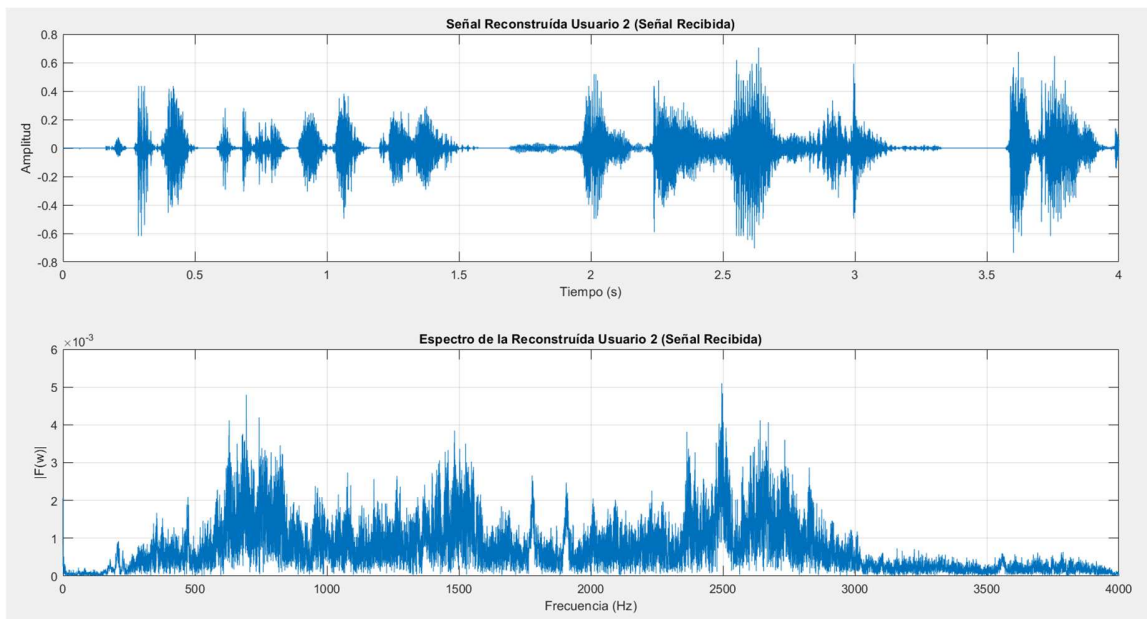


Figura 2.34. Señal recuperada de voz del usuario 2, representada en tiempo y frecuencia.

En esta simulación se complementa la etapa de transmisión con una etapa de recepción, mediante la cual las señales de los usuarios son convenientemente separadas y recuperadas. El procedimiento mediante el cual se lleva a cabo la separación fue desarrollado en su totalidad dentro del presente trabajo; si bien existen otros procedimientos de cancelación de interferencia sucesiva, éstos son acordes a la necesidad de cada sistema, por lo que no existe un diseño en particular que sea aplicable a todos. Por esta razón, todo el esquema de recepción de señal es de diseño propio.

La aplicación de las señales de voz y de los factores de desvanecimiento y pérdida por trayectoria y del ruido blanco aditivo, así como el proceso de separación y recuperación de las señales de voz, se llevaron a cabo con la finalidad de demostrar la funcionalidad del sistema y se encuentran descritos a detalle en el capítulo 4 como parte del proceso de validación.

CAPÍTULO 3

Implementación física del sistema de transmisión NOMA

En este capítulo se describe la implementación física del sistema de transmisión NOMA en una tarjeta de desarrollo con FPGA.

3.1. La tarjeta de desarrollo

Para las pruebas de implementación se utiliza la tarjeta de desarrollo DE0-NANO de la marca Terasic, la cual se muestra en la figura 3.1.

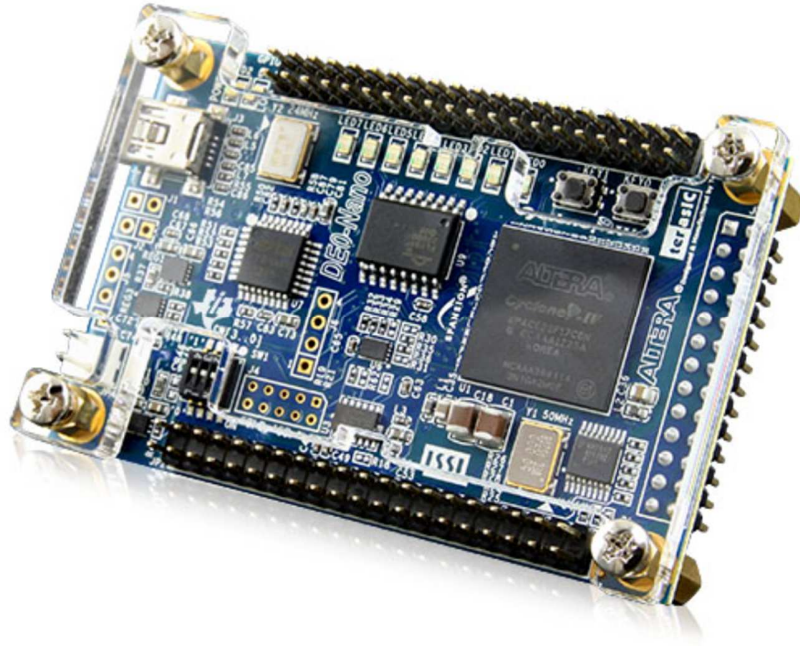


Figura 3.1. Tarjeta DE0-Nano, con la que se realizan las pruebas de implementación.

Algunas de sus principales características son:

FPGA Altera Cyclone® IV EP4CE22F17C6N:

22,320 elementos lógicos.

594 Kb de memoria incorporada.

Un máximo de 153 pines de E/S de FPGA.

Cabezales de expansión

Dos cabezales de 40 pines (72 pines de E/S digitales de 3.3V, dos pines de alimentación de 5V, dos pines de alimentación de 3.3V y cuatro pines de tierra).

Un cabezal de 26 pines (16 pines de E/S digitales de 3.3V y 8 pines de entrada analógica para conectarse a sensores analógicos).

Utilidades generales para usuario

8 LED verdes.

2 interruptores de botón con sistema anti-rebote, activos en bajo.

4 interruptores *dipswitch*.

Sistema de reloj integrado

Cristal oscilador integrado de 50MHz

Alimentación

Puerto mini USB (5V)

Cabezal de alimentación externa de 2 pines (3.6-5.7V)

Estos elementos hacen de la DE0-Nano una placa de desarrollo versátil, robusta y de fácil manejo, por lo que se considera adecuada para la implementación del sistema de transmisión.

3.2. El sistema de transmisión NOMA en FPGA

En la figura 3.2 se muestra el diagrama de bloques propuesto para la implementación del transmisor. Se indica el detalle de los elementos que se encuentran dentro y fuera del FPGA, así como los elementos que se encuentran dentro y fuera de la tarjeta de desarrollo.

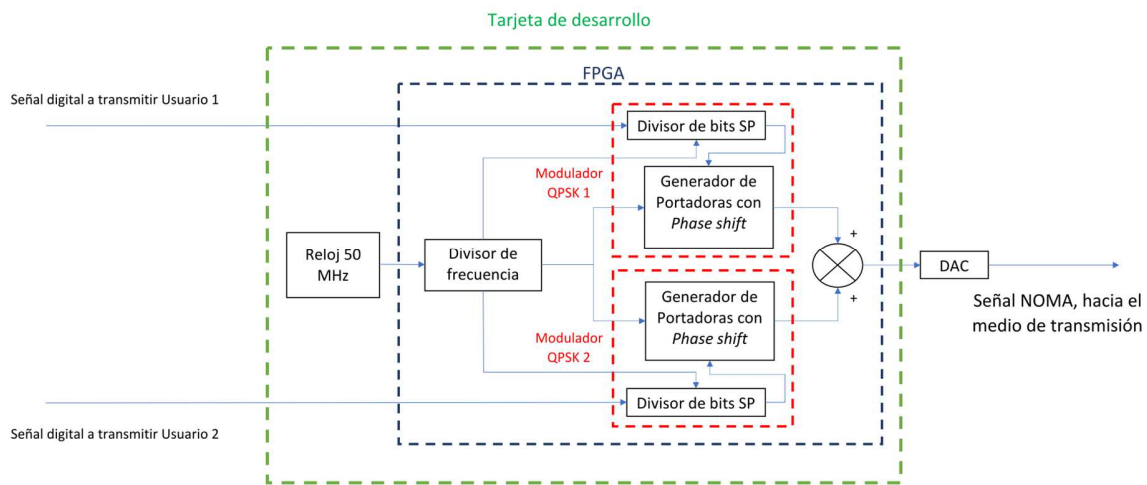


Figura 3.2. Diagrama de bloques propuesto para la implementación en FPGA.

Se configuraron en el FPGA los dos moduladores QPSK, los cuales reciben las señales digitalizadas correspondientes a los respectivos usuarios y las entregan, ya moduladas, al sumador. El reloj de 50 MHz provee los pulsos necesarios para la formación de las portadoras y para el funcionamiento de los divisores de bits serie-paralelo. Como se puede observar, la suma de las señales moduladas se realiza dentro del FPGA; la asignación de amplitud para cada usuario se lleva a cabo al momento de generar cada portadora. Finalmente, la señal resultante de la suma se envía hacia un

convertidor DAC externo, para ser entregada al medio de transmisión, el cual puede ser un cable, una fibra óptica (por medio de un optoacoplador), o el aire (por medio de un transmisor inalámbrico).

Los elementos que se muestran en el diagrama de bloques de la figura 3.2, que están configurados en el FPGA, fueron descritos en lenguaje VHDL; para tal fin se utilizó el programa Quartus Prime, desarrollado por Altera. El esquema completo del sistema prototipo (generado por Quartus Prime a partir del código VHDL) implementado en el FPGA se muestra en la figura 3.3, en el cual se pueden apreciar los elementos que forman el sistema y las conexiones entre ellos.

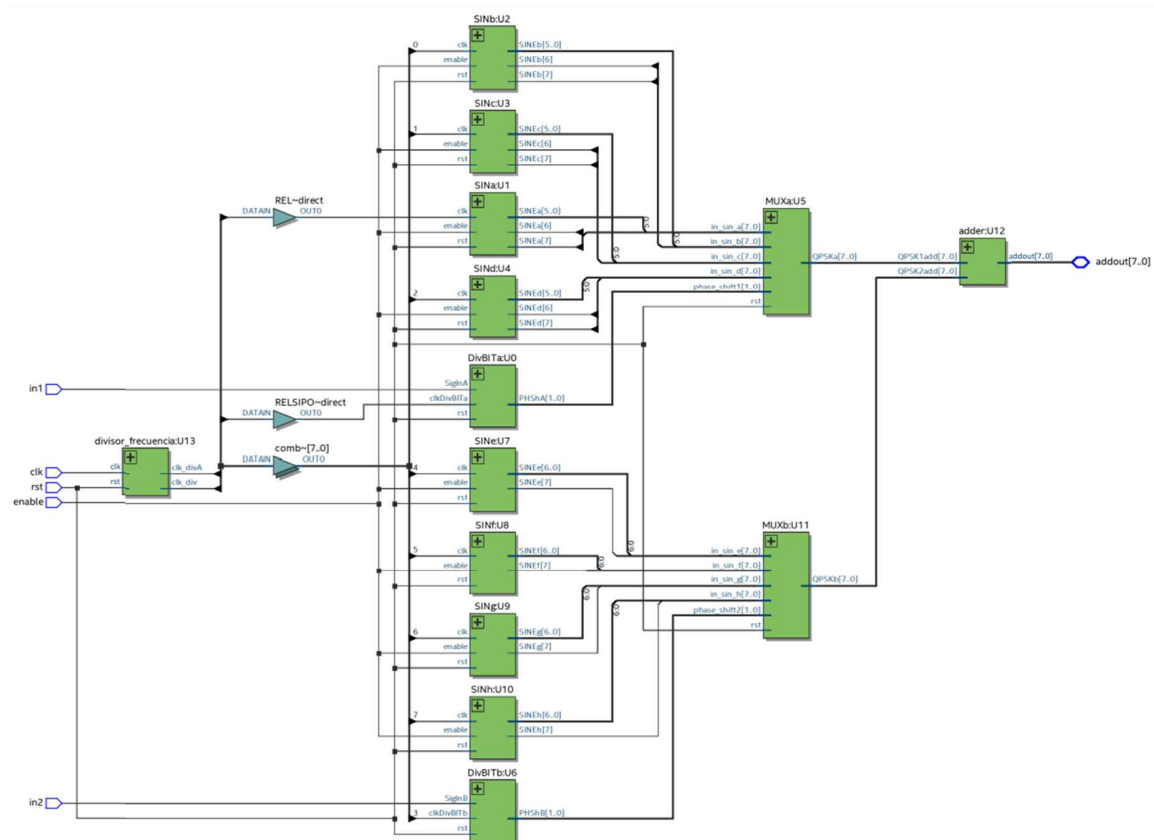


Figura 3.3. Esquema completo del sistema prototipo de transmisión NOMA, generado por Quartus Prime a partir del código VHDL.

A continuación se explica el funcionamiento del sistema prototipo describiendo cada elemento:

- a. *Divisor de frecuencia*: El divisor de frecuencia, denominado *divisor_frecuencia* en el código VHDL, toma en su entrada *clk* la señal del oscilador de 50 MHz integrado en la tarjeta de desarrollo y entrega, mediante las salidas *clk_div* y

clk_divA, dos señales de reloj con las frecuencias de 100 Hz y 1 Hz, respectivamente. Mediante la entrada *rst* se recibe el pulso asíncrono cuando se requiera reiniciar el ciclo de trabajo del divisor de frecuencia. Para la implementación inicial, y a su vez, para facilitar la visualización en el osciloscopio de la señal senoidal portadora, se aplica la señal de 100 Hz de la salida *clk_div* a las entradas de reloj *clk* de todos los generadores de portadora pertenecientes a los moduladores, de modo que se tendrán 100 puntos de gráfica cada segundo. Modificando esta frecuencia es posible ajustar la frecuencia de la señal senoidal portadora; en este caso específico de prueba, si son 100 puntos por segundo y la señal senoidal se compone de 64 puntos por ciclo (de portadora), se tiene una frecuencia en la onda senoidal de 1.56 Hz. Con esta configuración, la frecuencia máxima que es posible obtener de la portadora con la tarjeta de desarrollo DE0-nano es de 781.25 KHz; es importante mencionar que siempre es posible obtener mayores frecuencias utilizando un oscilador externo (tomando en cuenta la frecuencia máxima en que pudiera trabajar el FPGA). Por su parte, la señal de 1 Hz, que el divisor proporciona a través de la salida *clk_divA*, es aplicada a las entradas *clk* de ambos divisores de bits; éstos reciben directamente en sus entradas de datos las respectivas señales digitales de la información de los dos usuarios, de las que toman un valor de bit en cada ciclo de reloj, lo cual en este caso ocurre cada segundo.

- b. *Divisores de bits*: Cada modulador QPSK recibe los valores binarios de la señal de usuario en un solo bit de entrada, y cuenta con un divisor de bits con entrada serie y salida paralelo, el cual agrupa y entrega por pares dichos valores. Este trabajo es realizado por los divisores de bits *DivBitA* y *DivBitB*, los cuales cuentan con las entradas *SignIn*, *ClkDivBIT* (identificadas como A y B para cada divisor) y *rst*; así como las salidas *PHSh* (igualmente identificadas como A y B para cada divisor). Cada entrada *SignIn* recibe los valores binarios correspondientes a la información de cada usuario, mientras que las entradas *ClkDivBIT* reciben la señal de reloj proveniente del divisor de frecuencia, con la cual se tomará periódicamente cada valor de bit de la señal de entrada de usuario. Mediante la entrada *rst* se recibe el pulso asíncrono para reiniciar el ciclo de trabajo del divisor de bits en caso necesario. La salida *PHSh* de dos bits entrega los valores de bits de entrada por pares, los cuales son posteriormente enviados a las entradas de conmutación de los multiplexores selectores de portadora. Cada par de valores de bits se entrega en cada dos ciclos de reloj de la entrada *ClkDivBIT*.
- c. *Generadores de portadoras*: Se utiliza un modulador QPSK para cada usuario. Cada modulador modifica la fase de la señal senoidal portadora con 4 valores diferentes; éstos valores de fase pueden tener cualquier ángulo de inicio,

siempre y cuando se cumpla la condición de que la diferencia entre cada uno y el siguiente sea de 90° . En el presente trabajo, esto se logra implementando para cada usuario 4 bloques generadores de portadora, cada uno con diferente fase de inicio. Para el modulador del usuario 1 se utilizan los bloques *SINa*, *SINb*, *SINc* y *SINd*, y para el modulador del usuario 2 se utilizan los bloques *SINe*, *SINF*, *SING* y *SINh*. Cada bloque genera una señal senoidal de la siguiente manera: en el código VHDL se asignó un vector de tiempo de 64 valores, desde 0 hasta 63, que se repite indefinidamente y que en la representación gráfica corresponde al eje horizontal. A cada valor de tiempo se le asignó un valor representado en el eje vertical, de manera que se tiene una señal senoidal formada por 64 puntos. Cada bloque tiene definido el valor de gráfica al inicio de su ciclo de trabajo; para el caso del modulador del usuario 1, el bloque *SINa* comienza con un ángulo de fase de 45° , el bloque *SINb* comienza con un ángulo de fase de 135° , el bloque *SINc* comienza con un ángulo de fase de 225° , y el bloque *SINd* comienza con un ángulo de fase de 315° . Se realiza la misma configuración para los bloques *SINe*, *SINF*, *SING* y *SINh*. Ahora bien, la razón por la que no se utiliza el mismo conjunto de 4 bloques para ambos moduladores es que las portadoras formadas deben tener amplitudes distintas, y de esta manera los coeficientes de asignación de potencia quedan aplicados desde el momento en que se generan las portadoras. Para ilustrar lo anterior, se muestra la parte del código VHDL en la que se realizó la asignación de los valores de gráfica de dos bloques (el vector de tiempo es nombrado *table_index* y el conjunto de valores asignados es nombrado *table_value*); se comparan los valores del bloque *SINa* (primer bloque del usuario 1) con el bloque *SINe* (primer bloque del usuario 2). Se puede observar que el valor inicial de gráfica no es 0 para el tiempo 0; cada bloque inicia con un ángulo de fase de 45° dado por el respectivo valor de gráfica, sin embargo, cada bloque tiene un valor distinto de inicio con respecto al otro por corresponder a un nivel particular de amplitud asignado a cada usuario:

Portadora SINa del usuario 1:

```
begin
case table_index is  --SINa-(User 1)
when 0 => table_value := 50 ;
when 1 => table_value := 52 ;
when 2 => table_value := 54 ;
when 3 => table_value := 56 ;
when 4 => table_value := 56 ;
when 5 => table_value := 58 ;
when 6 => table_value := 58 ;
when 7 => table_value := 58 ;
when 8 => table_value := 58 ;
when 9 => table_value := 58 ;
when 10 => table_value := 58 ;
when 11 => table_value := 56 ;
when 12 => table_value := 56 ;
```

```

when 13 => table_value := 54 ;
when 14 => table_value := 52 ;
when 15 => table_value := 50 ;
when 16 => table_value := 48 ;
when 17 => table_value := 46 ;
when 18 => table_value := 44 ;
when 19 => table_value := 40 ;
when 20 => table_value := 38 ;
when 21 => table_value := 36 ;
when 22 => table_value := 32 ;
when 23 => table_value := 30 ;
when 24 => table_value := 28 ;
when 25 => table_value := 26 ;
when 26 => table_value := 22 ;
when 27 => table_value := 20 ;
when 28 => table_value := 18 ;
when 29 => table_value := 14 ;
when 30 => table_value := 12 ;
when 31 => table_value := 10 ;
when 32 => table_value := 8 ;
when 33 => table_value := 6 ;
when 34 => table_value := 4 ;
when 35 => table_value := 2 ;
when 36 => table_value := 2 ;
when 37 => table_value := 0 ;
when 38 => table_value := 0 ;
when 39 => table_value := 0 ;
when 40 => table_value := 0 ;
when 41 => table_value := 0 ;
when 42 => table_value := 0 ;
when 43 => table_value := 2 ;
when 44 => table_value := 2 ;
when 45 => table_value := 4 ;
when 46 => table_value := 6 ;
when 47 => table_value := 8 ;
when 48 => table_value := 10 ;
when 49 => table_value := 12 ;
when 50 => table_value := 14 ;
when 51 => table_value := 18 ;
when 52 => table_value := 20 ;
when 53 => table_value := 22 ;
when 54 => table_value := 26 ;
when 55 => table_value := 28 ;
when 56 => table_value := 30 ;
when 57 => table_value := 32 ;
when 58 => table_value := 36 ;
when 59 => table_value := 38 ;
when 60 => table_value := 40 ;
when 61 => table_value := 44 ;
when 62 => table_value := 46 ;
when 63 => table_value := 48 ;

```

```
end case;
```

Portadora SINE del usuario 2:

```

begin
  case table_index is
    --SINE(User 2)
    when 0 => table_value := 75 ;
    when 1 => table_value := 78 ;
    when 2 => table_value := 81 ;
    when 3 => table_value := 84 ;
    when 4 => table_value := 84 ;
    when 5 => table_value := 87 ;
    when 6 => table_value := 87 ;
    when 7 => table_value := 87 ;
    when 8 => table_value := 87 ;
    when 9 => table_value := 87 ;
  
```

```

when 10 => table_value := 87 ;
when 11 => table_value := 84 ;
when 12 => table_value := 84 ;
when 13 => table_value := 81 ;
when 14 => table_value := 78 ;
when 15 => table_value := 75 ;
when 16 => table_value := 72 ;
when 17 => table_value := 69 ;
when 18 => table_value := 66 ;
when 19 => table_value := 60 ;
when 20 => table_value := 57 ;
when 21 => table_value := 54 ;
when 22 => table_value := 48 ;
when 23 => table_value := 45 ;
when 24 => table_value := 42 ;
when 25 => table_value := 39 ;
when 26 => table_value := 33 ;
when 27 => table_value := 30 ;
when 28 => table_value := 27 ;
when 29 => table_value := 21 ;
when 30 => table_value := 18 ;
when 31 => table_value := 15 ;
when 32 => table_value := 12 ;
when 33 => table_value := 9 ;
when 34 => table_value := 6 ;
when 35 => table_value := 3 ;
when 36 => table_value := 3 ;
when 37 => table_value := 0 ;
when 38 => table_value := 0 ;
when 39 => table_value := 0 ;
when 40 => table_value := 0 ;
when 41 => table_value := 0 ;
when 42 => table_value := 0 ;
when 43 => table_value := 3 ;
when 44 => table_value := 3 ;
when 45 => table_value := 6 ;
when 46 => table_value := 9 ;
when 47 => table_value := 12 ;
when 48 => table_value := 15 ;
when 49 => table_value := 18 ;
when 50 => table_value := 21 ;
when 51 => table_value := 27 ;
when 52 => table_value := 30 ;
when 53 => table_value := 33 ;
when 54 => table_value := 39 ;
when 55 => table_value := 42 ;
when 56 => table_value := 45 ;
when 57 => table_value := 48 ;
when 58 => table_value := 54 ;
when 59 => table_value := 57 ;
when 60 => table_value := 60 ;
when 61 => table_value := 66 ;
when 62 => table_value := 69 ;
when 63 => table_value := 72 ;

end case;

```

Cada bloque cuenta con una entrada *clk*, cuya señal de reloj proviene del divisor de frecuencia y tiene, en este caso de prueba, una frecuencia de 100 Hz; cuenta además con entrada *enable* para detener o continuar la generación de la portadora y entrada *rst* para reiniciar el ciclo de trabajo del bloque en caso necesario. La salida de cada bloque, denominada *SINE* e identificada de la *a* a la *h* para cada uno, nos entrega un valor binario de 8 bits en cada ciclo de reloj, siendo en total 64 valores. Los valores de estas salidas son dirigidos a los dos

multiplexores; los bloques *SINa*, *SINb*, *SINc* y *SINd* envían sus salidas a un multiplexor y los bloques *SINe*, *SINf*, *SINg* y *SINh* al otro multiplexor, y cada uno de ellos seleccionará la señal de cada bloque generador de portadora de acuerdo con la fase requerida.

- d. *Multiplexores*: Cada modulador de la presente implementación cuenta con un multiplexor que selecciona para su salida a la vez uno de los 4 generadores de portadora conectados en sus entradas. Los multiplexores, nombrados *MUXa* y *MUXb*, contienen las entradas *in_sin* (identificadas de la *a* a la *d* para el multiplexor *a* y de la *e* a la *h* para el multiplexor *b*), cuyas señales provienen de los generadores de portadora correspondientes, además de la entrada *rst* para reiniciar su ciclo de trabajo en caso necesario. Para cada multiplexor, la señal respectiva de conmutación se aplica a la entrada *phase_shift* (identificada como 1 para el multiplexor *MUXa* y como 2 para el multiplexor *MUXb*), y proviene del divisor de bits correspondiente; esta señal de conmutación contiene, en sus dos bits, los valores binarios correspondientes a la información digital a transmitir de cada usuario, por lo que la señal portadora de cada modulador, con su respectivo valor de fase de inicio, será seleccionada de acuerdo con dichos valores binarios. Con esto se logra que cada multiplexor entregue en su salida una señal de valores binarios de 8 bits, que al ser aplicada a un convertidor DAC, formará una onda senoidal con los cambios de fase correspondientes a la señal digital de cada usuario. Las salidas de los multiplexores, identificadas en el código como *QPSKa* y *QPSKb*, son dirigidas al sumador y constituyen la parte final de la modulación.
- e. *Sumador*: El sumador, identificado en el código como *adder*, cuenta con dos entradas y una salida (todas de 8 bits). En las entradas, identificadas como *QPSK1addy* y *QPSK2add*, se reciben las señales entregadas por los moduladores, y en la salida *addout* se entrega finalmente la suma aritmética de dichas señales, con lo cual se lleva a cabo el acceso a la información de ambos usuarios en una sola señal. Esta señal digital de 8 bits se envía a la salida del sistema de transmisión NOMA para ser aplicada al convertidor DAC externo y poder ser transmitida por el medio correspondiente.

El convertidor DAC utilizado es de tipo escalera R/2R; consta de un arreglo de resistencias acoplado de tal manera que los valores de los bits recibidos son sumados, de modo que entregará un valor máximo de voltaje cuando todos los bits se encuentren en nivel lógico alto y un nivel mínimo de voltaje cuando sólo exista nivel alto en el bit menos significativo; el nivel bajo en todos los bits dará como resultado un valor de 0V en la salida. Al ser un circuito puramente resistivo ofrece la ventaja de no agregar

retrasos de tiempo en los momentos en que deben leerse los valores de salida del FPGA. El diagrama del convertidor DAC se muestra en la figura 3.4.

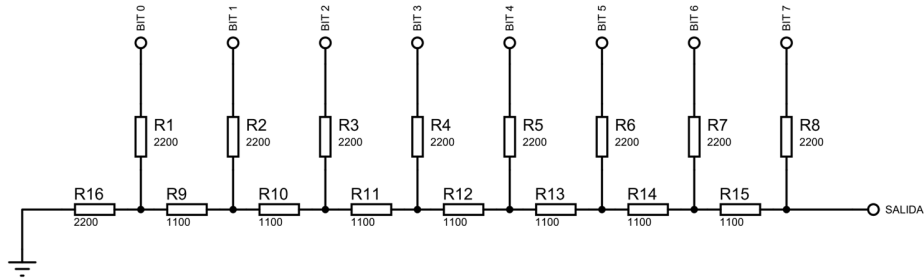


Figura 3.4. Diagrama del convertidor DAC utilizado.

Durante las primeras pruebas del sistema, se generó una señal portadora sin modular y sin asignación de amplitud, y posteriormente se integró esta portadora en un modulador.

En la figura 3.5 se aprecia, en la captura de imagen del osciloscopio, la señal portadora sin modulación generada dentro del FPGA.

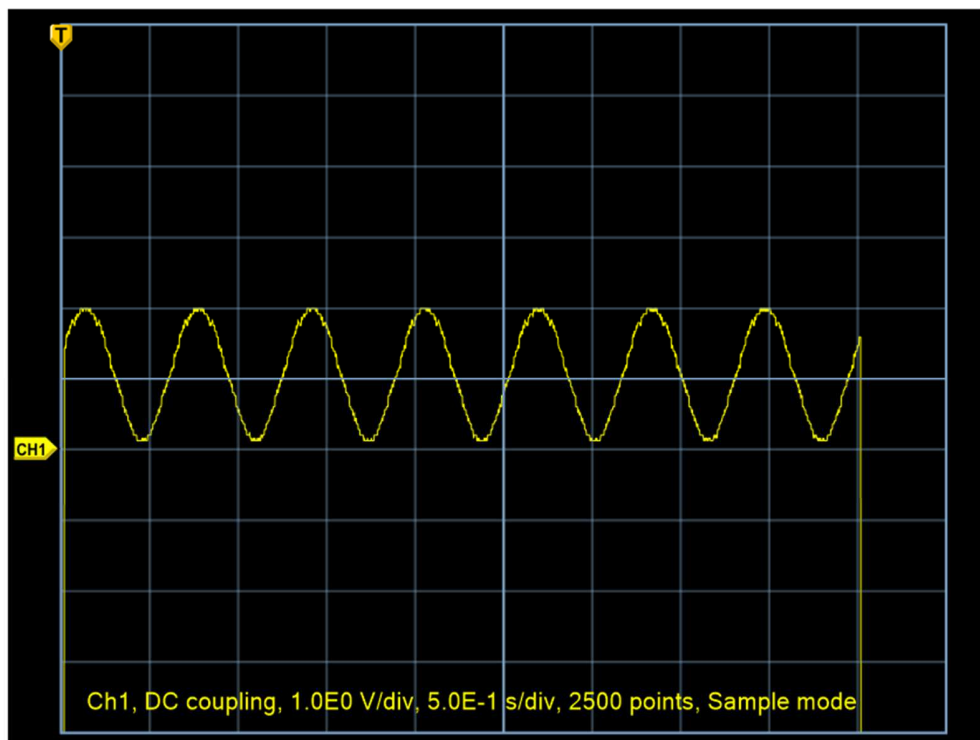


Figura 3.5. Detalle de la señal portadora de prueba generada con el FPGA.

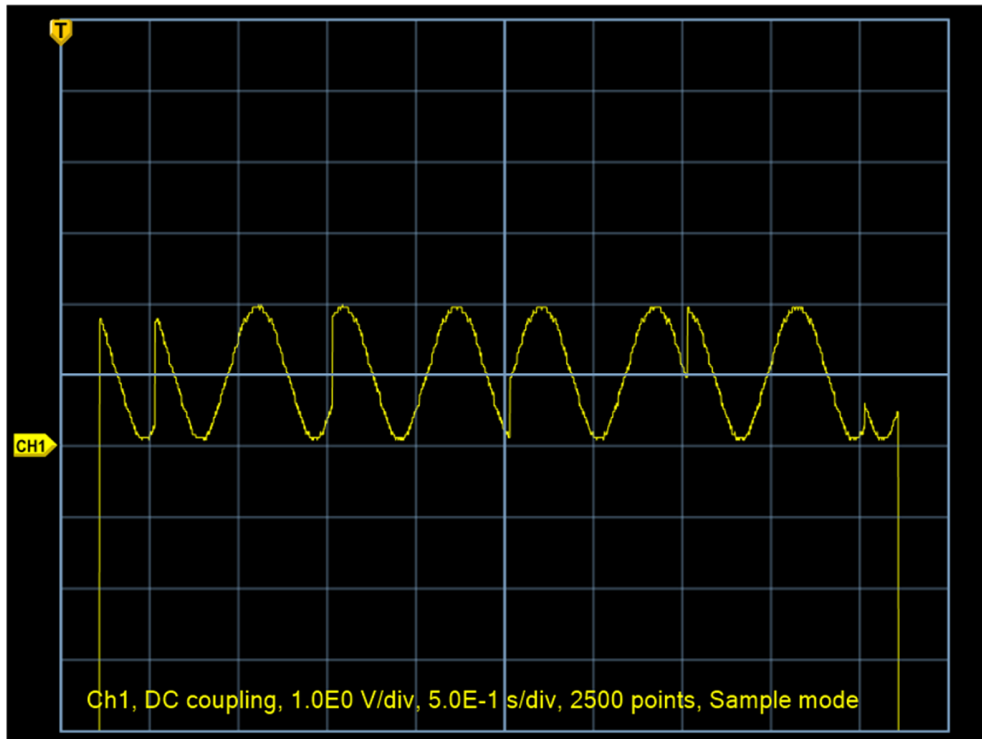


Figura 3.6. Respuesta del modulador QPSK prototipo.

La figura 3.6 muestra la respuesta en tiempo real del modulador inicial, en donde se muestran los cambios de fase de acuerdo con la señal digital que incide en el mismo. Una vez que se obtuvo la modulación de prueba se desarrollaron los dos moduladores con el mismo funcionamiento, pero con diferentes valores de amplitud. En la figura 3.7 se muestran las respuestas de los dos moduladores ya implementados; obsérvese la diferencia de amplitud entre las señales, correspondientes a la potencia particular asignada a cada señal.

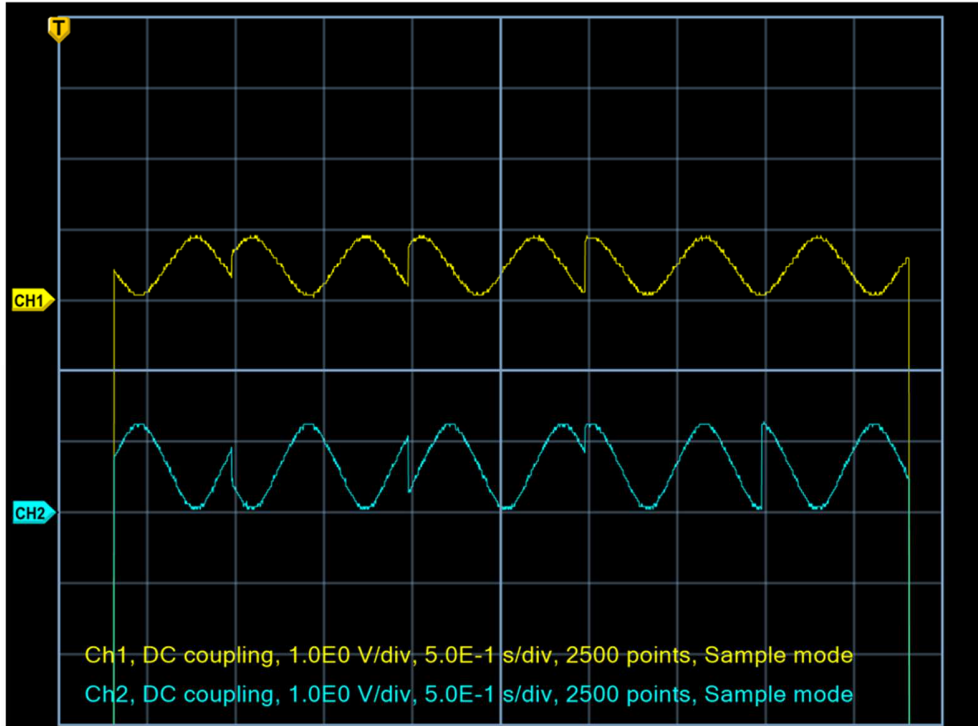


Figura 3.7. Señales de ambos moduladores, cada uno con su nivel asignado de potencia.

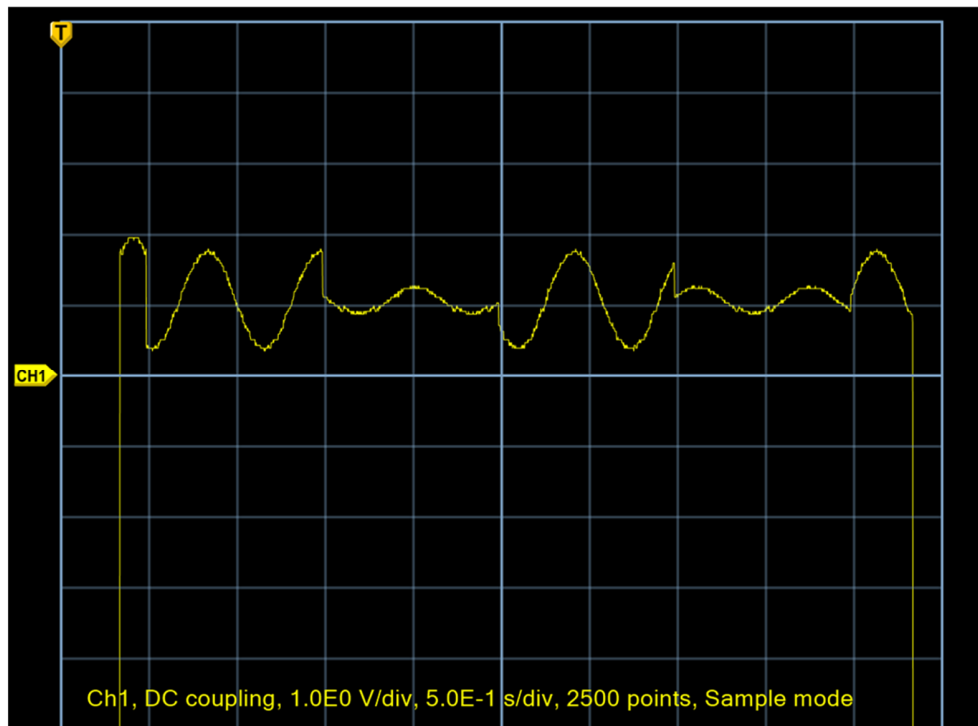


Figura 3.8. Suma de las señales de los moduladores. La señal resultante es la que entrega el sistema NOMA, lista para ser transmitida.

En la figura 3.8 se aprecia, finalmente, la suma de las señales de los moduladores, lo cual constituye el esquema de acceso NOMA al integrar en una única señal la información correspondiente a dos usuarios, distinguiéndolos por sus niveles de potencia. La señal resultante es la que entrega el sistema NOMA, lista para ser acondicionada y transmitida. En la figura 3.9 se muestra el detalle del convertidor DAC de 8 bits utilizado para acoplar la señal entregada por el FPGA al osciloscopio, conectado a la tarjeta DE0-Nano, mientras que en la figura 3.10 puede verse el dispositivo completo que se ha desarrollado. Nótese que el osciloscopio muestra en tiempo real la señal del esquema de acceso NOMA. Para las pruebas de implementación, las dos señales digitales de ingreso se generan externamente y se introducen en el FPGA por medio de dos pines de la tarjeta de desarrollo.

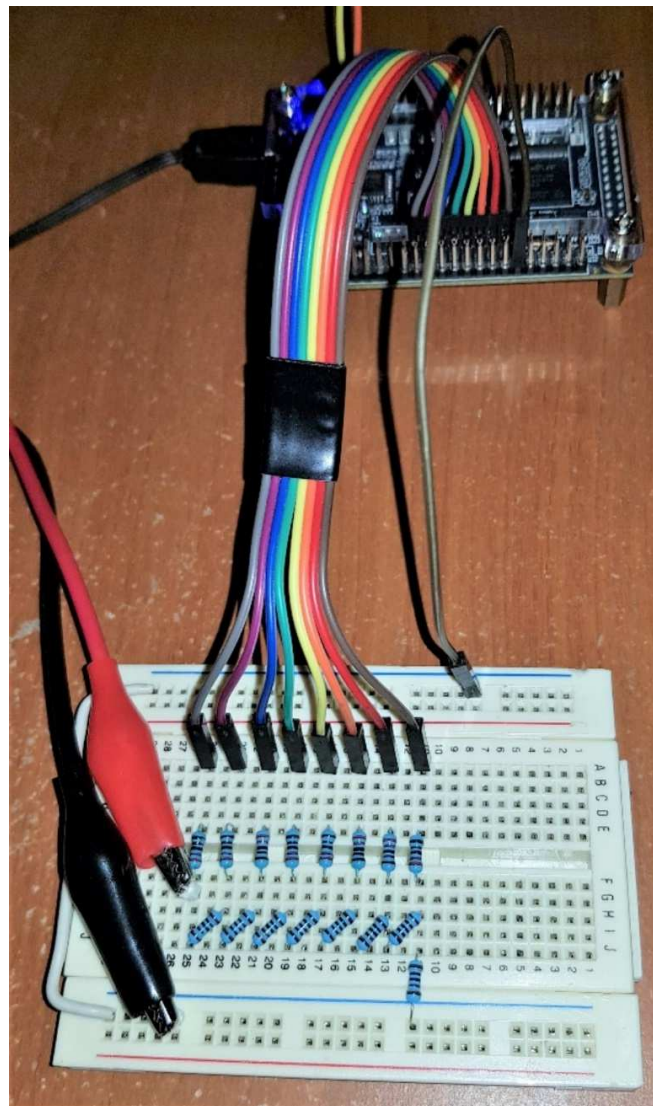


Figura 3.9. Detalle del convertidor DAC de 8 bits, conectado a la tarjeta DE0-Nano y acoplando la señal entregada por el FPGA.

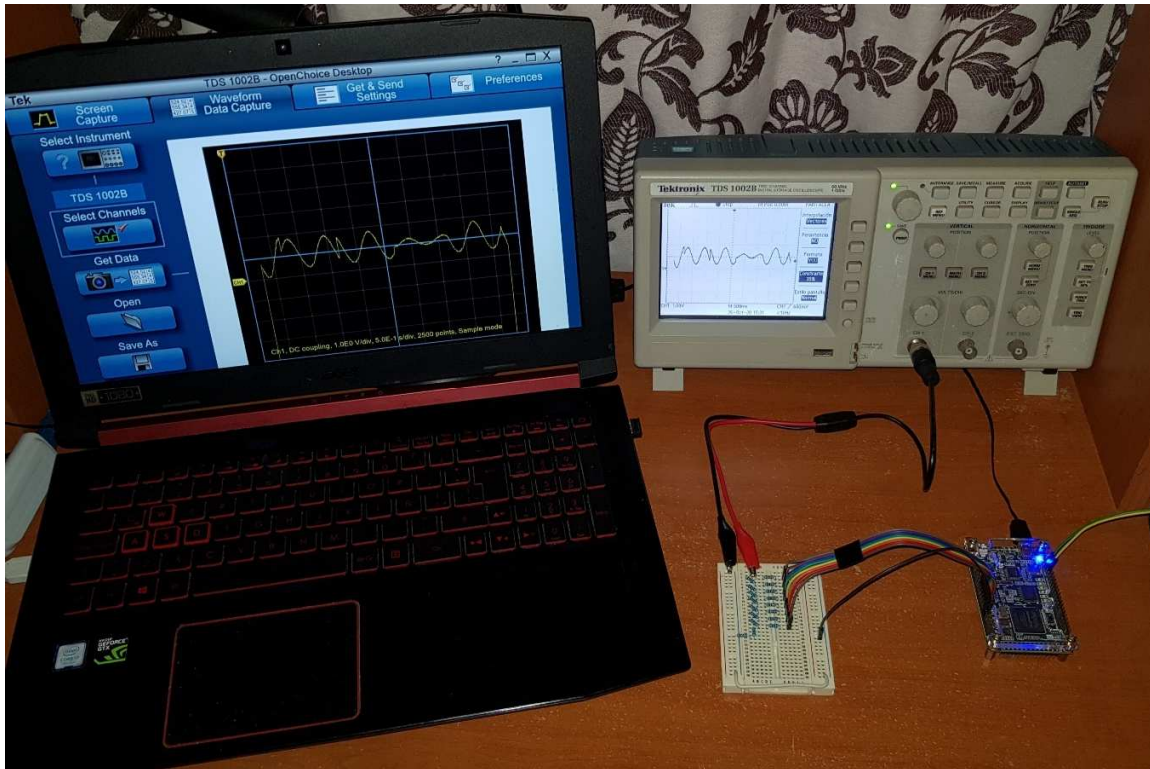


Figura 3.10. Detalle de la tarjeta DE0-Nano funcionando con el esquema NOMA implementado.

CAPÍTULO 4

Validación de la simulación y de la implementación del sistema NOMA propuesto

En el presente capítulo se explican los procedimientos de validación mediante los cuales se comprobó la funcionalidad tanto de la simulación como de la implementación en FPGA del esquema NOMA.

4.1. Descripción del método de validación para la simulación del sistema de transmisión NOMA

Validación es la acción y efecto de convertir algo en válido. Se conoce como *pruebas de validación* al proceso de revisión al que se somete un proyecto para comprobar que cumple con las especificaciones establecidas para su uso. Dicho proceso de revisión, que suele tener lugar al final de la etapa de desarrollo, se realiza principalmente con la intención de confirmar que el producto final del proyecto permita llevar a cabo las tareas que sus potenciales usuarios esperan de él [93].

El proceso de validación que se llevó al cabo para la simulación en MATLAB del sistema de transmisión NOMA de enlace descendente para dos usuarios se dividió en tres etapas:

1) *Etapa de acceso NOMA de dos señales reales.* Se capturaron dos señales distintas de voces humanas reales y fueron digitalizadas, moduladas (asignando a cada una un valor de amplitud de portadora propio y distinto de la otra), sumadas y enviadas en una sola señal. Esto es la esencia de un esquema de acceso NOMA para transmisión, por lo cual las etapas siguientes se realizaron en simulación estrictamente para efectos de validación.

2) *Etapa de representación del medio de transmisión.* Para la simulación se propone la transmisión de la señal por aire. Se establece que al encontrarse cada usuario ubicado a una distancia particular de la estación base, a la señal resultante, una vez transmitida, le afectan los factores de desvanecimiento y de ruido de manera individual para cada uno. Los elementos de pérdida por trayectoria y desvanecimiento por trayectorias múltiples de señal son factores multiplicativos (si no hay señal, no se observan sus efectos), mientras que el ruido blanco Gaussiano es un elemento aditivo (en la vida real el ruido puede encontrarse en el medio de transmisión independientemente de la presencia o ausencia de la señal). De esta manera se simulan los efectos de la transmisión de la señal cuando ésta ya se encuentra en el aire.

3) *Etapa de recepción y recuperación de las señales.* Para demostrar la funcionalidad del sistema NOMA desarrollado fue necesario diseñar y simular la etapa de recepción, en donde se separan las señales de los usuarios, se demodulan y se obtienen las señales analógicas a partir de las señales digitales demoduladas. Estas señales analógicas deben ser idénticas a las señales de voz que originalmente se capturaron, y cuya recuperación demuestra la funcionalidad del sistema, con lo cual se da por satisfactorio el proceso de validación de la simulación.

4.1.1. Etapa de acceso NOMA de dos señales reales

Cada señal de voz fue capturada por medio de los micrófonos integrados en el equipo de cómputo. Su digitalización se realizó en MATLAB con los siguientes parámetros:

Frecuencia de muestreo:	8 KHz.
Resolución:	8 bits.
Canales de audio:	1 canal.
Tiempo de grabación:	4 segundos.

Con estos parámetros, el programa genera 32,000 octetos (32,000 valores binarios de 8 bits cada uno) por cada señal de voz.

Dentro de la simulación, estos octetos fueron alineados en una sola fila, obteniendo entonces 256,000 valores binarios de un bit cada uno (por cada señal de voz). Con este procedimiento se obtuvo la información digitalizada que fue entregada a cada modulador.

En la figura 4.1 se muestra el diagrama de bloques correspondiente a la etapa de acceso NOMA de las dos señales digitalizadas, obteniendo así la señal única que en la simulación fue transmitida y que contiene la información de ambas señales de voz.

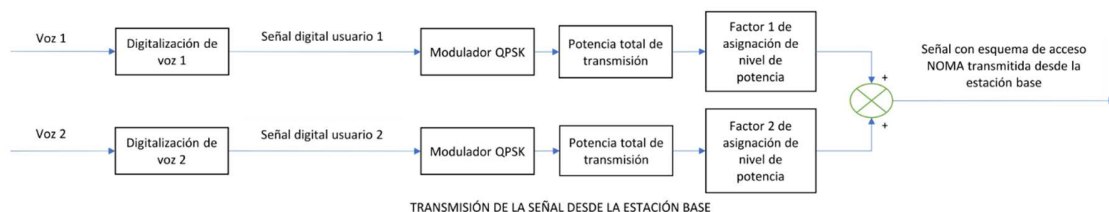


Figura 4.1. Etapa de generación, acceso NOMA y envío de las señales.

Después de digitalizar cada señal de voz, se realizó la modulación digital correspondiente, que en el presente trabajo fue modulación QPSK. Cada modulador utiliza una señal portadora cosenoidal de 2.4 GHz para los bits en fase, y una señal portadora senoidal de 2.4 GHz para los bits en cuadratura.

Posteriormente, la estación base asigna un nivel de potencia de transmisión que es común a todas las señales; para propósitos de simulación, y por conveniencia, la potencia asignada de transmisión de la estación base se propone unitaria.

Se aplican entonces los coeficientes de asignación de potencia, cada uno de los cuales es particular para cada usuario. Dado que estos coeficientes son factores multiplicativos, deberán cumplirse las siguientes condiciones:

a) Los coeficientes deben ser siempre diferentes, independientemente del número de señales. Si existen dos o más coeficientes iguales (en este caso sólo son 2), no habrá distinción de potencia entre las señales correspondientes y no se cumplirá con el trabajo de un esquema NOMA. Además, en la etapa de recepción no habrá manera de separar las señales porque desde el inicio no existió diferencia de potencia entre ellas.

b) La suma de los coeficientes deberá ser siempre 1, independientemente del número de señales. Si la suma excede de 1, se pretenderá obtener una potencia de transmisión equivalente a un valor mayor al disponible, de modo que sobrepasará la potencia total de transmisión asignada por la estación base, cosa que en la vida real es imposible (no habría forma de obtener energía de donde no hay), o en su caso, irá en detrimento de la calidad de la señal transmitida. Si la suma es menor que 1, la magnitud de la potencia de la señal transmitida caerá por debajo de la asignada por la estación base, lo que carece de sentido y representa un desperdicio de energía.

Se obtuvieron resultados óptimos en las pruebas de laboratorio asignando coeficientes de 0.4 y 0.6, respectivamente, para el caso de las dos señales de voz. Se debe mencionar que, aunque las mismas pruebas demostraron que es posible obtener buenos resultados con distintas proporciones (0.1 y 0.9, 0.2 y 0.8, 0.3 y 0.7), al agregar al sistema las condiciones del medio de transmisión, cuando la diferencia entre señales es muy grande la señal pequeña termina perdiéndose y sólo se recupera la señal del usuario que tuvo un coeficiente mayor de asignación de potencia.

Finalmente, las señales son sumadas. El sumador entrega una señal única que contiene la información de las dos señales de voz; esta señal es la que será transmitida.

Esto constituye la esencia de un sistema de transmisión NOMA de enlace descendente para dos usuarios. En esta etapa de la validación se comprobó la factibilidad de inyectar señales reales en el sistema, demostrando su capacidad para procesarlas.

4.1.2. Etapa de representación del medio de transmisión

En cualquier transmisión inalámbrica existen factores que pueden afectar a la señal transmitida de distintos modos. Para comprobar en el presente trabajo la funcionalidad del sistema en condiciones no ideales se consideraron tres situaciones al respecto: un factor multiplicativo de desvanecimiento por trayectorias múltiples de señal, un factor multiplicativo de pérdida de señal por trayectoria, y un ruido blanco Gaussiano aditivo. Dado que se propone que cada usuario se encuentre a una distancia particular a la estación base y distinta a la de los demás usuarios receptores, la señal transmitida será recibida por cada usuario con diferentes niveles de afectación; la magnitud de la pérdida por trayectoria depende de la distancia, y tanto dicha magnitud como las del desvanecimiento por trayectorias múltiples y el ruido blanco Gaussiano aditivo dependen de distintas variables aleatorias. Lo anterior se describe a continuación:

a) *Desvanecimiento por trayectorias múltiples de señal (multipath fading)*. En un entorno exterior real, las señales de radio rebotan en los edificios, árboles y otros objetos en el viaje entre los extremos del sistema de comunicación inalámbrico y que, como en este caso, usan un canal al aire libre. Este efecto de trayectorias múltiples produce múltiples ecos de la señal. Como resultado, la señal original y cada eco llegan al extremo receptor con una pequeña diferencia de tiempo, lo cual degrada la calidad de señal. En canales móviles la función de densidad de probabilidad Rayleigh es la que modela un canal inalámbrico con multitrayectoria para casos donde no existe línea de vista directa entre el usuario móvil y el transmisor; esto significa que el factor multiplicativo correspondiente presentará un valor cuya probabilidad tendrá una función de densidad Rayleigh [94]. El factor multiplicativo resultante puede ser mayor o menor que 1, por lo que puede atenuar o aumentar la amplitud de la señal.

b) *Pérdida por trayectoria*. El factor multiplicativo que determina la pérdida por trayectoria depende de una componente log-normal que representa las pérdidas por *shadowing*, cuyas características están definidas en función de una variable aleatoria Gaussiana, con media 0 y desviación estándar σ . Este factor multiplicativo siempre es menor que 1 y puede ser positivo o negativo.

c) *Ruido blanco Gaussiano aditivo (Additive White Gaussian Noise, AWGN)*. Es un modelo de ruido básico que se utiliza en la teoría de la información para imitar el efecto de muchos procesos aleatorios que ocurren en la naturaleza. Implica características específicas: es *ruido* porque cumple con la característica de ser una señal no deseada carente de información que se mezcla con la señal útil que se pretende transmitir; se le llama *blanco* porque se refiere a la idea de que tiene el poder uniforme en toda la banda de frecuencia para el sistema de información, es decir, se suma a la señal independientemente de la frecuencia y se le considera una mezcla de múltiples

ruidos existentes (es una analogía con el color blanco que tiene las emisiones uniformes en todas las frecuencias en el espectro visible); es *Gaussiano*, porque tiene una distribución normal (o distribución Gaussiana) en el dominio del tiempo con un valor promedio de cero (media cero); es *aditivo* porque que se añade a cualquier señal que pueda ser intrínseca al sistema de información [95].

Dentro de la simulación, estos factores se modelan con dependencia de las variables aleatorias mencionadas y se representa su influencia en un instante dado; esto significa que cada vez que se lleva a cabo la simulación, estas magnitudes presentan valores distintos y existe la posibilidad de que en un instante la señal no se recupere satisfactoriamente, lo que en la vida real equivale, en el peor de los casos, a un corte momentáneo de la señal.

En la figura 4.2 se muestra el diagrama de bloques en el que se representa lo que sucede con la señal cuando ya se encuentra en el aire antes de ser captada por los receptores (a los que respectivamente se les llama “usuario 1” y “usuario 2”). Es de gran importancia enfatizar que ambos usuarios reciben la misma señal, dado que en el esquema NOMA la información de ambos fue modulada, sumada y transmitida en esa sola señal. Se menciona a la “señal recibida por el usuario 1” y a la “señal recibida por el usuario 2” porque la misma señal fue afectada de diferente manera por los factores de desvanecimiento y por el ruido; la estación base emite una sola señal, pero ésta no llega igual a los dos usuarios porque sus distancias a la estación base son distintas.

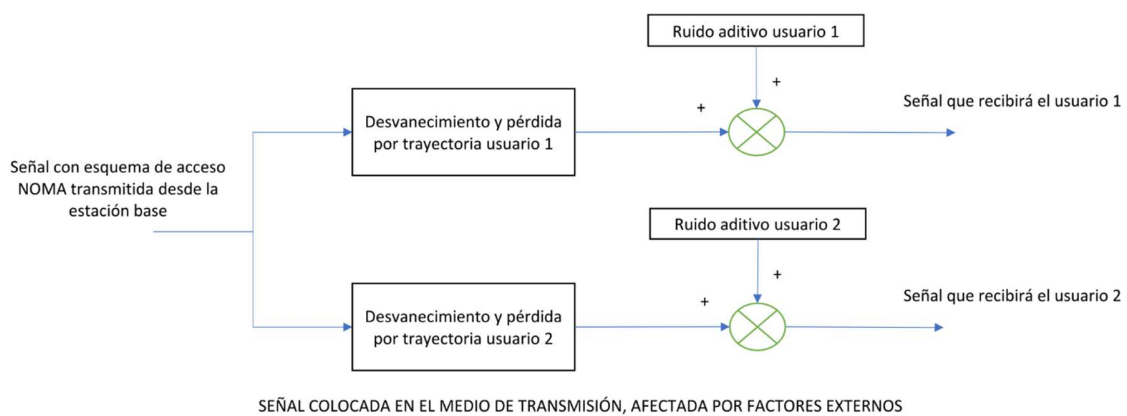


Figura 4.2. Etapa representativa del medio de transmisión. Dentro de la simulación, los usuarios se encuentran a distancias distintas de la estación base, por lo tanto la misma señal es recibida con distintos niveles de afectación.

En esta etapa se realizó un proceso de “estrés” de la señal imitando algunos de los factores que en la vida real afectan una señal transmitida por el aire, con la finalidad de comprobar posteriormente la integridad de la información que se transmite y la posibilidad de su recuperación.

4.1.3. Etapa de recepción y recuperación de las señales

Para demostrar la funcionalidad del esquema NOMA propuesto fue indispensable una etapa de recuperación de las señales capturadas. Dentro de la simulación, una vez que dichas señales fueron digitalizadas, moduladas y sumadas, se obtuvo una señal única que contiene la información de las dos señales anteriores; esta señal única fue afectada por factores de pérdida, desvanecimiento y ruido, y este último procedimiento se realizó dos veces a la misma señal estableciendo distancias diferentes de los usuarios a la estación base y generando las correspondientes variables aleatorias de manera individual para cada uno. Ahora (de la señal afectada) se procede a extraer la información de cada una de las señales originalmente capturadas. La figura 4.3 muestra el diagrama de bloques de la etapa de recuperación de las señales.

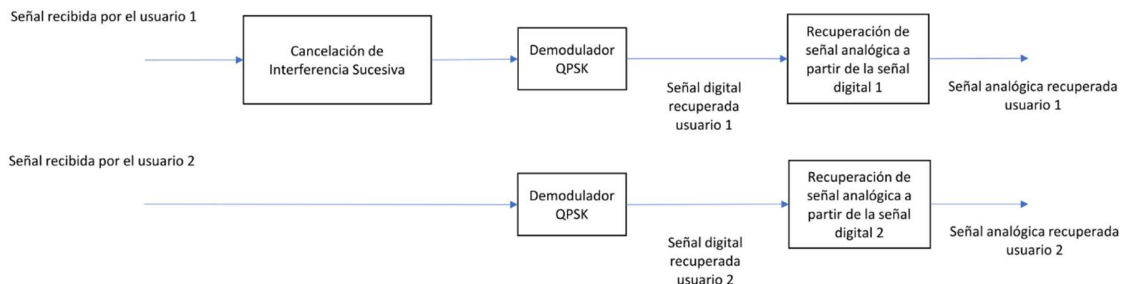


Figura 4.3. Etapa de separación y demodulación de las señales digitales, a partir de las cuales se recuperan las señales analógicas originalmente capturadas.

Para recuperar la señal del usuario 1, cuya amplitud es la más pequeña, se llevó al cabo el método de cancelación de interferencia sucesiva, mediante el cual se obtuvo la información de la señal del usuario 2 y se restó de la señal total. La diferencia entre la señal total y la señal del usuario 2 es precisamente la señal del usuario 1, la cual fue posteriormente demodulada para obtener la señal digital correspondiente, de donde se recuperó la señal analógica del usuario 1 originalmente capturada. Finalmente, esta señal analógica recuperada fue reproducida en los altavoces del equipo de cómputo.

La señal del usuario 2 tiene entonces mayor amplitud. Por esta razón, al ser mayor su proporción, es posible recuperar su señal digital simplemente demodulando la señal total, ya que en ésta, la señal del usuario 1 es mucho menor y puede ser tratada como ruido. Después se obtuvo de la señal digital recuperada la señal analógica de voz correspondiente al usuario 2 originalmente capturada, la cual fue también posteriormente reproducida en los altavoces de la computadora.

Con esto último se da por satisfactoria la validación de la simulación del sistema, con lo que también se establece la base para el desarrollo de la implementación física.

4.1.4. Conclusiones sobre el proceso de validación de la simulación en MATLAB

La figura 4.4 muestra la gráfica de la señal de voz asignada al usuario 1 que fue capturada en la simulación, mientras que en la figura 4.5 se observa la señal recuperada correspondiente. Las figuras 4.6 y 4.7 muestran lo propio para el usuario 2.

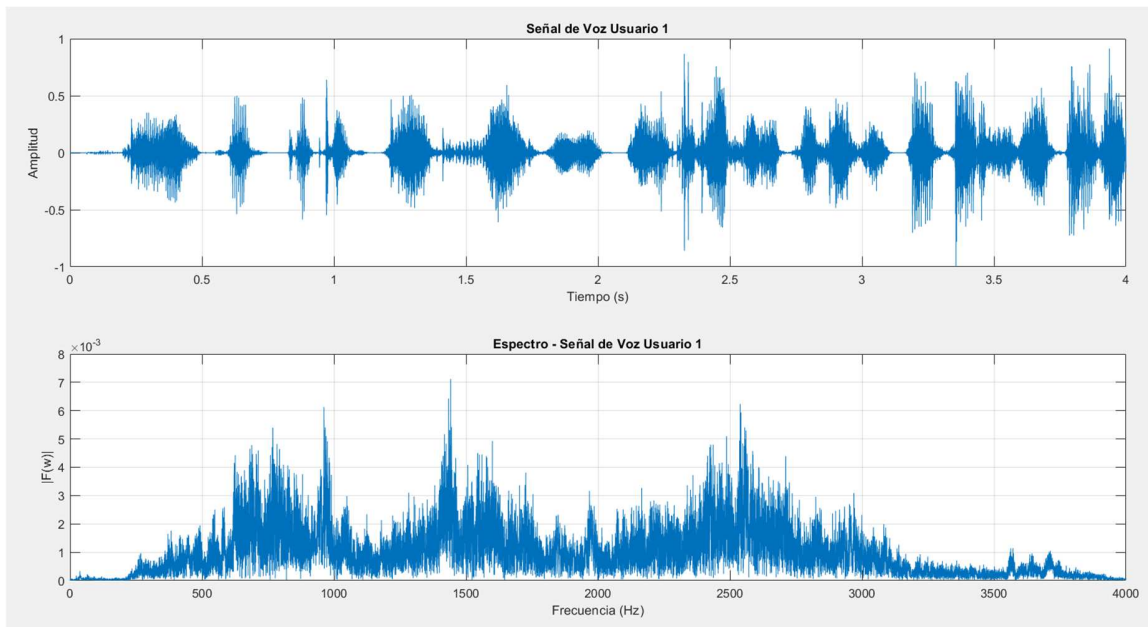


Figura 4.4. Señal de voz del usuario 1, representada en tiempo y frecuencia.

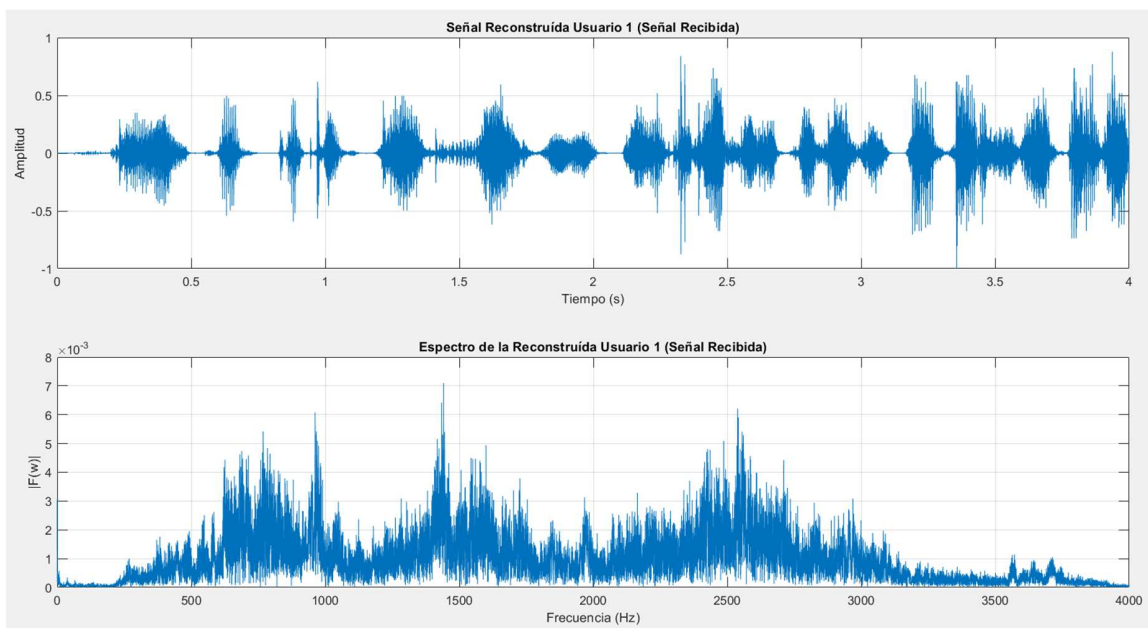


Figura 4.5. Señal recuperada de voz del usuario 1, representada en tiempo y frecuencia.

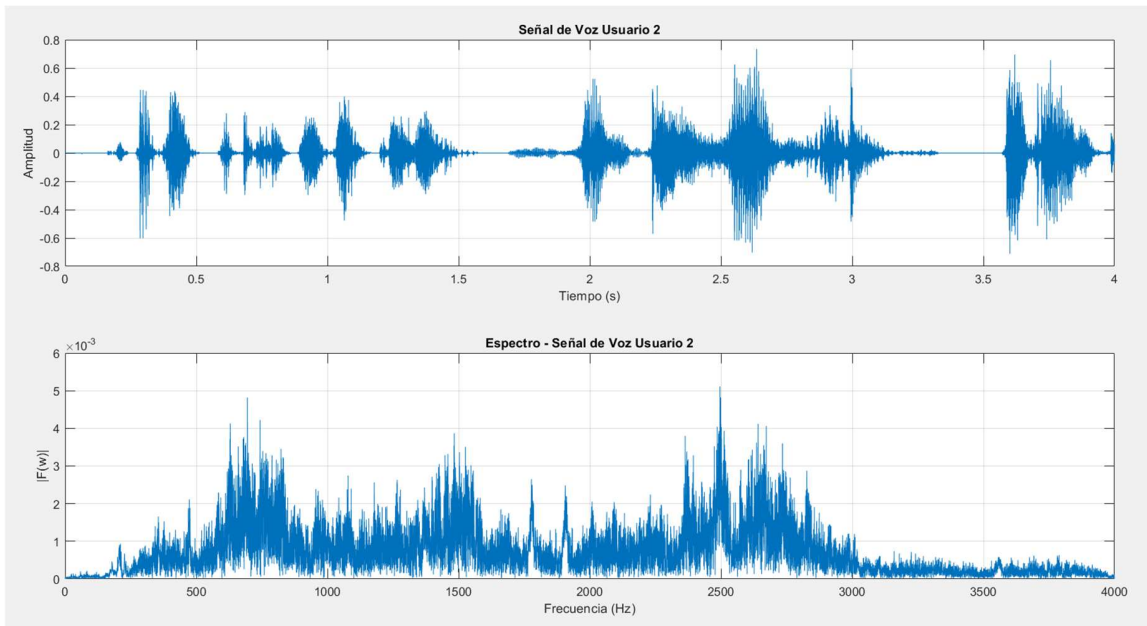


Figura 4.6. Señal de voz del usuario 2, representada en tiempo y frecuencia.

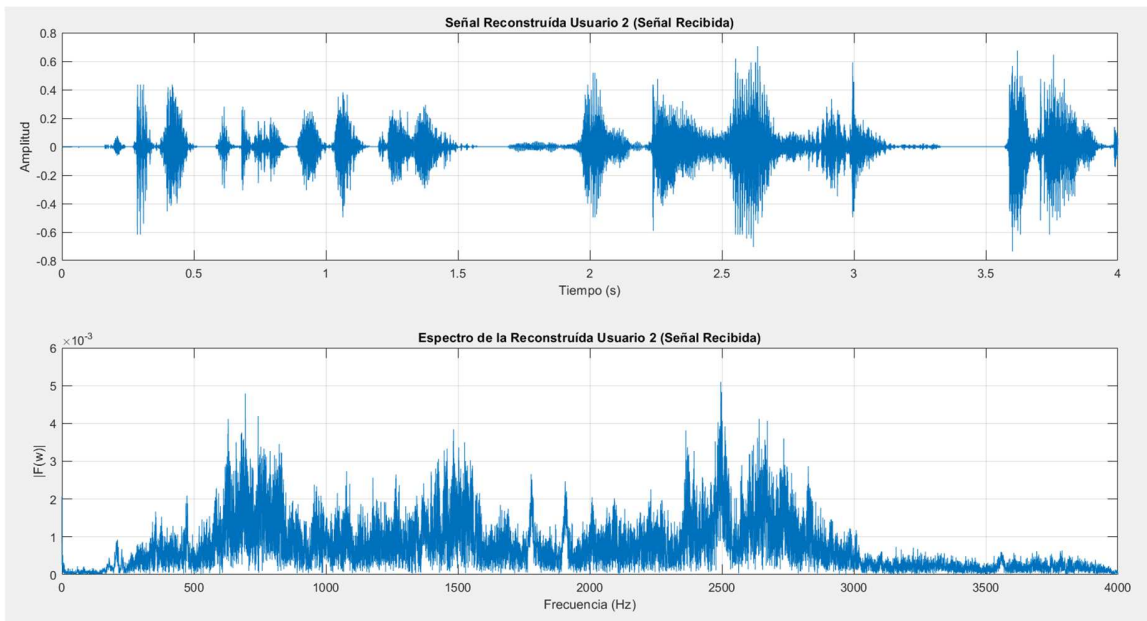


Figura 4.7. Señal recuperada de voz del usuario 2, representada en tiempo y frecuencia.

Todo sistema de comunicación tiene por objetivo transportar información real de un punto a otro, lo que significa que se debió trabajar con dos señales naturales aun cuando se trató de una simulación. Su validación implicaba entonces comprobar que el sistema es capaz de procesar estas señales naturales, unir las en una sola señal, transmitir las juntas, y separarlas y recuperarlas con la mayor similitud posible con las originales y sin interferencias.

El proceso de captura, digitalización, modulación, asignación de niveles de potencia, suma y transmisión de las señales, con las respectivas afectaciones, no representó problemas más allá de las pruebas necesarias para optimizar la simulación. Sin embargo, para el proceso de separación de las señales fue necesario desarrollar completamente el esquema de cancelación de interferencia sucesiva, lo que requirió probar y descartar múltiples diseños y operaciones. Lo anterior se considera de suma utilidad para anticiparse a posibles errores en la implementación.

Las figuras mostradas permiten comparar gráficamente las señales capturadas con las señales recuperadas; el sistema simulado fue capaz de reconstruir ambas señales de voz.

4.2. Descripción del método de validación para la implementación del sistema de transmisión NOMA en FPGA

El sistema de transmisión NOMA implementado en FPGA debe admitir dos señales digitalizadas, modularlas, asignar un factor de potencia de señal particular para cada una, sumarlas y entregar una señal única que contenga la información de las dos señales digitalizadas. Se establece entonces que si se introducen determinadas señales digitalizadas en la simulación y ésta nos entrega una señal correspondiente al esquema de acceso NOMA, el FPGA debe entregar una señal idéntica si se le introducen las mismas señales digitalizadas.

El proceso de validación que se llevó al cabo para la implementación en FPGA del sistema de transmisión NOMA de enlace descendente para dos usuarios se dividió en tres etapas:

1) *Etapas de revisión y corrección de los bloques de implementación.* La implementación consistió en configurar en el FPGA el sistema de transmisión con esquema de acceso NOMA, sin embargo, para procesar señales digitalizadas reales, todo sistema físico debe pasar por un proceso de ajuste, y en caso necesario, de modificaciones menores. Aunque el sistema cumplía ya con la función de modular e integrar dos señales digitales en un esquema de acceso NOMA, fue necesario contar con dos bloques adicionales en la parte inicial del sistema y modificar la conexión entre bloques en una parte intermedia del mismo, lo cual se explica más adelante.

2) *Etapas de comprobación de las señales moduladas y de los valores adecuados de las fases de inicio de cada símbolo.* Se introdujeron valores binarios específicos de prueba tanto a la simulación como a la implementación del sistema para comprobar que en éste se realizan los mismos cambios de fase cuando los valores cambian en un orden determinado. Estos valores tienen relación directa con la manera en que funciona un modulador QPSK, dado que los moduladores toman por pares los valores de los bits

de entrada; se observó, mediante pruebas de laboratorio, la respuesta del sistema a secuencias de bits específicas.

3) *Etapa de prueba con valores de bits correspondientes a una señal real.* Para optimizar la validación y facilitar la visualización en osciloscopio de la señal con esquema de acceso NOMA que entrega el FPGA, se optó por introducir dos secuencias de bits correspondientes a la digitalización de dos frases escritas en texto, las cuales fueron traducidas a código ASCII y posteriormente convertidas a valores binarios. Este paso dio como resultado dos vectores de 424 valores binarios, y cada uno fue introducido en cada una de las entradas de los divisores de bits.

4.2.1. Etapa de revisión y corrección de los bloques de implementación

En la figura 4.8 se muestra el esquema completo del sistema (generado por Quartus Prime a partir del código VHDL) con tres modificaciones principales con respecto al sistema prototipo.

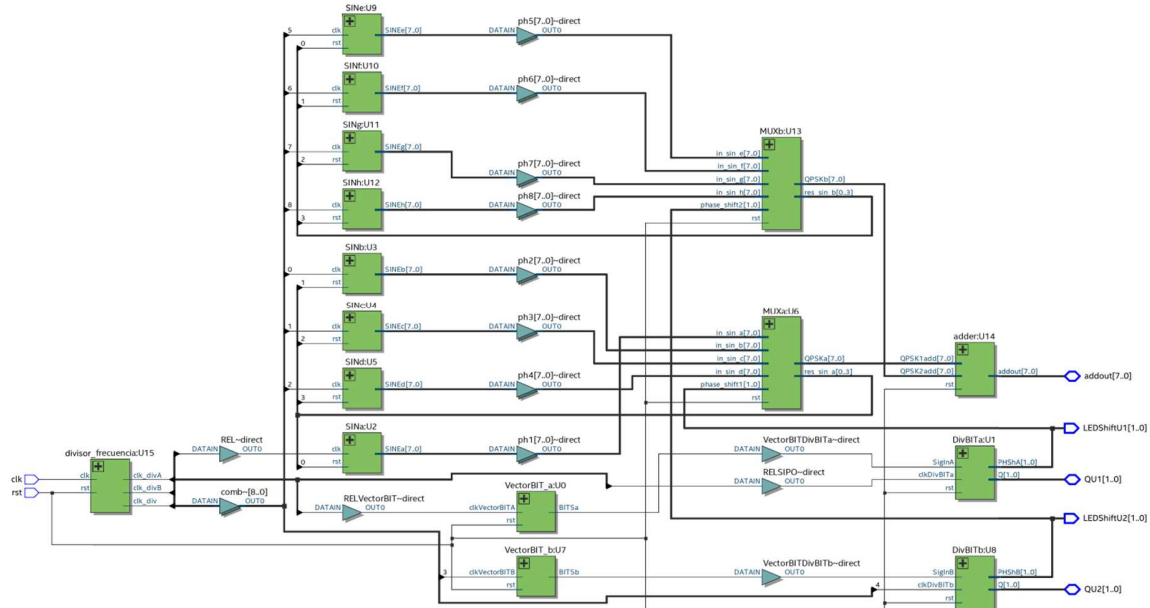


Figura 4.8. Esquema completo del sistema, generado por Quartus Prime a partir del código VHDL, con tres modificaciones principales con respecto al sistema prototipo.

Modificación 1: Se agregaron los bloques *VectorBIT_a* y *VectorBIT_b*, cada uno de los cuales proporciona los valores binarios correspondientes a la información a transmitir de cada usuario; la característica particular de estos bloques es que los valores binarios se encuentran almacenados en su código. Se tomó esta opción para efectos de demostración, aunque el sistema en todo momento es capaz de trabajar con señales binarias externas simplemente modificando el código para retirar estos

bloques o para utilizarlos como vía de paso (como registros de desplazamiento SISO) para determinar en su caso la frecuencia de muestreo con la que el sistema toma los valores binarios de dichas señales. Los bloques cuentan con las entradas *clkVectorBITA* y *clkVectorBITB*, mediante las cuales reciben la señal de reloj para determinar la frecuencia con la cual proporcionarán los valores binarios a los divisores de bit de cada modulador; esta señal de reloj, que en este caso es de 1 Hz, proviene del divisor de frecuencia, al cual se le agregó la correspondiente salida *clk_divB*. También cuentan con la entrada *rst* para reiniciar su ciclo de trabajo cada vez que sea necesario. Los valores binarios correspondientes a la información de los usuarios son dirigidos a las entradas de los divisores de bits por medio de las salidas *BITSa* y *BITSb*.

Modificación 2: En cada modulador QPSK, cada generador de portadoras debe comenzar su ciclo de trabajo con su valor determinado de ángulo de fase inicial al momento de ser seleccionado por el multiplexor correspondiente, con la finalidad de que en cada cambio de los valores de bits correspondientes a la información a transmitir se realice el cambio de fase esperado. Del mismo modo, cada generador de portadora debe detenerse e inicializarse cuando no es seleccionado, ya que de lo contrario no se obtendrían los valores de fase correspondientes a la información de usuario. Para lograrlo, fueron agregadas a los multiplexores las salidas *res_sin_a* y *res_sin_b*, de cuatro bits cada una, con la finalidad de enviar un valor lógico '1' a la entrada *rst* de cada generador cuando es seleccionado y un valor lógico '0' a la entrada *rst* de cada generador cuando no es seleccionado, de modo que en cada cambio de fase en esta salida se les envían 3 valores '0' y un valor '1' a la vez por parte de cada multiplexor (las entradas *rst* de todos los bloques que las contienen son activas en bajo). Con esto se consigue que sólo trabaje el generador seleccionado de cada modulador, mientras que los demás se encuentran detenidos e inicializados en su valor requerido de ángulo de fase.

Modificación 3: Se descartó la entrada *enable* de los bloques generadores de portadoras, dado que en ningún momento es necesario pausar o interrumpir su ciclo de trabajo. No sólo no es necesario; en caso de hacerlo, dicha interrupción produce información errónea en las salidas de los moduladores correspondientes. Su inicialización, cuando es requerida, es controlada desde los multiplexores.

Una característica no enumerada (dado que no influye en el funcionamiento del sistema) fue que en los LEDs incorporados a la tarjeta DE0-nano pueden visualizarse las secuencias (en pares) de bits entregadas por los divisores de bit para observar sus valores en tiempo real, así como las señales de reloj proporcionadas para monitorear los pulsos de reloj provenientes del divisor de frecuencia, con lo cual se optimizó considerablemente el proceso de validación.

4.2.2. Etapa de comprobación de las señales moduladas y de los valores adecuados de las fases de inicio de cada símbolo

Dado que el esquema de acceso NOMA implementado en el FPGA utiliza moduladores QPSK en su proceso, cada símbolo entregado corresponde a un par de bits de la secuencia de cada usuario. Para comprobar la funcionalidad del sistema y el correcto cambio de fases en la señal entregada, se utilizó como referencia la simulación, cuya validación ya había sido realizada. En las entradas de señal de ambos usuarios, tanto en la implementación como en la simulación, se hizo incidir simultáneamente la secuencia de bits “00011011001111111111”, para verificar que los cambios de fase sean los mismos al aplicar los mismos valores. El resultado se puede observar en la figura 4.9, que indica una comparación entre la señal NOMA entregada por la simulación con la señal NOMA entregada por el FPGA. Cada símbolo QPSK (es decir, cada segmento de gráfica comprendido entre dos cambios de fase) corresponde a cada par de valores de la secuencia aplicada.

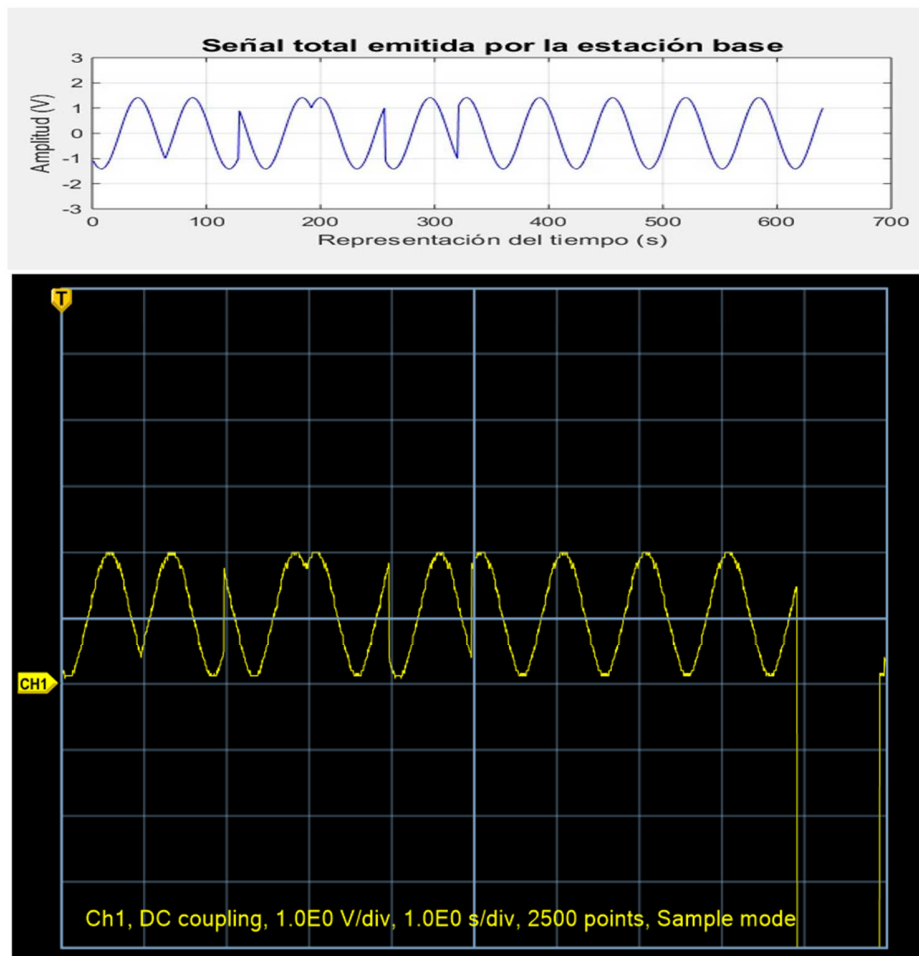


Figura 4.9. Comparación de las señales entregadas tanto en la simulación como en la implementación al aplicar a ambas la secuencias de bits “00011011001111111111”.

4.2.3. Etapa de prueba con valores de bits correspondientes a una señal real

Finalmente se hizo incidir, tanto en la simulación como en la implementación, las secuencias de bits correspondientes a dos textos en valores binarios.

A la entrada de señal binaria correspondiente al usuario 1 (tanto en la simulación como en la implementación) se le aplicó la secuencia

```
"01001100011000010111001100100000011000110110111101110011011000010  
111001100100000011100010111010101100101001000000111011001100001011  
011000110010101101110001000000110110001100001001000000111000001100  
101011011100110000100100000011011100110111100100000011100110110010  
100100000011010000110000101100011011001010110111000100000011000110  
110111101101110001000000110011001100001011000110110100101101100011  
01001011001000110000101100100",
```

que corresponde al texto "Las cosas que valen la pena no se hacen con facilidad", traducido al código ASCII y convertido a valores binarios.

Por su parte, a la entrada de señal binaria correspondiente al usuario 2 (tanto en la simulación como en la implementación) se le aplicó la secuencia

```
"01000101011011000010000001101101011101010111001001100011011010011  
100001110101001011011000110000101100111011011110010000001101101011  
001010010000001101000011000010010000001101101011011110111001001100  
100011010010110010001101111001000000110110101110101011000110110100  
001100001011100110010000001101101011101010110001101101000110000111  
010110101110011011010010110110101100001011100110010000001110110011  
00101011000110110010101110011",
```

que corresponde al texto "El murciélago me ha mordido muchas muchísimas veces", traducido al código ASCII y convertido a valores binarios.

Las figuras 4.10 y 4.11 muestran la comparación de las señales entregadas en 2 fragmentos; se observan los cambios de fase correspondientes a la modulación y las variaciones de amplitud correspondientes a la suma aritmética de las señales. En la parte superior de cada figura puede verse la gráfica correspondiente a la simulación en MATLAB al aplicar al sistema NOMA la señal binaria correspondiente a ambos textos, mientras que en la parte inferior se observa la captura de la señal mostrada por el osciloscopio entregada por el sistema implementado en el FPGA al aplicarle las señales binarias idénticas.

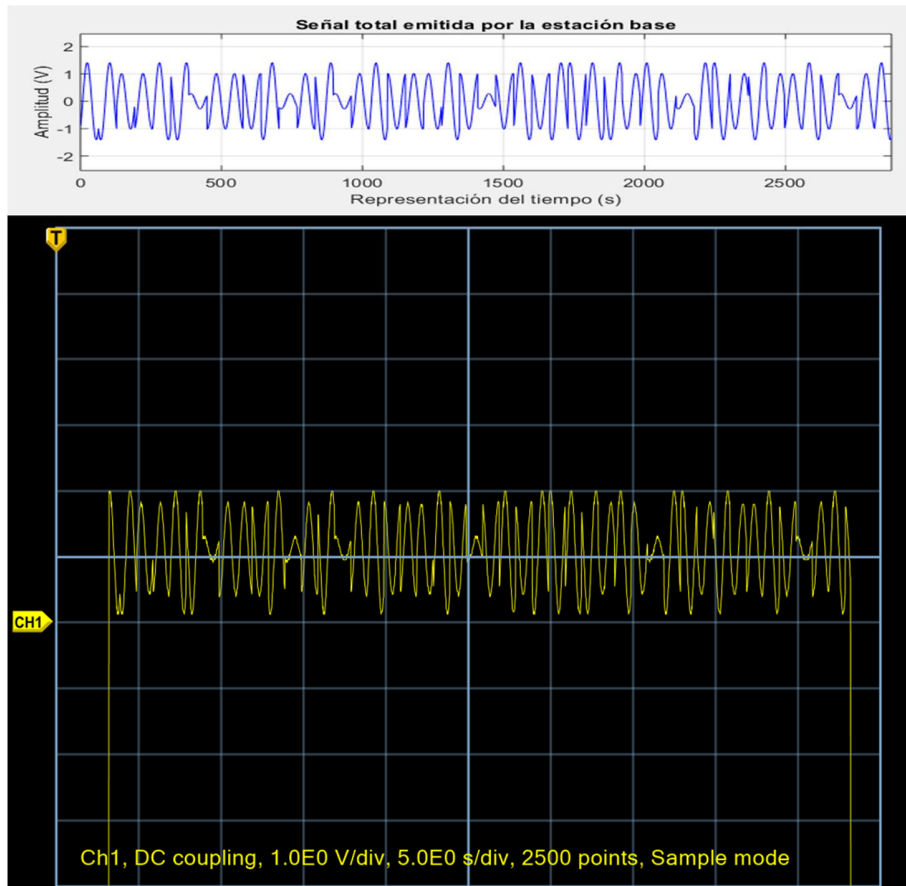


Figura 4.10. Fragmento de la señal NOMA entregada por la simulación y de la señal NOMA entregada por el FPGA. Ambas señales integran la información correspondiente al texto de prueba.

Es posible comparar entonces la señal de la simulación contra la señal de la implementación. Como puede verse en ambas figuras, los cambios de fase y de amplitud de la señal entregada por la simulación corresponden con los de la señal entregada por la implementación.

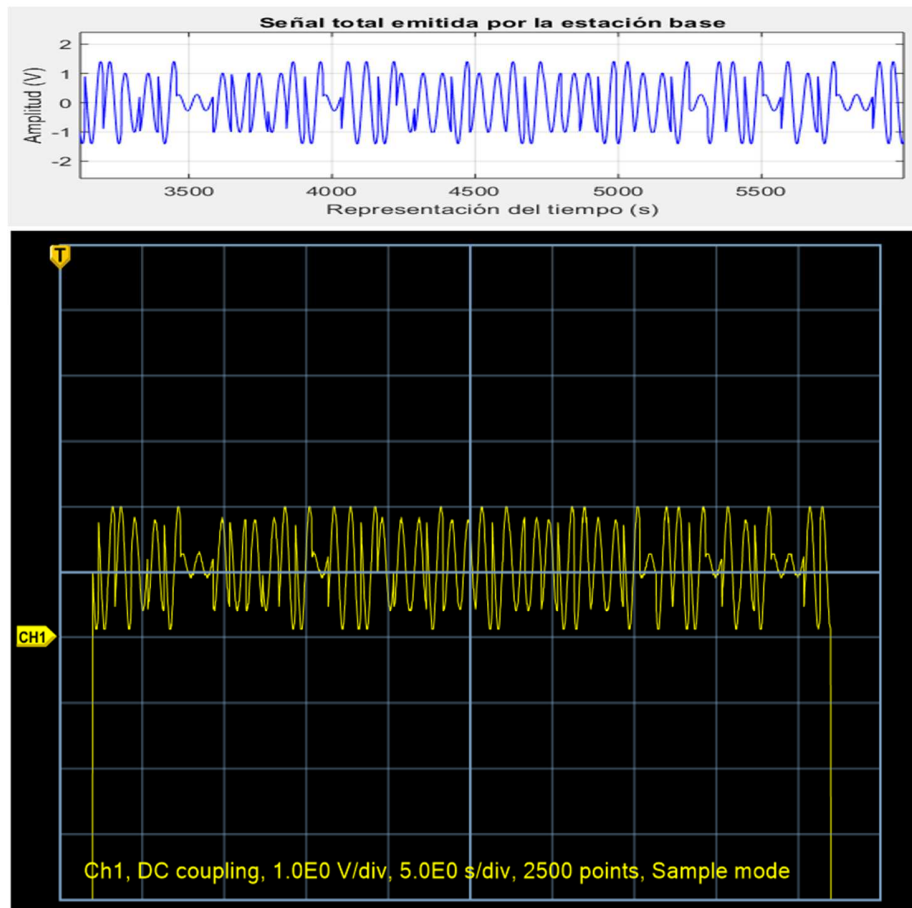


Figura 4.11. Fragmento de la señal NOMA entregada por la simulación y de la señal NOMA entregada por el FPGA. Ambas señales integran la información correspondiente al texto de prueba.

Con esto último se da por realizada la validación de la implementación del transmisor, al demostrar gráficamente que el FPGA es capaz de entregar una señal similar a la simulación al aplicarle secuencias idénticas de valores binarios.

4.2.4. Conclusiones sobre el proceso de validación para la implementación del sistema de transmisión NOMA en FPGA

Para la validación del sistema implementado, las modificaciones realizadas al código VHDL del sistema transmisor fueron importantes para corregir posibles errores en su funcionamiento; en la implementación inicial se obtuvo una señal NOMA, pero dichas modificaciones fueron decisivas para obtener una señal funcional que puede ser decodificada para recuperar las señales binarias originales con un procedimiento similar al desarrollado en la simulación.

Inicialmente se pretendía utilizar señales de audio, de la misma manera que en la simulación, sin embargo no fue factible utilizar el convertidor ADC integrado en la tarjeta de desarrollo por diversas razones:

- El convertidor ADC toma del exterior las señales analógicas (tiene capacidad para 8 canales) y entrega los valores binarios en un solo entramado de bits para todos los canales. Esto significa que de un solo entramado de bits, que se entrega por un solo pin del FPGA, salen en secuencia y en orden de número de canal todas las señales. Esto hace necesario un multiplexaje en tiempo para separar cada canal de los demás, lo cual introduciría secciones importantes de espacios vacíos de bits en las secuencias resultantes, lo que resultaría en múltiples errores de información en la modulación y en el acceso. Esto se puede resolver utilizando convertidores ADC externos que entreguen simultáneamente todas sus señales sin interrupciones, lo cual se puede implementar posteriormente.
- La secuencia resultante de una señal de audio consta de miles de valores binarios; se optó entonces, para simplificar la demostración de la funcionalidad del sistema y captar la totalidad de la señal NOMA entregada, utilizar una secuencia de bits del proceso de digitalización de un texto, lo cual permitió mostrar toda la secuencia de bits y la señal NOMA en su totalidad por segmentos, tanto de la simulación como de la implementación.

Los bloques divisores de bits eran considerados bloques SIPO 1 a 2, pero fue evidente que lo que se requería era diferente: el sistema debe manejar por pares los bits, y no debe ser un desplazamiento en la salida, por lo que debieron ser diseñados desde cero.

Más allá de lo mencionado, la validación del sistema de transmisión NOMA arrojó resultados satisfactorios.

CONCLUSIONES GENERALES

Para concluir, se hace mención general acerca del diseño del sistema, así como algunas de las posibilidades que el mismo ofrece para su uso y aplicación.

En la simulación se contemplan las etapas de transmisión y de recepción, lo cual permitió demostrar la funcionalidad del sistema al aplicar a la señal NOMA entregada por el transmisor diversos factores aditivos y multiplicativos que simulan una transmisión inalámbrica en condiciones no ideales sin perder la información; para ello fue necesario diseñar en su totalidad el proceso de separación de señales, lo cual sienta un precedente de vital importancia para la posterior implementación de los receptores, que puede ser en dispositivos fijos o también puede ser en FPGAs. La simulación tuvo un papel decisivo en el diseño del código para lograr la implementación, por el momento, de la etapa del transmisor.

En general, en la implementación no se presentaron dificultades más allá de las referentes a los errores en la señal NOMA entregada por el sistema, la cual al principio no coincidía exactamente con la entregada por la simulación, lo cual fue corregido llevando a cabo las modificaciones correspondientes y los ajustes y correcciones en el código VHDL que nos permitieran obtener un sistema funcional y sólido; una de las grandes ventajas de utilizar un dispositivo programable por lenguaje de descripción de Hardware es que cualquier ajuste y/o modificación del sistema se lleva a cabo modificando líneas de código, lo cual representa una de las razones principales para realizar el presente trabajo. Se pueden manipular frecuencias, niveles de voltaje, números de bits de los puertos de entradas y salidas, número de usuarios, y prácticamente todos los parámetros del sistema completo con el solo hecho de modificar el código VHDL.

Los resultados fueron satisfactorios. Al tratarse de un sistema implementado en un dispositivo reprogramable es posible realizar cualquier cambio modificando el código VHDL, lo cual permite que sea la base para sistemas mucho más grandes. El presente documento se podrá utilizar como guía para futuros diseños, y es la pauta para la implementación de la etapa de recepción.

Se destacan los siguientes puntos:

- En el sistema se utiliza la estrategia de modulación QPSK por ser robusta a las condiciones de movilidad en una red.
- En este trabajo se hace la implementación del sistema en un FPGA, lo que no tiene precedente porque no se ha reportado hasta el momento ningún desarrollo similar.
- Para la recuperación de la señal se está proponiendo un método nuevo de separación de las señales involucradas como parte de la estrategia de cancelación de interferencia sucesiva.

- En el presente trabajo se valida la robustez del sistema afectando la señal transmitida por factores de desvanecimientos rápido y lento, y ruido externo; aún en estas condiciones, la información correspondiente a cada usuario se recupera satisfactoriamente.
- En la literatura disponible se puede observar que, en gran parte de los trabajos existentes, las condiciones no ideales se contemplan escasamente, y en algunos no son tomadas en cuenta.
- El nivel de optimización en la programación del FPGA fue alto, en virtud de que se utilizó el 2% de los elementos lógicos del dispositivo para el transmisor completo, además de que se utilizaron 18 pines de 154 disponibles.

Como trabajo a futuro se destaca lo siguiente:

- Se propone como siguiente paso la implementación de los receptores en FPGA.
- Los esquemas de acceso multiusuario existen en las comunicaciones tanto alámbricas y de fibra óptica (medios guiados) como en las inalámbricas (medios no guiados). El presente trabajo se llevó a cabo con la idea original de utilizarse en comunicaciones inalámbricas, aunque finalmente la intención es que no se limite a eso; la configuración del sistema implementado permite tomar la señal y radiarla por medio de una antena, o acoplarla en un filtro fotónico para fibra óptica, o simplemente aplicarla en un cable para ser conducida a los receptores. También permite transmitir señales prácticamente de todo tipo mientras sea posible digitalizarlas.
- Desarrollar el sistema para un mayor número de usuarios. Realizar las pruebas de laboratorio y los ajustes necesarios.
- Implementar otros elementos en el FPGA en la medida en que crezca el número de usuarios.

REFERENCIAS

- [1] -Kukushkin, Alexander. "Types of Mobile Network by Multiple-Access Scheme," en *Introduction to Mobile Network Engineering: GSM, 3G-WCDMA, LTE and the Road to 5G*, Wiley, 2018, pp.3-4.
- [2] -Universidad Internacional de Valencia. (2018, Mar 21). Evolución de la red de comunicación móvil, del 1G al 5G [Online]. Available: <https://www.universidadviu.com/>
- [3] -M. L. J. Vora, "Evolution of Mobile Generation Technology : 1G To 5G and Review of Upcoming Wireless Technology 5G" *Sci. J. Impact Factor*, vol. 2, no. 10, pp. 281– 291, 2015.
- [4] -P. Popovski *et al.*, "Short Papers," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. c, pp. 1–4, 2018.
- [5] -S. Chatzinotas *et al.*, "Energy-Efficient and Secure Resource Allocation for Multiple-Antenna NOMA With Wireless Power Transfer," *IEEE Trans. Green Commun. Netw.*, vol. 2, no. 4, pp. 1059–1071, 2018.
- [6] -Z. Ding, P. Fan, and H. Vincent Poor, "Impact of Non-Orthogonal Multiple Access on the Offloading of Mobile Edge Computing," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 1, pp. 375–390, 2019.
- [7] -M. N. Jamal, S. A. Hassan, D. N. K. Jayakody, and J. P. Joel, "Efficient Nonorthogonal," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. PP, no. december, p. 1, 2018.
- [8] -X. Li, F. R. Yu, H. Ji, V. C. M. Leung, and Y. Liu, "Distributed Resource Allocation and Computation Offloading in Fog and Cloud Networks With Non-Orthogonal Multiple Access," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 12, pp. 12137–12151, 2019.
- [9] -D. Ni, L. Hao, Q. T. Tran, and X. Qian, "Transmit Power Minimization for Downlink Multi-Cell Multi-Carrier NOMA Networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 12, pp. 2459–2462, 2018.
- [10] -Z. Wei, X. Zhu, S. Sun, J. Wang, and L. Hanzo, "Energy-efficient full-duplex cooperative nonorthogonal multiple access," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 10, pp. 10123–10128, 2018.
- [11] -B. Li, X. Qi, K. Huang, Z. Fei, F. Zhou, and R. Q. Hu, "Security-reliability tradeoff analysis for cooperative NOMA in cognitive radio networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 1, pp. 83–96, 2019.
- [12] -H. Zhang, N. Yang, K. Long, M. Pan, G. K. Karagiannidis, and V. C. M. Leung, "Secure communications in NOMA system: Subcarrier assignment and power allocation," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 36, no. 7, pp. 1441–1452, 2018.
- [13] -S. Zhang, X. Xu, H. Wang, J. Peng, D. Zhang, and K. Huang, "Enhancing the physical layer security of uplink non-orthogonal multiple access in cellular internet of things," *IEEE Access*, vol. 6, no. c, pp. 58405–58417, 2018.
- [14] -B. Zheng *et al.*, "Secure NOMA Based Two-Way Relay Networks Using Artificial Noise and Full Duplex," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 36, no. 7, pp. 1426–1440, 2018.

- [15] -Y. Alsaba, C. Y. Leow, and S. K. Abdul Rahim, "A zero-sum game approach for non-orthogonal multiple access systems: Legitimate eavesdropper case," *IEEE Access*, vol. 6, no. c, pp. 58764–58773, 2018.
- [16] -A. Castiglione, X. Su, J. Gu, P. Nkurunziza, and C. Choi, "Inter-beam Interference Cancellation and Physical Layer Security Constraints by 3D Polarized Beamforming in Power Domain NOMA Systems," *IEEE Trans. Sustain. Comput.*, pp. 1–1, 2017.
- [17] -M. Chraïti, A. Gh-rayeb, and C. Assi, "A NOMA Scheme Exploiting Partial Similarity among Users Bit Sequences," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 10, pp. 4923–4935, 2018.
- [18] -X. Gu, L. Wang, W. Xiang, Q. Guo, and M. Jia, "A Low Complexity Detection Algorithm for Fixed Up-Link SCMA System in Mission Critical Scenario," *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 5, pp. 3289–3297, 2017.
- [19] -J. He, Z. Tang, Z. Tang, H. H. Chen, and C. Ling, "Design and Optimization of Scheduling and Non-Orthogonal Multiple Access Algorithms with Imperfect Channel State Information," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 11, pp. 10800–10814, 2018.
- [20] -J. H. Lee and J. Song, "Beamforming via Array Pattern Synthesis for Millimeter Wave NOMA Downlink Transmission," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 12, pp. 12363–12367, 2018.
- [21] -A. Mokdad, P. Azmi, S. Member, N. Mokari, M. Moltafet, and M. Ghaffari-miab, "Cross-Layer Energy Efficient Resource Allocation in PD-NOMA based H-CRANs : Implementation via GPU," vol. 1233, no. c, pp. 1–14, 2018.
- [22] -M. Moltafet, R. Joda, N. Mokari, M. R. Sabagh, and M. Zorzi, "Joint access and fronthaul radio resource allocation in PD-NOMA-based 5G networks enabling dual connectivity and CoMP," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 12, pp. 6463–6477, 2018.
- [23] -B. K. Ng and C. T. Lam, "Joint Power and Modulation Optimization in Two-User Non-Orthogonal Multiple Access Channels: A Minimum Error Probability Approach," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 11, pp. 10693–10703, 2018.
- [24] -H. Wang, S. H. Leung, and R. Song, "Precoding Design for Two-Cell MIMO-NOMA Uplink with CoMP Reception," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 12, pp. 2607–2610, 2018.
- [25] -L. Wang, M. Guan, Y. Ai, Y. Chen, B. Jiao, and L. Hanzo, "Beamforming-Aided NOMA expedites collaborative multiuser computational offloading," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 10, pp. 10027–10032, 2018.
- [26] -Y. Wu, K. Ni, C. Zhang, L. P. Qian, and D. H. K. Tsang, "Noma-assisted multi-access mobile edge computing: A joint optimization of computation offloading and time allocation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 12, pp. 12244–12258, 2018.
- [27] -W. Yu, L. Musavian, and Q. Ni, "Link-Layer Capacity of NOMA under Statistical Delay QoS Guarantees," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 10, pp. 4907–4922, 2018.
- [28] -T. M. Nguyen, W. Ajib, and C. Assi, "A novel cooperative NOMA for designing UAV-assisted wireless backhaul networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 36, no. 11, pp. 2497–2507, 2018.

- [29] -X. Yue, Z. Qin, Y. Liu, S. Kang, and Y. Chen, "A unified framework for non-orthogonal multiple access," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 11, pp. 5346–5359, 2018.
- [30] -A. Anwar, B. C. Seet, S. F. Hasan, X. J. Li, P. H. J. Chong, and M. Y. Chung, "An analytical framework for multi-tier NOMA networks with underlay D2D communications," *IEEE Access*, vol. 6, no. c, pp. 59221–59241, 2018.
- [31] -B. Van Nguyen, Q. D. Vu, and K. Kim, "Analysis and optimization for weighted sum rate in energy harvesting cooperative NOMA systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 12, pp. 12379–12383, 2018.
- [32] -L. Chen, L. Ma, Y. Xu, and V. Leung, "Hypergraph Spectral Clustering Based Spectrum Resource Allocation for Dense NOMA-HetNet," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 2337, no. c, pp. 1–4, 2018.
- [33] -Z. Ding, B. K. Chalise, Z. Mobini, A. Hakimi, M. Mohammadi, and H. A. Suraweera, "Beamforming Design and Power Allocation for Full-Duplex Non-Orthogonal Multiple Access Cognitive Relaying," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 12, pp. 5952–5965, 2018.
- [34] -M. Choi, D. J. Han, and J. Moon, "Bi-Directional Cooperative NOMA Without Full CSIT," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 17, no. 11, pp. 7515–7527, 2018.
- [35] -Y. Zhang, Q. Guo, Z. Wang, J. Xi, and N. Wu, "Block sparse bayesian learning based joint user activity detection and channel estimation for grant-free NOMA systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 10, pp. 9631–9640, 2018.
- [36] -Y. Du *et al.*, "Block-Sparsity-Based Multiuser Detection for Uplink Grant-Free NOMA," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 17, no. 12, pp. 7894–7899, 2018.
- [37] -C. Guo, A. N. Aljalai, C. Feng, L. Zhao, V. C. M. Leung, and R. K. Ward, "Compute-and-forward for uplink non-orthogonal multiple access," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 7, no. 6, pp. 986–989, 2018.
- [38] -G. Li, D. Mishra, and H. Jiang, "Cooperative NOMA with Incremental Relaying: Performance Analysis and Optimization," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 11, pp. 11291–11295, 2018.
- [39] -Z. Yu, C. Zhai, J. Liu, and H. Xu, "Cooperative Relaying Based Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) with Relay Selection," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 12, pp. 11606–11618, 2018.
- [40] -K. S. Kwak, H. Liu, H. V. Poor, K. J. Kim, and Z. Ding, "Decode-and-Forward Relaying for Cooperative NOMA Systems With Direct Links," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 17, no. 12, pp. 8077–8093, 2018.
- [41] -R. Tang, H. Qu, J. Zhao, J. Cheng, and Z. Cao, "Distributed resource allocation for IBFD-Enabled NOMA systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 11, pp. 2318–2321, 2018.
- [42] -X. Chen and R. Jia, "Exploiting rateless coding for massive access," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 11, pp. 11253–11257, 2018.
- [43] -M. Jia, D. Li, Z. Yin, Q. Guo, and X. Gu, "High Spectral Efficiency Secure Communications with Non-Orthogonal Physical and Multiple Access Layers," *IEEE Internet Things J.*, vol. 4662, no. c, 2018.
- [44] -G. Sun, W. Hao, K.-K. Wong, S. Yang, F. Zhou, and Z. Chu, "Green Communication for NOMA-Based CRAN," *IEEE Internet Things J.*, vol. 4662, no. c, pp. 1–1, 2018.

- [45] -L. Dai, B. Wang, M. Peng, and S. Chen, "Hybrid precoding-based millimeter-wave massive MIMO-NOMA with simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 37, no. 1, pp. 131–141, 2019.
- [46] -C. Chen, B. Wang, and R. Zhang, "Interference Hypergraph-Based Resource Allocation (IHG-RA) for NOMA-Integrated V2X Networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 4662, no. c, pp. 1–10, 2018.
- [47] -D. Zhai and R. Zhang, "Joint admission control and resource allocation for multi-carrier uplink NOMA networks," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 7, no. 6, pp. 922–925, 2018.
- [48] -L. Xu, Y. Zhou, P. Wang, and W. Liu, "Max-min resource allocation for video transmission in NOMA-based cognitive wireless networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 11, pp. 5804–5813, 2018.
- [49] -H. Zhu, Y. Cao, T. Jiang, and Q. Zhang, "Scalable NOMA multicast for SVC streams in cellular networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 12, pp. 6339–6352, 2018.
- [50] -J. Choi, "Multichannel NOMA-ALOHA game with fading," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 10, pp. 4997–5007, 2018.
- [51] -T. Hou, Y. Liu, Z. Song, X. Sun, and Y. Chen, "Multiple Antenna Aided NOMA in UAV Networks: A Stochastic Geometry Approach," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 6778, no. c, pp. 1–14, 2018.
- [52] -H. Pan, S. C. Liew, J. Liang, Y. Shao, and L. Lu, "Network-coded multiple access on unmanned aerial vehicle," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 36, no. 9, pp. 2071–2086, 2018.
- [53] -Z. Ding, P. Fan, G. K. Karagiannidis, R. Schober, and H. V. Poor, "NOMA assisted wireless caching: Strategies and performance analysis," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 10, pp. 4854–4876, 2018.
- [54] -O. Abbasi, A. Ebrahimi, and N. Mokari, "NOMA Inspired Cooperative Relaying System Using an AF Relay," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 2337, no. 1, pp. 10–13, 2018.
- [55] -Y. Li and G. A. Aruma Baduge, "NOMA-aided cell-free massive MIMO systems," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 7, no. 6, pp. 950–953, 2018.
- [56] -S. Hu *et al.*, "Nonorthogonal interleave-grid multiple access scheme for industrial internet of things in 5g network," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 14, no. 12, pp. 5436–5446, 2018.
- [57] -M. Mohammadkarimi, M. A. Raza, and O. A. Dobre, "Massive Multiple," no. december 2018, 2020.
- [58] -B. Alzahrani and W. Ejaz, "Resource Management for Cognitive IoT Systems With RF Energy Harvesting in Smart Cities," *IEEE Access*, vol. 6, no. c, pp. 62717–62727, 2018.
- [59] -N. Rupasinghe, Y. Yapici, I. Guvenc, and Y. Kakishima, "Non-orthogonal multiple access for mmWave drone networks with limited feedback," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 1, pp. 762–777, 2019.
- [60] -Z. Tang, J. Wang, J. Wang, and J. Song, "On the Achievable Rate Region of NOMA under Outage Probability Constraints," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 7798, no. c, pp. 1–4, 2018.

- [61] -H. Cao, J. Cai, S. Huang, and Y. Lu, "Online Adaptive Transmission Strategy for Buffer-Aided Cooperative NOMA Systems," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, pp. 1–13, 2018.
- [62] -L. Yang, H. Jiang, Q. Ye, Z. Ding, L. Lv, and J. Chen, "On the Impact of User Scheduling on Diversity and Fairness in Cooperative NOMA," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 11, pp. 11296–11301, 2018.
- [63] -Y. Sun, Z. Ding, and X. Dai, "On the performance of downlink NOMA in multi-cell mmWave networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 11, pp. 2366–2369, 2018.
- [64] -D. Cai, Z. Ding, P. Fan, and Z. Yang, "On the performance of NOMA with hybrid ARQ," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 10, pp. 10033–10038, 2018.
- [65] -Y. Fu, L. Salaun, C. W. Sung, and C. S. Chen, "Subcarrier and Power Allocation for the Downlink of Multicarrier NOMA Systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 12, pp. 11833–11847, 2018.
- [66] -M. Hedayati and I. M. Kim, "On the Performance of NOMA in the Two-User SWIPT System," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 11, pp. 11258–11263, 2018.
- [67] -J. Li and J. Xiao, "Short Papers," no. November, pp. 1–4, 2017.
- [68] -Y. Li and G. A. A. Baduge, "Underlay Spectrum-Sharing Massive MIMO NOMA," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 1, pp. 116–119, 2019.
- [69] -M. Sinaie, D. Wing Kwan Ng, and E. A. Jorswieck, "Resource allocation in NOMA virtualized wireless networks under statistical delay constraints," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 7, no. 6, pp. 954–957, 2018.
- [70] -L. Zhu, J. Zhang, Z. Xiao, X. Cao, and D. O. Wu, "Optimal User Pairing for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 2337, no. c, pp. 1–4, 2018.
- [71] -T. G. Nguyen *et al.*, "Performance Analysis of DF/AF Cooperative MISO Wireless Sensor Networks With NOMA and SWIPT Over Nakagami," *IEEE Access*, vol. 6, no. c, pp. 56142–56161, 2018.
- [72] -J. B. Seo, B. C. Jung, and H. Jin, "Performance analysis of NOMA random access," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 11, pp. 2242–2245, 2018.
- [73] -H. Zheng, S. Hou, H. Li, Z. Song, and Y. Hao, "Power allocation and user clustering for uplink MC-NOMA in D2D underlaid cellular networks," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 7, no. 6, pp. 1030–1033, 2018.
- [74] -H. Sun, F. Zhou, R. Q. Hu, and L. Hanzo, "Robust beamforming design in a NOMA cognitive radio network relying on SWIPT," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 37, no. 1, pp. 142–155, 2019.
- [75] -S. Zhao, M. Tian, and Q. Li, "Robust Transmission in Non-Orthogonal Multiple Access AF Relay Networks," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 7, no. 6, pp. 1078–1081, 2018.
- [76] -X. Chen, R. Jia, and D. W. K. Ng, "The application of relay to massive non-orthogonal multiple access," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 11, pp. 5161–5180, 2018.
- [77] -F. Wei, W. Chen, Y. Wu, J. Li, and Y. Luo, "Toward 5G Wireless," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. PP, no. October, p. 1, 2018.
- [78] -J. B. Seo and H. Jin, "Two-user NOMA uplink random access games," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 11, pp. 2246–2249, 2018.

- [79] J. Cui, Z. Ding, P. Fan, and N. Al-Dhahir, "Unsupervised machine learning-based user clustering in millimeter-Wave-NOMA systems," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 17, no. 11, pp. 7425–7440, 2018.
- [80] -N. Zhang, K. Cheng, and G. Kang, "A Machine-Learning-Based Blind Detection on Interference Modulation Order in NOMA Systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 12, pp. 2463–2466, 2018.
- [81] -Luo, Fa-Long, Zhang, Charlie. "Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA): Concept and Design", en: *Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementation*. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd., 2016., pp. 143-144.
- [82] -Garg, Vijay. "Multiple access techniques", en: *Wireless Communications and Networking*. USA: Elsevier, Inc, 2007 PP:152-154.
- [83] -Garg, Vijay. "Multiple access techniques", en: *Wireless Communications and Networking*. USA: Elsevier, Inc, 2007 PP:154-156.
- [84] -Diaz, M. (1997). Esquemas de acceso para sistemas móviles de tercera generación: cdma. *Buran*, 5(9), 5–10.
- [85] -C. Yang, Samuel. "Introduction to OFDM and OFDMA", en: *OFDMA, System Analysis and Design*. USA: Artech House, 2010, PP. 8-13
- [86] -Luo, Fa-Long, Zhang, Charlie. "Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA): Concept and Design", en: *Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementation*. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd., 2016., PP. 148-149.
- [87] -Turmero, Pablo. Principios de modulación [Online]. Available: <https://www.monografias.com/trabajos105/principios-modulacion/principios-modulacion.shtml>
- [88] -Luo, Fa-Long, Zhang, Charlie. "Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA): Concept and Design", en: *Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementation*. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd., 2016., P. 145.
- [89] -Z. Ding et al., "Application of Non-Orthogonal Multiple Access in LTE and 5G Networks," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 2, pp. 185-191, February 2017.
- [90] -J. Choi, "On the Power Allocation for MIMO-NOMA Systems With Layered Transmissions," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 5, pp. 3226-3237, May 2016
- [91] -Y. Zhou, V. W. S. Wong and R. Schober, "Performance Analysis of Cooperative NOMA with Dynamic Decode-and-Forward Relaying," *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, Singapore, 2017, P. 2.
- [92] DE0-NANO User Manual, Terasic Altera. Copyright 2003-2013, Terasic Technologies, Inc.
- [93] -Pérez Porto, Julián, Gardey, Ana. (2013). Definición de Validación [Online]. Available: <https://definicion.de/validacion/>
- [94] -Angel Del Valle Diego, M., Enríquez Caldera, R., Manuel Ramírez Cortés, J., & Martínez Carballido, J. "Modelado De Canal Inalámbrico Ofdm, Hacia Las Comunicaciones 4G". PP 1–7, 2009
- [95] -(2020, Apr 20). Ruido Gaussiano Blanco Aditivo - Additive white Gaussian noise [Online]. Available: https://es.qwe.wiki/wiki/Additive_white_Gaussian_noise

APÉNDICE A: Artículos escritos

Portada del artículo que fue aceptado para el congreso *Green 2020, The Fifth International Conference on Green Communications, Computing and Technologies*, organizado por la *International Academy, Research, and Industry Association (IARIA)*, a celebrarse del 21 al 25 de noviembre del año en curso en la ciudad de Valencia, España. La conferencia es en línea.

Health Risks from Exposure to Electromagnetic Waves Radiation from 5G

Rodrigo Cuevas-Terrones
Facultad de Ciencias de la Electrónica
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Puebla, México
e-mail: rodrigo.cuevast@alumno.buap.mx

Ana María Rodríguez-Domínguez
Facultad de Ciencias de la Electrónica
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Puebla, México
e-mail: anamaria.rodriguez@correo.buap.mx

Josefina Castañeda-Camacho
Facultad de Ciencias de la Electrónica
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Puebla, México
e-mail: josefina.castaneda@correo.buap.mx

Gerardo Mino-Aguilar
Facultad de Ciencias de la Electrónica
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Puebla, México
e-mail: gerardo.mino@correo.buap.mx

Abstract— This work shows a compilation of the results of some studies related with the affectations in living organisms produced by electromagnetic waves radiation based on their power and frequency ranges. Currently, the growing of the population throughout the planet makes necessary an analysis of the nature of these electromagnetic waves and their effects on living beings, specially in wireless communications field. Due to the nature of the information to be transmitted, the next generation of mobile telephony (5G) requires bands with higher frequencies than the current and previous generations for its operation, so it's needed to establish ranges of these that can be considered non-harmful in living beings. In the present work, a detailed study was done about electromagnetic waves, including the frequency bands that were previously and currently used in mobile telephony, and some of their effects on living organisms, with the aim of publicizing some of the possible consequences of the evolution of mobile telephony on them.

Keywords - 5G; electromagnetism; frequency; electromagnetic radiation.

I. INTRODUCTION

The present work deals with the effects of electromagnetic waves radiation on living beings. Electromagnetic waves have the main characteristic of not needing material means of propagation; unlike other wave types (such as sound, which needs a material medium to propagate), electromagnetic waves can be radiated in vacuum or in various materials and environments. In [1], electromagnetic wave radiation is defined as a combination of oscillating electric and magnetic fields that propagate through space carrying energy from one place to another. The radiations, ordered according to their wavelength (λ), make up the electromagnetic spectrum, which is discussed in Section II of this work. The wavelength of an electromagnetic wave (λ) is related to its frequency (f) and propagation speed (v) according to:

$$\lambda = v/f. \quad (1)$$

In free space, the propagation speed of electromagnetic waves is equal to the speed of light c ; so,

$$c = \text{light propagation speed} = 299\,792\,458 \text{ m/s,} \\ (\text{approximately } 3 \times 10^8 \text{ m/s}).$$

Therefore, for the radiation of electromagnetic waves:

$$c = \lambda f \quad (2)$$

Since the light speed is constant, as the frequency increases (and the wavelength decreases at the same proportion), the radiated energy increases.

X-rays, radio waves, infrared rays, ultraviolet rays, and visible light are some of the most important types of electromagnetic radiation, and humans have learned to usefully produce and control them.

In this paper, we study electromagnetic waves from the point of view of their frequency values according to their uses and their Ionizing and Non-ionizing quality. Some of its effects on living organisms are mentioned, and a reference is made to used frequencies in cell phones. The objective and the main contribution of this work is to present some of the results of previous studies about potential risks of the fifth generation of cellular telephony (5G); although there are no solid conclusions or hard data about the effect of this generation, it is already possible to know some of the potential risks.

This work is a review article, which means that information from previous and current works was collected and presented, indicating the proper references.

The rest of this paper is organized as follows: Section II describes electromagnetic waves in a general way and mentions some of their uses and their effects on living organisms according to their frequencies. It also describes certain characteristics of ionizing radiation and non-ionizing radiation. Section III deals with the generations of mobile phones and some of the frequencies used so far. Section IV talks about the situation regarding 5G, showing the results of

Portada del artículo a ser publicado en la revista Electronics, perteneciente al foro internacional MDPI Open Access Journals.



1 Article

2 A novel SIC procedure for a QPSK NOMA system

3

4 **Rodrigo Cuevas-Terrones*, Josefina Castaneda-Camacho, Ana M. Rodriguez-Dominguez, German**
5 **A. Munoz-Hernandez, Jose F. Guerrero-Castellanos and Gerardo Mino-Aguilar**

6 Benemerita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica Puebla, Mexico;
7 rodrigo.cuevast@alumno.buap.mx, josefina.castaneda@correo.buap.mx, anamaria.rodriguez@correo.buap.mx,
8 germanardul.munoz@correo.buap.mx, fermi.guerrero@correo.buap.mx, gerardo.mino@correo.buap.mx
9

10 * Correspondence: rodrigo.cuevast@alumno.buap.mx

11

12 Received: date; Accepted: date; Published: date

13

14 **Abstract:** The NOMA multi-User access scheme is considered as the basis of transmissions for the new
15 generation cellular systems (5G), although by its nature it can be used for many types of communication.
16 The signals can simultaneously use the same frequency / time multiplexing, separating each one by
17 assigning different levels of power; this implies that the resulting transmitted signal will be equal to the
18 sum of all the superimposed signals. In this document, a new Successive Interference Cancellation
19 technique is proposed to separate two signals that were added as a single signal. The corresponding
20 simulation is performed in MATLAB and then the results are shown and discussed.

21

22 **Keywords:** NOMA; SIC; Cellular Systems.

23

24 1. Introduction

25

26 A NOMA system carries out the separation of user links through different power levels of the signals
27 for users and using the differences between these levels to separate them, giving us a new way of
28 providing multi-user access schemes. The key is to have signals with significant differences in their
29 power levels, so that it could be possible to establish more than one link in the same frequency spectrum,
30 only taking advantage of those differences in signal powers. This can allow a greater range of wireless
31 connection possibilities, mainly to connect a greater number of users. This also makes possible to consider
32 the utility of implementing the NOMA scheme in the next generation of 5G cellular telephony (still in
33 development to date). Given the growing of demand for services that already exists today in the field of
34 wireless Internet and the Internet of Things, the recent progress of NOMA in 5G systems is exhaustively
35 analyzed in [1]. The authors review the cutting-edge capacity analysis, energy allocation strategies, user
36 equity and user pairing schemes in NOMA, and how it works when it is integrated with different wireless
37 communications techniques, such as cooperative communications, MIMO systems, beamforming, space-
38 time coding, and network coding, among others, is discussed. As there are different ways to take
39 advantage of a NOMA scheme, in [2], a NOMA-assisted relay system for 5G is proposed by allowing the
40 collaboration of source-relay and relay-destination NOMA links, in which the relay node decodes the

APÉNDICE B: Código VHDL del divisor de bits y del multiplexor

El código VHDL con el cual fue desarrollada la implementación en FPGA del sistema NOMA consta de 16 componentes de funciones específicas. Se muestra el código VHDL de dos de éstos.

El primer código de componente a mostrar es el correspondiente al divisor de bits *DivBITa*, que recibe en serie los valores de bit correspondientes a la información del usuario 1 y los entrega por pares. En un ciclo de reloj se toma un valor y en el siguiente ciclo se toma el siguiente valor; en éste segundo ciclo, el bloque entrega ambos valores simultáneamente. No es un registro SIPO, puesto que no desplaza cada valor por separado, sino que entrega cada par de valores durante dos ciclos de reloj.

```
library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
use IEEE.STD_LOGIC_ARITH.ALL;
use IEEE.STD_LOGIC_UNSIGNED.ALL;

entity DivBITa is

port(
    rst: in std_logic;
    SigInA: in std_logic;
    clkDivBITa: in std_logic;
    Q: inout std_logic_vector(1 downto 0);
    PHShA: inout std_logic_vector(0 to 1));

end DivBITa;

architecture behavioral of DivBITa is

signal temp: std_logic_vector(1 downto 0);

begin

process (clkDivBITa, rst, Q)
begin
    if rst='0' then
        Q <= (others => '0');
    elsif clkDivBITa='0' and clkDivBITa'event then
        Q <= Q + 1;
    else
        Q <= Q;
    end if;
end process;
```

```

process (temp, Q)
begin
    case Q(0) is
    when '0' =>temp(0)<=SigInA;
    when '1' =>temp(1)<=SigInA;
    end case;
    end process;

process (temp, Q)
begin
if Q(0)='0' and Q(0)'event then
PHShA<=temp;
else
PHShA<=PHShA;
end if;
end process;

    end behavioral;

```

El segundo código de componente a mostrar es el correspondiente al multiplexor de bits *MUXa*, que selecciona a cada uno de los generadores de portadora en la secuencia determinada por la señal binaria entregada por el divisor de bits *DivBITa*; éste multiplexor, además de seleccionar para su salida uno de los 4 generadores de portadora, cuenta adicionalmente con la salida *res_sin_a* de cuatro bits, cada uno de los cuales se encuentra conectado a cada generador de portadora en su entrada *rst*. Ésta salida de cuatro bits envía una señal '1' al bit significativo correspondiente al generador seleccionado, mientras envía una señal '0' al resto de los bits significativos. Con esta modificación se logra que sólo trabaje el generador seleccionado, mientras los tres restantes se encuentran en reset e inicializados.

```

library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
use IEEE.STD_LOGIC_ARITH.ALL;
use IEEE.STD_LOGIC_UNSIGNED.ALL;

entity MUXa is

port(
    rst: in std_logic;
    phase_shift1: in std_logic_vector (1 downto 0);
    in_sin_a: in std_logic_vector (7 downto 0);
    in_sin_b: in std_logic_vector (7 downto 0);
    in_sin_c: in std_logic_vector (7 downto 0);
    in_sin_d: in std_logic_vector (7 downto 0);
    res_sin_a: out std_logic_vector (0 to 3);

```

```

        QPSKa: out std_logic_vector (7 downto 0));
end MUXa;

architecture behavioral of MUXa is
begin

    process (rst, phase_shift1, in_sin_a, in_sin_b,
in_sin_c, in_sin_d)
    begin
        if rst = '0' then
            QPSKa<="01001011";
        else
            case phase_shift1 is
                when "00" => QPSKa <= in_sin_c;
                when "01" => QPSKa <= in_sin_b;
                when "11" => QPSKa <= in_sin_a;
                when "10" => QPSKa <= in_sin_d;
            when others => QPSKa <= "00000000";
            end case;

            case phase_shift1 is
                when "00" => res_sin_a <= "0010";
                when "01" => res_sin_a <= "0100";
                when "11" => res_sin_a <= "1000";
                when "10" => res_sin_a <= "0001";
            when others => res_sin_a <= "0000";
            end case;

        end if;
    end process;
end behavioral;

```