

# **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

Mayo 2023

# **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

Mayo 2023

## Tabla de contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>9</b>
2.1 JUSTIFICACIÓN .....	9
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>10</b>
3.1 OBJETIVO GENERAL .....	10
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	10
<b>4. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>11</b>
4.1 ADDITIVE GAUSSIAN NOISE (AWGN): .....	11
4.2 TÉCNICAS DE ACCESO MÚLTIPLE .....	12
4.2.1 Técnicas OMA .....	13
4.2.2 Tecnologías NOMA .....	13
4.2.2.1 NOMA en el dominio del código .....	13
4.2.2.2 NOMA multiplexado en diferentes dominios .....	14
4.2.2.3 NOMA en el dominio de la potencia .....	14
4.2.3 Superposition Coding (PDM) .....	15
4.2.4 Cancelación de interferencia sucesiva (SIC) .....	16
4.3 CAPACIDAD DEL CANAL INALÁMBRICO: .....	17
4.3.1 Canal AWGN .....	17
4.4 DESVANECIMIENTO A PEQUEÑA ESCALA .....	18
<b>5. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>20</b>
5.1 EVOLUCIÓN DE LAS REDES CELULARES' .....	20
5.1.1 Primera Generación (1G) .....	20
5.1.2 Segunda Generación (2G) .....	20
5.1.3 Tercera Generación (3G) .....	20
5.1.4 Cuarta Generación (4G) .....	21
5.1.5 Quinta Generación (5G) .....	21
5.2 RETOS DE LAS REDES 5G .....	22
5.2.1 Mayor ancho de banda y capacidad espectral .....	22
5.2.2 Manejo de interferencia .....	22
5.2.3 Cobertura y penetración de señal .....	22
5.2.4 Latencia ultra baja .....	22
5.2.5 Seguridad y privacidad .....	23
5.2.6 Interoperabilidad y estándares .....	23
5.3 MANEJO DE INTERFERENCIA .....	23
5.4 CANCELACIÓN SUCESIVA DE INTERFERENCIAS (SIC) .....	24
5.5 ANTECEDENTES .....	25
5.5.1 Successive interference cancellation in downlink cooperative cellular networks .....	25
5.5.2 Cooperative Successive Interference Cancellation for NOMA in Downlink Cellular Networks .....	25
<b>6. SOLUCION PROPUESTA .....</b>	<b>27</b>
6.1 DESARROLLO ANALÍTICO .....	27
6.2 DESARROLLO ANALÍTICO .....	29
6.3 DESARROLLO ANALÍTICO PARA TÉCNICA OMA OFDM. ....	30
6.3.1 Desarrollo analítico para modelo no determinístico. ....	31

6.4	DESARROLLO ANALÍTICO COOP SIC.....	32
6.5	RESULTADOS DE SIMULACIÓN Y COMPARACIONES CON RESULTADOS TEÓRICOS .....	33
6.6	ELABORACIÓN ARTICULO .....	33
6.7	DIAGRAMA DE GANTT.....	34
<b>7.</b>	<b>RESTRICCIONES DEL SISTEMA .....</b>	<b>34</b>
<b>8.</b>	<b>DISEÑO .....</b>	<b>34</b>
8.1	HERRAMIENTA DE MODELOS ANALÍTICOS (WNS) .....	35
8.1.1	<i>Estructura general</i> .....	35
8.1.2	<i>Funcionamiento</i> .....	37
8.2	PRUEBA DE CONCEPTO (PoC) .....	38
<b>9.</b>	<b>PROTOCOLO DE PRUEBAS.....</b>	<b>38</b>
9.1	HERRAMIENTA MODELOS ANALÍTICOS (WNS) .....	38
9.2	PRUEBAS COOPERATIVE SIC .....	39
9.2.1	<i>Comparación de distintas técnicas y resultados analíticos.....</i>	39
9.2.2	<i>Parámetros de simulación .....</i>	40
9.2.3	<i>Comparación de distintas técnicas y resultados analíticos.....</i>	40
<b>10.</b>	<b>IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS .....</b>	<b>41</b>
10.1	CARACTERIZACIÓN TÉCNICA COOPSIC .....	41
10.1.1	<i>Múltiples factores de reuso.....</i>	41
10.1.1.1	<i>Cooperación 2 BS's.....</i>	41
10.1.1.2	<i>Cooperación 3 BS's.....</i>	42
10.2	COMPARACIONES TÉCNICAS DE ACCESO MÚLTIPLE .....	43
10.3	GANANCIA RELATIVA OMA VS PDM .....	44
10.4	COMPARACIONES TÉCNICAS EN ESQUEMA 2x2 .....	45
10.4.1	<i>Desplazando usuario sobre el borde de la celda sin OCI .....</i>	45
10.4.1.1	<i>Sobre el borde de la celda con OCI .....</i>	46
10.4.2	<i>Desplazando Usuario hacia el borde de la celda.....</i>	48
10.4.2.1	<i>Hacia el borde de la celda con OCI .....</i>	49
10.5	COMPARACIONES EN ESQUEMA 3x3 .....	51
10.5.1	<i>Desplazando usuarios sobre el borde de la celda .....</i>	51
10.5.2	<i>Usuarios ubicados aleatoriamente evaluando condición extendida EC-Cooperative SIC sin OCI</i>	52
10.5.3	<i>Esquema con antenas trisectoriales evaluando condición extendida EC-Cooperative SIC vs laN y OMA</i>	53
<b>11.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>54</b>
<b>12.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>55</b>
<b>13.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>56</b>

## **Lista de Acrónimos**

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

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

## Lista de Figuras

Ilustración 1, Densidad espectral de potencia, AWGN.....	11
Ilustración 2, distribución gaussiana de ruido $N\rho, \sigma^2$ .....	11
Ilustración 3. Esquemas de comunicación inalámbrica de acceso multiple [9] .....	12
Ilustración 4. Uso de recursos NOMA [11].....	15
Ilustración 5, Constelacion, PDM, [11].....	16
Ilustración 6, Constelacion, SIC [13] .....	16
Ilustración 7, Diagrama de alto nivel, SIC .....	17
Ilustración 8, Desvanecimiento del canal. [17] .....	19
Ilustración 9, Diagrama de bloques: Algoritmo planteado.....	28
Ilustración 10, Interfaz gráfica esperada del modelo de red.....	28
Ilustración 11, Expresión esperada del modelo .....	28
Ilustración 12, Graficas esperadas del modelo teórico. ....	29
Ilustración 13, Visualización de modelo en simulador.....	33
Ilustración 14, Resultados numéricos dados por el simulador .....	33
Ilustración 15, Diagrama de Gantt planteado. ....	34

## 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] Con 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. OBJETIVOS**

#### **3.1 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.

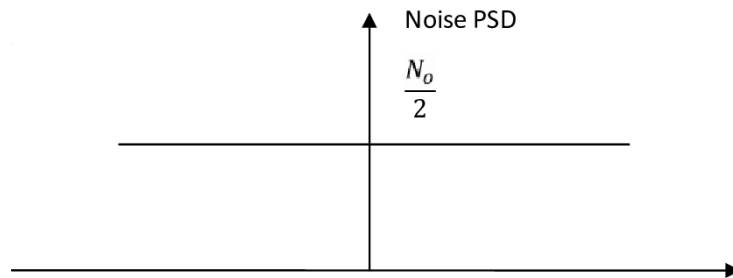
#### **3.2 Objetivos específicos**

- 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).

## 4. MARCO TEÓRICO

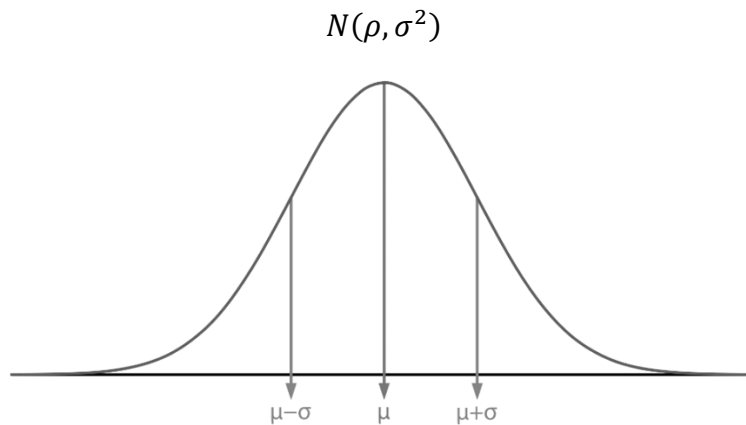
### 4.1 Additive Gaussian Noise (AWGN):

El ruido blanco gaussiano (AWGN), es un modelo matemático de un fenómeno físico: el 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  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$ .



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

## 4.2 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]

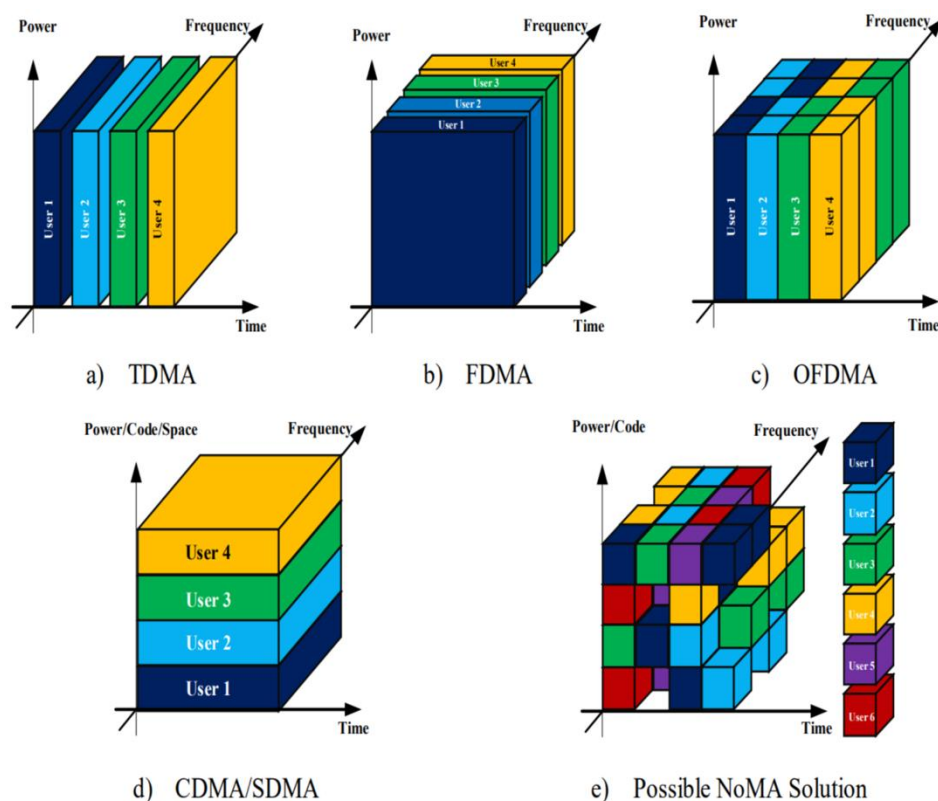


Ilustración 3. Esquemas de comunicación inalámbrica de acceso múltiple [9]

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

#### **4.2.1 Técnicas 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 (OFDMA) [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]

#### **4.2.2 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 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].

##### **4.2.2.1 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 acceso múltiple (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].

#### **4.2.2.2 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]

#### **4.2.2.3 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].

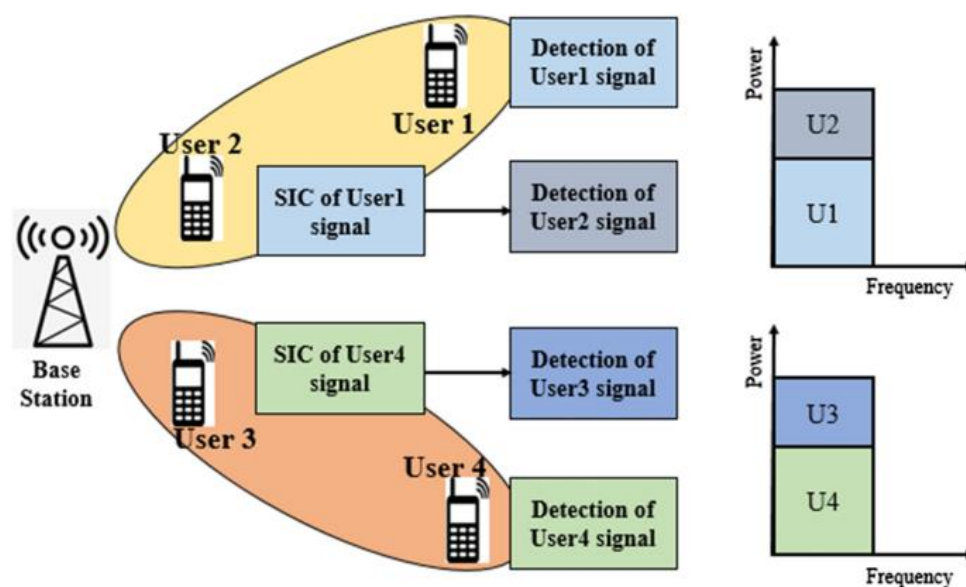


Ilustración 4. Uso de recursos NOMA [11]

#### 4.2.3 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

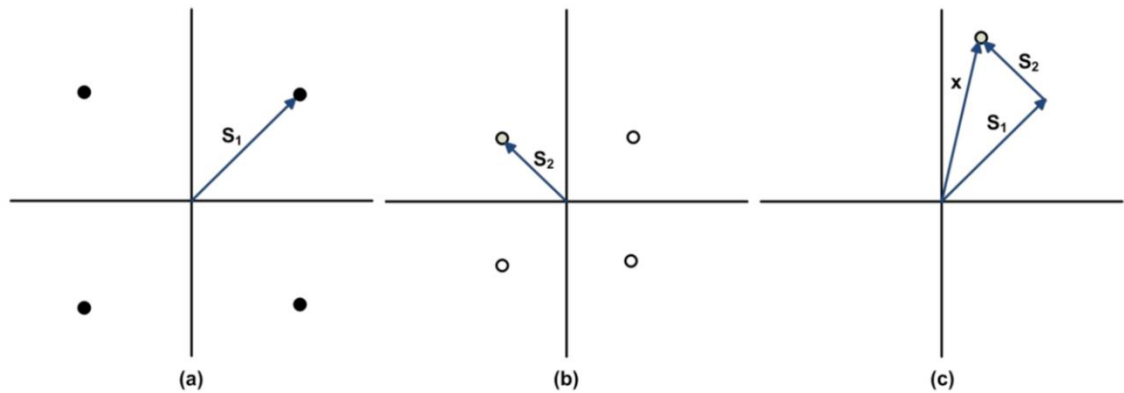


Ilustración 5, Constelacion, PDM, [11]

#### 4.2.4 Cancelación de interferencia sucesiva (SIC)

SIC se emplea en los receptores para decodificar la información superpuesta para cada usuario, como se muestra (Ver Ilustración 6). 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]

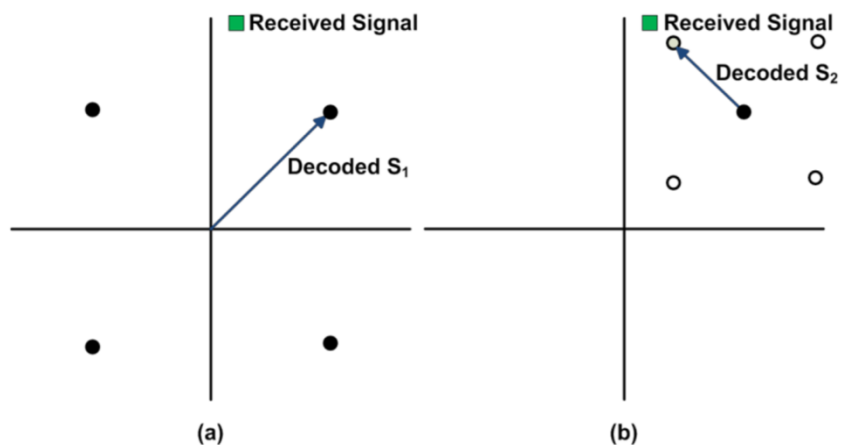


Ilustración 6, Constelacion, SIC [13]



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]

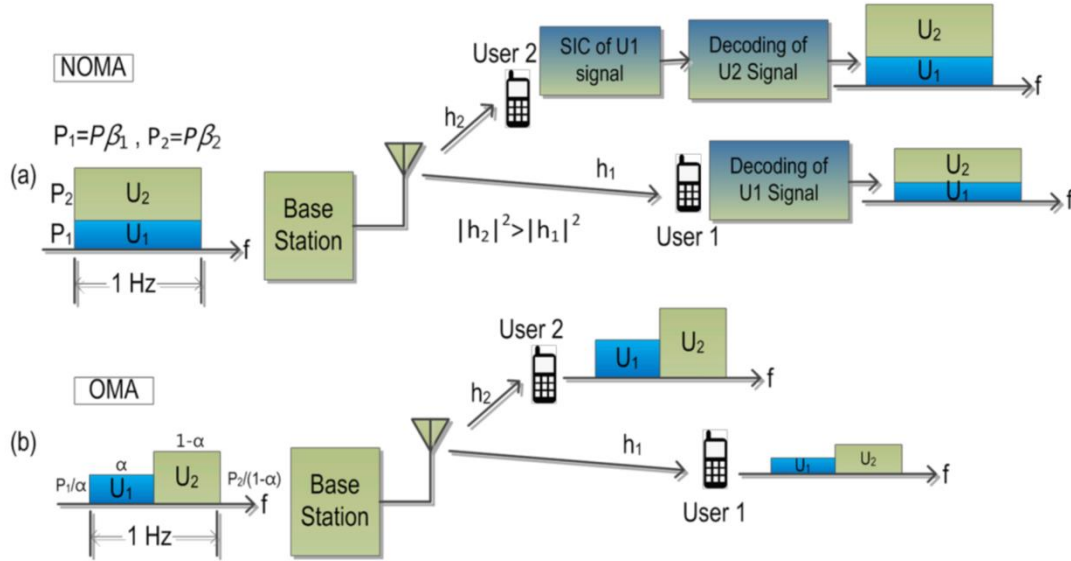


Ilustración 7, Diagrama de alto nivel, SIC

### 4.3 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 solo 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]

#### 4.3.1 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.

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

Donde SNR está dado por

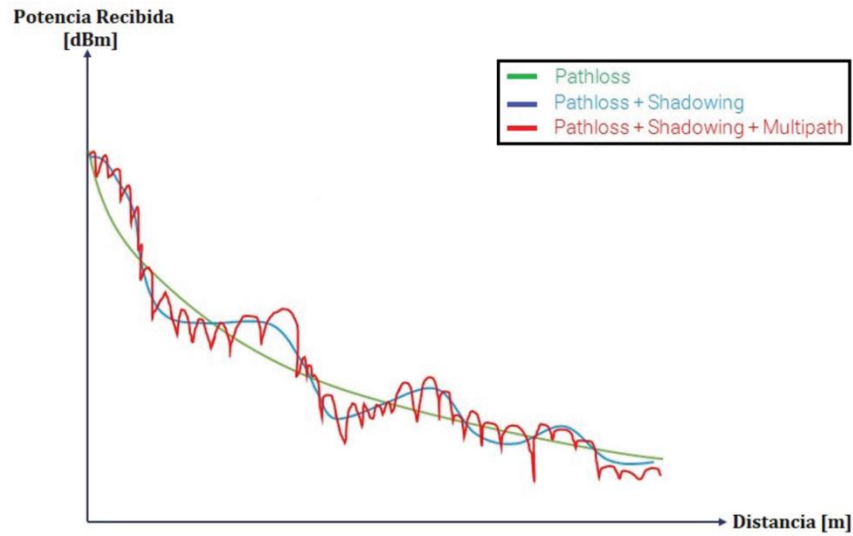
$$SNR = \frac{P_S}{P_N} = \frac{P_{BS}|h_a|^2 d^{-\alpha}}{WN_0}$$

- $W$  es el ancho de banda del canal
- $P_S$  es la Potencia de la señal
- $P_N$  es la potencia del ruido,
- $|h_a|^2$  describe la ganancia del canal considerando efectos de desvanecimiento en pequeña escala
- $d^{-\alpha}$  indica la distancia de la estación base al usuario y donde  $\alpha$  es la tasa de disminución de la potencia

Es importante destacar que esta ecuación representa la capacidad teórica máxima del canal, y factores prácticos como la interferencia, el desvanecimiento, distorsiones de canal y las limitaciones de la tecnología de modulación pueden reducir la capacidad real del sistema, se puede estimar la ecuación de capacidad utilizando el valor esperado de la relación señal a ruido para tener en cuenta esas variaciones del canal. Sin embargo, la fórmula de Shannon proporciona una base fundamental para analizar y diseñar sistemas de comunicación inalámbrica.

#### 4.4 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 multi-trayecto) 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

## **5. ESTADO DEL ARTE**

### **5.1 Evolución de las redes celulares'**

En esta sección, se presenta un análisis de la historia de las redes celulares, el estado actual de la técnica NOMA como técnica para el manejo de la quinta generación, se revisa la literatura existente, se identifican los avances recientes y se presentan las tendencias y limitaciones de NOMA.

#### **5.1.1 Primera Generación (1G)**

La primera generación de redes celulares, introducida en la década de 1980, utilizaba tecnología analógica y ofrecía servicios de voz básicos. Estas redes operaban en frecuencias de alrededor de 800 MHz y tenían un ancho de banda limitado. La velocidad de transmisión de datos era baja, generalmente en el rango de 2.4 kbps a 9.6 kbps. Los estándares utilizados incluían el sistema Advanced Mobile Phone Service (AMPS) en América del Norte y el sistema Total Access Communication System (TACS) en Europa [25].

#### **5.1.2 Segunda Generación (2G)**

La segunda generación de redes celulares, implementada a partir de la década de 1990, fue un avance significativo en comparación con 1G. Utilizaba tecnología digital y ofrecía servicios de voz y mensajería de texto. Los estándares más comunes fueron el Global System for Mobile Communications (GSM), utilizado en gran parte del mundo, y el Code Division Multiple Access (CDMA), utilizado principalmente en América del Norte y partes de Asia. Las redes 2G operaban en frecuencias de alrededor de 900 MHz y 1800 MHz, con un ancho de banda de hasta 200 kHz. La velocidad de datos mejoró considerablemente, llegando a alcanzar velocidades de hasta 384 kbps en servicios como GPRS (General Packet Radio Service) y EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) [25].

#### **5.1.3 Tercera Generación (3G)**

La tercera generación de redes celulares, introducida a principios de la década de 2000, marcó la transición hacia servicios móviles de banda ancha. Los estándares más prominentes fueron Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) basado en CDMA y CDMA2000. Las redes 3G operaban en frecuencias de alrededor de 2100 MHz y tenían un ancho de banda de hasta 5 MHz. Esto permitió velocidades de datos más altas, alcanzando hasta varios megabits por segundo (Mbps). Además de servicios de voz y mensajería de texto, las redes

3G también admitían aplicaciones más avanzadas, como navegación web, videoconferencia y transmisión de datos [25].

#### **5.1.4 Cuarta Generación (4G)**

La cuarta generación de redes celulares, implementada a partir de la década de 2010, se centró en ofrecer velocidades de datos aún más rápidas y una experiencia de banda ancha móvil de alta calidad. El estándar dominante fue Long-Term Evolution (LTE), que utilizaba tecnologías como Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) para mejorar la eficiencia espectral. Las redes 4G operaban en un amplio rango de frecuencias, incluyendo bandas de 700 MHz, 800 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, 2600 MHz, y más. El ancho de banda podía llegar hasta 20 MHz o más. Las velocidades de datos en 4G podían alcanzar varios Mbps o incluso decenas de Mbps, permitiendo una transmisión fluida de contenidos multimedia y aplicaciones exigentes en términos de ancho de banda, como video de alta definición y juegos en línea. Además, las redes 4G ofrecieron una latencia reducida en comparación con las generaciones anteriores, lo que mejoró la capacidad de respuesta en aplicaciones en tiempo real [25].

#### **5.1.5 Quinta Generación (5G)**

La quinta generación de redes celulares, implementada a partir de la década de 2020, representa un salto significativo en términos de rendimiento y capacidades. Las redes 5G utilizan una combinación de tecnologías, como el uso de frecuencias más altas (como ondas milimétricas) y el uso de antenas MIMO masivas, para lograr velocidades de datos ultrarrápidas, baja latencia y capacidad para conectar un gran número de dispositivos simultáneamente.

Las redes 5G operan en frecuencias que van desde bandas inferiores a 6 GHz hasta bandas superiores a 100 GHz. Esto proporciona un amplio espectro y mayor capacidad para soportar el creciente tráfico de datos. El ancho de banda en redes 5G puede alcanzar hasta 100 MHz o más en bandas inferiores, y varios GHz en bandas milimétricas. Esto permite velocidades de datos teóricas de varios Gbps e incluso decenas de Gbps.

Además de velocidades de datos ultrarrápidas, 5G se caracteriza por una baja latencia, en el rango de 1-10 ms, lo que permite aplicaciones en tiempo real y soporte para tecnologías como realidad virtual (VR), realidad aumentada (AR) y automatización industrial. Además, 5G es altamente escalable y puede conectar una gran cantidad de dispositivos IoT, lo que habilita la Internet de las Cosas a gran escala [25].

## **5.2 Retos de las redes 5G**

Con la llegada de las redes 5G, se presentan varios desafíos en términos de tecnologías y técnicas que deben implementarse para aprovechar al máximo su potencial. Algunos de estos retos y las soluciones propuestas son las siguientes:

### **5.2.1 Mayor ancho de banda y capacidad espectral**

- Tecnologías de modulación avanzada y acceso al espectro, como OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) y OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), que permiten una mayor eficiencia espectral y un mejor aprovechamiento del ancho de banda disponible.
- Implementación de antenas MIMO masivas y tecnologías de beamforming para aumentar la capacidad y mejorar la calidad de la señal, al enfocar la energía en direcciones específicas y mitigar la interferencia.

### **5.2.2 Manejo de interferencia**

- Técnicas de cancelación de interferencia, como Successive Interference Cancellation (SIC) utilizada en NOMA, que permiten a los receptores eliminar la interferencia de otras señales superpuestas.
- Coordinación de interferencias entre celdas (ICIC) y comunicación multipunto coordinada (CoMP), que permiten una gestión más eficiente de la interferencia en entornos de red heterogéneos.

### **5.2.3 Cobertura y penetración de señal**

- Implementación de tecnologías de antenas avanzadas, como antenas inteligentes y repetidores, para mejorar la cobertura y superar las limitaciones de propagación en frecuencias más altas, como ondas milimétricas.
- Uso de técnicas de propagación de señal mejoradas y algoritmos de compensación de pérdida de señal para garantizar una cobertura adecuada y una calidad de servicio consistente en todas las áreas.

### **5.2.4 Latencia ultra baja**

- Arquitecturas de red optimizadas, como el uso de computación en el borde (edge computing) para reducir la latencia al procesar datos y aplicaciones más cerca de los usuarios finales.

- Implementación de técnicas de procesamiento de señales de baja latencia y optimización de la transmisión de datos para minimizar la demora en la comunicación.

### 5.2.5 Seguridad y privacidad

- Desarrollo de medidas de seguridad robustas, como autenticación sólida, cifrado de extremo a extremo y detección de amenazas en tiempo real, para proteger los datos y garantizar la integridad de las comunicaciones en entornos altamente conectados.
- Implementación de estándares de seguridad y políticas de privacidad que regulen el manejo de datos y la protección de la privacidad del usuario.

### 5.2.6 Interoperabilidad y estándares

- Adhesión a estándares globales y desarrollo de marcos de interoperabilidad para garantizar la compatibilidad y la comunicación sin problemas entre diferentes proveedores y regiones.
- Participación en organismos de normalización y colaboración entre industrias para establecer estándares comunes y fomentar la adopción de tecnologías interoperables.

## 5.3 Manejo de interferencia

El manejo de interferencia es uno de los aspectos más para las redes 5G, especialmente debido a la alta densidad de dispositivos y al despliegue de redes heterogéneas superpuestas. Dado esto, existe la necesidad de mitigar sus efectos, hasta la fecha se tienen algunos avances presentados a continuación, que nos proporcionan una descripción más detallada de las soluciones y técnicas utilizadas para gestionar la interferencia en las redes 5G:

- **Coordinación de interferencias entre celdas (ICIC):** Esta técnica se utiliza para minimizar la interferencia entre celdas adyacentes en entornos de alta densidad de usuarios. Se basa en la coordinación y programación de los recursos de transmisión entre las celdas vecinas. Al asignar recursos de manera óptima y evitar la interferencia mutua, se mejora la calidad de la señal y se aumenta la capacidad de las redes.
- **Comunicación multipunto coordinada (CoMP):** La técnica CoMP se utiliza para mitigar la interferencia y mejorar el rendimiento de las comunicaciones en áreas donde múltiples estaciones base pueden transmitir simultáneamente a un usuario.

Permite la cooperación y el procesamiento conjunto de señales entre estaciones base cercanas, mejorando así la calidad de la señal y aumentando la capacidad.

- **Antenas MIMO masivas:** La implementación de antenas MIMO masivas en las estaciones base y los dispositivos de usuario permite una mejor gestión de la interferencia. Estas antenas utilizan múltiples elementos de antena para transmitir y recibir señales de manera simultánea y direccionada. Al enfocar la energía en la dirección deseada y mitigar la interferencia, se mejora la calidad de la señal y se aumenta la capacidad de la red.
- **Técnicas de cancelación de interferencia:** Una técnica importante utilizada en las redes 5G, especialmente en el contexto de NOMA, es la cancelación sucesiva de interferencia (SIC). SIC permite a los receptores eliminar la interferencia de otras señales superpuestas en un mismo recurso espectral. Al realizar un procesamiento de señal adecuado y recuperar las señales de usuario deseadas, se logra una mejor calidad de la comunicación y una mayor capacidad de los sistemas.
- **Asignación eficiente de recursos:** La gestión eficiente de los recursos de transmisión, como el espectro y el tiempo, es fundamental para mitigar la interferencia. La asignación óptima de recursos se realiza considerando factores como la ubicación de los usuarios, la calidad del canal y las necesidades de servicio. Mediante algoritmos y técnicas de asignación inteligente, se puede minimizar la interferencia y optimizar el rendimiento de las redes.
- **Técnicas de mitigación de interferencia intercelular:** Para gestionar la interferencia entre celdas y reducir la degradación del rendimiento, se utilizan técnicas como la asignación de recursos en función de la calidad del canal, el control de potencia adaptativo, el uso de códigos de corrección de errores eficientes y la programación de transmisiones en momentos de menor interferencia.

## 5.4 Cancelación Sucesiva de Interferencias (SIC)

La Cancelación Sucesiva de Interferencias (SIC) es una técnica clave utilizada en NOMA para mitigar las interferencias entre usuarios. En SIC, el receptor realiza la detección y decodificación de los usuarios en orden sucesivo. Comienza por decodificar al usuario con la señal más fuerte y luego utiliza esta información para eliminar su interferencia de las



señales de los usuarios siguientes, se continua el mismo proceso hasta que se encuentra la señal deseada.

## **5.5 Antecedentes**

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

### **5.5.1 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]

### **5.5.2 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.

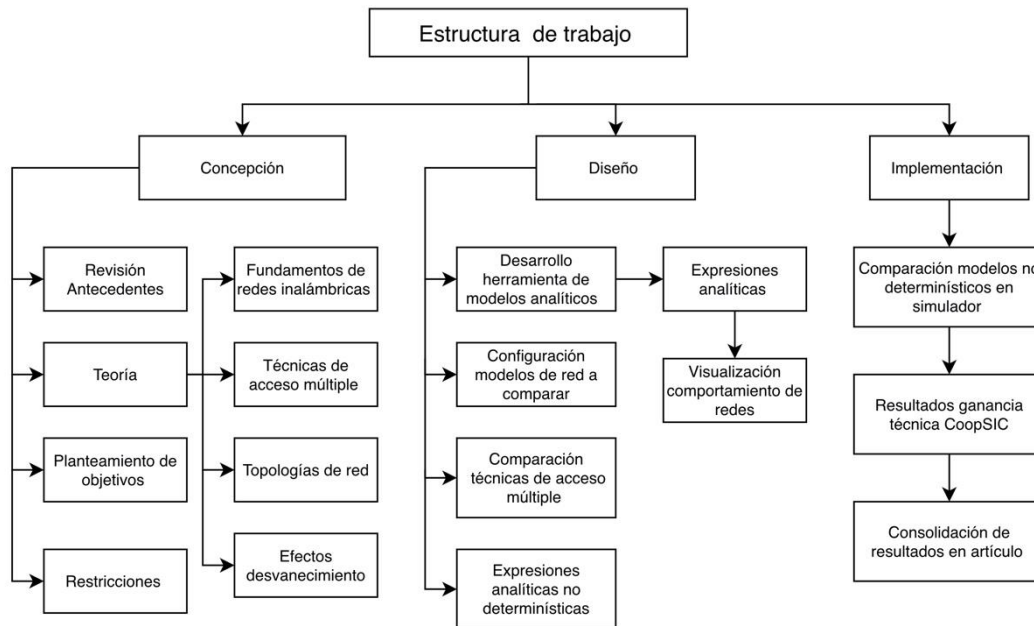
En este artículo se propone una nueva técnica de manejo cooperativo de interferencias para redes multicelulares de acceso múltiple no ortogonal (NOMA). La técnica, denominada cancelación de interferencia sucesiva cooperativa (Coop-SIC), aprovecha las condiciones de optimización de SIC en el canal de 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]

## 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 diseñó 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.

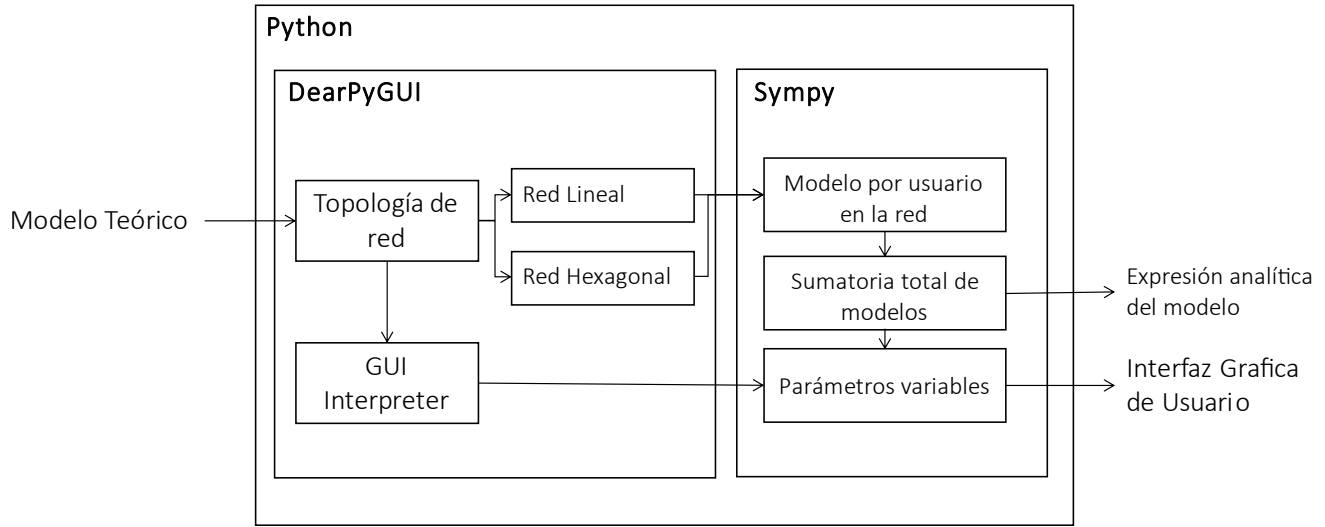


Ilustración 9, Diagrama de bloques: Algoritmo planteado.

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

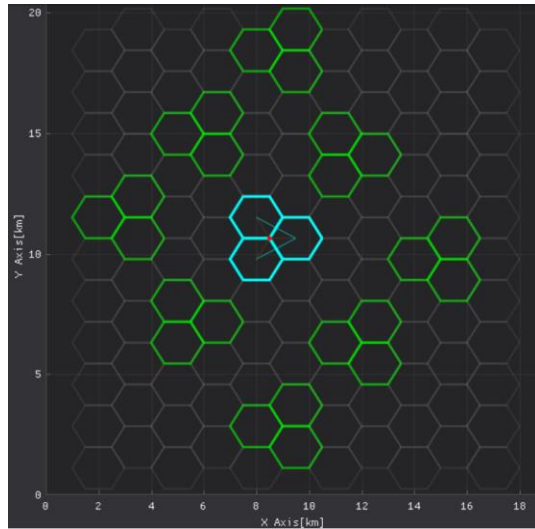


Ilustración 10, Interfaz gráfica esperada del modelo de red.

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

Ilustración 11, Expresión esperada del modelo

Donde C es la ecuación de capacidad del canal:

$$C = \log_2(1 + x)$$

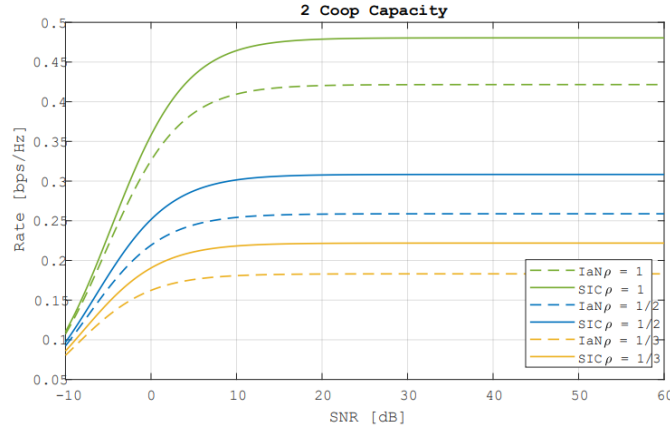


Ilustración 12, Graficas esperadas del modelo teórico.

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 Desarrollo Analítico

Para facilitar el desarrollo de las técnicas, se establece una matriz de canal, en el cual se puede acceder a todos los posibles canales disponibles en la red.

$$\gamma_{ij} = P d_{ij}^{-\alpha}$$

donde  $i = \text{antena}$

$j = \text{usuario}$

$$CH_{NxN} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{N1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{1N} & \cdots & \gamma_{NN} \end{bmatrix}$$

usuarios = filas

Antenas = Columnas

Vector de canales propios (señales propias)

$$CH \cdot I = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \gamma_{NN} \end{bmatrix}$$

Señal de cada usuario por estación base

$$usuario_N = \gamma_{ij} \text{ si } i = j$$

El vector de señales de usuario es la diagonal de la matriz de canal

$$SenalUsuarios_N = diag(CH) = [\gamma_{11} \dots \gamma_{NN}]$$

### 6.3 Desarrollo analítico para técnica OMA OFDM.

Para el desarrollo de la técnica OMA OFDM en la herramienta, se debe resolver un problema de optimización. Ya que cada usuario tiene su fracción de ancho de banda y una posición definida, se deben encontrar las fracciones de ancho de banda en las cuales se maximice el sum rate. El problema de optimización es descrito a continuación.

$$\max \{SR_{OMA}(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N)\} = \max \left\{ \sum_{i=1}^N \beta_i C \left( \frac{P_i}{\beta_i} \right) \right\}$$

Dado que las variables tienen límite y se tiene condición inicial.

$$0 \leq \sum_{i=1}^N \beta_i \leq 1$$

$$SR_{OMA}(0,0,\dots,0) = 0$$

Es posible resolver el problema de maximización utilizando el método Multiplicadores de Lagrange para N usuarios en N estaciones base.

$$\mathcal{L} = U(x, y) - \lambda(g(x, y) - c)$$

Con este método es posible encontrar el ancho de banda óptimo por usuario.

### 6.3.1 Desarrollo analítico para modelo no determinístico.

Al tener desvanecimiento de pequeña escala, el Sum Rate pasa a ser un valor esperado. Para el desarrollo de la técnica OMA OFDM en la herramienta, se debe resolver un problema de optimización. Ya que cada usuario tiene su fracción de ancho de banda y una posición definida, se deben encontrar las fracciones de ancho de banda en las cuales se maximice la suma de tasas. El problema de optimización es descrito a continuación.

$$SR_{OMA_i} = E \left[ \sum_{i=1}^N \beta_i C \left( \frac{P_i}{\beta_i} \right) \right]$$

Al ser OMA, el canal sobre el cual se calcula la probabilidad es SISO, sobre la variable aleatoria  $|h|^2$ .

$$SR_{OMA_i} = \sum_{i=1}^N E_i \left[ \beta_i C \left( \frac{P_i}{\beta_i} \right) \right]$$

$$\mathbb{P}(SNR_i > x) = 1 - F_{SNR_i}(x)$$

$$\mathbb{P} \left( \frac{P_i d_i^{-\alpha} |h|^2}{\beta_i} > x \right) = 1 - F_{SNR_i}(x)$$

Al ser un canal SISO, se tiene que su cdf es

$$F_{SNR_i}(x) = 1 - e^{-\frac{\beta_i x}{\gamma_i}}$$

$$\mathbb{P} \left( \frac{\gamma_i}{\beta_i} |h|^2 > x \right) = e^{-\frac{\beta_i x}{\gamma_i}}$$

$$E_i \left[ \beta_i C \left( \frac{P_i}{\beta_i} \right) \right] = \beta_i \int_0^\infty \frac{e^{-\frac{\beta_i x}{\gamma_i}}}{1+x} dx$$

Utilizando la definición de la función Integral Exponencial

$$E_1(x) = \int_0^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx$$

$$E_i \left[ \beta_i C \left( \frac{P_i}{\beta_i} \right) \right] = e^{\frac{\beta_i}{\gamma_i}} E_1 \left( \frac{\beta_i}{\gamma_i} \right)$$

$$SR_{OMA_i} = \sum_{i=1}^N e^{\frac{\beta_i}{\gamma_i}} E_1 \left( \frac{\beta_i}{\gamma_i} \right)$$

## 6.4 Desarrollo analítico Coop SIC.

El desarrollo analítico se realiza asumiendo desvanecimiento de pequeña escala (Rayleigh)

$$SR_{CoopSIC} = E \left[ C(P_1) + \min \left\{ C \left( \frac{P_{21}}{1 + P_1} \right), C \left( \frac{P_2}{1 + P_{12}} \right) \right\} \right]$$

Asumiendo el mínimo como  $C \left( \frac{P_{21}}{1 + P_1} \right)$

$$SR_{CoopSIC} = E \left[ C(P_1) + C \left( \frac{P_{21}}{1 + P_1} \right) \right]$$

$$F_{SINR_2}(x) = \mathbb{P}(SINR_2 < x)$$

$$F_{SINR_2}(x) = 1 - \left[ \frac{\gamma_2}{x\gamma_{12} + \gamma_2} \right] e^{-\frac{x}{\gamma_2}}$$

$$E_i \left[ C \left( \frac{P_2}{1 + P_{12}} \right) \right] = \int_0^\infty \frac{\gamma_2 e^{-\frac{1}{\gamma_2}}}{(1+x)(\gamma_2 + \gamma_{12}x)} dx$$

$$e^{\frac{1}{\gamma_1}} E_1 \left( \frac{1}{\gamma_1} \right)$$

$$SR_{CoopSIC} = e^{\frac{1}{\gamma_1}} E_1 \left( \frac{1}{\gamma_1} \right) + \frac{\gamma_2}{\gamma_{12} - \gamma_2} e^{\frac{1}{\gamma_{12}}} E_1 \left( \frac{1}{\gamma_{12}} \right) + \frac{\gamma_2}{\gamma_2 - \gamma_{12}} e^{\frac{1}{\gamma_{12}}} E_1 \left( \frac{1}{\gamma_2} \right)$$

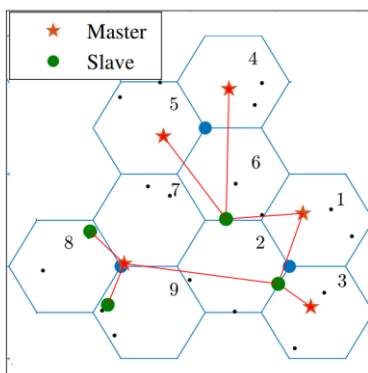
Para el desarrollo analítico de CoopSIC, es necesario realizar las posibles permutaciones posibles en el esquema de red, dado por.

$$\#SR = \sum_{n=2}^N \binom{N}{n} (n! - (n-1)!).$$

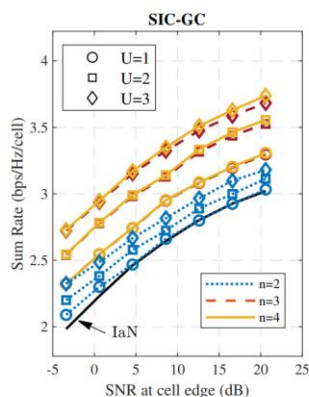


## 6.5 Resultados de simulación y comparaciones con resultados teóricos

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*

## 6.6 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.

## 6.7 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 con la Estructura de Trabajo (fig 15.)

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.

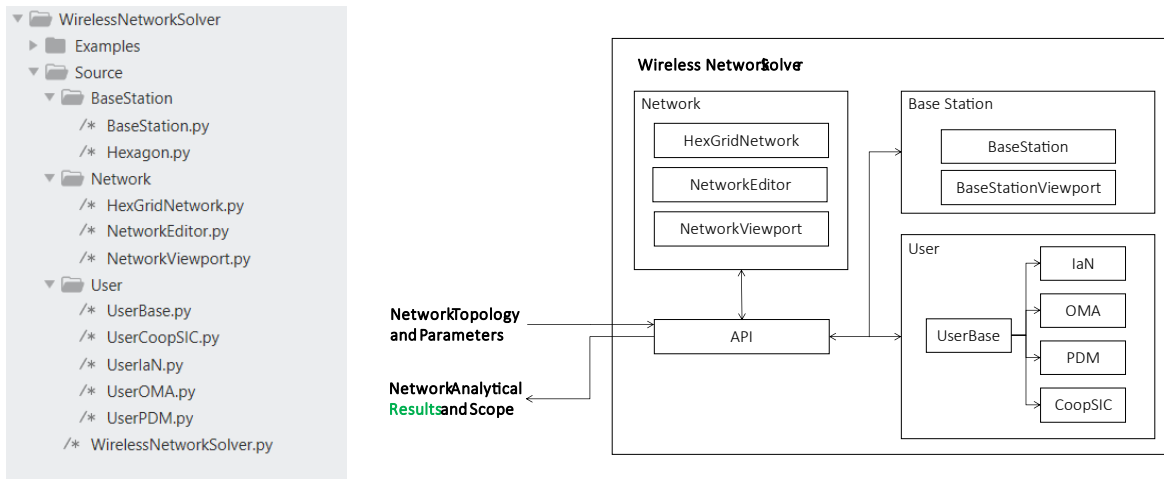


Ilustración 16. Diagrama y estructura Wireless Network Solver

**API:** Archivo llamado WirelessNetworkSolver.py el cual contiene las definiciones, funciones y utilidades necesarias para ser llamadas en un archivo externo (Application Programming Interface). A continuación, se muestra un ejemplo del uso de la librería en código

```

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(";", ".")\
25         .replace("/", ".")\
26         .replace(" ", "")\
27         .replace("1.0.*", ".")\
28         .replace("(1).*", "")
29
30 def VisualizeNetwork():
31     dpg.start_dearpygui()
32     dpg.destroy_context()
33
34 def ActivateTrise( Network, row , col ):
35
36     fixed_row = row
37     fixed_col = col
38
39     if row % 2 != 0:
40         fixed_col = col + 1
41     else:
42         fixed_col = col + 1
43
44     if col % 2 != 0:
45         fixed_row = row + 1
46     else:
47         fixed_row = row - 1
48
49     BS1 = Network.ActivateBS( row, col )#Get BS via row, column
50     BS2 = Network.ActivateBS( row, fixed_col )#Get BS via row, column
51     BS3 = Network.ActivateBS( fixed_row, fixed_col )#Get BS via row, column
52
53     BS1.SetAntennaRelativePosition( [BS1.radius,0.0] )
54     BS2.SetAntennaAbsolutePosition( BS1.antenna_absolute_position )
55     BS3.SetAntennaAbsolutePosition( BS1.antenna_absolute_position )
56
57     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

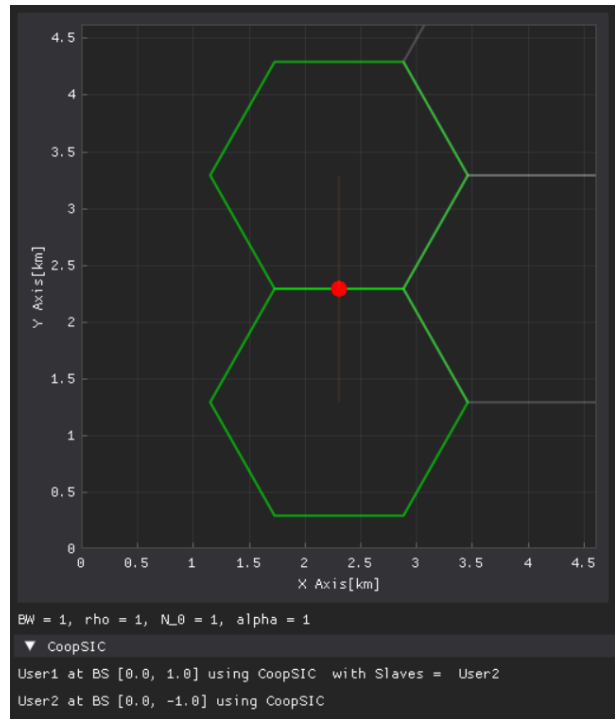


Ilustración 19. Red ejemplo CoopSIC al borde de celda

```
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)

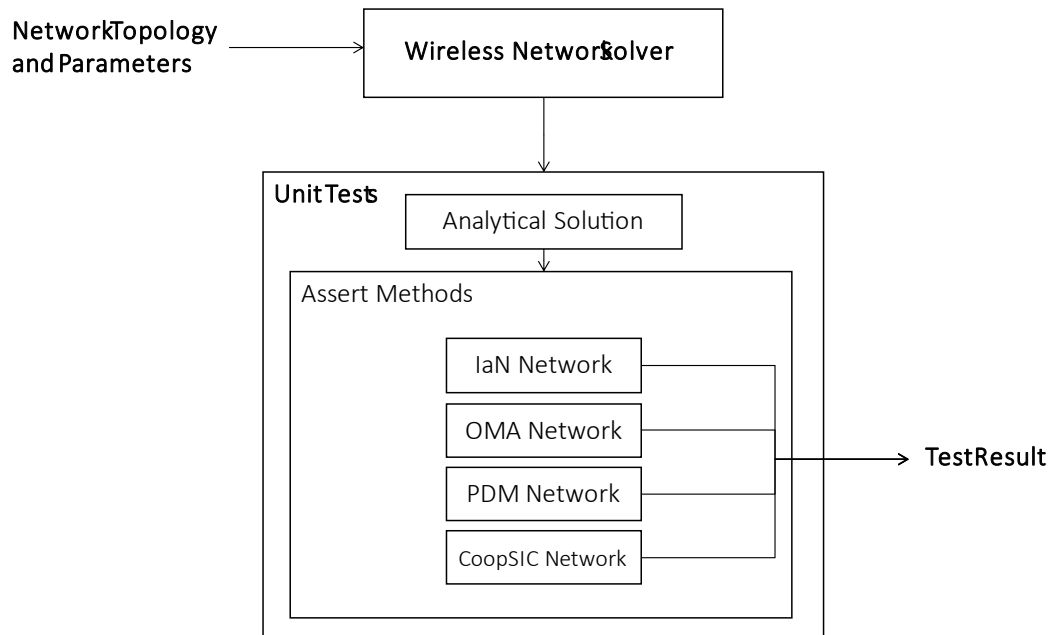
La prueba de concepto se realizó a lo largo del desarrollo de la librería, en la cual se pusieron a prueba prototipos de lo que son los bloques vistos en la Estructura de la librería (Ilustración 16), estos se desarrollaron en códigos externos a la librería y sus resultados fueron mostrados al cliente 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 con base a la ganancia relativa de CoopSIC respecto a las otras técnicas, dada por la siguiente expresión.

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

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



## 10. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

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.

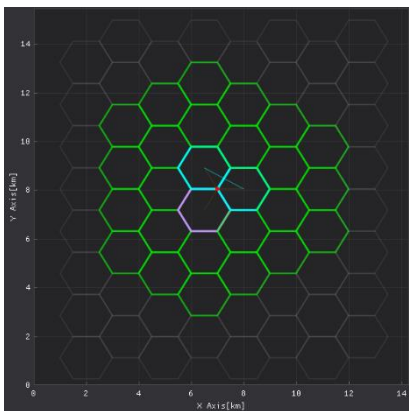
En esta sección se mostrará el comportamiento de las diferentes técnicas de acceso múltiple dadas unas condiciones ideales para cada caso a comparar, dado que las condiciones deben ser lo más justas posible, cada técnica deberá operar con parámetros internos que maximicen su capacidad, por esto, primero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

### 10.1 Caracterización Técnica CoopSIC

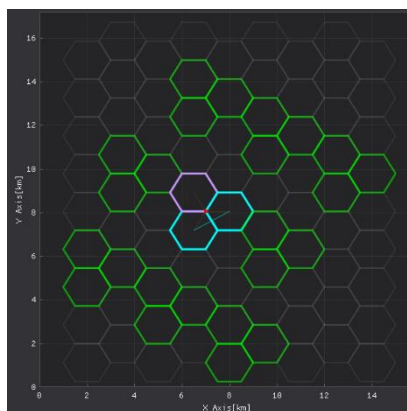
#### 10.1.1 Múltiples factores de reúso

Tener un factor de reúso 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

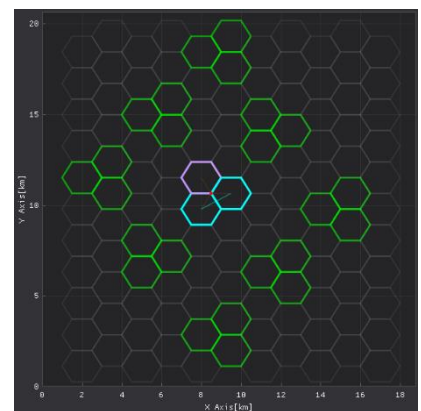
##### 10.1.1.1 Cooperación 2 BS's



a.  $\rho = 1$



c.  $\rho = 1/2$



b.  $\rho = 1/4$

Ilustración 21. 2 Coop Diferentes rhos

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 )

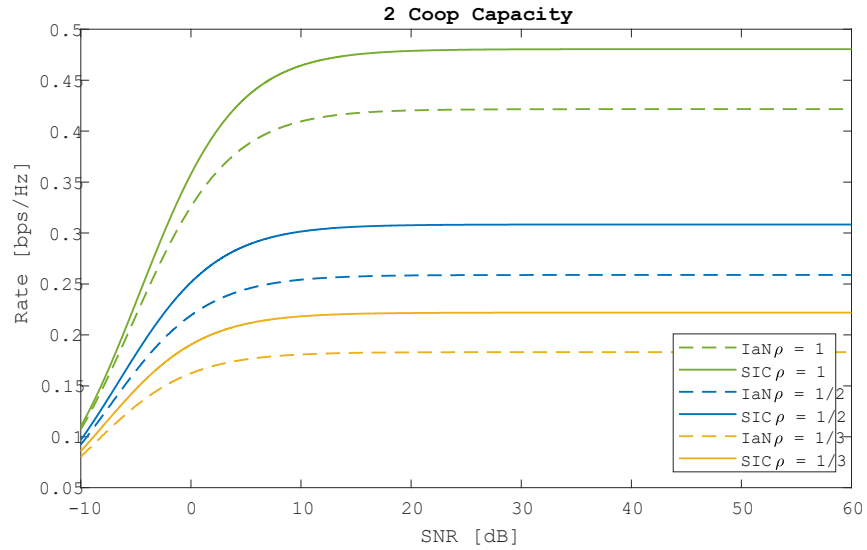


Ilustración 22. SR para 2 Coop

### 10.1.1.2 Cooperación 3 BS's

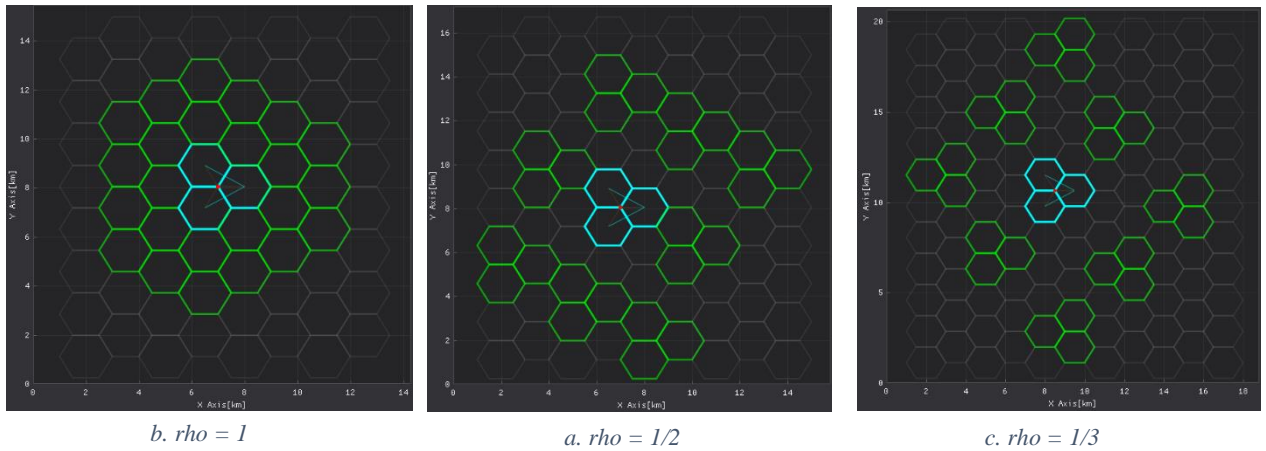


Ilustración 23. 3 Coop Diferentes rhos

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

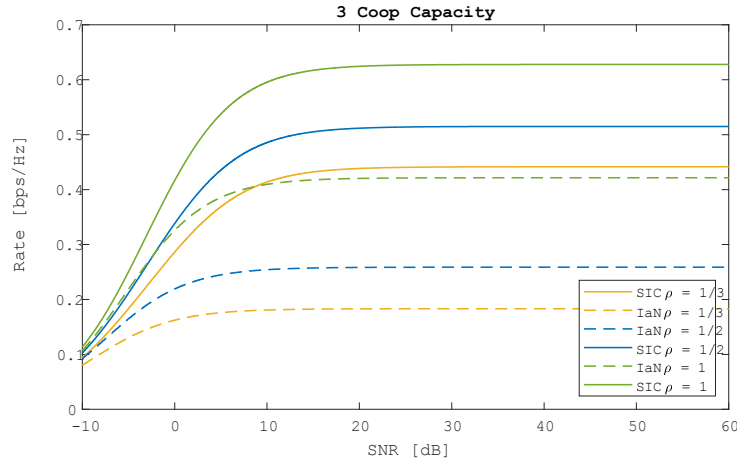


Ilustración 24. SR para 3 Coop

## 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.

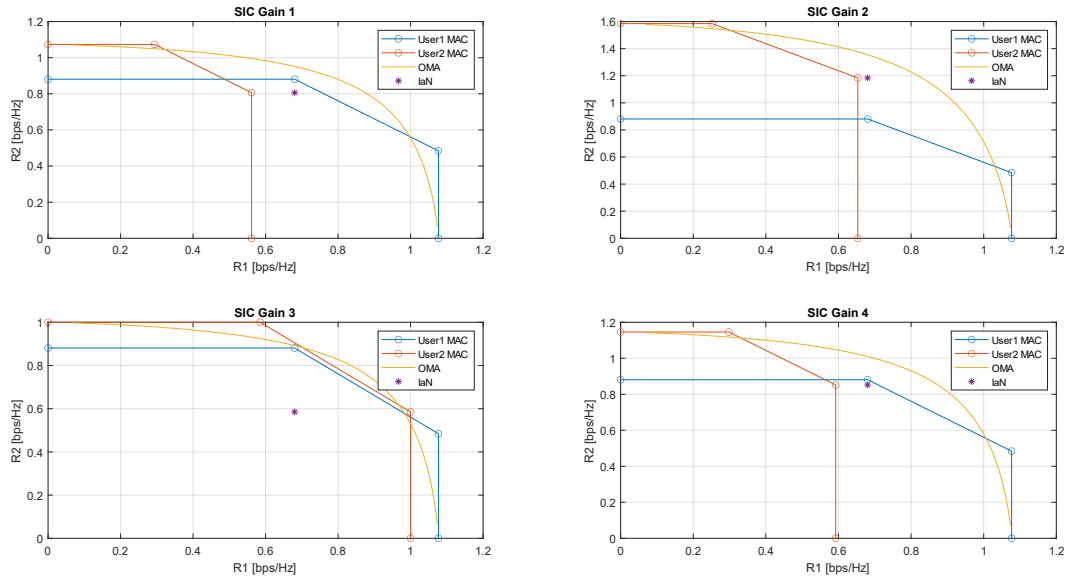


Ilustración 25. Comparación región de capacidad, múltiples técnicas.

### 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].

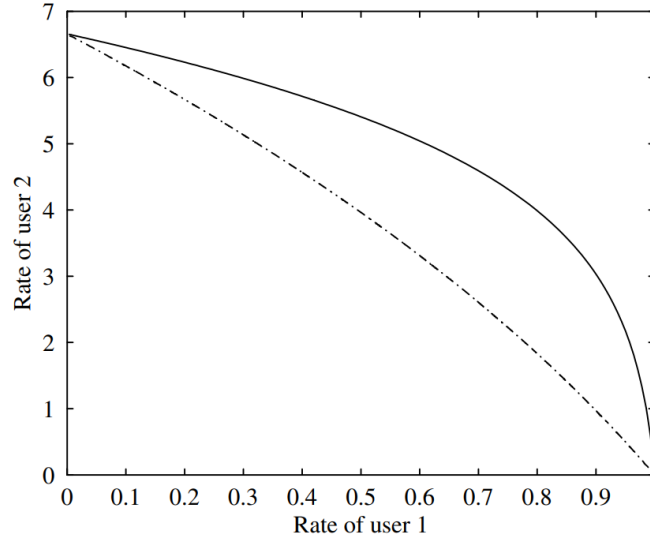


Ilustración 26, PDM vs OMA, Canales constantes.

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.

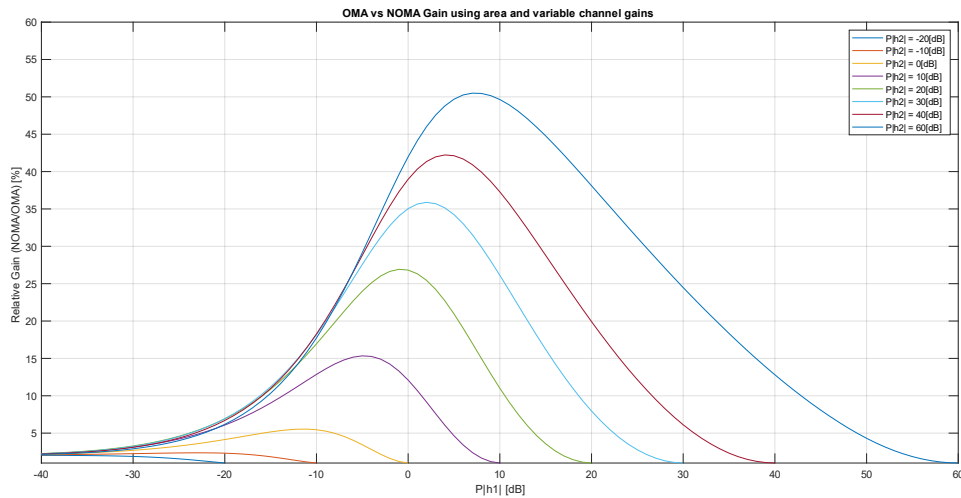


Ilustración 27, Ganancia relativa PDM vs OMA, Canales variables.

## 10.4 Comparaciones técnicas en esquema 2x2

### 10.4.1 Desplazando usuario sobre el borde de la celda sin OCI

Se realizaron las comparaciones utilizando dos celdas con un usuario cada uno, la primera celda tendría a su usuario fijo en el borde de la celda y la segunda tendría al usuario moviendo sobre el borde cercano al usuario1 (Ilustración 28).

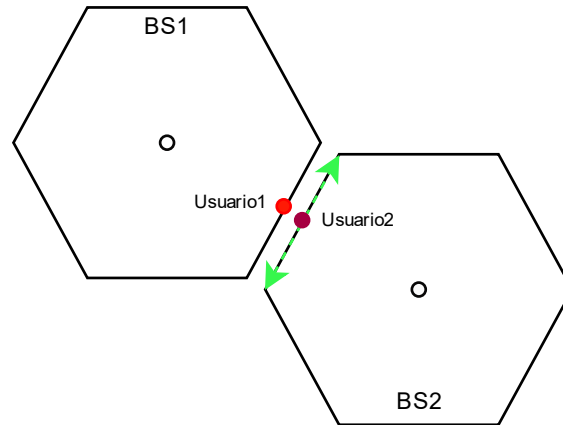


Ilustración 28. Esquema 2x2 Desplazamiento sobre el borde de la celda sin OCI

En el caso de Cooperative SIC el Usuario1 sería el maestro y el Usuario2 esclavo. Se manejan valores de normalizados para la potencia, ruido y lado de los hexágonos.

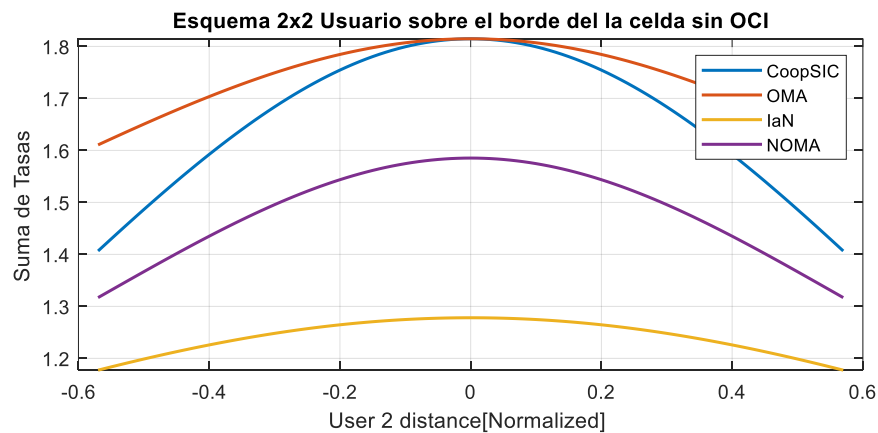


Ilustración 29. Simulación Esquema 2x2, Usuario sobre el borde de la celda Sin OCI

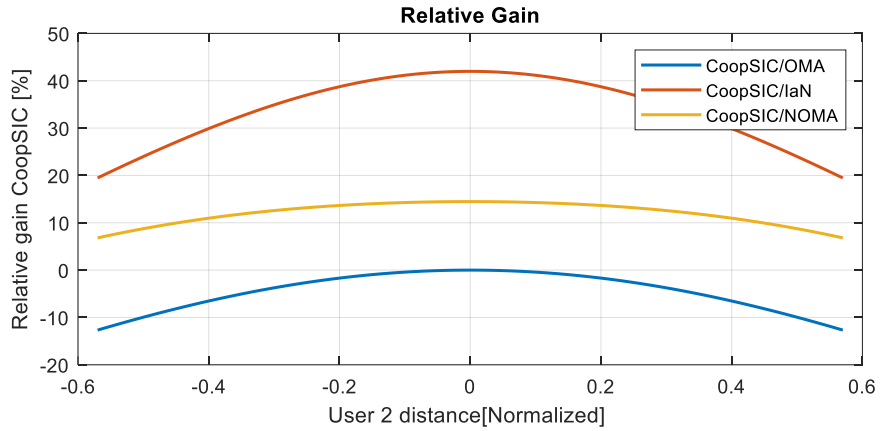


Ilustración 30. Ganancia Relativa Esquema 2x2 Usuario sobre el borde de la celda sin OCI

Como se aprecia (Ilustración 29), OMA y CoopSIC tienen el mismo comportamiento cuando no existe desplazamiento (Centro de borde) y OMA tiene mayor tasa cuando los usuarios están alejados. Además, CoopSIC tiene mayor ganancia de hasta, un poco mayor al 40% en el caso de IaN, y del 15% aproximadamente en NOMA (Ilustración 30).

#### 10.4.1.1 Sobre el borde de la celda con OCI

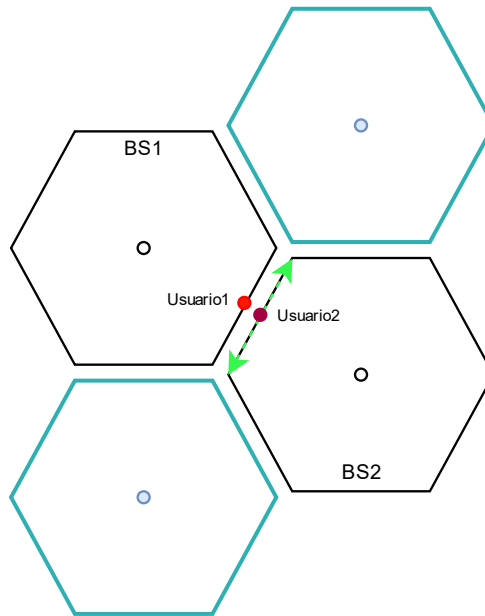


Ilustración 31. Esquema 2x2 sobre el borde de la celda con OCI

,De acuerdo con la ilustración anterior se consideraron para los ejemplos 2 fuentes externas de interferencia, hexágonos azules y se obtuvo como resultados las ilustraciones siguientes:

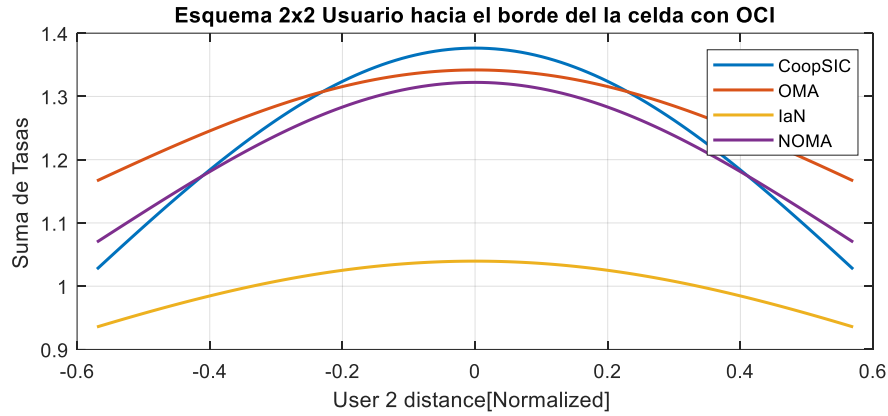


Ilustración 33. Simulación esquema 2x2 Sobre el borde de la celda con OCI

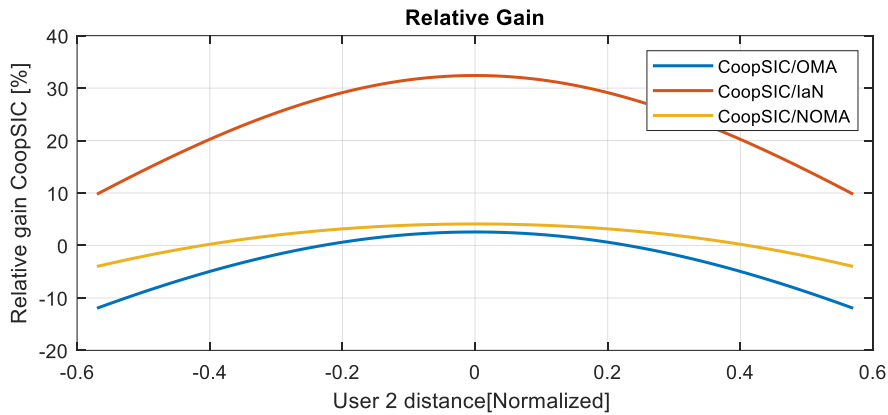
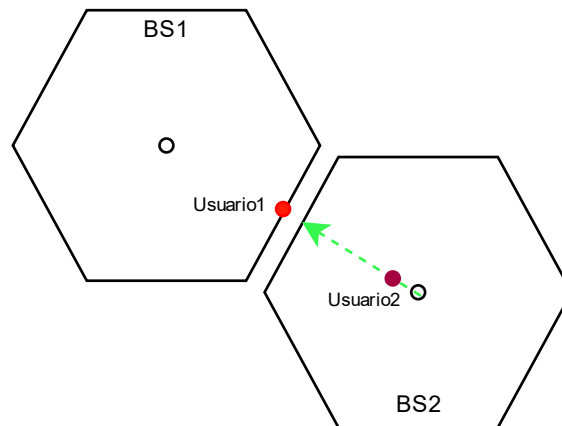


Ilustración 32. Ganancia esquema 2x2 sobre el borde de la celda con OCI

Como se aprecia, CoopSIC tiene una mayor ganancia en el centro del borde con respecto a las demás técnicas, siendo seguida por OMA y NOMA.

### 10.4.2 Desplazando Usuario hacia el borde de la celda

En esta configuración, la primera celda tendría a su usuario fijo en el borde de la celda y la segunda tendría al usuario moviendo hacia el borde (Ilustración 34).

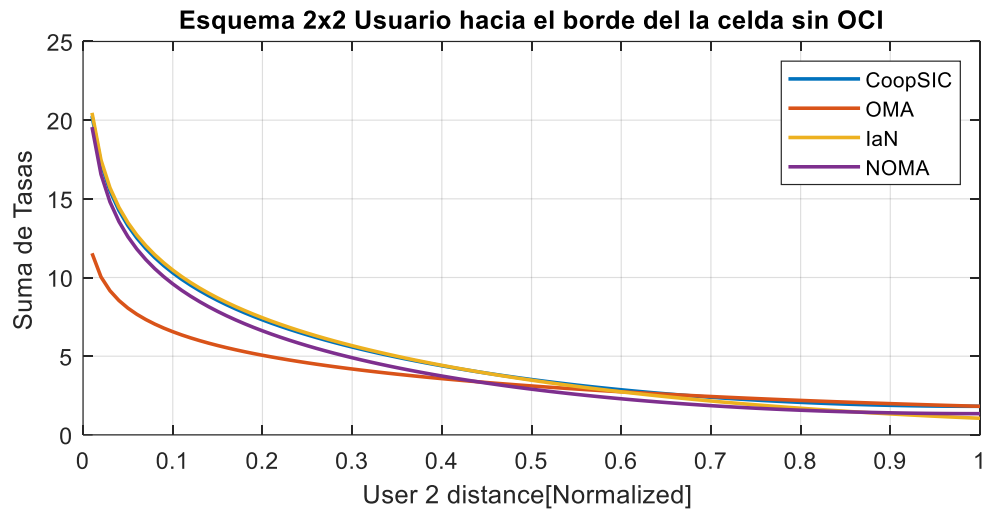


*Ilustración 34. Desplazamiento Esquema 2x2 Usuario hacia el borde de la Celda sin OCI*

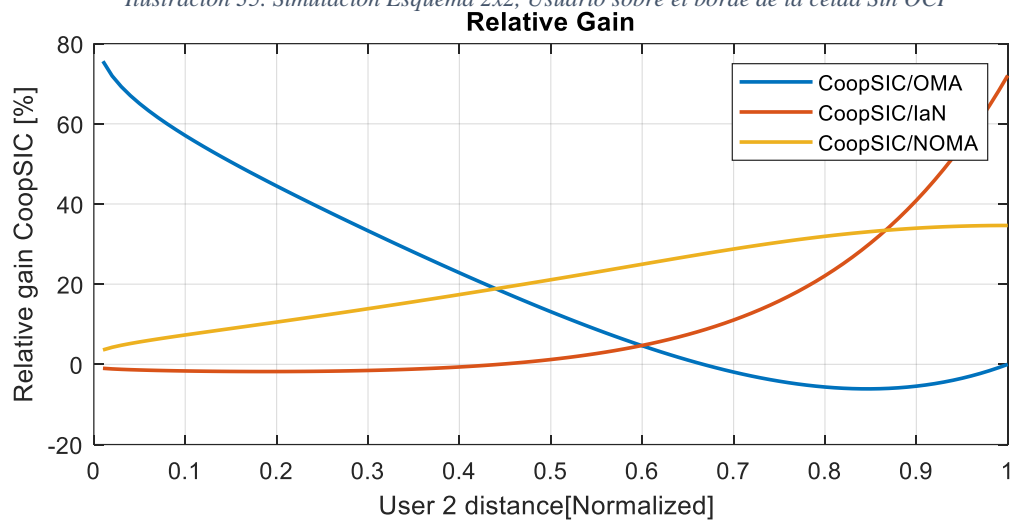
Como se aprecia en (Ilustración 35) e (

Ilustración 36) IaN y CoopSIC tienen un comportamiento similar, mientras que OMA es el que menor SR tiene. En estas comparaciones el Usuario2 es el maestro y el Usuario1 el esclavo



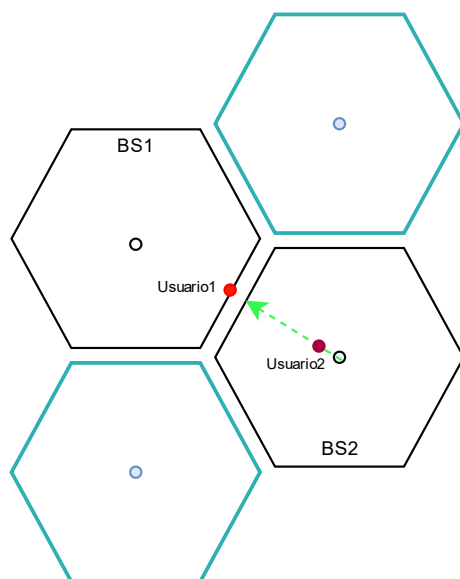


*Ilustración 35. Simulación Esquema 2x2, Usuario sobre el borde de la celda Sin OCI*

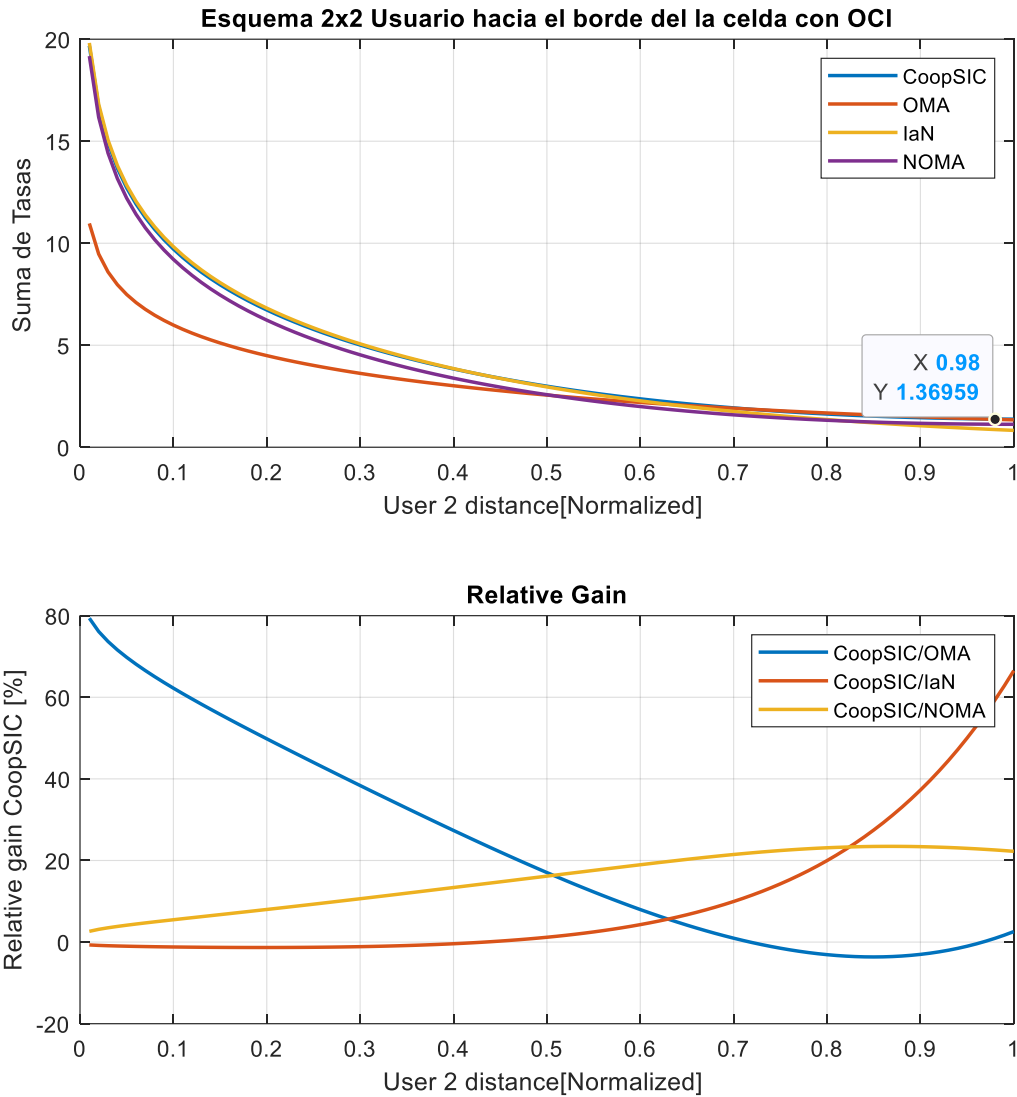


*Ilustración 36. Ganancia Relativa Esquema 2x2 Usuario sobre el borde de la celda sin OCI*

#### 10.4.2.1 Hacia el borde de la celda con OCI



*Ilustración 37. Esquema 2x2 hacia el borde de la celda con OCI*



*Ilustración 38. Simulación esquema 2x2 hacia el borde de la celda con OCI*

El anterior caso describe el comportamiento de un usuario2 maestro desplazándose desde el centro de la estación base hasta el borde en línea recta considerando 2 fuentes de interferencia, se aprecia que los comportamientos en el centro del borde se mantienen en las dos simulaciones.

## 10.5 Comparaciones en esquema 3x3

### 10.5.1 Desplazando usuarios sobre el borde de la celda

Se ubican 3 usuarios, uno por estación base. Estos se desplazarán sobre el borde de la celda en función de una variable *Offset*, desde el centro a la esquina respectivamente como se observa en (Ilustración 40)

Se maneja la condición extendida en este esquema sin OCI por medio de la evaluación de todas las combinaciones posibles hasta encontrar el orden (maestro-esclavos/esclavo-maestros) que generara un mayor SR

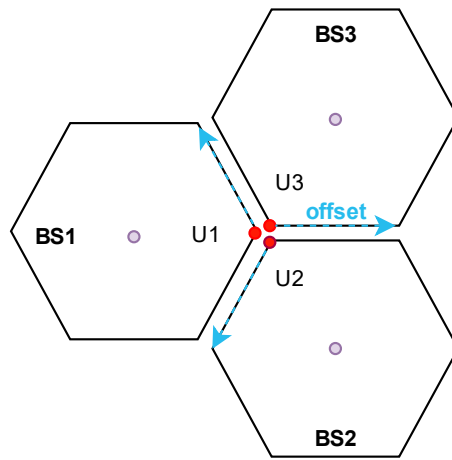


Ilustración 40. Esquema 3x3 Desplazamiento sobre el borde de la celda

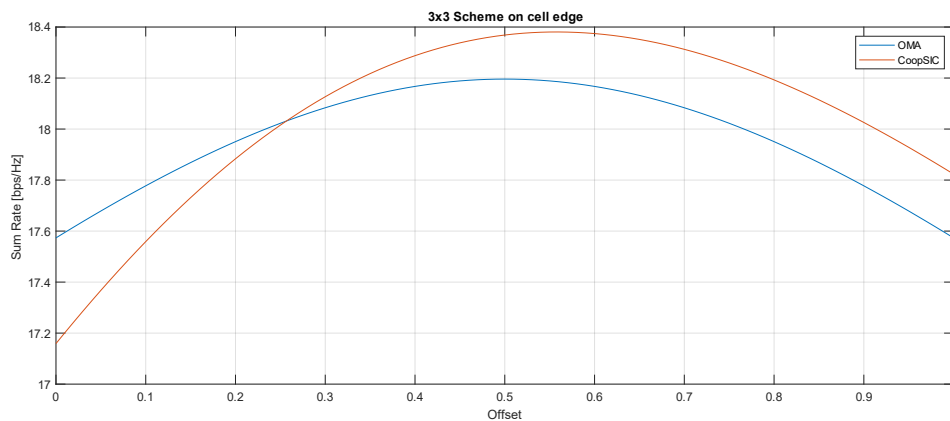
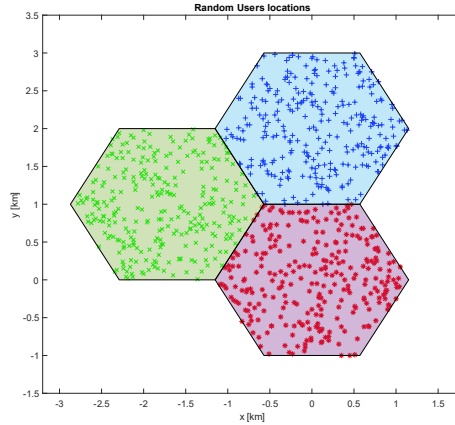


Ilustración 39. Suma de tasas OMA vs CoopSIC esquema 3x3

CoopSIC toma ventaja sobre OMA cuando la interferencia generada por las demás estaciones bases disminuye al alejar el usuario del punto de mayor interferencia (centro).

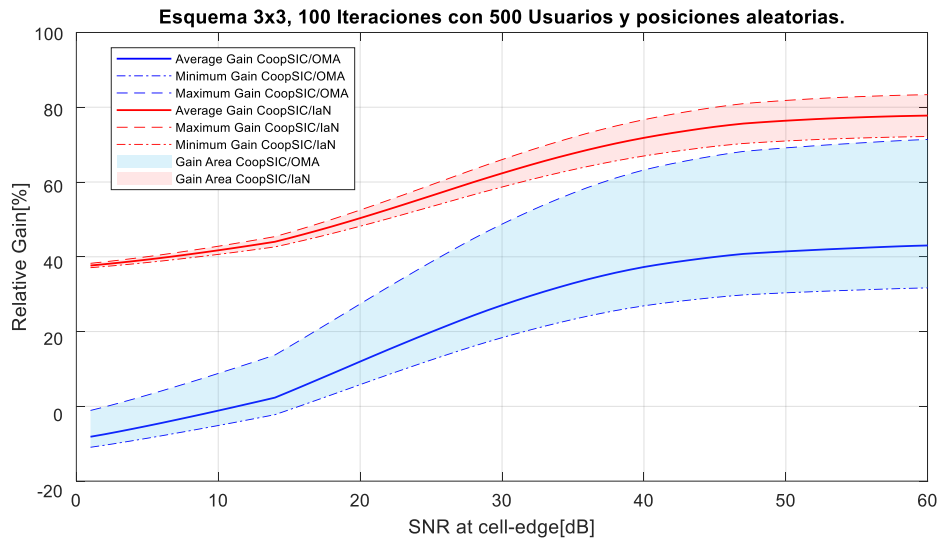
### 10.5.2 Usuarios ubicados aleatoriamente evaluando condición extendida EC-Cooperative SIC sin OCI

Como última comparación del esquema 3x3, se ubicaron 1 usuario por estación base y se realizan 5000 iteraciones aleatoriamente en el espacio, de las cuales se obtienen los promedios de capacidad por técnica variando el SNR al borde de la celda.



*Ilustración 41, Esquema 3x3 después de 1000 Iteraciones.*

La distribución de usuarios es uniforme en la estación base, se ponen a prueba 3 técnicas, OMA, IaN y CoopSIC con condicion extendida.



*Ilustración 42, Resultados de simulación 3x3.*

CoopSIC tiene ganancia al compararse con cualquiera de los esquemas a excepción de cuando se tiene bajo SNR al borde de la celda si se compara con OMA, esto debido a que

CoopSIC se beneficia de la interferencia, sin embargo, la ganancia de OMA oscila mucho, especialmente cuando hay alto SNR al borde de la celda.

### 10.5.3 Esquema con antenas trisectoriales evaluando condición extendida EC-Cooperative SIC vs IaN y OMA

Se ubican 6 antenas trisectoriales por estación base, lo cuales general, se ubicaron 1 usuario por estación base y se realizan 5000 iteraciones aleatoriamente en el espacio, de las cuales se obtienen los promedios de capacidad por técnica variando el SNR al borde de la celda.

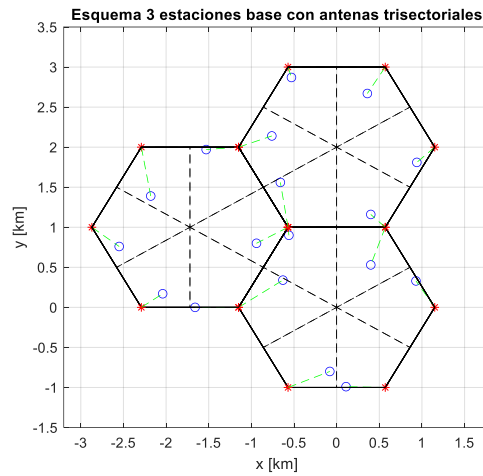


Ilustración 43, Esquema trisectorial con 3 estaciones base. Primera iteración.

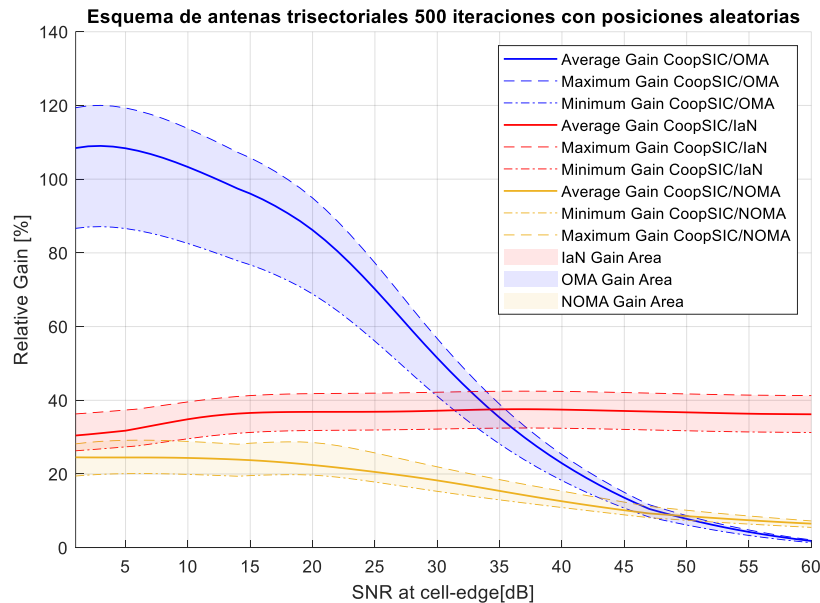


Ilustración 44, Resultados de simulación esquema trisectorial.

A baja potencia, OMA tiene baja capacidad, esto debido a que, aunque esté libre de interferencia, su capacidad es dividida en el número de antenas. CoopSIC es el mejor esquema en esta configuración, esto debido a que, al aplicar la condición extendida, la alta interferencia beneficia al sistema.

## **11.CONCLUSIONES**

En primer lugar, se logró alcanzar el objetivo específico de encontrar expresiones analíticas para la técnica Cooperative SIC que incluyeran desvanecimientos de pequeña escala, en particular, se consideró el canal Rayleigh. Estas expresiones analíticas fueron desarrolladas y permitieron evaluar de manera precisa el desempeño de la técnica en términos de la capacidad espectral, la eficiencia energética y otros parámetros relevantes.

Una de las mayores sorpresas fue la evaluación de la técnica ortogonal FDMA ya que muestra resultados muy buenos, llegando incluso a superar técnicas no ortogonales en esquemas de baja interferencia. Esto debido a que, en múltiples documentos revisados, hacen caso omiso a esquemas ortogonales, sin tener en cuenta su importancia cuando estos son optimizados.

Por otra parte, se llevó a cabo la evaluación y comparación de los resultados mediante simulación, considerando las ubicaciones de los usuarios. Esta etapa fue fundamental para validar los resultados obtenidos analíticamente y comprobar su aplicabilidad en escenarios reales. Los resultados de las simulaciones respaldaron las conclusiones obtenidas a partir de las expresiones analíticas, demostrando la eficacia y el desempeño superior de la técnica Cooperative SIC en comparación con otras técnicas, como OMA, NOMA e IaN.

Además de los resultados obtenidos, en este trabajo se desarrolló una herramienta de red diseñada específicamente para generar expresiones analíticas para cualquier configuración, ubicación y posición. Esta herramienta, denominada "Wireless Network Tool", ha demostrado ser una valiosa contribución para la evaluación y comparación de diferentes técnicas en redes celulares, brindando flexibilidad y facilitando futuras investigaciones y desarrollos en el campo y demostrar la importancia de lenguajes de programación como Python para el desarrollo de herramientas de código abierto.

Este trabajo ha logrado cumplir con los objetivos planteados, proporcionando una evaluación exhaustiva del desempeño de la técnica Cooperative SIC en redes celulares para transmisión SISO y canales con desvanecimientos de pequeña escala. Los resultados obtenidos, respaldados por las expresiones analíticas y las simulaciones realizadas, demuestran que la técnica Cooperative SIC presenta ventajas significativas en términos de capacidad espectral, eficiencia energética y control de potencia. Estos hallazgos contribuyen al avance y la mejora de las redes celulares, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y la implementación de esta técnica en entornos reales.

La complejidad que toma modelar redes celulares en esquemas no ortogonales es muy alta, debido al número de posibles permutaciones y relaciones maestro-esclavo.

## **12.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>



### 13.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](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.
- [25] M. Agiwal, A. Roy and N. Saxena, "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617-1655, thirdquarter 2016, doi: 10.1109/COMST.2016.2532458.
- [26] Nam, Wooseok & Bai, Dongwoon & Lee, Jungwon & Kang, Inyup. (2014). Advanced Interference Management for 5G Cellular Networks. *Communications Magazine, IEEE*. 52. 52-60. 10.1109/MCOM.2014.6815893.