

Cancelación sucesiva de interferencia cooperativa en redes celulares de enlace descendente



Sergio Lavao Osorio

Maria Paula Carreño Fernández

Pontificia Universidad Javeriana

Facultad de ingeniería

Departamento de electrónica

Bogotá – Colombia

Noviembre 2022

Cancelación sucesiva de interferencia cooperativa en redes celulares de enlace descendente

Autores:

Sergio Lavao Osorio

Maria Paula Carreño Fernández

Trabajo de grado como requisito para optar al título de:

Ingeniero Electrónico

Director:

Daniel Jaramillo Ramírez

Codirector:

Rafael Puerta Ramírez

Pontificia Universidad Javeriana

Facultad de ingeniería

Departamento de electrónica

Bogotá – Colombia

Noviembre 2022

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN	8
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
2.1 JUSTIFICACIÓN	9
3. ESTADO DEL ARTE	10
3.1 NOMA COOPERATIVO	10
3.2 NOMA INSPIRADA EN LA RADIO COGNITIVA	10
3.3 ANTECEDENTES	11
3.3.1 <i>Successive interference cancellation in downlink cooperative cellular networks</i>	11
3.3.2 <i>Cooperative Successive Interference Cancellation for NOMA in Downlink Cellular Networks</i>	12
4. OBJETIVOS	13
4.1 OBJETIVO GENERAL	13
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
5. MARCO TEÓRICO	14
5.1 ADDITIVE GAUSSIAN NOISE (AWGN):	14
5.2 TÉCNICAS DE ACCESO MÚLTIPLE	15
5.2.1 <i>Tecnologías OMA</i>	16
5.2.2 <i>Tecnologías NOMA</i>	16
5.2.2.1 NOMA en el dominio del código	16
5.2.2.2 NOMA multiplexado en diferentes dominios	17
5.2.2.3 NOMA en el dominio de la potencia	17
5.2.3 <i>Superposition Coding (PDM)</i>	18
5.2.4 <i>Cancelación de interferencia sucesiva (SIC)</i>	19
5.3 CAPACIDAD DEL CANAL INALÁMBRICO:	20
5.3.1 <i>Canal AWGN</i>	20
5.4 DESVANECIMIENTO A PEQUEÑA ESCALA	21
6. SOLUCION PROPUESTA	23
6.1 DESARROLLO ANALÍTICO	23
6.2 RESULTADOS DE SIMULACIÓN Y COMPARACIONES CON RESULTADOS TEÓRICOS	25
6.3 ELABORACIÓN ARTICULO	26
6.4 DIAGRAMA DE GANTT	26
7. RESTRICCIONES DEL SISTEMA	27
8. DISEÑO	28
8.1 HERRAMIENTA DE MODELOS ANALÍTICOS (WNS)	28
8.1.1 <i>Estructura general</i>	28
8.1.2 <i>Funcionamiento</i>	30

8.2	PRUEBA DE CONCEPTO (PoC).....	31
9.	PROTOCOLO DE PRUEBAS	32
9.1	HERRAMIENTA MODELOS ANALÍTICOS (WNS)	32
9.2	PRUEBAS COOPERATIVE SIC	33
9.2.1	<i>Comparación de distintas técnicas y resultados analíticos</i>	<i>33</i>
9.2.2	<i>Parámetros de simulación.....</i>	<i>33</i>
9.2.3	<i>Comparación de distintas técnicas y resultados analíticos</i>	<i>34</i>
10.	IMPLEMENTACIÓN.....	35
10.1	CARACTERIZACIÓN TÉCNICA COOP SIC	35
10.1.1	<i>Múltiples factores de reúso</i>	<i>35</i>
10.1.1.1	Cooperación 2 BS's.....	35
10.1.1.2	Cooperación 3 BS's.....	36
10.2	COMPARACIONES TÉCNICAS DE ACCESO MÚLTIPLE	37
10.3	GANANCIA RELATIVA OMA VS PDM.....	38
11.	ANEXOS	39
12.	REFERENCIAS	39

Lista de Acrónimos

4G	Cuarta Generación
5G	Quinta Generación
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BS	Base Station
BW	B andwidth
CDMa	Code Division Multiple Access
COOP SIC	Cooperative Successive Interference Cancellation
CR	Cognitive Ratio
SE	Spectral Effiency
FDMA	Frequeny Division Multiple Access
Gbps	GigaBytes per Second
IAN	Interference as Noise
IOT	Internet of things
LDS	Low Density Spreading
MA	Multiple Access
MAC	Multiple Access Channel
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
OMA	Orthogonal Multiple Access
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PA	P ower Allocation
PDM	Power Domain Multiplexing
PDMA	P attern Division Multiple Access

PSD	P ower S pectral D ensity
SC	S uperposition C oding
SC-FDMA	S ingle C arrier F requency D ivision M ultiple A ccess
SCMA	S parse C ode M ultiple A ccess
SIC	S uccessive I nterference C ancellation
SINR	S ignal I nterference to N oise R atio
SISO	S ingle I nput S ingle O utput
SNR	S ignal to N oise R atio
TDMA	T ime D ivision M ultiple A ccess
UE	U ser E quipment

Lista de Figuras

Ilustración 1, Densidad espectral de potencia, AWGN.	14
Ilustración 2, distribución gaussiana de ruido $N\rho, \sigma^2$	14
Ilustración 3. Esquemas de comunicación inalámbrica de acceso multiple [9]	15
Ilustración 4. Uso de recursos NOMA [11].....	18
Ilustración 5, Constelacion, PDM, [11].....	19
Ilustración 6, Constelacion, SIC [13]	19
Ilustración 7, Diagrama de alto nivel, SIC	20
Ilustración 8, Desvanecimiento del canal. [17]	22
Ilustración 9, Diagrama de bloques: Algoritmo planteado.....	24
Ilustración 10, Interfaz gráfica esperada del modelo de red.....	24
Ilustración 11, Expresión esperada del modelo	24
Ilustración 12, Graficas esperadas del modelo teórico.	25
Ilustración 13, Visualización de modelo en simulador.....	25
Ilustración 14, Resultados numéricos dados por el simulador	26
Ilustración 15, Diagrama de Gantt planteado.	26

1. INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento en la demanda de redes celulares y la creación de internet de las cosas (IoT), desencadenaron el diseño de la quinta generación de redes celulares inalámbricas (5G), dando lugar a una mayor velocidad (en promedio de 10 Gbps, 100 veces más rápida que la red 4G), 10-100 veces mayor número dispositivos conectados, menor latencia y consumo energético hasta 10 veces menor en comparación a la anterior generación (4G) [2]

Para las redes 5G el acceso múltiple no ortogonal (NOMA), ha sido de gran importancia, entre las principales razones para adoptar NOMA en 5G es su capacidad para dar servicio a múltiples usuarios utilizando los mismos recursos de tiempo y frecuencia, en comparación con las técnicas de acceso múltiple ortogonal (OMA), NOMA puede ofrecer una mayor eficiencia espectral, conectividad masiva, mayor rendimiento en el borde de la celda, baja latencia de transmisión y equidad para el usuario. NOMA convencional emplea superposición de código (SC) en el transmisor, también conocido como multiplexación en el dominio de la potencia (PDM) y la cancelación de interferencias sucesivas (SIC) en el receptor [3].

Entre las técnicas más prometedoras que buscan mejorar las capacidades en la red 5G se encuentra la técnica de cancelación de interferencia sucesiva cooperativa (Coop-SIC), la cual plantea cooperación entre varias estaciones base (BS) con el fin de que se alcance una mayor suma de tasas. En este trabajo se estudia de forma analítica la técnica de Coop-SIC para sistemas SISO de enlace descendiente y se evalúa el rendimiento de la técnica por medio de las condiciones de ganancia SIC en simulación, considerando distintos factores de reuso, topologías como transmisores trisectoriales e incluyendo efectos de desvanecimiento de pequeña escala en la señal.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con la llegada de nuevas tecnologías y el aumento de dispositivos conectados a internet existe una constante en la demanda de redes celulares inalámbricas, actualmente el Informe anual de Internet de CISCO de redes celulares móviles (3G, 4G, 5G) muestran proyecciones cuantitativas sobre el crecimiento de dispositivos conectados a internet, con una demanda de 4.7 Billones en 2021 a una proyección de 5.3 Billones para el 2023 [4].

La pérdida de capacidad de transmisión a distancias lejanas en redes celulares, especialmente en 5G, hace necesario el uso eficiente de recursos, mejora en las tasas de recepción, transmisión y baja latencia. [5] En base a esto, se están impulsando a nivel global investigaciones en el campo de las telecomunicaciones, con el fin de encontrar nuevas técnicas las cuales mejoren las capacidades en redes celulares inalámbricas. Con el avance tecnológico en los receptores y una infraestructura modernizada se hace posible plantear nuevas técnicas en el canal inalámbrico con vistas al futuro. [6]

2.1 Justificación

Teniendo en cuenta el planteamiento del problema, una de las técnicas más prometedoras en redes 5G, el manejo cooperativo de interferencias “Successive Interference Cancellation” (SIC) para redes multicelulares de acceso múltiple no ortogonal “Non Orthogonal Multiple Access” (NOMA). [6]

Con el fin de mejorar la capacidad a distancias lejanas, este proyecto consistirá en desarrollar herramientas para evaluar de manera analítica la técnica Cooperative SIC teniendo en cuenta diferentes configuraciones de red, tanto lineales como hexagonales con desvanecimientos a pequeña escala y condiciones de ganancia. Implementar la red en un entorno simulado con el fin de comparar los resultados y posteriormente desarrollar un paper-documento con valor académico, el cual sirva como apoyo a futuras investigaciones de la técnica Cooperative SIC.

3. ESTADO DEL ARTE

Las redes inalámbricas 5G se enfrentan a varios retos para soportar tráfico y usuarios heterogéneos a gran escala, por lo que se están desarrollando nuevos esquemas de modulación y acceso múltiple para satisfacer la demanda. Se hará una visión general de los esquemas de modulación y acceso múltiple (MA) más desarrollados actualmente para las redes 5G. [5]

3.1 NOMA Cooperativo

Las comunicaciones cooperativas en las redes inalámbricas han ganado mucha atención debido a su capacidad de ofrecer diversidad espacial para mitigar el desvanecimiento, al tiempo que resuelven las dificultades de montar múltiples antenas en terminales de comunicación pequeños. La idea básica que subyace al concepto de comunicaciones cooperativas es el despliegue de nodos de retransmisión para comunicar la información de reenvío desde la fuente hasta los destinos deseados.

Por lo tanto, las comunicaciones cooperativas integradas con NOMA permiten mejorar aún más la capacidad del sistema y la fiabilidad de la transmisión. Los autores en [6] investigaron un esquema NOMA cooperativo que explotaba la información previa disponible en los sistemas NOMA. El esquema se basaba en que los usuarios con mejores condiciones de canal decodificaran los mensajes para los demás, con el fin de mejorar la fiabilidad de la recepción para los usuarios con malas condiciones de canal. Por tanto, las comunicaciones cooperativas para usuarios con mejores condiciones de canal que los demás pueden emplearse utilizando técnicas de comunicación de corto alcance, como la ultra banda-ancha y el Bluetooth [5]

3.2 NOMA inspirada en la radio cognitiva

Para mejorar aún más los problemas de escasez de espectro en las comunicaciones inalámbricas, se han propuesto como solución las redes de relación cognitiva (CR), que permiten a los usuarios sin licencia utilizar los recursos del espectro con licencia de manera oportunista sin causar interferencias a los usuarios con licencia. Las redes CR se conciben como una tecnología habilitadora clave de las técnicas de acceso dinámico al espectro para proporcionar un gran ancho de banda a los usuarios móviles a través de arquitecturas inalámbricas heterogéneas. En particular, el concepto de la técnica de detección del espectro, que es la que permite la RC, ha sido bien investigado en [7][8], junto con el equilibrio entre la sobrecarga de detección y el rendimiento de la RC.

La red CR se considera un caso especial para la tecnología NOMA percibida en el dominio de la localización, mientras que la NOMA clásica puede realizarse en los dominios de potencia, código o múltiple. Por ejemplo, considerando un usuario sin licencia que comparte el mismo espectro con licencia, con un usuario con licencia limitado por la restricción de la

distancia, la interferencia generada por el usuario sin licencia será generalmente pequeña mientras se logran mejores velocidades de datos. Los autores en [9], propusieron un caso especial para las redes de RC, denominado comunicaciones D2D que ha ganado interés de investigación últimamente, considerado como una red de RC simple para un caso de dos usuarios.

Además, el dominio de la localización permite explotar la RC en el dominio espacial y en el dominio frecuencia-espacial. En [10] se propuso la convergencia a NOMA inspirada en la radio cognitiva (CRNOMA), que era totalmente diferente del esquema convencional con asignación de potencia fija. Las expresiones de forma cerrada de la probabilidad de interrupción se han derivado en [11] para redes CR subyacentes basadas en NOMA. Además, en [12] se han desarrollado esquemas de asignación de potencia para redes CR-NOMA y redes CR basadas en NOMA, con el fin de maximizar la tasa de suma y la eficiencia espectral (sE) del sistema.[5]

3.3 Antecedentes

A continuación, se presentan trabajos que han abordado la problemática inicialmente, y en los cuales hemos basado este proyecto.

3.3.1 Successive interference cancellation in downlink cooperative cellular networks

Artículo de investigación realizado por Daniel Jaramillo y Eric Hardouin de los laboratorios Orange y Mario Kountouris del departamento de comunicación de SUPELEC, Francia, 2014.

Este trabajo estudia la optimización en la suma de tasas de las redes celulares de enlace descendente utilizando SIC. Se considera inicialmente una red de dos celdas y se propone el uso de SIC cooperativo, donde un usuario recibe sus datos a su máxima capacidad utilizando SIC mientras que la otra celda ajusta su tasa de transmisión adecuadamente a modo de maximizar la suma de tasas.

Se identificaron las esquinas en la región de capacidad de un canal de interferencia de dos usuarios, y se obtuvieron condiciones para las que el uso de SIC aumente la suma de tasas en comparación con el tratamiento de la interferencia como ruido (IaN). Y también, se dan las condiciones en las que ambos móviles pueden realizar SIC. Estas condiciones permiten identificar las zonas de celdas y las posiciones de los usuarios en las que se pueden conseguir ganancias de SIC. Además, se presenta una política flexible de asociación de usuarios como medio para aumentar aún más las ganancias de la suma de tasas mediante el uso de SIC. Y se propone un algoritmo de programación centralizado para realizar el SIC cooperativo en redes multicelulares multiusuario.

Como resultado se tiene que se consigue una ganancia significativa de la suma de tasas utilizando receptores SIC, incluso con pocos usuarios por celda y especialmente en el borde de esta.[13]

3.3.2 Cooperative Successive Interference Cancellation for NOMA in Downlink Cellular Networks

Artículo de investigación realizado por Camilo Zamora, Karen Mezquida, estudiantes, Daniel Jaramillo, German Combariza profesores de la Pontificia Universidad Javeriana Bogotá, junto a Mario Kountouris del departamento de comunicación de EURECOM Francia, en junio de 2021.

En este artículo se propone una nueva técnica de manejo cooperativo de interferencias para redes multicelulares de acceso múltiple no ortogonal (NOMA). La técnica, denominada cancelación de interferencia sucesiva cooperativa (Coop-SIC), aprovecha las condiciones de optimización de SIC en el canal de acceso múltiple (MAC) visto en el lado del receptor sin codificación de superposición de código en el transmisor.

Se obtienen condiciones de ganancia de SIC que determinan cuándo es beneficioso reducir la tasa de un usuario para permitir SIC en otro usuario aumentando potencialmente su tasa y maximizando la suma de tasas. Se formula el problema de maximización de la suma de tasas en sistemas multicelulares de enlace descendente y se proporciona un algoritmo para encontrar la solución óptima.

Como resultado se obtiene por medio de simulación que la técnica Coop-SIC se emplea hasta en el 80% de las iteraciones, proporcionando hasta un 40% de ganancias en el promedio de la suma de tasas con respecto a utilizar interferencia como ruido I_{aN} , sin necesidad de NOMA en el dominio de la potencia con codificación de superposición. [14]

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño analíticamente y por simulación, de la técnica Cooperative SIC en redes celulares para transmisión SISO y canales con desvanecimientos de pequeña escala.

4.2 Objetivos específicos

- Encontrar expresiones analíticas para la técnica Cooperative SIC incluyendo desvanecimientos de pequeña escala.
- Evaluar de manera analítica las ganancias de la técnica Cooperative SIC incluyendo condición extendida: Distintos factores de reuso, distintas posiciones de transmisores trisectoriales y evaluación de control de potencia.
- Evaluar y comparar resultados por medio de simulación (ubicaciones de los usuarios).
- Desarrollar un artículo académico con las conclusiones de la técnica Cooperative SIC.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 Additive Gaussian Noise (AWGN):

El ruido blanco gaussiano (AWGN), también conocido como ruido térmico, es un ruido presente en todos los canales de comunicación eléctrica y electromagnética, el cual no puede ser filtrado ni eliminado ya que su densidad espectral de potencia (PSD) se encuentra distribuida uniformemente en el dominio de la frecuencia.[15]

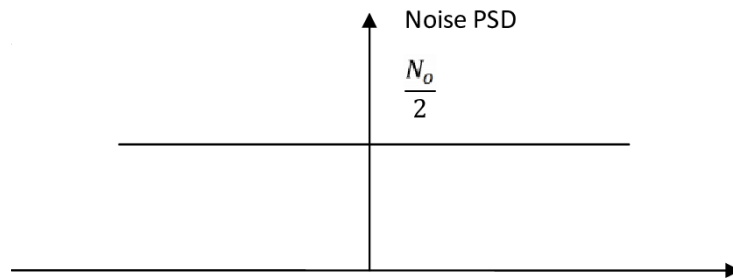


Ilustración 1, Densidad espectral de potencia, AWGN.

Este modelo de ruido es utilizado en teoría de la información para mitigar los efectos aleatorios que se encuentran en la naturaleza, por ende, su distribución es Gaussiana con media μ y varianza σ .

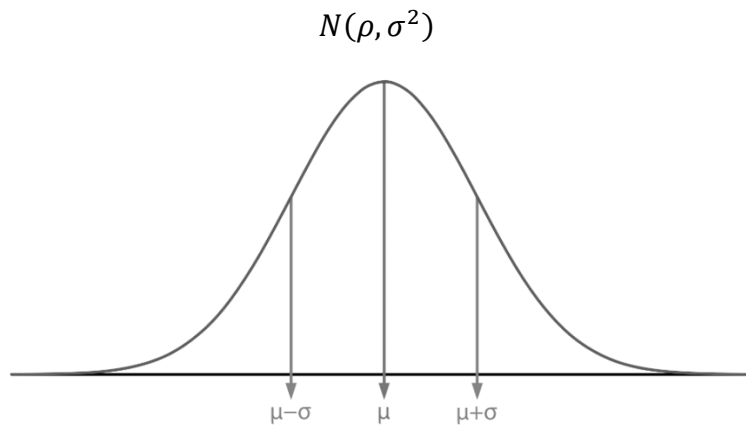


Ilustración 2, distribución gaussiana de ruido $N(\rho, \sigma^2)$

5.2 Técnicas de acceso múltiple

Las técnicas MA permiten a los usuarios acceder al medio de comunicación y se encargan de brindar servicio a un número específico de usuarios simultáneamente, los que se encuentran conectados a un mismo medio. Por lo tanto, el acceso múltiple se realiza mediante la multiplexación de los usuarios al compartir los recursos en tiempo, frecuencia o código, esto implica que los usuarios utilicen el mismo recurso de forma organizada mitigando las interferencias con otros usuarios. [16]

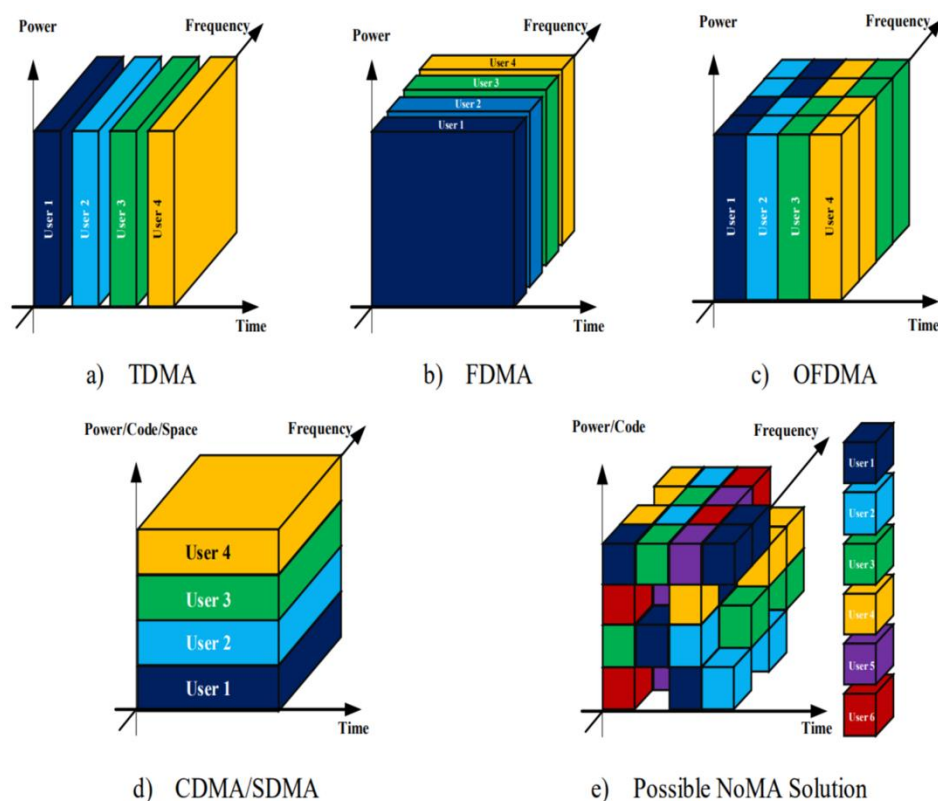


Ilustración 3. Esquemas de comunicación inalámbrica de acceso múltiple [9]

Las tecnologías de acceso múltiple se dividen en dos: ortogonales OMA, y no ortogonales NOMA.

5.2.1 Tecnologías OMA

Las técnicas de acceso convencionales OMA permiten que múltiples usuarios utilicen los recursos del sistema de forma ortogonal y simultáneamente, por división de tiempo, frecuencia o código. Por lo tanto, existe una interferencia mínima entre los bloques adyacentes permitiendo que la detección de la señal sea relativamente simple al aumentar la complejidad en el receptor. Las principales técnicas de acceso múltiple son: (Time Division Multiple Access) TDMA, Frequency Division Multiple Access (FDMA), Code Division Multiple Access (CDMA) y Orthogonal Frequency Division Multiple Access) [16]

Los esquemas de MA siempre se han considerado el hito de cada generación de comunicaciones móviles desde la 1G hasta la 4G, es decir, FDMA para la 1G, TDMA para la 2G, CDMA para la 3G, OFDMA y FDMA de una sola portadora (SC-FDMA) para la 4G.[5]

5.2.2 Tecnologías NOMA

La técnica de acceso múltiple no ortogonal permite a los usuarios utilizar los recursos simultáneamente de forma no ortogonal en una subportadora, al transmitir información sobre el mismo recurso de frecuencia al mismo tiempo con diferentes niveles de potencia, presentando un impacto significativo en la disminución de latencia durante la transmisión simultánea, esto. Esto genera que el recurso se aproveche de mejor manera al emplear todo el ancho de banda y así mejorar la eficiencia espectral [16]. NOMA se enfoca en tres enfoques principales: Dominio del código, dominio de la potencia y multiplexación en diferentes dominios [3]

5.2.2.1 NOMA en el dominio del código

NOMA en el dominio del código multiplexa la información de usuario mediante la asignación de diferentes códigos a distintos usuarios, luego se multiplexa sobre los mismos recursos de tiempo y frecuencia. Se clasifica en: CDMA de baja intensidad Low Density Spreading Code Domain Multiple Access (LDS CDMA), se encarga de limitar el impacto de la interferencia en cada chip de los sistemas CDMA básicos. OFDM de baja intensidad Low Density Spreading Orthogonal Frequency Multiple Access (LDS OFDM) se encuentra formado por símbolos de información que se distribuyen a través de secuencias de propagación y los símbolos excedentes se transmiten en un conjunto de subportadoras, y el código disperso de múltiple acceso (Sparse Code Multiple Access – (SCMA) es una técnica de acceso NOMA que se basa en LDS-CDMA pero a diferencia de esta proporciona una recepción de baja complejidad y ofrece un mejor rendimiento [16]

5.2.2.2 NOMA multiplexado en diferentes dominios

Multiplexación en diferentes dominios está relacionado con NOMA y se clasifica en: acceso múltiple por división de patrones Pattern Division Multiple Access (PDMA) es una técnica de acceso no ortogonal en la que los patrones no ortogonales se asignan a diferentes usuarios para realizar la multiplexación. Estos patrones están cuidadosamente diseñados en los múltiples dominios de código, potencia y espacio basados en la maximización de diversidad y minimizar las superposiciones entre múltiples usuarios, el acceso múltiple por división espacial Space Division Multiple Access (SDMA) es una técnica de acceso múltiple que se encarga de segmentar el espacio en sectores, donde cada sector utiliza una subpotadora permitiendo que varios usuarios puedan estar en una celda [17]

5.2.2.3 NOMA en el dominio de la potencia

NOMA en el dominio de la potencia admite señales de múltiples usuarios dentro del mismo bloque de recursos de tiempo, frecuencia o código mediante la asignación de distintos niveles potencias a diferentes usuarios de acuerdo con las diversas condiciones de sus canales. La aplicación de NOMA demuestra que los usuarios que tienen las condiciones de canal más distintivas pueden lograr un mayor rendimiento del sistema, Sin embargo, la potencia de transmisión se divide entre usuarios fuertes y débiles [3]

Por lo general, los usuarios débiles presentan malas condiciones del canal y se les asigna mayor cantidad de potencia, lo que garantiza que los usuarios con mal estado del canal puedan decodificar su mensaje tomando las señales de otros usuarios como ruido; mientras que, los usuarios fuertes disponen de buenas condiciones del canal, a estos se les asigna una potencia de transmisión más baja; esta asignación de potencia es fundamental para que exista un consumo total razonable de energía y así evitar interferencias generando degradación en el rendimiento del sistema.

NOMA permite que los usuarios ocupen todos los recursos, lo que significa que los usuarios son atendidos simultáneamente al utilizar todo el espectro generando una mejor eficiencia espectral y mejor rendimiento. NOMA convencional se refiere a la utilización de Superposition coding en los transmisores y successive interference cancelation en los receptores (Ilustración 4. Uso de recursos NOMA [11]), a continuación, se describe el funcionamiento de estas técnicas. [10]

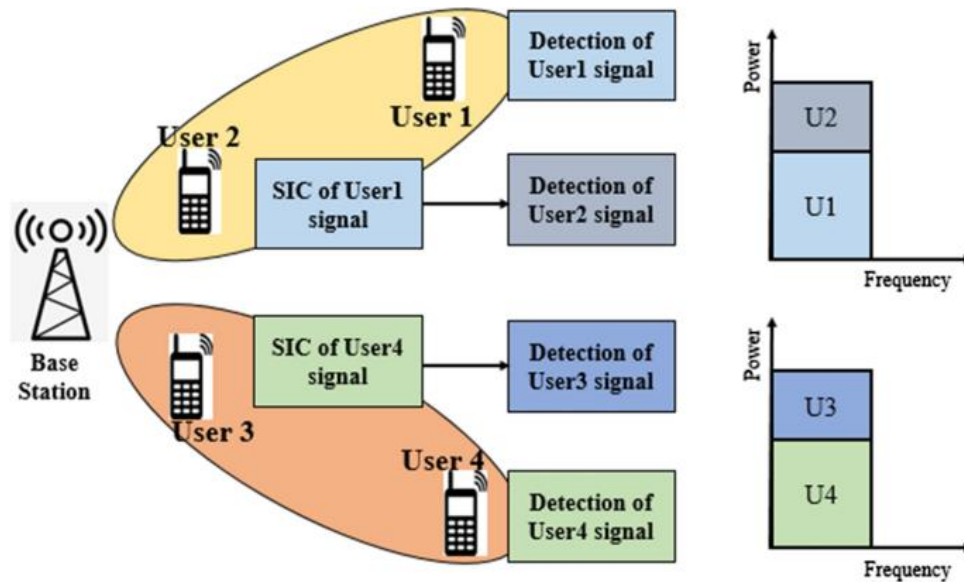


Ilustración 4. Uso de recursos NOMA [11]

5.2.3 Superposition Coding (PDM)

Power domain multiplexing PDM, también como Superposition coding SC se utiliza para superponer señales de múltiples usuarios a varios receptores por una sola fuente, codificando cada una de las señales por un factor de potencia dependiendo de las condiciones del receptor, que se hace por medio de Asignación de potencia (PA). SC es capaz de codificar un mensaje para un usuario con malas condiciones del canal a una velocidad menor y luego superponer la señal de un usuario que tenga mejores condiciones del canal [19]

Por lo tanto, SC aumenta efectivamente la capacidad del sistema NOMA sin expandir el ancho de banda [18]. Ilustración 5 se muestra un ejemplo de superposición de código de dos usuarios; (a) indica la señal de constelación del usuario 1, (b) indica la señal de constelación del usuario 2, mientras que (c) muestra la constelación de superposición de señales de los usuarios 1 y 2

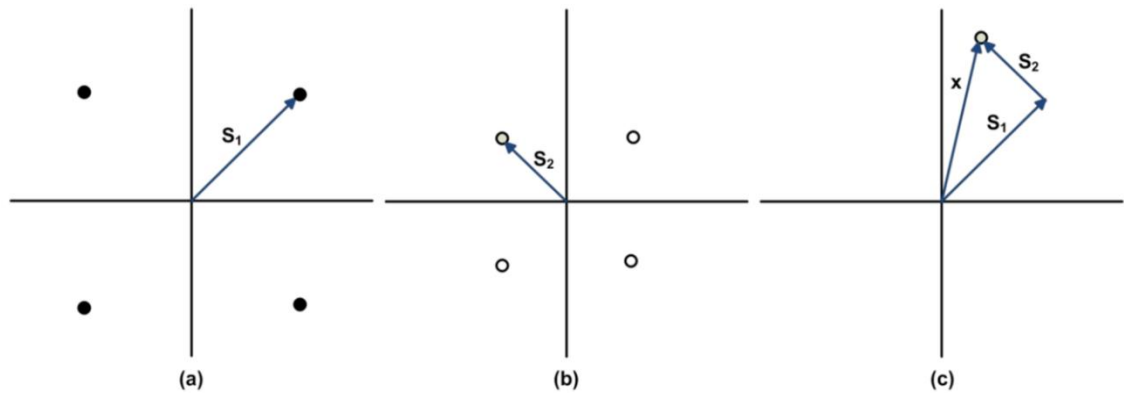


Ilustración 5, Constelacion, PDM, [11]

5.2.4 Cancelación de interferencia sucesiva (SIC)

SIC se emplea en los receptores para decodificar la información superpuesta para cada usuario, como se muestra (Ver Ilustrac). SIC es un algoritmo iterativo en el que los datos se decodifican en orden del nivel de potencia, comenzando por los datos correspondientes al usuario al que se otorgó la potencia más alta, sucesivamente se decodifican los otros usuarios.

Cuando se utiliza SIC, se decodifica una de las señales de usuario (Usuario 1), tratando la otra señal de usuario como interferencia, siendo luego esta última (Usuario 2) decodificada con la ventaja de que la señal de la primera ya ha sido eliminada. Sin embargo, antes de usar SIC, los usuarios se ordenan según la potencia de sus señales, de modo que el receptor puede decodificar primero la señal más fuerte, restarla de la señal combinada y aislar la más débil del residuo. [20]

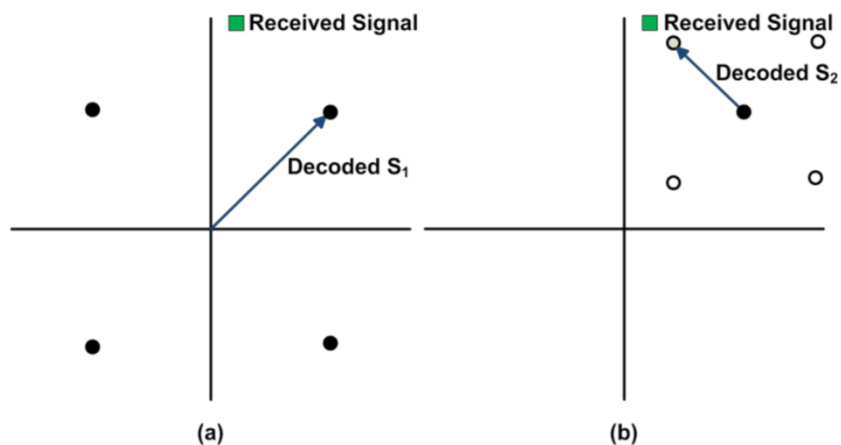


Ilustración 6, Constelacion, SIC [13]

De acuerdo con la ilustración anterior, cada usuario se decodifica su señal, tratando a los demás usuarios interferentes como ruido. La ilustración # presenta la técnica de decodificación de la señal superpuesta (ilustración 6) en el lado de recepción. Aquí, el punto de constelación del usuario 1 se decodifica primero a partir de la señal recibida. A continuación, se realiza la decodificación del punto de constelación del usuario 2 con respecto al punto de constelación decodificado del usuario 1. [21]

i

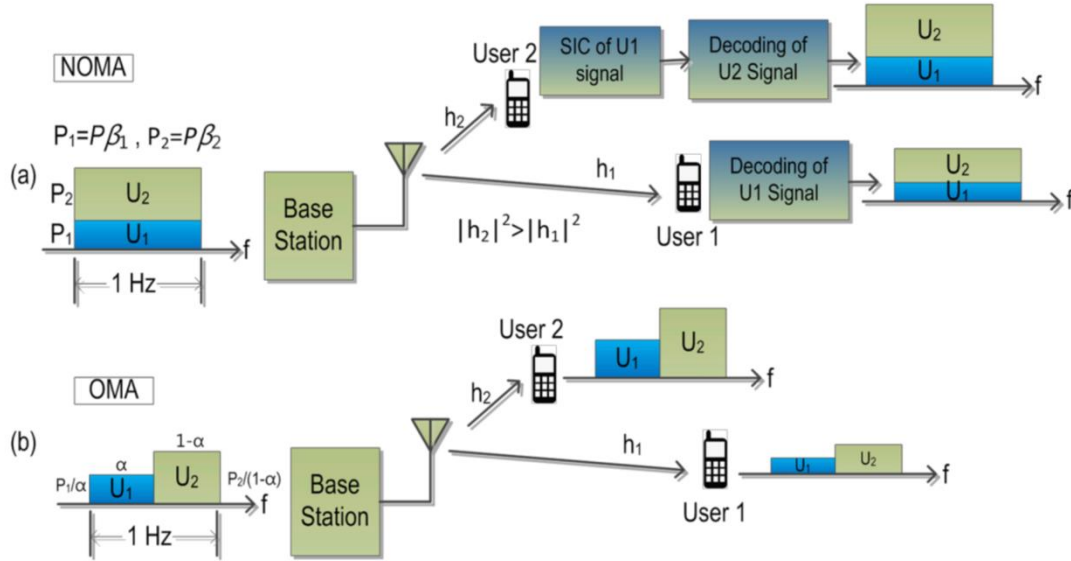


Ilustración 7, Diagrama de alto nivel, SIC

5.3 Capacidad del Canal Inalámbrico:

Considerando un canal inalámbrico invariante en el tiempo, Claude Shannon estableció el límite de capacidad de canal para obtener comunicación fiable (probabilidad mínima de error). [22] Este sólo puede ser alcanzado si la fuente se codifica perfectamente, la solución a estos códigos ha sido planteada y es ampliamente utilizada en sistemas de comunicación. [22]

5.3.1 Canal AWGN

Nos enfocaremos en la parte real del canal AWGN. El cual puede ser descrito por la siguiente ecuación.

$$y[m] = x[m] + w[m]$$

Donde $x[m]$ es el mensaje de entrada, $y[m]$ es la señal recibida y $w[m]$ el ruido.

$$C_{AWGN} = \log_2(1 + SNR)$$

Donde SNR está dado por

$$SNR = \frac{P_S}{P_N} = \frac{P_{BS}|h_a|^2}{WN_0}$$

P_S = Potencia de la señal, P_N = potencia del ruido, $|h_a|^2$ describe la ganancia del canal, donde el usuario se encuentra a una distancia d del transmisor, que a su vez se puede denotar por: $d^{-\alpha}$, donde α es la tasa de disminución de la potencia de potencia

5.4 Desvanecimiento a pequeña escala

Las fluctuaciones de potencia en un enlace se deben a variaciones temporales en las características del enlace. En el caso de un enlace entre 2 puntos fijos el desvanecimiento se debe al movimiento de los elementos dispersores (componentes de multitrayecto) en las cercanías de las antenas, para el caso que uno de los terminales móvil se producen 2 tipos de desvanecimientos, los desvanecimientos de gran escala y los desvanecimientos de pequeña escala. [23] Los efectos de los desvanecimientos se pueden observar a continuación.

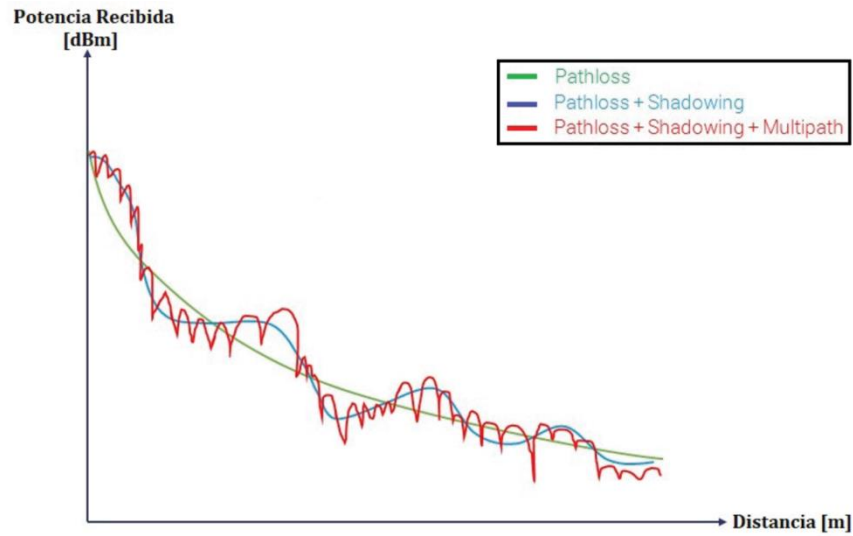


Ilustración 8, Desvanecimiento del canal. [17]

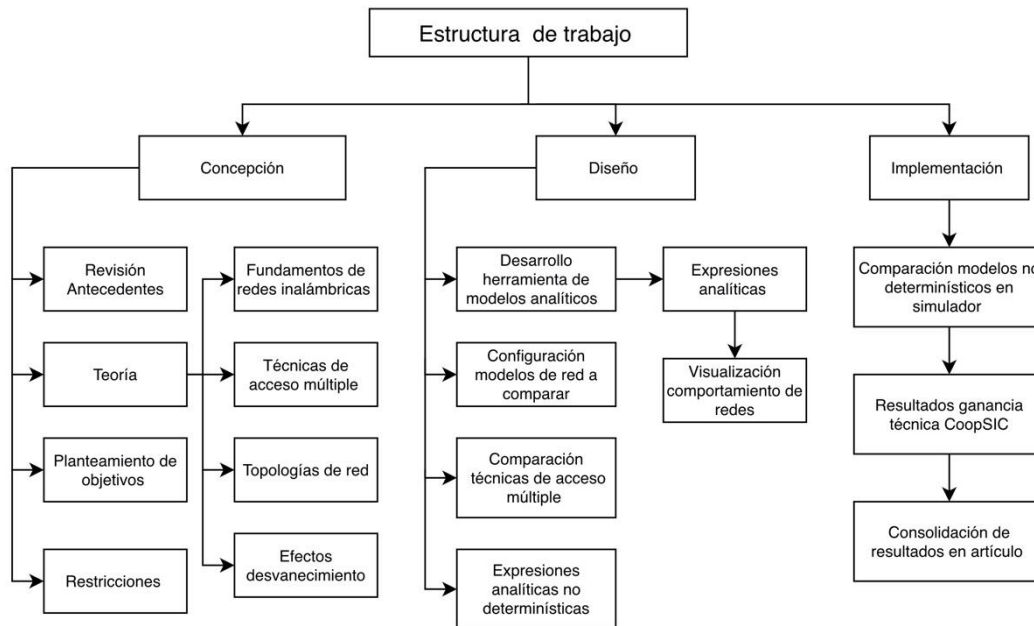
El desvanecimiento a pequeña escala es la rápida fluctuación de la amplitud de una señal de radio en un corto período de tiempo o distancia de viaje, de modo que los efectos de pérdida de trayectoria a gran escala pueden ser ignorados. El desvanecimiento está causado por la interferencia entre dos o más versiones de la señal transmitida que llegan al receptor en momentos ligeramente diferentes. [24]

Los tres efectos más importantes del desvanecimiento a pequeña escala son:

- Cambios rápidos en la intensidad de la señal a lo largo de una pequeña distancia de viaje o intervalo de tiempo
- Modulación aleatoria de la frecuencia debido a la variación de los desplazamientos Doppler en las diferentes señales multitrayecto
- Dispersión temporal (ecos) causada por los retrasos de propagación por trayectos múltiples

6. SOLUCION PROPUESTA

Para tener un panorama general en el desarrollo de la solución, se planteó inicialmente una estructura de trabajo, en la cual luego de concepción, se plantea el diseño de la solución.



En esta parte se diseñan y estudian modelos analíticos y sus resultados, para lo cual, partiendo de la teoría, se modelaron redes hexagonales que implementan diferentes técnicas OMA y NOMA con el fin de obtener la capacidad del sistema en cada caso y evaluar su comportamiento.

Para mayor simplicidad al realizar las distintas configuraciones y técnicas de las redes, se diseña una herramienta en Python la cual nos retorne las ecuaciones de modelos analíticos a una configuración de red dada.

6.1 Desarrollo Analítico

Con ayuda de librerías de código abierto desarrolladas en Python, se implementará un algoritmo el cual tenga como entrada modelos de red, tanto lineal como hexagonal, y retorne las soluciones analíticas de estos, con el fin de encontrar similitudes y funciones las cuales puedan ser simplificadas.

El sistema en Python es descrito en el siguiente diagrama de bloques.

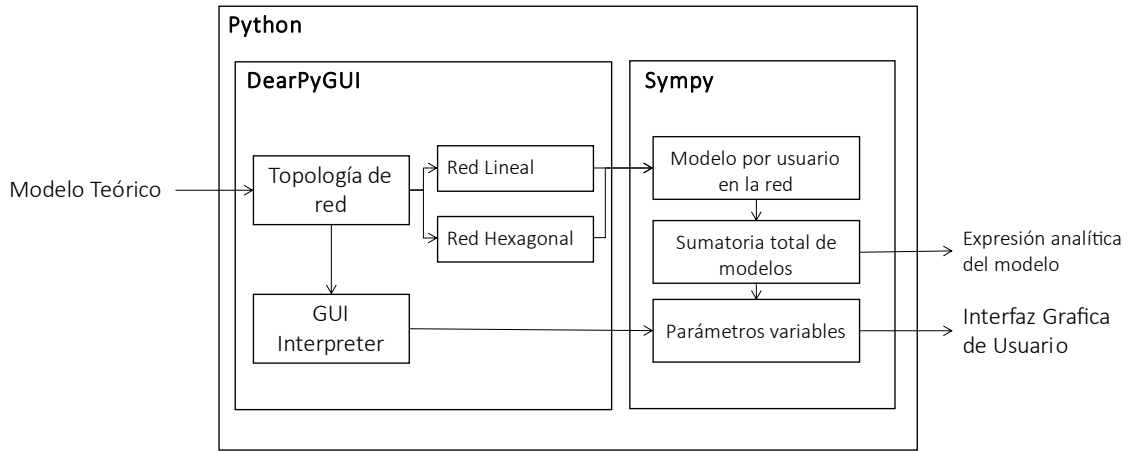


Ilustración 9, Diagrama de bloques: Algoritmo planteado.

El resultado del algoritmo será una interfaz gráfica y una expresión analítica del modelo en el formato que se verá a continuación.

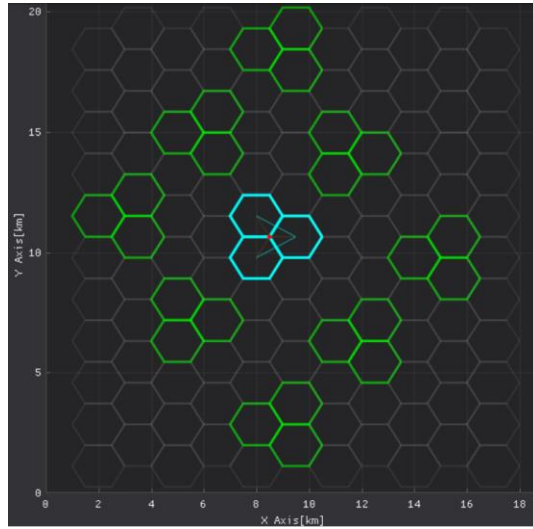


Ilustración 10, Interfaz gráfica esperada del modelo de red.

$$Cap = C \left(\frac{\beta P_1 |h_1|^2}{N_0 W \rho + (1 - \beta) P_1 |h_1|^2 + P_2 |h_{21}|^2} \right) + C \left(\frac{(1 - \beta) P_1 |h_{21}|^2}{N_0 W \rho + P_2 |h_{22}|^2} \right)$$

Ilustración 11, Expresión esperada del modelo

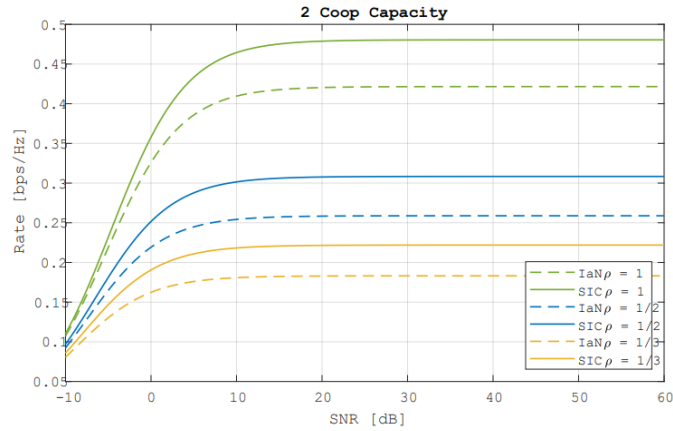


Ilustración 12, Graficas esperadas del modelo teórico.

A partir del análisis a ecuaciones y graficas obtenidas, se obtienen modelos no determinísticos del comportamiento de la técnica Coop SIC que garantiza ganancia frente a otras técnicas, estos modelos serán implementados en un simulador

6.2 Resultados de simulación y comparaciones con resultados teóricos

Las simulaciones se realizarán en condiciones menos ideales, con los mismos modelos que se pondrán a prueba analíticamente, el simulador a utilizar fue desarrollado en un trabajo anterior y cuenta con documentación de cómo ser utilizarlo y obtener resultados. [14]

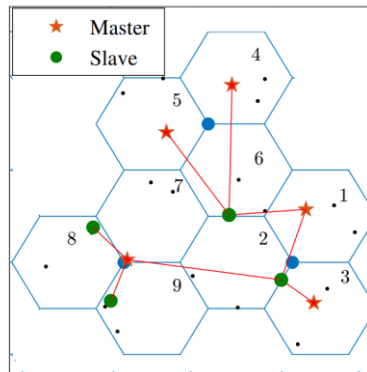


Ilustración 13, Visualización de modelo en simulador

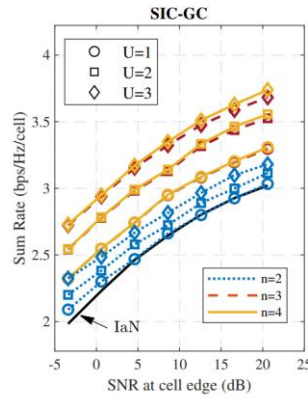


Ilustración 14, Resultados numéricos dados por el simulador

6.3 Elaboración Artículo

Ya que este proyecto se realiza con fines académicos, los resultados obtenidos anteriormente se consolidarán en un artículo de investigación para ser publicado y explorado en posteriores trabajos e investigaciones.

6.4 Diagrama de Gantt.

Para tener presente y tener un orden en la elaboración de cada tarea se diseña, haciendo uso de la herramienta Microsoft Project, un calendario con las tareas semanales que conlleva todo el desarrollo del proyecto y se obtiene un diagrama de Gantt como se observa a continuación.

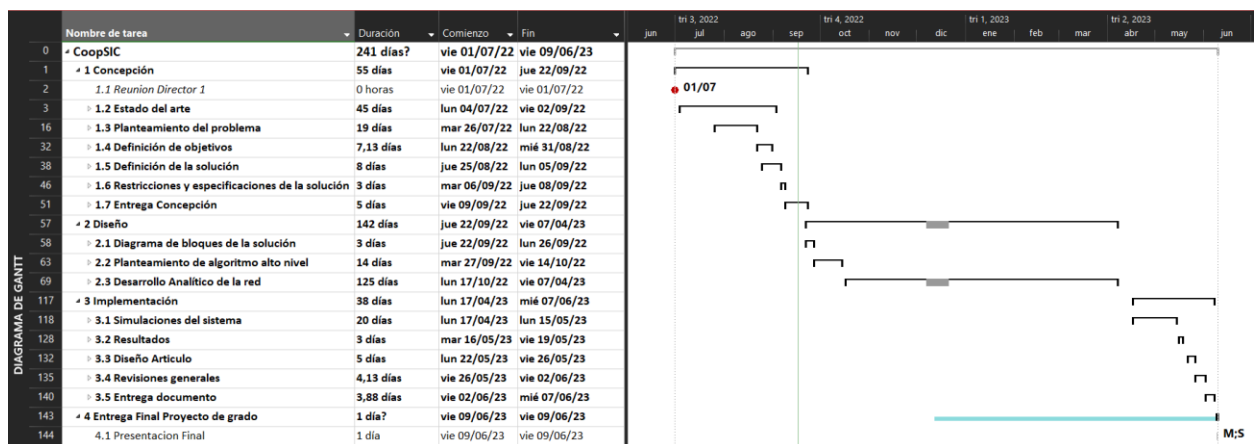


Ilustración 15, Diagrama de Gantt planteado.

Dado que el número de tareas es extenso, el archivo. PDT del proyecto, junto con el diagrama de Gantt se encuentran adjuntos en los archivos anexos y en el repositorio de Github que maneja el proyecto.

7. RESTRICCIONES DEL SISTEMA

- Las simulaciones requerirán bastantes recursos computacionales para su ejecución, específicamente si se realizan simulaciones multiusuario y se tiene en cuenta la condición de ganancia, con lo que no se adquiere un compromiso con el tiempo de ejecución y la cantidad de memoria requerida.
- Para los modelos teóricos y analíticos se dejaron de lado fenómenos que se presentan en condiciones reales de una antena, esto se desarrolla a fondo en la etapa de diseño.

8. DISEÑO

El diseño de este proyecto consta de cuatro etapas las cuales se plantearon de acuerdo a la Estructura de Trabajo (fig #.)

La etapa más importante en el diseño es el Desarrollo de herramienta para modelos analíticos, la cual puede se puede definir como una librería de Python que por conveniencia fue llamada **WirelessNetworkSolver** (WNS)

8.1 Herramienta de modelos analíticos (WNS)

Para el diseño de la herramienta se tuvieron en cuenta las características físicas y parámetros de una red hexagonal, como lo es el tamaño de las BSs, la posición de los usuarios, su potencia, entre otras, de forma que sea posible configurar cualquier tipo de red, poder visualizarla y obtener ecuaciones analíticas determinísticas que describan su comportamiento. A continuación, se detallará el diagrama de alto nivel, estructura y funcionamiento de la herramienta.

8.1.1 Estructura general

Consta principalmente de 3 componentes, Base Station, Network, y User.

Base Station: Consta de dos clases, *BaseStationViewport* y *BaseStation*, la primera define la geometría hexagonal de las estaciones base, y en la segunda se define el tamaño, posición de la antena, potencia y color.

User: Consta de cinco clases, donde *UserBase* contiene los parámetros generales de cada usuario, como su posición relativa, distancia a la estación base y su ecuación de capacidad general, la cual dependerá de las otras 4 clases que definen cada técnica, *IaN*, *OMA*, *PDM*, *CoopSIC*.

Network: Consta de 3 clases, *NetworkViewPort*, crea la ventana de visualización de acuerdo al tamaño de la red, *HexGridNetwork* define las ubicaciones de todas estaciones base y su topología, *NetworkEditor* define los parámetros de la estación base y de los usuarios, para devolver las ecuaciones analíticas de la red.

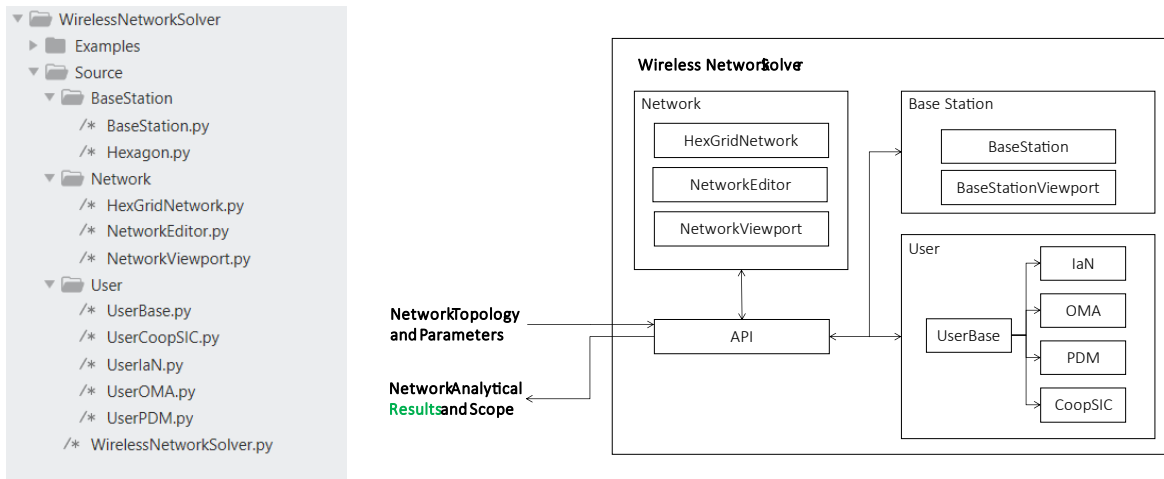


Ilustración 16. Diagrama y estructura Wireless Network Solver

API: Archivo llamado WirelessNetworkSolver.py el cual contiene las definiciones, funciones y utilidades necesarias para ser llamadas en un archivo externo (Application Programming Interface).

```

1  from HexGridNetwork import HexGridNetwork
2  from NetworkEditor import NetworkEditor
3
4  from UserIaN import UserIaN
5  from UserOMA import UserOMA
6  from UserPDM import UserPDM
7  from UserCoopSIC import UserCoopSIC
8  from UserPDMCoopSIC import UserPDMCoopSIC
9
10 import numpy as np
11 import sympy as sym
12 import dearpygui.dearpygui as dpg
13
14 def Parameter( alias ):
15     return sym.Symbol( alias )
16
17 def Parameters( alias ):
18     return sym.symbols( alias )
19
20 def SetRadiusFromEdge( edge = 1 ) -> float:
21     return edge/np.cos( np.pi/6 )
22
23 def MatlabExpression( expression ) -> str:
24     return expression.replace(" ** ", ".^").replace("/","./").replace(" * ",".").replace("1.0.*","").replace("(1).*","")
25
26 def VisualizeNetwork():
27     dpg.start_dearpygui()
28     dpg.destroy_context()
29
30 def ActivateTrisec( Network, row , col ):
31
32     fixed_row = row
33     fixed_col = col
34
35     if row % 2 != 0:
36         fixed_col = col + 1
37     else:
38         fixed_col = col + 1
39
40     if col % 2 != 0:
41         fixed_row = row + 1
42     else:
43         fixed_row = row - 1
44
45     BS1 = Network.ActivateBS( row, col )#Get BS via row, column
46     BS2 = Network.ActivateBS( row, fixed_col )#Get BS via row, column
47     BS3 = Network.ActivateBS( fixed_row, fixed_col )#Get BS via row, column
48
49     BS1.SetAntennaRelativePosition( [BS1.radius,0,0] )
50     BS2.SetAntennaAbsolutePosition( BS1.antenna_absolute_position )
51     BS3.SetAntennaAbsolutePosition( BS1.antenna_absolute_position )
52
53     return [BS1, BS2, BS3]

```

Ilustración 17. Código WirelessNetworkSolver

8.1.2 Funcionamiento

A continuación, se muestra un ejemplo del uso de la librería en código (

Los resultados obtenidos en (Ilustración 20) corresponden a la capacidad de cada usuario ($C_{CoopSIC_User1}$ y $C_{CoopSIC_User2}$) normalizando $N_0 = W = \rho = \alpha = 1$ y dejando como parámetros variables sus potencias

), con sus resultados gráficos (Ilustración 19) y analíticos (Ilustración 20), en donde se modela un sistema CoopSIC de dos antenas (BS1 y BS2) y dos usuarios (U1 y U2) que se encuentran en la misma posición, siendo U2 es esclavo de U1

```
1 import sys
2 sys.path.append("../Source")
3
4 from WirelessNetworkSolver import *
5
6 P = Parameter('P')
7 beta = Parameter('beta')
8
9 P_1 = Parameter('P1')
10 P_2 = Parameter('P2')
11
12 N_0, W, rho, alpha = Parameters('N_0 W rho alpha')
13
14 edge_distance = 1
15 radius = SetRadiusFromEdge( edge_distance )
16
17 Network = HexGridNetwork( [2,2], radius )
18 Editor = NetworkEditor( Network )
19
20 BS1 = Network.ActivateBS( 0 , 0 )
21 BS2 = Network.ActivateBS( 1 , 0 )
22
23 BS1.SetPower( P_1 )
24 BS2.SetPower( P_2 )
25
26 U1 = UserCoopSIC( BS1, 'User1', [0.0,1.0] )
27 U2 = UserCoopSIC( BS2, 'User2', [0.0,-1.0] )
28
29 U1.SetSICSlaves( [ U2 ] )
30
31 Editor.AddNetworkModel('CoopSIC')
32
33 VisualizeNetwork()
```

Ilustración 18. ejemplo CoopSIC al borde de celda

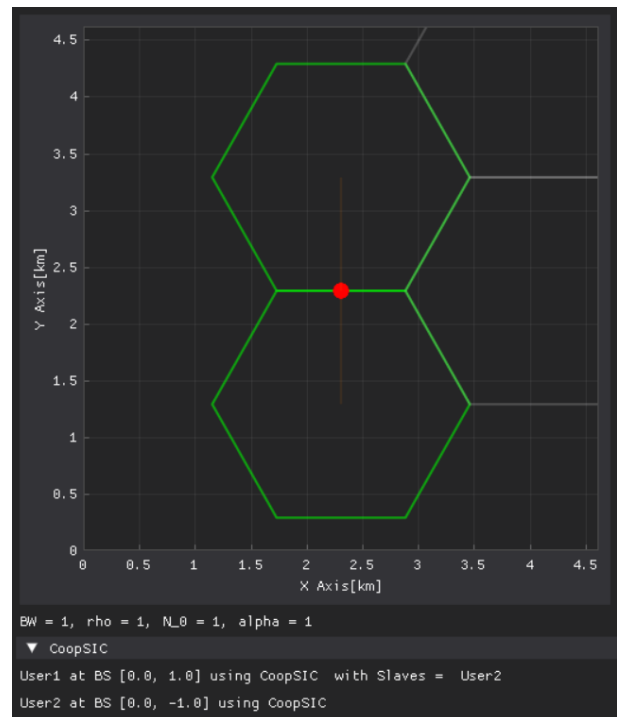


Ilustración 19. Red ejemplo CoopSIC al borde de celda

```
C_CoopSIC_User1 = log2(1 + P1);  
C_CoopSIC_User2 = log2(1 + P2./(P1 + 1.0));  
CoopSIC = C_CoopSIC_User1+C_CoopSIC_User2;
```

Ilustración 20. Capacidad Usuarios ejemplo CoopSIC al borde de celda

Los resultados obtenidos en (Ilustración 20) corresponden a la capacidad de cada usuario ($C_{CoopSIC_User1}$ y $C_{CoopSIC_User2}$) normalizando $N_0 = W = \rho = \alpha = 1$ y dejando como parámetros variables sus potencias

8.2 PRUEBA DE CONCEPTO (PoC)

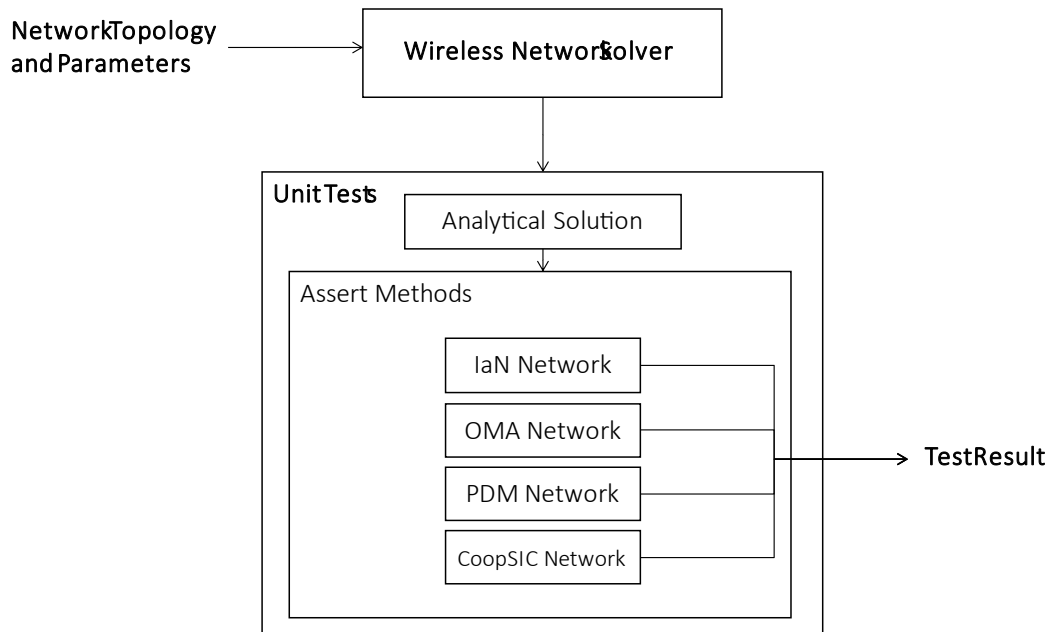
La prueba de concepto se realizó a lo largo del desarrollo de la librería, en la cual se pusieron a prueba prototipos de lo que son los bloques vistos en la Estructura de la librería (Ilustración 16), estos se desarrollaron en códigos externos a la librería y sus resultados fueron mostrados al cliente y director, los cuales dieron retroalimentación temprana a lo que sería o no viable. Gracias a estas pruebas, se realizaron múltiples cambios a lo largo del diseño y se tuvo el control sobre funciones obsoletas o inviables.

9. PROTOCOLO DE PRUEBAS

El protocolo de pruebas se divide en dos etapas, pruebas realizadas a la herramienta de modelos analíticos (WNS) y pruebas enfocadas a CoopSIC (Simulación, comparación y desempeño)

9.1 Herramienta Modelos Analíticos (WNS)

Las pruebas sobre la librería (WNS) son realizadas utilizando el Framework **unittest** en Python, el cual permite comprobar el correcto funcionamiento de los bloques vistos en la estructura general de la librería, estos son realizados generando un modelo de red conocido, el cual debe retornar los valores analíticos correctos, el diagrama de estas pruebas se puede apreciar a continuación.



Utilizando esta técnica, es posible realizar pruebas de una manera automatizada y eficiente, siempre que se hagan cambios en la librería se deben realizar, esto con el fin de verificar que el sistema responda de la manera adecuada y evitar errores.

9.2 Pruebas Cooperative SIC

Se realizarán pruebas en una red con parámetros estándar, y basadas en artículos realizados con anterioridad.

9.2.1 Comparación de distintas técnicas y resultados analíticos

Aunque las pruebas unitarias son buenas, se realizarán comparaciones y análisis manualmente basados en las mejores configuraciones de red que retorna la herramienta de modelos analíticos (WNS).

9.2.2 Parámetros de simulación

Distancia entre estaciones base: 500 metros.

Potencia de transmisión: Caracterizada a través del SNR al borde de celda, el cual indica la potencia en dBm recibida en la esquina más lejana al transmisor, varía dependiendo de la simulación. [13]

Iteraciones: Cada iteración representa un instante de tiempo, en donde cada transmisor atiende un único usuario de la celda. Para realizar pruebas de desempeño, es indispensable realizar un promedio de sus muestras entre un gran número de iteraciones, con el fin de mitigar la afectación de los resultados debido a iteraciones excepcionales. [13]

Usuarios por celda: Aunque cada transmisor solo atiende a un usuario durante cada instante de tiempo, la red debe ser capaz de escoger a cuál de ellos. Por esto, en las pruebas realizadas se muestra el desempeño del sistema frente a diferentes números de usuarios por celda. Debido a que el simulador debe buscar todas las posibles combinaciones entre usuarios de una asignación (para buscar la máxima tasa posible de forma exhaustiva), el número de usuarios por celda se limitó a 3 para pruebas de desempeño y a 5 para pruebas específicas. [13]

9.2.3 Comparación de distintas técnicas y resultados analíticos

Aunque las pruebas unitarias son buenas, se realizarán comparaciones y análisis las manualmente basados en mejores configuraciones de red que retorna la herramienta de modelos analíticos (WNS). De estas configuraciones se sacarán conclusiones y se desarrollarán los modelos no determinísticos.

Las comparaciones se realizarán en base a la ganancia relativa de CoopSIC respecto a las otras técnicas, dada por la siguiente expresión.

$$\%Relative\ Gain = \left(\frac{SR_{CoopSIC}}{SR_{Other}} - 1 \right) 100$$

Las ganancias relativas están implementadas en la librería WNS, y comparan CoopSIC con IaN, PDM y OMA.

10. IMPLEMENTACIÓN

Gracias al uso de la librería diseñada (WNS) fue posible encontrar distintos modelos que permitieron evaluar el comportamiento de las técnicas de una forma automatizada, al tratarse de sistemas de red con topologías complejas, que de otra forma hubieran significado mayor tiempo de desarrollo.

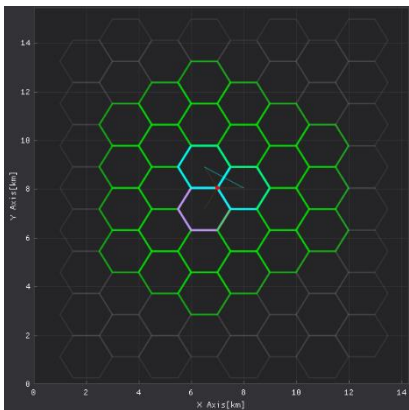
En esta sección se mostrará el comportamiento de las diferentes técnicas de acceso múltiple dadas unas condiciones ideales para cada caso a comparar, dado que las condiciones deben ser lo más justas posible, cada técnica deberá operar con parámetros internos que maximicen su capacidad, por esto, primero encontramos los parámetros para CoopSIC que proporcionan un mayor SR.

10.1 Caracterización Técnica Coop SIC

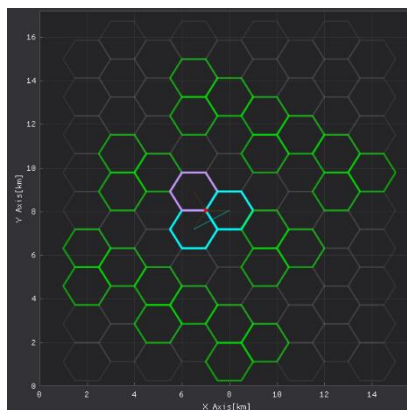
10.1.1 Múltiples factores de reuso

Tener un factor de reuso menor a 1, implica dividir el recurso de ancho de banda para minimizar la interferencia de otras celdas, como se observa en la ecuación, este término tiene dos efectos, a su vez que reduce la interferencia, mejorando el SINR disminuye la capacidad máxima que puede alcanzar cada usuario, por esto se configuraron distintas topologías para $\rho = 1$, $\rho = \frac{1}{2}$ y $\rho = \frac{1}{3}$ utilizando cooperación entre 2 y 3 BS's

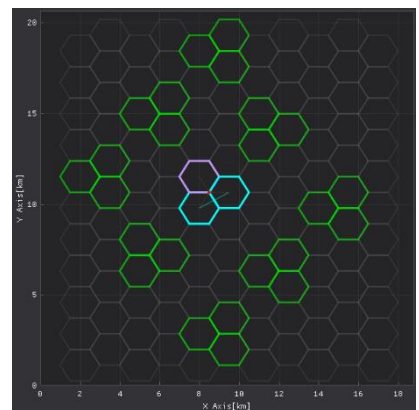
10.1.1.1 Cooperación 2 BS's



a. $\rho = 1$



b. $\rho = 1/2$



Después de configuradas las redes, se obtuvieron ecuaciones de capacidad de cada uno de los 3 usuarios, ya que estos 3 usuarios se encuentran a las mismas condiciones, considerando la misma cantidad de celdas interferentes, se graficó el SR para cada uno de los 3 casos de la (Ilustración 21) y se obtuvo (Ilustración 22)

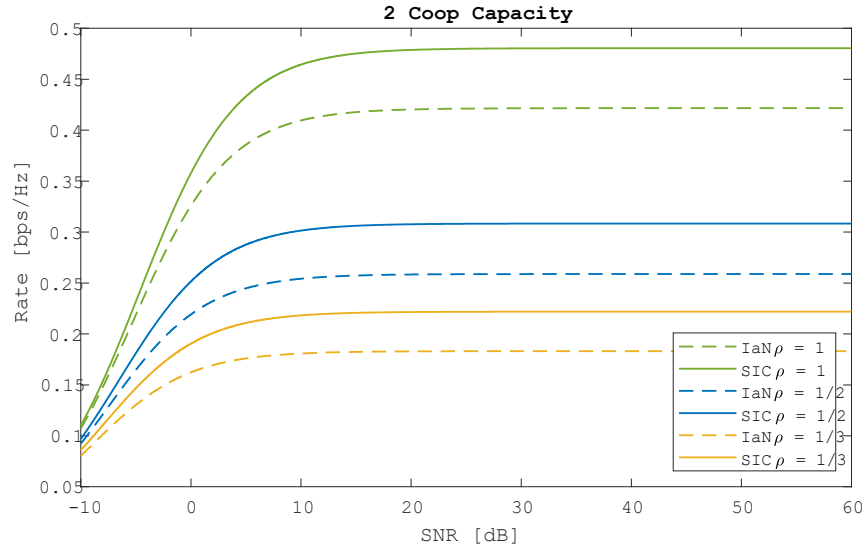


Ilustración 22. SR para 2 Coop

10.1.1.2 Cooperación 3 BS's

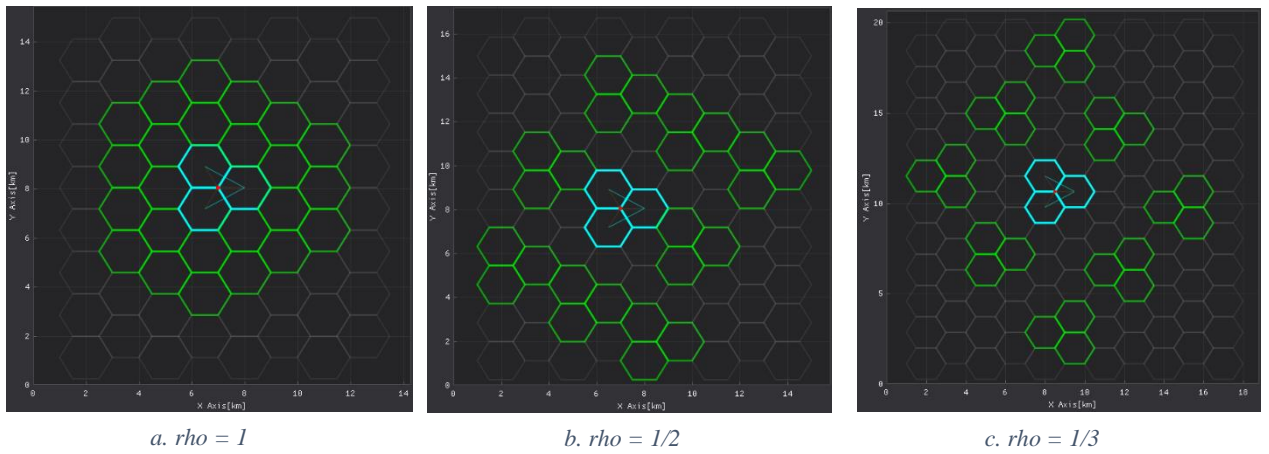


Ilustración 23. 3 Coop Diferentes rho

Se graficó el SR para cada uno de los 3 casos de la (Ilustración 23) y se obtuvo (Ilustración 24)

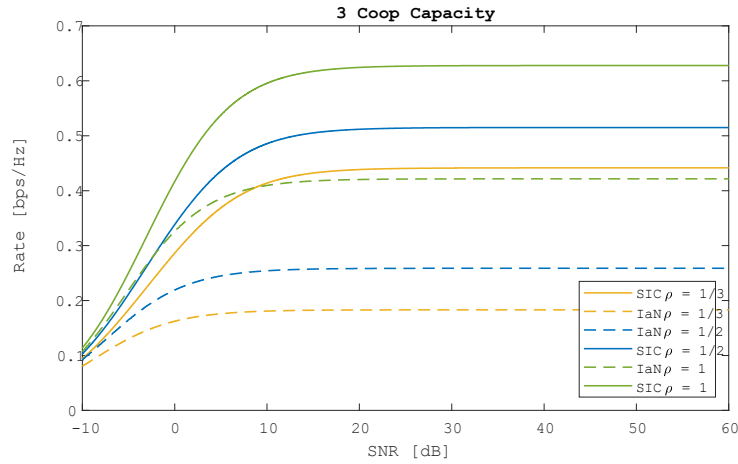


Ilustración 24. SR para 3 Coop

10.2 Comparaciones técnicas de acceso múltiple

Para hacer una comparación justa entre técnicas, se deben evaluar en condiciones similares, por esto, se definieron modelos de red que permitan evaluar el desempeño de la técnica Coop SIC con respecto a técnicas OMA, NOMA e IaN.

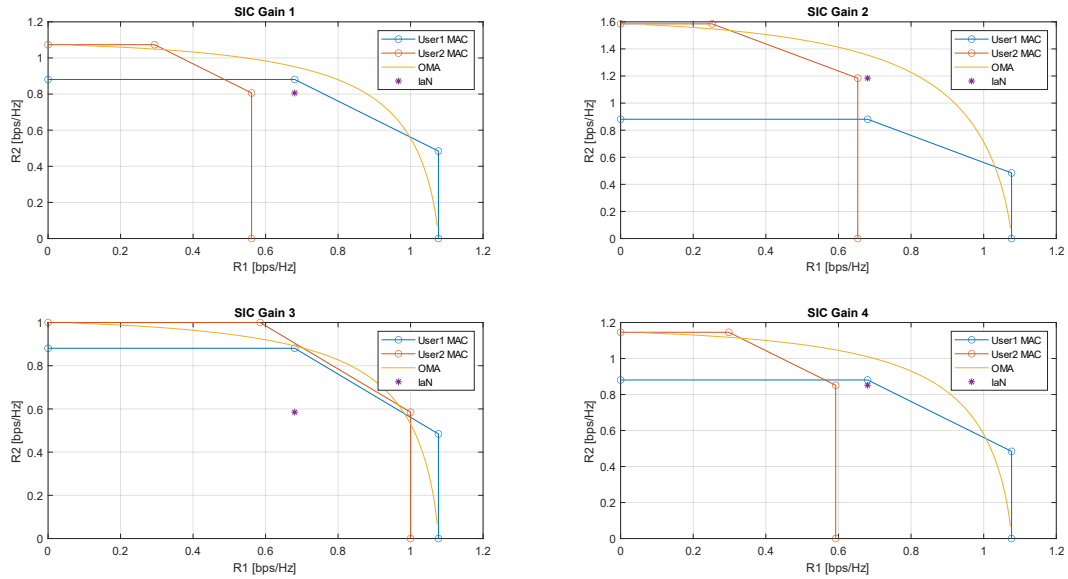


Ilustración 25. Comparación región de capacidad, múltiples técnicas.

10.3 Ganancia relativa OMA vs PDM

Se pusieron a prueba los algoritmos vistos en diseño, específicamente los bloques OMA y PDM, los cuales son los más utilizados en la literatura, a falta de referencias, se caracterizó su comportamiento basado en la gráfica de OMA vs PMD propuesta en [22].

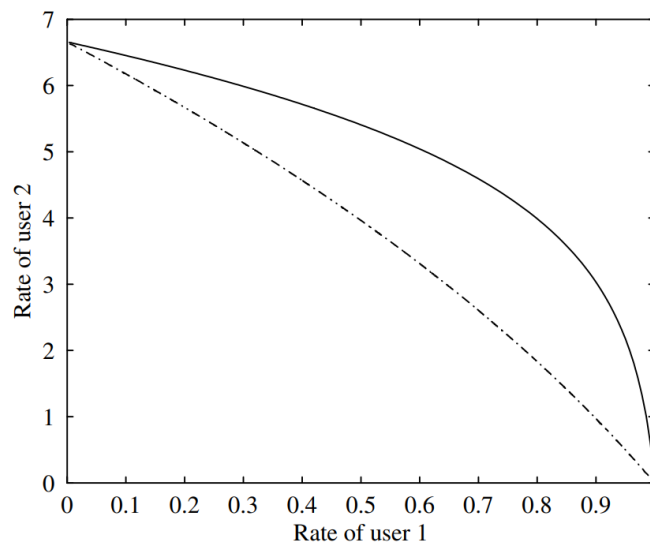


Ilustración 26, PDM vs OMA, Canales constantes.

En la cual se comparan las regiones de capacidad de OMA (línea punteada) y PDM (línea solida) con condiciones de canal constantes, su ganancia relativa está dada en el área bajo la

curva de PDM sobre el área bajo la curva de OMA. Utilizando este modelo de ganancia, fue posible caracterizar el comportamiento de OMA vs PDM en condiciones de canal variable, con el fin de analizar los resultados y encontrar futuras condiciones de ganancia en técnicas NOMA.

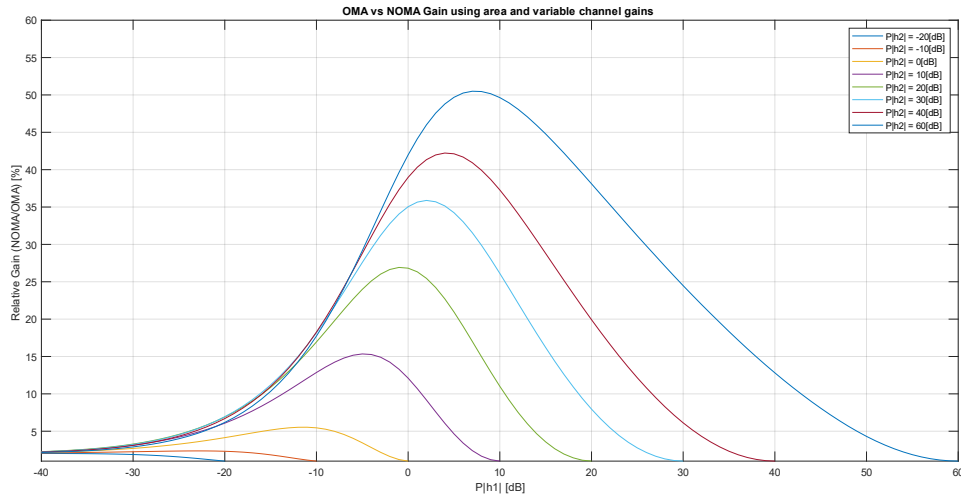


Ilustración 27, Ganancia relativa PDM vs OMA, Canales variables.

11.ANEXOS

El proyecto cuenta con un repositorio público en Github, donde están disponibles los códigos y resultados encontrados a lo largo del trabajo realizado.

<https://github.com/SergioLavao/CoopSIC>

12.REFERENCIAS

- [1] S. Ghazi, «Non-Orthogonal Multiple Access with Successive Interference Cancellation and its Applications», Poznan University of Technology, Poznań, 2021.
- [2] M. Liaqat, K. A. Noordin, T. Abdul Latef, y K. Dimyati, «Power-domain non orthogonal multiple access (PD-NOMA) in cooperative networks: an overview», *Wireless Networks*, vol. 26, n.º 1, pp. 181-203, 2020, doi: 10.1007/s11276-018-1807-z.
- [3] S. M. R. Islam, M. Zeng, y O. Dobre, «NOMA in 5G Systems: Exciting Possibilities for Enhancing Spectral Efficiency», jun. 2017.
- [4] CISCO, «Cisco Annual Internet Report - Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper - Cisco», mar. 09, 2020.

<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html> (accedido sep. 14, 2022).

- [5] Z. Samson Manyani, «Hybrid Generalized Non-Orthogonal Multiple Access for the 5G Wireless Networks», dic. 2018.
- [6] Z. Ding, M. Peng, y H. v Poor, «Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems», *IEEE Communications Letters*, vol. 19, n.º 8, pp. 1462-1465, 2015, doi: 10.1109/LCOMM.2015.2441064.
- [7] F. Salahdine, «Spectrum Sensing Techniques For Cognitive Radio Networks», 2017.
- [8] D. B. Rawat y G. Yan, *Signal processing techniques for spectrum sensing in cognitive radio systems: Challenges and Perspectives*. 2009. doi: 10.1109/AHICI.2009.5340297.
- [9] S. Dinh, V.-D. Nguyen, y O.-S. Shin, «Interference-Aware Transmission for D2D Communications in a Cellular Network», *Wirel Pers Commun*, vol. 98, ene. 2018, doi: 10.1007/s11277-017-4928-2.
- [10] M. F. Kader y S. Y. Shin, «Cooperative Hybrid Spectrum Sharing: A NOMA-based Approach», *Wirel Pers Commun*, vol. 96, n.º 1, pp. 1-21, 2017, doi: 10.1007/s11277-017-4148-9.
- [11] Y. Liu, Z. Ding, M. ElKashlan, y J. Yuan, «Nonorthogonal Multiple Access in Large-Scale Underlay Cognitive Radio Networks», *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 65, n.º 12, pp. 10152-10157, 2016, doi: 10.1109/TVT.2016.2524694.
- [12] Z. Yang, J. A. Hussein, P. Xu, Z. Ding, y Y. Wu, «Power Allocation Study for Non-Orthogonal Multiple Access Networks With Multicast-Unicast Transmission», *IEEE Trans Wirel Commun*, vol. 17, n.º 6, pp. 3588-3599, 2018, doi: 10.1109/TWC.2018.2806972.
- [13] D. Jaramillo-Ramirez, M. Kountouris, y E. Hardouin, «Successive interference cancellation in downlink cooperative cellular networks», en *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2014, pp. 5172-5177. doi: 10.1109/ICC.2014.6884142.
- [14] C. A. Zamora, K. Mezquida, G. Combariza, D. Jaramillo-Ramirez, y M. Kountouris, «Cooperative Successive Interference Cancellation for NOMA in Downlink Cellular Networks», en *ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications*, 2021, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICC42927.2021.9500423.
- [15] Q. Z. Al-Abbasi Abdulkareem, «RESOURCE ALLOCATION FOR DOWNLINK NON-ORTHOGONAL MULTIPLE ACCESS (NOMA) SYSTEM», 2017.

- [16] C. M. Arrieta Tapia, «Simulación de un sistema de comunicación inalámbrica usando la técnica de acceso NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) Simulación de un sistema de comunicación inalámbrica usando la técnica de acceso NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access)», Quito, 2020.
 - [17] S. M. R. Islam, N. Avazov, O. A. Dobre, y K. Kwak, «Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges», *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, n.º 2, pp. 721-742, 2017, doi: 10.1109/COMST.2016.2621116.
 - [18] L. Yuanwei, «Non-Orthogonal Multiple Access for 5G: Design and Performance Enhancement», may 2016.
 - [19] R. Kizilirmak, «Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for 5G Networks», 2016. doi: 10.5772/66048.
 - [20] N. Iswarya y L. S. Jayashree, «A Survey on Successive Interference Cancellation Schemes in Non-Orthogonal Multiple Access for Future Radio Access», *Wirel Pers Commun*, vol. 120, n.º 2, pp. 1057-1078, 2021, doi: 10.1007/s11277-021-08504-1.
 - [21] «Small-Scale Fading and its effects lecture notes». <http://www.faadooengineers.com/online-study/post/cse/wireless-communication/1344/small-scale-fading-and-its-effects> (accedido sep. 16, 2022).
 - [22] «Book: Fundamentals of Wireless Communication». https://web.stanford.edu/~dntse/wireless_book.html (accedido sep. 16, 2022).
 - [23] «Modelado del desvanecimiento espacial de pequeña escala en entornos interiores a 28 GHz». <http://repositorio.ucv.cl/handle/10.4151/90748> (accedido sep. 16, 2022).
 - [24] J. Guajardo Ibarra, «Modelado del Desvanecimiento Espacial de Pequeña Escala en Entornos Interiores a 28 [GHz]», Valparaíso, ago. 2019.
-