



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

TRABAJO DE GRADO

CANCELACIÓN SUCESIVA DE INTERFERENCIAS EN REDES
CELULARES DE MÚLTIPLES TRANSMISORES Y MÚLTIPLES
RECEPTORES

Camilo Andrés Zamora De La Torre

Karen Giselle Mezquida Ramos

Director:

Daniel Jaramillo Ramírez, PhD

Mayo, 2019

Índice general

Agradecimientos	3
1. Introducción	4
2. Objetivo del proyecto	5
2.1. Objetivo general	5
2.2. Objetivos específicos	5
3. Marco teórico	6
3.1. Redes Celulares	6
3.2. Fenómenos de propagación	7
3.3. Protocolos de Acceso al Medio	7
3.4. LTE	8
3.5. Interferencia entre Celdas	9
3.6. Manejo de Interferencia	9
3.7. Cancelación Sucesiva de Interferencias	10
3.8. SIC en Redes Celulares	11
4. SIC Cooperativa	12
4.1. SIC Cooperativa de segundo orden	12
4.1.1. Canal de Interferencia	12
4.1.2. Condición de Ganancia SIC	13
4.1.3. Algoritmo para SIC Cooperativa de segundo orden	16
4.2. SIC Cooperativa de Orden Superior	16
4.2.1. Canal de Interferencia	16
4.2.2. Condición General de Ganancia SIC	17
4.2.3. SIC Simultánea	19
5. Desarrollo	21
5.1. Problema de optimización	21
5.2. SIC Cooperativa Extendida	22
5.3. Algoritmo Propuesto para SIC Cooperativa de orden superior	24
6. Protocolo de Pruebas	27
6.1. Parámetros del simulador	27
6.1.1. Parámetros generales	27
6.1.2. Geometría del sistema	28
6.2. Medidas de desempeño	28
6.2.1. Regiones de asignaciones	28
6.2.2. Probabilidad de usar SIC	28

6.2.3.	Ganancia SIC	29
6.2.4.	Ganancia Total del Sistema	29
6.2.5.	Porcentaje de asignaciones de cada orden	29
6.3.	Comparaciones	29
6.3.1.	SIC Cooperativa de segundo orden y de orden superior	29
6.3.2.	Sistema utilizando SIC GC y SIC GC+	29
7.	Análisis de Resultados	30
7.1.	Modelo del sistema	30
7.2.	Regiones en las celdas	31
7.3.	Probabilidad de usar SIC	31
7.4.	Ganancia SIC y Ganancia Total del Sistema	32
7.5.	Porcentaje de asignaciones de cada orden	33
7.5.1.	Órdenes de asignación según el número de usuarios por celda	33
7.5.2.	Órdenes de asignación según la potencia de transmisión	34
7.6.	Comparación entre SIC Cooperativa de segundo orden y de orden superior	35
7.7.	Comparación de una red utilizando SIC GC o SIC GC+	36
7.8.	Comparación entre diferentes técnicas	37
8.	Conclusiones	41
8.1.	Conclusiones	41
8.2.	Trabajo a futuro	41
	Bibliografía	43
	Anexos	44
Matlab		44

Agradecimientos

Queremos presentar nuestros más sinceros agradecimientos a nuestro director de trabajo de grado, Daniel Jaramillo Ramírez, quien tuvo un acompañamiento continuo durante todo el proceso de investigación e implementación y nos brindó la oportunidad de continuar con el estudio realizado durante su tesis doctoral.

Además, queremos agradecer a la Pontificia Universidad Javeriana que nos brindó todo su apoyo mediante fuentes de información, espacios de trabajo y, en general, oportunidades de mejora y crecimiento en diferentes aspectos de nuestras vidas.

Por último, agradecemos a todas las personas que, de cualquier forma, contribuyeron a la realización de este trabajo de grado.

Capítulo 1

Introducción

Distinguishing the signal from the noise requires both scientific knowledge and self-knowledge.

Nate Silver

Las comunicaciones inalámbricas son estudiadas ampliamente en la actualidad y se han convertido en una característica fundamental de cualquier sociedad moderna. Específicamente, la tecnología celular y los smartphones han sido un medio de comunicación de bastante acogida a nivel mundial debido a su proactividad y comodidad. Tanto así que, en promedio, más de la mitad de la población mundial (52 %) hace uso de un smartphone al menos una vez al mes. Los dispositivos móviles -y por tanto, las redes celulares- se han establecido como el principal medio de acceso a internet (recurso indispensable para la sociedad actual), reemplazando a las estaciones de trabajo clásicas en un gran número de actividades. [1]

Gracias al masivo aumento en la demanda, la escasez del espectro se ha presentado como un gran inconveniente. El espectro es definido como el rango de frecuencias de radio electromagnéticas usadas para transmitir señales de forma inalámbrica. De todas las frecuencias en el espectro radioeléctrico, algunas son preferidas para los servicios de comunicaciones de radiodifusión televisiva o de radio, sistemas de navegación aérea o comunicaciones de radio para la policía y otros servicios públicos. A todos estos servicios se les ha asignado históricamente una porción de este [2]. Con la llegada de la telefonía móvil, el espectro designado para los servicios celulares es escaso y costoso. Los operadores de telefonía celular pagan grandes cantidades de dinero a las autoridades locales para alquilar un fragmento de espectro. Además, las señales 2G, 3G y 4G deben usar canales diferentes, y aunque las nuevas tecnologías pueden reemplazar los servicios 2G, muchos usuarios aún poseen únicamente terminales 2G y no se pueden desconectar.[3]

Así, con el aumento de la demanda de usuarios de tecnología celular y de la escasez del espectro designado para los servicios celulares, se plantean enormes desafíos científicos y de ingeniería, con el fin de dar solución a requerimientos de mayores tráficos y velocidades de datos. Para esto, es necesario un uso mucho más eficiente del espectro por área, lo que implica directamente la innovación en las tecnologías de comunicación celular, con el fin de mejorar la capacidad de transmisión de la red.

Capítulo 2

Objetivo del proyecto

2.1. Objetivo general

El objetivo general propuesto para este trabajo de grado es diseñar un algoritmo de programación para realizar cancelación de interferencias sucesivas (SIC, del inglés, *Successive Interference Cancellation*) cooperativa dentro de una red de múltiples celdas y múltiples usuarios por celda.

2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos que permiten el cumplimiento del objetivo general son:

1. Plantear un problema de optimización (función objetivo y restricciones) para incrementar la tasa de transmisión en redes celulares de múltiples celdas y múltiples usuarios por celda.
2. Implementar un simulador para realizar SIC cooperativa en redes multi-celda multi-usuario a partir del problema de optimización planteado.
3. A partir de la simulación, presentar resultados numéricos acerca de la probabilidad de usar SIC cooperativa en el sistema, la ganancia SIC después del algoritmo de programación, la ganancia total del sistema y de cómo se ven afectados estos resultados con el número de usuarios por celda.
4. Comparar el desempeño de usar SIC cooperativa en una red de orden N (es decir, N transmisores y múltiples receptores) con el de una red de orden dos y con respecto a usar el ruido como interferencia (IaN , del acrónimo en inglés *Interference as Noise*).

Capítulo 3

Marco teórico

3.1. Redes Celulares

Una red celular se puede definir como un conjunto de transmisores y receptores en donde, por lo menos, el último enlace entre ellos es inalámbrico. Estas están estructuradas como una malla de estaciones base, diseñada para que abarque cierta área definida. Cada estación base está compuesta de al menos una antena, la cual se encarga de atender las solicitudes de los receptores (en el enlace descendente) para los que la calidad de su comunicación sea mejor que la calidad que le proveería cualquier otro transmisor. El área para la cual esto se cumple es conocida como una celda. [4]

A su vez, en comunicaciones inalámbricas es importante diferenciar el enlace ascendente, del enlace descendente. El enlace ascendente (*uplink*) hace referencia a la comunicación cuando el dispositivo móvil es el transmisor y la antena ubicada en la estación base hace de receptora. Esto ocurre, por ejemplo, en la tecnología LTE, en donde el dispositivo móvil envía información acerca de la calidad de la señal recibida a la estación base; o en los dispositivos IoT, que suben grandes cantidades de información a la nube. Al contrario, el enlace descendente (*downlink*) indica la comunicación en donde la estación base hace de transmisora; por ejemplo, al ver un video a través de internet en un *smartphone* conectado a la red de cualquier operador móvil. El diagrama de estos enlaces de comunicación es mostrado en la figura 3.1. Debido a restricciones de potencia y tamaño en los dispositivos celulares, el *uplink* y el *downlink* presentan problemas completamente diferentes en el diseño y configuración del protocolo de comunicación dentro de una red celular. A lo largo de este texto, se tratará el problema con respecto al enlace descendente. [4]

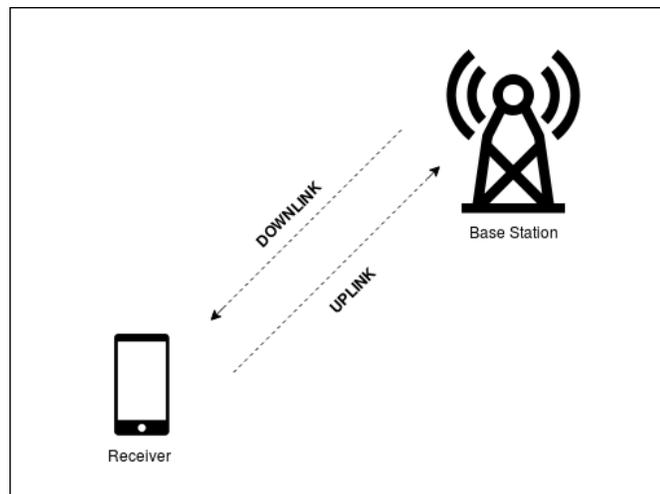


Figura 3.1: Enlaces de comunicación entre estación base y receptor

3.2. Fenómenos de propagación

Las ondas electromagnéticas describen el evento físico de la manera más rápida posible en la que la energía puede viajar en el espacio. Además, son el único medio de propagación de energía que puede viajar a través del espacio vacío. Su velocidad y su capacidad para atravesar cualquier medio las hacen ideales para llevar información. En particular, la parte del espectro donde tienen lugar las comunicaciones inalámbricas se conoce como ondas de radio. A medida que la energía se propaga en el espacio como una onda de radio, se distinguen tres efectos principales que forman la base para modelar el canal inalámbrico:

- *Path-loss*: A medida que la onda se desplaza, el espacio cubierto por la onda se agranda y la cantidad de energía por unidad de área se reduce al inverso del cuadrado de la distancia.
- *Shadowing*: Este efecto explica los grandes obstáculos que atenúan fuertemente la potencia de la señal. En ambientes urbanos al aire libre podría representar edificios. El *Shadowing* generalmente se modela como una variable aleatoria siguiendo una distribución *heavy-tailed*.
- *Small-scale fading*: Cuando una onda de radio se enfrenta a un obstáculo, parte de su energía puede atravesar el obstáculo, pero parte de ella también puede reflejarse (este efecto se conoce como dispersión). Por lo tanto, el receptor verá múltiples copias de la señal llegando en diferentes momentos con diferentes intensidades y la onda resultante puede aumentar su amplitud si las copias múltiples llegan alineadas en fase o pueden sufrir un fuerte desvanecimiento si las copias llegan con fases opuestas. Este hecho constituye el principal desafío para las comunicaciones inalámbricas, ya que es resulta complicado distinguir una señal de potencia muy baja de otras señales [5].

Para contrarrestar estos efectos, se han utilizado múltiples mecanismos en la evolución de las redes celulares explicados con más detalle en la sección 3.4. En este trabajo en específico sólo es tenido en cuenta el efecto *Path-loss*.

3.3. Protocolos de Acceso al Medio

En telecomunicaciones, MAC (subcapa de control de acceso al medio, del inglés: *Media Access Control*) es el conjunto de mecanismos y protocolos de comunicaciones a través de los cuales varios “interlocutores” (computadoras, teléfonos móviles, etcétera) se ponen de acuerdo para compartir un medio de transmisión común [4]. Esta subcapa hace parte de la capa de enlace del modelo OSI (Modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos) según el estándar 802.3 de IEEE [6], el cual se encarga de caracterizar y estandarizar las funciones de comunicación de un sistema de telecomunicaciones o computación sin tener en cuenta su estructura interna y tecnología subyacente. Por su parte, la capa de enlace es la encargada de proporcionar la transferencia de datos de nodo a nodo y define el protocolo para establecer y terminar una conexión entre dos dispositivos físicamente conectados [7]. Las redes celulares, como las redes GSM, UMTS o LTE, también poseen una capa MAC.

El protocolo MAC en redes celulares está diseñado para maximizar la utilización del costoso espectro licenciado. Una analogía posible para el problema del acceso múltiple sería una habitación (que representaría el canal) en la que varias personas desean hablar al mismo tiempo. Si varias personas hablan a la vez, se producirán interferencias y se hará difícil la comprensión. Existen diferentes protocolos que hacen posible que varias estaciones conectadas al mismo medio físico lo compartan, ya sea dando turnos (estrategia de división por tiempo o TDMA), dividiendo el espectro por frecuencias (FDMA) o diferenciando la comunicación por códigos (CDMA, solo quienes conocen el código, pueden entenderlo). Sin embargo, la interferencia llega a ser considerable cuando se está lejos de la antena transmisora, debido a la baja en el nivel de potencia. Una de las alternativas más recientes, que utiliza un principio similar a CDMA, es OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access). En la cual se utiliza división en frecuencia al igual que en FDMA,

con la diferencia que cada usuario posee un grupo único de frecuencias, para las cuales sus portadoras son ortogonales con las de los otros usuarios, eliminando en gran medida la interferencia dentro de la celda [4].

Los protocolos descritos anteriormente son representados en la figura 3.2 en función del tiempo y la frecuencia.

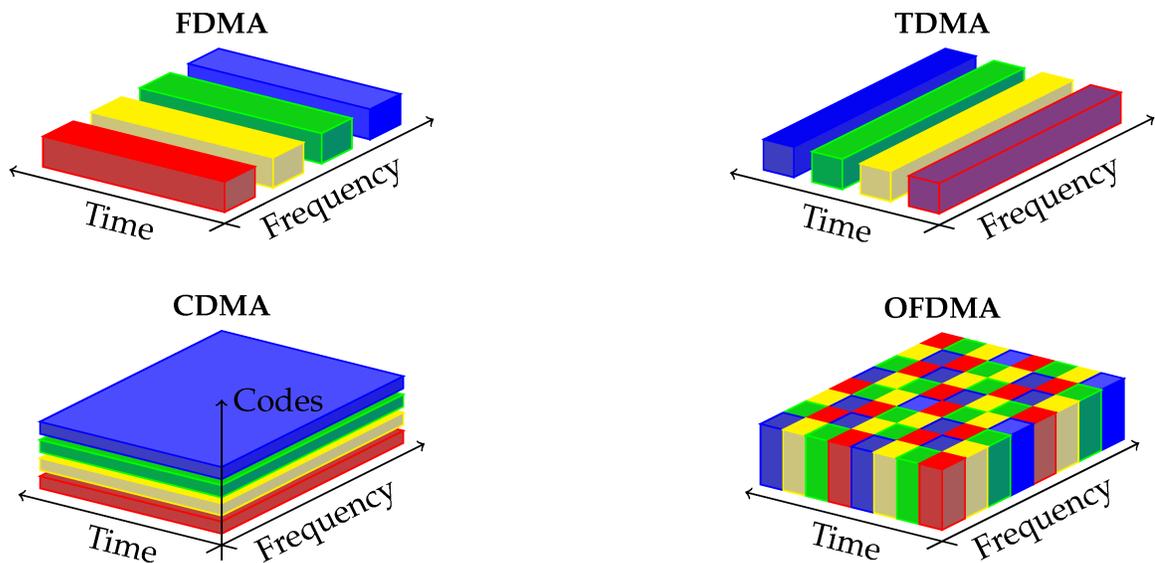


Figura 3.2: Protocolos de acceso al medio en función del tiempo y la frecuencia. Tomado de [8].

En general, todas las tecnologías inalámbricas tratan la interferencia usando asignación de recursos de frecuencia y de tiempo ortogonal (OMA, del inglés *Orthogonal Multiple Access*), es decir, separando las transmisiones contiguas en tiempo o frecuencia (ver sección 3.4, apartado OFDMA). Esta técnica, aunque efectiva, es ineficiente dada la escasez de espectro. Para aumentar la capacidad total de la red o, de forma equivalente, la eficiencia espectral por área, es mejor tratar la interferencia que evitarla. Una opción muy investigada actualmente para conseguir esto es haciendo asignación de recursos de frecuencia y tiempo no ortogonal (NOMA, del inglés *Non-Orthogonal Multiple Access*) [3].

3.4. LTE

En diciembre de 1998, a inicios del acelerado crecimiento en la demanda de la comunicación celular, nació 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), la principal organización de estándares de protocolos de comunicación. La entidad se encarga de mantener, desarrollar, incentivar y definir los protocolos de comunicación utilizados por las empresas que manejan redes celulares, principalmente las tecnologías 2G (EDGE, GPRS), 3G (HSPA, HSPA+), 4G (UMTS, LTE, LTE-A) y el desarrollo del estándar para 5G [9].

LTE (*Long Term Evolution*) y más precisamente LTE-A (*Long Term Evolution - Advanced*) es la tecnología estado del arte en términos de comunicación móvil, la cual se encuentra estandarizada por 3GPP como la tecnología que cumple con los requerimientos para ser considerada 4G, debido a que ofrece tasas y desempeño mucho mayor que sus tecnologías predecesoras a un costo moderado. Los principales proveedores de servicio han escogido LTE-A como arquitectura en su red 4G, debido a la mayor flexibilidad en su implementación [10].

Las principales técnicas que caracterizan a LTE-A como tecnología son [3]:

- MIMO: Haciendo que tanto el receptor como el transmisor hagan uso de múltiples antenas, es posible aprovechar la característica de propagación por múltiples caminos intrínseca a los canales inalámbricos. El dispositivo receptor combina las diferentes copias que recibe a través de sus múltiples antenas, provenientes de diferentes direcciones del espacio que cubre su transmisor designado. La principal desventaja de esta técnica es que añade complejidad de implementación a ambos lados de la comunicación. Sin embargo, posee grandes ganancias en términos de eficiencia espectral.
- OFDMA: Como protocolo de acceso al medio, se utiliza OFDMA en el *downlink* y SC-FDMA (del inglés, *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) en el *uplink*. El ancho de banda de un transmisor es dividido en sub-canales de banda angosta, separados por pequeños intervalos de resguardo para evitar la interferencia entre usuarios. Mediante técnicas de procesamiento de señales, es posible hacer que los sub-canales que esté utilizando un transmisor sean ortogonales entre sí, disminuyendo casi por completo la interferencia entre usuarios cubiertos por él.
- Enlace Adaptativo: El esquema de enlace adaptativo o *link adaptation* consiste en cambiar el tipo de modulación y la tasa de transmisión que utiliza el transmisor según la calidad de señal informada por el receptor, con el fin de evitar pérdidas de información bajo condiciones no aptas de calidad de señal.

3.5. Interferencia entre Celdas

Aunque las tecnologías 4G tratan con gran éxito el problema de la interferencia entre usuarios pertenecientes a la misma celda (es decir, cubiertas por el mismo transmisor). Uno de los principales inconvenientes para seguir mejorando la calidad de las comunicaciones celulares es la interferencia entre celdas (ICI) [3].

Las implementaciones modernas de redes celulares en las ciudades están implementando técnicas de micro o femto celdas. Es decir, estaciones base que cubren áreas pequeñas (tan pequeñas como un solo barrio, o una entidad específica); contrario a las implementaciones tradicionales que utilizaban grandes antenas que cubrían sectores de tamaño considerable [3]. Esto, aunque soluciona problemas intrínsecos a las comunicaciones inalámbricas, como pérdidas de señal debido a la distancia o a obstáculos entre el transmisor y el receptor, implica que en cada punto del espacio pueden llegar a coexistir señales de potencia considerable provenientes de múltiples estaciones base, síntoma que es empeorado en las redes que utilizan técnicas MIMO.

Gracias a la técnica de adaptación de enlace y las características físicas de la red, la señal designada a un receptor específico siempre será mejor que las señales provenientes de otros transmisores (ICI). Sin embargo, la calidad de esta puede llegar a ser afectada de manera considerable [10]. Aunque las tecnologías actuales utilizan diversas técnicas (ver sección 3.6) para mitigar esta interferencia, la calidad de las comunicaciones celulares podría aumentar en gran medida con las tecnologías que surjan a partir de las investigaciones enfocadas a la nueva generación de redes celulares.

3.6. Manejo de Interferencia

En las tecnologías más recientes, han surgido diversas técnicas para el manejo de interferencia (IM, del inglés *Interference Management*) que mejoran aún más el desempeño de las redes que las implementan. El objetivo de estas es, específicamente, aumentar la eficiencia espectral (mayor capacidad de transmisión utilizando el mismo número de recursos) dentro de una región específica. En la figura 3.3 se muestra el esquema de un canal de interferencia (IC, del inglés *Interference Channel*) de dos celdas con un usuario (receptor) por celda.

Entre las técnicas más conocidas para el manejo de interferencia se destacan la Programación Coordinada o *Coordinated Scheduling*, que mediante la comunicación entre distintas antenas o estaciones base (BS, del

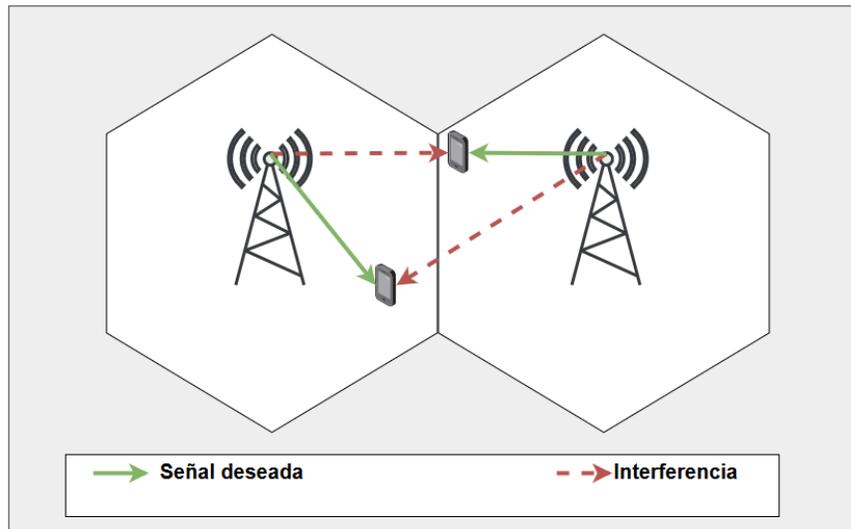


Figura 3.3: Canal de interferencia en red celular de dos celdas

inglés *Base Stations*) permite evitar que interfieran entre sí, especialmente en los bordes de sus celdas [11]. Otro de estos esquemas es conocido como *Beamforming Coordinado* o *Coordinated Beamforming*, el cual también necesita de cooperación entre diferentes BS; en esta técnica, cada BS conoce la ubicación de los receptores en los bordes de sus celdas vecinas, por lo que es capaz de transmitir señales que cancelen su propia interferencia hacia esta región, si es posible [12]. También existe la *Transmisión Conjunta* o *Joint Transmission*, en la cual una BS es capaz de servir a un usuario que esté en el borde de la celda vecina, al mismo tiempo que su propia BS, si esto implica una ganancia en su capacidad de transmisión [13]. El punto en común de todas estas técnicas es la cooperación entre las distintas BS, elemento que es una de las soluciones más prometedoras al problema de la interferencia entre celdas.

3.7. Cancelación Sucesiva de Interferencias

Tradicionalmente, los receptores en redes celulares tratan la interferencia entre celdas como un problema de ruido (*Interference as Noise*), incluso llegando a aplicar técnicas de aleatorización en la interferencia para facilitar su modelado. Sin embargo, en la actualidad la ICI es una de las principales problemáticas que impiden la mejoría en las capacidades de las redes 4G. En próximas generaciones de redes celulares debería existir una forma de manejar esta interferencia. Por esto, fue necesario el diseño de un receptor avanzado que tenga la capacidad de identificar las señales de interferencia y reconstruirlas. Al tener la señal de interferencia, aunque sea parcialmente, es posible eliminarla de la señal deseada [14]. La técnica más estudiada para conseguirlo (y en la cual se basa la mayoría de este trabajo) es conocida como *Cancelación Sucesiva de Interferencias* (SIC).

SIC es una técnica de la capa física conocida desde los años 70's [15]. Esta técnica hace uso de receptores con la capacidad de recibir dos señales diferentes sobre un mismo canal de manera simultánea (lo que en la tecnología actual sería una colisión). Lo realmente interesante de esta técnica es que este "receptor avanzado" es capaz de decodificar la señal más débil y substraerla de la señal combinada, obteniendo finalmente la señal más fuerte (que en redes celulares es usualmente la señal deseada) sin la interferencia. La capacidad del receptor para lograr esto depende de la relación entre ambas señales en el receptor, y es la principal razón por la que no se utiliza en los estándares modernos de comunicación. [16]

3.8. SIC en Redes Celulares

SIC Cooperativa es un esquema basado en principios de cooperación de red y que aprovecha la capacidad de los receptores avanzados para realizar SIC. La técnica ha venido abriéndose campo en las investigaciones frente a las nuevas generaciones de redes celulares. Se ha intentado mostrar que SIC Cooperativa puede mejorar la capacidad de un canal en ciertas condiciones para el Canal de Acceso Múltiple o *Multiple Access Channel* (MAC) [17]. SIC ha ganado gran atención en diferentes contextos, como: diseño de receptor SIC de *hard/soft decision* [18], uso conjunto de SIC en sistemas OFDM [19], rendimiento de los receptores SIC en redes inalámbricas *ad hoc* [20], entre otros. Se ha demostrado que el uso de técnicas NOMA, entre ellas: SIC Cooperativa, genera mejoras en la capacidad de transmisión de una red en comparación con técnicas ortogonales, como se utiliza actualmente en LTE [21].

Sin embargo, aunque la técnica de Cancelación Sucesiva de Interferencias es conocida hace más de 40 años y se han realizado diversos estudios para implementarla en una red móvil a gran escala, aún no ha logrado abrirse campo en las redes de distribución global. La dificultad detrás del uso de SIC en el *downlink* está estrechamente relacionada con el uso de *link adaptation* en los estándares modernos. Específicamente en redes celulares, cualquier usuario se asociará a la BS que proporcione la señal más fuerte y la interferencia recibida de otra BS probablemente no podrá ser decodificada (paso necesario para realizar la cancelación de interferencia), ya que está destinada a un receptor más cercano a ella y su potencia recibida no será suficiente. Sin embargo, estudios recientes han mostrado que es vital encontrar una técnica para mitigar la interferencia entre celdas [10], y SIC Cooperativa es una alternativa importante. En [22] se comprobó que hay un gran espacio para ganancias al utilizar SIC Cooperativa en redes celulares. El problema gira alrededor de la comprensión de la geometría de una red dada, la búsqueda de las regiones donde las condiciones del canal permiten el uso de receptores SIC y la obtención de un algoritmo de programación adecuado para la cooperación en la red. [23]

Capítulo 4

SIC Cooperativa

Como uno de los conceptos más prometedores para superar la interferencia en redes celulares, la cooperación de red se ha estudiado ampliamente en los últimos años y se han propuesto varias técnicas diferentes. Centrándose en el *downlink*, este trabajo investiga la cooperación de red del lado del transmisor y explora las ganancias potenciales de una nueva técnica que aprovecha las capacidades de procesamiento de señal en el lado del receptor [3].

Específicamente, en este trabajo se propone un esquema de SIC cooperativa para redes multicelulares multi-usuario, en el cual se identifican condiciones para las cuales el uso de SIC incrementa la capacidad de transmisión comparado a tratar la interferencia como ruido (*IaN*) en redes celulares con más de dos transmisores y múltiples usuarios por celda. Para aprovechar estas condiciones, es necesario que exista una coordinación interna de la red, de esta forma es posible adaptar las tasas para que sean decodificadas adecuadamente en los diferentes usuarios involucrados. La estrategia SIC cooperativa se establece inicialmente para un receptor que suprime una única señal de interferencia, para luego ser ampliada a eliminación de interferencias múltiples [23].

Para este trabajo de grado, y durante la totalidad de la sección 4.1, se tomará como punto de partida el trabajo descrito en [24]. En este, se demostraron y describieron las condiciones necesarias para usar SIC cooperativa de segundo orden (dos transmisores, dos receptores). Como resultado final, se hallaron las restricciones de un sistema que utiliza SIC cooperativa de segundo orden y se propuso una primera versión del simulador que cumple con estas características.

4.1. SIC Cooperativa de segundo orden

En primera instancia, se considera una red celular compuesta por celdas hexagonales, en donde cada celda posee una antena transmisora T_x . En cada instante de tiempo, cada celda atiende un receptor R_x ubicado dentro de su área designada, y todas las celdas utilizan los mismos recursos en tiempo-frecuencia.

4.1.1. Canal de Interferencia

Para representar un par receptor-transmisor, el radio de alcance de la antena es simulado como una celda hexagonal, donde cada celda tiene un único transmisor. El IC entre dos celdas puede ser descompuesto en dos canales de acceso múltiple (MAC), este se refiere a la situación donde varias fuentes se comunican con el mismo receptor sobre el mismo canal. Dado que hay varios enlaces individuales, la capacidad del MAC no es una tasa única, sino un conjunto de tasas para cada uno de estos; a este conjunto de tasas se les llama Región de Capacidad. Al representar los canales MAC de dos celdas donde cada transmisor atiende a un

único usuario, se evidencia que estos son dependientes: la fuente de señal deseada en Rx_1 es la fuente de interferencia en Rx_2 y viceversa. Un esquema de la región de capacidad de estos dos MAC es representado en la figura 4.1.

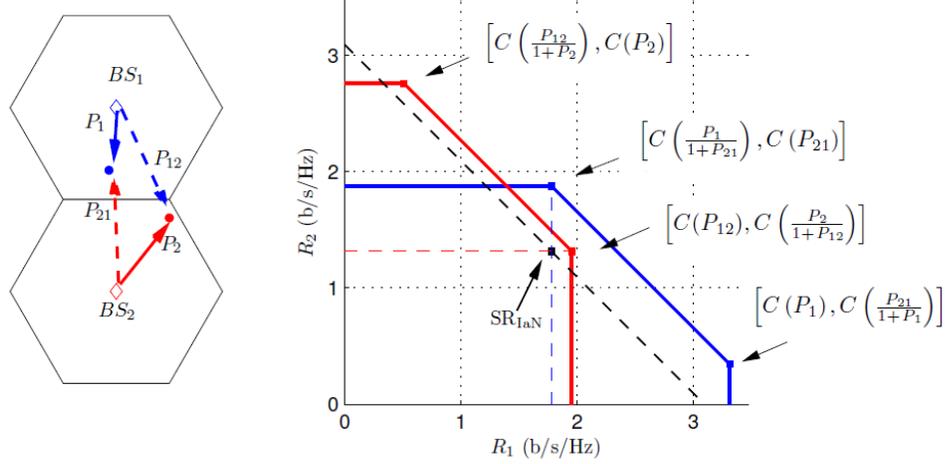


Figura 4.1: Canales MAC de un IC con 2 Rx y 2 Tx . Tomado de [23].

Cada canal de acceso múltiple está constituido por la intersección entre tres regiones:

$$\begin{aligned} R_1 &\leq C(P_1) \\ R_2 &\leq C(P_{21}) \\ R_1 + R_2 &\leq C(P_1 + P_{21}) \end{aligned}$$

El área contenida entre estas tres ecuaciones es conocida como la región de capacidad de un receptor con interferencia. Esta indica el par de tasas máximas admitidas por un receptor, para que ambas sean decodificables.

A partir de esta definición, y observando la figura 4.1, se puede notar que es posible alcanzar la tasa sin interferencia para Rx_1 si la tasa de transmisión de Tx_2 es igual o menor a $C(\frac{P_{21}}{1+P_1})$ (esta tasa se puede interpretar como la capacidad de Rx_1 para decodificar la señal recibida desde Tx_2 , con la señal recibida desde Tx_1 como interferencia); de esta forma el receptor avanzado de Rx_1 es capaz de eliminar la interferencia proveniente de Tx_2 . También existen los valores recíprocos para Rx_2 .

Para un canal de interferencia entre dos celdas, como el mostrado en esta sección, los puntos que permiten las tasas mayores para Rx_1 y Rx_2 se conocen como las esquinas externas del sistema. A su vez, los puntos en donde las tasas máximas sobre los receptores son equivalentes a su capacidad IaN , son conocidos como esquinas internas. Cada esquina corresponde a una pareja de tasas en donde el receptor correspondiente realiza SIC. Debido a que la utilidad de realizar SIC es aumentar la capacidad de transmisión sobre un receptor, las esquinas internas no deben ser consideradas para un sistema SIC Cooperativa.

4.1.2. Condición de Ganancia SIC

Esta sección fue tomada del trabajo [24]. Se plantea el concepto de *Sum Rate* (SR), como la suma de todas las tasas de los transmisores dentro de un conjunto de celdas. Es decir:

$$SR = R_1 + R_2 + \dots + R_N$$

Se plantea una condición inicial para que el SR de una red utilizando SIC Cooperativa (SR_{SIC}) sea mayor al SR tratando a la interferencia como ruido (SR_{IaN}).

En primer lugar, se halla el SR_{IaN} a partir de la relación señal a ruido-e-interferencia (SINR). Cada tasa es concebida utilizando las fórmulas de Shannon-Hartley de la forma:

$$SR_{IaN} = C\left(\frac{P_1}{1 + P_{21}}\right) + C\left(\frac{P_2}{1 + P_{12}}\right)$$

En donde

$$C(x) = \log_2(1 + x) \quad (4.1)$$

Y P_{ab} equivale a la potencia recibida por b a partir del transmisor a , P_x es la potencia recibida por x a partir del transmisor designado en su celda y cada tasa ($C(x)$) está dada en unidades de $b/s/Hz$ (bits por segundo por hercio).

Seguido a esto, se plantean las tasas de una relación de dos celdas realizando SIC Cooperativa a partir de las capacidades de su canal de interferencia, en donde R_{x_1} decodifica la señal de T_{x_2} para obtener su tasa máxima, de la forma:

$$R_1 = C(P_1), \quad R_2 = \min\left\{C\left(\frac{P_{21}}{1 + P_1}\right), C(\text{SINR}_2)\right\} \quad (4.2)$$

En donde R_1 equivale a la tasa que usaría el receptor 1 eliminando la interferencia proveniente del transmisor 2, y R_2 es la tasa mínima necesaria para que ambos receptores sean capaces de decodificarla, asegurando que el receptor 1 tenga la máxima capacidad posible en su canal (utilizando SIC). Finalmente, el SR_{SIC} es equivalente a

$$\begin{aligned} SR_{SIC} &= R_1 + R_2 \\ SR_{SIC} &= C(P_1) + \min\left\{C\left(\frac{P_{21}}{1 + P_1}\right), C(\text{SINR}_2)\right\} \end{aligned}$$

Por lo tanto, asumiendo que $C\left(\frac{P_{21}}{1 + P_1}\right) < C(\text{SINR}_2)$, la condición necesaria para que utilizar SIC cooperativa de segundo orden entre dos celdas sea provechosa puede ser expresada como:

$$\begin{aligned} SR_{SIC} &> SR_{IaN} \\ C(P_1) + C\left(\frac{P_{21}}{1 + P_1}\right) &> C\left(\frac{P_1}{1 + P_{21}}\right) + C\left(\frac{P_2}{1 + P_{12}}\right) \end{aligned}$$

A partir de 4.1, y resolviendo la desigualdad, se puede probar que la condición necesaria en una red de 2 T_x y 2 R_x (de ahora en adelante, *SIC Gain Condition*) es:

$$P_{21} > \frac{P_2}{1 + P_{12}}$$

A partir de esto, se puede concluir que:

- Para un sistema que permita SIC cooperativo de segundo orden (N=2), se tiene la relación maestro-esclavo entre dos celdas:
 - Celda Maestra: Un par transmisor-receptor que impone una tasa de transmisión a otra celda, el receptor haría uso de SIC.
 - Celda Esclava: Un par transmisor-receptor cuya tasa es impuesta por una celda maestra.
- En una relación maestro-esclavo

- La transmisión del maestro se da en su tasa máxima.
 - El receptor dentro de la celda maestro realiza SIC. Elimina la interferencia proveniente del transmisor esclavo y obtiene mejor calidad de la señal. Para esto, debe poder decodificar la señal proveniente de la celda esclavo.
 - La transmisión del esclavo se da en la tasa mínima necesaria para que los receptores de ambas celdas puedan decodificarla.
- Se utilizará SIC cooperativa si el SR total del sistema utilizando esta técnica es mayor a su SR IaN.

Estas definiciones se pueden extender a redes con más de dos celdas, si se cumple con las siguientes restricciones:

1. Una celda maestro no puede ser esclavo simultáneamente.
2. Una celda maestro tiene únicamente un esclavo.
3. Una celda esclavo podría tener varios maestros si su SR aumenta. La tasa impuesta a ella será la mínima necesaria para que todos los receptores involucrados en la relación puedan decodificarla.

En la figura 4.2 se muestra un ejemplo de un sistema de 21 celdas utilizando SIC Cooperativa de segundo orden, con dos usuarios por celda. Se puede apreciar que se cumplen las tres condiciones establecidas.

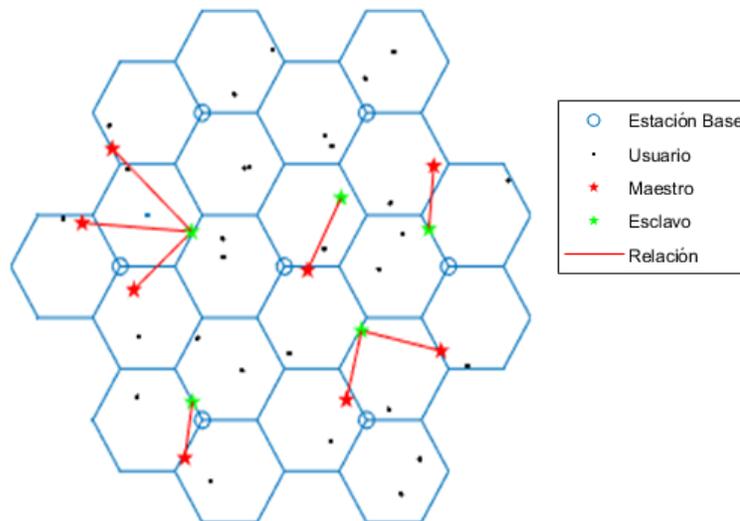


Figura 4.2: Sistema utilizando SIC Cooperativa de segundo orden.

Sin embargo, a lo largo de la sección 4.2, se plantearán las condiciones para extender la capacidad de un receptor para eliminar la interferencia de N celdas de forma cooperativa, eliminando la segunda restricción; y en la sección 5.2, se mostrará a partir de la tercera restricción, que la capacidad de una red de obtener ganancias utilizando SIC Cooperativa puede ser aumentada si se tiene en cuenta la capacidad de varias celdas de eliminar la interferencia proveniente de un mismo transmisor.

4.1.3. Algoritmo para SIC Cooperativa de segundo orden

Con punto de partida en las definiciones presentadas en la sección 4.1, [24] plantea una primera versión del algoritmo de programación (*scheduler*) que controla la cooperación de red dentro de un sistema de 21 celdas con un máximo nivel de cooperación de un esclavo por cada maestro (segundo orden). Este escoge cuáles celdas dentro de la red realizan SIC Cooperativa, después de revisar todas las posibles combinaciones de relaciones maestro-esclavo que cumplan con la *SIC Gain Condition* y las restricciones establecidas en 4.1.2.

El flujo principal del algoritmo se describe en el Algoritmo 1.

Algoritmo 1: Algoritmo de programación de una red habilitada para SIC Cooperativa de segundo orden

Datos: Posiciones de usuarios (receptores) dentro de las celdas en un instante de tiempo

Resultado: Conjunto de tasas y usuarios del sistema utilizando SIC Cooperativa en un instante de tiempo

para cada usuario hacer

| Hallar la potencia recibida por cada transmisor, según el modelo 3GPP.

fin

para cada celda (C) hacer

| **para cada vecino de C hacer**

| | Hallar la pareja de usuarios para la cual la *SIC Gain Condition* sea más alta

| **fin**

fin

Revisar todos los conflictos entre combinaciones de relaciones maestro-esclavo y hallar subconjuntos sin conflictos.

Hallar combinaciones de subconjuntos que no posean conflictos entre sí. (S)

para cada S hacer

| Hallar las tasas asignadas a cada transmisor según su papel dentro del sistema (S). Una celda puede actuar como maestra, esclava u operar con su tasa IaN.

fin

Hallar el conjunto de tasas que posean el mayor Sum Rate.

4.2. SIC Cooperativa de Orden Superior

La *SIC Gain Condition* puede ser extendida a un canal de interferencia con N pares $T_x - R_x$ en donde se garantice que el uso de un receptor SIC conduce a una ganancia en el SR total del sistema.

En el caso donde un usuario (R_{x_u}) recibe N señales y usa su capacidad SIC, R_{x_u} puede suprimir $N-1$ señales de interferencia sucesivamente con el fin de decodificar su señal deseada a la tasa libre de interferencia. En contraste, el resto de usuarios deberán adaptar sus tasas para que puedan ser decodificadas por el usuario que realiza SIC y decodificadas por sí mismos.

4.2.1. Canal de Interferencia

En la figura 4.3 se muestra el esquema de un canal de interferencia entre tres celdas. En esta red, ahora existen tres canales de acceso múltiple de tamaño 3, junto a seis MACs de tamaño 2. Esta definición se puede extender a un IC entre N celdas, el cual consistiría de N MACs de tamaño N , sumado a $\binom{N}{m}$ MACs de tamaño

m , para todos los m entre $2 \leq m \leq N - 1$. Además, se debe notar que el número de esquinas en una MAC de tamaño K , crece de la forma $K!$.

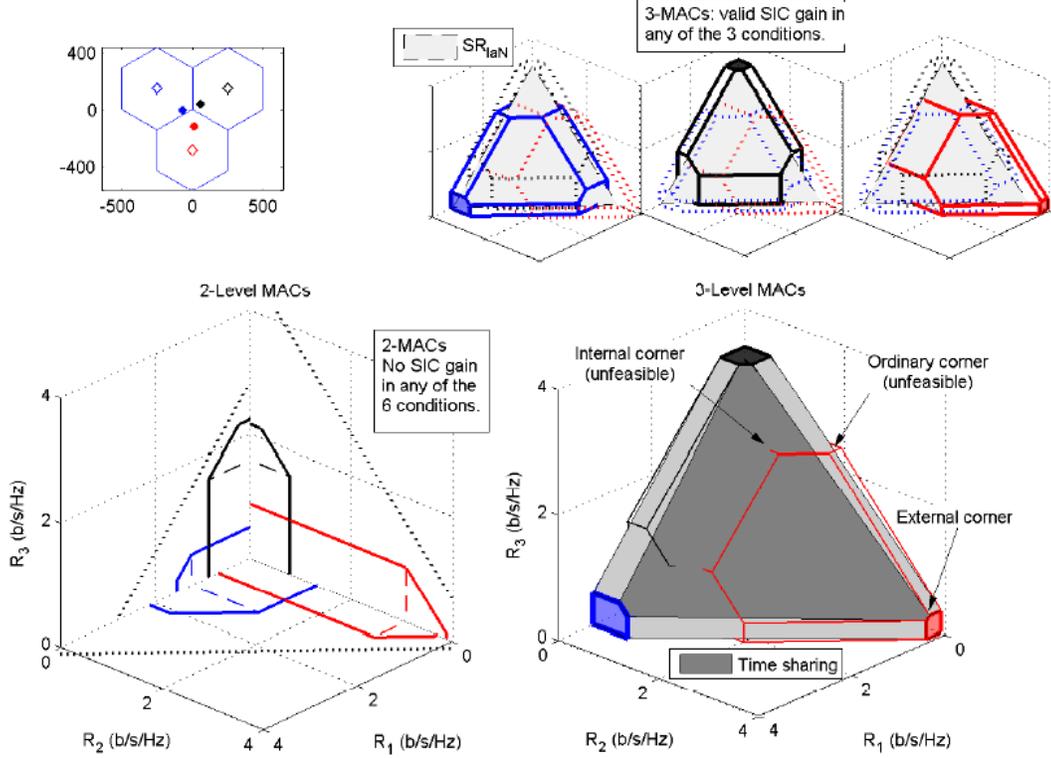


Figura 4.3: Canales MAC de un IC con 3 R_x y 3 T_x . Tomado de [23].

Como se puede apreciar, la complejidad del sistema aumenta drásticamente con la inserción de una pareja transmisor-receptor. Esto es principalmente debido que cada esquina en un MAC representa una posibilidad de realizar SIC en la red, y como se demostró, el número de esquinas encontradas en un IC crece de sobremanera en la medida que el tamaño de este aumenta.

4.2.2. Condición General de Ganancia SIC

A partir de la figura 4.3, y tomando como base la ecuación 4.2, se plantean las tasas de una relación de N celdas realizando SIC Cooperativa a partir de las capacidades de su canal de interferencia, de la forma:

$$R_u = C(P_u), \quad R_{k \neq u} = \min \left\{ C \left(\frac{P_{ku}}{1 + \sum_{j=1}^{k-1} P_{ju}} \right), C(\text{SINR}_k) \right\} \quad (4.3)$$

Siendo u la celda maestra y k sus múltiples esclavas.

Dado que R_{x_u} recibe N señales, hay N tasas que forman una esquina de la región de capacidad MAC en R_{x_u} y que pueden ser suprimidas usando SIC. Estas tasas son:

$$\left[C P_u, C \left(\frac{P_{1u}}{1 + P_u} \right), \dots, C \left(\frac{P_{Nu}}{1 + \sum_{j \neq N}^N P_{ju}} \right) \right]$$

En el peor caso de ganancia SIC, donde el SR_{SIC} sea muy cercano al SR_{IaN} , todos los receptores $k \neq u$ obtienen las tasas IaN: $R_{k \neq u} = C(\text{SINR}_K)$. De esta manera, la *SIC Gain Condition* se cumple mientras:

$$SR_{SIC} > SR_{IaN}$$

$$C(P_u) + C(\text{SINR}_1) + \dots + C(\text{SINR}_N) > \sum_{i=1}^N C(\text{SINR}_i)$$

Cancelando a ambos lados de la ecuación, se obtiene que siempre debe cumplirse:

$$C(P_u) > C(\text{SINR}_u)$$

Sin embargo, la mayor diferencia en la desigualdad se obtendrá si todas las tasas son iguales a la tasa máxima de decodificación según el canal MAC formado por las N señales que llegan a R_{x_u} .

$$\text{A partir de la ecuación 4.3, sabemos que } R_{k \neq u} = C\left(\frac{P_{ku}}{1 + \sum_{j=1}^{k-1} P_{ju}}\right).$$

En ese caso, la *SIC Gain Condition* puede ser expandida de la siguiente forma:

$$C(P_u) + C\left(\frac{P_{1u}}{1 + P_u}\right) + \dots + C\left(\frac{P_{Nu}}{1 + \sum_{j \neq N}^N P_{ju}}\right) > \sum_{i=1}^N C(\text{SINR}_i)$$

Simplificando la desigualdad a partir de 4.1:

$$(1 + P_u) \left(\frac{1 + P_u + P_{1u}}{1 + P_u}\right) \dots \left(\frac{1 + \sum_{j=1}^N P_{ju}}{1 + \sum_{j \neq N}^N P_{ju}}\right) > \prod_{i=1}^N (1 + \text{SINR}_i)$$

Cancelando términos y reformulando la ecuación, se obtiene:

$$1 + \sum_{j=1}^N P_{ju} > \left(1 + \frac{P_u}{1 + \sum_{j \neq u}^N P_{ju}}\right) \prod_{i \neq u}^N (1 + \text{SINR}_i)$$

$$1 + \sum_{j=1}^N P_{ju} > \left(\frac{1 + \sum_{j=1}^N P_{ju}}{1 + \sum_{j \neq u}^N P_{ju}}\right) \prod_{i \neq u}^N (1 + \text{SINR}_i)$$

Así, en una red de $N T_x$ y $N R_x$, la condición necesaria para que el receptor R_{x_u} realice SIC e incremente el SR es:

$$1 + \sum_{j \neq u}^N P_{ju} > \prod_{i \neq u}^N (1 + \text{SINR}_i)$$

Esta condición (de ahora en adelante, *General Sic Gain Condition*) garantiza que el receptor u podrá suprimir $N-1$ señales de interferencia mediante el uso de SIC, obteniendo su mejor tasa posible, mientras que el resto de usuarios obtendrán su tasa IaN o una tasa menor, garantizando que sea decodificable por R_{x_u} y por ellos mismos.

4.2.3. SIC Simultánea

Todos los resultados presentados hasta ahora tienen lugar en una red donde solo un receptor utiliza su capacidad SIC para cada asignación (es decir, hay máximo un maestro por canal de interferencia). Existe un caso en donde dentro de una misma asignación, puedan coexistir varias celdas que realicen SIC.

Si la tasa escogida para realizar SIC en una celda determinada no es decodificable por su usuario respectivo, esta debe reducirse para garantizar el funcionamiento correcto de la red. Esto sucede, por ejemplo, para un esclavo u en una relación de segundo orden con una celda maestro m , para el cual $C(\text{SINR}_u) < C\left(\frac{P_{um}}{1+P_m}\right)$. En este caso, la celda debe transmitir a una potencia menor a la deseada, disminuyendo el SR . A esta operación se le llama degradación de esquina o *corner degradation*.

Existe un caso en donde la degradación de esquina puede ser evitada, el cual solo es posible para relaciones de orden superior a dos dentro de una red celular. (fuera del contexto de las redes celulares, existen estudios para lograrlo con relaciones de nivel 2, ver [24])

Tómese como ejemplo el caso de una asignación de tercer nivel, operando en una esquina degradada para R_{x_2} . A partir de la ecuación 4.3 y la definición de una esquina degradada, se hallan las tasas de la forma:

$$\begin{aligned} R_1 &= C(P_1) \\ R_2 &= \min\left\{C\left(\frac{P_{21}}{1+P_1}\right), C(\text{SINR}_2)\right\} = C(\text{SINR}_2) \\ R_3 &= \min\left\{C\left(\frac{P_{31}}{1+P_1+P_{21}}\right), C(\text{SINR}_3)\right\} = C\left(\frac{P_{31}}{1+P_1+P_{21}}\right) \end{aligned}$$

Sin embargo, R_{x_2} puede ser capaz de evitar la degradación de su tasa si realiza SIC. El requerimiento para esto es que todas las tasas decodificadas antes que R_2 (en este caso únicamente R_3), sean decodificables en R_{x_2} . Para el caso de este ejemplo:

$$\begin{aligned} R_3 &< C\left(\frac{P_{32}}{1+P_{12}+P_2}\right) \\ C\left(\frac{P_{31}}{1+P_1+P_{21}}\right) &< C\left(\frac{P_{32}}{1+P_{12}+P_2}\right) \end{aligned}$$

Esta técnica puede ser extendida fácilmente a relaciones de orden N , en donde la condición general sería de la forma:

Para todos los $n > m$:

$$R_n < C\left(\frac{P_{nm}}{1+\sum_{j=1}^{N-1} P_{jm}}\right)$$

En donde m es la celda a la cual se le degrada su tasa y $n > m$ se refiere a todas las celdas las cuales están antes que m en el orden de decodificación.

En la figura 4.4 se muestra un ejemplo de una red de tres celdas utilizando la técnica de SIC Simultánea. En este caso, se obtiene una relación de tercer orden (1 maestro - 2 esclavos) de la cual se deriva una subrelación de segundo orden, donde uno de los esclavos evitó la degradación eliminando la interferencia del otro.

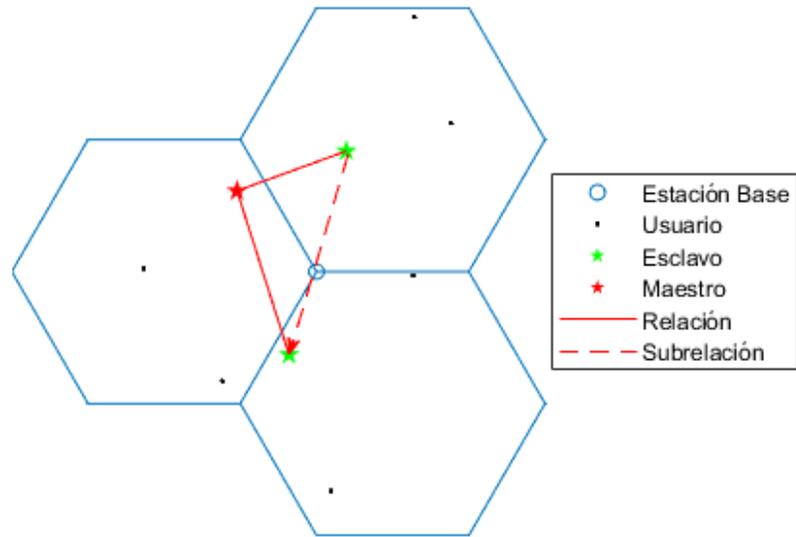


Figura 4.4: Red de tres celdas utilizando la técnica de SIC Simultánea

Utilizando esta técnica, es posible evitar la degradación de esquinas y se adquiere el máximo SR disponible para una asignación específica.

Capítulo 5

Desarrollo

5.1. Problema de optimización

Como se explicó en la sección 4.2, en un canal de interferencia de N pares $T_x - R_x$, hay $N - 1$ señales que pueden ser decodificadas y suprimidas con SIC. Además, se mostró que el IC formado por N pares $T_x - R_x$, no solo contiene N MACs de orden N , sino también $\binom{N}{m}$ MACs de orden m , con $2 \leq m \leq N-1$.

Al aumentar el tamaño del canal de interferencia, se reduce el área donde la *SIC Gain Condition* es válida, pero debido a que el receptor es capaz de decodificar más señales, existe la posibilidad de aumentar las ganancias del SR_{SIC} con respecto al SR_{IaN} . Sin embargo, como se mostró en la sección 4.2, aumentar el tamaño del IC también aumenta la complejidad para encontrar el mejor SR entre todas las posibilidades de SIC Cooperativas que existen en el canal; ya que una red con N pares $T_x - R_x$ debe verificar si alguno de los SR correspondiente a todas las esquinas factibles por cada nivel de MAC es mayor que el SR_{IaN} . Se encuentra que el número total de posibles esquinas que deben verificarse es:

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

En donde la suma representa todos los niveles de SIC existentes en un IC de orden N , para los cuales cada uno está compuesto de $\binom{N}{m}$ MACs de orden m , $m!$ esquinas totales y $(m-1)!$ esquinas internas, que pueden ser restadas del total de esquinas debido a que nunca van a permitir la tasa deseada en el receptor, como fue explicado en la sección 4.1.1.

Por lo anterior, y sabiendo que una red consiste de múltiples canales de interferencia, es necesario plantear un problema de optimización que permita maximizar el SR dentro de una red con N pares $T_x - R_x$ y para diferentes ordenes de MAC.

En primera instancia, se plantea la siguiente función objetivo:

$$f(X_i^A, X_k) = \sum_{i=1}^N \sum_A R_i^A X_i^A + \sum_k R_k X_k$$

En donde,

- i representa el índice de un esclavo.
- A es un subconjunto de maestros del esclavo i .
- R_i^A es la tasa SIC del esclavo i impuesta por los maestros del subconjunto A descrita en 4.3.

- X_i^A es una variable binaria que indica si se usa la tasa SIC para ese esclavo y sus maestros.
- k representa el índice de un usuario que no es esclavo ni maestro.
- R_k es la tasa IaN del usuario k .
- X_k es una variable binaria que indica si k usa la tasa IaN .

A partir de lo planteado en la sección 4.1, se proponen las siguientes restricciones al problema de optimización:

1. Si $j \in A$ y $A \not\subset B$

$$X_i^A \cdot X_j^B = 0$$

Un maestro no puede ser esclavo

2. Si $i \notin A$, $i \notin B$ y $A \not\subset B$

$$X_i^A \cdot X_i^B = 0$$

Un esclavo posee un único conjunto de maestros

3. Si $m \in \bigcap_{i=1}^N A_i$

$$\prod_{i=1}^N X_{k_i}^{A_i} = 0$$

Un maestro posee máximo N-1 esclavos

El objetivo de este trabajo de grado será diseñar un algoritmo inicial que, teniendo en cuenta lo descrito en esta sección y a lo largo del capítulo actual, permita descubrir el desempeño del sistema propuesto, y compararlo con la versión descrita en [24].

5.2. SIC Cooperativa Extendida

Dentro de la condición de SIC Cooperativa Extendida se plantea el concepto de Maestros Simultáneos: esta técnica se define como la capacidad de varias celdas maestro de suprimir la interferencia de una única celda esclavo. A partir del análisis de los resultados obtenidos en [24], se encuentra que el sistema adquiere sus mayores tasas. Sin embargo, gracias a comparaciones realizadas a lo largo de la ejecución de este trabajo de grado, también se encuentra que la *SIC Gain Condition* no abarca muchos de los casos en los que pueden existir maestros simultáneos.

Lo anterior es debido a que, en la mayoría de casos para los que existe la posibilidad de utilizar Maestros Simultáneos, la relación entre un maestro y la celda esclavo no cumple con la *SIC Gain Condition* (el SR_{SIC} de la relación maestro-esclavo es menor al SR_{IaN}). Sin embargo, cuando uno o más maestros adicionales también imponen una tasa a esta celda esclavo, como se muestra en la figura 5.1, el SR conjunto entre todas las celdas involucradas sí cumple la condición.

A partir de esto, se propone extender la *SIC Gain Condition* implementada en el simulador. No solo para permitir asignaciones de orden superior, sino también para incluir todas las posibilidades en las que exista la técnica de Maestros Simultáneos.

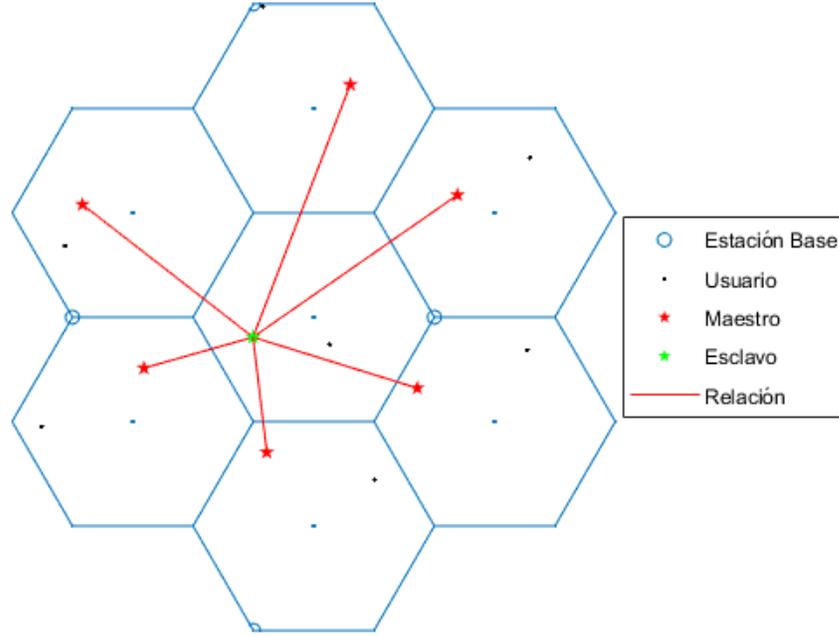


Figura 5.1: Red de siete celdas utilizando la técnica de Maestros Simultáneos

Partiendo de los resultados obtenidos en la sección 4, en un IC con 3 R_x y 3 T_x , en donde la celda 1 es maestro de la celda 2, se cumple la *SIC Gain Condition* si:

$$C(P_1) + \min\left\{C\left(\frac{P_{31}}{1 + P_1}\right), C(\text{SINR}_3)\right\} > C(\text{SINR}_1) + C(\text{SINR}_3) \quad (5.1)$$

Y si la celda 2 es maestro de la celda 3, se cumple la *SIC Gain Condition* si:

$$C(P_2) + \min\left\{C\left(\frac{P_{32}}{1 + P_2}\right), C(\text{SINR}_3)\right\} > C(\text{SINR}_2) + C(\text{SINR}_3) \quad (5.2)$$

En caso de que no se cumplan las condiciones 5.1 y 5.2, las celdas involucradas realizarían IaN.

En este punto se introduce el concepto de Maestros Simultáneos y se agrega una nueva condición al sistema en la que la celda 1 y la celda 2 pueden ser maestros de la celda 3 al mismo tiempo. Para esto es necesario:

$$C\left(\frac{P_1}{1 + P_{21}}\right) + C\left(\frac{P_2}{1 + P_{12}}\right) + \min\left\{C\left(\frac{P_{31}}{1 + P_1 + P_{21}}\right), C\left(\frac{P_{32}}{1 + P_2 + P_{12}}\right), C(\text{SINR}_3)\right\} > C(\text{SINR}_1) + C(\text{SINR}_2) + C(\text{SINR}_3)$$

De esta forma las tres celdas usarían SIC.

Las tasas de los maestros y el esclavo son definidas en la ecuación 5.3.

$$R_{u \neq k} = C\left(\frac{P_u}{1 + \sum_{j \neq k \neq u}^M P_{ju}}\right), \quad R_k = \min\left\{C\left(\frac{P_{ku}}{1 + \sum_{j \neq k}^M P_{ju}}\right), C(\text{SINR}_k)\right\} \quad (5.3)$$

Siendo u la celda maestra y k sus múltiples esclavas.

De forma general, la condición de ganancia extendida es:

$$\sum_{u=1}^M R_{u \neq k} + R_k > \sum_{i=1}^{M+1} C(\text{SINR}_i) \quad (5.4)$$

Esta condición garantiza que, aunque el SR_{SIC} sea menor al SR_{IaN} de las dos relaciones por separado, al existir una nueva relación de varios maestros hacia un mismo esclavo, puede llegar a aumentar el SR_{SIC} de la relación completa y la probabilidad de realizar SIC en el sistema aumenta considerablemente al incluir la técnica Maestros Simultáneos.

De ahora en adelante, en este texto, se utilizarán los términos $SIC GC$ y $SIC GC+$ para referirse a $SIC Gain Condition$ y a la $SIC Gain Condition$ extendida, respectivamente.

5.3. Algoritmo Propuesto para SIC Cooperativa de orden superior

Con base en los resultados mostrados en el capítulo 4, junto a las técnicas discutidas en la sección 5.2 y lo planteado en 5.1, se implementó una nueva versión del scheduler, con el fin de simular una red celular de 9 celdas, habilitada para realizar SIC Cooperativa de nivel N y que tuviera en cuenta las técnicas de *Simultaneous Masters* y *Simultaneous SIC*. El algoritmo se encarga principalmente de revisar todas las posibles combinaciones de relaciones maestro-esclavo de usuarios dentro de la red y determinar para qué celdas es mejor realizar SIC o IaN según la $SIC GC+$ y las restricciones establecidas.

A continuación se presenta una breve descripción del algoritmo básico implementado, que a su vez enuncia ciertas funciones descritas posteriormente.

Algoritmo 2: *Algoritmo de programación de una red habilitada para SIC Cooperativa de orden N*

Datos: Posiciones de usuarios (receptores) dentro de las celdas en un instante de tiempo

Resultado: Tasas escogidas para el sistema y ubicación de la combinación de usuarios con mayor SR

Declaración de variables

Asignación de variables

Dibujo de celdas

para cada iteración hacer

Asignar posiciones a los usuarios

Calcular potencias de cada usuario

para cada celda hacer

Hallar posibles combinaciones de esclavos de todos los niveles

para cada combinación de esclavos hacer

Organizar arreglo junto al maestro

Hallar las tasas de la relación (Algoritmo 3)

fin

fin

Verificar ESGC: *Extended SIC Gain Condition* (Algoritmo 4)

Hallar todas las posibles combinaciones de las relaciones que cumplen la S

para cada combinación posible que cumple ESGC hacer

Revisar las restricciones

Corregir conflictos de *Simultaneous Masters*

Hallar las tasas de la combinación

fin

Hallar el máximo SR

Mostrar las relaciones seleccionadas

fin

El esquema del algoritmo que encuentra las tasas de una asignación está dado a continuación.

Algoritmo 3: *Tasas para una asignación de orden N*

Datos: Conjunto de un maestro y uno o varios esclavos.

Resultado: Tasas y usuarios pertenecientes al mejor orden de decodificación para todas las celdas de la relación

si la relación es $1aN$ entonces

Calcular las tasas de todos los usuarios

Escoger el usuario con la mejor tasa

fin

si la relación es *Cooperative SIC* entonces

Hallar todos los posibles ordenes de decodificación de la relación

para cada orden de decodificación hacer

Hallar todas las posibles combinaciones de usuarios entre las celdas

Escoger la combinación de usuarios con la mejor tasa

fin

Escoger el orden de decodificación con las mejores tasas

fin

Se implementó una versión inicial del algoritmo que revisa la Condición Extendida de Ganancia SIC. Este revisa todos los casos en los que haya posibilidad de realizar Maestros Simultáneos, y compara el SR de cada uno de estos casos, con su SR_{IaN} equivalente. Una descripción de este algoritmo se muestra a continuación.

Algoritmo 4: *Verificar Condición de Ganancia SIC Extendida*

Datos: Todas las relaciones posibles de un solo maestro y sus tasas

Resultado: Todas las relaciones posibles para las que se cumple al menos una condición de *Simultaneous Masters* o *Cooperative SIC*

```
para cada celda C hacer
| Hallar todas las combinaciones (de todos los niveles) de posibles maestros de C
| para cada vecino de C (posible maestro) hacer
| | Encontrar las relaciones en donde C es su esclava
| fin
| para cada combinación de maestros hacer
| | Descartar relaciones en las que el maestro es esclavo de otra celda de la combinación
| | Combinar las relaciones válidas
| | para cada combinación de relaciones válidas hacer
| | | Hallar las tasas de las celdas de la combinación utilizando Cooperative SIC
| | | si  $SR_{SIC} > SR_{IaN}$  entonces
| | | | Guardar las celdas de la relación y sus tasas
| | | fin
| | fin
| fin
fin
```

El algoritmo fue implementado en la herramienta de software matemático MATLAB ® teniendo en cuenta las condiciones derivadas del diseño conceptual.

Capítulo 6

Protocolo de Pruebas

En este capítulo se describirán las medidas de desempeño analizadas durante el trabajo de grado, cómo fueron obtenidas y con qué objetivo, así como el análisis de las características de funcionamiento del sistema propuesto.

6.1. Parámetros del simulador

6.1.1. Parámetros generales

Para comprobar el funcionamiento del simulador, y verificar el desempeño de las técnicas planteadas a lo largo de este proyecto de grado, se parametrizó el algoritmo con las siguientes características:

- Estaciones base: Compuestas de tres transmisores dispuestos para atender un sector. La distancia entre estaciones base es de 0.5 km.
- Número de celdas: 9 repartidas en tres sectores.
- 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.
- 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.
- 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.
- Orden de cooperación (N): Indica el número de celdas involucradas en una asignación. Debido a que aumentar este parámetro incrementa considerablemente el tiempo de proceso y el uso de recursos computacionales, se limitó a 3 para pruebas de desempeño y a 5 para pruebas específicas.

6.1.2. Geometría del sistema

En la figura 6.1 se muestra un esquema con la geometría del sistema implementada y descrita en la sección 6.1.1.

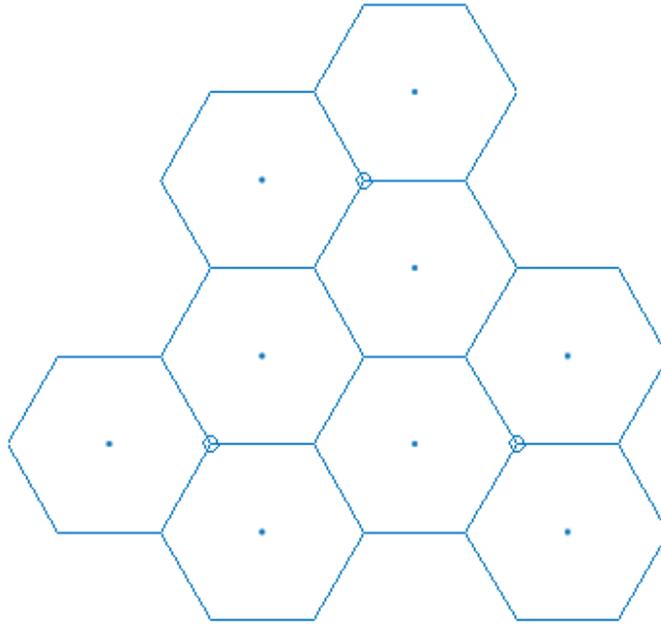


Figura 6.1: Geometría del sistema.

6.2. Medidas de desempeño

Las siguientes son las variables que indicarán el desempeño del sistema.

6.2.1. Regiones de asignaciones

Debido a la complejidad del algoritmo, y las dificultades que resultarían de una implementación, hallar las regiones en las que los usuarios tienen mayor probabilidad de realizar SIC puede llegar a ser de vital importancia.

En este trabajo de grado, se planteó mostrar las ubicaciones de los usuarios que actúan como maestros o esclavos, después de revisar un elevado número de iteraciones. A partir de esto será posible realizar una deducción aproximada de las regiones de importancia dentro de la red.

6.2.2. Probabilidad de usar SIC

La probabilidad de usar SIC muestra el porcentaje de las celdas que usa SIC Cooperativa respecto a la cantidad total de celdas, lo anterior es presentado en función de la potencia que recibiría un usuario al borde de una celda y del número de usuarios por celda. Este resultado da un indicio de los casos en los que resulta más conveniente la utilización de un receptor SIC en redes celulares.

Para cada iteración, esta medida se halla de la forma:

$$SIC\% = \frac{\#CeldasSIC}{\#CeldasTotales}$$

6.2.3. Ganancia SIC

La ganancia SIC después del algoritmo *scheduler* compara las tasas SIC y las tasas *IaN* de las celdas que están involucradas en alguna asignación. Es decir, si la celda es escogida para utilizar su tasa *IaN* al final del *scheduler*, no será tenida en cuenta. Esta medida se da en función del número de usuarios por celda.

Para cada iteración, esta medida se halla de la forma:

$$SIC\ Gain = 100 * \left(\frac{SR_{SIC}}{SR_{IaN}} - 1 \right)$$

6.2.4. Ganancia Total del Sistema

La ganancia total compara el *SR* del sistema después del *scheduler* (incluidas las tasas *SIC* y las tasas *IaN*) con el *SR* del sistema utilizando *IaN*. Esta medida se da en función del número de usuarios por celda.

Para cada iteración, esta medida se halla de la forma:

$$System\ Gain = 100 * \left(\frac{SR_{System..}}{SR_{IaN}} - 1 \right)$$

6.2.5. Porcentaje de asignaciones de cada orden

Esta medida se refiere a la cantidad de asignaciones dentro de una iteración que son de un orden de cooperación específico, de la forma:

$$N\% = \frac{\#Asignaciones\ de\ orden\ N}{Total\ de\ asignaciones}$$

6.3. Comparaciones

6.3.1. SIC Cooperativa de segundo orden y de orden superior

Se realizarán comparaciones de desempeño entre el sistema utilizando SIC Cooperativa $N=2$ y $N>2$ en términos de la ganancia SIC, la ganancia del sistema y la probabilidad de SIC. Además se mostrarán ejemplos para iteraciones específicas operando en estos dos casos generales.

6.3.2. Sistema utilizando SIC GC y SIC GC+

A partir de las condiciones halladas en las secciones 4.1.2 y 5.2, se realiza una comparación de los resultados obtenidos a partir de los dos algoritmos propuestos. Lo anterior con el fin de definir cuál de los dos planteamientos presenta mayor probabilidad de usar SIC, ganancia SIC y ganancia total del sistema.

Capítulo 7

Análisis de Resultados

7.1. Modelo del sistema

Como introducción al capítulo de resultados, en la figura 7.1 se presenta el ejemplo de una iteración promedio del simulador.

En este caso, el algoritmo *scheduler* decidió, a partir del análisis de todas las posibles asignaciones existentes y la SIC GC+, que la configuración que maximizaba el *SR* es una única relación de tercer orden. Cada iteración realizada en el sistema presenta estadísticas de ganancia SIC, ganancia del sistema, probabilidad de SIC y número de asignaciones por cada orden de cooperación. Al realizar pruebas de desempeño, se realizan al menos 300 iteraciones por cada punto de interés, con el fin de promediar estas estadísticas y disminuir la probabilidad de error en los resultados.

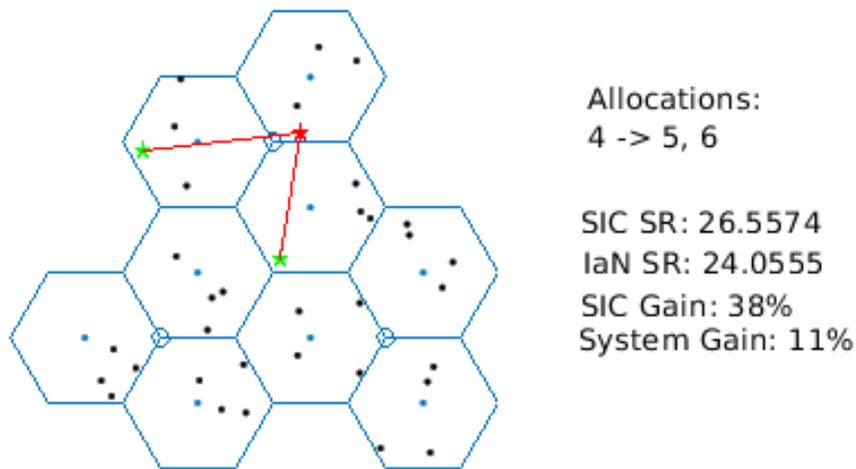


Figura 7.1: Red de nueve celdas utilizando SIC Cooperativa con máxima cooperación entre 2 celdas

A lo largo de este capítulo, se presentan los resultados obtenidos acerca de las medidas de desempeño mostradas en el capítulo 6, así como justificaciones y/o conclusiones sobre cada uno de ellos.

7.2. Regiones en las celdas

En la figura 7.2, se presenta el mapa de las asignaciones de la red a lo largo de 1500 iteraciones.

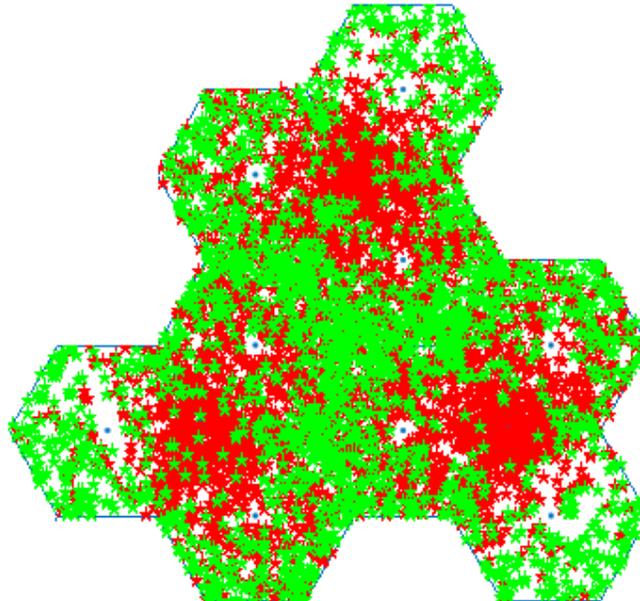


Figura 7.2: Regiones dentro de la red.

Evidentemente, la concentración de los usuarios maestros (en rojo) está dada hacia las cercanías de las estaciones base. Las posiciones de estas se pueden observar con más claridad en la figura 6.1. A su vez, las posiciones de los esclavos están dadas hacia los bordes de los sectores. Estos puntos son las regiones en la red para los cuales la potencia recibida de su transmisor designado es mínima.

A partir de estos resultados, es posible aproximar un área para la cual buscar posibles maestros/esclavos sea más factible. Así, es posible eliminar la búsqueda de asignaciones para los usuarios que no se encuentren en estas áreas, reduciendo el tiempo y complejidad de la computación.

7.3. Probabilidad de usar SIC

La probabilidad de SIC del sistema en función del número de usuarios y de la potencia al borde de celda se muestra en la figura 7.3.

Como se puede apreciar, la probabilidad de usar SIC dentro del sistema aumenta considerablemente a medida que aumenta el número de usuarios por celda, de igual manera esta probabilidad es proporcional a la potencia al borde de celda, especialmente en el caso de un usuario. Lo anterior debido a que al aumentar el número de usuarios por celda, la probabilidad de que exista un usuario de la celda esclava ubicado en borde de celda y un usuario de la celda maestro muy cercano a la estación base (donde se obtiene mayor ganancia SIC) aumenta.

Además, cabe anotar que la variación del porcentaje de la probabilidad de SIC disminuye a medida que aumenta la potencia al borde de celda; es decir, la variación de este porcentaje es bastante alta para

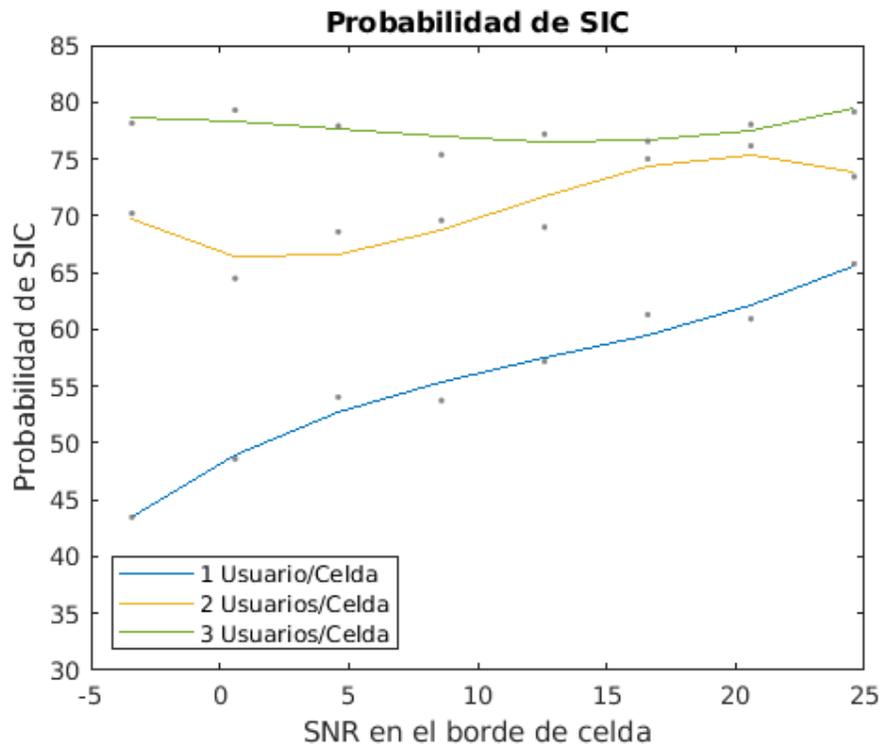


Figura 7.3: Probabilidad de SIC del sistema

1 usuario por celda (aproximadamente 20%), mientras que la variación del porcentaje para 3 usuarios por celda es baja (aproximadamente del 1%). Esto probablemente se debe a que al tener probabilidades de SIC tan altas como las encontradas en el caso de múltiples usuarios por celda, SIC Cooperativo sigue buscando las asignaciones con mejor SR a medida que aumenta la potencia de transmisión, pero lo hace utilizando técnicas como Maestros Simultáneos o implementando relaciones de mayor nivel sobre las ya encontradas.

7.4. Ganancia SIC y Ganancia Total del Sistema

En la figura 7.4 se muestra la ganancia SIC del sistema y la ganancia total en función del número de usuarios por celda para 8 dB de SNR al borde de celda.

A partir de este resultado, se observa que tanto la ganancia SIC como la ganancia total del sistema aumentan con el número de usuarios por celda. Sin embargo, mientras que el rango de variación de la ganancia SIC del sistema se encuentra entre 51% y 59%, el rango de variación de la ganancia total del sistema se encuentra entre 8% y 14% aproximadamente.

Esto se comporta de acuerdo a lo esperado. A medida que aumenta el número de usuarios en cada celda, es más probable que la ubicación de estos se encuentre dentro de regiones de mayor ganancia, por lo que permitirá mejores asignaciones. Además, la ganancia total del sistema es más baja debido a que las asignaciones que ocurren con más frecuencia son de segundo orden (de 2 celdas), donde se obtiene mucha ganancia respecto a las tasas de estas dos celdas usando IaN ; sin embargo, debido a que estas dos celdas representan un porcentaje bajo del total de celdas del sistema, la ganancia total de este no se ve afectada de manera contundente.

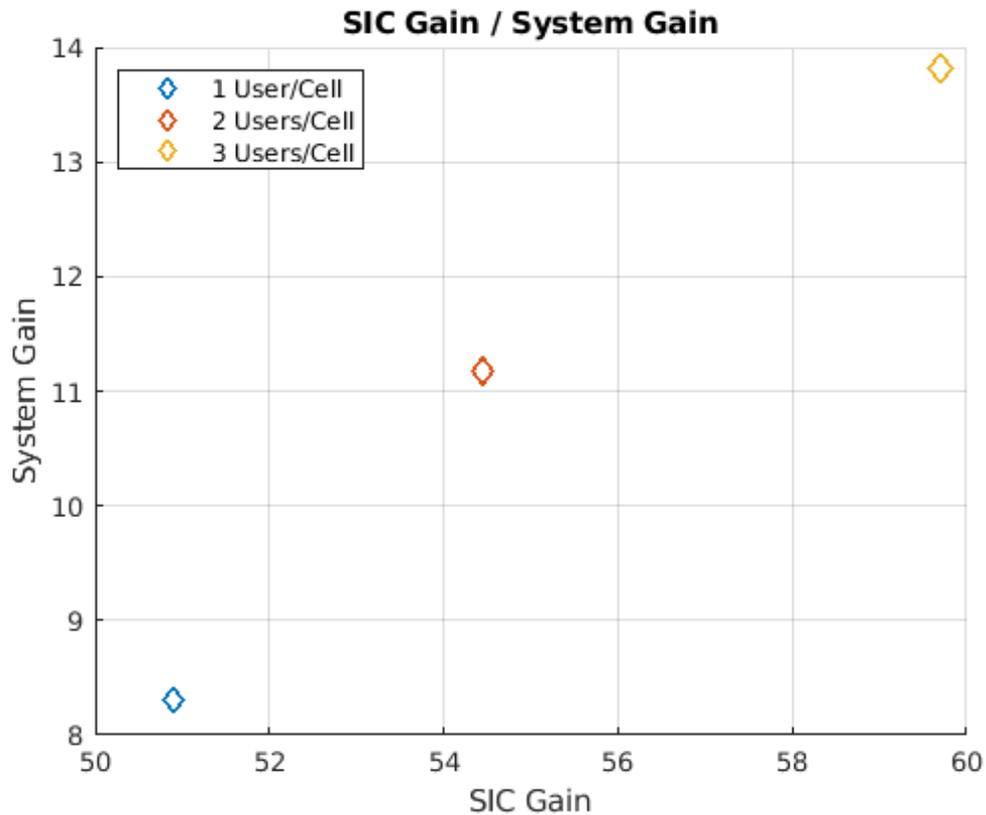


Figura 7.4: Ganancia SIC y Ganancia Total del sistema

7.5. Porcentaje de asignaciones de cada orden

A continuación, se muestran los porcentajes de asignaciones IaN , de segundo orden y de tercer orden en función del número de usuarios por celda y de la potencia al borde de celda. Debido a que la interferencia entre celdas incrementa proporcionalmente a la potencia de transmisión de las estaciones base, se espera que el número de asignaciones de orden superior también aumente.

Respecto a esta medida de desempeño es importante recordar que en una asignación de orden superior hay más celdas involucradas. Por esto, el número de asignaciones de orden superior que pueden aparecer simultáneamente en la red, es menor en comparación con el número de asignaciones de orden inferior.

7.5.1. Órdenes de asignación según el número de usuarios por celda

En la figura 7.5 se aprecia la gráfica que representa el porcentaje de asignaciones de hasta tercer orden, según el número de usuarios por celda.

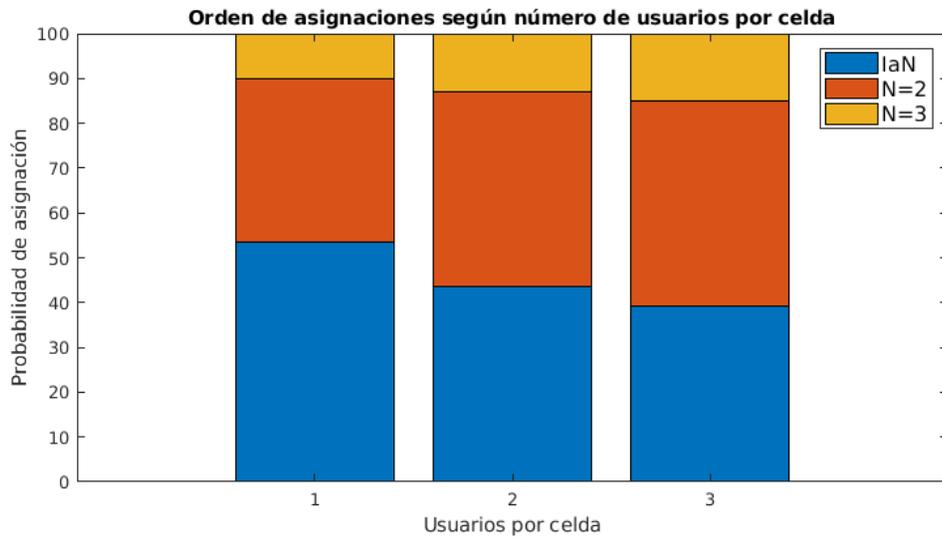


Figura 7.5: Porcentaje de órdenes de cooperación según la potencia transmitida

Como se puede apreciar, en la medida en la que aumenta el número de usuarios por celda, crece el número de asignaciones SIC en la red. Se aprecian aumentos considerables en el número de relaciones tanto de orden dos como de orden tres. Esto, sumado a lo evidenciado en 7.5.2, puede indicar que la aparición de asignaciones de orden superior está más relacionado a la ubicación de los usuarios dentro de las regiones de importancia que a la potencia de transmisión.

7.5.2. Órdenes de asignación según la potencia de transmisión

En la figura 7.6 se muestra la variación de los porcentajes de asignaciones *1aN*, de segundo orden y de tercer orden para diferentes valores de potencia al borde de celda.

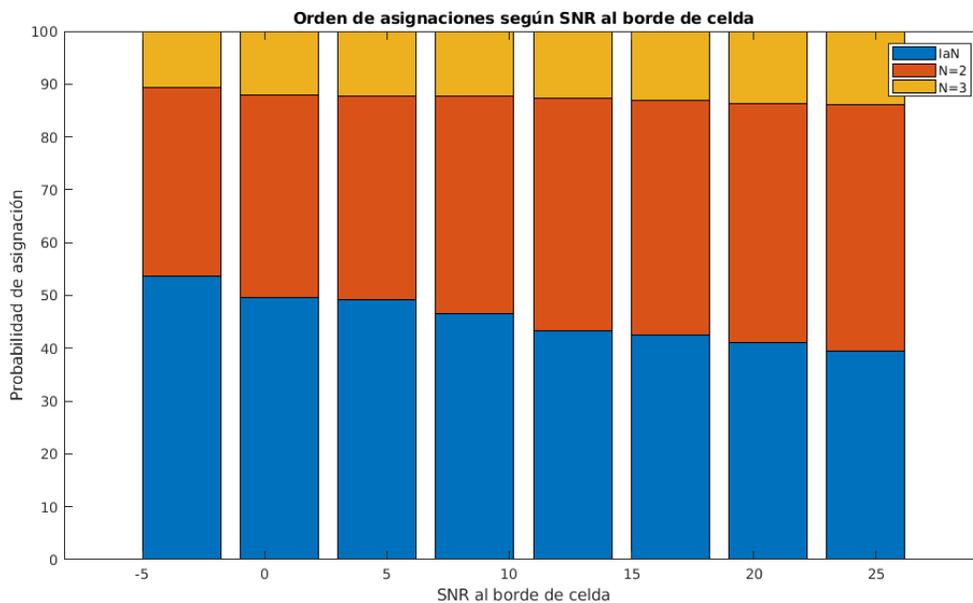


Figura 7.6: Porcentaje de órdenes de cooperación según la potencia transmitida

Evidentemente, a medida que aumenta la potencia al borde de celda, las asignaciones $1aN$ decrecen mientras que las asignaciones de segundo y tercer orden aumentan. La asignación que más aumenta es la de segundo orden con un incremento de aproximadamente 15 %, por lo que se puede inferir que la mayoría de asignaciones se da en el caso de Maestros Simultáneos. Este incremento en las asignaciones de segundo orden se da debido a que los usuarios de la celda maestro se encuentran ubicados más cerca a la estación base, esto hace que al aumentar la potencia emitida por la estación base, sus tasas también aumenten considerablemente y más celdas puedan cumplir con la SIC GC+.

7.6. Comparación entre SIC Cooperativa de segundo orden y de orden superior

En la figura 7.7 se muestra la comparación de la probabilidad de SIC del sistema de segundo orden y de tercer orden en función del SNR recibido al borde de celda y del número de usuarios por celda.

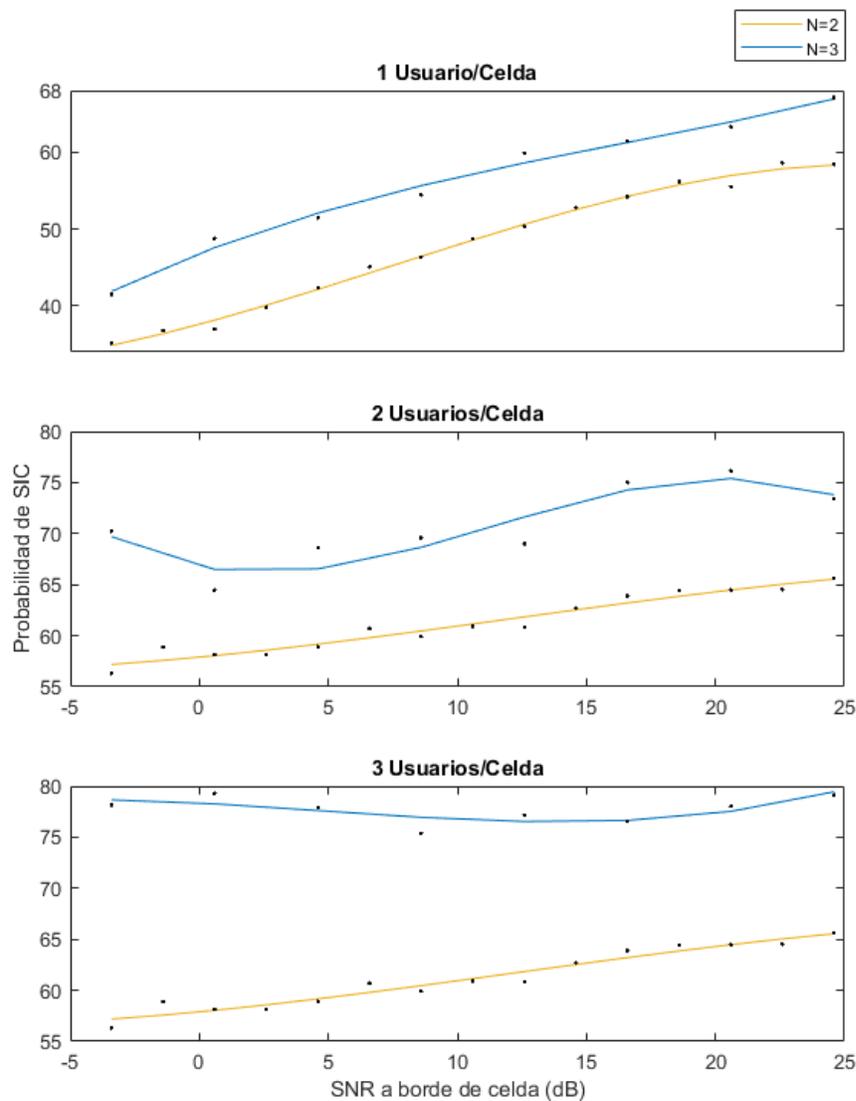


Figura 7.7: Comparación entre cooperación de segundo y tercer orden

Es evidente que, para todos los casos, la probabilidad de realizar SIC crece de manera sustancial si se aumenta el orden máximo de cooperación entre celdas. Para el caso de un usuario por celda, esta diferencia es de aproximadamente de un 10 %; para dos usuarios por celda, es del 15 %; para tres usuarios por celda, el aumento es de más del 20 %.

Esto concuerda con los resultados esperados. Por un lado, las relaciones de orden superior poseen inherentemente un mayor número de celdas involucradas, lo que eleva la probabilidad de SIC; sin embargo, la razón más importante de esto es debido al aumento en la posibilidad de que se cumpla alguna condición de ganancia SIC, al añadir una nueva. Además, sabiendo que en promedio más del 10 % de todas las asignaciones en una red habilitada para relaciones de tercer orden hace uso de esta técnica y que, por definición, genera ganancias superiores, es válido afirmar que hacer uso de relaciones $N > 2$ presenta una gran ventaja sobre el uso de relaciones de segundo orden en redes habilitadas para SIC Cooperativa.

7.7. Comparación de una red utilizando SIC GC o SIC GC+

En la figura 7.8 se muestra la comparación de la probabilidad de SIC del sistema en función del SNR recibido al borde de celda y del número de usuarios por celda haciendo uso de la *SIC Gain Condition* y de la *SIC Gain Condition* Extendida.

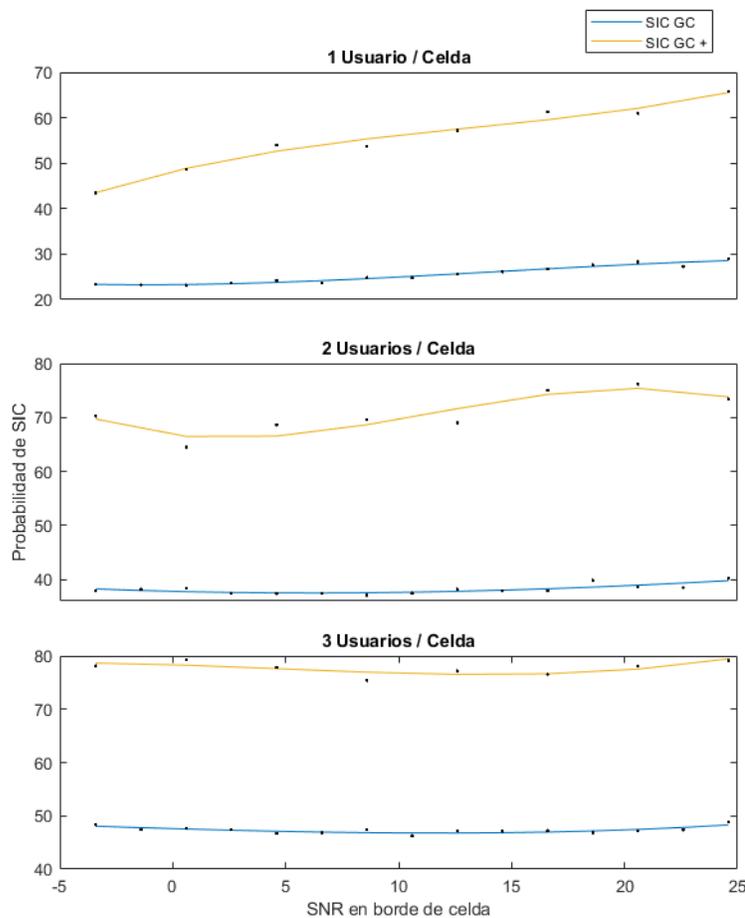


Figura 7.8: Comparación entre Condición SIC Gain y Condición SIC Gain Extendida

Es evidente que evaluando únicamente la SIC GC , las probabilidades de realizar SIC oscilan aproximadamente entre 23 % y 49 % según el número de usuarios y no se evidencian cambios significativos de este porcentaje a medida que aumenta la potencia. Mientras que evaluando la SIC GC+, las probabilidades de usar SIC en el sistema oscilan entre 44 % y 80 % según el número de usuarios y aumentan a medida que incrementa la potencia en borde de celda. Por medio de lo anterior, se deduce que al evaluar la SIC GC+ que incluye la técnica de Maestros Simultáneos se encuentran más relaciones SIC que representan ganancias para el sistema y que el SR de esta relación puede aumentar a medida que aumenta la potencia emitida por la estación base.

7.8. Comparación entre diferentes técnicas

En esta sección, se compararán las medidas de desempeño de una iteración específica, a la que se le habilitó el uso de diferentes técnicas, y se explicarán ciertos aspectos importantes acerca de las comparaciones y diferencias entre ellas.

– N=2 / SIC GC

En primer lugar, se analiza la implementación básica de SIC Cooperativo. Esta implementación es equivalente a la encontrada en [24]. Una red con estas características se muestra en la figura 7.9.

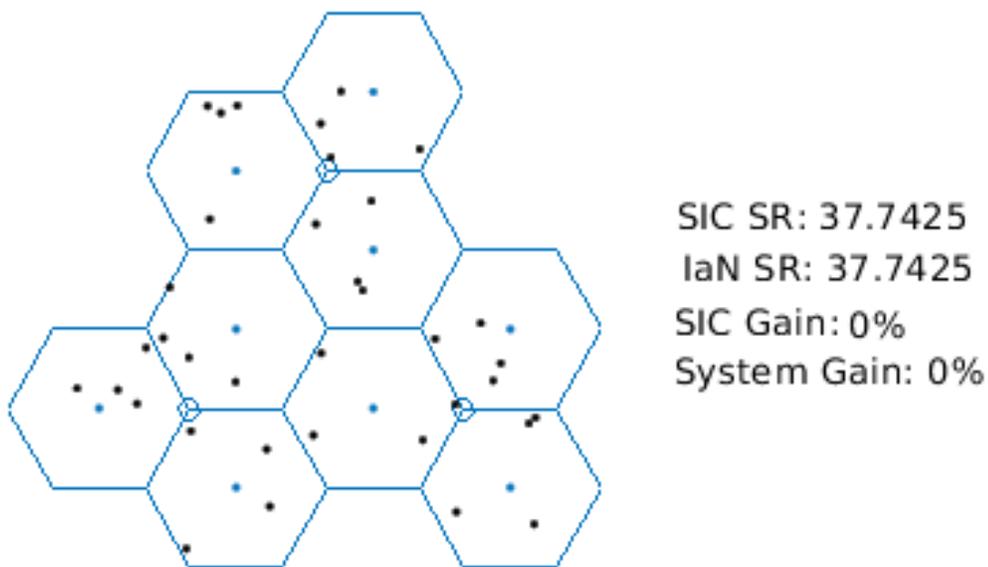


Figura 7.9: Red de nueve celdas utilizando SIC Cooperativa con máxima cooperación entre 2 celdas

Como se puede apreciar, si se utiliza SIC Cooperativo básico para este conjunto específico de usuarios, no existe ninguna asignación que le provea ganancia al sistema. Aunque en muchos casos, esta implementación posee resultados interesantes y genera ganancias al sistema, en esta sección se mostrará un ejemplo en el que utilizar una de las técnicas descritas en el desarrollo del presente trabajo de grado provee tasas mucho mayores.

– **N=2 / SIC GC+**

Como siguiente paso en la comparación, se activa la habilidad de la red para implementar la verificación de la condición extendida de ganancia SIC. Para esta iteración en específico, se da el caso extremo, en donde todos los vecinos de una misma celda la toman como esclava.

En este punto vale la pena aclarar que las tasas IaN que se asignan para la comparación entre el SR_{SIC} y el SR_{IaN} , son las tasas IaN de los usuarios que hacen parte de una relación maestro-esclavo, en caso de que hagan parte de una. En el caso de la figura 7.10, se puede notar que tanto la ganancia SIC, como la ganancia del sistema son relativamente bajas debido a este fenómeno, muchos de los usuarios escogidos para realizar SIC en la iteración están ubicados cerca al transmisor, por lo que tendrán tasas IaN altas, disminuyendo la ganancia.

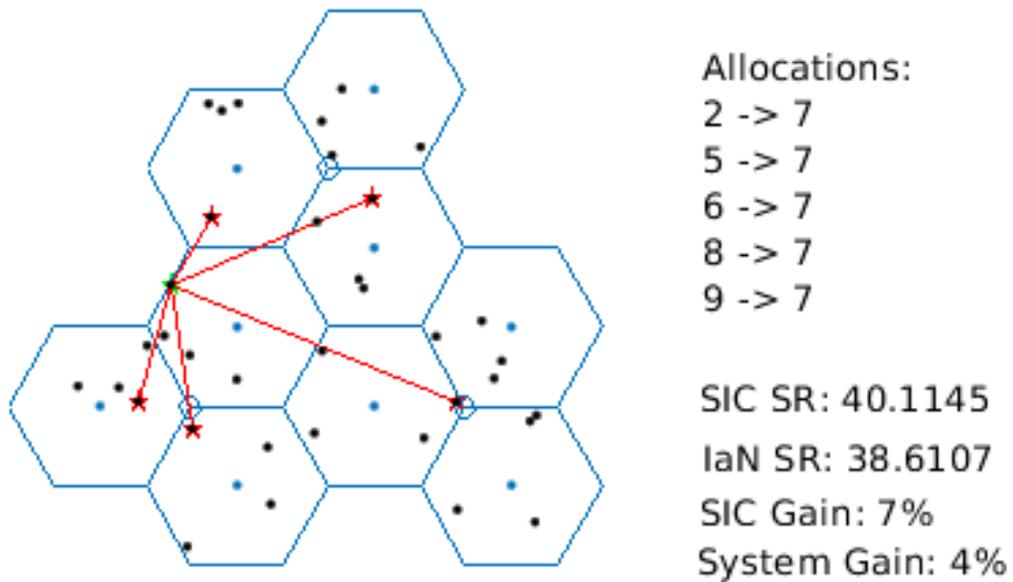


Figura 7.10: Red de nueve celdas utilizando SIC Cooperativa con máxima cooperación entre 2 celdas y SIC GC+

– $N > 2$ / SIC GC

Para el siguiente paso, se aumentó el orden máximo de cooperación a 5. Es el primero de los casos vistos en este ejemplo que posee ganancias significativas. En la figura 7.11 se puede apreciar que todas las celdas de la red pertenecen a alguna asignación, y que todas las relaciones son de orden superior a 2. Debido a que ahora existen más esclavos en el sistema, el SR_{IaN} es menor al visto en los dos casos anteriores. A su vez, gracias a la combinación entre la técnica de maestros simultáneos y relaciones de orden superior, el SR_{SIC} es mucho mayor al visto en las pruebas anteriores.

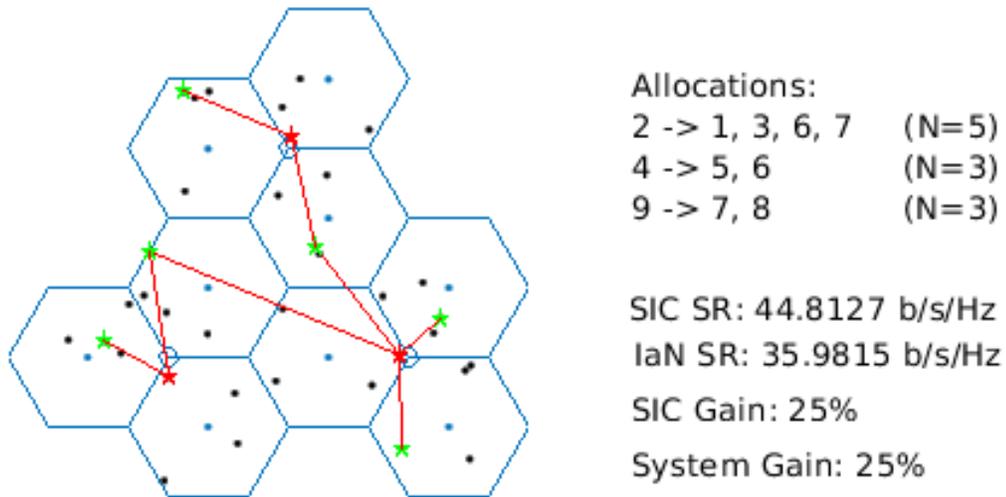


Figura 7.11: Red de nueve celdas utilizando SIC Cooperativa con máxima cooperación entre 5 celdas

– **N>2 / SIC GC+**

En este caso se utilizan todas las técnicas presentadas en el presente trabajo de grado. El sistema hace uso de la condición de ganancia extendida, permitiendo nuevas relaciones de maestros simultáneos que permiten aumentar el SR_{total} . Además de utilizar, como fue visto también en el caso anterior, relaciones de orden alto. Se presenta de nuevo el fenómeno de crecimiento en el SR_{IaN} , razón por la cual la ganancia del sistema es menor al caso anterior, aunque el SR_{SIC} sea mayor. El esquema para esta iteración se muestra en la figura 7.12.

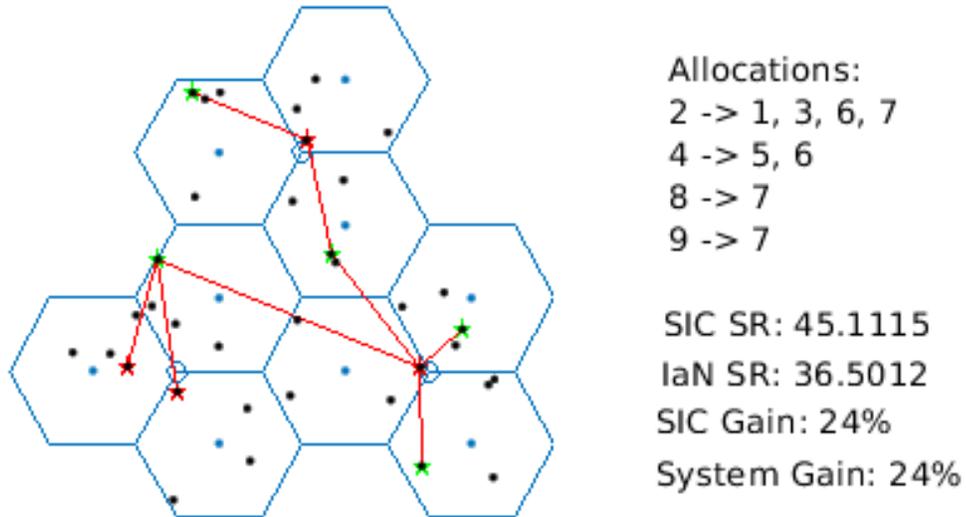


Figura 7.12: Red de nueve celdas utilizando SIC Cooperativa con máxima cooperación entre 5 celdas y SIC GC+

Capítulo 8

Conclusiones

8.1. Conclusiones

El esquema de Cancelación Sucesiva de Interferencias (SIC) Cooperativa descrito en este trabajo de grado se presenta como una prometedora técnica para mejorar la eficiencia espectral en redes celulares con altos niveles de interferencia. Inicialmente, este esquema se presentó para redes con dos transmisores y dos receptores, para el cual se halló una condición de ganancia que compara la suma de las tasas entregadas para el caso de utilizar SIC, respecto a la suma de las tasas en el caso de tratar la interferencia como ruido. Luego, este esquema fue extendido a redes de múltiples transmisores y múltiples receptores y se propuso una nueva condición de ganancia.

Posteriormente, se permite el uso de maestros simultáneos como una técnica que puede incrementar la eficiencia espectral, con lo cual se extiende la condición de ganancia nuevamente. A partir de estos fundamentos, se planteó un algoritmo que evalúa restricciones para realizar una búsqueda exhaustiva de todas las posibles combinaciones de relaciones que pueden existir dentro de una red y revisa la condición de ganancia SIC hallada anteriormente.

Luego de implementar el algoritmo, se puede concluir que por medio de este esquema pueden ser logradas ganancias relevantes, en especial para órdenes mayores a dos. También se pudo comprobar que los usuarios de la celda maestro dentro de la relación SIC se encuentran constantemente ubicados cerca a las estaciones base, mientras que los usuarios de la celda esclava se encuentran con mayor frecuencia en los bordes de celda. Además, la técnica de Maestros Simultáneos incluida dentro de la SIC GC+ representa un aumento en la probabilidad de realizar SIC en el sistema en función del número de usuarios por celda y de la potencia emitida por la estación base.

8.2. Trabajo a futuro

Debido a que la cantidad de relaciones por evaluar es muy alta y esto aumenta la capacidad de memoria y cómputo requerida para el equipo en el que se ejecute el algoritmo, el problema de optimización descrito en la sección 5.1 es de gran importancia y es necesario realizar implementaciones basadas en este para conseguir realizar simulaciones de una red celular más realista (más celdas y más usuarios por celda).

La técnica de SIC Simultánea descrita en la sección 4.4 puede llegar a generar ganancias importantes dentro del esquema propuesto en este trabajo de grado. Sin embargo, debido a que el uso de esta técnica representa evaluar más relaciones SIC, es conveniente incluir esta técnica en un algoritmo de programación futuro en el que se encuentre solucionado el problema de optimización y pueda desarrollarse en un equipo con una capacidad de memoria y cómputo regular.

Bibliografía

- [1] Newzoo International B.V., “Top 50 Countries/Markets by Smartphone Users and Penetration,” pp. <https://newzoo.com/insights/rankings/top-50-countr>, 2018. [Online]. Available: <https://newzoo.com/insights/rankings/top-50-countries-by-smartphone-penetration-and-users/>
- [2] European Broadcasting Union, “Radio Spectrum – the EBU Q & A,” pp. 1–7, 2014. [Online]. Available: <https://www.ebu.ch/files/live/sites/ebu/files/Publications/Factsheets/Q%26A-201409%7B%7D%7BRadio%7B%7DSpectrum.pdf>
- [3] D. Jaramillo-Ramirez, “Interference mitigation techniques for 4G networks,” THESE DE DOCTORAT, SUPELEC, 2015.
- [4] G. Miao, J. Zander, K. Won Sung, and S. Ben, “Fundamentals of Mobile Data Networks,” *Cambridge University Press*, 2016. [Online]. Available: www.cambridge.org
- [5] T. S. Rappaport, “Wireless communications: principles and practice,” *New Jersey: prentice hall PTR*, vol. 2, 1996.
- [6] IEEE, “IEEE Standars Glossary,” 2010. [Online]. Available: <https://www.ieee.org/education%7B%7Dcareers/education/standards/standards%7B%7Dglossary.html>
- [7] Hubert Zimmermann, “OSI Reference Model-The ISO Model of Architecture for Open Systems Interconnection,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 28, no. 4, pp. 425–432, 1980.
- [8] M. Dikshtein, R. Duan, Y. Liang, and S. Shamai (Shitz), “MIMO Gaussian State-Dependent Channels with a State-Cognitive Helper,” *Entropy*, vol. 21, no. 3, p. 273, 2019.
- [9] 3GPP, “About 3GPP Home,” 2018. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpphttp://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpp>
- [10] J. Islam, M. Nazmul, and H. Chowdhury, “Study of inter-cell interference and its impact on the quality of video conference traffic in LTE Network,” 2013.
- [11] B. Clerckx, H. Lee, Y. J. Hong, and G. Kim, “Rank recommendation-based coordinated scheduling for interference mitigation in cellular networks,” *GLOBECOM - IEEE Global Telecommunications Conference*, pp. 1–6, 2011.
- [12] Hayssam Dahrouj and Wei Yu, “Coordinated Beamforming for the multicell multi-antenna wireless systems,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 5, pp. 1748–1759, 2010.
- [13] G. Foschini, K. Karakayali, and R. Valenzuela, “Coordinating multiple antenna cellular networks to achieve enormous spectral efficiency,” *IEE Proceedings - Communications*, vol. 153, no. 4, p. 548, 2006.
- [14] J. Lee and W. Nam, “Advanced Interference Management for 5G Cellular Networks Advanced Interference Management for 5G Cellular Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. March, pp. 52–60, 2015.

- [15] T. M. Cover, "Broadcast Channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 18, no. 1, pp. 2–14, 1972.
- [16] S. Sen, N. Santhapuri, R. R. Choudhury, and S. Nelakuditi, "Successive Interference Cancellation: A Back-of-the-Envelope Perspective," pp. 1–6, 2010.
- [17] S. Verdu, *Multiuser Detection*, 1998.
- [18] J. Axns, Y. P. E. Wang, M. Kamuf, and N. Andgart, "Successive interference cancellation techniques for LTE downlink," *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, pp. 1793–1797, 2011.
- [19] N. I. Miridakis and D. D. Vergados, "A Survey on the Successive Interference Cancellation Performance for Single-Antenna and OFDM Systems," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 312–335, 2013.
- [20] J. Blomer and N. Jindal, "Transmission capacity of wireless ad hoc networks: Successive interference cancellation vs. joint detection," *IEEE International Conference on Communications*, pp. 1–5, 2009.
- [21] P. Sedtheetorn and T. Chulajata, "Accurate spectral efficiency analysis for non orthogonal multiple access," *International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT*, pp. 844–850, 2017.
- [22] E. Hardouin, M. Sayed Hassan, and A. Saadani, "Downlink interference cancellation in LTE: Potential and challenges," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*, 2013, pp. 3597–3602.
- [23] D. Jaramillo-Ramirez, M. Kountouris, and E. Hardouin, "Cooperative Successive Interference Cancellation in Wireless Networks," pp. 1–35, 2013.
- [24] D. JaramilloRamirez, M. Kountouris, and E. Hardouin, "Successive interference cancellation in downlink cooperative cellular networks," in *2014 IEEE International Conference on Communications, ICC 2014*, no. 1, 2014, pp. 5172–5177.

Anexos

Anexo 1: Código fuente

En el siguiente enlace se encuentra alojado el código fuente implementado para el desarrollo de este proyecto de grado:

https://www.dropbox.com/s/1du5oi2ftxn1f8y/src_TG1818.zip?dl=0

En caso de cualquier eventualidad con la descarga, contactar directamente a cualquiera de los autores del presente.