

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias de la Electrónica

Maestría en Ciencias de la Electrónica  
Opción en Automatización



Tesis para obtener el grado de  
*Maestro en Ciencias de la Electrónica*

**DISEÑO DE LA INTERFAZ DE AIRE DE UN SISTEMA DE ACCESO NOMA  
PARA SU INSTRUMENTACIÓN EN PLATAFORMA FPGA**

Alumno: **Ing. Steven Gersain Pérez Cortés\***

Directores de Tesis: **Dra. Josefina Castañeda Camacho (FCE-BUAP)**

**Dr. José Moisés Gutiérrez Arias (FCE-BUAP)**

Colaborador externo: **Dra. Gabriela Pérez Osorio (FIQ-BUAP)**

\*Becario CONACYT

Puebla, Pue. 1 de febrero de 2025

# Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Dra. Josefina Castañeda Camacho, quien ha sido una presencia fundamental en este camino en el fascinante mundo de las comunicaciones. Su dedicación, tanto como docente como ser humano, ha tenido un impacto profundo en mi desarrollo académico y personal. A lo largo de este proceso, no solo he aprendido de su vasto conocimiento en el campo, sino también de su generosidad y disposición para ayudar.

A mis padres, Gersain Perez Vázquez e Irene Cortes Arenas, quienes han sido mi pilar fundamental a lo largo de este increíble viaje. Su amor incondicional, su apoyo constante y su sabiduría infinita han sido la luz que me ha guiado en cada paso hacia la consecución de mis sueños y objetivos. A lo largo de este camino, no solo han sido mis padres, sino también mis consejeros, mis mayores motivadores y mis más fieles aliados. Su respaldo, que nunca ha vacilado, me ha dado la fuerza necesaria para superar cada desafío y seguir adelante, incluso cuando las dificultades parecían insuperables. Gracias a ellos, he aprendido no solo la importancia de la perseverancia, sino también el valor de la humildad, el trabajo arduo y la gratitud.

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>II</b>
<b>Resumen</b>	<b>VI</b>
<b>Introducción</b>	<b>VII</b>
Definición del problema . . . . .	VII
Justificación . . . . .	VII
Objetivos . . . . .	IX
Objetivo general . . . . .	IX
Objetivos particulares . . . . .	IX
Estado del arte . . . . .	IX
Solución propuesta . . . . .	X
<b>1. Sistemas de comunicación inalámbricos</b>	<b>1</b>
1.1. Generaciones de teléfonos móviles . . . . .	1
1.1.1. Primera generación (1G) . . . . .	1
1.1.2. Segunda generación (2G) . . . . .	2
1.1.3. Tercera generación (3G) . . . . .	2
1.1.4. Cuarta generación (4G) . . . . .	2
1.1.5. Quinta generación (5G) . . . . .	2
1.2. Esquemas de acceso multiusuario . . . . .	3
1.2.1. FDMA (Acceso múltiple por división de frecuencia) . . . . .	4
1.2.2. TDMA (Acceso múltiple por división de tiempo) . . . . .	4
1.2.3. CDMA (Acceso múltiple por división de código) . . . . .	5
1.2.4. OFDMA (Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal) . . . . .	6
1.3. NOMA . . . . .	6
1.4. Codificación . . . . .	7
1.5. Modulación . . . . .	7
1.6. Interfaz de aire . . . . .	8
<b>2. Áreas de cobertura</b>	<b>9</b>
2.1. Distribución de la red celular . . . . .	9
2.1.1. Características de una celda hexagonal . . . . .	10
2.1.2. Reusos de frecuencia . . . . .	11
2.2. Modelos de propagación . . . . .	12

2.2.1.	Fenómenos de propagación . . . . .	13
2.2.2.	Modelo del espacio libre . . . . .	15
2.2.3.	Modelo de 2 rayos . . . . .	16
2.2.4.	Modelo Log-Normal shadowing . . . . .	18
2.3.	Simulación de los modelos de propagación . . . . .	19
<b>3.</b>	<b>Comunicaciones digitales</b>	<b>22</b>
3.1.	Modulación Digital . . . . .	22
3.1.1.	Modulación QPSK . . . . .	23
3.1.2.	Demodulación QPSK . . . . .	25
3.2.	Modelo matemático NOMA . . . . .	26
3.3.	Simulación de señal NOMA . . . . .	27
3.3.1.	Señal NOMA . . . . .	28
3.3.2.	Recuperación de las señales . . . . .	29
<b>4.</b>	<b>Propagación de señal NOMA</b>	<b>31</b>
4.1.	Ruido, interferencia y distorsión . . . . .	31
4.2.	Radio definida por software (SDR) . . . . .	32
4.2.1.	Esquema básico de un sistema de radio definido por software . . . . .	33
4.2.2.	GNU Radio . . . . .	34
4.2.3.	HackRF One . . . . .	35
4.2.4.	GNU radio companion . . . . .	36
4.3.	Diagrama del Transmisor NOMA EN GNU Radio . . . . .	39
4.4.	Diagrama del Receptor en GNU Radio . . . . .	42
4.5.	Medición de desempeño de la señal NOMA . . . . .	44
4.5.1.	Diagrama de ojo . . . . .	44
4.5.2.	Bit error radio (BER) . . . . .	47
	<b>Conclusiones</b>	<b>49</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>51</b>
	<b>Apéndice A: Artículo</b>	<b>55</b>
	<b>Apéndice B: Estancia de investigación</b>	<b>56</b>

# Índice de figuras

1.	Acceso NOMA de enlace de bajada para dos usuarios . . . . .	VIII
1.1.	Esquema de acceso multiusuario . . . . .	4
1.2.	Esquema de acceso multiusuario por división de frecuencia. . . . .	4
1.3.	Esquema de acceso multiusuario por división de tiempo. . . . .	5
1.4.	Esquema de acceso multiusuario por división de código. . . . .	5
1.5.	Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal. . . . .	6
1.6.	Esquema de acceso multiusuario no ortogonal. . . . .	7
2.1.	Morfología de celdas . . . . .	10
2.2.	Características de un hexágono . . . . .	11
2.3.	Celdas co-canal. . . . .	12
2.4.	Fenomeno de reflexión. . . . .	13
2.5.	Fenomeno de refracción. . . . .	14
2.6.	Fenomeno de dispersión. . . . .	14
2.7.	Fenomeno de difracción. . . . .	15
2.8.	Fenomeno de absorción . . . . .	15
2.9.	Pérdida por distancia en el espacio libre (Friis. . . . .	16
2.10.	Modelo de dos rayos. . . . .	17
2.11.	Método de imagen se utiliza para encontrar la diferencia de trayectoria entre la línea de vista y las trayectorias reflejadas en el suelo. . . . .	18
2.12.	Pérdida por distancia en el modelo Log-Normal Shadowing . . . . .	18
2.13.	Potencia recibida en 2.4 GHz. . . . .	20
2.14.	Potencia recibida en 2.4 GHz con regresiones logarítmicas. . . . .	20
2.15.	Potencia recibida en 5.8 GHz con regresiones logarítmicas. . . . .	21
3.1.	Diagrama de constelación. . . . .	24
3.2.	Modulación QPSK. . . . .	25
3.3.	Demodulación QPSK. . . . .	26
3.4.	Diagrama a bloques de un sistema de transmisión NOMA y afectaciones en el canal inalámbrico. . . . .	27
3.5.	Señal de voz en tiempo y frecuencia del usuario 1. . . . .	28
3.6.	Señal NOMA. . . . .	29
3.7.	Recuperación de las señales por los receptores. . . . .	29
3.8.	Señal recuperada del usuario 1. . . . .	30

4.1. Radio definido por software. . . . .	33
4.2. Interfaz de GNU Radio Companion. . . . .	36
4.3. SDR y GNU Radio . . . . .	37
4.4. Bloque de una variable en GNU Radio . . . . .	37
4.5. Bloque Throttle en GNU Radio. . . . .	38
4.6. Bloque Signal Source en GNU Radio. . . . .	38
4.7. Señal Seno en QT GUI Time. . . . .	39
4.8. Modulación QPSK para el usuario 1. . . . .	40
4.9. Modulación QPSK para el usuario 2. . . . .	40
4.10. Asignación de potencia a las señales. . . . .	41
4.11. Señal NOMA en QT GUI Time. . . . .	41
4.12. Diagrama a bloques de modulaion en AM de la señal NOMA. . . . .	42
4.13. Señal NOMA modulada en amplitud . . . . .	42
4.14. Bloques de recepción de señal NOMA. . . . .	43
4.15. Señal NOMA en el receptor. . . . .	43
4.16. Recuperación de señal NOMA. . . . .	44
4.17. Diagrama de ojo simulado para 3 muestras. . . . .	45
4.18. Diagrama de ojo obtenido por las tarjetas para 3 muestras. . . . .	46
4.19. Diagrama de ojo simulado para 10 muestras. . . . .	46
4.20. Diagrama de ojo obtenido por las tarjetas para 10 muestras. . . . .	47

# Índice de cuadros

2.1. Clasificación de celdas por tamaño (3GPP TS 25.305 2012). . . . .	10
2.2. Exponente de pérdida por trayectoria típico. . . . .	19
2.3. Parámetros de simulación. . . . .	19
3.1. Generación de símbolos QPSK . . . . .	23
3.2. Símbolos QPSK . . . . .	24
4.1. Porcentaje de parentesco con la señal. . . . .	48

# Resumen

Esta tesis se compone de cuatro capítulos, en los cuales se describe el proceso completo, desde el estudio de los diferentes sistemas de acceso hasta la propagación de la señal NOMA en la plataforma HackRF One. En el primer capítulo se aborda el análisis de los diversos sistemas de acceso, destacando la propuesta de NOMA como una nueva alternativa para las tecnologías de acceso en el marco de 5G. En el segundo capítulo, se realiza un análisis de los modelos de propagación, destacando su aporte fundamental en la predicción del comportamiento de las pérdidas de potencia recibida, considerando los fenómenos naturales que influyen en dicho proceso. El tercer capítulo presenta la técnica empleada para generar una señal NOMA a partir de la modulación de señales de voz y la asignación de potencia correspondiente, seguido de la simulación y recuperación de la señal mediante la técnica SIC (Successive Interference Cancellation), demostrando la viabilidad de recuperar la información transmitida. Finalmente, el cuarto capítulo detalla los pasos necesarios para propagar la señal NOMA en un entorno físico, analizando las afectaciones del canal y cómo se puede recuperar la información de ambos usuarios, complementado con las métricas de calidad que se obtienen a partir de un análisis de las señales para configuraciones de tres y diez muestras.

# Introducción

## Definición del problema

A través de los años se han buscado técnicas que puedan adaptarse ante la creciente demanda de usuarios en redes telefónicas. Las recientes investigaciones proponen a la técnica de acceso multiusuario no ortogonal (NOMA) en redes 5G que explota el dominio de la potencia de las señales la cual no se ha tomado en cuenta en su totalidad en diferentes implementaciones. Dichas investigaciones se basan en resultados teóricos y simulaciones que no toman en cuenta diferentes fenómenos presentes en la implementación física o asumen condiciones ideales las cuales en la práctica son difíciles de tener.

## Justificación

En el acceso múltiple no ortogonal (NOMA), se separan los enlaces de comunicación entre un nodo 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 técnica prometedora 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), 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, 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.

Los sistemas NOMA son la base para distintos tipos de dispositivos, no sólo de telefonía celular, sino también de transmisión directa de radio frecuencia [1]. También ha sido propuesto por sus características de ahorro energético [2–7].

Existen diversos estudios en torno al esquema NOMA asociados a su nivel de seguridad, eficiencia espectral, aplicado para ambientes micro celulares y para la comunicación de vehículos aéreos [8–24].

El esquema de acceso NOMA utiliza las diferencias de potencia entre las señales de usuarios. De hecho, uno de los objetivos de los desarrolladores es que sea el esquema de acceso más utilizado para 5G, con una aplicación potencial para IoT [25–27].

Modelar matemáticamente un sistema de transmisión NOMA específico y construir su diagrama de bloques para describirlo requiere del planteamiento hipotético y el análisis del esquema de transmisión y recepción. En el modelo de la Figura 1 se considera un sistema compuesto por una estación base (BS) y dos usuarios. En dicho ejemplo, en los receptores se separan los enlaces mediante el procedimiento de cancelación de interferencia sucesiva (SIC). 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 SIC en el lado del receptor.

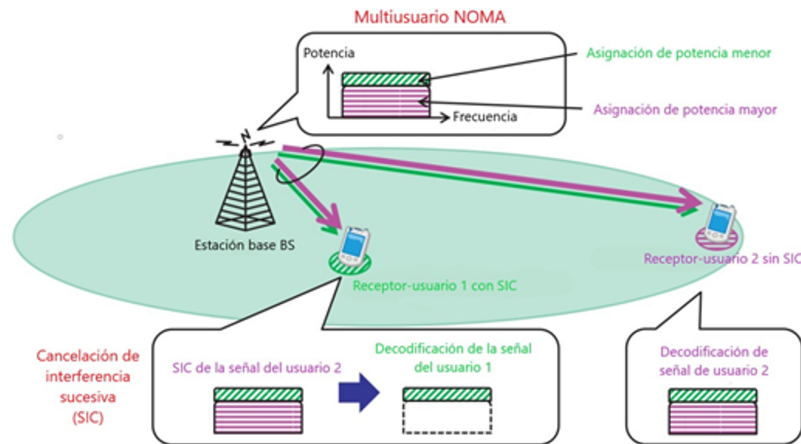


Figura 1: Acceso NOMA de enlace de bajada para dos usuarios. [28].

## Objetivos

Los objetivos general y específicos de este trabajo de tesis se enuncian a continuación.

### Objetivo general

Diseñar e implementar la interfaz de aire de las etapas de transmisión y recepción de un sistema de acceso NOMA para su integración en plataforma FPGA.

### Objetivos particulares

1. Estudiar los principios de funcionamiento del esquema de acceso NOMA y las normas que lo regulan.
2. Simular en MATLAB la etapa de transmisión y recepción de un sistema NOMA para su implementación en FPGA.
3. Diseñar la interfaz de aire del sistema NOMA del transmisor y receptor.
4. Acoplar la interfaz de aire del sistema NOMA al transmisor y receptor desarrollado en plataforma FPGA.
5. Probar la compatibilidad del sistema y su capacidad de operación con respecto a lo reportado en la literatura.

## Estado del arte

La implementación de la técnica basada en NOMA es en la actualidad el objeto de diversos estudios que en su mayoría están enfocados a cálculos, simulaciones e hipótesis. Esto deja la implementación física de forma limitada en cuanto a prototipos funcionales porque dicha implementación no es sencilla debido a diversos factores.

El artículo [29] nos habla sobre un banco de pruebas basado en la técnica NOMA implementado en una red Wi-fi la cual tiene como elemento principal un dispositivo de radio definido por software (USRP-2944R) incluyendo además un FPGA muy potente en su interior que puede transmitir y procesar datos en una banda de 20 MHz con el potencial de incrementar hasta 160 MHz.

El artículo [30] nos habla de las principales características y consideraciones al implementar la técnica basada en NOMA y una comparación de NOMA con OMA la cual es un esquema con el que se ha venido trabajando en las comunicaciones por radio.

NOMA es una solución competitiva frente a las grandes demandas de conectividad masiva, razón potencial por la que se busca estandarizar esta técnica. Los artículos [31, 32] nos hablan del proceso de estandarización LTE versión 13 para definir comunicaciones inalámbricas de transmisión de datos de alta velocidad, aún en proceso de estudio.

La comunicación entre vehículos busca transmitir una gran cantidad de datos a grandes velocidades, para esto se propone el esquema de acceso NOMA el cual es un gran candidato

para mejorar la eficiencia espectral y proporcionar una conectividad masiva. En [33] se propone un FD-NOMA el cual busca resolver problemas de seguridad y privacidad personal.

Noma ofrece una solución viable para el internet de las cosas (IoT) masivo en redes inalámbricas 5G; sin embargo, las graves interferencias co-canal y la elevada complejidad de implementación dificultan su aplicación en sistemas prácticos. Para resolver estos problemas, las técnicas de antenas múltiples se han utilizado ampliamente en los sistemas NOMA aprovechando las ventajas de los grados de libertad espaciales [34].

Se analiza el rendimiento del acceso de entradas y salidas múltiples (MIMO-NOMA), cuando varios usuarios se agrupan en un clúster. La superioridad de MIMO-NOMA sobre el acceso múltiple ortogonal (MIMO-OMA) en términos de capacidad de canal y de suma ergódica se demuestra analíticamente en [35].

## Solución propuesta

Para la implementación de la interfaz de aire para un sistema multiusuario como lo es NOMA se propone en una tarjeta FPGA, dicha tarjeta por sus características la hace persistente a la obsolescencia y permite su posterior cambio de código con el simple hecho de modificar el código compilador. La limitante sería la configuración para un número mayor de componentes, lo cual puede ser solucionando, escogiendo un dispositivo de mayor capacidad disponible al momento.

# Capítulo 1

## Sistemas de comunicación inalámbricos

Ante la creciente demanda del uso de tecnología inalámbrica para proveer servicios a una gran cantidad de usuarios, la búsqueda de técnicas de transmisión inalámbrica es fundamental. Otras características importantes son la capacidad de atender a una gran cantidad de usuarios, eficiencia energética, eficiencia espectral, etc. con el objetivo de garantizar la sostenibilidad de las tecnologías de acceso radio-celular.

### 1.1. Generaciones de teléfonos móviles

Las técnicas de acceso múltiple son fundamentales en la distinción de cada generación de sistemas de comunicaciones inalámbricas en las últimas décadas. Entre ellas destaca el acceso múltiple ortogonal (OMA) que ha utilizado ampliamente desde la primera generación (1G) hasta 4G. El conocido acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA) para 1G, el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) para 2G, el acceso múltiple por división de código (CDMA) para 3G y el acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA) para 4G, son todos esquemas OMA. En estos esquemas OMA, los usuarios se multiplexan ortogonalmente en el dominio de la frecuencia, el tiempo o el código, de modo que la señal mixta puede separarse en el receptor con relativamente poca complejidad [36].

Se observa que la tecnología celular ha ido evolucionando a través de los años adaptándose a los requerimientos de la época. La evolución de dichas tecnologías ha sido marcada por generaciones las cuales cumplen con ciertas características particulares. Dichas generaciones son descritas a continuación de tal forma que se muestra como han ido cambiando a la par de las técnicas multiusuario.

#### 1.1.1. Primera generación (1G)

La 1G se introdujo a principios de la década de 1980 sobre la base de un sistema analógico con una red de conmutación de circuitos. El sistema móvil 1G se utilizaba sólo para operaciones de voz mediante una técnica llamada FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia). Las frecuencias de funcionamiento dentro del rango de 800 - 900 MHz y la capacidad de los canales

estaba limitada a 30 KHz. Tenía una capacidad limitada, una recepción y un rendimiento de la batería deficientes, además de interferencia y ruido de fondo. Su ventaja era su relativa simpleza y poca cantidad de elementos de red [37].

### 1.1.2. Segunda generación (2G)

La tecnología celular 2G supuso un gran avance en la tecnología celular inalámbrica cuando se lanzó en los años 90 y se basó en el uso de sistemas digitales. En las primeras etapas de 2G, se introdujeron comercialmente servicios de datos limitados. GSM fue la primera red que ofrecía servicios de voz y datos conjuntamente. El avance en la tecnología GSM fue GPRS, también conocido como 2.5G. La velocidad de los datos aumentó hasta 150 Kbps. Después de 2,5G, se introdujo una tecnología bajo el paraguas de 2G conocida como EDGE (Enhanced Data rate for GSM Evolution), actualización de GPRS con una velocidad de datos máxima de 384 Kbps. En 2G, la red de conmutación de circuitos se utilizó para transmitir y recibir los datos desde el origen hasta el destino. La robustez al ruido y la calidad de la voz se mejoraron. La encriptación digital se introdujo por primera vez en la 2G para asegurar la transmisión de datos 3G [37]. Adicionalmente aparece por primera vez el esquema de acceso múltiple por división de código bajo el estándar IS-95 eventualmente remplazado en la tercera generación CDMA 2000.

### 1.1.3. Tercera generación (3G)

La tecnología móvil de tercera generación se basó en el empleo de banda ancha bajo las especificaciones de las Telecomunicaciones Móviles 2000 (IMT-2000). Según las normas IMT-2000, un sistema debería proporcionar velocidades de datos de al menos 200 Kbit/s. El sistema 3G funcionaba en el rango de 2100 MHz. Su ancho de banda era de 15-20 MHz. La 3G entre sus objetivos buscaba ofrecer una cobertura (casi) omnipresente y continua, bajo escenarios en los que, por ejemplo, un consumidor mantenía una conversación telefónica mientras conducía una autopista a 100 km/hora [38].

### 1.1.4. Cuarta generación (4G)

La cuarta generación (4G) es un marco conceptual que proporciona una red inalámbrica de alta velocidad que puede transmitir datos multimedia. 4G puede soportar 100 Mbps en la cobertura de área amplia de plena movilidad y 1Gbps en cobertura de área local de baja movilidad. 4G tiene una velocidad de datos de hasta 20 Mbps y hasta 100mbps de velocidad de descarga. Un sistema 4G debe proporcionar capacidades definidas por la UIT en IMT Advanced. El sistema 4G no admite el servicio de telefonía tradicional con conmutación de circuitos sino una comunicación basada en el Protocolo de Internet (IP) como la telefonía IP [38].

### 1.1.5. Quinta generación (5G)

La quinta generación es una tecnología aún en proceso de despliegue. Algunas fuentes sugieren que la tecnología 5G llegaría en el 2020. 5G tiene velocidades superiores a las que puede ofrecer el actual 4G. Las terminales 5G tendrán áreas de cobertura definidas por software, esquemas de modulación y nuevos esquemas de control de errores que podrán ser descargados

de Internet. El desarrollo se dirige hacia los terminales de usuario como foco de las redes móviles 5G. Los terminales tendrán acceso a diferentes tecnologías inalámbricas al mismo tiempo, siendo capaz de combinarlas. En 5G, todas las redes serán responsables de gestionar la movilidad de los usuarios, mientras que el terminal hará la elección final entre diferentes proveedores de redes inalámbricas o de acceso móvil para un determinado servicio. Esta elección se basará en un software intermedio inteligente abierto en el teléfono móvil .

5G deberá cumplir con características que mejoren la accesibilidad entre los usuarios, considerando los siguientes aspectos [38]:

- Las velocidades de datos de varias decenas de megabits por segundo deben ser soportadas por decenas de miles de usuarios.
- 1 gigabit por segundo para decenas de trabajadores en la misma planta de la oficina.
- Varios miles de conexiones simultáneas para los despliegues masivos de sensores.
- La eficiencia espectral debería mejorar considerablemente en comparación con la 4G.
- La cobertura debe ser mejorada.
- La eficiencia de la señalización debe mejorar.
- La latencia debe reducirse significativamente.

Adicionalmente, se pretende:

- Disminuir el consumo de la batería.
- Admitir un mayor número de dispositivos.
- Bajar costos de la infraestructura.
- Alta flexibilidad y escalabilidad.
- Comunicación fiable.

## 1.2. Esquemas de acceso multiusuario

Los esquemas de acceso múltiple tienen como principal objetivo la conectividad de diferentes usuarios de forma que estos puedan estar conectados de forma simultánea y que no se presente errores de comunicación o interferencias. Para que esto sea posible se necesitan técnicas que puedan suministrar de manera eficiente la conectividad entre los múltiples usuarios. Con el paso del tiempo el incremento de usuarios ha sido un factor para considerar ya que los sistemas de comunicación se deben adaptar a estos requerimientos. En la Figura 1.1 se puede observar el diagrama básico de comunicación entre diferentes usuarios y la ubicación del esquema de acceso multiusuario. La técnica para codificar y decodificar la información hacia el usuario depende directamente de la técnica del acceso multiusuario utilizados.

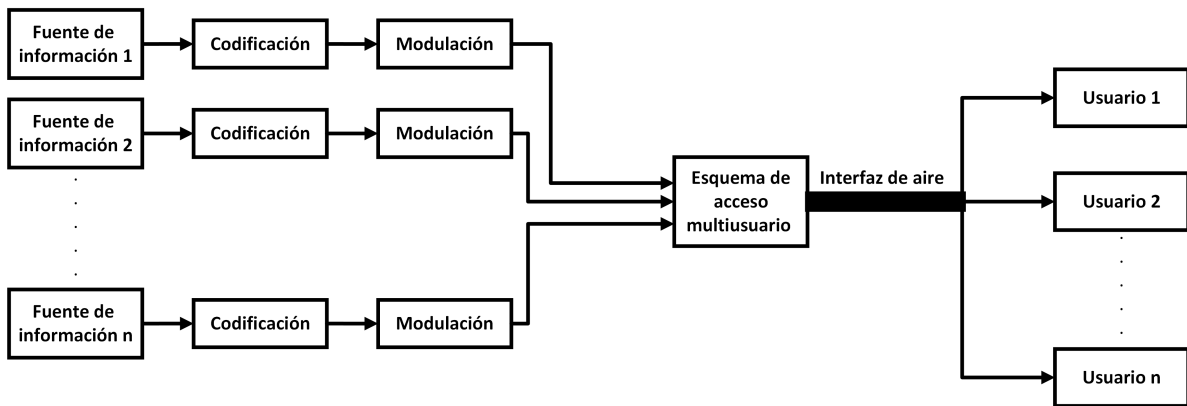


Figura 1.1: Diagrama de acceso Multiusuario.

Los esquemas de acceso multiusuario permiten la comunicación entre diferentes usuarios, siempre buscando que estos puedan compartir el ancho de banda eficazmente.

### 1.2.1. FDMA (Acceso múltiple por división de frecuencia)

FDMA es una técnica de acceso múltiple en la que el espectro de frecuencias disponible se divide en varios canales de frecuencia como se muestra en la Figura 1.2. Cada usuario o dispositivo se asigna a un canal de frecuencia exclusivo, lo que les permite transmitir simultáneamente sin interferir entre sí. Cada canal es ortogonal, lo que significa que las señales no se superponen y no causan interferencia.

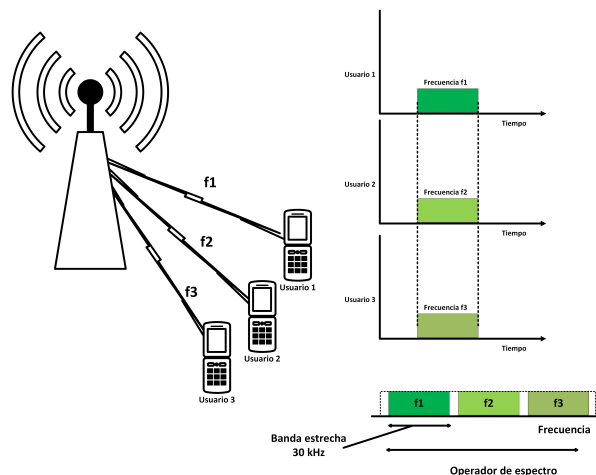


Figura 1.2: Esquema de acceso multiusuario por división de frecuencia.

### 1.2.2. TDMA (Acceso múltiple por división de tiempo)

TDMA es una técnica de acceso múltiple en la que el tiempo disponible en un canal de comunicación se divide en intervalos de tiempo o ranuras de tiempo como se muestra en la Figura 1.3. Cada usuario tiene asignada una ranura específica en el tiempo para transmitir sus

datos. Aunque todos los usuarios comparten el mismo canal de frecuencia, la división en el tiempo permite que sus transmisiones no se solapen y, por lo tanto, no interfieran entre sí.

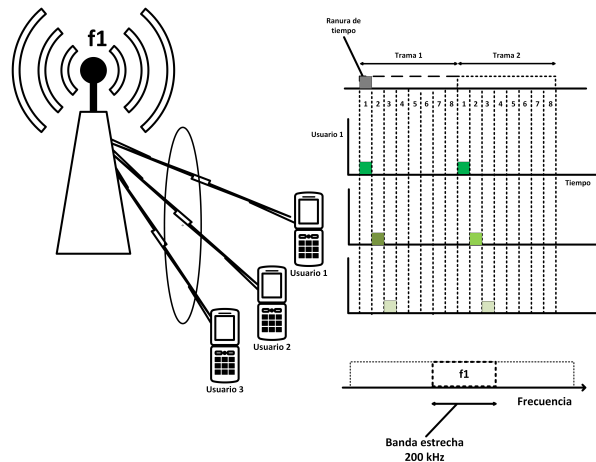


Figura 1.3: Esquema de acceso multiusuario por división de tiempo.

### 1.2.3. CDMA (Acceso múltiple por división de código)

CDMA es una técnica de acceso múltiple en la que múltiples usuarios pueden transmitir al mismo tiempo a través del mismo canal de frecuencia como se muestra en la Figura 1.4. Cada usuario se distingue por un código único que modula su señal. Estos códigos son ortogonales, lo que significa que las señales de diferentes usuarios no interfieren entre sí, aunque estén transmitiendo al mismo tiempo en el mismo espectro de frecuencia.

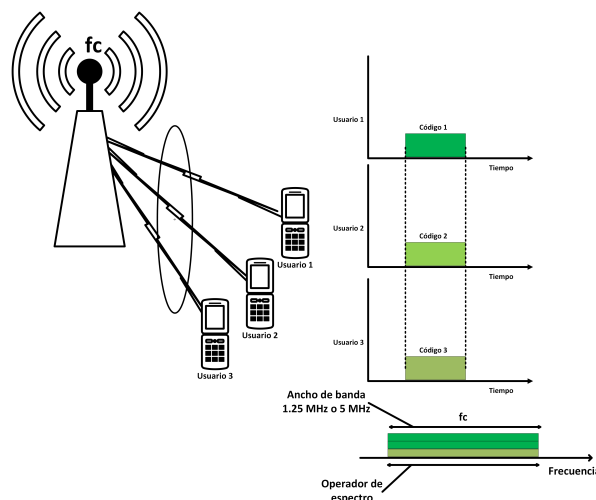


Figura 1.4: Esquema de acceso multiusuario por división de código.

### 1.2.4. OFDMA (Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal)

Entre las diversas técnicas de acceso múltiple conocidas, la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA) es la más favorecida en los sistemas de transmisión de banda ancha. Ha sido diseñado para ser capaz de superar la interferencia que se genera entre el transmisor y el receptor para aprovechar eficientemente el espectro de frecuencias útiles. La Figura 1.5 muestra que OFDMA es similar a OFDM, pero mucho más eficiente al aprovechar el espectro de frecuencias, debido a que el espacio entre subportadoras es traslapado ortogonalmente sin representar pérdida de información gracias a esta característica [39].

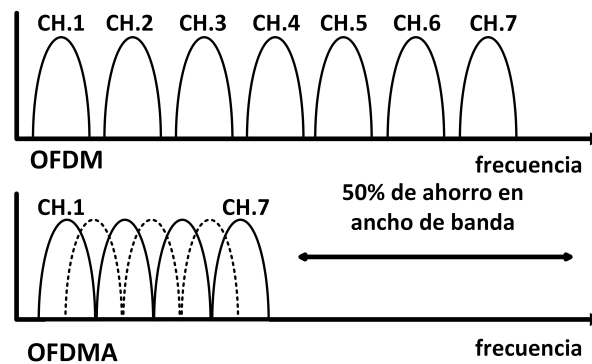


Figura 1.5: Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal.

## 1.3. NOMA

El diseño de esquemas de acceso múltiple es un aspecto importante del diseño de sistemas celulares. Se tiene como objetivo proporcionar los medios para que múltiples usuarios compartan los recursos radioeléctricos de una manera eficiente desde el punto de vista del espectro.

NOMA introduce la multiplexación de usuarios en el dominio de la potencia, explota la diferencia de canales entre los usuarios para mejorar la eficiencia del espectro y se basa en receptores más avanzados para la separación de señales multiusuario en el lado del receptor. Con NOMA, varios usuarios se emparejan y comparten los mismos recursos radioeléctricos, ya sea en tiempo, en frecuencia o en código. Desde una perspectiva teórica, NOMA con un SIC es un esquema de acceso múltiple óptimo desde el punto de vista de la región de capacidad multiusuario en el enlace descendente y en el enlace ascendente. De hecho, cuanto mayor sea las regiones de capacidad multiusuario de NOMA y OMA, más puede contribuir NOMA a la mejora simultánea de la eficiencia del sistema y la experiencia del usuario. Esto es especialmente importante en los sistemas celulares donde las condiciones del canal varían significativamente entre los usuarios debido al efecto cerca-lejos [40].

(NOMA) representa una de las tecnologías clave de la capa física que se están investigando y desarrollando para las redes celulares 5G y más allá de la 5G. El interés por NOMA se originó en la teoría de la información multiusuario, que dice que acceso múltiple ortogonal (OMA) no es óptimo en general y que la codificación por superposición, junto con la cancelación de

interferencia (SIC) proporciona una solución óptima para el acceso múltiple [41].

NOMA es una técnica de acceso múltiple en la que varios usuarios pueden compartir el mismo recurso (como un canal de frecuencia o tiempo) transmitiendo simultáneamente, pero se distinguen por diferentes niveles de potencia como se muestra en la Figura 1.6. A diferencia de otras técnicas ortogonales como FDMA, TDMA y CDMA, en NOMA las señales de los usuarios se superponen y se separan posteriormente mediante un proceso de decodificación sucesiva, donde el receptor primero decodifica la señal más fuerte y luego cancela esa interferencia para decodificar las señales más débiles.

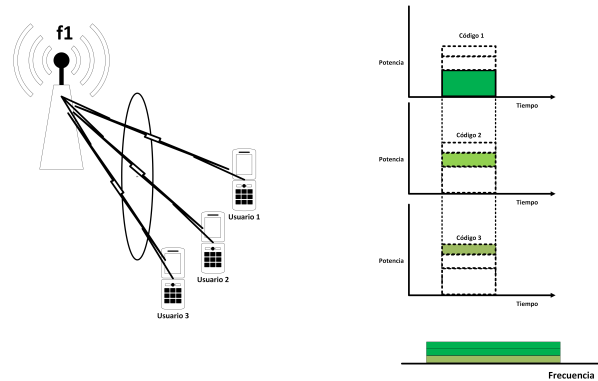


Figura 1.6: Esquema de acceso multiusuario no ortogonal.

## 1.4. Codificación

Se entiende por codificación al proceso de conversión de un sistema de datos de origen a otro sistema de datos de destino. De esta forma se debe tener la misma información en el receptor que la que fue enviada por el transmisor previamente. La codificación permite pasar de sistema de datos a otro de tal forma que el emisor envíe esa información y que el transmisor pueda entenderla. En ese contexto la codificación digital consiste en la traducción de los valores de tensión eléctrica analógicos que ya han sido cuantificados (ponderados) al sistema binario, mediante códigos preestablecidos. La señal analógica va a quedar transformada en un tren de impulsos de señal digital (sucesión de ceros y unos). Esta traducción es el último de los procesos que tiene lugar durante la conversión analógica-digital.

## 1.5. Modulación

La transmisión de señales digitales se puede hacer de dos formas. La primera consiste en transmitir la señal directamente a través del canal sin efectuar ningún tipo de modulación. A este tipo de transmisión se le conoce como en banda base. La segunda forma que consiste en modular la señal con alguna técnica analógica o digital antes de ser transmitida recibe el nombre de transmisión fuera de banda o con corrimiento de frecuencia. La modulación digital consiste en convertir una señal digital en una señal analógica que ira variando su amplitud, frecuencia, fase o bien amplitud y fase conjuntamente, según los valores que valla tomando la señal digital de información. La gran ventaja de la modulación sobre banda base es la posibilidad

de multiplexar en frecuencia varias señales moduladas, la mayor distancia que pueden alcanzar las señales sin verse tan afectadas por el ruido y principalmente el hecho de hacer el sistema realizable.

El uso de señales digitales sobre analógicas tiene sus ventajas como:

- La facilidad en el tratamiento de la información digital.
- La posibilidad de introducir mecanismos que permitan la detección y corrección de posibles errores ocurridos durante la transmisión.

## 1.6. Interfaz de aire

En telecomunicaciones una interfaz es un puerto a través del cual se envían y reciben señales desde un sistema a otro. Para enviar y recibir información entre los sistemas se establecen especificaciones técnicas concretas para poder tener un intercambio de información exitoso, se necesita de un emisor y un receptor para poder compartir información. Para el intercambio de información es necesario que tanto el emisor como el receptor tengan implementada la misma interfaz para lograr una buena interconexión.

Un sistema de comunicación móvil necesita enviar y recibir datos entre la estación base y la estación móvil de forma inalámbrica a través del aire. A la interfaz de aire también se le puede encontrar en la literatura como modo de acceso ya que a través de este medio se realiza la comunicación entre los múltiples usuarios.

Desde el punto de vista de la interfaz aire, el envío de paquetes de usuario mediante dicha interfaz se gestiona en base al establecimiento de los denominados servicios portadores de radio. Cada servicio portador de radio tiene asociado un perfil de calidad de servicio (QoS) que la torre de protocolos que caracteriza a la interfaz debe garantizar.

## Capítulo 2

# Áreas de cobertura

El principio fundamental en la construcción de una red celular es la división del área de cobertura por un conjunto de celdas que cubran la mayor área posible. En cada una de las celdas se tiene una determinada frecuencia asignada con el fin de no tener interferencia con celdas cercanas. Dentro de la celda se cuenta con una estación base la cual está compuesta de transmisor, receptor y unidad de control. El transmisor se encarga de enviar señales hacia diferentes dispositivos móviles dentro de su área de cobertura con una determinada frecuencia. El transmisor genera las señales que se modulan para ser transmitidas por las antenas de la estación base. El receptor se encarga de recibir señales a una determinada frecuencia desde los dispositivos móviles, estas señales que reciben por lo general están moduladas con la información (voz, datos, control etc.) y este debe ser capaz de extraer esta información para convertirla en una señal útil para el dispositivo. La unidad de control esta es la encargada de gestionar la asignación de recursos dentro de la celda como lo son: asignación de frecuencia, gestionar la calidad del enlace y la conexión de los móviles con el resto de la red.

### 2.1. Distribución de la red celular

La forma más natural que puede adoptar una celda es un círculo, ya que puede proporcionar potencia de manera uniforme hacia los límites del círculo. Por otro lado, los círculos no pueden formar un grupo sin que se formen traslapes o espacios libres. Otra alternativa es en forma cuadrada, en este caso no tenemos traslapes ni espacios libres en un grupo, pero se tiene el inconveniente de que el centro de la celda central con respecto a sus celdas cercanas tiene una variación en distancia. Para garantizar el servicio en un determinado territorio sin que existan áreas sin cobertura las celdas deben modelarse de forma hexagonal debido a que esta forma geométrica permite cubrir una región geográfica con el menor número de celdas posibles sin dejar áreas sin cobertura permitiendo además que la distancia entre las antenas de las celdas sea la misma en todo el territorio como se observa en la Figura 2.1 donde se muestra la comparativa de diferentes formas de celda.

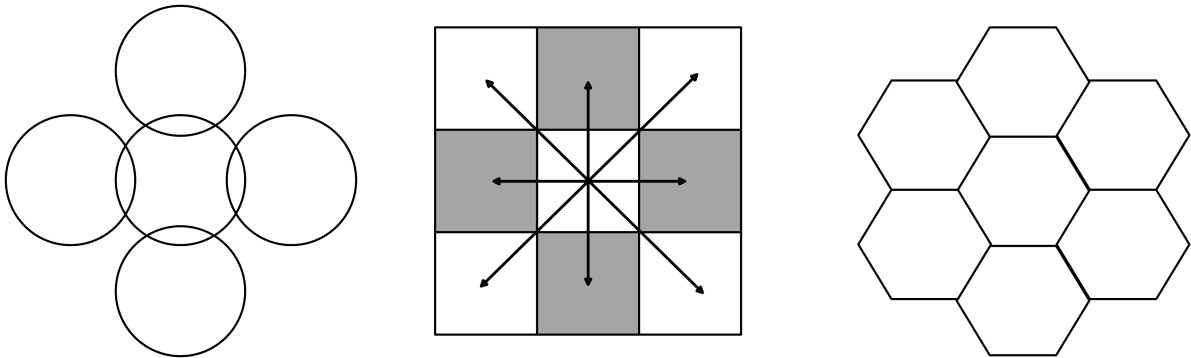


Figura 2.1: Morfología de celdas .

Por tanto, los hexágonos se consideran la forma básica de las células en las redes celulares, especialmente por consideraciones teóricas. Sin embargo, en la práctica, debido a irregularidades en la propagación, las células no resultan ser hexagonales.

Las áreas de cobertura de una antena pueden clasificarse por su tamaño de la zona que cubren. Estas áreas varían por diferentes factores como lo son el tipo de antena, la potencia de transmisión, la frecuencia y el entorno en el que se utiliza. En el Cuadro 2.1 se observa la clasificación por tamaño del área de cobertura de las antenas bajo el estándar 3GPP TS 25.305 2012.

Tipo de celda	Dimensión de la celda (m)
Macrocela grande	3,000-30,000
Macrocela pequeña	1,000-3,000
Micro celda	100-1,000
Pico celda	10-100
Nano celda	1-10

Cuadro 2.1: Clasificación de celdas por tamaño (3GPP TS 25.305 2012).

### 2.1.1. Características de una celda hexagonal

Las principales características de un hexágono se ven en la Figura 2.2 donde tenemos radio que se mide desde el centro del hexágono a un vértice, apotema que se mide desde el centro de hexágono a la mitad de un lado del hexágono.

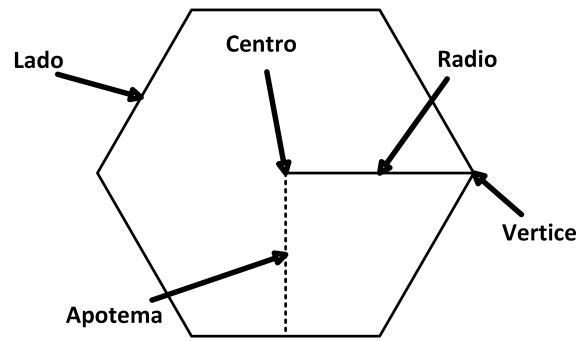


Figura 2.2: Características de un hexágono.

### 2.1.2. Reusos de frecuencia

El espectro radioeléctrico es un recurso muy preciado puesto que este está limitado de acuerdo con el permiso que se tenga para usar ciertas bandas de frecuencia. Para optimizar el uso de estas bandas de frecuencia se hace uso de diversas técnicas con el fin de poder hacer un uso eficiente de este recurso. Una forma de optimizar las bandas de frecuencia se logra mediante la separación espacial entre las celdas, es decir utilizar una misma banda de frecuencia en otra celda separada a una distancia que la interferencia entre esa banda de frecuencia sea mínima.

El reuso de la frecuencia que es el principal componente al momento de transmitir una señal, consiste en asignar una misma banda a distintos usuarios lo que podría interpretarse como interferencia entre dispositivos ya que todos los dispositivos celulares deben trabajar en frecuencias diferentes, pero se hace uso de la sectorización de la celda y distribución geográfica de antenas para no tener interferencias.

A continuación, se explica como las celdas que usan el mismo canal ajustan su orientación con respecto a otra. Para trazar un sistema celular en el sentido de determinar qué conjunto de canales debe asignarse a cada celda, comenzamos con dos números enteros  $i$  y  $j$  ( $i \geq j$ ), denominados «parámetros de desplazamiento», predeterminados de alguna manera. En el patrón celular de la Figura 2.3, se observan seis «cadenas» de hexágonos que emanan de la celda, que se extienden en diferentes direcciones. Partiendo de cualquier celda como referencia, encontramos las celdas más cercanas (co-canal), es decir, aquellas celdas que deberían utilizar el mismo conjunto de canales, de la siguiente manera:

- Mover  $i$  casillas a lo largo de cualquier cadena de hexágonos; gira en sentido contrario a las manecillas del reloj 60 grados; mover  $j$  casillas a lo largo de la cadena que se encuentra en esta nueva dirección.
- Las celdas A y la celda de referencia son celdas co-canal. Ahora vuelva a la celda de referencia y siga a lo largo de otra cadena de hexágonos siguiendo el mismo procedimiento.

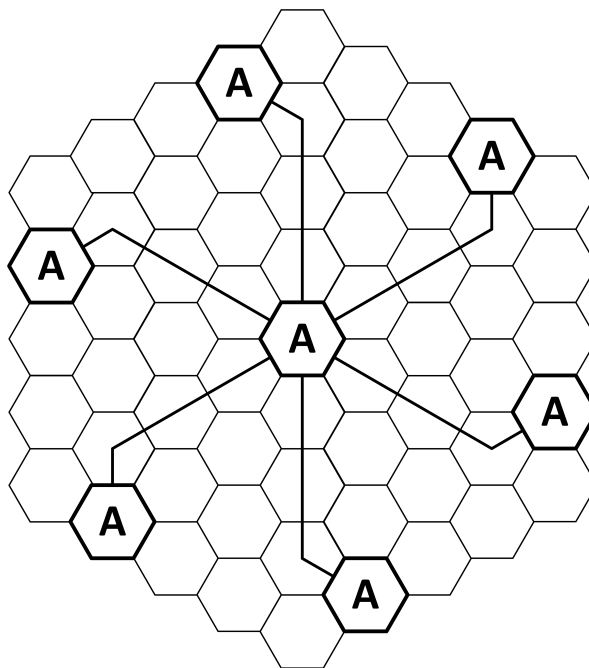


Figura 2.3: Celdas co-canal.

La Figura 2.3 ilustra el uso de estas direcciones para un ejemplo en el que  $i = 3$  y  $j = 1$ . Una celda cerca del centro de la figura se toma como referencia y etiquetada como A. Donde K generalmente puede tomar valores como 3, 7, 9, 12, 21 y otros múltiplos, dependiendo de la configuración de la red.

$$K = i^2 + ij + j^2 \quad (2.1)$$

## 2.2. Modelos de propagación

La propagación de las ondas electromagnéticas por el espacio libre se suele llamar propagación de radiofrecuencia (RF), o simplemente radio propagación. Aunque el espacio libre implica al vacío, con frecuencia la propagación por la atmósfera terrestre se llama propagación por el espacio libre. La diferencia principal es que la atmósfera de la Tierra introduce pérdidas de la señal que no se encuentran en el vacío. Las ondas electromagnéticas se propagan a través de cualquier material dieléctrico, incluyendo el aire. Sin embargo, no se propagan bien a través de conductores con pérdidas, como por ejemplo agua de mar, porque los campos eléctricos hacen que fluyan corrientes en el material, que disipan con rapidez la energía de las ondas. Para propagar las ondas de radio por la atmósfera terrestre se necesita que la energía se irradie de la fuente. A continuación, la energía se debe capturar en el lado de recepción. La irradiación y la captura de energía son funciones de las antenas. Una onda electromagnética contiene un campo eléctrico y uno magnético, que forman  $90^\circ$  entre sí. La polarización de una onda electromagnética plana no es más que la orientación del vector de campo eléctrico con respecto a la superficie de la Tierra, es decir, respecto al horizonte. Si la polarización permanece constante se llama polarización lineal. La polarización horizontal y la polarización vertical son dos formas

de polarización lineal. Si el campo eléctrico se propaga en dirección paralela a la superficie terrestre, se dice que la onda está polarizada horizontalmente. Si el campo eléctrico se propaga en dirección perpendicular a la superficie terrestre, se dice que la onda está polarizada verticalmente. Si el vector de polarización gira  $360^\circ$  a medida que la onda recorre una longitud de onda por el espacio, y la intensidad de campo es igual en todos los ángulos de polarización, se dice que la onda tiene polarización circular. Cuando la intensidad de campo varía con cambios en la polarización, se dice que es una polarización elíptica [42].

### 2.2.1. Fenómenos de propagación

La propagación de señales en las comunicaciones inalámbricas no ocurre de manera simple, ya que las ondas electromagnéticas pueden interactuar con su entorno de diversas formas antes de llegar a su destino. Estos fenómenos de propagación son fundamentales para entender cómo se comportan las señales a medida que se transmiten a través del espacio, especialmente en entornos complejos. Algunos de los principales fenómenos que afectan la propagación de las ondas electromagnéticas son reflexión, refracción, dispersión, difracción y absorción. Cada uno de estos fenómenos influye en la calidad de la señal recibida y en la eficiencia de la comunicación inalámbrica.

#### Reflexión

La reflexión ocurre cuando una onda electromagnética choca con una superficie (como una pared, edificio o el suelo) y rebota en una dirección diferente como se muestra en la Figura 2.4. Este fenómeno es clave en entornos urbanos donde las señales pueden reflejarse en edificios y otras estructuras, lo que puede causar interferencia y afectación en la recepción de la señal en zonas fuera de la línea de vista directa. La reflexión depende de la superficie con la que interactúa la señal, y la frecuencia de la onda también juega un papel importante en la forma en que se refleja. La reflexión puede producir múltiples trayectorias para una misma señal (efecto multipath), lo que puede causar desvanecimiento o interferencia constructiva/destructiva dependiendo de la fase de las señales reflejadas.

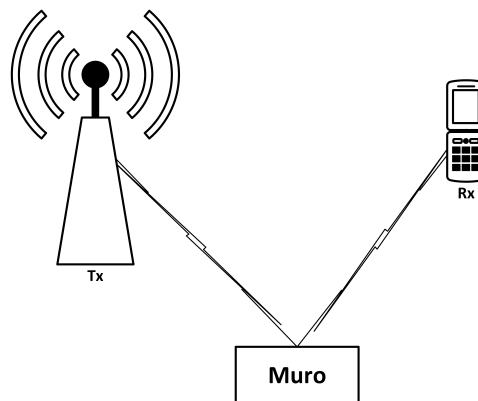


Figura 2.4: Fenómeno de reflexión.

## Refracción

La refracción es el cambio en la dirección de una onda cuando pasa de un medio a otro con diferente índice de refracción como se muestra en la Figura 2.3. En las comunicaciones inalámbricas, esto ocurre cuando las ondas electromagnéticas atraviesan capas atmosféricas con diferentes propiedades, como el paso de una capa de aire seco a una capa de aire más húmedo. La refracción puede desviar la señal hacia una dirección diferente, lo que puede afectar la cobertura y la fiabilidad de la comunicación, especialmente en la propagación a larga distancia o cuando las ondas pasan a través de diferentes capas atmosféricas.

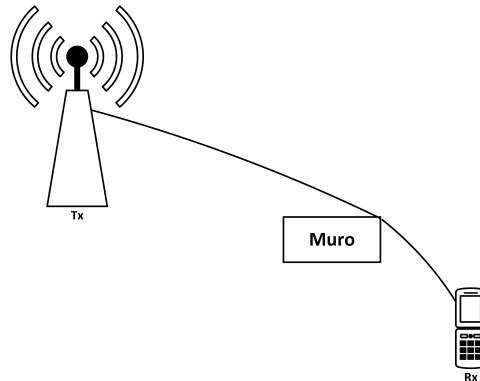


Figura 2.5: Fenomeno de refracción.

## Dispersión

La dispersión se refiere a la dispersión de la energía de la onda cuando viaja a través de un medio heterogéneo o no homogéneo, lo que provoca que la onda se propague en diferentes direcciones como se muestra en la Figura 2.6. Este fenómeno puede ser causado por diferentes factores, como la variabilidad del terreno o la atmósfera. En sistemas de comunicación de alta velocidad o de amplio espectro, la dispersión puede causar desalineación temporal de las señales. Esto puede provocar distorsión en la señal recibida, lo que reduce la calidad de la comunicación, especialmente en sistemas de comunicación digital.

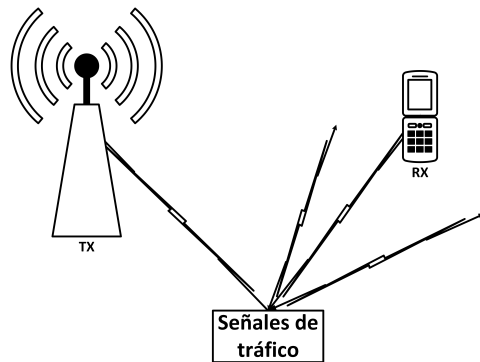


Figura 2.6: Fenomeno de dispersión.

### Difracción

La difracción es el fenómeno que ocurre cuando una onda encuentra un obstáculo o una abertura y se desvía de su trayectoria original como se muestra en la Figura 2.7. Las ondas no solo viajan a través del obstáculo, sino que se curvan alrededor de él, permitiendo que la señal alcance áreas que no están directamente en línea de vista del transmisor. Impacto en las comunicaciones: La difracción es especialmente importante cuando las señales deben atravesar obstáculos como montañas o edificios. En entornos urbanos, la difracción puede permitir que las señales lleguen a zonas donde de otro modo no serían recibidas. Sin embargo, la difracción también puede disminuir la intensidad de la señal, lo que podría reducir la calidad de la comunicación en las zonas afectadas.

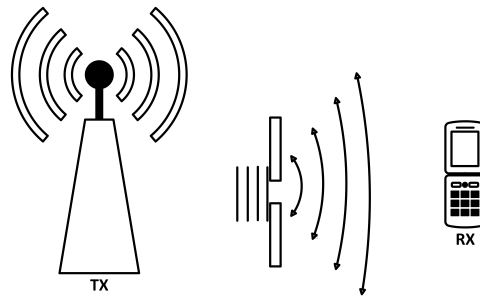


Figura 2.7: Fenomeno de difracción.

### Absorción

La absorción ocurre cuando la energía de una onda electromagnética es absorbida por el medio a través del cual viaja, como la atmósfera, edificios, árboles o el propio suelo como se muestra en la Figura 2.8. Esta pérdida de energía reduce la intensidad de la señal y puede afectar la distancia de propagación. Impacto en las comunicaciones: La absorción es especialmente significativa en frecuencias altas, como las microondas y las ondas de radiofrecuencia (RF), que pueden ser absorbidas por agua o humedad en la atmósfera. En zonas con alta humedad o en entornos densos, como bosques o ciudades, la absorción puede limitar el alcance de la señal.

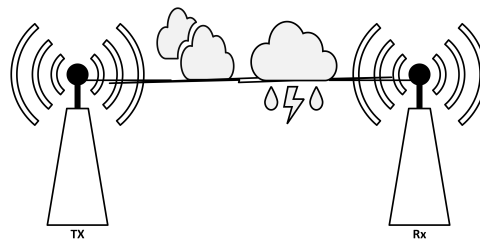


Figura 2.8: Fenomeno de absorción

#### 2.2.2. Modelo del espacio libre

Al considerar la señal transmitida a través del espacio libre a un receptor situado a una distancia del transmisor y suponiendo que no hay obstáculos entre el transmisor y el receptor,

se tiene una señal que se propaga a lo largo de una línea recta entre ambos. El modelo del canal asociado a esta transmisión se denomina canal de línea de vista (LOS) y la correspondiente señal recibida es llamada señal o rayo de línea de vista. La ecuación de espacio libre para el receptor está dada por:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (2.2)$$

Para este modelo no se consideran las alturas de las antenas puesto que la comunicación es en línea directa y solo se considera la separación en tierra de las antenas como se muestra en la Figura 2.9.

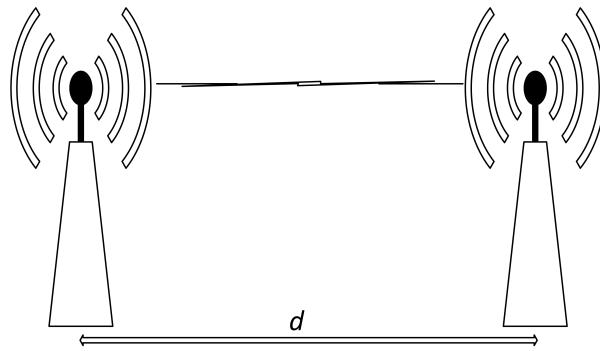


Figura 2.9: Pérdida por distancia en el espacio libre (Friis).

Donde  $G_t$  y  $G_r$  son la ganancia de potencia de la antena transmisora y receptora en línea de vista. Con  $G_t = G_r = 1$  para antenas isotrópicas. La pérdida por trayectoria en espacio libre se define como la pérdida por trayecto del modelo de espacio libre:

$$P_L \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_t}{P_r} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d_m}{\lambda} \right) \quad (2.3)$$

### 2.2.3. Modelo de 2 rayos

El modelo de dos rayos se basa en la óptica geométrica y considera la transmisión directa LOS y una componente de propagación reflejada en el suelo entre transmisor y receptor. La Figura 2.10 ilustra la trayectoria de los rayos que le llegan al transmisor por la línea de vista y por reflexión en el suelo. La señal recibida consta de dos componentes: el componente o rayo  $d_0$ , que corresponde a la señal transmitida que se propaga por el espacio libre, y un componente o rayo reflejado  $d_1$ , que es la señal transmitida que se refleja en el suelo.

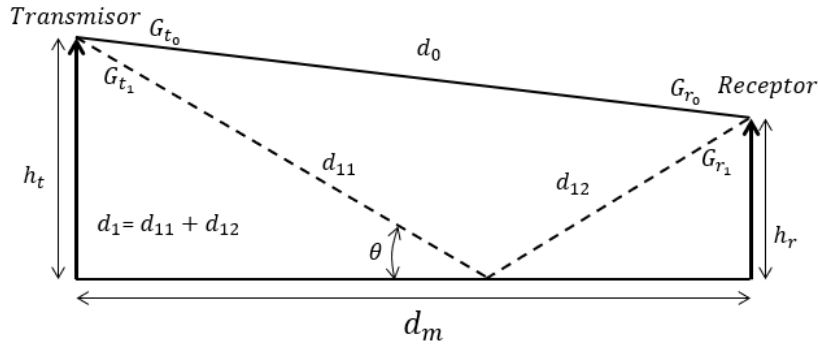


Figura 2.10: Modelo de dos rayos.

Donde los dos componentes de la señal en este modelo recorren distancias diferentes, utilizamos  $d_m$  en este modelo para denotar la distancia horizontal entre el transmisor y el receptor. Las distancias  $d_0$  y  $d_1$  dependen de  $d_m$  y de las alturas  $h_t$  y  $h_r$  del transmisor y el receptor,  $\sqrt{G_0} = G_{t_0}G_{r_0}$  es el producto de los diagramas de radiación de campo de las antenas transmisora y receptora en la dirección LOS,  $R$  es el coeficiente de reflexión en el suelo, y  $\sqrt{G_1} = G_{t_0}G_{r_0}$  es el producto de los diagramas de radiación de campo de las antenas transmisora y receptora correspondientes a la reflexión en el suelo. La potencia recibida del modelo de dos rayos para transmisión es [43]:

$$P_r = P_t \left[ \frac{\lambda}{4\pi} \right]^2 \left| \frac{\sqrt{G_0}}{d_0} + \frac{R\sqrt{G_1}e^{j\Delta\phi}}{d_1} \right|^2 \quad (2.4)$$

Donde  $\Delta\phi$  es la diferencia de fase entre las dos componentes de las señales de recibidas.

$$\Delta\theta = \frac{2\pi(d_1 - d_0)}{\lambda} \quad (2.5)$$

El coeficiente de reflexión este dado por

$$R = \frac{\text{sen}(\theta) - Z}{\text{sen}(\theta) + Z} \quad (2.6)$$

Donde

$$Z = \begin{cases} \frac{\sqrt{\epsilon_r - \cos^2\theta}}{\epsilon_r} & \text{para polarizacion vertical} \\ \sqrt{\epsilon_r - \cos^2\theta} & \text{para polarizacion horizontal} \end{cases} \quad (2.7)$$

y  $\epsilon_r$  es la constante dieléctrica del suelo. Para las superficies de tierra o carreteras, esta constante dieléctrica es aproximadamente la de un dieléctrico puro (para el que  $r$  es real con un valor de aproximadamente 15). Usando el método de imagen, que es demostrado por la geometría de la Figura 2.11.

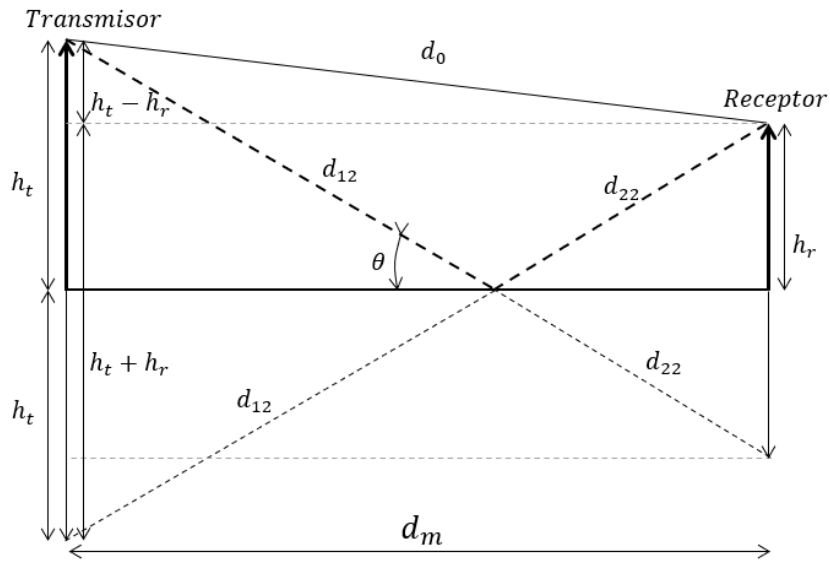


Figura 2.11: Método de imagen se utiliza para encontrar la diferencia de trayectoria entre la línea de vista y las trayectorias reflejadas en el suelo.

Donde

$$d_0 = \sqrt{(h_t - h_r)^2 + (d_m)^2} \quad (2.8)$$

$$d_1 = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + (d_m)^2} \quad (2.9)$$

#### 2.2.4. Modelo Log-Normal shadowing

Este modelo estima la pérdida de potencia para una distancia y rango de comunicación amplios, es decir, calcula la pérdida de potencia exponencial incurrida desde una distancia entre el transmisor y receptor y está dada por:

$$\frac{P_r}{P_t} dB = 10 \log_{10} K - 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_r} \right) - \psi_{dB} \quad (2.10)$$

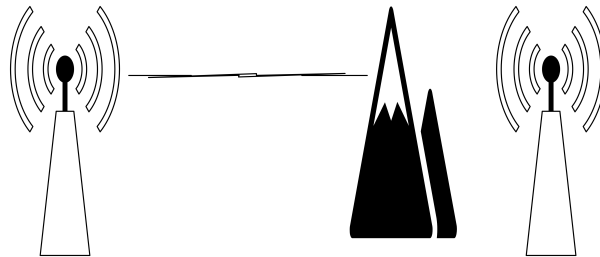


Figura 2.12: Pérdida por distancia en el modelo Log-Normal Shadowing

Donde  $P_t$  es la potencia del transmisor,  $P_r$  es la potencia de recepción,  $K$  es el modelo del espacio libre  $\psi_{dB}$  es una variable aleatoria Gaussiana con media ( $\bar{X}$ ) igual a cero y desviación

estándar ( $\Delta$ ) en dB y  $\gamma$  es el exponente de pérdida por trayectoria. En la Figura 2.11 se muestra el efecto de sombra debido a la interferencia de un obstáculo entre transmisor y receptor. En este caso el obstáculo es una montaña que reduce la potencia de recepción. Los rangos típicos de exponente de pérdida por trayectoria se presentan en la Cuadro 2.2.

Ambiente	Rango $\gamma$
Macroceldas urbanas	3.7-6.5
Microceldas urbanas	2.7-3.5
Edificio (mismo piso)	1.6-3.5
Edificio (múltiples pisos)	2-6
Almacén	1.8-2.2
Fabrica	1.6-3.3
Casa	3

Cuadro 2.2: Exponente de pérdida por trayectoria típico.

## 2.3. Simulación de los modelos de propagación

Los parámetros de simulación se presentan en el Cuadro 2.3.

Parámetro	Símbolo	Valor
Frecuencia	$f$	[2.4GHz, 5.8GHz]
Altura del transmisor	$h_t$	10 m
Altura del receptor	$h_r$	1.5 m
Potencia de transmisión	$P_t$	20 dBm
Ganancia de transmisión	$G_t$	0 dBi
Ganancia de recepción	$G_r$	0 dBi
Constante dieléctrica	$\epsilon$	2.5
Conductividad	$\sigma$	.002 S/m
Distancia de cobertura	$d$	[1, 1000] m
Exponente de pérdida	$n$	2

Cuadro 2.3: Parámetros de simulación.

En la Figura 2.13 se ilustran tres modelos de propagación de señales: el modelo de espacio libre, el modelo de dos rayos y el modelo de Log-Normal Shadowing. El modelo de espacio libre se utiliza como referencia de comparación con los otros dos modelos, ya que representa el escenario ideal en el que, en condiciones óptimas, no se deben obtener resultados superiores a los del punto de referencia ubicado a 1 metro de distancia. El modelo de dos rayos exhibe oscilaciones debido a que la señal se recibe por dos trayectorias distintas, generando efectos de interferencia constructiva y destructiva en ciertos puntos, lo que provoca fluctuaciones en la señal a medida que avanza a lo largo de la gráfica. Por su parte, el modelo de Log-Normal Shadowing describe el comportamiento de la obstrucción de la señal causada por obstáculos

interferentes, representando una variable aleatoria con un patrón impredecible debido a las condiciones del entorno.

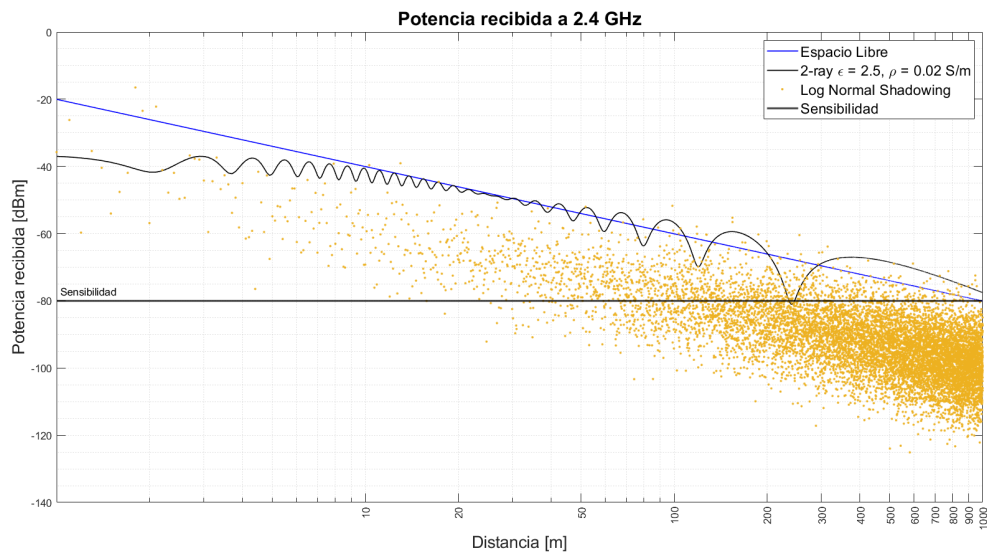


Figura 2.13: Potencia recibida en 2.4 GHz.

Al realizar las regresiones para los modelos de dos rayos y Log-Normal Shadowing mostrado en la Figura 2.14, se observa la predicción de comportamiento de estos modelos para una frecuencia de 2.4 GHz. En el caso del modelo Log-Normal, se evidencia una pérdida significativa de la señal antes de alcanzar los 100 metros, donde la sensibilidad del sistema alcanza los 80 dBm. En el modelo de dos rayos, se observa que, después de los 100 metros, las curvas se cruzan con el modelo de Friis, lo que se atribuye al comportamiento oscilatorio de la señal inherente al modelo de dos rayos.

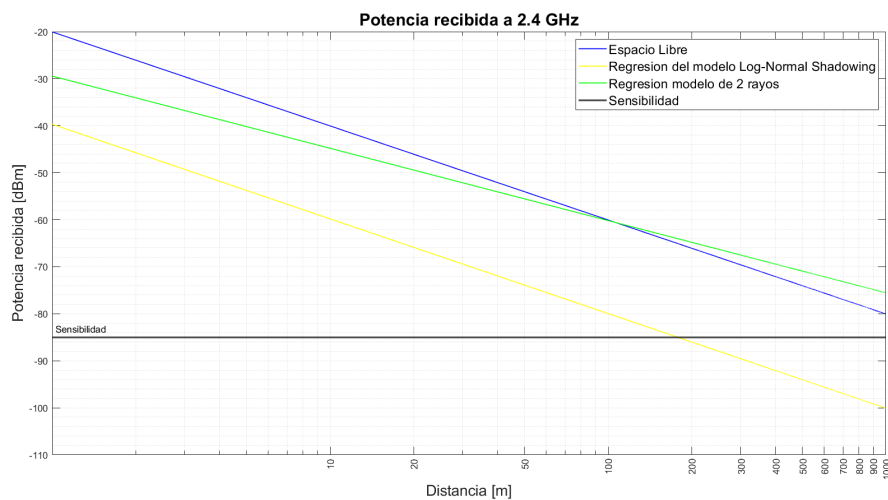


Figura 2.14: Potencia recibida en 2.4 GHz con regresiones logarítmicas.

Para la frecuencia de 5.8 GHz, se observa que el modelo de dos rayos presenta pérdidas significativas antes de los 100 metros como se muestra en la Figura 2.15. Además, los modelos de Friis y dos rayos muestran una incapacidad para recuperar la señal antes de los 800 metros, como se indica en la figura. Este comportamiento sugiere que, para una frecuencia de 5.8 GHz, la pérdida de potencia es mayor en comparación con la frecuencia de 2.4 GHz, lo que resalta las diferencias en la propagación de la señal a distintas frecuencias.

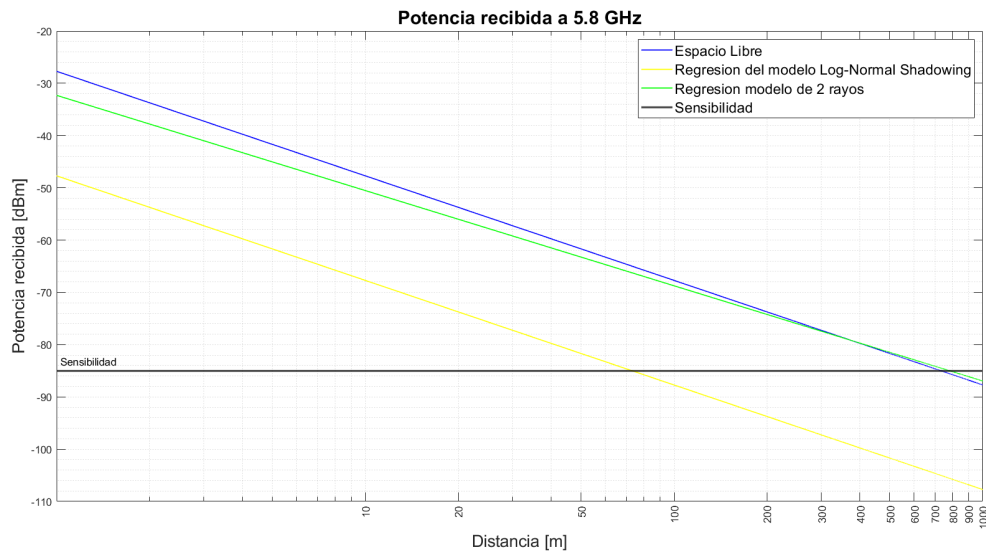


Figura 2.15: Potencia recibida en 5.8 GHz con regresiones logarítmicas.

## Capítulo 3

# Comunicaciones digitales

Cuando se desea transmitir información a larga distancia (p.ej., a través de un cable submarino), la atenuación sufrida por la señal enviada obligaba a que los sistemas de comunicaciones analógicas incorporasen repetidores, esto es, dispositivos que captan, amplifican y retransmiten dicha señal. El inconveniente de los repetidores es que no sólo amplifican la señal, sino también el ruido, por lo que al final de una cadena con muchos repetidores la calidad de la señal en el extremo receptor podía ser muy pobre. Empleando comunicaciones digitales es posible emplear repetidores regenerativos, esto es, que reconstruyen la señal antes de retransmitirla. De este modo, si la calidad de un solo enlace es suficientemente buena, la reconstrucción puede tener lugar sin apenas errores, lo que hace que la información en el extremo receptor pueda extraerse sin una pérdida de calidad apreciable. La diferencia fundamental entre comunicaciones digitales y analógicas es que en las primeras el número de formas de onda transmitidas posibles es finito, lo que no ocurre en el segundo caso. Podemos pensar, por tanto, que en un instante de tiempo dado el transmisor tiene a su disposición un conjunto finito y discreto de formas de onda que puede hacer corresponder con los bits a transmitir [44].

Las comunicaciones aprovechan el potencial que ofrecen los sistemas electrónicos digitales con el enfoque en desarrollar terminales más baratos y pequeños. Un terminal de comunicaciones digitales contiene una enorme cantidad de software o terminales definidos por software más recientemente como lo es el HackRF One. Finalmente, los sistemas digitales permiten construir fácilmente mecanismos de multiplexación en tiempo que permite una mayor cantidad de información. En la práctica se han desarrollado algoritmos de codificación cada vez más eficientes siendo posible reducir la demanda de ancho de banda al momento de transmitir información.

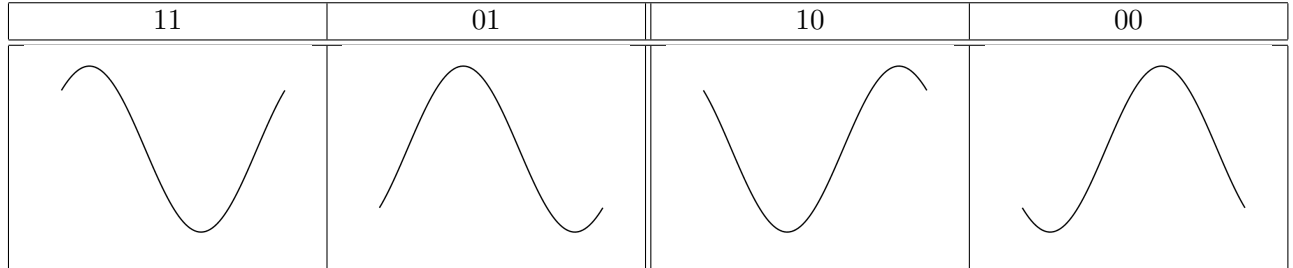
### 3.1. Modulación Digital

Existen dos formas de transmitir una señal digital. La primera no es otra que transmitir la señal directamente a través del canal sin efectuar antes ningún tipo de modulación, cuando ocurre esto, se dice que la transmisión se realiza en banda base. La segunda forma, que consiste en modular la señal con alguna técnica de modulación digital antes de ser transmitida, recibe el nombre de transmisión fuera de banda. Básicamente, modular consistirá en convertir una señal digital en una señal analógica que ira variando su amplitud, frecuencia, fase o bien amplitud y fase conjuntamente, según los valores que vaya tomando la señal digital de información. Las

grandes ventajas de la transmisión en banda ancha frente a banda base son la posibilidad de la multiplexación en frecuencia de varias señales digitales moduladas, y la mayor distancia que pueden alcanzar las señales transmitidas en banda ancha sin verse afectadas por el ruido [45].

### 3.1.1. Modulación QPSK

La modulación QPSK (Quadrature Phase Shift Keying o modulación por desplazamiento de fase en cuadratura) es una técnica de modulación digital que es utilizada en comunicaciones principalmente en sistemas inalámbricos y de transmisión de datos a alta velocidad de transferencia. La modulación consiste principalmente en la variación de la señal portadora con cuatro diferentes formas de onda variando su fase para representar los datos binarios. En el Cuadro 3.1 se muestra la representación para las posibles combinaciones binarias.



Cuadro 3.1: Generación de símbolos QPSK

La técnica que se utiliza para la modulación consiste en modificar y dividir la trama de bits por medio de la portadora en 4 valores distintos y espaciados 90 grados cada uno con respecto al anterior, de esta forma se tiene 4 valores como los que se muestran en la figura el cual representa un diagrama de constelación QPSK. El eje horizontal se refiere a los componentes que están en fase llamados “I” de la señal portadora y el eje vertical a los componentes en cuadratura “Q”. Los símbolos que se asigna se hacen en código Gray lo cual da lugar a que entre símbolos adyacentes se diferencian solo en un bit con el objetivo de minimizar la tasa de bits erróneos. Los diagramas de constelación representan la amplitud y fase de los esquemas de modulación digital y con este se pueden reconocer interferencia y distorsión de una señal.

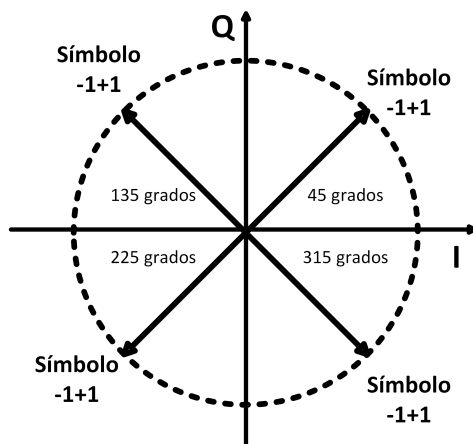


Figura 3.1: Diagrama de constelación.

En el Figura 3.1 se muestra las combinaciones a partir del diagrama de constelación donde la fase está representado por la señal portadora  $A \cos(\omega_0 t)$  y la cuadratura por la señal  $A \sin(\omega_0 t)$ . La suma de las señales en fase y cuadratura da como resultado las 4 formas de onda en las cuales por cada onda se representa un símbolo de 2 bits y se diferencian por la fase de la señal. A partir de un diagrama de constelación se puede observar los fenómenos que ocurran en la señal como lo son desincronización, amplificación y el error de los símbolos al ser representados en la constelación. El Cuadro 3.2 uestra la configuración de posibles combinaciones de seno y coseno al ser sumadas para formar ondas diferentes en fase y espaciadas 90 grados con el fin de tener formas de onda ortogonales entre sí.

Símbolo	Señal	Forma de onda	Fase de la señal
11	$I = (A) \quad Q = (A)$	$+A \cos(\omega_0 t) + A \sin(\omega_0 t)$	$\theta_1 = 45^\circ$
01	$I = -(A) \quad Q = (A)$	$-A \cos(\omega_0 t) + A \sin(\omega_0 t)$	$\theta_1 = 135^\circ$
00	$I = -(A) \quad Q = -(A)$	$-A \cos(\omega_0 t) - A \sin(\omega_0 t)$	$\theta_1 = 225^\circ$
10	$I = (A) \quad Q = -(A)$	$+A \cos(\omega_0 t) - A \sin(\omega_0 t)$	$\theta_1 = 315^\circ$

Cuadro 3.2: Símbolos QPSK

A continuación, se muestra en la Figura 3.2 el proceso de modulación en el cual como entrada se tiene la información en formato binario y en serie. A la salida se tiene una señal analógica con 4 formas de onda diferentes que se transmiten al medio inalámbrico sin contemplar el ruido y la interferencia, en forma ideal. La señal de entrada es un ejemplo para un byte en formato serie.

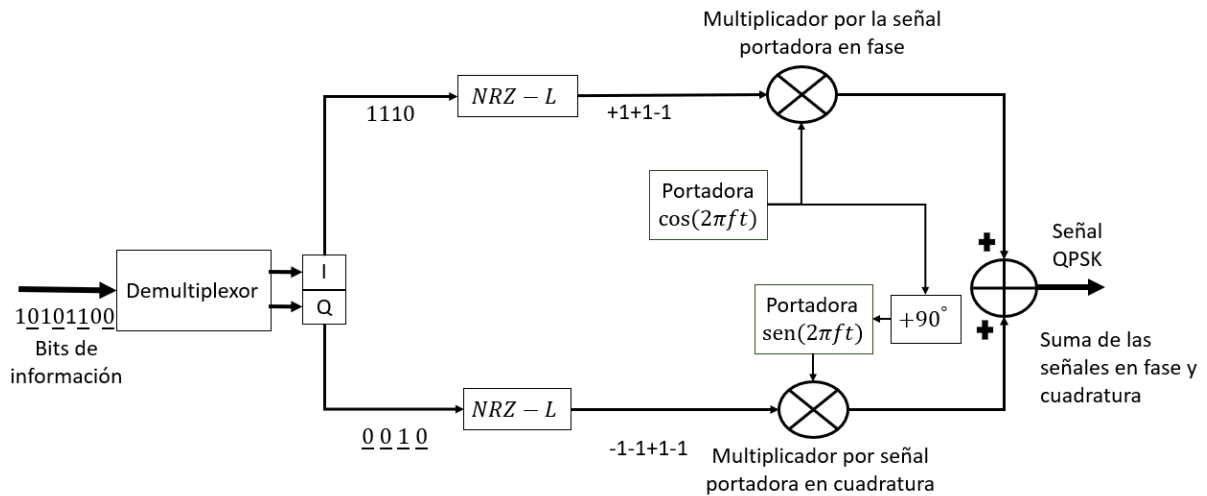


Figura 3.2: Modulación QPSK.

En la Figura 3.2 se muestra el proceso de modulación QPSK la cual se describe a continuación:

- A partir de la señal expresada en valores digitales los cuales están en forma serial y llegan a un demultiplexor con el fin de dividirlos en dos ramas, en fase y cuadratura.
- Una vez que tenemos la separación en fase y cuadratura los bits pasan por un NRZ-L (no retorno a cero) el cual se encarga de cambiar los bits a códigos de línea donde un 0 lógico será representado por  $-1$  y 1 lógico por  $+1$  con el fin de facilitar la decodificación del lado del receptor.
- Posteriormente se multiplican esos valores por una portadora que tiene como objetivo transportar la señal, para el caso de la rama en fase se multiplica por un  $A \cos(\omega_0 t)$  y la rama en cuadratura por un  $A \sin(\omega_0 t)$  los cuales están desfasados 90 grados.
- Al final se suman ambas señales porque al momento de transmitir solo se envía una señal y esta es justo la señal QPSK que se transmite la cual por forma de onda representa 2 bits.

### 3.1.2. Demodulación QPSK

Al tener la señal modulada, el siguiente paso es demodular la señal del lado del receptor. El proceso se muestra en la Figura 3.3 en la cual se vuelve a multiplicar la señal por la correspondiente portadora en las ramas de fase y cuadratura. Después de multiplicarlas se podrán identificar los bits y se procede a integrar en ese lapso, si el resultado es negativo su correspondiente interpretación es un 0 lógico y si la integral es positiva su correspondiente es un 1 lógico, finalmente se reorganizan los bits en forma de muestras digitales y se procede al proceso inverso y se pasa a su correspondiente valor analógico.

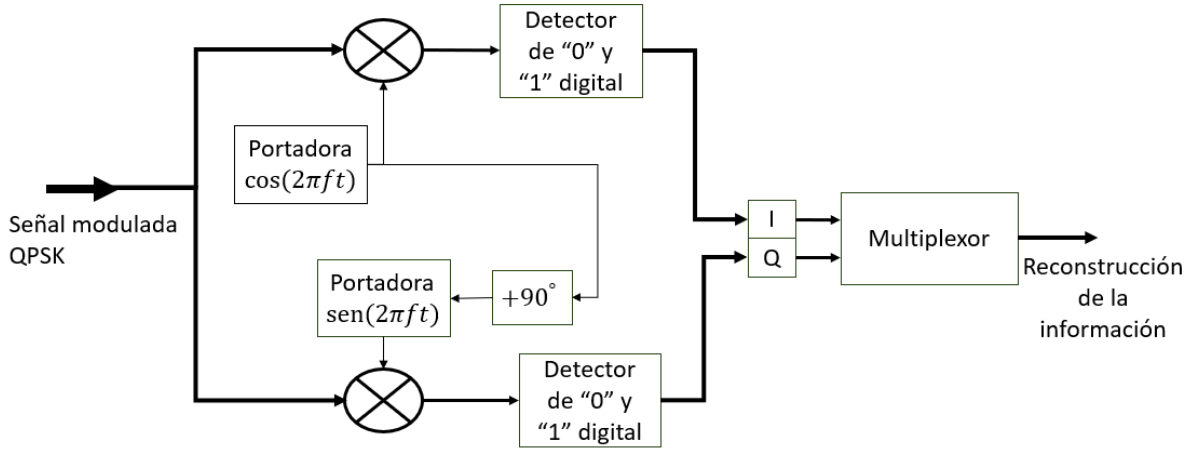


Figura 3.3: Demodulación QPSK.

### 3.2. Modelo matemático NOMA

En la BS se genera y se procesa la información de ambos usuarios, se digitaliza la información destinada para cada uno y se modula antes de ser transmitida. Se determina matemáticamente la duración de la trama de principio a fin con respecto al tiempo, adicionalmente se determina la ganancia del canal mediante la asignación de distancia entre la BS y cada uno de los usuarios.

La estación base tendrá una distancia para cada uno de los usuarios de manera que uno se denotará como  $u_f$  (usuario más lejano) y el otro como  $u_n$  (usuario más cercano) con el fin de determinar la ganancia del canal. La BS tiene una determinada potencia general de transmisión  $P_s$ , con el fin de simplificar el análisis esta será de 1. Esta potencia general será multiplicada por los coeficientes de asignación de potencia  $\alpha_f$  y  $\alpha_n$  correspondientes a cada uno de los usuarios. A cada uno de los usuarios les corresponde una determinada trama de información  $S_f$  y  $S_n$ . A partir de estos términos se desarrolla un esquema NOMA para atender a los usuarios  $u_f$  y  $u_n$  con las tramas de información  $S_f$  y  $S_n$  correspondiente a los usuarios. Donde  $y$  es la señal total que se transmitirá por la estación base y  $y(v, i)$  los símbolos de ambos usuarios enviados. Por lo tanto, tenemos la siguiente ecuación:

$$y(v, i) = \alpha_f \cdot P_s(S_{f_i}) + \alpha_n \cdot P_s(S_{n_i}) \quad (3.1)$$

A partir del modelo matemático obtenido correspondiente a la señal transmitida por la estación base, se prosigue a expresar la señal que recibirán los usuarios y sus correspondientes afectaciones en el canal de transmisión. Para el presente trabajo 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).

En la Figura 3.4 se muestra el diagrama de bloques del proceso general de la etapa de transmisión y recepción para el sistema de acceso NOMA para dos usuarios. En este se observa el acceso a la información transmitida por la estación base para dos usuarios ( $u_1$  y  $u_2$ ). Como lo muestra el diagrama a cada usuario se le asigna un factor multiplicativo de potencia total de transmisión, para posteriormente ser multiplicada por un factor de asignación de potencia correspondiente a cada usuario. La potencia total de transmisión es de uno y el factor de asignación para el usuario 1 es de 0.7 mientras que para el usuario 2 es de 0.3. Las señales con su nivel de asignación de potencia definidos se suman y se emiten a través de la estación base.

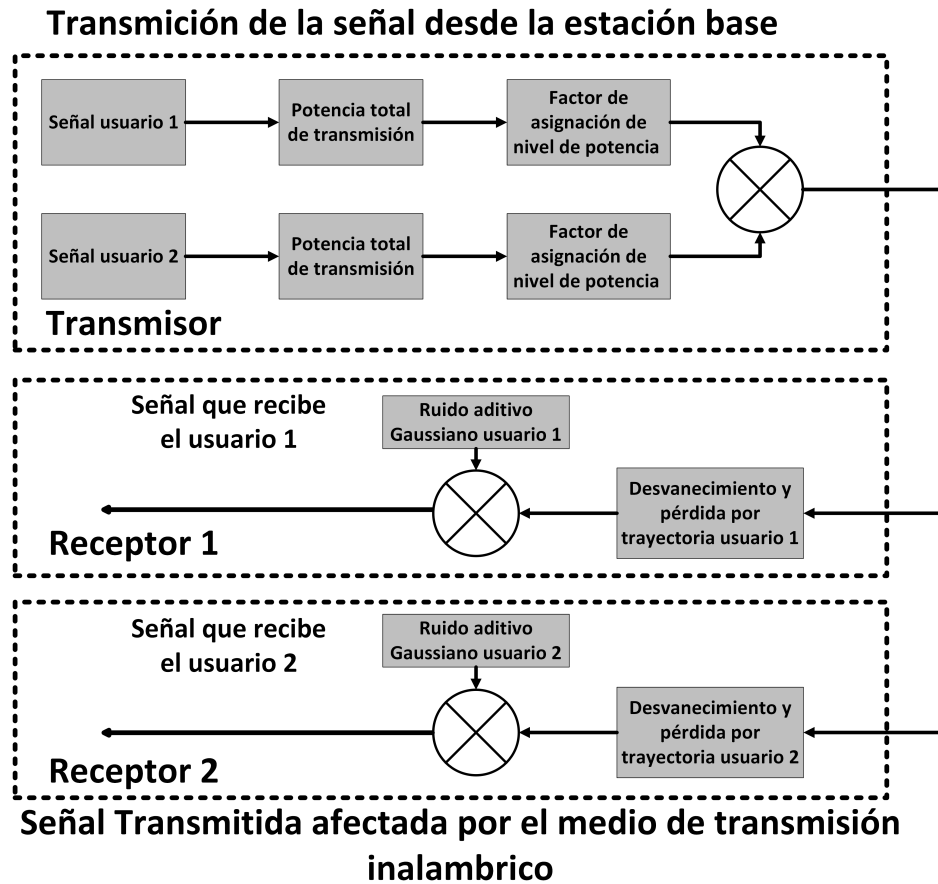


Figura 3.4: Diagrama a bloques de un sistema de transmisión NOMA y afectaciones en el canal inalámbrico.

### 3.3. Simulación de señal NOMA

La señal por transmitir es voz muestreada a 8 KHz y digitalizada en 8 bits, el tiempo de duración de la señal de voz es de 5 segundos, entonces la señal digitalizada estará compuesta por una matriz de 40,000 filas (muestras de la señal analógica) por 8 columnas (valores binarios para cada muestra). Al modulador QPSK le llegan los bits en forma serial correspondiente a

toda la información y son separados en fase y cuadratura, a partir de esta se tienen 2 vectores de 160000 componentes. En la Figura 3.5 se muestra las componentes de la señal de voz en tiempo y en frecuencia, en esta se muestra la señal en banda base puesto que no está siendo afectada por ningún tipo de modulación, pero se necesita de una portadora para poder transmitir la señal de voz y que esta se vea lo menos afectada posible con el fin de que el usuario pueda recuperar la información.

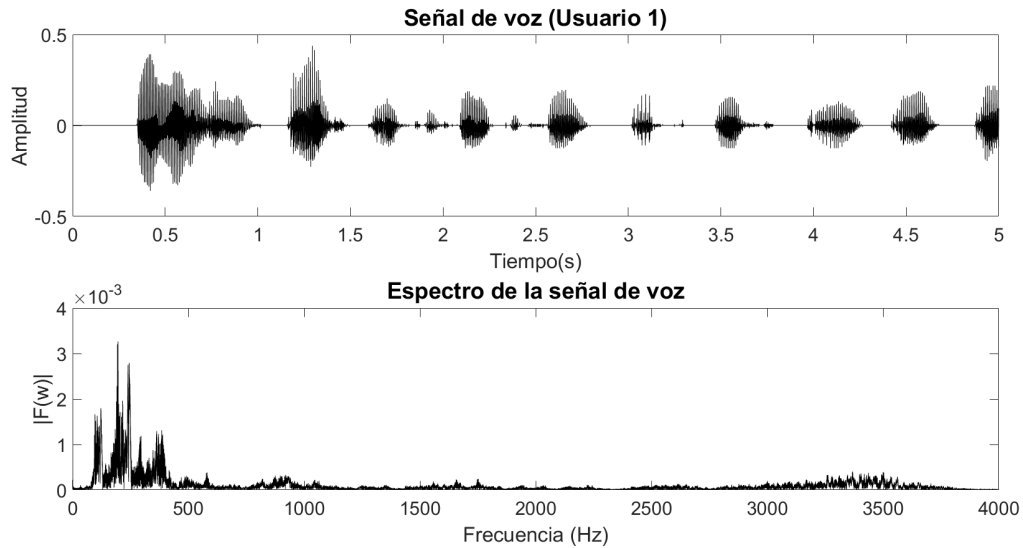


Figura 3.5: Señal de voz en tiempo y frecuencia del usuario 1.

### 3.3.1. Señal NOMA

La frecuencia de la portadora es de 2.4 GHz que es una banda de uso libre. Se suman ambas señales moduladas correspondientes a las señales de voz quedando ahora una señal analógica que será enviada. La Figura 3.6 muestra los primeros 4 símbolos de cada usuario al modular la señal de voz, estos símbolos están representados por 100 muestras cada uno. Se le asigna una potencia a cada usuario para el usuario 1 (0.7) y para el 2 (0.3) y se suman ambas señales moduladas. Para el usuario 1 se tiene una señal dominante sobre la del usuario 2 entonces la señal dominante es más fácil de recuperar y para el usuario 2 se tiene que hacer uso de SIC para recuperar la información.

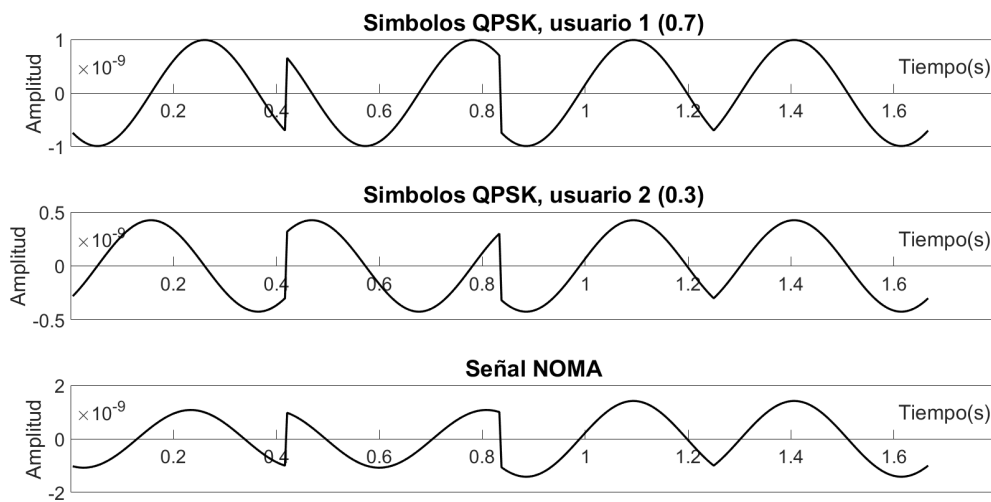


Figura 3.6: Señal NOMA.

### 3.3.2. Recuperación de las señales

La recuperación de los usuarios se realiza como se muestra en la Figura 3.7, el primer usuario al asignarle una potencia mayor que es de 0.7 es más fácil recuperar esa información puesto que la información del primer usuario se sobrepone sobre la del segundo usuario, pero en el caso de usuario 2 es más compleja su recuperación puesto que esta es de menor potencia y es menos visible que la señal de mayor potencia.

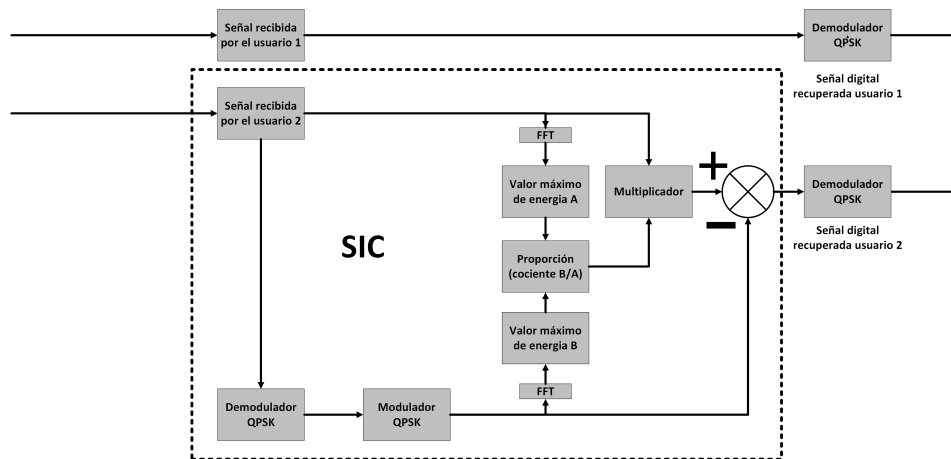


Figura 3.7: Recuperación de las señales por los receptores.

Para la recuperación de la información del usuario 2 se siguen los siguientes pasos:

- Demodular nuevamente la señal recibida por el usuario 1, para recuperar la señal digital del usuario 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.
- La señal pura y la modulada se deben expresar en el dominio de la frecuencia.
- Se mide el valor máximo del nivel de energía de cada señal.
- 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.
- 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.
- 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.

La Figura 3.8 muestra la recuperación de la señal asignada al usuario 1, a esta se le demodula puesto que es la señal con asignación de potencia mayor, esta se ve afectada por la información del usuario 2 pero aún con esto se puede recuperar.

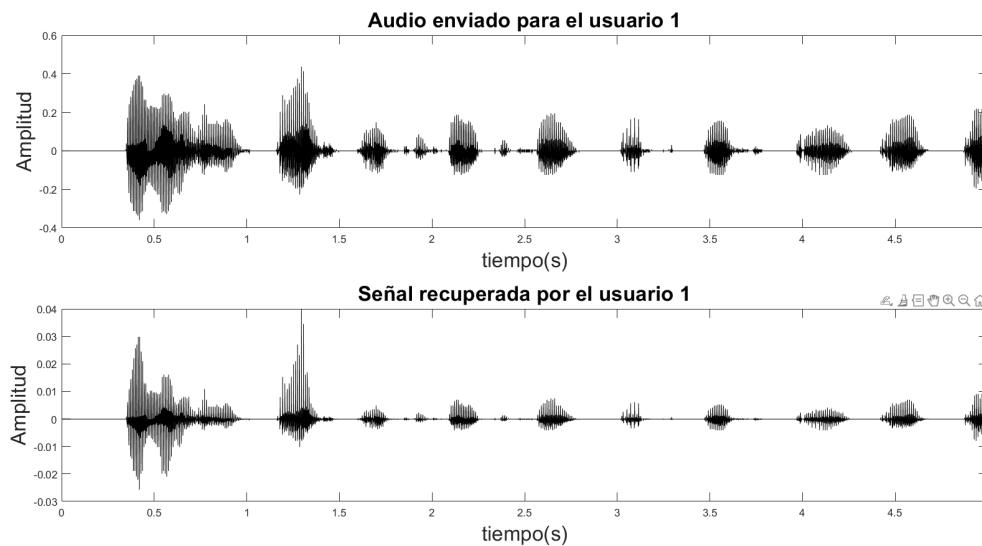


Figura 3.8: Señal recuperada del usuario 1.

## Capítulo 4

# Propagación de señal NOMA

La propagación de señales es un aspecto fundamental en las comunicaciones inalámbricas, ya que define cómo las ondas de radio se transmiten a través del espacio y afectan la cobertura y calidad de la señal. En el caso del HackRF One, un dispositivo de radio definida por software (SDR), la propagación de señales juega un papel crucial en la experimentación y análisis de diferentes tipos de comunicaciones. HackRF One permite transmitir y recibir señales de radio en un amplio rango de frecuencias (1 MHz a 6 GHz), lo que facilita el estudio de cómo las señales se comportan en diversas condiciones y entornos.

La propagación de señales depende de varios factores, como la frecuencia, la distancia, la atmósfera y los obstáculos. Por ejemplo, las señales de mayor frecuencia suelen tener un alcance más corto, pero son más eficientes en el uso de bandas anchas, mientras que las de menor frecuencia pueden cubrir distancias mayores pero con mayor susceptibilidad a interferencias. Al utilizar HackRF One, los usuarios pueden simular y estudiar cómo las señales se propagan en diferentes configuraciones, ajustando parámetros como la potencia de transmisión y la modulación, y observar los efectos en la calidad de la señal en función de la distancia, obstáculos y condiciones ambientales.

En resumen, el HackRF One es una herramienta poderosa para explorar la propagación de señales, permitiendo tanto a profesionales como a aficionados experimentar y analizar cómo las señales de radio se comportan en una variedad de condiciones. A través de este dispositivo, se pueden realizar pruebas y estudios prácticos sobre la cobertura y eficiencia de las transmisiones inalámbricas.

### 4.1. Ruido, interferencia y distorsión

El ruido son componentes no deseadas que se añaden a la señal eléctrica. Diferenciamos dos tipos de ruido, el ruido inherente, y el ruido de interferencias.

El ruido inherente es producido por la propia naturaleza física de los dispositivos electrónicos en funcionamiento, el tipo de ruido inherente que se produce en los sistemas se clasifican como:

- La agitación térmica producto del movimiento de las moléculas en un material y depende principalmente de su temperatura y estado de agregación (ruido térmico).

- La tensión producida por el movimiento de los electrones en un conductor (ruido de tránsito).
- El ruido de disparo en semiconductores (ruido shoot).

El ruido de interferencias producido por el acoplamiento eléctrico y magnético de la señal a transmitir y proviene del exterior. Este se produce por fenómenos naturales y por el acoplamiento con otros sistemas como son:

- Ruido proveniente de fenómenos como tormentas eléctricas o tormentas solares (ruido atmosférico).
- Ruido que se origina fuera de la atmosfera terrestre (ruido cósmico).
- Ruido proveniente de otros sistemas.

La distorsión es un fenómeno no deseado que transforma las señales, produciendo la degradación de estas.

Generalmente se distingue entre distorsión lineal y distorsión no lineal, por el parámetro afectado de la señal. En general se destacan dos tipos de distorsión (lineal y no lineal) y afectan directamente en los parámetros de la señal como:

- Distorsión lineal producto de alteraciones en la amplitud y fase de los componentes frecuenciales de la señal. Este tipo de distorsión se debe principalmente cuando las señales sufren retardos por la dispersión en la propagación de la señal. Este tipo de distorsión no genera más componentes espectrales en la señal afectada.
- Distorsión no lineal producto de la saturación de la señal en amplitud o al efecto de intermodulación. Cuando este tipo de distorsión se presenta el difícilmente recuperable y puede originar nuevas componentes espectrales.

## 4.2. Radio definida por software (SDR)

La radio definida por software (SDR, por sus siglas en inglés: Software Defined Radio) es una tecnología que permite realizar muchas de las funciones de radio tradicionales a través de software en lugar de depender completamente de hardware especializado. Esto incluye tareas como la modulación, demodulación, codificación y decodificación de señales. En un sistema SDR, gran parte del procesamiento de las señales se maneja mediante algoritmos de software, lo que proporciona una flexibilidad considerable al adaptarse a diferentes estándares de comunicación sin la necesidad de modificar el hardware.

Los componentes principales de un sistema SDR incluyen el hardware básico, como antenas y convertidores analógicos a digitales (y viceversa), que se encargan de transformar las señales de radiofrecuencia en datos digitales. Sin embargo, las funciones más complejas, como la modulación y la decodificación, se llevan a cabo mediante software, lo que permite que el mismo hardware sea reutilizado para diversas aplicaciones de radio y estándares de comunicación, solo con cambios en el software.

Una de las principales ventajas del SDR es su flexibilidad. Al poder actualizarse mediante software, un sistema SDR puede adaptarse fácilmente a nuevos protocolos y tecnologías sin necesidad de cambiar el hardware. Esta capacidad de actualización y reconfiguración facilita la interoperabilidad entre diferentes sistemas y permite que un mismo dispositivo pueda manejar múltiples estándares de comunicación. Además, la reducida dependencia de hardware especializado contribuye a disminuir los costos operativos y de implementación, ya que se eliminan los gastos de adquirir equipos específicos para cada estándar.

Sin embargo, también existen desventajas. La principal es el alto consumo de recursos computacionales. El procesamiento de señales en tiempo real a través de software exige un hardware potente, como procesadores especializados (por ejemplo, FPGAs o DSPs), lo que puede resultar en un mayor consumo energético, especialmente en dispositivos portátiles. Además, en algunos casos, la implementación en software puede no ser tan eficiente como los sistemas hardware dedicados, especialmente en aplicaciones de alta velocidad.

Los usos del SDR son diversos y se extienden a múltiples áreas. En el ámbito de las telecomunicaciones, es utilizado en redes móviles como LTE y 5G, permitiendo que las estaciones base y otros dispositivos se adapten a los cambios en los estándares sin necesidad de hardware nuevo. En el sector militar, las radios SDR permiten la creación de equipos de comunicación reconfigurables que pueden operar en múltiples frecuencias y protocolos, garantizando la flexibilidad en entornos cambiantes. También se emplea en comunicaciones satelitales, radioaficionados, y en la implementación de tecnologías como Wi-Fi y Bluetooth.

Algunos ejemplos de hardware SDR incluyen plataformas como HackRF y USRP (Universal Software Radio Peripheral), que permiten transmitir y recibir señales en una amplia gama de frecuencias y con diversas técnicas de modulación. Estas plataformas, controladas por software, son herramientas populares entre investigadores, desarrolladores y radioaficionados debido a su accesibilidad y versatilidad.

#### 4.2.1. Esquema básico de un sistema de radio definido por software

El esquema básico de funcionamiento de un sistema de Radio Definida por Software (SDR) utilizando GNU Radio y HackRF One se ilustra en la Figura 4.1. Este sistema, que representa una combinación poderosa y versátil para la transmisión y recepción de señales de radio, sigue un flujo de trabajo estructurado que permite la manipulación y procesamiento de señales a través de software.

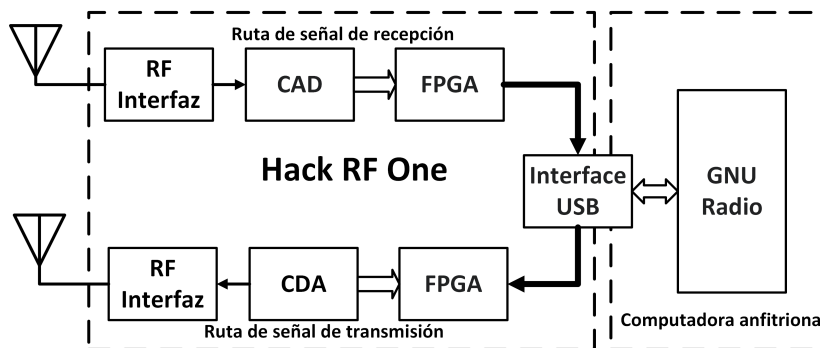


Figura 4.1: Radio definido por software.

El flujo de trabajo básico de este sistema comienza con la entrada de datos al sistema de SDR a través de la interfaz de software. Estos datos pueden provenir de diversas fuentes, como señales generadas por el propio sistema o señales de radiofrecuencia externas. Luego, los bloques de procesamiento de GNU Radio se encargan de aplicar las transformaciones necesarias, como la modulación de las señales o la conversión de frecuencias, utilizando algoritmos de procesamiento digital de señales. Una vez que los datos han sido procesados y modulados adecuadamente, el HackRF One convierte estas señales digitales en señales de radiofrecuencia, que pueden ser transmitidas mediante una antena.

Este enfoque permite una gran flexibilidad en la operación del sistema SDR, ya que, al depender en gran medida del software, es posible modificar y adaptar el funcionamiento del sistema para diferentes aplicaciones sin necesidad de cambios costosos en el hardware. Este diseño modular y programable también posibilita la experimentación y la implementación de nuevos protocolos de comunicación o técnicas de modulación de manera rápida y eficiente, lo que hace del SDR una herramienta clave en el desarrollo de nuevas tecnologías de comunicación.

### **Transmision HackRF One**

En transmisión el ordenador genera a partir del software de SDR una secuencia correspondiente a una señal en banda base, y la transfiere al DAC, la señal en banda base analógica resultante de dicha conversión se traslada a la frecuencia deseada de RF con un up-converter y se ajusta su potencia con un amplificador. Algunas ventajas significativas de la SDR son:

- Admite fabricación a gran escala.
- Admite fabricación a gran escala.
- No es necesario ubicar componentes discretos.
- No degrada las señales
- No requiere reajustes manuales. Es actualizable.

### **Recepcion HackRF One**

En la recepción se tiene una etapa analógica de entrada y filtrado de la señal de RF, que se introduce en un conversor de frecuencia down-converter y la sitúa en banda base, la señal en banda base es digitalizada mediante un ADC que muestrea la señal, y la envía al software del ordenador, en algunos sistemas SDR el hardware de adquisición incluye sistemas de DSP para asumir tareas de procesamiento y filtrado digital previas a las que realiza el software.

#### **4.2.2. GNU Radio**

GNU Radio es un marco de desarrollo de software libre y de código abierto que permite crear sistemas de radio definidos por software (SDR). Su principal objetivo es proporcionar una plataforma flexible y accesible para la creación, simulación y procesamiento de señales en tiempo real, utilizando herramientas y bibliotecas de software. Este entorno está diseñado tanto para usuarios principiantes como para expertos, y se aplica en una variedad de campos, desde las comunicaciones inalámbricas hasta la investigación en sistemas de radiofrecuencia.

GNU Radio permite el diseño de sistemas SDR sin la necesidad de un hardware especializado, utilizando bloques de procesamiento que se pueden combinar para crear aplicaciones de comunicación, modulación, demodulación, filtrado, decodificación y otras funciones de procesamiento de señales. Estos bloques, que son componentes modulares, se pueden interconectar de forma gráfica a través de una interfaz de usuario, conocida como GNU Radio Companion (GRC), o bien se pueden programar de forma más detallada utilizando lenguajes como Python y C++. Gracias a su arquitectura modular, GNU Radio facilita la creación de sistemas flexibles que pueden adaptarse a diversas necesidades, desde experimentación en comunicación hasta la implementación de prototipos de sistemas de radio completos. Uno de los aspectos más destacables de GNU Radio es su capacidad para trabajar con una amplia variedad de dispositivos de hardware SDR, como HackRF One, USRP (Universal Software Radio Peripheral), y otros dispositivos compatibles. A través de estos dispositivos, los usuarios pueden generar señales de radio reales, transmitir las y recibir las, y realizar análisis detallados de cómo se comportan las señales en el mundo físico. Además, GNU Radio es utilizado para estudiar la propagación de señales, realizar pruebas de interferencia y cobertura, y diseñar sistemas avanzados de comunicaciones, incluyendo redes móviles, comunicaciones satelitales y sistemas de radar. La comunidad de usuarios y desarrolladores de GNU Radio es activa y diversa, lo que ha contribuido a su continuo crecimiento y mejora. Dada su naturaleza de código abierto, cualquier usuario puede contribuir al desarrollo de nuevas funciones, bloques y mejoras, lo que ha permitido que GNU Radio se convierta en una herramienta muy poderosa en la investigación académica, la educación y la industria. Además, existen múltiples recursos, tutoriales y foros disponibles para aquellos que deseen aprender a usar la plataforma o resolver problemas específicos. En resumen, GNU Radio es una herramienta robusta y versátil para la creación y experimentación con sistemas de radio definidos por software. Su arquitectura modular y su capacidad para interactuar con una variedad de dispositivos de hardware lo convierten en una opción popular tanto para el desarrollo de prototipos como para la investigación avanzada en comunicaciones inalámbricas. Al ser un proyecto de código abierto, GNU Radio promueve la colaboración y el aprendizaje, lo que lo convierte en un recurso valioso para profesionales, investigadores y aficionados interesados en la radiofrecuencia y las comunicaciones inalámbricas.

### 4.2.3. HackRF One

HackRF One es un periférico de radio definido por software capaz de transmitir o recibir señales de radio de 1 MHz a 6 GHz. Diseñado para permitir la prueba y el desarrollo de tecnologías de radio modernas y de próxima generación, HackRF One es una plataforma de hardware de código abierto que se puede utilizar como periférico USB. Según Great Scott Gadgets, el HackRF One, posee las siguientes características:

- Frecuencia de funcionamiento de 1 MHz a 6 GHz
- Transceptor semidúplex
- Hasta 20 millones de muestras por segundo
- Muestras en cuadratura de 8 bits (I de 8 bits y Q de 8 bits)
- Compatible con GNU Radio, SDR# y más

- Ganancia RX y TX configurable por software y filtro de banda base
- Alimentación del puerto de antena controlada por software (50 mA a 3,3 V)
- Conector de antena hembra SMA
- Entrada y salida de reloj hembra SMA para sincronización
- Botones convenientes para programar
- Cabezales de pines internos para expansión
- USB 2.0 de alta velocidad
- Alimentado por USB
- Hardware de código abierto

#### 4.2.4. GNU radio companion

La interfaz de GNU Radio companion se muestra en la Figura 4.2 donde se distinguen 5 paneles diferentes; con el numero 1 tenemos la terminal de comandos donde se pueden visualizar errores de ejecución en el programa, con el 2 se muestran las variables que están declaradas en el proyecto, en el 3 la librería en la que se encuentran los bloques, en 4 el área de trabajo donde se colocan los bloques necesarios para la ejecución de una rutina, y en 5 se tiene la barra de herramientas donde se pueden crear o eliminar archivos de tipo .grc.

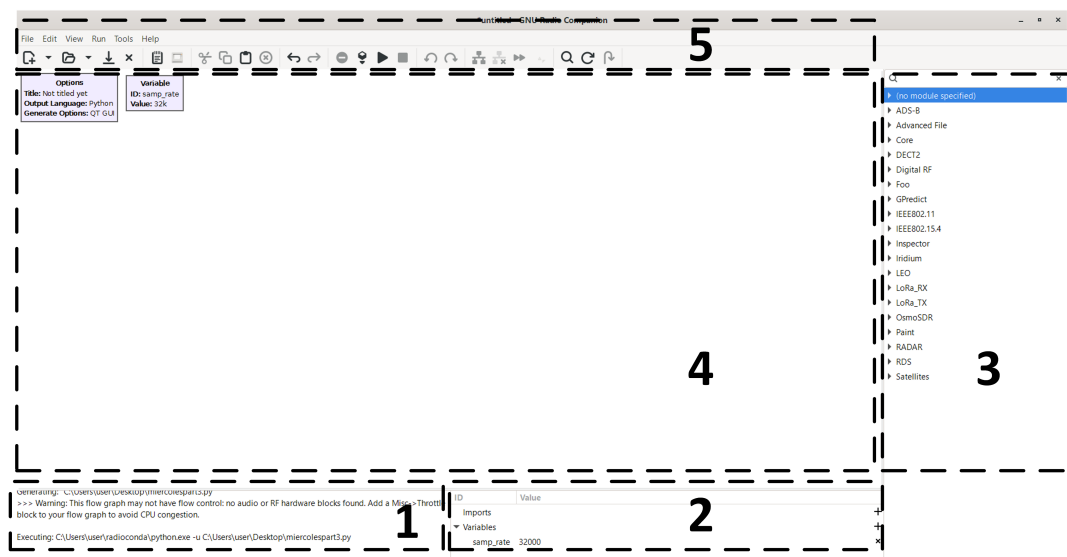


Figura 4.2: Interfaz de GNU Radio Companion.

## Tipos de datos

GNU Radio puedes manejar variables de varios tipos y utilizarlas para controlar diferentes aspectos de tu flujo de procesamiento, como frecuencias, amplitudes o cualquier parámetro dinámico dentro de los bloques. Cada puerto de entrada y salida de un bloque tendrá un tipo de datos asociado. El tipo de datos se identifica por el color del puerto de entrada y salida. Los datos más comunes son Complex Float 32 en azul y Float 32 en naranja. En la Figura 4.3 se muestra cada uno de los tipos de datos que se encuentran en el entorno de GNU Radio.

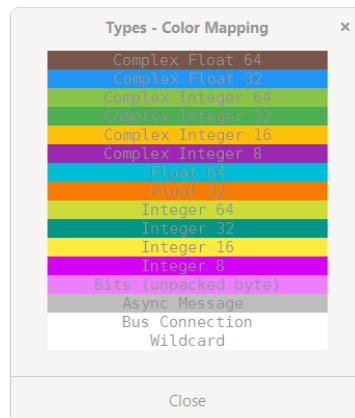


Figura 4.3: SDR y GNU Radio

## Variable

Este bloque asigna un valor a una variable única. Puede utilizar la variable en el campo de parámetros de otro bloque simplemente utilizando el ID del bloque de variables. El bloque variable como se muestra en la Figura 4.4 es una forma conveniente de tener un valor que se usa en muchos lugares diferentes (es decir, parámetros de otros bloques) y poder cambiarlo fácilmente.

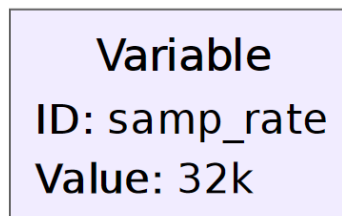


Figura 4.4: Bloque de una variable en GNU Radio

## Throttle

Este bloque como se muestra en la Figura 4.5 limita el flujo de muestras de forma que no se exceda la tasa de muestras por segundo. Este bloque no modifica en nada la señal a su salida y este se usa específicamente si no se cuenta con un limitador de velocidad que normalmente es hardware (por ejemplo, un SDR, un altavoz o un micrófono). GNU Radio ve una señal

como una secuencia atemporal de números y los procesa con las características máximas del computador haciendo uso excesivo de los recursos del sistema, es por esto por lo que para evitar ralentización en la simulación en GNU radio se hace uso de este bloque o en su defecto si se cuenta con el hardware este bloque no es necesario.

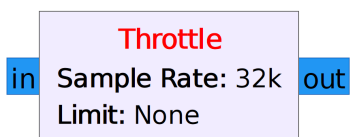


Figura 4.5: Bloque Throttle en GNU Radio.

### Signal Source

Signal Source como se muestra en la Figura 4.6 es un generador de señales que es capaz de generar una variedad de formas de onda y admite datos de tipo complejo, float, int y short.

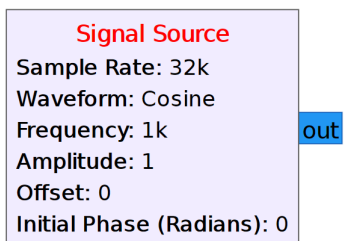


Figura 4.6: Bloque Signal Source en GNU Radio.

Al dar doble click sobre el bloque se accede a la configuración del bloque como se muestra en la Figura 4.6 en el cual se pueden modificar los siguientes atributos:

- Sample Rate, es la frecuencia de muestreo promedio obtenidas en un segundo. Sus unidades son muestras por segundo o hercios.
- Waveform, son las formas de onda disponibles en el bloque como son Constante, Seno, Coseno, Cuadrada, Triangular y Diente de sierra.
- Frequency, es la frecuencia que tiene la forma de onda (predeterminada: 1000).
- Amplitude, es la amplitud de salida de la señal (predeterminada: 1).
- Offset, es el desplazamiento en el eje y que se puede dar a la señal (predeterminada: 0).
- Initial Phase (Radians), es la fase de la señal de interés y se cambia en formato de radianes (predeterminada: 0).

### QT GUI Time Sink

Este bloque es un receptor gráfico basado en QT que toma conjuntos de flujos flotantes o complejos y los representa gráficamente en el dominio del tiempo. Cada señal se representa

gráficamente con un color diferente y las opciones del bloque se pueden usar para cambiar la etiqueta y el color de un número de entrada determinado. Este bloque trabaja con variables de tipo Complex, Float, Complex Message y Float Message. Entre sus principales características del bloque destacan las siguientes:

- Name, es el nombre que se le pone al gráfico y se muestra en la parte superior del gráfico.
- Y Axis Label, es la etiqueta del eje Y que se agrega al gráfico, la etiqueta del eje X es el Tiempo que se agrega automáticamente al gráfico.
- Y Axis Unit, son las unidades de datos que se muestra delante de la etiqueta dl eje Y. Se muestra entre paréntesis.
- Number of Points, es el número de puntos de la señal de interés que se muestra en el eje X.
- Number of Inputs, es el número de entrada a este bloque, se pueden comparar diferentes tipos de señales cambiando el número de entradas en este bloque.
- Update Period, es el periodo de actualización de los datos de la trama.

En la Figura 4.7 de muestra la simulación de una señal seno en el bloque QT GUI Time Sink donde se puede configurar los parámetros según el requerimiento del sistema.

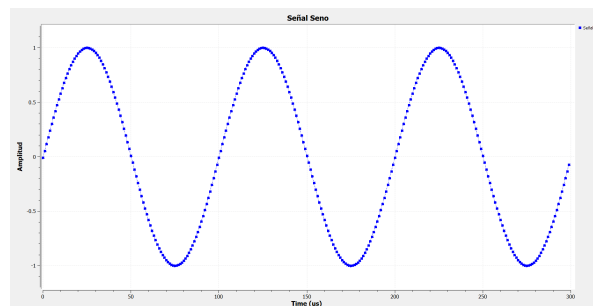


Figura 4.7: Señal Seno en QT GUI Time.

### 4.3. Diagrama del Transmisor NOMA EN GNU Radio

Como fuente de información se tiene audios de 5 segundos a una frecuencia de muestreo de 8 KHz los cuales están previamente procesados en MATLAB donde se procesa hasta lograr las señales en fase y cuadratura con la información en forma de códigos de línea. la información en fase y cuadratura de la señal de voz se guardan en archivos .dat. En GNU Radio se pueden leer diferentes tipos de archivos con el bloque File Source y trabajar con la información del archivo. A partir de los archivos en fase y cuadratura se procede a modular la señal multiplicando por seno y coseno respectivamente. Al final se suman ambas señales obteniendo la modulación de la señal QPSK. En la Figura 4.8 se muestra el diagrama a bloques de la modulación QPSK para el primer usuario.

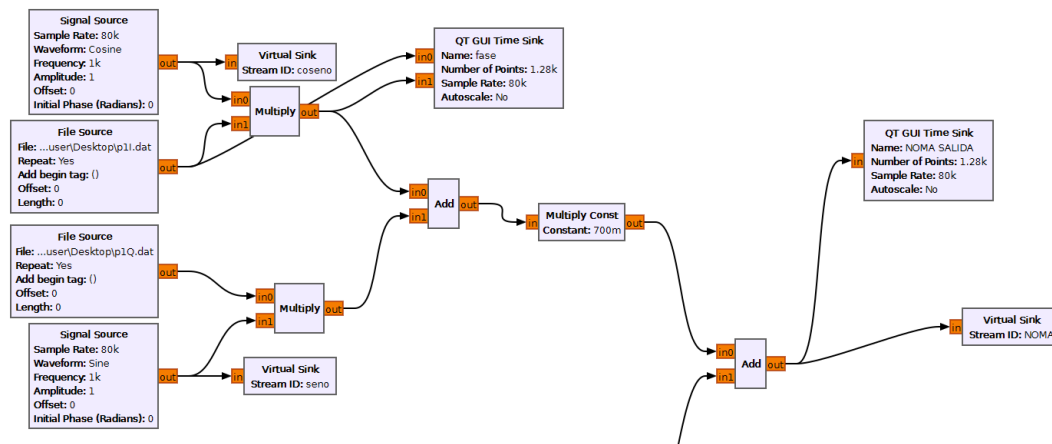


Figura 4.8: Modulación QPSK para el usuario 1.

La Figura 4.9 muestra la modulación QPSK para la información del segundo usuario donde se realiza el mismo proceso. Con la información de ambos usuarios modulada se procede a la asignación de potencia para ambos usuarios.

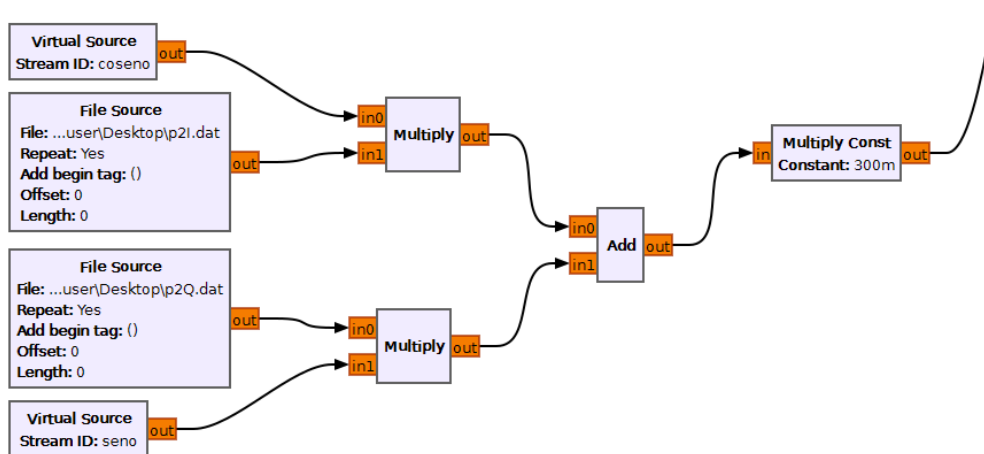


Figura 4.9: Modulación QPSK para el usuario 2.

En la Figura 4.10 se muestra la asignación para los usuarios con 0.7 para el usuario 1 y 0.3 para el usuario 2.

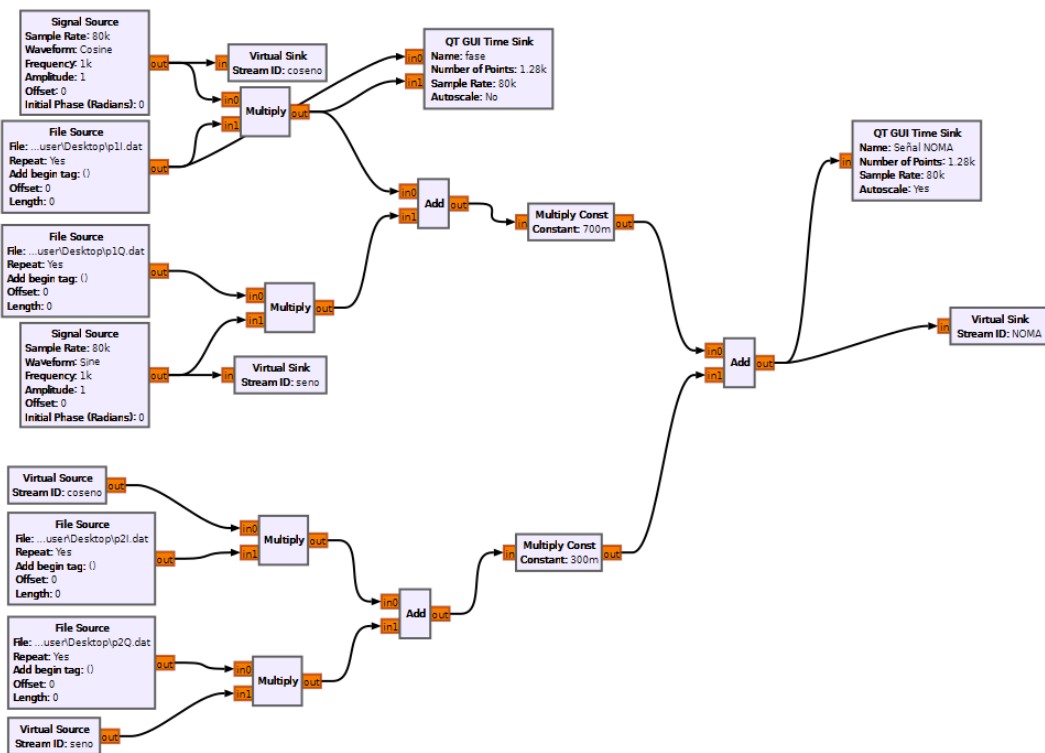


Figura 4.10: Asignación de potencia a las señales.

Con la asignación de potencia para las señales, el siguiente paso es sumar ambas señales para obtener la señal NOMA. El Figura 4.11 se muestra la forma que tiene la señal NOMA a transmitir, está ahora esta codificada y representa la información de ambos usuarios.

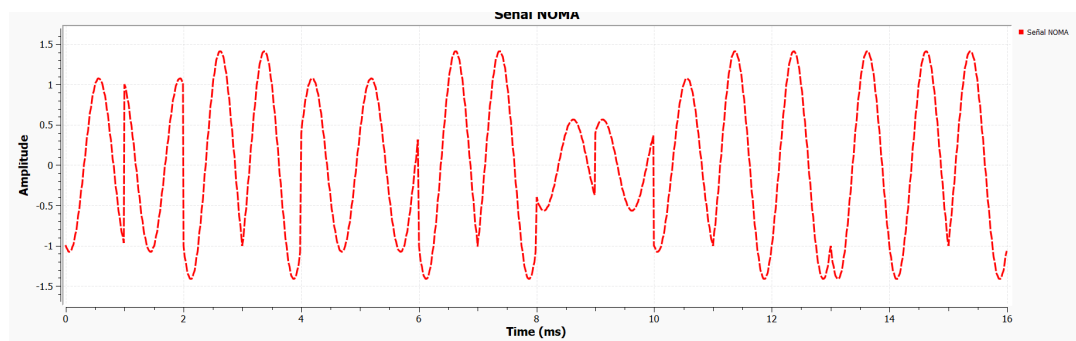


Figura 4.11: Señal NOMA en QT GUI Time.

Por la forma en la que las tarjetas trabajan con procesos internos de conversión ascendente y descendente se tiene que modular esta información con el fin de recuperar la información del lado del receptor. La conversión ascendente y descendente permite trabajar con la información en banda base puesto que la tarjeta hace el traslado en frecuencia a 2.4 GHz y del lado del receptor se encarga de regresar a la frecuencia original de la señal NOMA. La Figura 4.12

muestra el diagrama a bloques de la modulación AM en el lado del transmisor.

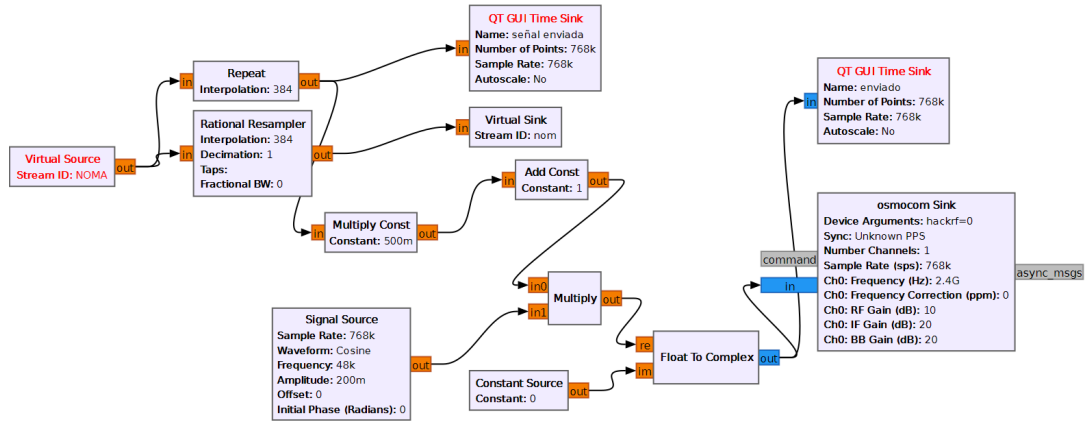


Figura 4.12: Diagrama a bloques de modulación en AM de la señal NOMA.

En la Figura 4.13 se muestra la señal NOMA modulada en AM la cual está ahora lista para ser enviada por medio del bloque de transmisión Osmocom para la tarjeta HackRF One.

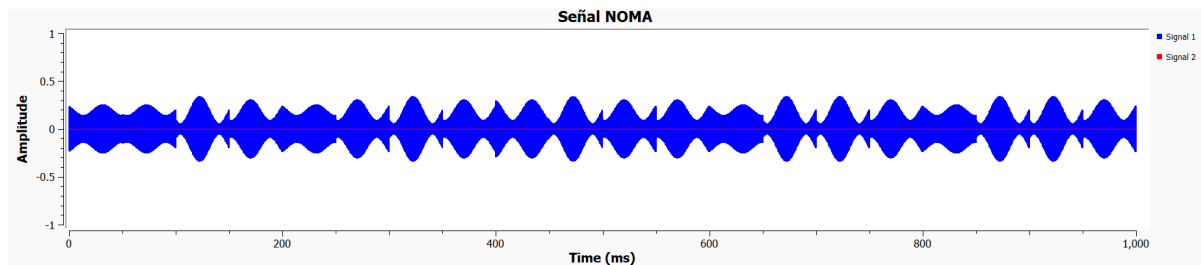


Figura 4.13: Señal NOMA modulada en amplitud

#### 4.4. Diagrama del Receptor en GNU Radio

En el receptor se sintoniza a la misma frecuencia y a la misma frecuencia de muestreo como se muestra en la Figura 4.13 donde tenemos la entrada de la señal en la tarjeta receptora y como esta se ve afectada por los diferentes tipos de distorsión, interferencia y ruido.

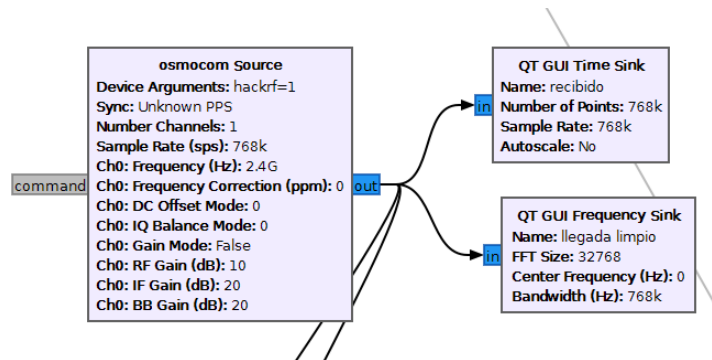


Figura 4.14: Bloques de recepción de señal NOMA.

La Figura 4.15 nos muestra lo que se obtuvo de la señal, en esta se muestra que se tiene dos señales correspondientes a la fase y cuadratura de la señal AM, a partir de este paso se van a seguir una serie de pasos para recuperar la señal AM.

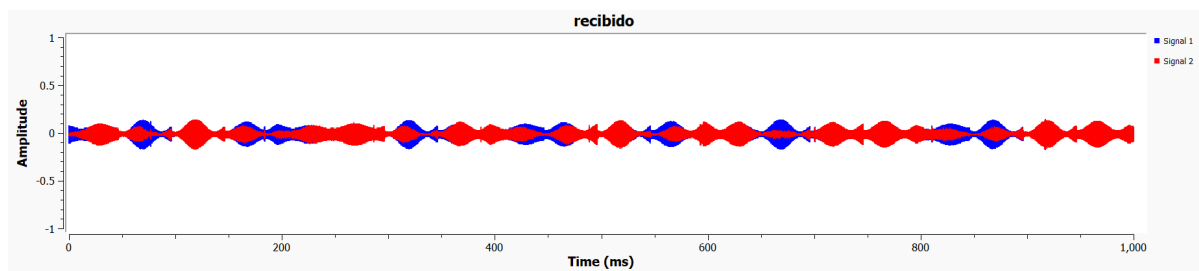


Figura 4.15: Señal NOMA en el receptor.

Para recuperar la señal NOMA, como se ilustra en la Figura 4.16, se sigue una serie de pasos previos a la recuperación de las muestras de la señal. El primer paso consiste en obtener la magnitud de la señal, con el objetivo de asegurar que los valores sean únicamente positivos. Posteriormente, dado que la señal NOMA permanece en banda base, se aplica un filtro pasa bajas para eliminar la señal portadora de AM y obtener exclusivamente la señal NOMA pura. Finalmente, la señal procesada se guarda en un archivo con extensión .dat para su posterior análisis y procesamiento en MATLAB.

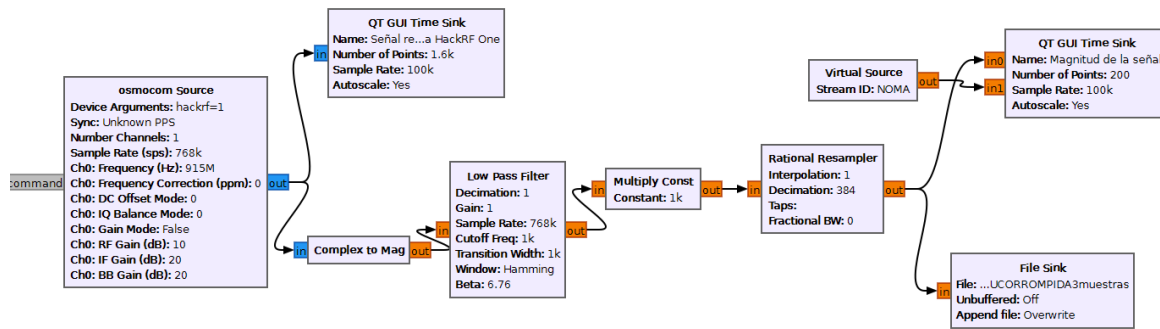


Figura 4.16: Recuperación de señal NOMA.

## 4.5. Medición de desempeño de la señal NOMA

El desempeño de los sistemas de comunicación se mide comúnmente a través de la tasa de error de bit (BER) y el diagrama de ojo, dos parámetros fundamentales que permiten evaluar la calidad de la transmisión de señales. El BER es una métrica clave que indica la proporción de bits recibidos incorrectamente en relación con el total de bits transmitidos, proporcionando una evaluación cuantitativa de la fiabilidad de un sistema. En términos generales, un BER bajo refleja una transmisión exitosa y precisa, mientras que un BER alto señala problemas en la transmisión, como interferencias o ruido, que pueden afectar la integridad de los datos.

Por otro lado, el diagrama de ojo es una herramienta visual que permite analizar cómo se comporta la señal a lo largo del tiempo, representando la señal recibida y ayudando a identificar problemas como la distorsión, el ruido y la interferencia. Este diagrama se genera superponiendo múltiples ciclos de la señal, lo que permite observar la forma de onda de manera clara. Un diagrama de ojo nítido y amplio indica que la calidad de la señal es buena, lo que generalmente corresponde a un bajo BER. Cuando el diagrama se cierra, indicando una mayor interferencia o distorsión, el BER tiende a aumentar. Así, ambas herramientas, BER y diagrama de ojo, son esenciales para diagnosticar y optimizar el rendimiento de los sistemas de comunicación, permitiendo mejorar la fiabilidad y la calidad de las transmisiones.

### 4.5.1. Diagrama de ojo

El diagrama de ojo es una herramienta gráfica que proporciona una visualización detallada del comportamiento temporal de una señal de comunicación digital. Este diagrama se obtiene al superponer varias formas de onda de la señal, representando una serie de ciclos repetidos en función del tiempo. En un diagrama de ojo ideal, la forma de onda es clara y no presenta distorsión, lo que indica que la señal ha sido transmitida correctamente y que el sistema de comunicación funciona de manera óptima. El ojo en el diagrama se forma debido a la superposición de estas formas de onda, y su claridad es un buen indicador de la calidad de la señal recibida.

El diagrama de ojo es especialmente útil para evaluar la interferencia, el ruido y los efectos de distorsión en la señal. Un diagrama claro, con un ojo bien abierto, indica que los símbolos de la señal se distinguen fácilmente y que el sistema de transmisión es robusto. Sin embargo,

si el ojo se cierra, significa que la señal está experimentando interferencias o distorsiones, lo que aumenta la probabilidad de error en la recepción. Además, el diagrama permite observar aspectos clave de la señal, como la sincronización temporal y la integridad de la forma de onda, que son esenciales para el buen funcionamiento de los sistemas de comunicación digital. En resumen, el diagrama de ojo es una herramienta diagnóstica valiosa para los ingenieros, ya que proporciona información visual sobre la calidad de la señal y permite detectar problemas que afectan el rendimiento del sistema.

Para el diagrama de ojo se obtuvo a partir de la simulación de dos casos en la primera se simuló en MATLAB todo el proceso y en el segundo caso se transmitió la señal NOMA por la tarjeta HackRF One y se procesó lo obtenido en MATLAB. El proceso se realizó para señales en las que se tenían 3 muestras por símbolo NOMA y 10 muestras por símbolo.

En la Figura 4.17 se presenta el diagrama de ojo correspondiente a una simulación en MATLAB con tres muestras por símbolo, bajo condiciones ideales. En este escenario, la programación y simulación realizadas en MATLAB permitieron una recuperación exitosa de la señal, logrando una tasa de recuperación del 100 por ciento para las señales de ambos usuarios.

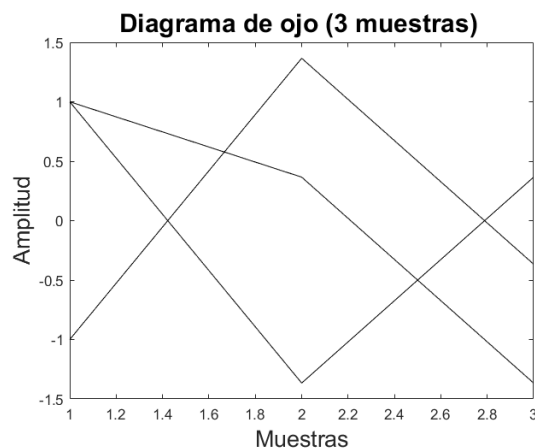


Figura 4.17: Diagrama de ojo simulado para 3 muestras.

La Figura 4.18 siguiente ilustra el diagrama de ojo de la señal procesada y recibida por la tarjeta. En este caso, la señal no se recupera completamente, lo que resulta en una reconstrucción de la señal deficiente. El diagrama de ojo muestra un notable cierre de los ojos, lo que indica un incremento en la dificultad para recuperar la información. Este comportamiento puede atribuirse a factores como el desfase de la señal y la limitada cantidad de muestras por símbolo, donde un error en una muestra afecta secuencialmente a las demás, complicando la recuperación de los bits de información.

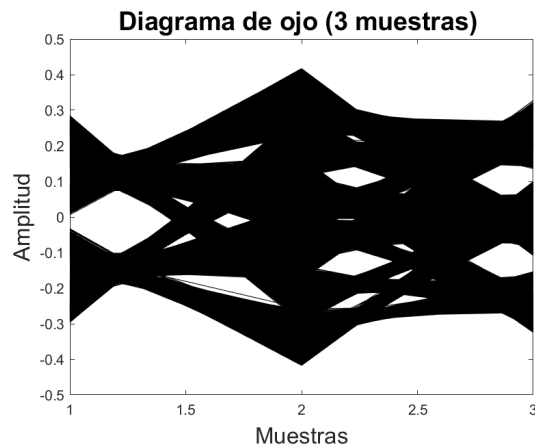


Figura 4.18: Diagrama de ojo obtenido por las tarjetas para 3 muestras.

En la La Figura 4.19 se presenta la simulación de un diagrama de ojo para un sistema que utiliza 10 muestras por símbolo, bajo condiciones ideales y sin distorsión, ejecutada en MATLAB. En este escenario controlado, se pueden observar las características óptimas del sistema de comunicación, donde la señal transmitida y recibida se mantiene fiel a su forma original, sin la influencia de factores adversos como interferencias, ruido o pérdidas significativas de señal. Este tipo de simulación es esencial para evaluar el rendimiento del sistema en un entorno teórico perfecto, proporcionando una referencia de desempeño bajo condiciones ideales.

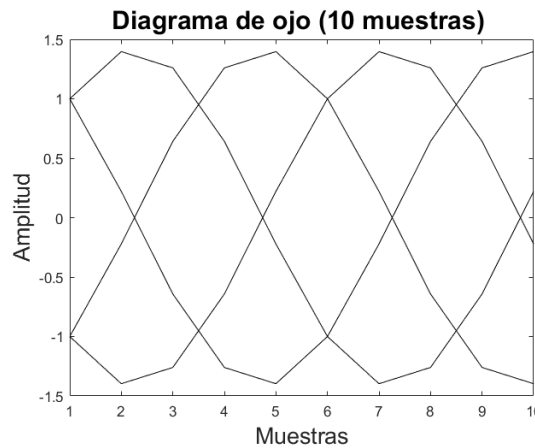


Figura 4.19: Diagrama de ojo simulado para 10 muestras.

Por otro lado la Figura 4.20 siguiente ilustra el diagrama de ojo obtenido utilizando 10 muestras por símbolo en un entorno más realista, donde las señales son procesadas por las tarjetas de comunicación. En este caso, se observa una mayor claridad en la apertura de los ojos, lo que indica un rendimiento superior en términos de calidad de la señal. Esta mayor apertura sugiere una disminución en la interferencia entre símbolos y una mejora significativa en la capacidad del sistema para recuperar correctamente las señales de ambos usuarios. El uso de un mayor número de muestras por símbolo (en este caso, 10 muestras) permite una

mejor resolución temporal de la señal, lo que incrementa el margen de error tolerado y facilita una recuperación más precisa de los datos. Como resultado, se alcanza un 100 por ciento de recuperación de la información para ambos usuarios, lo que evidencia la eficacia del sistema bajo estas condiciones. Este desempeño superior se debe a la mayor cantidad de muestras por símbolo, que mejora la precisión en la detección de los puntos de decisión y reduce el impacto de errores en la transmisión, en comparación con sistemas que emplean un número menor de muestras.

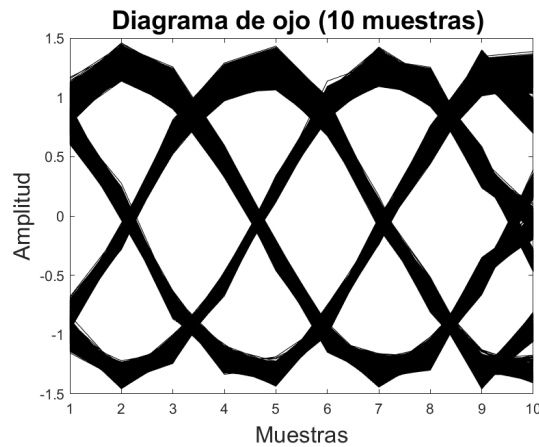


Figura 4.20: Diagrama de ojo obtenido por las tarjetas para 10 muestras.

#### 4.5.2. Bit error radio (BER)

La tasa de error de bit (BER, por sus siglas en inglés: Bit Error Rate) es una medida fundamental en los sistemas de comunicación digital que cuantifica la cantidad de errores en la transmisión de datos. El BER se define como el número de bits erróneos recibidos dividido por el número total de bits transmitidos, lo que proporciona una evaluación precisa del desempeño del sistema en cuanto a la precisión de la transmisión. Este parámetro es crucial para entender cómo los errores, causados por factores como ruido, interferencia y distorsión de la señal, afectan la integridad de la información transmitida.

Un BER bajo indica que la transmisión ha sido precisa, con pocos errores, lo que es el objetivo de cualquier sistema de comunicación. Por el contrario, un BER alto sugiere que la señal ha sufrido degradación, lo que puede ocurrir debido a condiciones adversas del canal de comunicación, como interferencia de otras señales, atenuación de la señal o pérdidas en el medio de transmisión. Para mejorar el desempeño de un sistema, los ingenieros buscan minimizar el BER a través de técnicas como modulación avanzada, codificación de canal y procesamiento de señal. La tasa de error de bit es, por tanto, una de las métricas más utilizadas para evaluar la eficiencia y la fiabilidad de los sistemas de comunicación digital, y su monitoreo continuo es esencial para garantizar comunicaciones de alta calidad.

En el Cuadro 4.1 se presentan los porcentajes de parentesco obtenidos en los casos de 3 y 10 muestras por símbolo. En el caso de 10 muestras, el porcentaje de parentesco es completamente idéntico, lo que indica un alto nivel de consistencia y calidad en la señal. Sin embargo, en el caso de 3 muestras, el porcentaje de parentesco está lejos de alcanzar un nivel considerado aceptable.

De acuerdo con los estándares 3GPP TS 38.101 y 3GPP TS 38.104, donde se establece que una señal con un 1 por ciento de tasa de error se clasifica como deficiente, los resultados obtenidos para 3 muestras no alcanzan este umbral de calidad. En consecuencia, la señal obtenida en este caso no puede considerarse adecuada según estos estándares, y se requiere de condiciones adicionales para mejorar su desempeño y cumplir con los requisitos mínimos aceptables dentro del marco normativo establecido.

Muestras por símbolo	10 muestras	3 muestras
Señal 1	<b>100 %</b>	<b>50.78 %</b>
Señal 2	<b>100 %</b>	<b>49.15 %</b>

*Cuadro 4.1: Porcentaje de parentesco con la señal.*

# Conclusiones

Las tarjetas HackRF One permiten realizar procesos de conversión ascendente y descendente de señales en frecuencia. Estos procesos son fundamentales para la modulación y demodulación de información. En el caso de las tarjetas HackRF One, la información transmitida se modula utilizando modulación de amplitud (AM) para este caso particular, lo que permite que la señal pueda ser recuperada y procesada en el receptor de manera efectiva. La conversión ascendente es utilizada para trasladar la señal desde una frecuencia base a una frecuencia de operación de 2.4 GHz, mientras que la conversión descendente se encarga de devolver la señal a su frecuencia original en el receptor. El uso de la conversión ascendente y descendente permite a los sistemas operar sobre señales en banda base, lo cual simplifica la gestión de la señal y optimiza su procesamiento. Al realizar la conversión de frecuencia, se facilita la transmisión a través de canales más adecuados para la propagación de señales a largas distancias, como es el caso de las frecuencias en el rango de 2.4 GHz, que son utilizadas en muchas aplicaciones de comunicaciones modernas. En el lado del receptor, el proceso inverso de conversión descendente permite recuperar la señal original y procesar la información contenida en ella, asegurando la integridad de la comunicación en el sistema NOMA. En el contexto de las comunicaciones inalámbricas, la tecnología ha experimentado avances exponenciales en las últimas décadas. La evolución hacia sistemas que utilizan técnicas de procesamiento de señales basadas en software ha permitido manejar grandes volúmenes de datos de manera más eficiente, con menores costos en comparación con los sistemas tradicionales basados en hardware dedicado. La flexibilidad del procesamiento en software, junto con la capacidad de adaptar algoritmos y parámetros de manera dinámica, ha transformado la forma en que se gestionan las comunicaciones en redes modernas. Este enfoque ha facilitado el desarrollo de sistemas más escalables y accesibles, permitiendo la expansión de redes de comunicación sin los elevados costos que implican los dispositivos de hardware especializados. En cuanto a las frecuencias milimétricas, el uso de bandas en este rango se ha vuelto crucial para soportar las crecientes demandas de ancho de banda y capacidad de las redes de comunicaciones de próxima generación, como las redes 5G. Las frecuencias milimétricas, aunque capaces de soportar grandes anchos de banda, tienen características de propagación que las hacen más susceptibles a la atenuación, especialmente en entornos urbanos y con obstáculos. Debido a esto, se requiere de una gran cantidad de antenas para garantizar una cobertura adecuada, ya que las señales en estas frecuencias tienen un alcance limitado y una menor capacidad para atravesar barreras físicas. Este desafío se enfrenta mediante la implementación de redes densas con una mayor densidad de celdas, lo que mejora la cobertura y capacidad en áreas de alta demanda. La utilización de celdas pequeñas, en combinación con técnicas avanzadas de antenas y procesamiento de señales, permite mitigar los efectos negativos de la atenuación y mejorar la eficiencia de la red. La tecnología NOMA es

particularmente relevante en este contexto, ya que permite la transmisión de información de múltiples usuarios sobre el mismo canal de comunicación utilizando recursos de frecuencia y tiempo de manera no ortogonal. En lugar de asignar frecuencias o slots de tiempo exclusivos a cada usuario, como ocurre en sistemas tradicionales ortogonales, NOMA permite que varios usuarios compartan el mismo recurso, diferenciándolos por su potencia de transmisión. La aportación de este trabajo además de incluir la implementación de la interfaz de aire a través del uso de tarjetas para software radio como la HACK RF, deja las bases para el modelado de un sistema NOMA 5G en esta plataforma. Adicionalmente aporta a esta área del conocimiento una propuesta analítica para dimensionar el impacto del incremento frecuencial en las bandas de operación de los sistemas 5G y más allá. Se busca continuar con este trabajo en futuras tesis para generalizar el sistema NOMA a  $N$  usuarios.

# Bibliografía

- [1] Zheng Chang, Lei Lei, Huaqing Zhang, Tapani Ristaniemi, Symeon Chatzinotas, Björn Ottersten, and Zhu Han. Energy-efficient and secure resource allocation for multiple-antenna noma with wireless power transfer. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2(4):1059–1071, 2018.
- [2] Zhiguo Ding, Pingzhi Fan, and H. Vincent Poor. Impact of non-orthogonal multiple access on the offloading of mobile edge computing. *IEEE Transactions on Communications*, 67(1):375–390, 2019.
- [3] Muhammad Nasar Jamal, Syed Ali Hassan, Dushantha Nalin K. Jayakody, and Joel J.P.C. Rodrigues. Efficient nonorthogonal multiple access: Cooperative use of distributed space-time block coding. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 13(4):70–77, 2018.
- [4] Yiming Liu, F. Richard Yu, Xi Li, Hong Ji, and Victor C. M. Leung. Distributed resource allocation and computation offloading in fog and cloud networks with non-orthogonal multiple access. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(12):12137–12151, 2018.
- [5] Dadong Ni, Li Hao, Quang Thanh Tran, and Xiaomin Qian. Transmit power minimization for downlink multi-cell multi-carrier noma networks. *IEEE Communications Letters*, 22(12):2459–2462, 2018.
- [6] Zhongxiang Wei, Xu Zhu, Sumei Sun, Jingjing Wang, and Lajos Hanzo. Energy-efficient full-duplex cooperative nonorthogonal multiple access. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(10):10123–10128, 2018.
- [7] Bin Li, Xiaohui Qi, Kaizhi Huang, Zesong Fei, Fuhui Zhou, and Rose Qingyang Hu. Security-reliability tradeoff analysis for cooperative noma in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Communications*, 67(1):83–96, 2019.
- [8] Haijun Zhang, Ning Yang, Keping Long, Miao Pan, George K. Karagiannidis, and Victor C. M. Leung. Secure communications in noma system: Subcarrier assignment and power allocation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36(7):1441–1452, 2018.
- [9] Shuai Zhang, Xiaoming Xu, Huiming Wang, Jianhua Peng, Di Zhang, and Kaizhi Huang. Enhancing the physical layer security of uplink non-orthogonal multiple access in cellular internet of things. *IEEE Access*, 6:58405–58417, 2018.

- [10] Beixiong Zheng, Miaowen Wen, Cheng-Xiang Wang, Xiaodong Wang, Fangjiong Chen, Jie Tang, and Fei Ji. Secure noma based two-way relay networks using artificial noise and full duplex. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36(7):1426–1440, 2018.
- [11] Yamen Alsaba, Chee Yen Leow, and Sharul Kamal Abdul Rahim. A zero-sum game approach for non-orthogonal multiple access systems: Legitimate eavesdropper case. *IEEE Access*, 6:58764–58773, 2018.
- [12] Xin Su, Pascal Nkurunziza, Junrong Gu, Aniello Castiglione, and Chang Choi. Inter-beam interference cancellation and physical layer security constraints by 3d polarized beamforming in power domain noma systems. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, 5(2):291–303, 2020.
- [13] Mohaned Chraiti, Ali Ghayeb, and Chadi Assi. A noma scheme exploiting partial similarity among users bit sequences. *IEEE Transactions on Communications*, 66(10):4923–4935, 2018.
- [14] Min Jia, Linfang Wang, Qing Guo, Xuemai Gu, and Wei Xiang. A low complexity detection algorithm for fixed up-link scma system in mission critical scenario. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(5):3289–3297, 2018.
- [15] Jianhua He, Zuoyin Tang, Zuowen Tang, Hsiao-Hwa Chen, and Cong Ling. Design and optimization of scheduling and non-orthogonal multiple access algorithms with imperfect channel state information. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(11):10800–10814, 2018.
- [16] Jong-Ho Lee and Jiho Song. Beamforming via array pattern synthesis for millimeter wave noma downlink transmission. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(12):12363–12367, 2018.
- [17] Ali Mokdad, Paeiz Azmi, Nader Mokari, Mohammad Moltafet, and Mohsen Ghaffari-Miab. Cross-layer energy efficient resource allocation in pd-noma based h-crans: Implementation via gpu. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 18(6):1246–1259, 2019.
- [18] Mohammad Moltafet, Roghayeh Joda, Nader Mokari, Mohammad Reza Sabagh, and Michele Zorzi. Joint access and fronthaul radio resource allocation in pd-noma-based 5g networks enabling dual connectivity and comp. *IEEE Transactions on Communications*, 66(12):6463–6477, 2018.
- [19] Benjamin K. Ng and Chan-Tong Lam. Joint power and modulation optimization in two-user non-orthogonal multiple access channels: A minimum error probability approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(11):10693–10703, 2018.
- [20] Hong Wang, Shu-Hung Leung, and Rongfang Song. Precoding design for two-cell mimo-noma uplink with comp reception. *IEEE Communications Letters*, 22(12):2607–2610, 2018.
- [21] Li Wang, Mengling Guan, Yutong Ai, Yingyang Chen, Bingli Jiao, and Lajos Hanzo. Beamforming-aided noma expedites collaborative multiuser computational offloading. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(10):10027–10032, 2018.

- [22] Yuan Wu, Kejie Ni, Cheng Zhang, Li Ping Qian, and Danny H. K. Tsang. Noma-assisted multi-access mobile edge computing: A joint optimization of computation offloading and time allocation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(12):12244–12258, 2018.
- [23] Wenjuan Yu, Leila Musavian, and Qiang Ni. Link-layer capacity of noma under statistical delay qos guarantees. *IEEE Transactions on Communications*, 66(10):4907–4922, 2018.
- [24] Tri Minh Nguyen, Wessam Ajib, and Chadi Assi. A novel cooperative noma for designing uav-assisted wireless backhaul networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36(11):2497–2507, 2018.
- [25] Xiaoming Chen and Rundong Jia. Exploiting rateless coding for massive access. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(11):11253–11257, 2018.
- [26] Min Jia, Dongbo Li, Zhisheng Yin, Qing Guo, and Xuemai Gu. High spectral efficiency secure communications with nonorthogonal physical and multiple access layers. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(4):5954–5961, 2019.
- [27] Wanming Hao, Zheng Chu, Fuhui Zhou, Shouyi Yang, Gangcan Sun, and Kai-Kit Wong. Green communication for noma-based cran. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(1):666–678, 2019.
- [28] Fa-Long Luo and Charlie Zhang. *Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA): Concept and Design*, pages 143–168. 2016.
- [29] Evgeny Khorov, Aleksey Kureev, and Ilya Levitsky. Noma testbed on wi-fi. In *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 1153–1154, 2018.
- [30] Anass Benjebbour, Yuya Saito, Yoshihisa Kishiyama, Anxin Li, Atsushi Harada, and Takehiro Nakamura. Concept and practical considerations of non-orthogonal multiple access (noma) for future radio access. In *2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, pages 770–774, 2013.
- [31] Anass Benjebbour, Anxin Li, Keisuke Saito, Yuya Saito, Yoshihisa Kishiyama, and Takehiro Nakamura. Noma: From concept to standardization. In *2015 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, pages 18–23, 2015.
- [32] Yan Chen, Alireza Bayesteh, Yiqun Wu, Bin Ren, Shaoli Kang, Shaohui Sun, Qi Xiong, Chen Qian, Bin Yu, Zhiguo Ding, Sen Wang, Shuangfeng Han, Xiaolin Hou, Hao Lin, Raphael Visoz, and Razieh Razavi. Toward the standardization of non-orthogonal multiple access for next generation wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 56(3):19–27, 2018.
- [33] Lai Wei, Yingyang Chen, Dongsheng Zheng, and Bingli Jiao. Secure performance analysis and optimization for fd-noma vehicular communications, 11 2020.
- [34] Fei-yan Tian and Xiao-ming Chen. Multiple-antenna techniques in nonorthogonal multiple access: a review. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 20(12):1665–1697, 2019.

- [35] Ming Zeng, Animesh Yadav, Octavia A. Dobre, Georgios I. Tsiropoulos, and H. Vincent Poor. Capacity comparison between mimo-noma and mimo-oma with multiple users in a cluster. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(10):2413–2424, 2017.
- [36] Zekun Zhang, Haijian Sun, and Xianfu Lei. *Non-orthogonal Multiple Access*, pages 1–4. 01 2018.
- [37] Qazi Arshad, A. Kashif, and Ijaz Quershi. A review on the evolution of cellular technologies. pages 989–993, 01 2019.
- [38] Cha ru and Rajeev Gupta. A comparative study of various generations in mobile technology. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 28:328–332, 10 2015.
- [39] G. Parsaee and A. Yarali. Ofdma for the 4th generation cellular networks. volume 4, pages 2325 – 2330 Vol.4, 06 2004.
- [40] Kenichi Higuchi and Anass Benjebbour. Non-orthogonal multiple access (noma) with successive interference cancellation for future radio access. *IEICE Transactions on Communications*, E98.B:403–414, 03 2015.
- [41] Ali al Khansa, Yue Yin, Guan Gui, and Hikmet Sari. Power-domain noma or noma-2000. 11 2019.
- [42] Wayne Tomasi. *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson, México, 4th edition, 2014.
- [43] Andrea Goldsmith. *Wireless Communications*. Cambridge university press, 2020.
- [44] J. Cid Sueiro R. López Valcarce C. Mosquera Nartallo F. Pérez Cruz. A. Artés Rodríguez, F. Pérez González. *Comunicaciones digitales*. Pearson, España, 2012.
- [45] Sebastián Clavijo Suero. Joaquín Luque Rodríguez. *MODULACIÓN DE SEÑALES DIGITALES*. Departamento de Tecnología Electrónica, Sevilla, España, 1995.

# Apéndice A: Artículo



International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics, 15(5), Dec 2024, 64-74. ISSN: 2007-1558.  
<https://doi.org/10.61467/2007.1558.2024.v15i5.558>

www.editada.org

## VANET Network Simulation for Greenhouse Monitoring Utilizing Two Mobile Differential Robot Nodes

Fernando Avendaño Macías<sup>1</sup>, Steven Gersain Pérez Cortes<sup>1</sup>, Elias Christopher García Herrera<sup>1</sup>, Josefina Castañeda Camacho<sup>1</sup>, José Eligio Moisés Gutiérrez Arias<sup>1</sup>, Gabriela Pérez Osorio<sup>2</sup>, Mauricio Rodríguez<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 18 Sur y Avenida San Claudio S/N, San Manuel, Puebla, México

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería Química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 18 Sur y Avenida San Claudio S/N, San Manuel, Puebla, México

<sup>3</sup> Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

elias.garciaher@alumno.buap.mx, josefina.castaneda@correo.buap.mx, jose.gutierrez@correo.buap.mx, gabriela.perez@correo.buap.mx, Mauricio.rodriguez.g@pucv.cl

**Abstract.** Monitoring the greenhouse environment is crucial for regulating physical variables such as temperature, humidity, CO<sub>2</sub> concentration and luminosity. VANET (Vehicular Ad-hoc Network) represents a particular case of multi-hop wireless network, characterized by rapid topology changes due to the high mobility of nodes. With an increasing number of vehicles equipped with computer technologies and wireless communication devices, vehicular communication emerges as a promising domain for research, standardization, and development. In the forthcoming era, VANET is positioned to become an integral part of smart cities, offering diverse applications. This article presents the outcomes of simulating a VANET network comprising two mobile nodes within a greenhouse, alongside the design and Lyapunov analysis of mobile node control within that network.

**Keywords:** Vanet Network, Mobile Node, Lyapunov Analysis, Differential Robot and Wireless Sensor Network.

Article Info  
Received May 10, 2024,  
Accepted Nov 20, 2024.

### 1 Introduction

The increase in world population will have a significant impact on the food supply. The World Population Prospect is an estimate and future projection prepared by the Department of Economic and Social Affairs (DESA) of the United Nations, since 1951. In its last update in 2019, a population of 7.7 billion was estimated and it has been projected that by the year 2059 there will be an increase in the population of about 9.7 billion inhabitants [1]. For this reason, it is important to have good quality food and abundant harvests throughout the year, regardless of the change in climate in the different seasons. The greenhouse is a protected agriculture (PA) technique that maintains a controlled environment in a closed place, and is a good solution for supplying food throughout the year. To obtain good quality in the crops, the environment in the greenhouse must be monitored with a network of sensors, for this reason the objective of this work is to apply the VANET concept in two mobile nodes located on a differential robot, each one to measure different variables, physics such as: temperature,

# Apéndice B: Estancia de investigación



**Mauricio Rodríguez Guzmán**  
Dr.-Ing.  
Profesor Adjunto  
tel +56 32 2273669  
mauricio.rodriguez.g@pucv.cl

Escuela de Ingeniería Eléctrica  
Av. Brasil 2147 - Casilla 4059  
2362804 Valparaíso - Chile  
tel +56 32 2273661  
eie.pucv.cl

Valparaíso, a 21 de Enero de 2025.

A quien corresponda,

El que suscribe Dr. Mauricio Rodríguez Director del Doctorado en Ingeniería Eléctrica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile. Hago constar que el alumno Steven Gersain Perez Cortes, alumno del posgrado de maestría de la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla con matrícula 222470346 realizó una estancia internacional en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile. El periodo de realización fue definido del 4 de abril de 2024 al 4 de Julio de 2024.

Los objetivos de la estancia serían los siguientes:

1. Estudio y análisis de modelos empíricos de propagación en sistemas 5G.
2. Simulación del ambiente de propagación en una red 5G.
3. Capacitación del uso de equipos de medición de pérdidas por propagación en la región de ondas 5G.
4. Mediciones de pérdidas para el ambiente de propagación de una red 5G.

Adicionalmente Steven Gersain Perez Cortes fue parte del curso de propagación inalámbrica y expuso en varias ocasiones los avances de su trabajo ante la comunidad estudiantil de diversas universidades.

Siendo las 18:00hrs del día 21 de Enero de 2024, se firma la presente.

Artículo  
Idioma  
Estancia de investigación

Dr. Mauricio Rodríguez  
Profesor Adjunto, Escuela de Ingeniería Eléctrica  
Director del Doctorado en Ingeniería Eléctrica  
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso  
Valparaíso, Chile