

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA



**Coordinación de potencia consciente de la Interferencia para
redes 5G Ultra-Densas (UDN)**

TESIS

que presenta para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS

Cosme Alexis Anzaldo Navarrete

**DIRECTOR DE TESIS
DR. ÁNGEL GABRIEL ANDRADE REÁTIGA**

MEXICALI, B. C.

AGOSTO DE 2019

TESIS DEFENDIDA POR

Cosme Alexis Anzaldo Navarrete

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Ángel Gabriel Andrade Reátiga

Director del Comité

Dr. David H. Covarrubias Rosales

Miembro del Comité

Dr. Guillermo Galaviz Yáñez

Miembro del Comité

M. C. Enrique René Bastidas Puga

Miembro del Comité

Dr. Guillermo Galaviz Yáñez

Coordinador de Posgrado e Investigación

Facultad de Ingeniería

Mexicali, Baja California, Agosto de 2019

RESUMEN de la Tesis de Cosme Alexis Anzaldo Navarrete, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS. Mexicali, Baja California, México. Agosto de 2019.

Coordinación de potencia consciente de la Interferencia para redes 5G Ultra-Densas (UDN).

Resumen aprobado por:

Dr. Ángel Gabriel Andrade Reátiga

Director de tesis

Se espera que los recientes sistemas 5G conecten a personas, cosas, datos, aplicaciones, sistemas de transporte y ciudades a través de una comunicación inteligente. El aumento del tráfico y la velocidad requeridos por la red 5G requerirán tecnologías espectralmente más eficientes. De entre las estrategias propuestas para mejorar el uso del espectro, atender el aumento anticipado en el tráfico, la cantidad de dispositivos, los servicios, así como la demanda de mejor accesibilidad y experiencia del usuario, se encuentra la densificación de la red. Sin embargo, esta densificación no está exenta de retos y áreas de oportunidad que deben identificarse y abordarse para garantizar un ecosistema móvil viable para el futuro. En este trabajo de tesis se aborda el problema de asignación de potencia para reducir los niveles de interferencia en las transmisiones del enlace descendente en una red móvil Ultra-Densa (UDN). La interferencia potencial generada por el despliegue masivo de estaciones base afecta las condiciones de canal de los usuarios, provocando una asignación de recursos ineficiente. El problema de asignación de recursos se sub-divide en dos etapas; en la asignación de ancho de banda se utilizó un algoritmo que considera la equidad proporcional entre los usuarios (PF), mientras que la asignación de la potencia se coordina mediante un Algoritmo Genético (GA). Las consideraciones del GA para coordinar la potencia se presentan y discuten con respecto a la asignación de potencias sin coordinación y bajo dos esquemas de asignación de recursos: esquema compartido y esquema particionado. El rendimiento de la red se evalúa tomando en cuenta la cantidad de usuarios con canales adecuados para transmitir y la capacidad de la red. Los resultados muestran una mejora en el rendimiento del sistema al aplicar el algoritmo propuesto, además el rendimiento de la red mejora al incrementar la cantidad de usuarios asociados a los nodos de baja potencia.

Palabras clave: Redes Heterogéneas Ultra-Densas, asignación de potencia, algoritmo genético, red móvil 5G.

ABSTRACT of the thesis, presented by Cosme Alexis Anzaldo Navarrete, in order to obtain the MASTER IN SCIENCES. Mexicali, Baja California, México. August, 2019.

Interference-aware power coordination algorithm for 5G Ultra-Dense Networks (UDN).

Approved by:

Dr. Ángel Gabriel Andrade Reátiga

Thesis Advisor

The recent 5G systems are expected to connect people, things, data, applications, transport systems, and cities through smart communication. The increased traffic and speed required for 5G network will require much more spectrally efficient technologies. Among the proposed strategies to improve the spectrum use, address the anticipated increased traffic, the number of devices, services, as well as meet higher levels of accessibility and user experience, is the densification of the network. However, this densification present challenges and opportunity areas that must be identified and addressed to ensure a viable mobile ecosystem for the future. In this thesis, the problem of power allocation is discussed to reduce the levels of interference in downlink transmissions for Ultra-Dense mobile network (UDN). The interference level generated due to the massive deployment of base stations affects the user's channel conditions, causing inefficient allocation of resources. The resource allocation problem is divided into two stages; in the allocation of bandwidth, an algorithm that considers proportional fair among users (PF) was used, while the allocation of power is coordinated applying a Genetic Algorithm (GA). The GA considerations to coordinate the power are presented and discussed concerning a non-coordinated power allocation, also considering a sharing and partitioning spectrum approach. The performance of the UDN is evaluated, considering the number of users and network capacity. The results show a system performance improvement when applying the proposed algorithm, also, the performance of the network improves when increasing the number of users associated with the low power nodes.

Keywords: Ultra-Dense Heterogeneous networks, power allocation, genetic algorithm, 5G mobile network.

AGRADECIMIENTOS

A mi novia Carolina por apoyarme siempre y estar a mi lado en todo momento.

Al Dr. Ángel G. Andrade Reátiga por su tiempo, enseñanzas y orientación brindadas durante mis estudios de maestría.

A los miembros de mi comité de tesis, Dr. David H. Covarrubias Rosales, Dr. Guillermo Galaviz Yáñez y M. C. Enrique René Bastidas Puga por sus recomendaciones y ayuda para mejorar mi trabajo de investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) por apoyarme económicamente durante mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), por darme la oportunidad de seguir con mis estudios.

ÍNDICE

	<u>Página</u>
1. Introducción.....	1
1.1 Contexto del Problema	1
1.2 Redes Heterogéneas Ultradensas (UDNs).....	3
1.2.1 Retos y problemas abiertos que enfrentan las UDN.....	4
1.3 Planteamiento del problema	5
1.4 Trabajo relacionado	5
1.5 Preguntas de investigación	8
1.6 Objetivo General	9
1.7 Objetivos específicos.....	9
1.8 Organización de la tesis.....	9
2 Fundamentos y operación de una Red-Ultradensa (UDN).....	11
2.1 Despliegue de estaciones base	12
2.2 Asociación de usuarios.....	13
2.3 Asignación de recursos.....	14
2.4 Métricas de desempeño	16
2.5 Conclusiones	17
3 Modelo del problema.....	18
3.1 Definición del modelo	18
3.2 Formulación del problema	21
3.3 Asignación de recursos.....	23
3.3.1 Asignación de canales	23
3.3.2 Asignación de potencia	24
3.4 Conclusiones	25
4 Algoritmo genético para la asignación de potencia.....	26
4.1 Descripción de la población inicial	26
4.2 Definición de la Aptitud (fitness)	28
4.3 Procedimiento de Selección.....	28
4.4 Procedimiento de Cruzamiento (Recombinación).....	30
4.5 Procedimiento de Mutación	30
4.6 Procedimiento de Reemplazo	31
4.7 Definición de parámetros y evaluación del algoritmo genético	32

4.7.1	Evaluación de la capacidad utilizando un GA.....	33
4.7.2	Parámetros de la población inicial	36
4.7.3	Selección del método de cruzamiento.....	38
4.7.4	Selección del tamaño de la población y criterio de detención	39
4.8	Conclusiones	41
5	Análisis de Resultados.....	43
5.1	Configuración del escenario de simulación	43
5.2	Estaciones base	45
5.2.1	Análisis de la evaluación de una red UDN con Densidad de Usuarios baja (DUE:100 UE/km ²)	45
5.2.2	Análisis de la evaluación de una red UDN con Densidad de Usuarios media (DUE:300 UE/km ²)	52
5.2.3	Análisis de la evaluación de una red UDN con Densidad de Usuarios alta (DUE:600 UE/km ²)	58
5.2.4	Análisis de la evaluación de una red UDN con Densidad de Estaciones Base alta (DBS:2500 BS/km ²)	64
5.3	Discusión de resultados	69
6	Conclusiones y trabajo futuro	72
6.1	Resumen del trabajo	72
6.2	Conclusiones	74
6.3	Limitantes.....	76
6.4	Contribuciones	76
6.5	Trabajo futuro	76
7	Referencias	78

Índice de figuras

	<u>Página</u>
2.1. Diagramas de Voronoi representando el despliegue de FBS:(a) Fijo, (b) Aleatorio.	13
2.2. Variación del nivel de potencia de la señal con respecto a la distancia.	15
3.1. Modelo del sistema. Red UDN formada por una macrocélula (BS en el centro) y varias Estaciones Base Femtocelular distribuidas aleatoriamente siguiendo un proceso puntual de Poisson (PPP).	19
3.2. Esquemas de operación del proceso de asignación de recursos.	20
3.3. Diagrama de selección de B_f en el esquema particionado.	20
4.1. Estructura de la población inicial.	27
4.2. Probabilidad de que un cromosoma sea seleccionado de la población: (a) Selección por Rueda de Ruleta. (b) Selección por Clasificación.	30
4.3. Ejemplo del proceso de cruzamiento por recombinación de un punto.	30
4.4. Ejemplo de mutación de un cromosoma.	31
4.5. Diagrama de flujo del reemplazo CD/RW.	32
4.6. Comparación de penalizaciones tras ciclos del GA: (a) Penalización de potencia. (b) Penalización de usuarios. Con y sin coordinación de potencia.	35
4.7. Evaluación comparativa de la capacidad de la red UDN cuando se aplica una estrategia de coordinación de potencia con respecto a utilizar PP (sin coordinación de la potencia).	35
4.8. Capacidad de la red en la zona de penalizaciones.	35
4.9. Evaluación del límite inferior de potencia para la población inicial: (a) Capacidad de la red. (b) Penalización de usuarios.	37
4.10. Evaluación del límite superior de potencia para la población inicial: (a) Capacidad de la red. (b) Penalización de usuarios.	37
4.11. Evaluación de la capacidad de la red utilizando diferentes métodos de cruzamiento.	39
4.12. Evaluación de la penalización de usuarios utilizando diferentes métodos de cruzamiento.	39
4.13. Evaluación de la capacidad de la red utilizando diferentes tamaños de población inicial.	40
4.14. Evaluación de las penalizaciones de la red utilizando diferentes tamaños de la población inicial: (a) Penalización de potencia. Penalización de usuarios.	41
5.1. Evaluación de la Capacidad de la UDN con respecto al incremento de BS, se consideró una densidad de usuarios $DUE=100$ y las siguientes condiciones: (a) $SINR_{th}:9.4$ dB, $R_f:10$ m., (b) $SINR_{th}:9.4$ dB, $R_f:25$ m., (c) $SINR_{th}:22.4$ dB, $R_f:10$ m., (d) $SINR_{th}:22.4$ dB, $R_f:25$ m.	46
5.2. Usuarios atendidos en incremento de BS ($DUE:100$, $Radio:10m$, $SINR_{th}:9.4$).	49

5.3.	Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:100, Radio:10m, SINR _{th} :22.4).	49
5.4.	Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:100, Radio:25m, SINR _{th} :9.4).	49
5.5.	Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:100, Radio:25m, SINR _{th} :22.4).	50
5.6.	Evaluación de la Capacidad de la UDN con respecto al incremento de BS, se consideró una densidad de usuarios DUE=300 y las siguientes condiciones: (a) SINR _{th} :9.4 dB, Rf:10 m., (b) SINR _{th} :9.4 dB, Rf:25 m., (c) SINR _{th} :22.4 dB, Rf:10 m., (d) SINR _{th} :22.4 dB, Rf:25 m.	53
5.7.	Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:300, Radio:10m, SINR _{th} :9.4).	55
5.8.	Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:300, Radio:10m, SINR _{th} :22.4).	55
5.9.	Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:300, Radio:25m, SINR _{th} :9.4).	55
5.10.	Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:300, Radio:25m, SINR _{th} :22.4).	56
5.11.	Evaluación de la Capacidad de la UDN con respecto al incremento de BS, se consideró una densidad de usuarios DUE=600 y las siguientes condiciones: (a) SINR _{th} :9.4 dB, Rf:10 m., (b) SINR _{th} :9.4 dB, Rf:25 m., (c) SINR _{th} :22.4 dB, Rf:10 m., (d) SINR _{th} :22.4 dB, Rf:25 m.	59
5.12.	Cantidad de usuarios asociados respecto al incremento de BS (DUE:600): (a) Rf: 10 m. (b) Rf: 25 m.	60
5.13.	Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:600, Radio:10m, SINR _{th} :9.4).	61
5.14.	Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:600, Radio:10m, SINR _{th} :22.4).	61
5.15.	Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:600, Radio:25m, SINR _{th} :9.4).	61
5.16.	Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:600, Radio:25m, SINR _{th} :22.4).	62
5.17.	Evaluación de la Capacidad de la UDN con respecto al incremento de UE, se consideró una densidad de estaciones base DBS=2500 y las siguientes condiciones: (a) SINR _{th} :9.4 dB, Rf:10 m., (b) SINR _{th} :9.4 dB, Rf:25 m., (c) SINR _{th} :22.4 dB, Rf:10 m., (d) SINR _{th} :22.4 dB, Rf:25 m.	65
5.18.	Usuarios atendidos en incremento de UE (DBS:2500, Radio:10m, SINR _{th} :9.4).	66
5.19.	Usuarios atendidos en incremento de UE (DBS:2500, Radio:10m, SINR _{th} :22.4).	67
5.20.	Usuarios atendidos en incremento de UE (DBS:2500, Radio:25m, SINR _{th} :9.4).	67
5.21.	Usuarios atendidos en incremento de UE (DBS:2500, Radio:25m, SINR _{th} :22.4).	67

Índice de tablas

	<u>Página</u>
3.1. Modelo de pérdidas por propagación utilizado en el enlace descendente (BS-UE).	22
3.2. Parámetros de simulación del sistema.	22
4.1. Parámetros de simulación de la red UDN utilizados durante la obtención de los valores de las variables para el GA.	33
4.2. Resumen del incremento en la capacidad cada 1000 iteraciones para la decisión del criterio de detención.	41
4.3. Resumen de los parámetros seleccionados para el algoritmo genético.	42
5.1. Parámetros de simulación para la evaluación de la red UDN.	45
5.2. Tabla de concentrado de los resultados de la evaluación de la red UDN con respecto al incremento de BS, considerando una Densidad de Usuarios (DUE:100) y un $SINR_{th}$ bajo, utilizando una escala de colores.	51
5.3. Tabla de concentrado de los resultados de la evaluación de la red UDN con respecto al incremento de BS considerando una Densidad de Usuarios (DUE:100) y un $SINR_{th}$ alto, utilizando una escala de colores.	52
5.4. Tabla de concentrado de los resultados de la evaluación de la red UDN con respecto al incremento de BS, considerando una Densidad de Usuarios (DUE:300) y un $SINR_{th}$ bajo, utilizando una escala de colores.	57
5.5. Tabla de concentrado de los resultados de la evaluación de la red UDN con respecto al incremento de BS, considerando una Densidad de Usuarios (DUE:300) y un $SINR_{th}$ alto, utilizando una escala de colores.	57
5.6. Tabla de concentrado de los resultados de la evaluación de la red UDN con respecto al incremento de BS, considerando una Densidad de Usuarios (DUE:600) y un $SINR_{th}$ bajo, utilizando una escala de colores.	63
5.7. Tabla de concentrado de los resultados de la evaluación de la red UDN con respecto al incremento de BS, considerando una Densidad de Usuarios (DUE:600) y un $SINR_{th}$ alto, utilizando una escala de colores.	63
5.8. Tabla de concentrado de los resultados de la evaluación de la red UDN con respecto al incremento de usuarios, considerando una Densidad de Estaciones Base (DBS:2500) y un $SINR_{th}$ bajo, utilizando una escala de colores.	68
5.9. Tabla de concentrado de los resultados de la evaluación de la red UDN con respecto al incremento de usuarios, considerando una Densidad de Estaciones Base (DBS:2500) y un $SINR_{th}$ alto, utilizando una escala de colores.	69

Acrónimos

4G	Cuarta Generación
5G	Quinta Generación
AMXO	Método Aritmético
BER	Tasa de Error de Bit
BS	Estación Base
DBS	Densidad de Estaciones Base
CSG	Grupo de Suscripción Cerrada
DC	Conectividad Dual
DUE	Densidad de Usuarios
eICIC	Coordinación de Interferencia Inter Celda mejorada
FBS	Estación Base Femtocelular
FUE	Usuario Femto
GA	Algoritmo Genético
HetNet	Red Heterogénea
HX	Operador Heurístico
ICIC	Coordinación de Interferencia Inter Celda
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones
LOS	Línea de Visión
LTE	Long Term Evolution
LX	Operador Laplace
MBS	Estación Base Macrocelular
MC	Celda Macro
mm-Wave	Ondas Milimétricas
MUE	Usuario Macro
NLOS	Sin Línea de Visión
NOMA	Acceso Múltiple No Ortogonal
OFDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales
OMA	Acceso Múltiple Ortogonal
OSG	Grupo de Suscripción Abierta
PF	Equidad Proporcional
PL	Pérdidas por Propagación
PP	Potencias Planas
PPP	Proceso Punto de Poisson
QoE	Calidad de Experiencia
QoS	Calidad de Servicio
RAT	Tecnología de Acceso al Radio
RB	Bloque de Recurso
RE	Expansión de Rango
RR	Round Robin
RSSI	Indicador de Fuerza de la Señal Recibida
SC	Celda Pequeña
SINR	Relación Señal a Ruido e Interferencia

SNR	Relación Señal a Ruido
TM	Terminal Móvil
UDN	Red Ultradensa

Capítulo 1

Introducción

La evolución de las redes celulares de comunicación móvil está influenciada principalmente por el crecimiento continuo de la cantidad usuarios inalámbricos, la demanda por transmitir y recibir grandes volúmenes de datos y por la necesidad de obtener una mejor calidad de experiencia (QoE). Para ello, se ha propuesto que las redes Móviles de Quinta Generación (5G), a diferencia de sus predecesoras, ofrezcan conectividad ubicua, comunicaciones con baja latencia y atención a una gran cantidad de usuarios y dispositivos (comunicación masiva de máquina), lo cual será crucial para el desarrollo y despliegue de las futuras aplicaciones móviles [1].

1.1 Contexto del Problema

Para lograr un despliegue exitoso de estos sistemas 5G y lograr comunicaciones con alta calidad y eficiencia espectral, fundamentalmente se requiere que los operadores móviles cuenten con una mayor cantidad de recursos espectrales con respecto a los que cuentan actualmente. Según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), la mayor parte provendrá de bandas de frecuencia mayores a los 24 GHz, esto plantea desafíos importantes en términos de propagación de ondas de radio y en el desarrollo de tecnologías de radio respaldadas por estándares globalmente armonizados. En [2] se describe la situación global

con respecto al estado regulatorio y técnico sobre la asignación de espectro radioeléctrico para los sistemas 5G.

En ese sentido, en la literatura se reportan diversas propuestas que abordan el problema de mitigar los efectos ocasionados por esta escasez de espectro. Entre ellas, se incluyen reducir el uso del espectro mediante la reducción del tamaño de trama en los esquemas de acceso múltiple, o implementar actividades de cooperación entre dispositivos móviles (Mobile-to-Mobile communications). Otras soluciones recientes, viables pero que requieren cambios de fondo son: (i) incrementar el ancho de banda disponible utilizando la banda de las ondas milimétricas (mm-Wave) [3], (ii) utilizar esquemas de Acceso Múltiple No-Ortogonal (NOMA) [4], [5] y, (iii) explotar el reuso espacial del espectro o lo que se conoce como densificar las redes [6]. Utilizar bandas de frecuencias en la banda mm-Wave (bandas superiores a los 6 GHz) permitirá asignar anchos de banda más anchos en comparación con el que cuentan los canales convencionales de 20 MHz utilizados en los sistemas de cuarta generación (4G). Sin embargo, las señales de longitud de onda milimétrica son afectadas fácilmente por las condiciones del entorno de propagación, por lo que se requieren diseñar nuevos dispositivos transmisores-receptores para contrarrestar este efecto. Los esquemas NOMA, a pesar de que logran una eficiencia espectral superior a los esquemas de Acceso Múltiple Ortogonal (OMA), debido a que multiplexan a sus usuarios en la misma frecuencia, tiempo y código, requieren asignar a cada usuario potencias de transmisión distintas (para lograr la ortogonalidad) y superiores a los 12 dB para mantener los requerimientos de Tasa de Error de Bit (BER) [3]. Lo anterior genera una interferencia co-canal alta en el sistema y, para contrarrestarla, se requieren receptores que cuenten con técnicas basadas en cancelación/coordinación de interferencia (ICIC) o que ofrezcan la capacidad de generar anchos de haz angosto como se demuestra en [4]. Por otro lado, la densificación de estaciones base, aunque es viable a corto plazo, consiste en desplegar un gran número de nodos de baja potencia sobre una red macrocelular. En este caso, las celdas macrocelulares son responsables de proporcionar cobertura ubicua, mientras que las celdas pequeñas (micro-/pico-/femto-/nanoceldas) sirven para potenciar la capacidad del sistema. Agregar estaciones base de potencia y costo menores no es una estrategia novedosa, surge de la observación hecha por Martin Cooper (pionero en el desarrollo de las comunicaciones móviles celulares) en la que establece que la máxima capacidad de un sistema móvil

(conocido como límite de Shannon) depende principalmente de tres factores: incrementar el número de nodos (cell splitting o división celular), incrementar el uso de los recursos de radio y calidad del enlace (reduciendo ruido e interferencia).

Densificar una red móvil se refiere entonces a la combinación de una densificación espacial (incrementar relación estaciones base-usuarios por zona geográfica) y una densificación espectral (utilizar mayores cantidades de espectro electromagnético) generando como consecuencia un mayor número de conexiones de backhaul [9].

Según lo reportado en [7]-[10] se afirma que el despliegue masivo de celdas pequeñas (SC) de forma concurrente con celdas macrocelulares (MC) incrementará la tasa de datos de los usuarios conforme se agregan más SCs, ya que estas, reutilizarán y explotarán aquellas porciones del espectro poco o no utilizadas de la MC. Sin embargo, se establece en [11]-[13] que estas redes heterogéneas ultradensas (UDN) no pueden beneficiarse ilimitadamente si existiera una densificación excesiva, ya que la interferencia generada, por el uso compartido del espectro y el despliegue aleatorio de SCs, se incrementará conforme se incremente la densificación, a tal grado que se volverá el factor dominante en la degradación de la capacidad de la red y en la ineficiencia del uso de los recursos espectrales.

Por lo anterior, uno de los aspectos fundamentales para que las redes UDN logren altas tasas de datos y mantengan altos requerimientos de calidad a sus usuarios es el de diseñar estrategias de asignación de recursos eficientes que mitiguen o controlen su interferencia [14], [15]. Conforme las SCs se despliegan en el sistema, la transmisión en una celda afectará la capacidad sobre muchas otras. Además, cada SC usualmente se encuentra adyacente una con otra, separadas por una distancia de reuso mucho menor en comparación con la de dos macroceldas, por lo que la interferencia mutua entre ellas será mayor que la perciben las MC adyacentes.

1.2 Redes Heterogéneas Ultradensas (UDNs)

Las UDNs se definen como aquellas redes donde existen más SCs que usuarios activos. Ding et al. [16] establecen que deben existir alrededor de 1000 SCs por km^2 para clasificar una red inalámbrica móvil como una UDN. El objetivo principal de implementar una UDN es que los nodos de acceso se encuentren lo más cerca posible de las terminales de

los usuarios y así mejorar sus condiciones de transmisión. La idea es lograr un despliegue denso de SCs en aquellas zonas geográficas en las que se generan grandes volúmenes de tráfico. Sin embargo, la interferencia que se generará entre celdas vecinas se considera un factor limitante para aumentar la capacidad de la red [17].

1.2.1 Retos y problemas abiertos que enfrentan las UDN

Las redes UDN enfrentan tres retos principales:

- **Asociación de usuarios:** Los procesos de asociación de usuarios a celdas se han estudiado ampliamente en las redes HetNets tradicionales [18], [19]. Sin embargo, en el escenario de redes UDN, hay retos únicos que necesitan tomarse en cuenta. La interferencia generada por los componentes de la línea de visión (LOS) requiere proponer reglas novedosas de asociación para aprovechar las capacidades del modo inactivo de las BS de celdas pequeñas. Otro reto se presenta durante la gestión de movilidad, ya que los usuarios que se desplazan entre celdas rápidamente provocarán mayor número de eventos de traspaso de llamada (handover), lo que implica un incremento del tráfico de señalización para efectuarlos con éxito y mantener el enlace con una estación base (BS) [20].
- **Gestión de interferencia:** La capacidad de la UDN estará afectada por la falta de espectro y por la interferencia intercelular e intracelular generada entre sus celdas. Mitigar la interferencia se vuelve un reto cuando existe un número elevado de celdas vecinas que comparten recursos espectrales. La poca distancia entre celdas ocasiona que la interferencia que percibe el usuario sea tan fuerte que sea posible perder la comunicación.
- **Asignación de recursos:** La red cuenta con pocos recursos espectrales y debido a la gran cantidad de nodos operando en la UDN, la potencia de transmisión deberá ser de bajo nivel para que la interferencia generada sea de menor intensidad. La adecuada asignación de recursos (potencia y ancho de banda) se vuelve una tarea indispensable para lograr los objetivos de capacidad impuestos en las redes 5G. En la literatura, la asignación de los recursos en HetNets se realiza bajo los enfoques de compartición de espectro [21] o partición de espectro [22]. Bajo el esquema de partición de espectro o canal dedicado, la asignación de bandas de frecuencia a las MCs y SCs sigue un

enfoque ortogonal, de tal forma que un usuario macrocelular solo puede utilizar alguno de los canales asignados a la MC, lo mismo sucede con los usuarios femtocelular, esto es, no existe compartición de canal entre MCs y SCs. Este enfoque evita la generación de interferencia entre redes, pero la nula reutilización simultánea de canales reduce la capacidad de la HetNet. Por otro lado, cuando el espectro se comparte, las SC tienen permitido reutilizar los canales asignados a la MC, lo que incrementa la capacidad de la red, pero al mismo tiempo se limita por la interferencia que se genera.

1.3 Planteamiento del problema

El despliegue masivo de nodos de baja potencia colocados sobre el área de cobertura de una MC se considera como un pre-requisito para reducirle la carga de usuarios atendidos (un concepto similar al de sectorizar). Esta densificación mejora la calidad de la señal porque reduce la distancia entre transmisor y terminal móvil y, en consecuencia, se incrementa la capacidad de la red de acuerdo con el teorema de Shannon. Sin embargo, bajo un esquema de re-uso, o compartición de frecuencia, la interferencia generada entre celdas será un factor limitante sobre esta capacidad [9], [23]. Lograr una asignación de canal y potencia de forma efectiva será el complemento del proceso de densificación de red para mitigar dicha interferencia.

1.4 Trabajo relacionado

En la literatura están reportadas diversas estrategias de asignación de recursos aplicadas a redes UDN, una muestra reciente de estos trabajos se reporta en [7], [8], [17], [24-36]. Estas nuevas estrategias de asignación se diferencian de aquellos esquemas de asignación de recursos aplicados a sistemas 4G principalmente en que estos últimos se basan en priorizar los servicios que requiere el usuario, en lugar de diseñarse para atender, de forma transparente, un conjunto de servicios con diferentes requerimientos de calidad de servicio, y de esa manera cumplir con los objetivos que impone el estándar para los sistemas 5G [10].

Los trabajos que proponen mitigar la interferencia en redes UDN a partir de un esquema de asignación de recursos se pueden clasificar en aquellos que consideran NOMA [25], [36], esquemas de compartición de espectro [7], [8], [27] o partición de espectro [37],

[24], [35], los que asignan recursos a partir de la formación inicial de conjuntos de celdas pequeñas (clustering) [26], [29], [32], [35], o con base a la QoS medido en términos de la relación señal a ruido e interferencia (SINR) [28], [31] o en los que se apoyan en la cooperación de sus SCs [30], [33].

Los trabajos que utilizan NOMA como esquema de acceso múltiple lo justifican a partir de que es posible lograr mejores tasas de datos y equidad (fairness) en comparación con los esquemas ortogonales (como OFDMA), sin embargo, lo logran a costa de incrementar la infraestructura de la red, ya sea para cancelar señales interferentes o para desactivar estaciones base y reducir interferencia [25]. Otros, enfocan sus propuestas de asignación de recursos en una de dos opciones; mejorar la eficiencia espectral (mediante la asignación de canales) [7], [8], [27], [29], o eficientizar el uso de la energía (mediante la asignación de potencia) [28], [31], [34]. Por otro lado, aquellos trabajos que controlan la interferencia con base en la conformación de conjuntos de celdas (clustering) [26], [32], [35], también se pueden incluir en el conjunto de trabajos que aplican un esquema de partición de espectro, ya que el bloque de canales asignados para la MC lo dividen en dos sub-bloques, uno para la MC y el otro para compartir entre los conjuntos de SCs (clusters). El procedimiento de clustering requiere una estrategia eficiente para formar el conjunto de SCs (clusters). Una vez formados los clusters, se designa un nodo líder por cada uno y se establece un mecanismo para que cada nodo líder intercambie información sobre como reutilizar los recursos entre los clusters. Este proceso incrementa el tráfico de señalización (overhead) y el uso de recursos, es por ello que algunos trabajos, como en [29], proponen una estrategia para reducir este overhead a partir de un esquema de asignación de recursos basado en un clustering dinámico. Esto es, asignan recursos en cada cluster de forma independiente. En [34], proponen un esquema de asignación de frecuencia híbrido, dividen el conjunto de SCs que forman la red UDN en dos regiones, la región de alta interferencia, en donde las SCs tendrán un bloque de canales ortogonal a la MC, mientras que las SCs localizadas en la región de baja interferencia reutilizarán, bajo un esquema de espectro compartido, los mismos recursos que la MC tiene asignado. Aunque este enfoque de partición de espectro ofrece buenos resultados bajo el modelo de clustering, en un escenario en el que existan más usuarios por celda, el desbalance de cargas en las SCs puede afectar la eficiencia de estos algoritmos, generando una interferencia distinta en cada cluster, por lo que se requeriría de un esquema

de mayor robustez para mitigar una interferencia heterogénea. Además, entre más usuarios por celda existan habrá menos espectro disponible, por lo que se requiere analizar el compromiso entre la interferencia generada y la cantidad de clusters formados. A pesar de que logran buenos resultados de capacidad y uso eficiente del espectro, estos esquemas de conformación de conjuntos requieren de una alta complejidad computacional para el proceso de asignación de recursos.

En [37] los autores también proponen una estrategia para reducir la complejidad computacional, en la que dividen la banda espectral asignada a una celda en varias regiones y después cada sub-división del espectro lo asignan a una zona en particular de la celda previamente dividida. Con esto reducen la interferencia inter-celular y, el procedimiento de asignación de los recursos, lo vuelven poco complejo. Al utilizar un esquema de partición de espectro reducen la cantidad de ejecuciones algorítmicas para reutilizar el espectro, pero también el aprovechamiento del mismo. A pesar de que resuelven el problema de asignación de recursos, los resultados reportados no son mejores que los descritos en [38]. En [38], los autores consideran ubicación, potencia, demanda de recursos y ancho de banda para realizar la asignación de recursos en una HetNet, pero no toman en cuenta la interferencia generada en la red, ya que parten de la premisa de que utilizan una partición de espectro y no una compartición de espectro. Sin embargo, si no se considera el enfoque de compartición de espectro en las celdas pequeñas, la capacidad y eficiencia espectral resultarán disminuidas. Por el contrario, en [24], se reportan dos variantes del esquema de partición de espectro: dinámica y cooperativa. Ambas variantes superan la capacidad obtenida con respecto al esquema de partición tradicional (fija) por 33.07% y 76.01% respectivamente, demostrando que con coordinación de las estaciones base y cooperación entre capas se puede lograr una mejor utilización del espectro en redes UDN bajo el enfoque de partición de espectro. En [27] reportan que el esquema de partición de espectro ofrece mejores prestaciones con respecto al esquema de compartición de espectro, aunque este comportamiento se presenta solo cuando la tasa de reutilización es mayor al 80% y el nivel de *SINR* en el sistema es alto.

Otros trabajos, como en [7], [8], [11] y [17], en los que evalúan la capacidad de la red bajo esquemas de compartición de espectro, demuestran que esta capacidad disminuye conforme se incrementa la cantidad de SCs desplegadas en la red. Sin embargo, en estos

trabajos los autores no aplican alguna técnica que controle la interferencia durante la asignación de canal.

El trabajo reportado en [11] presenta un análisis de la capacidad de una red UDN a partir de un modelo modificado de propagación de pérdidas por trayectoria. La justificación de proponer este nuevo modelo se basa en que si se utiliza un modelo tradicional de pérdidas por trayectoria en la evaluación de capacidad de una red UDN, la distribución estadística del *SINR* se vuelve invariante (*SINR* invariance) o independiente de la distribución y densidad espacial de las estaciones base (caso Poisson, hexagonal grid, entre otros), incluso de otros aspectos tales como; el sombreado log-normal, desvanecimiento Rayleigh y Nakagami, potencia de transmisión y acceso múltiple por división espacial. Lo anterior resultaría en que cada usuario en la red incrementaría linealmente y sin límite su capacidad conforme se agregue más SCs al sistema. Los resultados reportados con este nuevo modelo de pérdidas por trayectoria demuestran que para una cantidad grande de SCs (alrededor de 1000) el nivel de *SINR* se reduce conforme la red se densifica y, en consecuencia, también la capacidad de cada usuario en la red.

Con base a lo reportado en los trabajos anteriores, se concluye que, en un escenario de alta densificación, se espera que la red presente niveles bajos de *SINR*, debido principalmente a la interferencia generada, por lo que será conveniente considerar esquemas de asignación de ancho de banda y potencia que controlen la interferencia en la red e incrementen su capacidad.

En esta tesis se presenta una estrategia de coordinación de interferencia (ICIC), resolviendo el problema de asignación de potencia, para minimizar la interferencia entre celdas y usuarios en una red UDN. El algoritmo se evalúa bajo dos implementaciones basadas en partición de espectro y compartición de espectro y se analiza la capacidad de la red considerando una variedad de situaciones contextuales tales como la densificación de celdas, carga de tráfico, radio de cobertura de las SCs e interferencia.

1.5 Preguntas de investigación

- ¿Cuáles deberían ser las condiciones de despliegue de nodos de baja potencia para que la coordinación de interferencia en una Red Ultra-Densa mejore la capacidad de la red?

- ¿De qué manera influye la estrategia de asignación de potencia sobre los esquemas de partición y compartición de espectro en una Red Ultra-Densa (UDN)?

1.6 Objetivo General

Diseñar un algoritmo que coordine la interferencia mediante la asignación de potencia, para incrementar la capacidad de una red Ultra Densa (UDN).

1.7 Objetivos específicos

1. Modelar el algoritmo de asignación de potencia con base a un Algoritmo Genético que permita resolver el problema de maximizar la capacidad de una red UDN.
2. Analizar el efecto de aplicar una estrategia de partición de espectro y de compartición de espectro sobre la capacidad de la red UDN.

1.8 Organización de la tesis

Esta tesis se encuentra organizada de la siguiente manera:

En el capítulo 2 se presentan las características y diferencias de las redes heterogéneas y las redes ultradensas. Así como las consideraciones reportadas para modelar los escenarios como el despliegue de estaciones base, la asociación de usuarios, la asignación de potencia, la asignación de ancho de banda y las métricas para medir el rendimiento de estas redes.

En el capítulo 3 se describen las consideraciones tomadas para el modelo del problema basándose en lo mencionado en el capítulo anterior, así como el problema de optimización. En este capítulo se describen los esquemas de asignación de recursos utilizados, el algoritmo de asignación de ancho de banda y el algoritmo para asignar la potencia, el cual es desglosado posteriormente en el siguiente capítulo.

El capítulo 4 describe cada etapa del algoritmo genético que se implementó en la asignación de potencia y se resalta la motivación del uso de una técnica metaheurística como esta. Las etapas descritas son la población inicial, la aptitud, la selección, el cruzamiento, la mutación y el reemplazo.

El capítulo 5 se encuentra compuesto de los resultados experimentales en donde se comparan los dos esquemas de asignación de recursos, la asignación por algoritmo genético

y una asignación de potencia convencional en escenarios considerados UDN con densidades de usuarios baja, media y alta, bajo un nivel de calidad bajo y alto y bajo dos radios de asociación para las estaciones base femto. Evaluados bajo la métrica de capacidad total de la red y en la cantidad de usuarios con canales con condiciones mínimas para transmitir.

Por último, en el capítulo 6 se presenta el resumen y conclusiones de los resultados obtenidos en el capítulo anterior y una sección de los trabajos para futuras investigaciones.

Capítulo 2

Fundamentos y operación de una Red-Ultradensa (UDN)

Mientras que la densidad de usuarios en una HetNet es mayor que la densidad de Estaciones Base (BS), en una UDN sucede lo contrario, lo que provoca que en ciertos instantes de tiempo varias BS no tengan la necesidad de atender a usuarios. Por tal motivo, es requisito que las BSs en una UDN tengan capacidades de ahorro de energía para reducir la interferencia cuando estas no están atendiendo a ningún usuario. Además, debe existir un compromiso entre la capacidad de la red, la atención a usuarios y los requerimientos de servicio, limitado por la interferencia que se pueda generar en la red influenciada por la asociación de usuarios a celdas, la asignación de recursos y la planificación del despliegue de las estaciones base que permita mejorar el rendimiento general de la red. Estos factores son definidos y analizados en este capítulo con en base a lo reportado en la literatura en HetNets y UDNs resaltando sus principales diferencias.

2.1 Despliegue de estaciones base

En una UDN, la ubicación de las SCs, denominadas Estaciones Base Femtocelular (FBS), puede determinarse a partir de una planificación ordenada o fija realizada por los operadores o, aleatoria cuando se les da ese derecho a los usuarios [40].

En un despliegue fijo de FBSs se debe considerar una distancia mínima entre ellas o una cantidad fija de FBSs distribuidas uniformemente sobre la MC con la intención de reducir la interferencia entre ellas (ver Figura 2.1(a)). En la Figura 2.1(a) se puede observar un conjunto de FBSs desplegadas sobre el área de cobertura de una MC, la cobertura de cada FBS (representada por la línea punteada) se define por la distancia más corta entre un punto en el espacio y cada FBS representado por la teselación del diagrama de Voronoi [41]. Típicamente, en estos modelos no se considera la interferencia entre FBSs (co-tier), ya que estas se encuentran separadas por una distancia mínima y se considera que los usuarios están ubicados en interiores.

Por otra parte, se utiliza la geometría estocástica [42] para modelar la aleatoriedad en el despliegue de FBSs como un proceso puntual. Generalmente, se considera un Proceso Puntual de Poisson (PPP), el cual distribuye las FBSs aleatoriamente como puntos en dos o tres dimensiones del espacio Euclidiano. Un ejemplo de un despliegue de FBSs aleatorio basado en el PPP se puede observar en la Figura 2.1(b), en este caso, la cantidad de estaciones base necesarias para cubrir un área de cobertura en particular la determina una variable aleatoria de Poisson. Los modelos PPP han sido utilizado para analizar el desempeño de redes HetNets y UDN en [30], [33], [34].

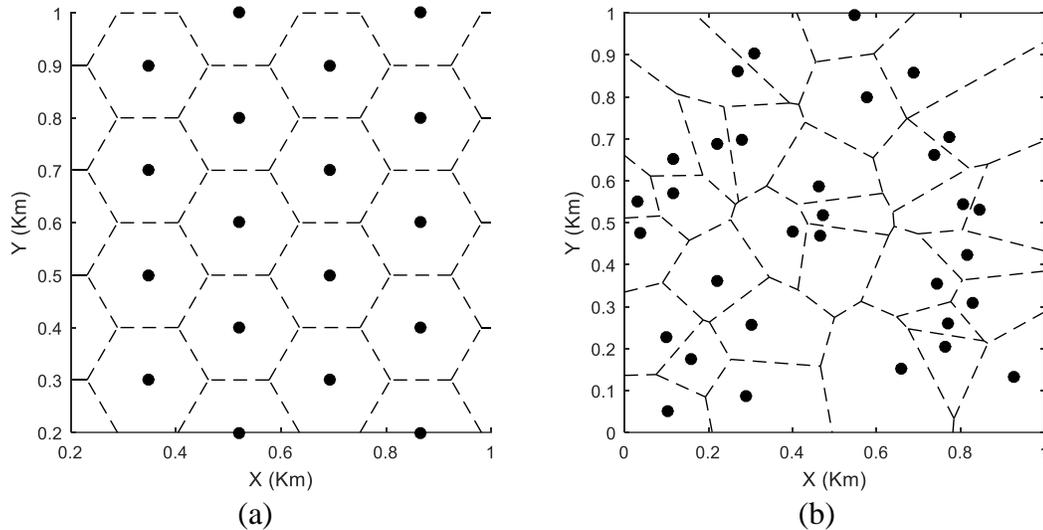


Figura 2.1. Diagramas de Voronoi representando el despliegue de FBS:(a) Fijo, (b) Aleatorio.

El despliegue fijo de FBSs por lo general se utiliza para tener control sobre la interferencia que pudiera generarse en la red y garantizar una distribución uniforme de usuarios en las FBSs. Sin embargo, a diferencia del despliegue aleatorio, el despliegue fijo de FBSs no considera la naturaleza geográfica no uniforme de las UDN, ya sea por los despliegues de FBS determinados por los operadores o los usuarios o por las irregularidades de los terrenos en donde son desplegadas.

2.2 Asociación de usuarios

La asociación de usuarios a celdas (o asociación de celdas) se refiere al proceso en el que el usuario selecciona una BS (puede ser la MC o alguna FBS) de entre varias disponibles para establecer su comunicación [43]. En las redes móviles LTE (Long Term Evolution) [44] la asociación la inicia el usuario con base al Indicador de la Fuerza de la Señal Recibida (RSSI) de las celdas vecinas. Un usuario siempre se conecta a la BS que le ofrece el RSSI máximo. Otra regla de asociación se basa en la calidad de la señal que percibe el Terminal Móvil (TM) en lugar del RSSI. Cuando la asociación se ejecuta con base a la calidad de la señal, el usuario se conecta a la celda que le ofrece el mayor nivel de Relación-Señal a Ruido e Interferencia (*SINR*), a esta asociación se le conoce como asociación de *SINR* máximo [45]. Debido a que en las UDNs habrá nodos que ofrezcan una potencia de transmisión y cobertura distintas, la asociación basada en RSSI no se considera como la mejor opción. Uno de los objetivos de las FBSs es atender a una porción de usuarios macrocelulares y con esto

descargar tráfico de la MC. Sin embargo, si se asocian usuarios a celdas con base al RSSI, debido a que la potencia de la MC es mucho mayor que la de las FBSs, esta descarga de tráfico es poco probable que suceda.

Las FBSs usualmente atienden a pocos usuarios debido a su limitada cobertura, esto ofrece la ventaja de que perciban niveles bajos de interferencia y logren altas tasas de transmisión. La Expansión de Rango (RE) [46] es una estrategia de asociación de usuarios a celdas utilizada en redes UDN. Con este tipo de asociación se propone asociar usuarios a las FBSs con el motivo de descargar tráfico de la MC y mejorar las tasas de transmisión de los usuarios al realizar una expansión virtual de la cobertura de las FBSs [47]. La potencia de la señal que percibe una FBS se modifica por un valor de compensación basado en la distancia extendida para atraer a más usuarios. Como consecuencia, el usuario se asocia a la FBS con la máxima potencia parcial de la señal.

La conectividad dual (DC) [48-50] es otra alternativa de asociación. Con esta técnica el usuario se conecta a la MC y a un conjunto de FBSs simultáneamente. Este tipo de asociación ofrece robustez en la gestión de movilidad de los usuarios debido a que se encuentran conectados al mismo tiempo a la red macro y a la red de FBSs. El uso principal de la DC es la división del flujo del tráfico de los usuarios para satisfacer sus requerimientos y distribuir la carga de usuarios entre FBSs vecinas.

La asociación múltiple [19] se propone como un mecanismo de asociación de usuarios que los conecta a más de una celda. El usuario se conecta a las celdas más cercanas y distribuye su tráfico entre ellas para superar las limitantes de backhaul y generar mayores tasas de datos. Entre más FBSs se encuentren en la cercanía del usuario más se aprovecha la diversidad de condiciones entre las celdas para una mejor asignación de recursos.

2.3 Asignación de recursos

En los sistemas móviles LTE está definido que un bloque de recursos (RB) es la unidad más pequeña de ancho de banda que puede asignarse a un usuario. Cada bloque de recursos consiste en 180 KHz de ancho de banda. El ancho de banda total disponible en el sistema móvil se divide en RBs o canales que posteriormente se asignan por medio de algoritmos simples, tales como Round Robin (RR) o Proportional Fair (PF) [51].

En la asignación RR los canales de la BS se reparten entre todos los usuarios de manera equitativa sin tomarse en cuenta las condiciones del canal. Esto resulta en un pobre desempeño de la red cuando se requiere incrementar su capacidad. Este enfoque es eficiente cuando se busca que a todos los usuarios de la red se les asigne al menos un RB sin importar si se atienden las demandas de QoS o capacidad.

El algoritmo PF logra un balance entre capacidad y equidad. Lo anterior significa que el algoritmo provee al usuario los recursos suficientes para satisfacer un nivel de servicio (tasa de datos) mínimo y al mismo tiempo maximizar la capacidad total del sistema.

Cada RB asignado requiere de cierto nivel de potencia para lograr una Relación-Señal a Ruido (*SNR*) mínimo para transmitir. Algunas técnicas de asignación de potencia, por simplicidad, asignan el mismo nivel de potencia a todos los canales, con esto logran una forma de equidad de potencia, esta asignación de potencia se denomina potencias planas (PP). Otro método de asignación es asignar potencia hasta lograr un valor de *SNR* mínimo con el fin de utilizar solo la potencia necesaria para satisfacer la demanda de los usuarios. Un ejemplo de cómo varía la potencia de la señal con respecto a la distancia se muestra en la Figura 2.2. Se puede observar que el nivel de *SNR* disminuye conforme aumenta la distancia, mientras que la variación del nivel de potencia de la señal se debe a los efectos de la propagación de la señal.

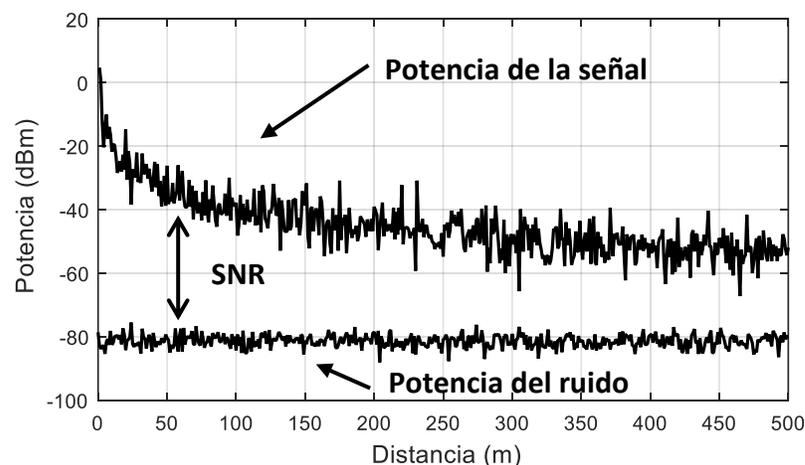


Figura 2.2. Variación del nivel de potencia de la señal con respecto a la distancia.

Las técnicas de asignación de recursos antes mencionadas se aplican en HetNets. Sin embargo, aunque las condiciones entre HetNets y UDNs son diferentes, algunos trabajos también consideran este tipo de asignación simple. Para una asignación de recursos eficiente es necesario considerar la interferencia intercelular e intracelular que se genera en las redes UDN que no se considera con las asignaciones por *SNR*. Las diferentes condiciones de propagación e interacciones de las transmisiones LOS de las estaciones base cercanas provocan una alta variación del *SINR* percibido por los usuarios. Por lo tanto, para cumplir con las diferentes demandas y mantener enlaces de alta QoS es necesario aplicar técnicas de optimización durante la asignación de recursos.

2.4 Métricas de desempeño

En la literatura se reportan distintas métricas para evaluar el desempeño de una red UDN.

- **Probabilidad de cobertura / éxito y probabilidad de interrupción / distribución de *SINR*:** La probabilidad de cobertura se define como la probabilidad de que el *SINR* de un usuario se encuentre por encima de un cierto umbral [11]. Es decir, la calidad del enlace es lo suficientemente alta para realizar una conexión exitosa. La probabilidad de interrupción o distribución de *SINR* es la probabilidad de que el *SINR* de un usuario arbitrario se encuentre por debajo de un umbral mínimo. Se considera que un usuario está en estado de interrupción cuando el *SINR* del enlace de la BS atendida no es suficiente para una conexión exitosa. Estas métricas cuantifican la calidad del enlace entre usuario y BS.
- **Tasa de cobertura y tasa de interrupción:** La tasa de cobertura se define como la probabilidad de que la tasa de datos que puede alcanzar un usuario arbitrario se encuentre por encima de un cierto umbral mínimo. Por otro lado, la tasa de interrupción es la probabilidad de que la tasa de datos que puede alcanzar un usuario arbitrario se encuentre por debajo de un cierto umbral mínimo [6]. En HetNets y UDNs, la tasa alcanzable no solo es determinada por el *SINR* sino también por la capacidad de backhaul y la carga individual de las celdas.
- **Eficiencia espectral promedio:** El número promedio de bits transmitidos por segundo por unidad de ancho de banda representan la eficiencia espectral [12].

- **Eficiencia espectral de área:** La densificación de la red incrementa el reuso del espectro por unidad de área. Por lo tanto, la eficiencia espectral del área de cobertura de la celda es una métrica importante para cuantificar el rendimiento de la UDN y es definida como la velocidad promedio alcanzable por unidad de ancho de banda por unidad de área [16].
- **Capacidad de la red:** La capacidad de la red cuantifica el número promedio de bits transmitidos exitosamente por segundo por Hz por unidad de área [9].
- **Eficiencia energética:** Se define como la relación entre la capacidad de la red y el consumo de energía por unidad de área. La métrica de la eficiencia energética es un indicador que mide la tasa de costo-beneficio comparando las tasas de datos alcanzables con los costos de energía para lograr estas tasas [32].
- **Equidad:** Es un indicador que evalúa si los esquemas de asociación de celdas y gestión de recursos dan a cada usuario lo que se merece en función de sus condiciones, diferencias y cualidades [15].

2.5 Conclusiones

En este capítulo se describieron las principales características y limitantes de las técnicas de asociación de usuarios a celdas y la planificación del despliegue de las estaciones base para las redes UDN. Además, se reporta que la interferencia inter-celda e intra-celda se considera como una de las debilidades importante para que en las redes UDN se logren altas tasas de transmisión. Una de las estrategias para controlar la interferencia es la utilización de técnicas eficientes de asignación de recursos, ya sea de canal o potencia. El éxito de las técnicas de asignación de recursos dependerá de la conciencia que la red tenga sobre las características del entorno de propagación, medido en términos del *SINR*. En el siguiente capítulo se describe la fundamentación del modelo de asignación de recursos propuesto en este trabajo y su aplicación en redes UDN a partir de los enfoques de partición de espectro y compartición de espectro.

Capítulo 3

Modelo del problema

El modelo del sistema propuesto se realizó basado en las consideraciones mencionadas en el capítulo anterior y las características de la red fueron configuradas para una red UDN que cumple con las definiciones en la literatura. En este capítulo, se define el modelo de optimización para resolver el problema de asignación de recursos en los esquemas compartidos y particionados. Además, se presenta la metodología para resolver el problema formulado separado en dos etapas, la asignación de canales y la asignación de potencia.

3.1 Definición del modelo

Para modelar y evaluar la estrategia de coordinación de interferencia se considera el enlace descendente de una red UDN bajo el esquema de acceso múltiple es el Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (OFDMA). La red está conformada por I FBSs y U usuarios desplegados uniformemente sobre el área de cobertura de la Estación Base Macrocelular (MBS) como se muestra en la Figura 3.1. Las FBSs están representadas por triángulos, mientras que la MBS por un cuadrado en el centro, el círculo representa el área de cobertura de la MBS, los usuarios están representados por asteriscos y se asocian a la BS

(MBS o FBS según corresponda) ya sea, por una asociación por distancia o por pérdidas por propagación (PL). La asociación por distancia asocia a un usuario con la BS más cercana, si la BS más cercana es una FBS el usuario se asocia a ella siempre y cuándo se encuentre dentro de su radio cobertura, de lo contrario se asociará a la MBS, la asociación por PL asocia a un usuario con la BS que le proporcione una menor PL dentro de un radio mínimo. Un usuario se considera como usuario femto (FUE) si se encuentra asociado a la FBS o usuario macro (MUE) si se asocia a la MBS. Además, cada FBS opera en modo de acceso abierto, es decir, cualquier usuario puede tener acceso a ellas.

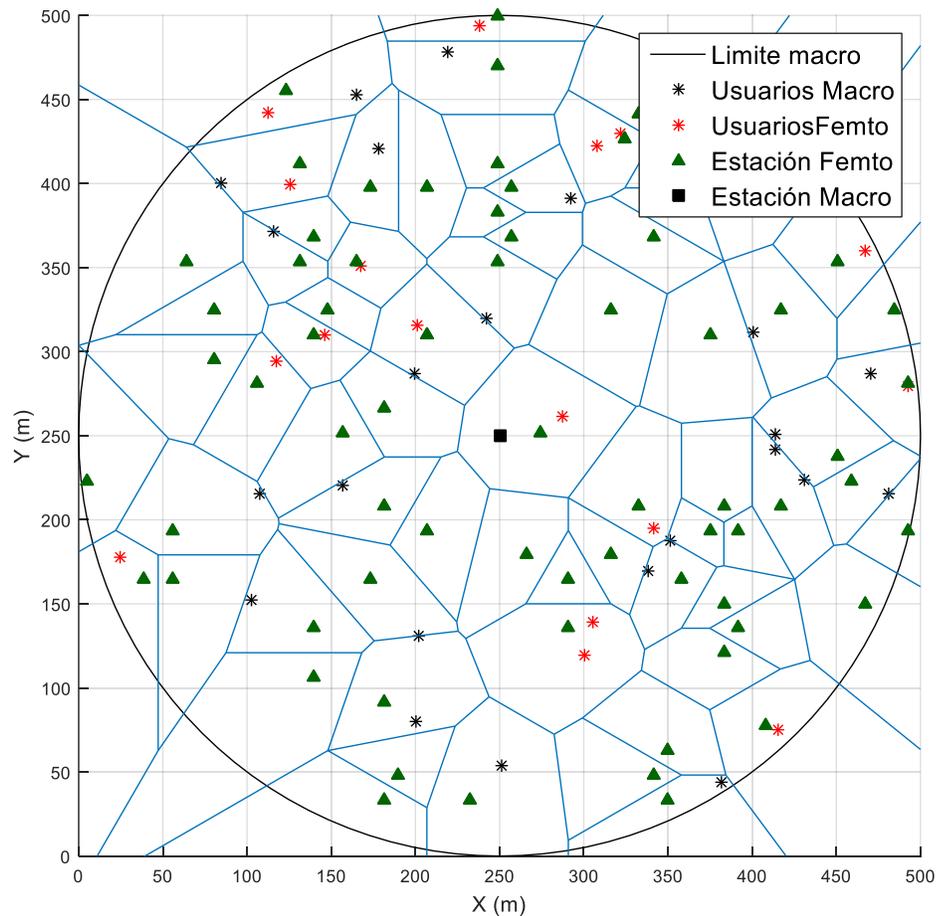


Figura 3.1. Modelo del sistema. Red UDN formada por una macrocelda (BS en el centro) y varias Estaciones Base Femtocelular distribuidas aleatoriamente siguiendo un proceso puntual de Poisson (PPP).

Por otra parte, el algoritmo de coordinación de interferencia se evaluó bajo los esquemas por partición de espectro y compartición de espectro. En la Figura 3.2 se ilustra la forma en que se distribuye el ancho de banda total disponible B entre la MBS y las FBSs de la red para los casos de partición y compartición de espectro. En el esquema de partición de

espectro los canales presentan anchos de banda dinámicos, esto es, el ancho de banda disponible B_f para los FUE y B_m para los MUE varía en función de la cantidad de usuarios asociados a las FBSs y MBS respectivamente, es decir, el ancho de banda disponible $B = \{B_f \cup B_m\}$, $\{B_f \cap B_m\} = \emptyset$. A partir de la ecuación (3.1) se calcula un valor de B_f inicial (B'_f) como referencia para obtener B_f de acuerdo con el diagrama mostrado en la Figura 3.3 para adaptar dinámicamente una porción mínima de ancho de banda a la red macrocelular o femtocelular con el fin de garantizar un servicio mínimo a los MUE y maximizar la reutilización de B . La cantidad de usuarios compuesta de FUE y MUE se define por $U = \{u_f \cup u_m\}$, $\{u_f \cap u_m\} = \emptyset$. Mientras que B_m se estima a partir de la ecuación (3.2).

$$B'_f \approx \frac{u_f * B}{U} \quad (3.1)$$

$$B_m = B - B_f \quad (3.2)$$

Por otro lado, en la compartición de espectro, el ancho de banda total disponible lo pueden utilizar simultáneamente tanto las FBSs como la MBS. Es decir, $B = B_f = B_m$.

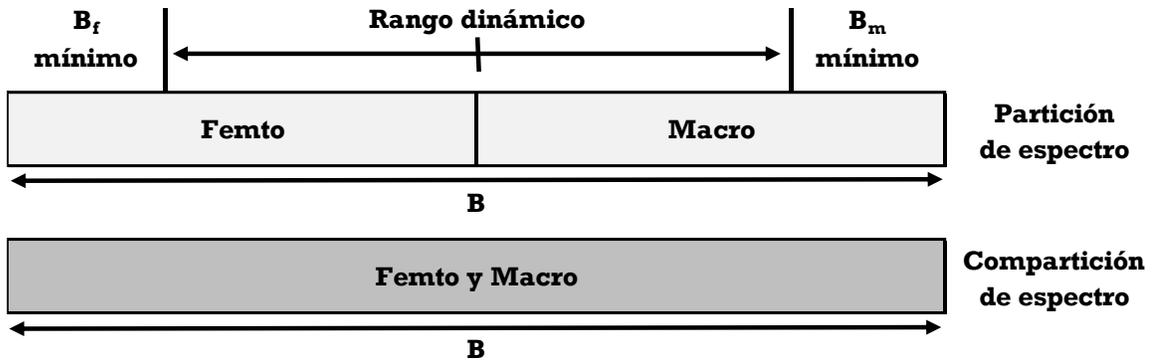


Figura 3.2. Esquemas de operación del proceso de asignación de recursos.

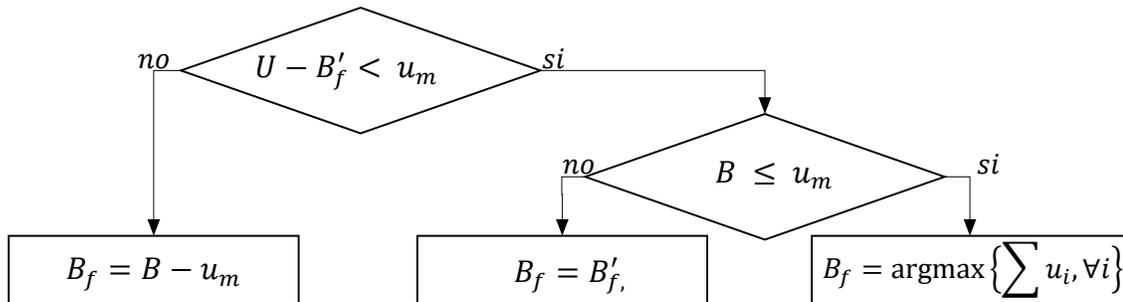


Figura 3.3. Diagrama de selección de B_f en el esquema particionado.

3.2 Formulación del problema

Coordinar la interferencia en una red UDN por medio de la asignación eficiente de potencia tiene como objetivo maximizar la capacidad de la red. Dicha capacidad se logra al maximizar la capacidad individual de cada uno de los usuarios, al mismo tiempo que se mantiene la equidad entre ellos, es decir, asignar a todos los usuarios al menos un canal con QoS mínima para transmitir en cada instante del proceso de asignación de recursos. De acuerdo con la ecuación de capacidad de Shannon, la suma de capacidades se formula como sigue:

$$\max \sum_{i=1}^I \sum_{u \in \{i\}} \sum_{q \in \{u\}} B_{u,q} \log_2(1 + SINR_{u,q}) \quad (3.3)$$

$$SINR_{u,q} = \frac{P_{u,q} L_{i,u} \alpha_{u,q}}{N + \sum_{j \neq i}^I \sum_{w \neq u}^U P_{w,q} L_{j,u}} \quad (3.4)$$

donde $B_{u,q}$ corresponde al ancho de banda asignado al usuario u en el canal q . El $SINR_{u,q}$ percibido por el usuario u en el canal q es directamente proporcional a la potencia $P_{u,q}$ asignada al usuario u en el canal q , a las condiciones de canal $L_{i,u}$ y a las pérdidas por trayectoria $\alpha_{u,q}$. Las pérdidas por trayectoria son aquellas que experimenta el usuario u con respecto a la BS i a la que se encuentra asociado [52]. Las pérdidas por propagación se modelan considerando transmisiones LOS y NLOS tratadas como eventos probabilísticos definidas en términos de distancia entre BS y el equipo de usuario (UE) como se muestra en la Tabla 3.1 y a las pérdidas por trayectoria múltiple que experimenta el usuario u en el canal q , como se reporta en [29]. N representa la potencia del ruido y, la interferencia total en la red se calcula a partir de la suma de potencias $P_{w,q}$ que se transmiten a los usuarios w en el mismo canal q que al usuario u . Asimismo, la función de optimización (3.3) se encuentra sujeto a las siguientes restricciones:

- La restricción de potencia está dada por;

$$\sum_{u \in \{i\}} \sum_{q \in \{u\}} P_{u,q} \leq P_{max}^i, \forall i \quad (3.5)$$

lo que significa que la potencia total asignada en una celda debe ser menor o igual a la potencia disponible en cada BS.

- La restricción de ancho de banda está dada por;

$$\sum_{u \in \{i\}} \sum_{q \in \{u\}} B_{u,q} \leq B_{max}^i, \forall i \quad (3.6)$$

lo que significa que el de ancho de banda total asignado por celda debe ser menor o igual al ancho de banda disponible en cada BS.

- La restricción de reutilización está dada por;

$$\sum_{u \in \{i\}} B_{u,q} \leq 180 \text{ KHz}, \forall q, \forall i \quad (3.7)$$

lo que significa que un canal no puede ser utilizado por dos o más usuarios asociados a la misma BS.

- La restricción del umbral está dada por;

$$SINR_{u,q}^i \geq SINR_{Th} \quad (3.8)$$

para mantener la QoS requerida el $SINR$ de cada canal asignado debe ser mayor o igual a un $SINR$ umbral mínimo.

Los parámetros de simulación utilizados para la evaluación del sistema UDN se describen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.1. Modelo de pérdidas por propagación utilizado en el enlace descendente (BS-UE)

Pathloss LOS	$103.8 + 20.9 \log_{10} d \text{ [dB]}, (d \text{ en km})$
Pathloss NLOS	$145.4 + 37.5 \log_{10} d \text{ [dB]}, (d \text{ en km})$
Probabilidad LOS	$\begin{cases} 1 - 5 \exp\left(\frac{-0.156}{d}\right), & 0 < d \leq 0.0667 \text{ km} \\ 5 \exp\left(\frac{-d}{0.03}\right), & d > 0.0667 \text{ km} \end{cases}$

Tabla 3.2. Parámetros de simulación del sistema

Parámetro	Descripción
$B_{u,q}$	Ancho de banda del usuario u en el canal q
B_{max}^i	Ancho de banda máximo disponible en la BS i
B	Ancho de banda por canal
$L_{u,q}$	Atenuación por distancia del usuario u en el canal q
$\alpha_{u,q}$	Atenuación por multi trayecto del usuario u en el canal q
q	Canales disponibles en la red, $q = 1, \dots, Q$
i	Estaciones Base, $i = 1, \dots, I$
$P_{u,q}$	Potencia asignada del usuario u en el canal q
N	Potencia del ruido
P_{max}^i	Potencia máxima disponible en la BS i

$SINR_{u,q}$	Relación señal a ruido e interferencia del usuario u en el canal q
$SINR_{Th}$	Umbral de la Relación señal a ruido e interferencia
u	Usuarios móviles, $u= 1, \dots, U$

3.3 Asignación de recursos

Dado que la interferencia producida en la red UDN es el factor que limita su capacidad, es necesario incluir técnicas de coordinación de interferencia para aumentar la capacidad individual de los usuarios mientras se mantiene una atención y QoS mínima. Considerando que la función de optimización (3.3) es no lineal y el problema se define como del tipo NP-hard, entonces no existe una técnica de tiempo polinomial que encuentre una solución confiable durante la asignación de ancho de banda y potencia. Para resolver el problema de asignación de recursos, primero se aplicó un algoritmo de asignación de canal basada en PF y, una vez que los canales se asignaron, se utilizó un algoritmo de optimización metaheurístico para evaluar el desempeño de la asignación de potencia a cada canal como estrategia para coordinar la interferencia.

3.3.1 Asignación de canales

Para garantizar que los canales disponibles en cada BS se asignen a todos los usuarios atendidos por dicha BS y se mantenga una proporción de canales equitativa entre ellos, se utilizó el algoritmo de Rhee reportado en [53]. El Algoritmo 1, describe el procedimiento de asignación de canal.

Algoritmo 1. Proceso de asignación de canales utilizando el algoritmo de Rhee [53].

Suponiendo una red UDN con U usuarios compartiendo Q sub-canales en una celda y SNR individuales por usuario.

1. Inicializar a cero las tasas de datos de los usuarios $C_u = 0$ para todo $u \in U$.
2. A sea el conjunto de sub-canales disponibles $A = \{1, 2, \dots, Q\}$.

Para $j = 1$ a J **hacer**

3. Determinar el valor q^* tal que $|SNR_{u,q^*}| \geq |SNR_{u^*,q}|$ para toda $q \in A$ con $q \neq q^*$.
4. Actualizar la capacidad $C_u = q \log_2(1 + SNR_{u,q})$ y $A = A \setminus \{q^*\}$.

Fin

Mientras $A \neq 0$

5. Encontrar u^* tal que $C_{u^*} \leq C_u$ para todo u con $u \neq u^*$ y $0 \leq u \leq U$.
6. Para u^* encontrar q^* tal que $|SNR_{u^*,q^*}| \geq |SNR_{u^*,q}|$ para todo $q \in A$ con $q \neq q^*$.
7. Actualizar $C_u = C_u + q \log_2(1 + SNR_{u,q})$ y $A = A \setminus \{q^*\}$.

Fin

3.3.2 Asignación de potencia

Después de asignar aquellos canales con las mejores condiciones para cada usuario en cada celda, se debe asignar el nivel de potencia a cada canal asignado controlando al mismo tiempo la interferencia que se generará en la celda, así como la QoS mínima necesaria para lograr transmisiones exitosas en dicho canal. Para evaluar la asignación de potencia, se utilizó el algoritmo genético (GA), este algoritmo se basa en la teoría de selección natural de Darwin, en el que los individuos más aptos son los que sobreviven después de un proceso de reproducción de varias etapas. Computacionalmente, el GA opera de forma iterativa actualizando un conjunto de soluciones (la población). Durante cada iteración, a cada miembro de la población se le evalúa su valor de aptitud mediante la función objetivo definida en la ecuación (3.3). A partir de una selección probabilística se seleccionan los miembros con mejor aptitud para combinar su información y generar una nueva población. La elección del GA para este problema está fundamentada en los siguientes puntos:

- El problema de asignación de recursos es un problema combinatorio que pertenece a la clase NP-hard por lo que una solución óptima no puede encontrarse en tiempo polinomial. Por otro lado, los GAs tienen la característica de lograr una convergencia rápida hacia un óptimo global, la habilidad para generar un conjunto de soluciones y operabilidad con cualquier número de restricciones y variables (lineales/ no lineales).
- Los GA siguen el concepto de evolución natural para elegir las mejores soluciones globales mediante el desarrollo de una función objetivo a través de un conjunto predefinido de probabilidades mediante el cual se desarrolla un proceso de búsqueda heurística a lo largo de un número adecuado de generaciones.
- La mayoría de los métodos de optimización se mueven desde un punto en la decisión del espacio hacia otro, utilizando una regla de transición para determinar el siguiente punto. Este método puede ser perjudicial ya que puede encontrar falsos picos en espacios de búsqueda multimodales. Por el contrario, el GA trabaja desde un conjunto de puntos simultáneos descubriendo varios picos simultáneamente [54].

El GA es ampliamente estudiado y utilizado en diversas aplicaciones y en la resolución de problemas que involucran HetNets, como por ejemplo en [55-58]. En la literatura se reportan aplicaciones de otros algoritmos heurísticos y metaheurísticos para

resolver problemas de asignación de recursos [24], [26], [59] [60]. Sin embargo, la evaluación y análisis comparativo con otros algoritmos se encuentra fuera del alcance de esta investigación.

El problema de optimización que se aborda en este trabajo de tesis es un problema combinatorio y de decisión, dado que de un conjunto de celdas pequeñas y usuarios desplegados en ellas se debe seleccionar, para cada canal asignado, la potencia de transmisión que minimice la interferencia producida en el sistema.

3.4 Conclusiones

En este capítulo se definió el modelo del sistema que se utilizará para evaluar el desempeño de la estrategia de coordinación de interferencia en una red UDN. En la evaluación se considerará dos escenarios: esquema de compartición de espectro y de partición de espectro. En el primero, todas las FBSs y la MC pueden reutilizar todo el ancho de banda, mientras que en el esquema particionado propuesto se adaptan las porciones de ancho de banda asignados a la red femtocelular y macrocelular con base a la cantidad de usuarios asociados a las mismas. La capacidad de la red será la métrica que evaluará la estrategia de asignación de potencia y el Algoritmo Genético permitirá encontrar la mejor asignación. Por simplicidad, la metodología para resolver el problema de asignación de recursos consistió en dividir el problema en dos etapas. La primera etapa, asigna un número de canales disponibles a cada usuario asociado a la estación base de acuerdo con las condiciones de propagación. La segunda etapa, asigna un nivel de potencia a cada canal tomando en cuenta la interferencia generada a otros usuarios en la red. En el siguiente capítulo se describe el procedimiento para resolver el problema de asignación de potencia mediante el Algoritmo Genético.

Capítulo 4

Algoritmo genético para la asignación de potencia

En este capítulo se describen las etapas del proceso de reproducción del Algoritmo Genético (Selección, Cruzamiento y Mutación) utilizado para resolver el problema de asignación de potencia en una red UDN. Se reportan algunos resultados del desempeño del Algoritmo Genético aplicando diferentes métodos de cruzamiento y tamaños de población inicial, sobre la capacidad de la red UDN y penalización de los usuarios (esto es, aquellos usuarios que no son atendidos). Además, se comparan los resultados con un escenario en el que solo se emplea asignación de potencias planas.

4.1 Descripción de la población inicial

La población inicial es un conjunto de soluciones denominadas cromosomas y cada cromosoma está compuesto por diversos genes, como se observa en la Figura 4.1. Cada gen del cromosoma representa, en este trabajo, la potencia asignada a un canal de un usuario en la red. Los dos aspectos importantes que se deben considerar en la población de un GA son la generación de la población inicial y el tamaño de la población.

El tamaño de la población depende de la complejidad del problema. Además, debe elegirse tomando en cuenta algunas consideraciones. Entre más grande es el tamaño de la población, el espacio de búsqueda será explorado ampliamente, pero el tiempo de convergencia para encontrar una solución confiable será de $O(n \log n)$ evaluación de funciones en donde n es el tamaño de la población [61]. Por otra parte, los GA son algoritmos flexibles, ya que existen una gran cantidad de métodos para realizar los procedimientos de selección, cruzamiento, mutación y reemplazo, lo que permite combinar e incluso modificar cada etapa de acuerdo con las necesidades de cada problema. De esta manera, se puede preservar la diversidad en las soluciones y explorar ampliamente el espacio de búsqueda aun si la población es pequeña [61, 62]. No obstante, idealmente la población inicial debe tener una gran cantidad de información (desde soluciones factibles hasta soluciones no factibles) para poder explorar todo el espacio de búsqueda. En la mayoría de los casos la población inicial se genera de forma aleatoria. Sin embargo, algunas veces se utilizan algunos algoritmos heurísticos para determinar buenas soluciones iniciales como punto de partida, si se cuenta con un conocimiento previo acerca del experimento.

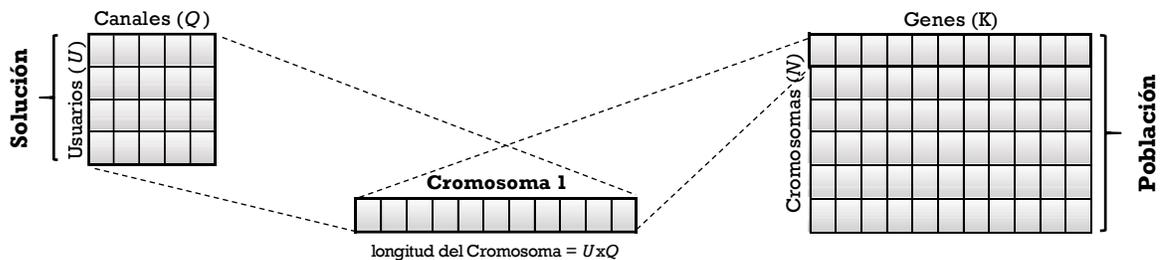


Figura 4.1. Estructura de la población inicial.

Para la generación de soluciones iniciales se consideró limitar las asignaciones de potencia de entre una potencia mínima $P_{mín}^{Rb}$ hasta una potencia máxima $P_{máx}^{Rb}$ por canal, con el motivo de generar cromosomas con potencias factibles. Es decir, si se asignan potencias muy altas, provocaría un excedente de potencia que violaría la restricción definida en (3.5), y se generarían soluciones no factibles. En la red UDN, asignar potencias altas generarían niveles altos de interferencia entre los usuarios y en consecuencia una gran cantidad de canales quedarían sin utilizar. Por otra parte, asignar potencias muy bajas, provocaría que los canales asignados ofrezcan niveles de QoS por debajo del mínimo requerido. La potencia no asignada no podría reasignarse a otros canales con mejores condiciones. La selección de los

límites de potencia para cada canal y el tamaño de la población se seleccionó de manera experimental y se analizan en la sección 4.7.2 y 4.7.4, respectivamente.

4.2 Definición de la Aptitud (fitness)

La aptitud de un individuo es un valor numérico que se obtiene con base en la función objetivo del problema y le otorga un nivel de prioridad a cada solución para considerarla en el proceso de generación de nuevas soluciones. La Aptitud refleja que tan buena es una solución con respecto a otras, sin embargo, es necesario que la función utilizada para calcularla sea adecuada y considere las restricciones de cada problema. Hay diferentes formas de controlar las restricciones en un GA [63], una de ellas es aplicando penalizaciones. Las soluciones son penalizadas disminuyendo su valor de aptitud en caso de que no cumplan con las restricciones establecidas. De esta manera, la solución tendrá menor prioridad de ser elegida en los siguientes procedimientos de reproducción del GA. Sin embargo, es posible que esta solución sea evaluada y considerada en los procedimientos de cruzamiento para que no se pierda información tras los ciclos de reproducción.

La función de aptitud utilizada en este trabajo se define de la siguiente manera;

$$A = \frac{C}{1 + \alpha P_1 + \beta P_2} \quad (4.1)$$

donde $\alpha \gg \beta$ son valores de peso constantes y C es la capacidad de la red obtenida a partir de la ecuación (3.3). La penalización P_1 (o por potencia máxima) se activa cuando un cromosoma asigna más potencia de la que una BS puede proporcionar (solución no factible). La penalización P_2 (o por usuarios no atendidos) se activa cuando se identifican usuarios sin canales adecuados para transmitir, esto es, canales con niveles de $SINR$ por debajo de un umbral mínimo. Esta penalización es suave y se incluye en el modelo para mantener la equidad en la red, es decir, se obliga al algoritmo de asignación de recursos a que asigne a todos los usuarios al menos un canal con una QoS mínima.

4.3 Procedimiento de Selección

Durante el procedimiento de Selección se eligen dos individuos (denominados padres) para el cruzamiento de información contenida en cada individuo. El propósito de la selección es elegir aquellos individuos con mayor aptitud para que sus descendientes tengan

mejores características y, por consecuente, una mayor aptitud que sus padres. La selección por Clasificación asigna una probabilidad de selección proporcional al lugar que ocupa cada individuo en la clasificación que se obtiene al ordenar a los individuos de forma creciente por su valor de aptitud. Esta selección se utiliza con frecuencia en poblaciones con valores de aptitud, ya sea, o muy similares o muy diferentes. Por considerar dos penalizaciones en este trabajo de tesis los valores de aptitud tienden a ser muy diferentes y, para que el cruzamiento considere tanto soluciones factibles como no factibles, se eligió el método de Clasificación sobre el método de selección Rueda de Ruleta (Roulette Wheel) [61]. En los trabajos reportados en [55-58] los autores utilizan la Rueda de Ruleta como método de selección, en estos casos, el método es apropiado ya que no toman en cuenta los efectos de la interferencia, por lo que no hay una consecuencia sobre la capacidad de la red si se asigna eficientemente o no la potencia. Se ha observado que al utilizar el método Rueda de Ruleta en los casos en los que las funciones de aptitud incluyen penalizaciones, una sola solución que cumpla con alguna de las penalizaciones tendrá mayor probabilidad de ser seleccionada una y otra vez, lo que generará poca diversidad en el conjunto de soluciones (por los cruces entre los mismos padres) y que la población converja prematuramente hacia un óptimo local.

Un ejemplo de las probabilidades asignadas a cada cromosoma para ser elegidos en el proceso de cruzamiento entre el método de Rueda de Ruleta y el método de Clasificación se muestra en la Figura 4.2. Se puede observar en la Figura 4.2(a) que cuando se aplica el método de selección Rueda de Ruleta el "Cromosoma 1" cumple con las penalizaciones de la función de aptitud, por lo que presenta mayor probabilidad de ser seleccionado por sobre los Cromosomas 2, 3, y 4. Mientras que cuando se aplica el método de Selección (Figura 4.2(b)), las probabilidades de que los Cromosomas 2, 3, y 4 sean seleccionados para el cruzamiento se incrementan. Lo anterior permite que haya una mayor cantidad de cruces con cromosomas no factibles aumentando, con esto, la diversidad en las soluciones. La probabilidad asignada por la selección por clasificación se determina a partir de la siguiente expresión;

$$X_i = \frac{2R_i}{K(K+1)} \quad (4.2)$$

donde K es el tamaño de la población; R_i es la posición del individuo i con respecto a la capacidad en orden descendiente.

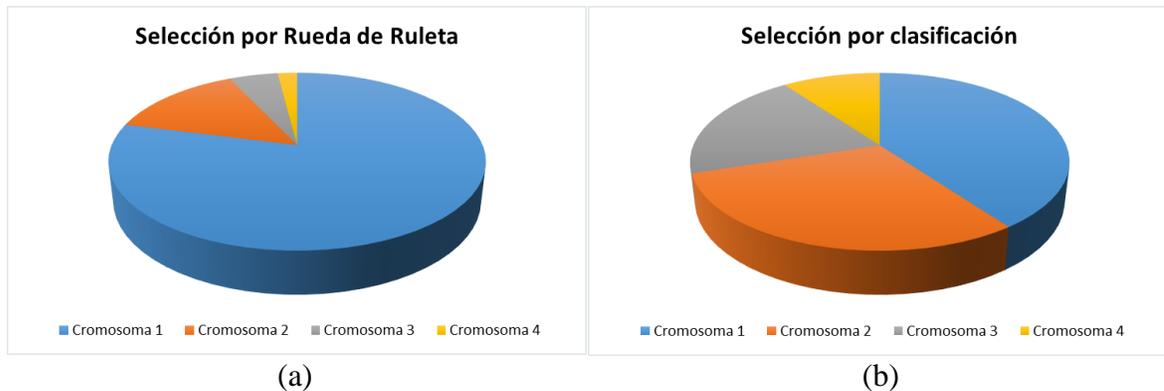


Figura 4.2. Probabilidad de que un cromosoma sea seleccionado de la población: (a) Selección por Rueda de Ruleta. (b) Selección por Clasificación.

4.4 Procedimiento de Cruzamiento (Recombinación)

El Cruzamiento es el proceso de tomar dos soluciones como padres y reproducir un hijo con el intercambio de su información. El método de cruzamiento más simple consiste en seleccionar aleatoriamente una posición en dos cromosomas e intercambiar la información de un lado de un padre y complementarla con el otro lado del otro padre. Este método es denominado recombinación de un punto [61], un ejemplo de aplicación de esta estrategia se muestra en la Figura 4.3. Se puede observar que se ha seleccionado una posición aleatoria en ambos padres y, a partir de este punto, se intercambia la información entre los padres para generar a los hijos.

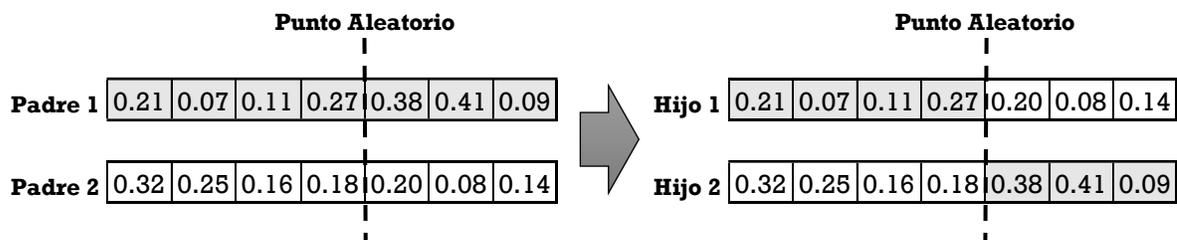


Figura 4.3. Ejemplo del proceso de cruzamiento por recombinación de un punto.

4.5 Procedimiento de Mutación

Después de aplicar el procedimiento de Cruzamiento, los descendientes se someten a un proceso de mutación. La mutación previene que el algoritmo quede atrapado en un mínimo local. Mientras que el cruzamiento se utiliza para aprovechar las características de soluciones actuales y encontrar las mejores, la mutación se utiliza para mejorar la exploración de todo el espacio de búsqueda. Existen diversas formas de realizar el procedimiento de mutación

según el tipo dato a optimizar, por ejemplo; Binario, Hexadecimal, o Numérico [61]. En este trabajo se utilizó el procedimiento de mutación reportado en [55-58], en el cual se obtiene una probabilidad del 1% de que un elemento en los cromosomas de los descendientes sea remplazado por un valor de potencia seleccionado aleatoriamente con distribución uniforme entre el intervalo $[P_{min}^{Rb}, P_{max}^{Rb}]$. Algunos resultados obtenidos en este trabajo muestran que una probabilidad de mutación mayor al 1% altera la información de los descendientes de tal manera que la aptitud de la población no mejore, un valor de probabilidad de mutación menor al 1%, tendría un efecto poco significativo sobre el valor de aptitud del cromosoma, ya que tardaría demasiados ciclos para activarse el proceso de mutación o en el peor de los casos no se active. La Figura 4.4 muestra un ejemplo de un cromosoma seleccionado para mutación, aleatoriamente se seleccionó un gen dentro del cromosoma y su valor de potencia se modificó por un valor de potencia que se obtiene del intervalo de potencias $[P_{min}^{Rb}, P_{max}^{Rb}]$. En este caso se puede observar que se modificó del valor 0.11 por el valor de potencia de 0.32.

0.28	0.31	0.43	0.24	0.15	0.12	0.21	0.07	0.11	0.27	0.38	0.41	0.09
└───┘												
0.28	0.31	0.43	0.24	0.15	0.12	0.21	0.07	0.32	0.27	0.38	0.41	0.09

Figura 4.4. Ejemplo de mutación de un cromosoma.

4.6 Procedimiento de Reemplazo

El Reemplazo es la etapa final del proceso del GA. Con este procedimiento se seleccionan dos padres de la población y, a partir de ellos, se producen dos hijos. Sin embargo, estos 4 cromosomas no pueden regresar a la población inicial, por lo que dos de ellos deben ser reemplazados. Aunque las probabilidades de generar mejores descendientes después del proceso de reproducción sean muy altas, no garantiza que los hijos generados tengan mayor aptitud, ni que aporten mayor diversidad a la población para evitar que las soluciones converjan prematuramente a óptimos locales. Para poblaciones pequeñas, la diversidad se reduce rápidamente y no es posible observar el principio de la supervivencia del más apto. Por lo que se debe utilizar un método de reemplazo adecuado para conservar la diversidad entre las soluciones y evitar una convergencia prematura hacia una solución alrededor de un óptimo local. Por esta razón, se utilizó el método de reemplazo CD/RW reportado en [62], compuesto por dos estrategias de reemplazo, la primera se basa en la

contribución en la diversidad (CD) y la segunda en el reemplazo del peor (RW), en las cuales el hijo se incluye en la población de soluciones siempre y cuando tenga una CD o una aptitud más alta que el padre, respectivamente.

La CD de un cromosoma se define como la similitud entre él mismo y los demás individuos de la población, es decir la diferencia entre los genes de los cromosomas, y se calcula a partir de la distancia de Hamming, distancia Euclidiana, entre otras. En este trabajo la CD se define como la suma de las diferencias entre potencias de cada cromosoma.

La Figura 4.5 muestra el diagrama de flujo de la estrategia de reemplazo CD/RW. Primeramente, se determina al hijo con mayor aptitud generado después del cruzamiento y mutación Z_h . Después, se crea un subconjunto Z_{min} de a los individuos de la población con aptitud menor a la que posee Z_h . Luego, se compara la CD de Z_{min} y Z_h , respecto a la población (removiendo Z_{min} de la población). Z_h reemplaza al miembro de la población con menor CD denominado Z_p , siempre y cuando aporte una mayor CD. De esta manera se garantiza la inclusión de individuos con mejores valores de aptitud y mayor CD en la población, incrementando la diversidad de la población y mejorando la calidad de las soluciones. Si Z_h no provee mayor diversidad que Z_p , se utiliza la estrategia RW.

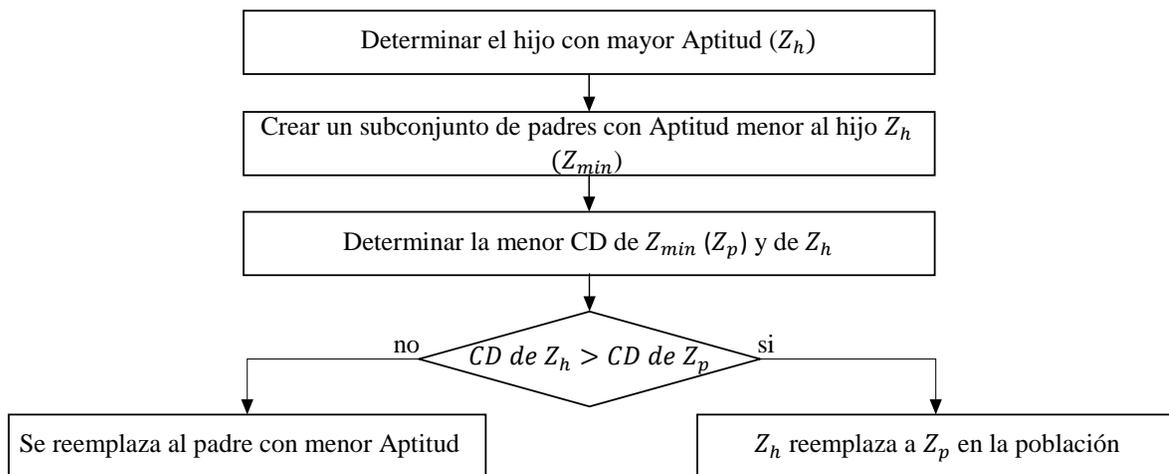


Figura 4.5. Diagrama de flujo del reemplazo CD/RW.

4.7 Definición de parámetros y evaluación del algoritmo genético

Con el objetivo de seleccionar los parámetros adecuados para ejecutar el GA, se realizó una evaluación experimental de las distintas estrategias para cada procedimiento de

la reproducción del GA. Las técnicas y parámetros seleccionados son aquellos con los que se encontraron los mejores resultados de capacidad y número de usuarios atendidos en una red UDN.

Para esta evaluación se consideró una red UDN en un esquema de compartición de espectro en lugar del de partición de espectro, ya que en el primero existe la opción de que se genere interferencia inter-celular, lo que representa mayor complejidad al tratar de coordinar los recursos disponibles [45]. Además, la dimensionalidad es mayor debido a que todos los canales están siendo utilizados en conjunto por las FBS y la MBS. En otras palabras, cada cromosoma tiene una longitud igual al número de canales por el número de usuarios, como se observa en la Figura 4.1.

Las BSs y los UEs utilizados durante la evaluación se desplegaron uniformemente sobre el área de cobertura de la MBS y los UEs se asociaron a las FBS más cercana si se encuentra dentro del radio de cobertura de las FBS, en caso contrario son asociados a la MBS. Los parámetros de simulación de la red UDN se describen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Parámetros de simulación de la red UDN utilizados durante la obtención de los valores de las variables para el GA.

Parámetro	Valor
Ancho de banda del canal	180 KHz
Cantidad de canales	80
Densidad de BS	2500 BS/Km ²
Densidad de potencia del ruido	-174 dBm/Hz
Densidad de usuarios	600 UE/Km ²
Potencia de la FBS	24 dBm
Potencia de la MBS	46 dBm
Radio de la FBS	25 m
Radio de la MBS	250 m
<i>SINR_{th}</i>	9.4

4.7.1 Evaluación de la capacidad utilizando un GA

La Figura 4.6 muestra el efecto de las penalizaciones de potencia (Figura 4.6(a)) y de usuarios sin servicio (Figura 4.6(b)) con respecto al número de iteraciones del GA. En ellas se observa que, al aplicar el GA para coordinar la potencia, las restricciones de potencia

excedente y usuarios sin servicio se cumplen en comparación con una asignación por Potencias Planas (PP).

En la Figura 4.7 se puede observar el comportamiento de la capacidad de la red UDN cuando se coordina la potencia con respecto a cuando se aplica una asignación por PP, en ella se identifica la zona en la que se encuentran soluciones penalizadas, de acuerdo con la Figura 4.6. Aunque en la asignación de potencia por PP (Figura 4.6(a)) no se incluye una penalización de potencia, debido a que se asigna equitativamente a todos los canales, si existe un deterioro significativo sobre la cantidad de usuarios que se quedan sin servicio (Figura 4.6(b)) y en la capacidad de la red (Figura 4.7) con respecto a cuando se considera una estrategia de coordinación de interferencia.

En la Figura 4.8 se muestra con mayor detalle la zona de soluciones penalizadas o soluciones no factibles. En la región marcada como P1, los valores de capacidad inician con valores altos, esto se debe a que la potencia asignada excede la potencia disponible de las BS (violando la restricción 3.5). Para solucionar lo anterior, se reasignaron potencias de menor nivel. En la región P2, se encuentran soluciones factibles, pero en estas soluciones se presentan casos en los que cierto número de usuarios no tienen asignados canales con una QoS mínima para transmitir (Figura 4.6(b)). Es por eso que a algunos canales se les reduce la potencia de transmisión o dejen de utilizarse para mejorar la condición de propagación de aquellos usuarios que no cuentan con canales.

En la Figura 4.8, se observa que la penalización de potencia se cumple con pocas iteraciones del GA, debido a su alta prioridad de aptitud (referirse a ecuación (4.1)). Mientras se mantenga una alta cantidad de iteraciones esta penalización P1 se cumplirá. Es decir, la condición de paro del algoritmo genético es de 3000 iteraciones, mientras que las soluciones no factibles (región P1) son descartadas de la población inicial aproximadamente después de las 100 iteraciones, por lo tanto, los factores considerados para seleccionar los parámetros del GA son la capacidad de la red y la cantidad de usuarios atendidos.

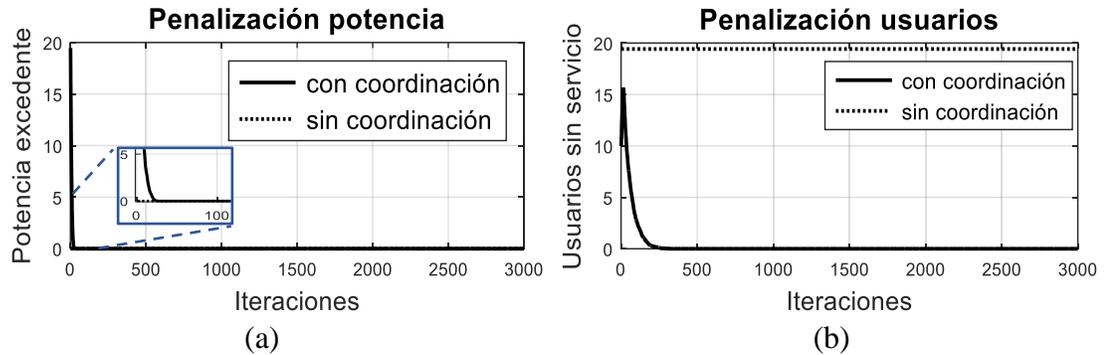


Figura 4.6. Comparación de penalizaciones tras ciclos del GA: (a) Penalización de potencia. (b) Penalización de usuarios. Con y sin coordinación de potencia.

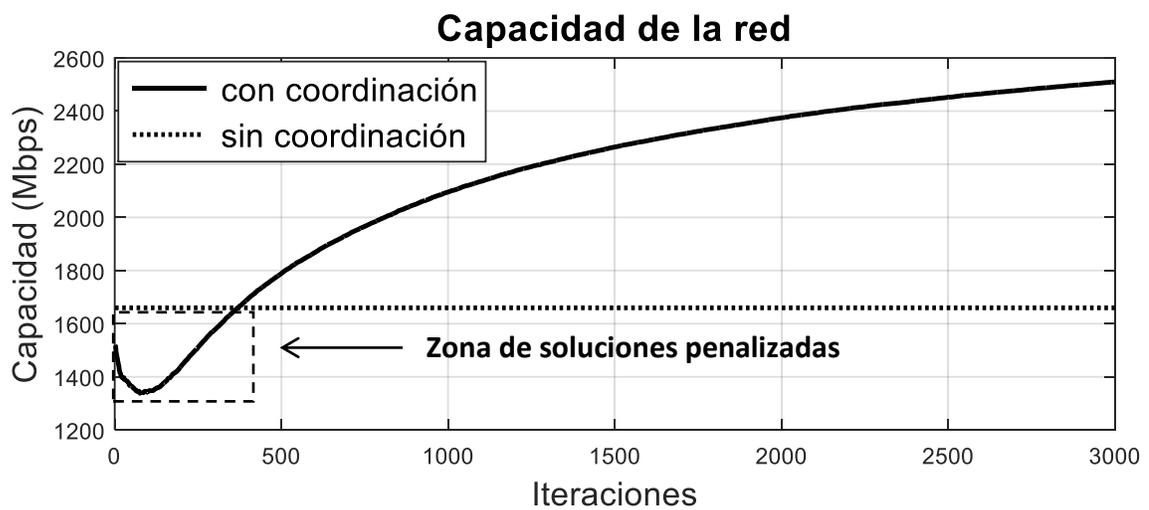


Figura 4.7. Evaluación comparativa de la capacidad de la red UDN cuando se aplica una estrategia de coordinación de potencia con respecto a utilizar PP (sin coordinación de la potencia).

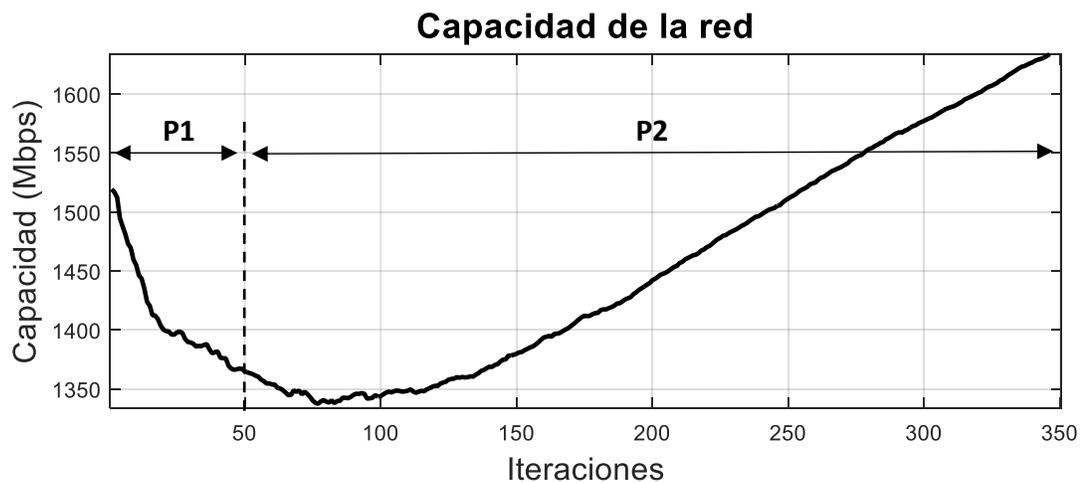


Figura 4.8. Capacidad de la red en la zona de penalizaciones.

4.7.2 Parámetros de la población inicial

Como se mencionó en la sección 4.1, para que el GA logre que las BSs asignen los valores de potencia sin violar la restricción (3.5), se definió un rango de valores de potencia $[P_{min}^{Rb}, P_{max}^{Rb}]$ factibles y apropiados para asignarse. Primeramente, se establece un valor de potencia de referencia, en este caso, denominado potencia promedio, P_{prom}^{Rb} . Este valor es el equivalente a la potencia que se asignaría, equitativamente, a cada BS de la red si se aplicara la estrategia de asignación de potencias planas y, se calcula a partir de la ecuación (4.2);

$$P_{prom}^{Rb} = \frac{P_{max}^i}{Q^i}, \forall i \quad (4.2)$$

en donde P_{prom}^{Rb} es la relación entre la potencia total disponible P_{max}^i y el número de canales disponibles Q^i en la BS_i .

Posteriormente, el límite inferior P_{min}^{Rb} y superior P_{max}^{Rb} se determinaron de forma experimental con base a los mejores resultados obtenidos de la evaluación de las métricas de capacidad y usuarios sin servicio. Para lo anterior, se consideraron arbitrariamente dos conjuntos de valores de potencia, el conjunto-1 incluye valores de potencia menores a P_{prom}^{Rb} formado por $[\text{cero}, \frac{P_{prom}^{Rb}}{4} \text{ y } \frac{P_{prom}^{Rb}}{2}]$, mientras que el conjunto-2 está conformado por valores de potencia igual o mayores a P_{prom}^{Rb} , $[P_{prom}^{Rb}, 2 * P_{prom}^{Rb}, 4 * P_{prom}^{Rb}]$. Finalmente, los valores que se definirán como P_{min}^{Rb} y P_{max}^{Rb} serán aquellos valores de potencia del conjunto-1 y conjunto-2 respectivamente, que logren los mejores resultados de capacidad y usuarios atendidos.

En la Figura 4.9 se presenta la evaluación de capacidad y usuarios sin servicio para los diferentes valores de potencia del conjunto-1. Se puede observar en la Figura 4.9(b) que cuando se aplica el valor de potencia igual a cero como límite inferior el sistema deja desatendidos a un mayor número de usuarios en comparación con los otros dos valores de potencia el conjunto-1. Lo anterior se debe a que se asignan potencias muy bajas, desaprovechándose parte de la potencia disponible. De los tres valores de potencia del conjunto-1, el que permite que el algoritmo de asignación de potencia logre atender a la

mayor cantidad de usuarios en la red es $\frac{P_{prom}^{Rb}}{2}$, considerándose este valor como el límite inferior P_{min}^{Rb} .

De la misma forma, en la Figura 4.10 se puede observar el desempeño de la red considerando los valores de potencia del conjunto-2. En la Figura 4.10(a) se observa que cuando se utiliza el valor de $2 * P_{prom}^{Rb}$ como límite superior de potencia se logra 19.8% más capacidad en la red con respecto a cuando se utiliza un valor de P_{prom}^{Rb} y del 23.2% con respecto a utilizar el valor de $4 * P_{prom}^{Rb}$. De la Figura 4.10(b), se concluye que cualquiera de los valores del conjunto-2 que se utilice como límite superior de potencia, el sistema logra atender a todos los usuarios. Lo anterior tiene el siguiente razonamiento; utilizar un límite superior de potencia elevado dificulta obtener buenas soluciones por la ventana tan amplia de posibles valores de potencia que son posibles de asignar a la población inicial y durante el procedimiento de mutación, esto provoca que las soluciones converjan rápidamente (alrededor de 800) hacia un óptimo local. Por lo anterior, en este trabajo se consideró como el límite superior P_{max}^{Rb} , el valor de $2 * P_{prom}^{Rb}$.

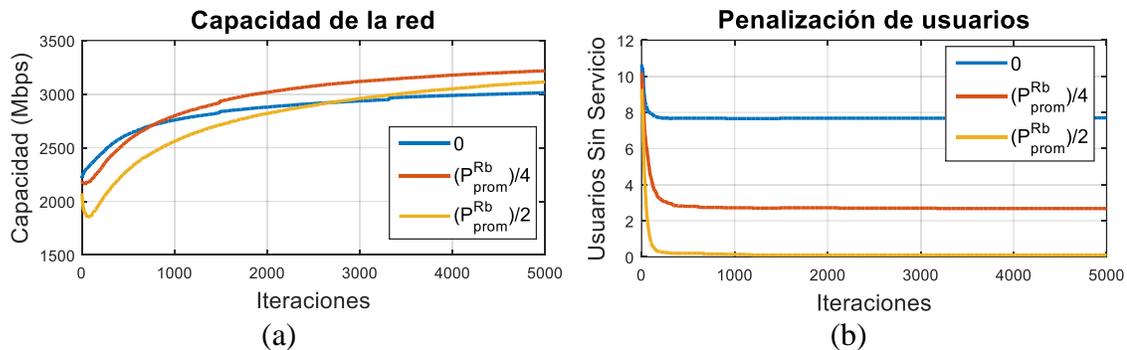


Figura 4.9. Evaluación del límite inferior de potencia para la población inicial: (a) Capacidad de la red. (b) Penalización de usuarios.

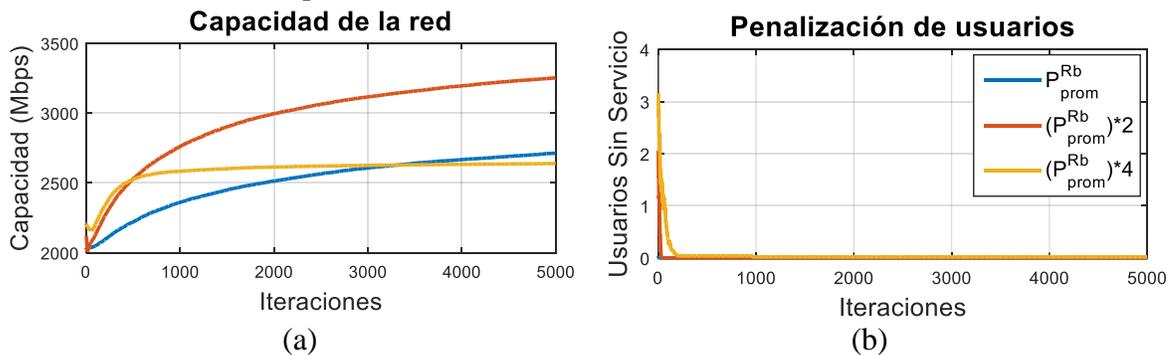


Figura 4.10. Evaluación del límite superior de potencia para la población inicial: (a) Capacidad de la red. (b) Penalización de usuarios.

4.7.3 Selección del método de cruzamiento

Como se mencionó en la sección 4.4, el método más simple de cruzamiento es el de recombinación de un punto. Aunque este método es ampliamente utilizado por su sencillez, es un método que se utiliza en problemas con cromosomas binarios. En este trabajo de tesis los cromosomas están formados por valores de potencia que pertenecen al conjunto de los números reales, por lo que para determinar cuál método de cruzamiento es el más apropiado para el problema de asignación de potencia en UDN, fue necesario evaluar algunos de ellos, tales como; Doble Punto, Método Aritmético (AMXO), Operador Heurístico (HX), Operador Laplace (LX) y Operador BLX- α , todos ellos se reportan en [64].

En la Figura 4.11 se observa el comportamiento de la capacidad de la red a partir de los diferentes métodos de cruzamiento considerados para la asignación de potencia. Se puede observar que los métodos de cruzamiento ofrecen un desempeño similar. Sin embargo, en la Figura 4.12 se observa que los métodos Doble Punto y AMXO presentan el desempeño más pobre al tratar de asignar canales a los usuarios con una QoS mínima. Con respecto a la capacidad de la red, en la Figura 4.11 el método Operador BLX- α es mejor en un 17.8%, 11.2%, 7.8% y 6% con respecto a los métodos HX, LX, Doble Punto y AMXO, respectivamente. De acuerdo con los resultados que se presentan en las Figuras 4.11 y 4.12 se eligió el método BLX- α , debido a que con este método de cruzamiento se logra una mayor capacidad y un menor número de usuarios sin servicio con menor número de iteraciones.

El operador de cruzamiento BLX- α empareja a dos padres para producir un solo descendiente. El cromosoma descendiente está definido por la ecuación (4.3);

$$y = (y_1, \dots, y_i, \dots, y_n) \quad (4.3)$$

donde y_i es un número seleccionado aleatoriamente con distribución uniforme entre el intervalo $[lb_i - I\alpha, ub_i + I\alpha]$. Los términos de los intervalos se calculan a partir de la ecuación (4.4).

$$\begin{cases} ub_i = \max(x_i^{(1)}, x_i^{(2)}) \\ lb_i = \min(x_i^{(1)}, x_i^{(2)}) \\ I = ub_i - lb_i \end{cases} \quad (4.4)$$

donde ub_i y lb_i indican el límite superior e inferior del valor máximo y mínimo de los padres $x_i^{(1)}$ y $x_i^{(2)}$ en la posición i , respectivamente; α es un valor aleatorio uniforme entre $[0,1]$.

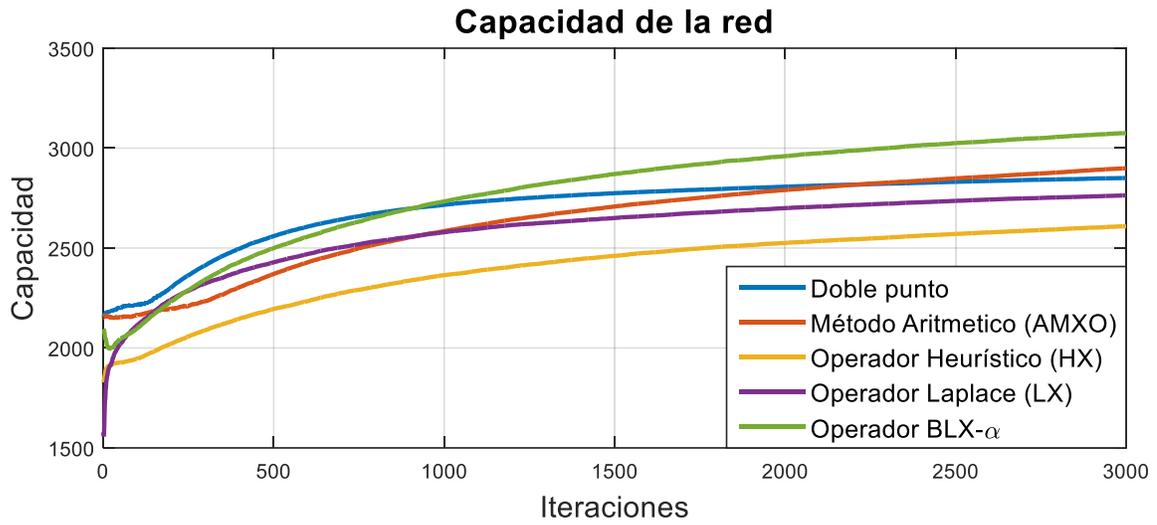


Figura 4.11. Evaluación de la capacidad de la red utilizando diferentes métodos de cruzamiento.

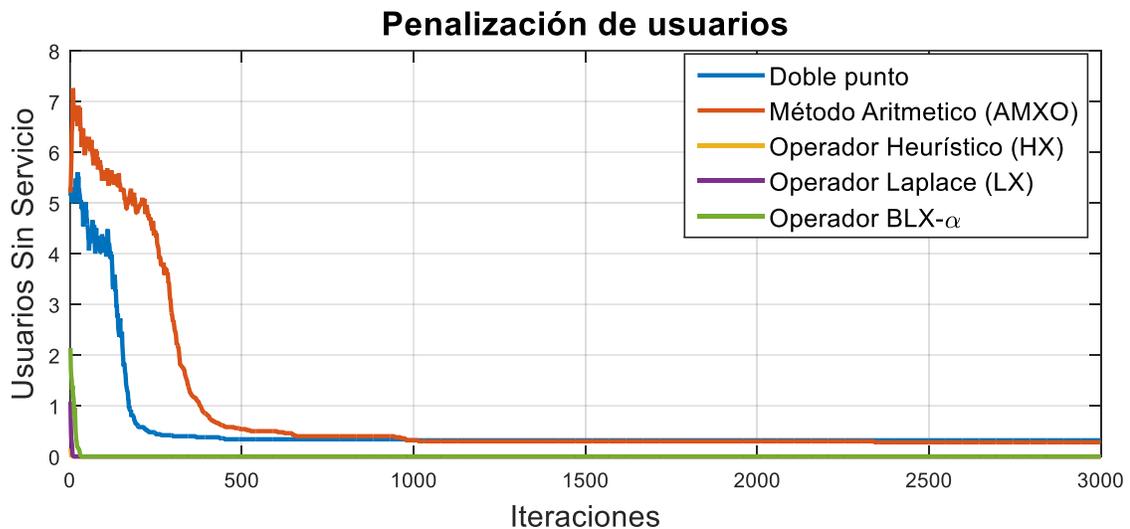


Figura 4.12. Evaluación de la penalización de usuarios utilizando diferentes métodos de cruzamiento.

4.7.4 Selección del tamaño de la población y criterio de detención

Por último, se analizó el impacto que tiene el tamaño de la población en la capacidad de la red utilizando el GA con los parámetros y técnicas seleccionadas anteriormente.

La Figura 4.13 muestra la capacidad de la red obtenida a partir de tres tamaños de población diferentes (30, 50, 100). Se sabe que entre menor es el tamaño de la población, menor será el tiempo computacional para encontrar una solución. Por otro lado, entre mayor es el tamaño de la población, mayor es la información que aportan los cromosomas en la

población. No obstante, como se mencionó en la sección 4.6, se eligieron procedimientos para mantener la diversidad de las soluciones, tales como el método de selección por clasificación y el método de reemplazo CD/RW. Además, el método de cruzamiento BLX- α y los límites impuestos en los canales ayudan a combinar información entre cromosomas y encontrar soluciones factibles rápidamente de acuerdo con los resultados experimentales obtenidos, provocando una mejora en la población inicial. Como resultado, una población con 30 individuos resulta en una mejora de la población y la sustitución será más rápida que utilizar una población de 100 individuos (ver Figura 4.13). De acuerdo con lo antes mencionado y a los resultados de capacidad de la red ofrecidos por los distintos tamaños de población, se eligió un tamaño de población de 30 cromosomas.

Con respecto al criterio de detención se consideró un número máximo de iteraciones. En la Figura 4.14 se muestra el comportamiento de las penalizaciones respecto al incremento de iteraciones de la evaluación de la Figura 4.13. Tanto en 4.14(a) como en 4.14(b) el algoritmo encuentra soluciones que cumplen con las penalizaciones en aproximadamente 100 iteraciones. Por lo tanto, el criterio de detención se basó en la capacidad ofrecida por la red y los incrementos de capacidad respecto a un número de iteraciones.

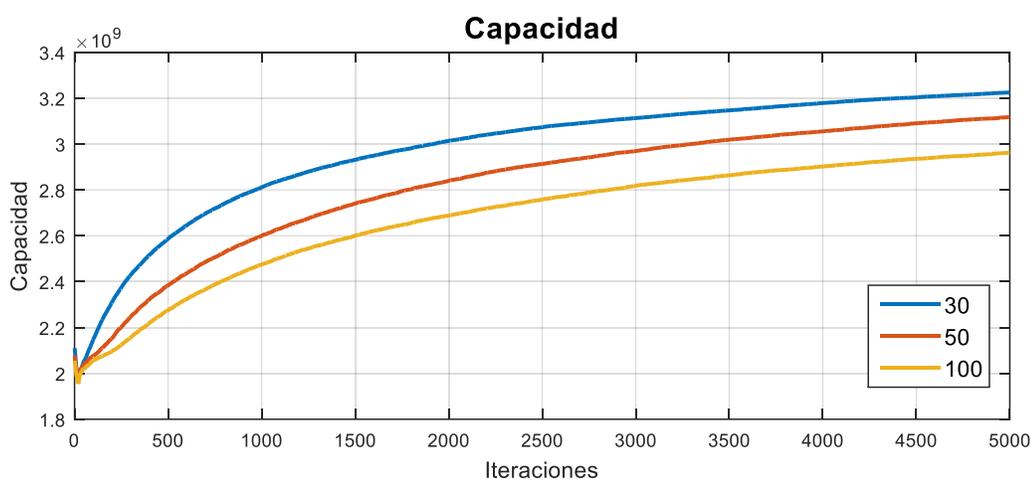


Figura 4.13. Evaluación de la capacidad de la red utilizando diferentes tamaños de población inicial.

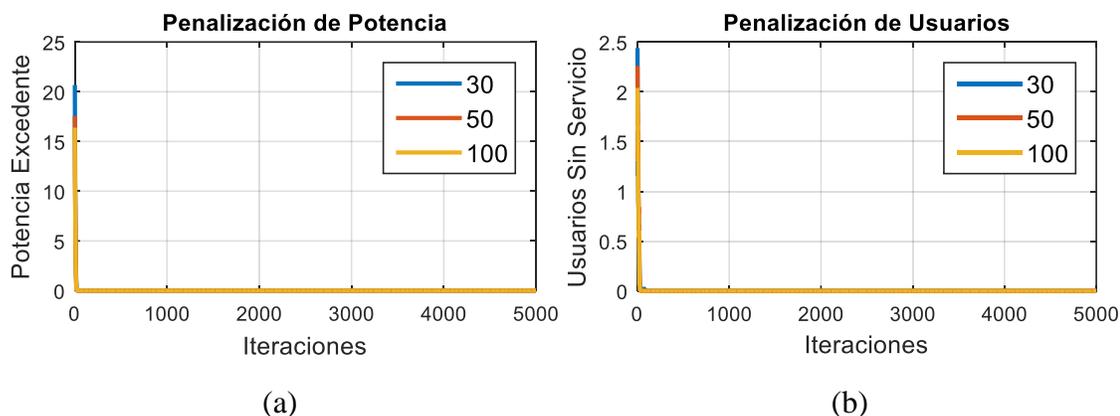


Figura 4.14. Evaluación de las penalizaciones de la red utilizando diferentes tamaños de la población inicial: (a) Penalización de potencia. Penalización de usuarios.

La Tabla 4.2. muestra las ganancias en capacidad con respecto al número de iteraciones (cada 1000 iteraciones), tomando como punto inicial el número de iteraciones en el cual se cumplen las penalizaciones (100 iteraciones). En la tabla se observa que el incremento más significativo es de 100 a 1000 iteraciones, con un 40.97% de incremento en la capacidad, mientras que el menos significativo es de 4000 a 5000 iteraciones, con un 1.48% de incremento en la capacidad. Lo anterior significa que durante las primeras iteraciones se encuentran las mejores soluciones. Por tal motivo se eligió el criterio de detención 3000 iteraciones máximas, debido a que para mayores iteraciones la capacidad tendría aumentos menores al 2% y el tiempo computacional se incrementa exponencialmente.

Tabla 4.2. Resumen del incremento en la capacidad cada 1000 iteraciones para la decisión del criterio de detención.

Número de Iteraciones	100	1000	2000	3000	4000	5000
Capacidad (Gbps)	1.994	2.811	3.014	3.113	3.178	3.225
Ganancia	-	40.97%	7.22%	3.28%	2.09%	1.48%

4.8 Conclusiones

En este capítulo se definió la herramienta utilizada para la asignación de potencias en la red UDN. Además, se definieron los métodos seleccionados para cada procedimiento. Se adaptó la función objetivo por medio de penalizaciones para mantener una equidad entre las asignaciones de potencia tomando en cuenta el número de usuarios con una QoS mínima para transmitir. La probabilidad de mutación del 1%, la selección por clasificación y el método de

reemplazo CD/RW fueron elegidos de acuerdo con lo reportado en la literatura. Mientras que, los límites de potencia, el tamaño de la población, el número de iteraciones del GA y el método de cruzamiento se seleccionaron de acuerdo con los resultados experimentales obtenidos en este capítulo. La tabla 4.3 muestra un resumen de los parámetros seleccionados para aplicar el algoritmo genético en el problema de asignación de potencia.

Tabla 4.3. Resumen de los parámetros seleccionados para el algoritmo genético.

Criterio de paro	3000 iteraciones
Cruzamiento	BLX- α
Método de Reemplazo	CD/RW
Método de Selección	Clasificación
Mutación	1%
Población inicial	Generación aleatoria $[\frac{P_{max}^i}{4Q^i}, \frac{2P_{max}^i}{Q^i}]$
Tamaño de la población	30 cromosomas

Capítulo 5

Análisis de Resultados

La estrategia para resolver el problema de asignación de potencia descrito en el capítulo anterior tiene como objetivo coordinar la interferencia tomando en consideración las condiciones de los usuarios en la red. Con esto, es posible incrementar la cantidad de usuarios atendidos en el sistema en un instante de tiempo, y asignarles los recursos necesarios para aumentar su capacidad de datos. En este capítulo se presenta un análisis de los resultados obtenidos del método de asignación de potencias evaluado en una red UDN, bajo los esquemas de partición de espectro y compartición de espectro. El escenario de evaluación considera especificaciones técnicas de los sistemas UDN necesarios para un contexto 4G y 5G [52]. La estrategia propuesta en este trabajo se compara con una asignación de potencias sin coordinación esto es, asignar indistintamente el mismo nivel de potencia en cada BS.

5.1 Configuración del escenario de simulación

En este trabajo se consideró el despliegue de una red UDN como escenario de evaluación del algoritmo de asignación de recursos propuesto. El modelo UDN considerado consiste de una MBS de 250 m de radio de cobertura [52] y sobre ella se despliegan de entre

50 y 2500 FBS por kilómetro cuadrado para lograr densidades recomendadas desde sistemas 4G hasta UDN [52]. La ubicación de cada FBS sigue una distribución uniforme sobre el área de cobertura de la MBS. Sin embargo, se asume que el despliegue de las FBS es determinado por los operadores. Es decir, cada FBS se encuentra separada por una distancia mínima de 16 metros entre cada BS para lograr una mejor distribución de FBS y evitar interferencia innecesaria de BS cercanas entre sí. Los usuarios se despliegan uniformemente sobre el área de cobertura de la MBS con densidades de usuarios (DUE) de 100, 300 y 600 por kilómetro cuadrado. Una densidad de 300 usuarios por kilómetro cuadrado es una densidad típica para un sistema 5G [65]. Mientras que una densidad 600 usuarios representa un escenario UDN [52]. Los umbrales mínimos de *SINR* considerados son 9.4 y 22.4 dB para garantizar una QoS mínima en las transmisiones [56]. La potencia de transmisión total en la MBS y FBS es de 46 dBm y 24 dBm, respectivamente [44]. Los radios de cobertura de las FBS se consideran como mínimo de 10 metros y máximo de 25 metros para observar el efecto de la descarga de usuarios de la MBS a las FBS sobre la capacidad de la red y la atención de usuarios. La red UDN utiliza un esquema de acceso OFDMA con un ancho de banda B dividido en 60 canales de 180 KHz de ancho de banda cada uno. Para incluir un desvanecimiento en cada canal se consideró el desvanecimiento de gran escala representado por las pérdidas por propagación (PL) y el desvanecimiento multitrayectoria o de pequeña escala modelado como una variable aleatoria con distribución Rayleigh [29], generada a partir de dos variables aleatorias independientes $X \sim N(0,1)$ y $Y \sim N(0,1)$ en donde el valor de magnitud del desvanecimiento de Rayleigh es $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$. Los parámetros de simulación se describen en la Tabla 5.1. Para lograr una asignación de canales equitativa se utilizó el algoritmo Proportional Fair (PF) como se describió en la sección 3.2.1. La asignación de potencia a cada canal asignado se realizó mediante la propuesta de coordinación de interferencia descrita en el Capítulo 4. Con la finalidad de comparar el desempeño de la propuesta de coordinación de interferencia mediante el algoritmo genético (GA), también se evaluó la capacidad de la UDN aplicando una estrategia de potencias planas (PP), esto significa que a cada canal se le asigna la misma potencia. Bajo este escenario, la asignación de potencia no toma en cuenta las condiciones de propagación de los usuarios ni la carga de tráfico de las BSs.

Tabla 5.1. Parámetros de simulación para la evaluación de la red UDN.

Parámetro	Valor
Ancho de banda del canal	180 KHz
Cantidad de canales	60
Cantidad de usuarios	19/59/118
Densidad de potencia del ruido	-174 dBm/Hz
Iteraciones del GA	3000
Parámetro de desvanecimiento Rayleigh	1
Población inicial del GA	30
Potencia de la MBS	46 dBm
Potencia de la FBS	24 dBm
Radio de la FBS	10 y 25 m
Radio de la MBS	250 m
$SINR_{th}$	9.4 y 22.4 dBm

5.2 Estaciones base

Para evaluar el desempeño de la estrategia de coordinación de interferencia mediante una asignación óptima de potencia, se consideraron densidades de estaciones base (DBS) de 50, 250 y mayores a 1000 BS/Km² correspondientes a escenarios LTE, 5G y UDN, respectivamente.

Las densidades de usuarios evaluados corresponden a situaciones en donde la cantidad de canales es mayor a la cantidad de usuarios (DUE:100), la cantidad de canales es la misma que la cantidad de usuarios (DUE:300) y la cantidad de canales es menor a la cantidad de usuarios (DUE:600), es decir, el operador o BS central debe decidir como asignar sus recursos para lograr la mayor capacidad de la red, mientras mantiene a todos o la mayor cantidad de usuarios con canales que cumplan la QoS mínima para transmitir.

5.2.1 Análisis de la evaluación de una red UDN con Densidad de Usuarios baja (DUE:100 UE/km²)

En las Figuras 5.1(a)-(d) se presentan la evaluación de capacidad de una UDN cuando se aplica: (i) la estrategia de coordinación de interferencia (GA) y, (ii) potencias planas (PP) o sin coordinación de interferencia, ambas en escenarios de compartición de espectro (Comp) y partición de espectro (Part). El análisis de capacidad de transferencia de datos (data rate) está en función del incremento de estaciones base por km² (de 50 a 2500 BS/ km²). En todos

los casos la DUE en la red es de 100 UE/Km² y se aplicó, en cada caso, una asociación por distancia (A1) y por pérdidas por trayectoria (A2).

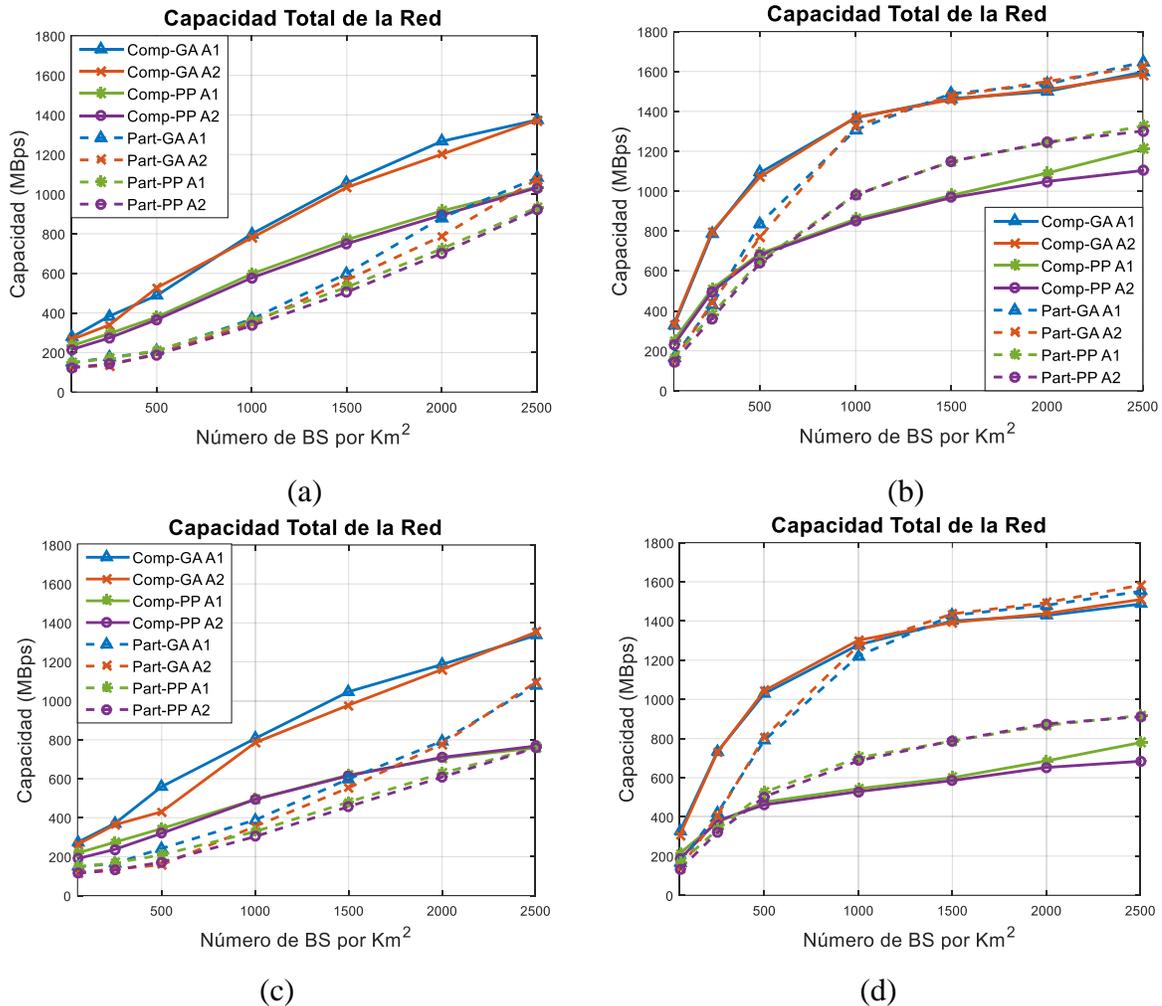


Figura 5.1. Evaluación de la Capacidad de la UDN con respecto al incremento de BS, se consideró una densidad de usuarios DUE=100 y las siguientes condiciones: (a) $SINR_{th}$:9.4 dB, R_f :10 m., (b) $SINR_{th}$:9.4 dB, R_f :25 m., (c) $SINR_{th}$:22.4 dB, R_f :10 m., (d) $SINR_{th}$:22.4 dB, R_f :25 m.

Para la obtención de las Figuras 5.1(a) y 5.1(c) se consideró que las FBS ofrecen un radio de cobertura de 10 metros y un $SINR$ -umbral ($SINR_{th}$) de 9.4 dB y 22.4 dB respectivamente. Mientras que en las Figuras 5.1(b) y 5.1(d), las FBS ofrecen un radio de 25 metros y un $SINR_{th}$ de 9.4 dB y 22.4 dB respectivamente. Se puede observar en las Figuras 5.1(a)-(d) que conforme aumenta la cantidad de FBS desplegadas en la red la capacidad del sistema se incrementa. Por una parte, incrementar la cantidad de estaciones base ocasiona que la cantidad de usuarios asociados a las FBS sea mayor, esto implica que se mejoran las

condiciones de los usuarios (antes MUE) al tener enlaces más cortos y por lo tanto incrementa la capacidad de la red al reutilizarse una mayor cantidad de recursos. Sin embargo, al considerar un radio más grande, la cobertura de las femtoceldas comienza a cubrir la mayor parte de la macrocelda mientras se incrementa la densidad de estaciones base. Lo anterior provoca que la cantidad de estaciones base activas rápidamente alcance un límite y la mejora en capacidad se deba al despliegue de nuevas FBS. Es decir, de acuerdo con las reglas de asociación los usuarios tienen la posibilidad de asociarse a una FBS con mejores condiciones. Este comportamiento se observa en las Figuras 5.1(a) y 5.1(c) en donde la pendiente del incremento de la capacidad se mantiene estable mientras que en las Figuras 5.1(b) y 5.1(d) la pendiente comienza a disminuir a partir de una DBS de 1000 BS/Km². Por otra parte, se observa que en todos los casos que se aplica la coordinación de interferencia los resultados superan las prestaciones con respecto a asignar potencias planas (PP).

Si se incrementa el radio de cobertura de las FBSs de 10 a 25 metros se producen dos efectos (ver Figuras 5.1(a) y 5.1(b)). El primero, se refiere a que cuando las FBSs ofrecen radios de cobertura de 25 metros se mejora la capacidad total de la red en un 15% para el caso de compartición de espectro, y de 48% para el caso de partición de espectro, con respecto a cuando utilizan radios de 10 metros en densidades de 2500 BS/ km² (ver Figura 5.1(a)). Por otro lado, se puede observar que, con el esquema de partición de espectro, para densidades de FBSs mayores a 1000 (caso ultradenso) con radios de cobertura de 25 metros y con coordinación de interferencia, se logra mayor capacidad que con un esquema de compartición de espectro (ver Figura 5.1(b)). No obstante, se presenta un efecto contrario cuando se consideran radios de cobertura de 10 metros (ver Figura 5.1(a)), ya que al aumentar el radio de cobertura de las FBSs ocasiona que más usuarios se asocien a una FBS y una mayor cantidad de recursos se reutilicen por la partición dinámica de espectro. Es decir, se logra una mayor capacidad de la red al asociar a más usuarios a las FBS.

Restringir en el sistema el nivel de *SINR* ($SINR_{th}$), permite que los canales y potencias asignados cumplan con un nivel mínimo aceptable de QoS. Incrementar el valor del $SINR_{th}$ representa que los servicios ofrecidos en la red requieren mayores niveles de QoS, por lo que las condiciones del entorno de propagación podrían ocasionar que no se logren estos niveles de $SINR_{th}$, incrementándose la cantidad de usuarios sin servicio. Con base a lo anterior, se

puede observar en las Figuras 5.1(a) y 5.1(c) y en las 5.1(b) y 5.1(d) que incrementar el $SINR_{th}$ no tiene un efecto significativo sobre la capacidad de la red UDN cuando se aplica la coordinación de interferencia, pero si cuando solo se aplican potencias planas (esto es, a mayor $SINR_{th}$ menor capacidad). Lo que demuestra que existe la necesidad de coordinar la potencia si se requieren enlaces con niveles altos de QoS.

Aplicar una estrategia de coordinación de interferencia permite lograr una mayor capacidad de la red comparado a cuando no se aplica, además se logra atender a una mayor cantidad de usuarios (ver Figuras 5.2 a 5.5). A pesar de que las distintas estrategias de asociación de usuarios a celdas aplicados en este trabajo, por distancia (A1) o por pérdidas por trayectoria (A2), no producen un efecto significativo sobre la capacidad total de la red, si lo hacen sobre el número de usuarios macro atendidos. Durante los procesos de asociación se consideran las distancias entre estaciones base y las pérdidas por propagación, esta decisión puede influir en el rendimiento de algunos usuarios como se observa en la atención de los usuarios macro en las Figuras 5.4 y 5.5, la asociación A1 tiene una mayor cantidad de usuarios atendidos con respecto a la asociación A2. Lo anterior se debe a que cuando el radio de las FBS es grande cubre la mayoría de la cobertura de la MBS, asociando a los usuarios de los extremos a las FBS y los MUE mantienen enlaces cortos centrándose en el interior de la celda, mejorando sus condiciones de transmisión. Por otra parte, la asociación A2, un usuario se asocia considerando las pérdidas por propagación de todas las BS aun si la BS con mejores condiciones no sea la más cercana, provocando que los MUE tengan enlaces más largos que en A1. Sin embargo, aun si los MUE son asociados por A1 o A2, utilizando coordinación de interferencia se logra su atención total como lo muestran las Figuras 5.2 a 5.5. También se puede resaltar que, aun cuando la capacidad total de la red se ve beneficiada por la densificación, en las Figuras 5.2-5.5 se puede observar que la falta de coordinación de interferencia provoca que un alto porcentaje del total de los usuarios en la red no sean atendidos en un esquema de compartición de espectro debido a la interferencia generada entre FBSs. Por otro lado, en un esquema particionado, cuando la DUE es baja (100 UE/km^2) y la asignación de potencias es plana, se logra una atención de usuarios casi en su totalidad, a excepción de cuando se requiere una QoS alta y el radio de cobertura de las FBSs es de 10 metros (ver Figura 5.3).

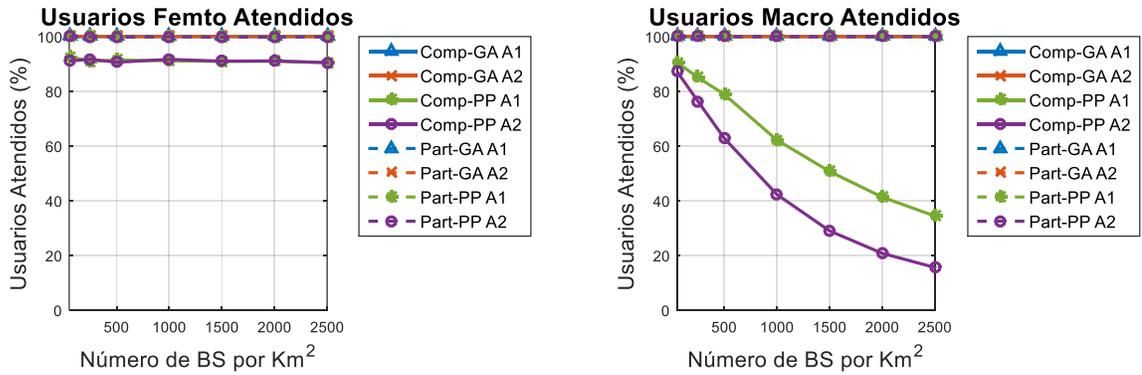


Figura 5.2. Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:100, Radio:10m, SINR_{th}:9.4).

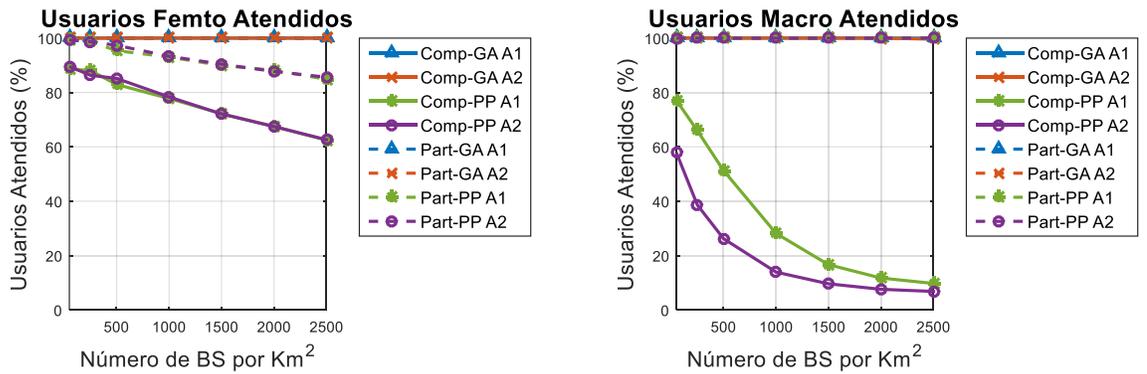


Figura 5.3. Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:100, Radio:10m, SINR_{th}:22.4).

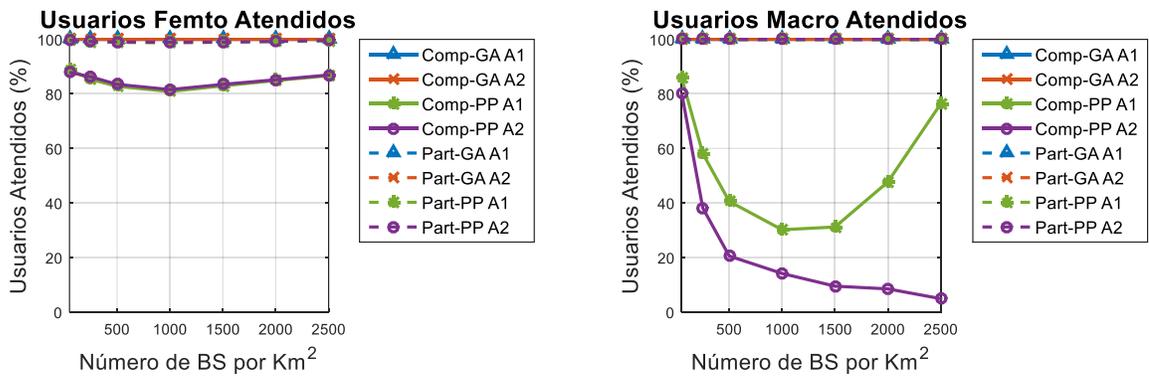


Figura 5.4. Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:100, Radio:25m, SINR_{th}:9.4).

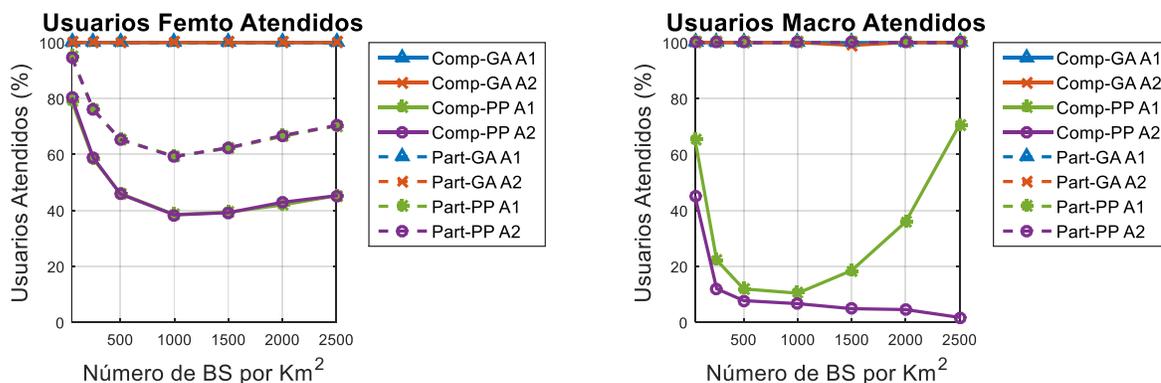


Figura 5.5. Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:100, Radio:25m, $SINR_{th}$:22.4).

El compromiso entre usuarios atendidos y capacidad (Mbps) que se presenta en una red UDN se resume en las Tablas 5.2-5.9. Las Tablas 5.2 y 5.3 contienen los resultados para los escenarios con una densidad de usuarios, $DUE=100$ y un $SINR_{th}$ de 9.4 dB y 22.4 dB respectivamente. Los resultados que se muestran en cada Tabla se diferencian entre sí por una escala de colores que van desde el rojo al verde. El color rojo representa los valores más bajos, mientras que el verde los más altos. En esencia, los resultados de las Tablas se dividen en cuatro cuadrantes: (i) porcentaje de usuarios atendidos-compartición de espectro, (ii) porcentaje de usuarios atendidos-partición de espectro, (iii) capacidad total-compartición de espectro y, (iv) capacidad total-partición de espectro. Mediante un solo vistazo se puede notar en la Tabla 5.2 que mientras se coordina la interferencia en la red (casos GA-A1, GA-A2,) es posible atender al 100% de los usuarios, independientemente del radio de cobertura de las FBSs, densidad de BSs, método de asociación de usuarios a celdas o si el espectro disponible se comparte o particiona. Por otro lado, en la mayoría de los escenarios evaluados, la capacidad total de la red se incrementa cuando se coordina la asignación de potencia, y este incremento es directamente proporcional a la densidad y radio de cobertura de las FBSs.

Tabla 5.2. Tabla de concentrado de los resultados de la evaluación de la red UDN con respecto al incremento de BS, considerando una Densidad de Usuarios (DUE:100) y un $SINR_{th}$ bajo, utilizando una escala de colores.

DUE: 100 UE/Km ² SINR _{th} : 9.4 dB			Compartición de espectro						Partición de espectro							
			Densidad de BS													
			50	250	500	1000	1500	2000	2500	50	250	500	1000	1500	2000	2500
Usuarios Atendidos (%)	Rf: 10m	GA-A1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		GA-A2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		PP-A1	90.6	85.6	80.7	70.7	67.8	68.4	71.9	100	100	99.9	99.9	99.9	99.9	99.8
		PP-A2	87.5	77.8	62.2	56.9	55.1	59.3	65.5	100	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9
	Rf: 25m	GA-A1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		GA-A2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		PP-A1	86.2	68.5	67.1	73.9	79.1	82.7	86	99.9	99.6	99.3	98.8	99	99.2	99.4
		PP-A2	81.1	56.5	60.1	72.3	78.1	80.6	82.4	99.9	99.7	99.4	99	99	99.3	99.6
Capacidad Total (Mbps)	Rf: 10m	GA-A1	276	383	488	799	1055	1266	1374	147	175	205	368	599	880	1081
		GA-A2	265	339	527	779	1034	1201	1327	124	135	196	347	565	787	1073
		PP-A1	234	295	379	597	769	915	1035	149	170	209	359	529	723	931
		PP-A2	214	273	366	577	749	837	1031	124	141	188	335	505	701	920
	Rf: 25m	GA-A1	324	788	1092	1367	1464	1499	1596	166	429	837	1307	1489	1535	1646
		GA-A2	333	797	1071	1370	1458	1509	1582	146	441	768	1329	1476	1549	1656
		PP-A1	251	510	687	859	978	1090	1212	166	382	652	983	1148	1242	1325
		PP-A2	229	497	837	849	967	1048	1103	143	362	638	980	1149	1252	1301

En la Tabla 5.3 se reportan los resultados obtenidos en un escenario que demanda una QoS alta, representado por $SINR_{th}=22.4$ dB. Con respecto al porcentaje de usuarios atendidos, se observa una diferencia significativa entre aplicar coordinación de interferencia o asignación de potencias planas en compartición de espectro, mientras que en un esquema de partición de espectro la diferencia entre aplicar coordinación de interferencia o no es poco significativa cuando el radio de cobertura es de 10 metros. El mejor resultado de capacidad total de la red se logra en un esquema de partición de espectro cuando se aplica coordinación de interferencia, el radio de cobertura de las FBSs es de 25 metros y la densidad de BS es mayor a 2000.

Tabla 5.3. Tabla de concentrado de los resultados de la evaluación de la red UDN con respecto al incremento de BS considerando una Densidad de Usuarios (DUE:100) y un $SINR_{th}$ alto, utilizando una escala de colores.

DUE: 100 UE/Km ² SINR _{th} : 22.4 dB			Compartición de espectro						Partición de espectro							
			Densidad de BS													
			50	250	500	1000	1500	2000	2500	50	250	500	1000	1500	2000	2500
Usuarios Atendidos (%)	10m	Rf: GA-A1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		GA-A2	100	100	100	100	100	100	99.8	100	100	100	100	100	99.8	100
		PP-A1	77.8	68.1	56.2	42.6	40.6	42.7	45.2	99.9	99.8	99.2	97.9	95.6	93.4	89.7
		PP-A2	59.7	43.3	35.3	32.6	36.5	40.5	44.4	99.9	99.8	99.5	98.0	95.8	93.2	90.3
	25m	Rf: GA-A1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		GA-A2	100	100	100	100	99.9	100.0	100	100	100	100	100	100	100	100
		PP-A1	66.7	36.0	33.3	34.5	37.7	41.5	46.5	99.4	90.8	78.1	65.0	64.9	68.4	71.8
		PP-A2	48.8	30.0	31.5	33.9	36.7	40.6	42.8	99.4	90.7	78.3	64.8	65.0	68.6	71.9
Capacidad Total (Mbps)	10m	Rf: GA-A1	273	370	559	806	1046	1186	1335	147	164	243	388	599	793	1079
		GA-A2	262	363	430	785	977	1160	1351	118	136	157	355	553	778	1094
		PP-A1	218	274	344	493	619	705	758	148	168	209	328	480	628	759
		PP-A2	189	237	319	493	615	710	767	114	130	172	303	456	608	758
	25m	Rf: GA-A1	325	733	1029	1278	1400	1428	1486	167	419	791	1221	1428	1480	1551
		GA-A2	306	730	1044	1301	1393	1438	1509	135	407	808	1274	1436	1494	1583
		PP-A1	214	372	476	544	600	686	779	164	335	526	702	787	867	917
		PP-A2	184	379	462	529	585	652	684	132	321	502	686	788	875	911

5.2.2 Análisis de la evaluación de una red UDN con Densidad de Usuarios media (DUE:300 UE/km²)

En esta sección se presenta la evaluación de capacidad de la UDN cuando la DUE es de 300 UE/Km² (Figuras 5.6(a)-(d)). Al igual que en la sección anterior los escenarios consideran: (i) la estrategia de coordinación de interferencia (GA) y, (ii) potencias planas (PP) o sin coordinación de interferencia, en situaciones de compartición de espectro (Comp) y partición de espectro (Part). El análisis de capacidad de transferencia de datos (data rate) se realiza con respecto al incremento de estaciones base por km² (de 50 a 2500 BS/ km²).

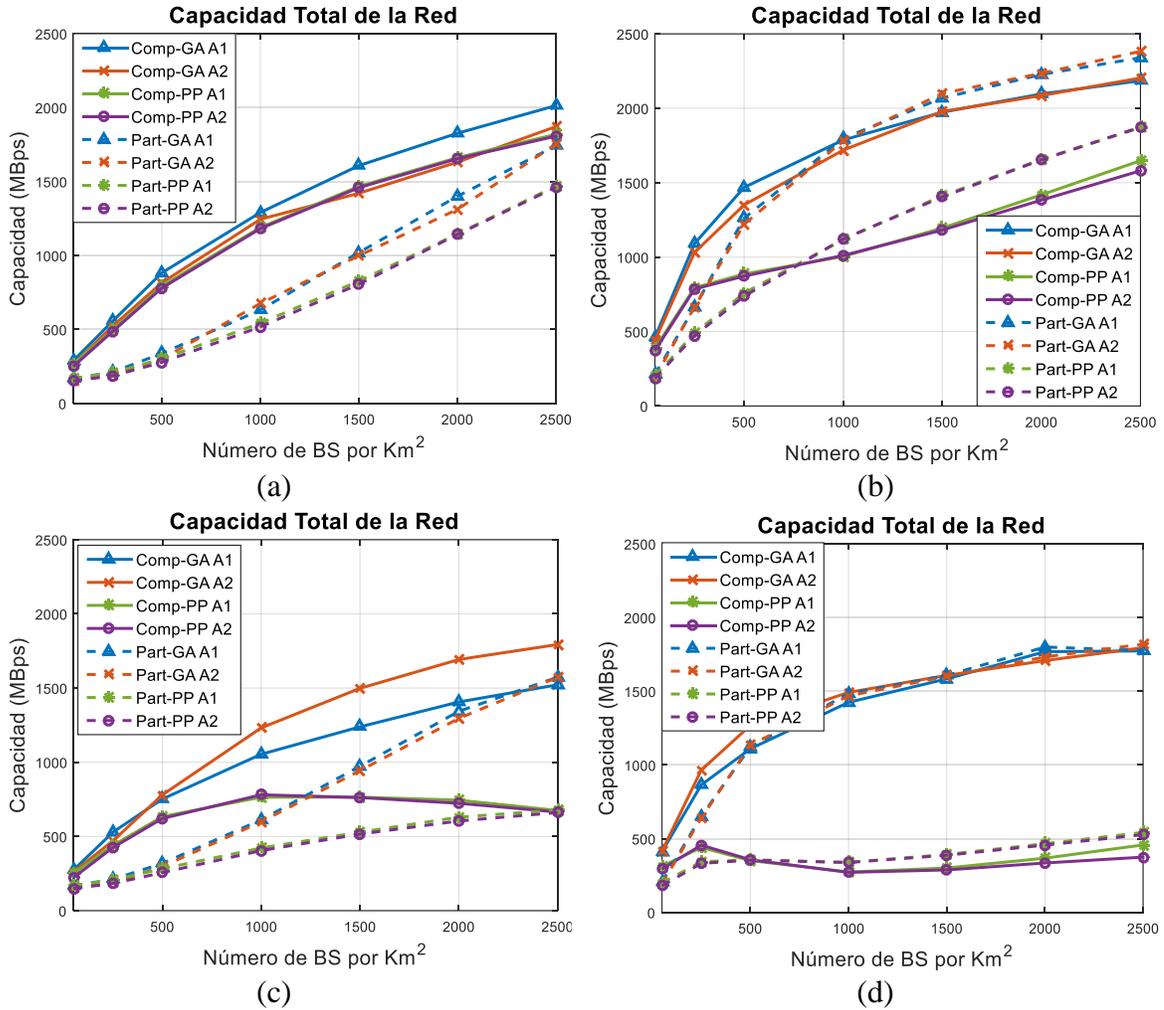


Figura 5.6. Evaluación de la Capacidad de la UDN con respecto al incremento de BS, se consideró una densidad de usuarios $DUE=300$ y las siguientes condiciones: (a) $SINR_{th}:9.4$ dB, $R_f:10$ m., (b) $SINR_{th}:9.4$ dB, $R_f:25$ m., (c) $SINR_{th}:22.4$ dB, $R_f:10$ m., (d) $SINR_{th}:22.4$ dB, $R_f:25$ m.

Figuras 5.6(a) y 5.6(c) muestran los resultados en los que las FBS ofrecen un radio de cobertura de 10 metros y se establece un $SINR_{th}$ de 9.4 dB y 22.4 dB respectivamente. Mientras que en las Figuras 5.6(b) y 5.6(d), se considera un radio de 25 metros y el $SINR_{th}$ es de 9.4 dB y 22.4 dB respectivamente. Similar a los resultados mostrados en la Figura 5.1, en los reportados en la Figura 5.6 también se puede observar que la capacidad de la red se incrementa mientras aumenta la cantidad de FBS desplegadas en la red. Sin embargo, en este caso en concreto, cuando se considera una $DUE=300$ se obtienen mayores valores de capacidad con respecto a considerar $DUE=100$. Lo anterior se debe a que, con una mayor cantidad de usuarios desplegados en la red, el sistema requiere activar un mayor número de BSs y con ello se incrementa el reuso de canales de comunicación.

Brevemente, de las Figuras 5.6(a)-(d) se concluye que cuando se controla la asignación de potencia en un escenario con 2500 BS/Km² y $SINR_{th}$ bajo, la capacidad de la red mejora con respecto a cuando no se controla la potencia y, además, esta mejora se incrementa 17% cuando aumenta el radio de cobertura de 10 a 25 metros (Figuras 5.6(a) y 5.6(b)). Lo mismo sucede cuando el $SINR_{th}$ es alto (en este caso 22.4 dB), solo que la mejora sobre la capacidad que se logra con el incremento del radio de cobertura de las FBSs es del 6% (Figuras 5.6(c) y 5.6(d)). Ahora bien, no solamente la capacidad total de la red aumenta cuando se controla la interferencia con respecto a cuando no se controla, sino que también es posible incrementar la cantidad de usuarios atendidos, tanto los que atiende la MC (MUE) como aquellos que están asociados a las FBSs (FUE) (ver Figuras 5.7-5.10). En este sentido, cuando la DUE=300 y la densidad de BS es de 2500 BS/Km², se puede observar que cuando se aplica un esquema de partición de espectro (Part) y al mismo tiempo un control de interferencia (GA) se atiende al 100% de los usuarios MUE y FUE, este resultado es independiente del esquema de asociación de usuarios a celdas (A1 o A2). Lo anterior es un resultado interesante, ya que diversos trabajos reportados en la literatura establecen que, por el hecho de considerar el esquema de partición de espectro, es decir una porción del espectro total se asigna a la MC y el resto a las FBSs, se logra crear un escenario ortogonal entre las dos redes, minimizando con esto la interferencia entre ellas. Los resultados en las Figuras 5.8-5.10 demuestran lo contrario, esto significa que no se logran atender al 100% de los usuarios FUE cuando el control de interferencia está ausente y el esquema de distribución de espectro es particionado. Y, para aquellos casos en los que se aplica un esquema de compartición de espectro, además de que no se atienden a todos los usuarios FUE, tampoco se logra atender al 100% de los usuarios MUE aun cuando se aplique la estrategia de control de interferencia. Un caso particular se puede observar en las Figuras 5.8 y 5.10, en el que aun con la aplicación del control de potencia se desatienden al 38% de los usuarios MUE, para los casos en que el $SINR_{th}$ que requiere la red es de 22.4 dB (QoS alto). Este efecto puede estar relacionado con el hecho de que al considerar una asociación de usuarios a celdas por pérdidas por trayectorias (A2), este asocia a usuarios a una BS dentro del rango de otras BS (generando enlaces de interferencia más cortos que los enlaces de transmisión) y aunque el incremento del radio de asociación ocasione que más usuarios sean asociados a las FBS también lo hacen los enlaces interferentes. Como consecuencia, los MUE restantes no logran

alcanzar los $SINR_{th}$ por la interferencia que generan las FBS a los MUE (interferencia co-tier).

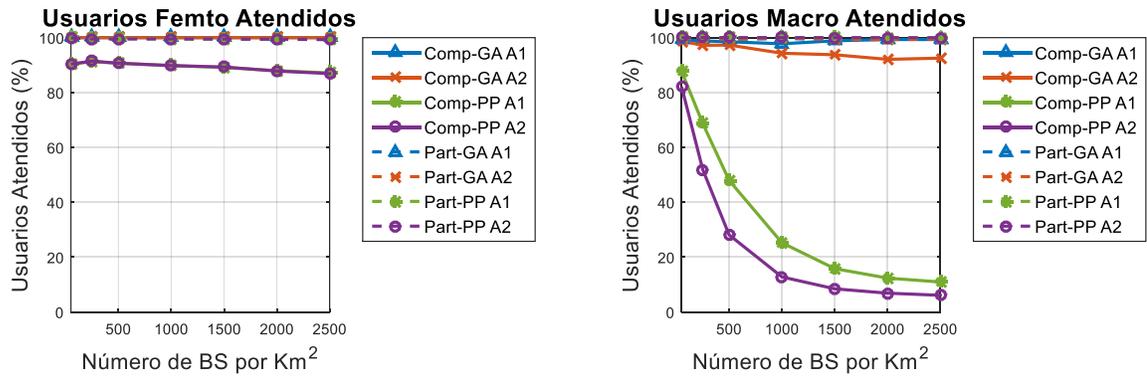


Figura 5.7. Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:300, Radio:10m, $SINR_{th}$:9.4).

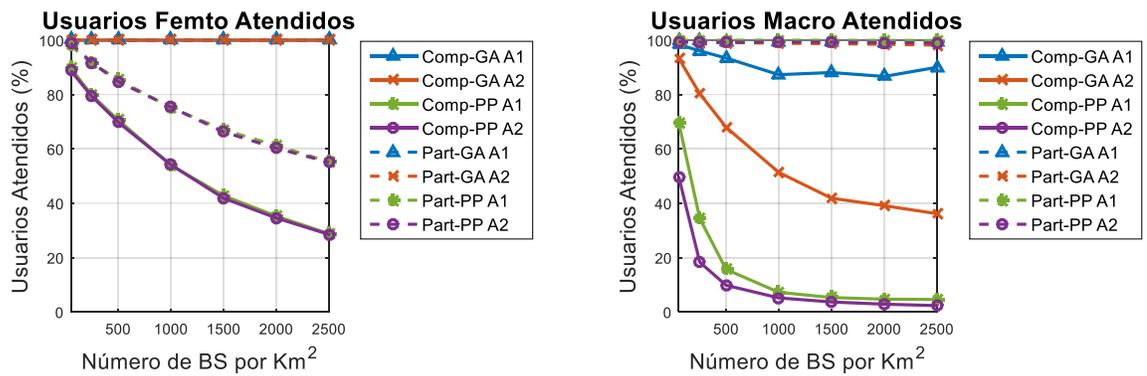


Figura 5.8. Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:300, Radio:10m, $SINR_{th}$:22.4).

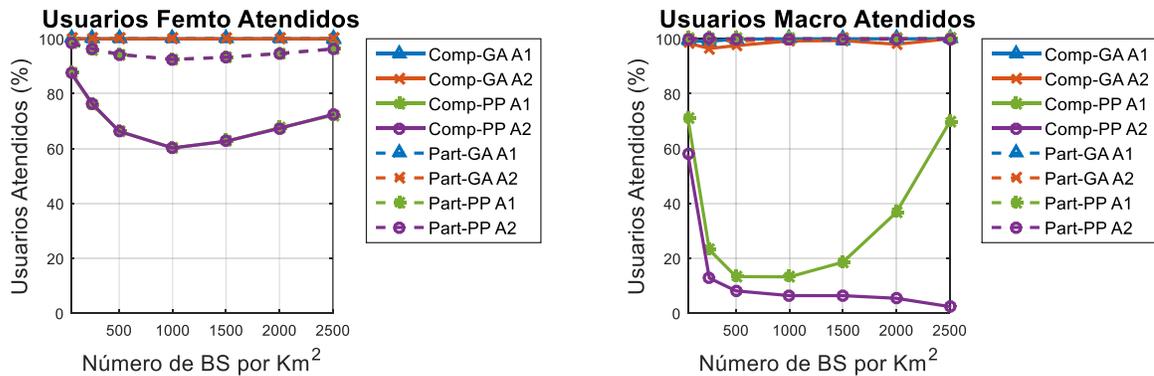


Figura 5.9. Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:300, Radio:25m, $SINR_{th}$:9.4).

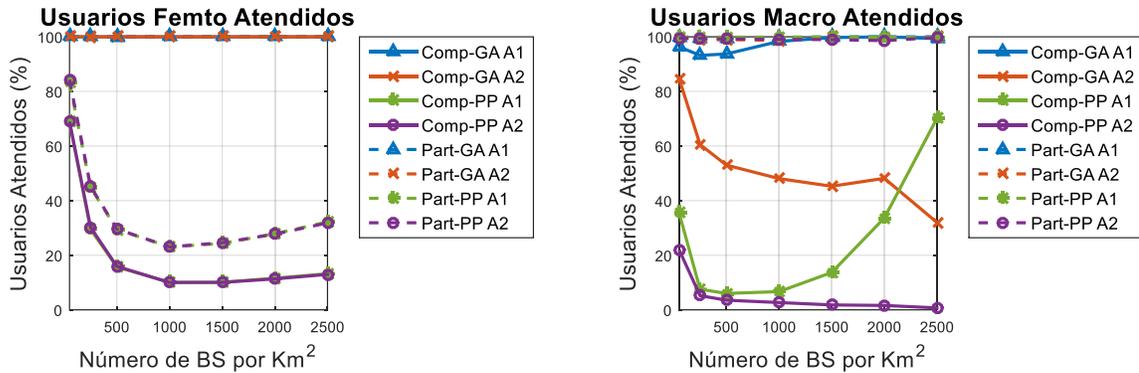


Figura 5.10. Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:300, Radio:25m, $SINR_{th}$:22.4).

El porcentaje de usuarios atendidos, esto es, el total de usuarios atendidos en la MC y FBS, y los valores de capacidad total de la red (Mbps) para cada escenario evaluado se reportan en las Tablas 5.4 y 5.5, para una densidad de usuarios DUE=300, un $SINR_{th}$ bajo y un $SINR_{th}$ alto, respectivamente. De la misma forma que en las Tablas 5.2 y 5.3, en estas Tablas se utiliza una escala de colores que van desde el rojo al verde. El color rojo representa los valores más bajos, mientras que el verde los más altos. Se puede observar que, a pesar del aumento de usuarios en la red, se mantiene una atención cercana al 100% mientras se coordina la interferencia en la red (casos GA-A1, GA-A2). Por otra parte, la atención de usuarios de los escenarios que requieren un $SINR_{th}$ alto, se ven altamente afectados por la interferencia en el esquema compartido cuando no se aplica coordinación de interferencia como lo muestra la Tabla 5.5, especialmente cuando el radio de asociación aumenta. Sin embargo, este aumento del radio muestra una mejora considerable en la capacidad de la red cuando se coordina potencia (GA). Lo que se observa en la Tabla 5.4 y 5.5 con color verde desde densidades de 1000 a 2500 estaciones base comparadas con un radio de 10 metros.

Tabla 5.4. Tabla de concentrado de los resultados de la evaluación de la red UDN con respecto al incremento de BS, considerando una Densidad de Usuarios (DUE:300) y un $SINR_{th}$ bajo, utilizando una escala de colores.

DUE: 300 UE/Km ² SINR _{th} : 9.4 dB			Compartición de espectro							Partición de espectro						
			Densidad de BS													
			50	250	500	1000	1500	2000	2500	50	250	500	1000	1500	2000	2500
Usuarios Atendidos (%)	Rf:	GA-A1	99.2	98.8	98.7	98.4	99.3	99.6	99.7	99.5	99.8	99.4	99.8	99.6	99.7	99.8
		GA-A2	98.7	97.4	97.6	96.1	96.4	96.2	97.5	99.8	99.6	99.4	99.8	99.6	99.6	99.8
		PP-A1	87.7	70.4	54.3	44.1	46.9	54.1	61.9	100	99.9	99.9	99.8	99.7	99.6	99.5
		PP-A2	82.2	54.9	37.4	35.0	42.7	51.7	60.2	99.9	99.9	99.9	99.8	99.7	99.6	99.5
	25m	GA-A1	99.2	99.4	99.9	100	100	100	100	99.6	99.7	99.8	100	99.9	100	99.9
		GA-A2	98.5	97.8	99.0	99.8	99.9	99.9	100	99.7	99.7	99.7	99.9	100	100	100
		PP-A1	72.4	43.2	46.4	54.2	60.7	66.8	72.0	99.8	98.4	96.3	93.4	93.4	94.8	96.3
		PP-A2	60.6	36.9	44.3	53.4	60.2	65.8	71.0	99.8	98.6	96.4	93.3	93.5	94.7	96.3
Capacidad Total (Mbps)	Rf:	GA-A1	288	556	883	1290	1607	1864	2013	167	212	338	632	1020	1400	1718
		GA-A2	264	522	815	1244	1421	1631	1871	152	194	300	676	998	1311	1724
		PP-A1	265	497	794	1189	1467	1661	1819	169	208	301	542	827	1145	1469
		PP-A2	249	486	780	1182	1458	1654	1806	151	186	277	517	806	1142	1461
	25m	GA-A1	459	1091	1468	1787	1973	2096	2185	211	663	1261	1798	2069	2227	2340
		GA-A2	439	1031	1350	1719	1978	2085	2203	191	666	1219	1781	2099	2234	2382
		PP-A1	387	794	886	1004	1195	1418	1681	202	488	758	1118	1412	1655	1886
		PP-A2	371	785	872	1011	1182	1383	1580	186	472	737	1121	1404	1654	1873

Tabla 5.5. Tabla de concentrado de los resultados de la evaluación de la red UDN con respecto al incremento de BS, considerando una Densidad de Usuarios (DUE:300) y un $SINR_{th}$ alto, utilizando una escala de colores.

DUE: 300 UE/Km ² SINR _{th} : 22.4 dB			Compartición de espectro							Partición de espectro						
			Densidad de BS													
			50	250	500	1000	1500	2000	2500	50	250	500	1000	1500	2000	2500
Usuarios Atendidos (%)	Rf:	GA-A1	98.4	96.3	94.3	90.9	93.2	94.1	96.8	99.7	99.6	99.6	99.6	99.7	99.5	99.8
		GA-A2	93.5	81.7	72.8	65.3	66.4	72.3	78.9	99.3	99.1	99.2	99.2	99.2	99.3	99.4
		PP-A1	70.1	37.8	23.9	20.9	21.1	21.5	20.7	99.9	99.3	97.7	92.7	86.0	78.5	70.0
		PP-A2	50.7	23.0	18.8	19.4	20.0	20.3	19.9	99.4	98.6	97.0	92.3	85.1	77.6	65.5
	25m	GA-A1	99.6	95.7	97.5	99.7	99.9	100.0	99.9	99.7	99.5	99.7	99.9	100	100	100
		GA-A2	86.3	75.6	82.1	93.6	97.6	98.8	98.6	99.6	99.2	99.6	99.8	100	100.0	100
		PP-A1	38.7	15.8	12.0	9.6	10.2	12.1	14.3	98.6	78.9	55.7	32.7	27.5	29.5	33.4
		PP-A2	26.3	14.6	11.2	9.1	9.7	11.0	12.7	98.1	78.9	55.6	32.5	27.7	29.4	33.1
Capacidad Total (Mbps)	Rf:	GA-A1	273	528	752	1053	1238	1406	1522	168	211	318	612	972	1343	1572
		GA-A2	260	470	780	1231	1498	1692	1793	151	188	297	598	943	1295	1572
		PP-A1	250	439	633	764	764	744	675	168	206	282	422	529	629	678
		PP-A2	222	425	621	780	762	723	664	148	183	256	404	518	604	661
	25m	GA-A1	411	865	1110	1425	1584	1783	1735	207	652	1122	1484	1607	1800	1757
		GA-A2	417	965	1268	1492	1607	1708	1795	196	639	1135	1468	1600	1733	1819
		PP-A1	313	440	351	273	301	368	457	200	343	357	339	393	466	542
		PP-A2	295	456	357	272	288	335	375	181	332	354	338	388	456	527

5.2.3 Análisis de la evaluación de una red UDN con Densidad de Usuarios alta (DUE:600 UE/km²)

Un escenario en el que se despliegan 2500 FBS/km² y 600 usuarios/km² es la representación convencional de una red UDN. En esta sección se analiza la manera en que la estrategia de control de interferencia bajo condiciones de compartición (Comp) y partición de espectro (Part), influye sobre la capacidad y atención a usuarios en una red UDN. El análisis de capacidad total de la red (data rate) se presenta con respecto al incremento de estaciones base por km² (de 50 a 2500 BS/km²). En todos los escenarios la DUE en la red es de 600 UE/Km² y se analizó, en cada caso, el impacto de considerar una asociación por distancia (A1) y por pérdidas por trayectoria (A2).

Para la obtención de las Figuras 5.11(a) y 5.11(c) se consideró un radio de cobertura de 10 metros para las FBSs y como requerimiento mínimo de QoS en la red un valor de $SINR_{th}$ de 9.4 dB y 22.4 dB respectivamente. Mientras que para las Figuras 5.11(b) y 5.11(d), el radio de cobertura de las FBS es de 25 metros y los valores de $SINR_{th}$ son los mismos que en el caso anterior.

En las Figuras 5.11(a)-(d) se puede observar que los mejores valores de capacidad se obtienen cuando se aplica un control de potencia, independientemente si el esquema inicial de distribución de espectro es compartido o particionado (Comp-GA A1, Comp-GA A2, Part-GA A1, Part-GA A2). Sin embargo, el esquema de asignación de potencia propuesto en este trabajo se aprovecha mejor en la situación en el que el espectro se comparte entre FBSs y MBS (Comp-GA A1, Comp-GA A2). Lo anterior se debe a que cuando el espectro se comparte entre FBSs y MBS existe mayor reutilización de los recursos espectrales, de manera lógica se podría pensar que esto logra mayor capacidad, pero quizás también se genere mayor interferencia, afectándola de inmediato. Pero como se observa en las Figuras, la estrategia de control de interferencia propuesta aquí reduce sus efectos negativos y, como consecuencia, mantiene los niveles altos de capacidad total de la red. Por otro lado, en un esquema de partición de espectro, la reutilización de este recurso solo se ejecuta entre las FBSs, eliminando de origen una porción de la interferencia total (la que se produciría entre FBSs y MBS), por lo que aplicar una estrategia de control de interferencia en esta situación pareciera no ser relevante. Sin embargo, como ya se mencionó anteriormente, los mejores resultados

de capacidad se logran cuando se asignan las potencias en busca de mejorar el nivel de $SINR$ de la UDN en comparación a cuando solo se asigna la misma potencia equivalente a todos los canales (esto es, los casos identificados como PP en las Figuras 5.11(a)-(d)).

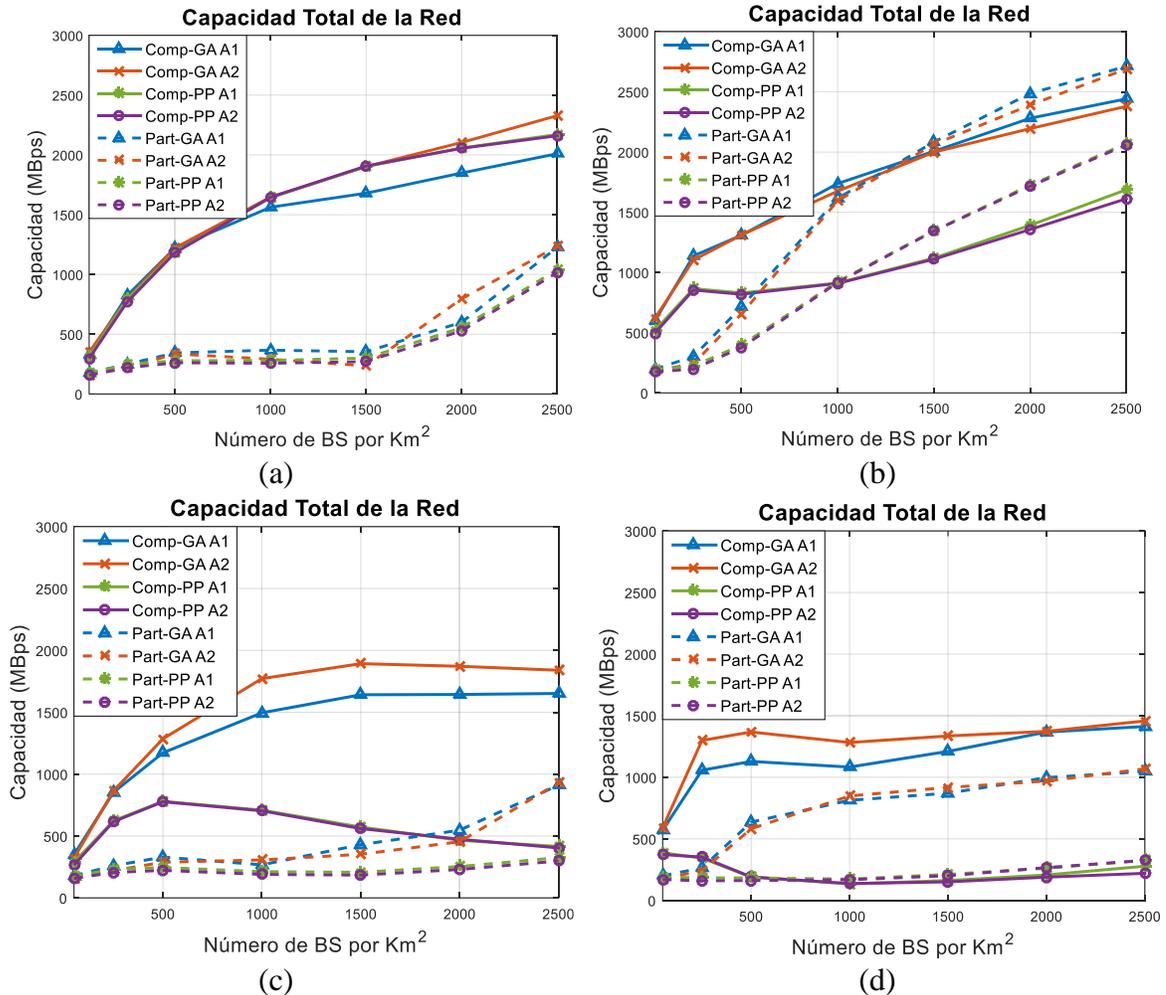


Figura 5.11. Evaluación de la Capacidad de la UDN con respecto al incremento de BS, se consideró una densidad de usuarios $DUE=600$ y las siguientes condiciones: (a) $SINR_{th}: 9.4$ dB, $R_f: 10$ m., (b) $SINR_{th}: 9.4$ dB, $R_f: 25$ m., (c) $SINR_{th}: 22.4$ dB, $R_f: 10$ m., (d) $SINR_{th}: 22.4$ dB, $R_f: 25$ m.

Ahora bien, como se ha mencionado en las secciones anteriores, evaluar y mejorar solamente la capacidad total de la red no es resultado suficiente para concluir sobre los beneficios que se logran al controlar la potencia en una UDN. El porcentaje de atención a usuarios o, en otras palabras, la cantidad de usuarios que la red puede atender con los recursos disponibles, es otra métrica que permite evaluar el desempeño del control de interferencia propuesto. Su objetivo en este sentido, es reducir la “*hambruna (starving)*” por el servicio y, que, al mismo tiempo, se atienda al mayor número de usuarios en la UDN. En la Figura

5.12(a)-(b) se presenta el comportamiento de la cantidad de usuarios asociados, tanto en la MC (MUE) como en las FBSs (FUE). Se puede observar que al incrementar la densidad de FBSs en la red se logra incrementar el número de usuarios FUE atendidos y asimismo incrementa la reutilización de canales. En las Figuras se puede observar que a partir de una densidad de 2000 BS/ km² y de 500 BS/ km² la cantidad de MUE es menor a la cantidad de canales, permitiendo asignar canales a todos los usuarios al reutilizarlos en cada FBS, para los radios de asociación de 10 metros y 25 metros, respectivamente. Sin embargo, aunque la cantidad de canales sea suficiente para atender a todos los usuarios, es necesario coordinar la potencia (casos GA) para que logren sus requerimientos mínimos de transmisión como se muestra las Figuras 5.13 a 5.16.

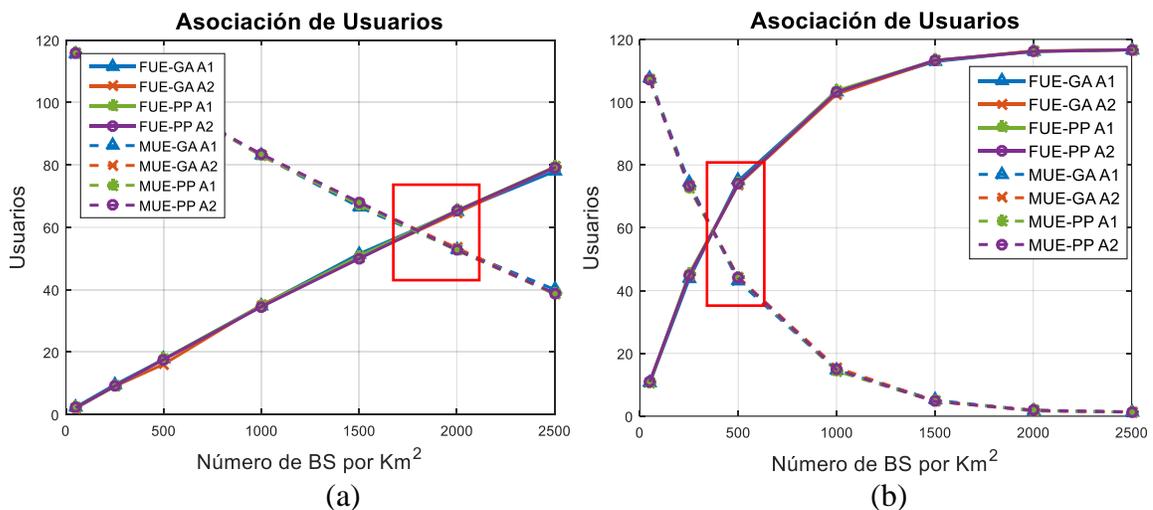


Figura 5.12. Cantidad de usuarios asociados respecto al incremento de BS (DUE:600): (a) Rf: 10 m. (b) Rf: 25 m.

Como se mencionó, en bajas densidades de BS la cantidad de canales no es suficiente para atender a todos los usuarios en la red, por tal motivo, los esquemas particionados tienen un bajo desempeño y la porción de espectro para las MBS es mucho mayor la correspondiente a la red de FBSs, reflejándose en una baja reutilización y capacidad de la red. Sin embargo, incrementar el radio mejora en un 121% la capacidad de la red (en del esquema particionado ver Figuras 5.11(a) y 5.11(b)) a una densidad de 2500 BS/Km². Además, el incremento del radio provoca que se mejore la cantidad de usuarios atendidos en general cuando se utiliza coordinación. No obstante, a diferencia de las densidades de usuarios anteriores (DUE=100 y DUE=300) los esquemas compartidos no logran una atención del 100% de los MUE cuando el $SINR_{th}$ es alto (Figuras 5.14 y 5.16), incluso utilizando coordinación de potencia. Es decir,

para mantener enlaces de calidad alta, los esquemas particionados parecen ser la mejor opción para evitar pérdidas de enlaces de transmisión por la interferencia co-tier generada en los esquemas compartidos.

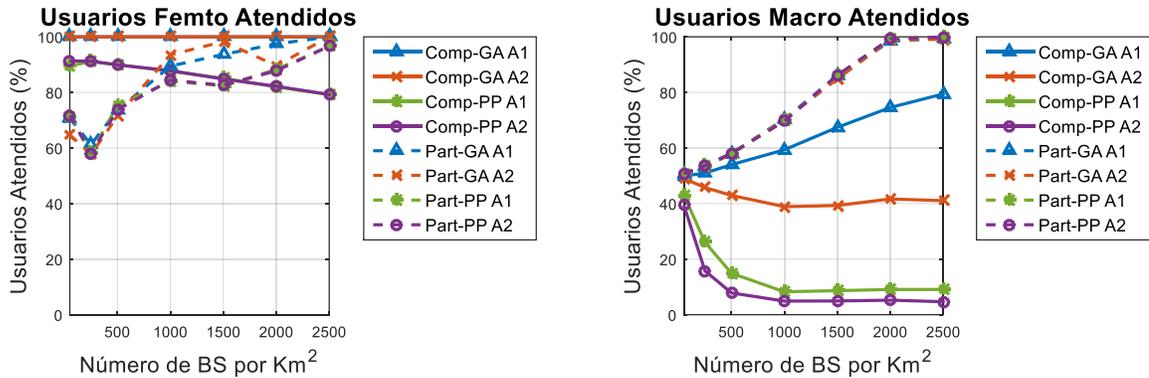


Figura 5.13. Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:600, Radio:10m, $SINR_{th}$:9.4).

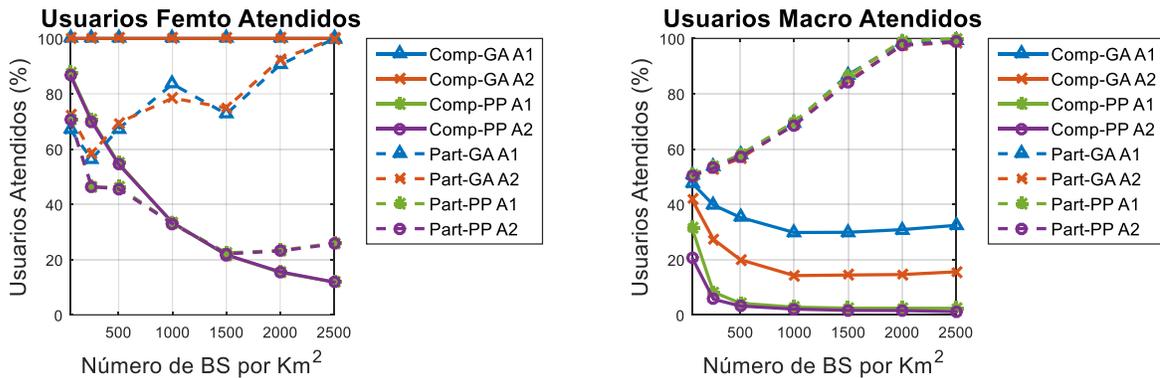


Figura 5.14. Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:600, Radio:10m, $SINR_{th}$:22.4).

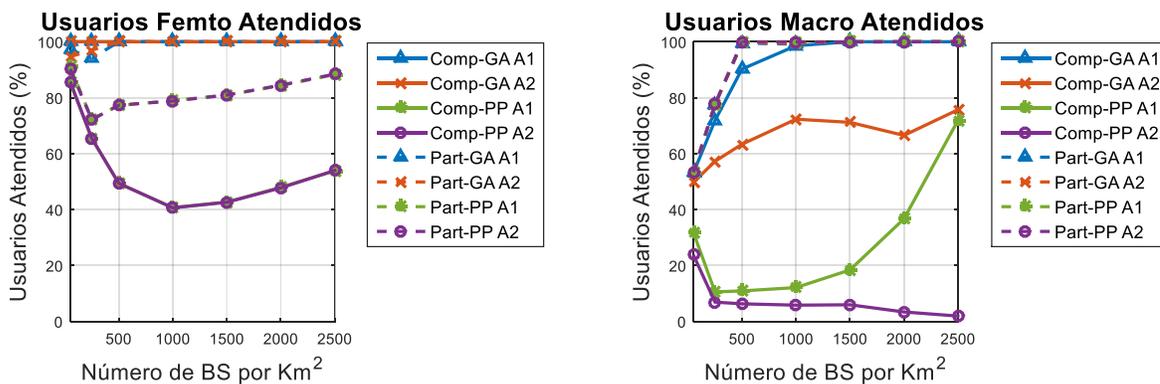


Figura 5.15. Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:600, Radio:25m, $SINR_{th}$:9.4).

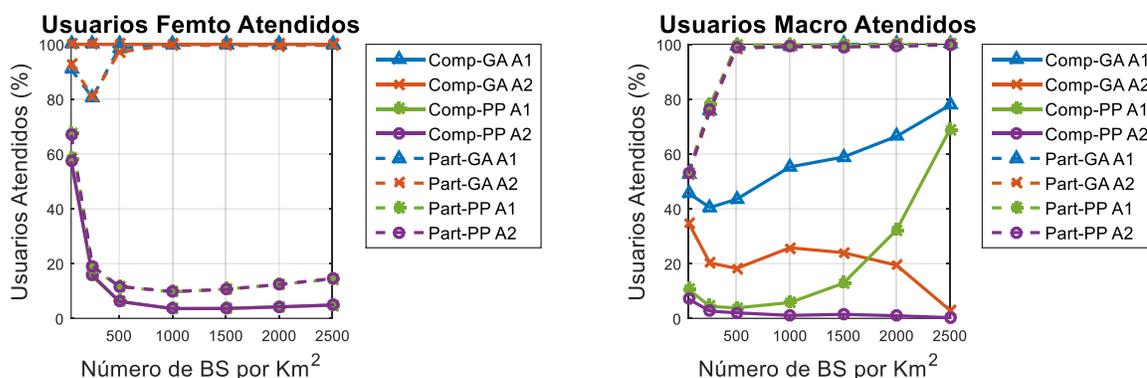


Figura 5.16. Usuarios atendidos en incremento de BS (DUE:600, Radio:25m, $SINR_{th}$:22.4).

Los valores de atención de usuarios (porcentaje de usuarios atendidos) y los valores de capacidad (Mbps) para cada escenario evaluado fueron resumidos las Tablas 5.6 y 5.7. Ahí se concentran los resultados del incremento de BS para una densidad de usuarios (DUE:600) para un $SINR_{th}$ bajo y un $SINR_{th}$ alto, respectivamente. En cada tabla se utilizó una escala de colores (rojo a verde) en donde los colores rojos indican los valores más bajos, mientras que los verdes los más altos. La escala de colores fue aplicada a los esquemas de partición y compartición en conjunto. Además, fue dividida en dos secciones, el renglón de atención a usuarios y el renglón de la capacidad de la red. En donde cada sección está compuesta de los escenarios (GA-A1, GA-A2, PP-A1, PP-A2) y los radios de asociación (R_f :10 y R_f :25) considerados.

En la Tabla 5.6 se puede resaltar que una asignación de potencias simple puede lograr una atención cercana al 100% cuando se utiliza el esquema particionado con respecto al esquema compartido, sin embargo, se logra casi el doble de capacidad en este esquema. Por otro lado, el aumento del radio reduce la atención al 88.3% y 54% en los esquemas particionado y compartido, mientras que la capacidad aumenta 99.2% y disminuye un 28.6%, respectivamente. Reflejando el impacto de la interferencia en los esquemas compartidos.

Por otro lado, en la Tabla 5.7 se puede observar la necesidad de coordinar la potencia si se desean mantener una atención alta y enlaces con un $SINR_{th}$ alto. Los escenarios (GA-A1 y GA-A2) muestran una atención cercana al 100% mientras que la máxima atención lograda en los escenarios (PP-A1 y PP-A2) es del 59%.

Tabla 5.6. Tabla de concentrado de los resultados de la evaluación de la red UDN con respecto al incremento de BS, considerando una Densidad de Usuarios (DUE:600) y un $SINR_{th}$ bajo, utilizando una escala de colores.

DUE: 600 UE/Km ² SINR _{th} : 9.4 dB			Compartición de espectro							Partición de espectro						
			Densidad de BS													
			50	250	500	1000	1500	2000	2500	50	250	500	1000	1500	2000	2500
Usuarios Atendidos (%)	Rf:	GA-A1	50.8	54.6	60.9	71.8	88.8	88.4	93.1	50.9	53.9	60.2	76.1	89.2	97.8	99.8
		GA-A2	50.1	49.6	51.6	57.3	64.8	73.6	80.4	51.0	53.4	60.0	77.2	90.5	93.8	99.6
		PP-A1	43.9	31.0	26.1	31.5	41.3	49.4	56.2	51.1	54.0	60.6	73.9	84.4	93.1	97.7
		PP-A2	40.5	21.5	20.1	29.2	39.2	47.7	54.7	51.1	53.9	60.4	73.9	84.6	92.9	97.7
	25m	GA-A1	57.3	82.6	96.3	99.8	100	100	100	57.1	83.8	99.8	99.8	100	100	100
		GA-A2	54.5	73.6	86.0	96.7	98.7	99.4	99.7	57.3	85.0	99.8	99.9	100	100	100
		PP-A1	36.7	31.4	34.9	37.1	41.7	47.7	54.0	56.8	75.4	85.6	81.6	81.6	84.5	88.3
		PP-A2	29.4	29.2	33.3	36.2	41.1	46.9	53.3	56.7	75.5	85.7	81.4	81.6	84.7	88.5
Capacidad Total (Mbps)	Rf:	GA-A1	326	825	1222	1562	1679	1846	2009	176	249	344	367	353	599	1226
		GA-A2	351	796	1223	1647	1902	2104	2328	159	219	335	291	235	795	1234
		PP-A1	313	796	1186	1648	1902	2057	2170	176	245	278	280	300	554	1039
		PP-A2	296	771	1181	1645	1907	2055	2160	157	219	261	256	270	528	1016
	25m	GA-A1	597	1137	1309	1738	2006	2280	2441	197	302	713	1615	2083	2486	2712
		GA-A2	620	1103	1311	1675	1998	2194	2379	185	240	656	1595	2064	2390	2690
		PP-A1	518	865	830	912	1119	1391	1687	194	223	397	924	1347	1725	2070
		PP-A2	495	854	818	909	1110	1356	1612	174	198	376	916	1344	1716	2059

Tabla 5.7. Tabla de concentrado de los resultados de la evaluación de la red UDN con respecto al incremento de BS, considerando una Densidad de Usuarios (DUE:600) y un $SINR_{th}$ alto, utilizando una escala de colores.

DUE: 600 UE/Km ² SINR _{th} : 22.4 dB			Compartición de espectro							Partición de espectro						
			Densidad de BS													
			50	250	500	1000	1500	2000	2500	50	250	500	1000	1500	2000	2500
Usuarios Atendidos (%)	Rf:	GA-A1	48.8	44.6	44.9	50.6	60.4	68.9	77.0	50.8	53.8	59.2	73.5	80.6	94.1	99.6
		GA-A2	42.7	32.9	30.8	39.7	50.8	61.3	72.2	50.5	53.3	58.3	71.8	80.5	94.6	99.5
		PP-A1	32.4	13.0	11.8	11.7	10.7	9.5	8.8	51.1	53.0	56.2	59.0	58.8	57.1	50.2
		PP-A2	22.0	10.6	10.8	11.2	10.1	9.3	8.3	50.7	52.5	55.5	58.1	57.8	56.4	49.7
	25m	GA-A1	50.5	62.4	79.3	94.4	98.2	99.4	99.7	56.1	77.4	98.8	99.6	99.5	99.6	99.6
		GA-A2	40.7	50.4	69.3	90.2	96.9	98.8	98.8	56.2	77.7	97.6	99.7	99.6	99.5	99.6
		PP-A1	14.8	8.5	5.3	3.8	3.9	4.6	5.5	54.5	55.0	44.5	20.6	14.2	13.7	15.2
		PP-A2	11.7	7.6	4.6	3.2	3.5	4.1	4.8	54.1	54.6	44.1	21.0	14.7	13.7	15.4
Capacidad Total (Mbps)	Rf:	GA-A1	349	853	1172	1495	1641	1643	1651	179	260	329	267	430	547	910
		GA-A2	320	865	1285	1771	1892	1871	1839	153	220	288	306	352	453	929
		PP-A1	287	622	780	708	572	465	415	175	232	245	211	207	253	325
		PP-A2	266	616	776	703	560	473	404	157	205	222	190	184	229	298
	25m	GA-A1	570	1057	1128	1082	1210	1366	1412	200	264	636	813	870	997	1047
		GA-A2	590	1293	1367	1282	1335	1372	1457	176	241	582	848	917	968	1068
		PP-A1	386	343	189	134	161	206	277	188	183	182	173	211	261	326
		PP-A2	372	351	190	136	150	189	220	169	159	161	167	200	266	324

5.2.4 Análisis de la evaluación de una red UDN con Densidad de Estaciones Base alta (DBS:2500 BS/km²)

En las Figuras 5.17(a)-(d) se presentan la evaluación de capacidad de una UDN cuando se aplica la estrategia de coordinación de interferencia (GA) y se compara, como en los casos anteriores, en escenarios cuando se asignan potencias planas (PP). Ambas condiciones se analizan bajos los esquemas de compartición de espectro (Comp) y partición de espectro (Part). El análisis de capacidad de transferencia de datos (data rate) se evalúa con respecto al incremento de densidad de usuarios (de 100 a 600 UE/ km²). En todos los casos la Densidad de Estaciones Base (DBS) considerada en la red es de 2500 BS/Km² y dicha capacidad se evaluó, en cada caso, con una asociación por distancia (A1) y por pérdidas por trayectoria (A2).

Para la obtención de las Figuras 5.17(a) y 5.17(c) se consideró que las FBS cubren un radio de 10 metros y el requerimiento mínimo de QoS se establece con un valor de $SINR_{th}$ de 9.4 dB y 22.4 dB respectivamente. Mientras que en las Figuras 5.17(b) y 5.17(d), se considera un radio de 25 metros de cobertura por FBS y el $SINR_{th}$ de 9.4 dB y 22.4 dB respectivamente. En las secciones anteriores, en las que se consideraron Densidades de Usuarios de 100 UE/Km² y 300 UE/Km², se observó que al incrementar la densidad de estaciones base, se incrementaba la capacidad total de la red sin que se presentara algún punto de inflexión en el que la capacidad de la red comenzara a disminuir conforme la densidad de estaciones aumentara. Ahora bien, en este caso en el que se considera una DUE=600 UE/Km² se observa que cuando el requerimiento mínimo de $SINR$ es de 22.4 dB y el radio de las FBS es de 10 metros, la máxima capacidad de la red se logra cuando la Densidad de Usuarios es aproximadamente de 400 UE/Km² para el caso compartido y de 300 UE/Km² para el caso de partición de espectro (ver Figura 5.17(c)). Por otro lado, cuando el radio cuando se incrementa a 25 metros los valores de máxima capacidad de la red se logra cuando la Densidad de Usuarios es aproximadamente de 300 UE/Km² para el caso compartido y de 200 UE/Km² para el caso de partición de espectro (ver Figura 5.17(d)). Lo anterior establece que la capacidad de la red deja de aumentar aun cuando se emplee una estrategia óptima de asignación de potencia, lo que valida que la capacidad de la UDN no puede incrementar de forma lineal conforme se aumente la densidad de estaciones base en la red, sino que este incremento depende de la cantidad de usuarios que se requieran atender.

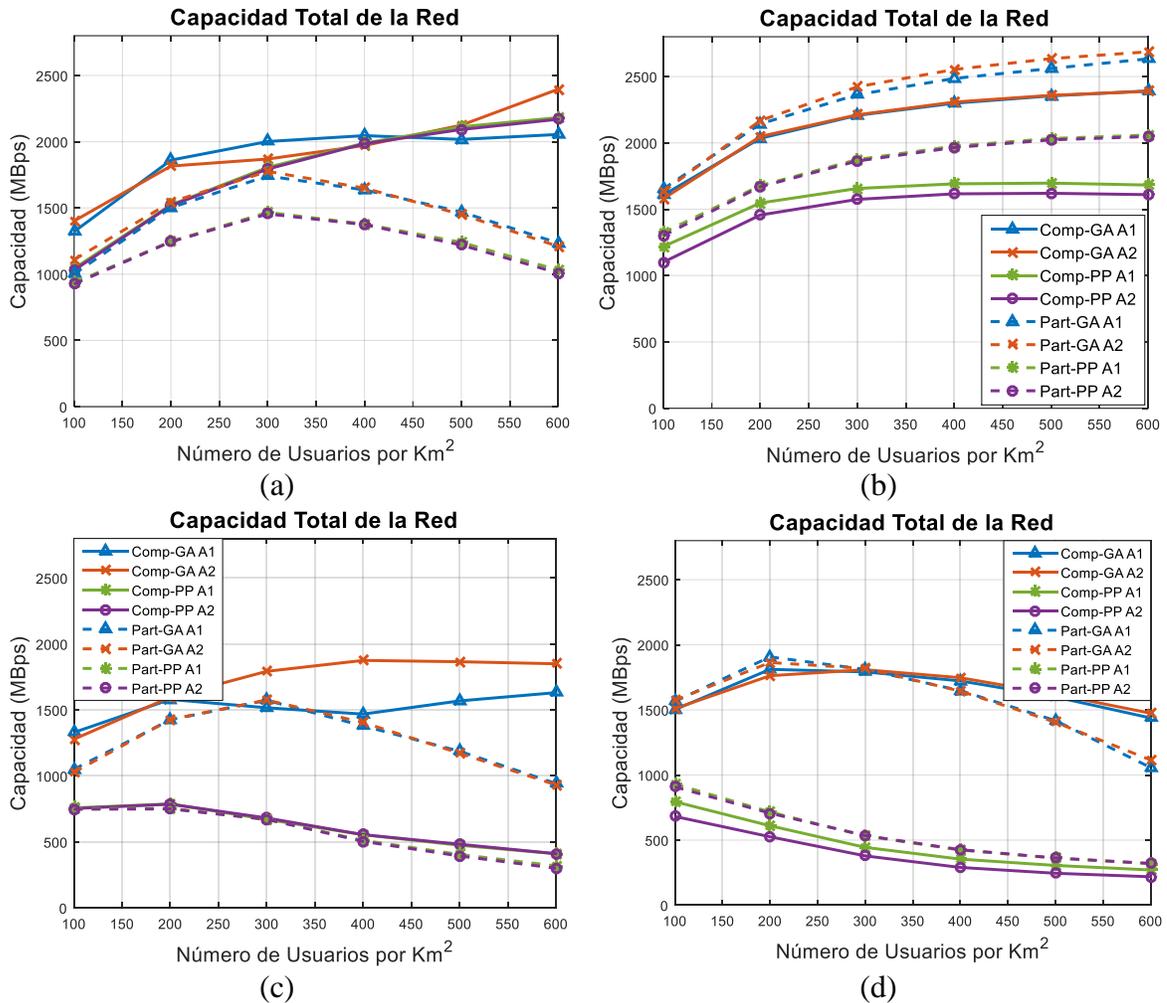


Figura 5.17. Evaluación de la Capacidad de la UDN con respecto al incremento de UE, se consideró una densidad de estaciones base DBS=2500 y las siguientes condiciones: (a) SINR_{th}:9.4 dB, Rf:10 m., (b) SINR_{th}:9.4 dB, Rf:25 m., (c) SINR_{th}:22.4 dB, Rf:10 m., (d) SINR_{th}:22.4 dB, Rf:25 m.

En las Figuras 5.17 (a), (c) y (d) se puede observar que la interferencia afecta en mayor medida el esquema particionado, ya que este logra menores valores de capacidad en comparación con el esquema compartido. Esta diferencia de capacidad lograda en el esquema de partición de espectro, con respecto al esquema compartido, se debe a que la cantidad de usuarios es mayor a la cantidad de canales disponibles por FBS, por lo que el esquema particionado debe adaptar las porciones de ancho de banda para cada red (red MacroCelular y red FemtoCelular), es decir, en la sección 3.1, se presentó la selección del ancho de banda para el esquema particionado, la cual depende de la cantidad de usuarios asociados en cada red (MBS y FBS), entre mayor número de FUE, mayor espectro será asignado para la red

FemtoCelular y con esto mayor reutilización y mayor capacidad de la red.. Sin embargo, esta reducción de la capacidad es compensada por una mayor cantidad de usuarios atendidos en comparación a utilizar el esquema compartido como se puede observar en las Figuras 5.18-5.21.

En las Figuras 5.18 a 5.21 se observa que al reducir el efecto negativo de la interferencia (GA) el esquema de partición de espectro logra una atención total a los usuarios en la red (FUE y MUE), mientras que en los esquemas compartidos los MUE tienen un porcentaje de atención entre el 36-100% y el 11-70% utilizando asociación por distancia (A1) y asociación por pérdidas por trayectorias (A2) respectivamente. Aunque para densidades de usuarios bajas (menor a 300 UE/ km²) los MUE son atendidos en su totalidad, cuando se incrementa el número de usuarios, incrementan también las estaciones base activas y las transmisiones interferentes, provocando que los MUE no encuentren canales con condiciones mínimas para transmitir. Por otro lado, se puede resaltar que al utilizar un radio de 25 metros y una asociación por distancia (A1), se logra el 100% y el 82% de atención a los MUE con la asociación A1 (ver Figura 5.20 y 5.21) a diferencia del 72% y del 11% alcanzados con la asociación por pérdidas por trayectorias (A2) utilizando un $SINR_{th}$ bajo y un $SINR_{th}$ alto, respectivamente.

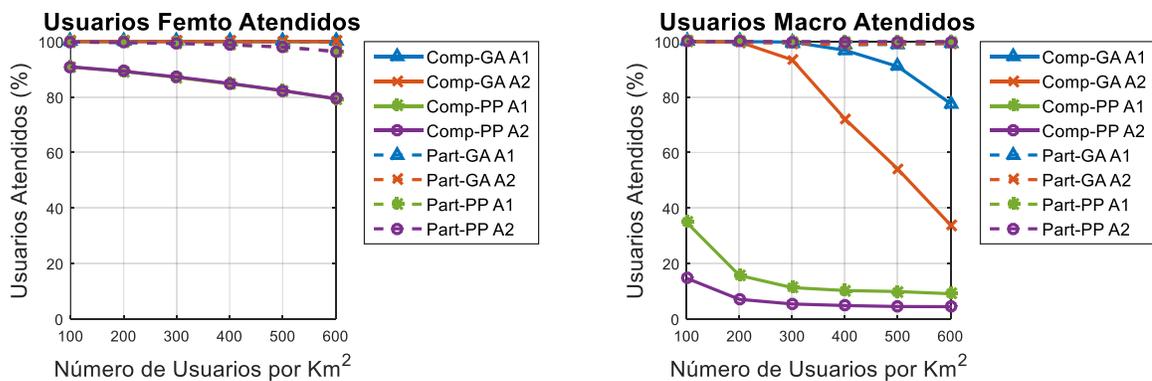


Figura 5.18. Usuarios atendidos en incremento de UE (DBS:2500, Radio:10m, $SINR_{th}$:9.4).

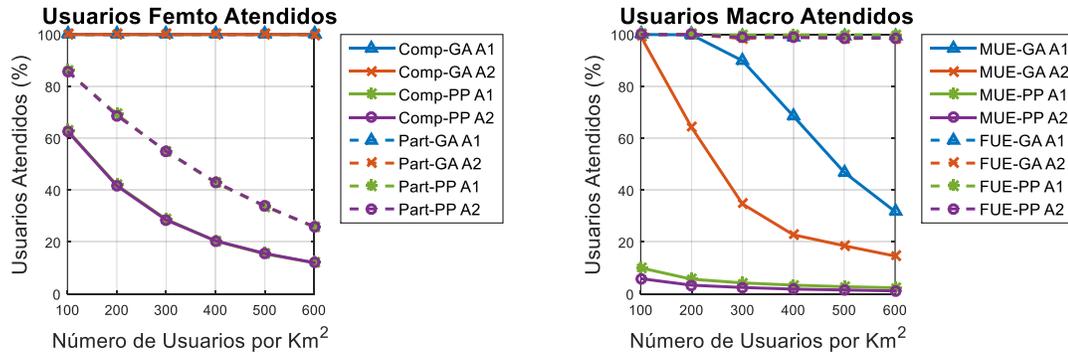


Figura 5.19. Usuarios atendidos en incremento de UE (DBS:2500, Radio:10m, SINR_{th}:22.4).

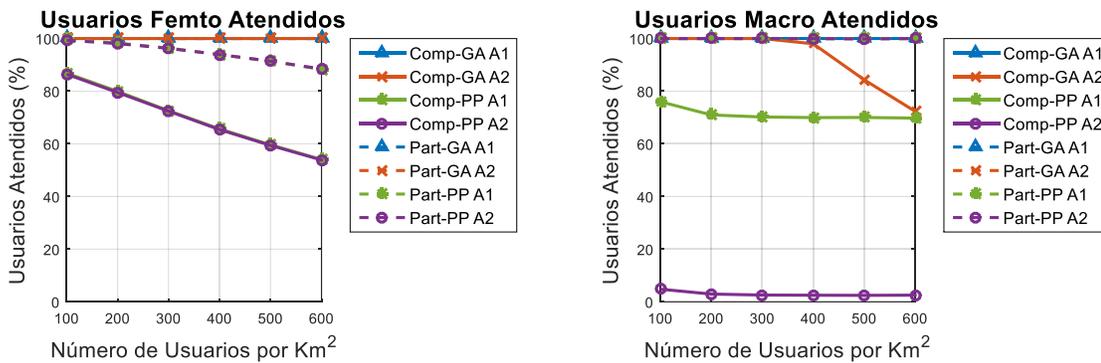


Figura 5.20. Usuarios atendidos en incremento de UE (DBS:2500, Radio:25m, SINR_{th}:9.4).

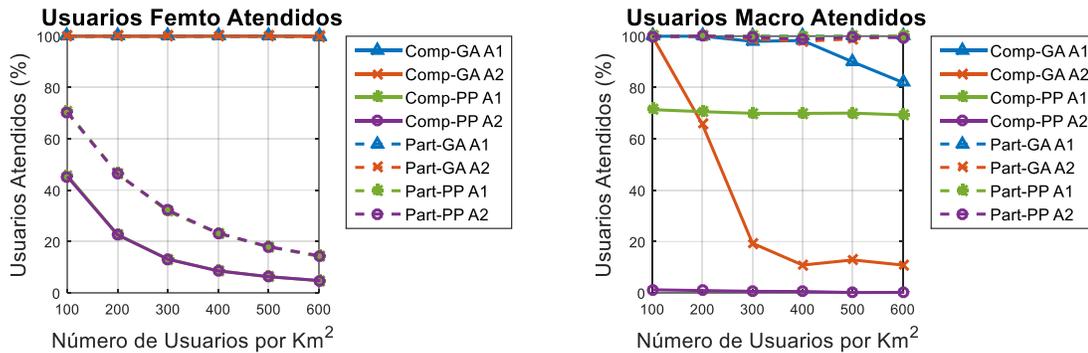


Figura 5.21. Usuarios atendidos en incremento de UE (DBS:2500, Radio:25m, SINR_{th}:22.4).

Los valores de atención de usuarios (porcentaje de usuarios atendidos) y los valores de capacidad (Mbps) para cada escenario evaluado se presentan en las Tablas 5.8 y 5.9, para los casos en los que el $SINR_{th}$ es de 9.4 dB y 22.4 dB respectivamente. En este caso, se observan los valores máximos de capacidad y de usuarios atendidos para diferentes valores de densidad de usuarios, el valor de Densidad de Estaciones Base se mantiene fijo en 2500 BS/Km². En cada tabla se utilizó una escala de colores (rojo a verde) en donde los colores

rojos indican los valores más bajos, mientras que los verdes los más altos. La escala de colores fue aplicada a los esquemas de partición y compartición en conjunto. Además, fue dividida en dos secciones, el renglón de atención a usuarios y el renglón de la capacidad de la red. En donde cada sección está compuesta de los escenarios (GA-A1, GA-A2, PP-A1, PP-A2) y los radios de asociación (Rf:10 y Rf:25) considerados.

En la Tabla 5.8 y 5.9 se observa que los escenarios con un radio de 25 metros y control de potencia (GA-A1 y GA-A2) son los que logran la mayor atención de usuarios. Por otra parte, cuando no se utiliza la coordinación (PP-A1 y PP-A1) la cantidad de usuarios sin servicio disminuye gradualmente cuando el $SINR_{th}$ es bajo (9.4 dB), mientras que cuando el $SINR_{th}$ es de 22.4 dB la atención disminuye hasta el 4.7% y 15.3 en los esquemas compartidos y particionados, respectivamente. Además, se observan que con control de potencia se obtienen los mayores valores de capacidad

Tabla 5.8. Tabla de concentrado de los resultados de la evaluación de la red UDN con respecto al incremento de usuarios, considerando una Densidad de Estaciones Base (DBS:2500) y un $SINR_{th}$ bajo, utilizando una escala de colores.

DBS: 2500 BS/Km ² SINR _{th} : 9.4 dB			Compartición de espectro						Partición de espectro					
			Densidad de UE											
			100	200	300	400	500	600	100	200	300	400	500	600
Usuarios Atendidos (%)	Rf: 10m	GA-A1	100	100	99.9	98.9	96.9	92.5	100	100	99.8	99.6	99.6	99.7
		GA-A2	100	99.9	97.8	90.7	84.6	77.7	100	99.9	99.8	99.6	99.7	99.7
		PP-A1	72.3	64.8	61.9	60.0	58.3	56.0	99.9	99.7	99.5	99.2	98.6	97.6
		PP-A2	66.0	62.4	60.4	58.6	56.6	54.6	99.9	99.7	99.5	99.2	98.6	97.5
	Rf: 25m	GA-A1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		GA-A2	100	100	100	99.9	99.7	99.6	100	100	100	100	100	100
		PP-A1	86.2	78.6	72.5	65.7	59.7	54.2	99.5	98.3	96.4	93.9	91.5	88.4
		PP-A2	81.9	77.2	70.9	64.3	58.7	53.2	99.3	98.1	96.3	94.0	91.5	88.6
Capacidad Total (Mbps)	Rf: 10m	GA-A1	1321	1861	2001	2045	2017	2054	1001	1501	1741	1636	1469	1235
		GA-A2	1401	1862	1869	1971	2124	2395	1109	1544	1776	1649	1450	1210
		PP-A1	1043	1523	1806	1989	2112	2181	935	1247	1466	1378	1240	1030
		PP-A2	1030	1518	1793	1985	2092	2169	925	1244	1454	1373	1220	1008
	Rf: 25m	GA-A1	1606	2034	2207	2298	2354	2391	1653	2143	2363	2485	2561	2635
		GA-A2	1579	2048	2211	2307	2358	2388	1632	2168	2422	2553	2635	2686
		PP-A1	1285	1547	1656	1691	1696	1682	1323	1678	1874	1975	2033	2059
		PP-A2	1100	1456	1574	1615	1620	1609	1301	1669	1863	1965	2022	2047

Tabla 5.9. Tabla de concentrado de los resultados de la evaluación de la red UDN con respecto al incremento de usuarios, considerando una Densidad de Estaciones Base (DBS:2500) y un $SINR_{th}$ alto, utilizando una escala de colores.

DBS: 2500 BS/Km ² SINRth: 22.4 dB			Compartición de espectro						Partición					
			Densidad de UE											
			100	200	300	400	500	600	100	200	300	400	500	600
Usuarios Atendidos (%)	Rf: 10m	GA-A1	100	99.9	96.7	89.7	82.8	77.9	100	100	99.7	99.6	99.7	99.8
		GA-A2	99.7	88.1	78.6	75.1	73.2	72.3	100	100.0	99.4	99.7	99.4	99.5
		PP-A1	45.3	29.8	20.6	14.7	11.2	8.8	90.6	79.5	69.8	61.8	55.6	50.3
		PP-A2	44.1	29.1	20.0	14.4	10.9	8.4	90.4	78.9	69.2	61.3	55.1	49.8
	Rf: 25m	GA-A1	100	100	99.9	99.9	99.8	99.7	100	100	100	100	100	99.7
		GA-A2	100	98.7	98	98.2	98.5	98.7	100	100	99.9	99.9	99.9	99.7
		PP-A1	47.2	24.1	14.3	9.6	7.2	5.6	72.3	48.0	33.2	24.6	19.1	15.3
		PP-A2	42.9	21.9	12.8	8.4	6.2	4.7	71.9	47.8	33.6	24.5	19.1	15.5
Capacidad Total (Mbps)	Rf: 10m	GA-A1	1329	1580	1516	1468	1568	1631	1050	1425	1573	1379	1187	943
		GA-A2	1278	1597	1792	1875	1865	1850	1027	1427	1575	1405	1172	932
		PP-A1	757	788	670	554	474	410	753	754	669	511	404	318
		PP-A2	753	785	681	555	482	411	747	749	671	504	393	300
	Rf: 25m	GA-A1	1502	1811	1791	1722	1599	1438	1565	1907	1811	1648	1417	1057
		GA-A2	1510	1762	1808	1747	1620	1474	1573	1863	1818	1643	1405	1115
		PP-A1	794	610	444	353	305	270	930	716	531	423	361	319
		PP-A2	681	525	378	290	245	218	908	706	535	426	362	320

5.3 Discusión de resultados

Conforme se incrementa la densidad de estaciones base y la aleatoriedad de su despliegue, la interferencia en una UDN será más impredecible y menos controlable con respecto a una red celular convencional (es decir, con menos BS). Algunos resultados teóricos indican que el potencial en capacidad que puede ofrecer la densificación de la red tiende a disminuir por causa de dicha interferencia, generada por la heterogeneidad de la UDN y la densidad tan alta de estaciones base que reutilizan el espectro. Por ejemplo, las FBSs son instaladas básicamente por los usuarios, en lugar de ser parte de un despliegue planeado. Por esa razón algunos trabajos reportan estudios sobre el análisis y comportamiento de la interferencia en UDN, con el fin de poder establecer estrategias para controlarla de manera efectiva. Los resultados presentados en este capítulo muestran que existe una densidad de estaciones base crítica, que, más allá de este límite, la capacidad espacial de la UDN tiende a disminuir. Por lo que es necesario coordinar la interferencia cuando la cantidad de canales comienza a ser menor a la cantidad de usuarios disponibles. Con la coordinación de interferencia, más conexiones pueden atenderse sin que la red sufra degradación en su capacidad. La densificación de BSs permite que más recursos sean disponibles para los usuarios. Sin embargo, si no se cuenta con una BS central que coordine

la interferencia y controle los niveles de potencia de cada usuario de acuerdo con las condiciones del entorno, una gran cantidad de usuarios se quedarán sin servicio. Es decir, no lograrían la QoS mínima para transmitir. Aun si la capacidad total de la red disminuye, la estrategia de coordinación de interferencia permite que más usuarios cuenten con recursos para sus transmisiones. Especialmente cuando se utiliza el esquema particionado. Por otro lado, cuando la cantidad de usuarios es baja, coordinar la interferencia mejora la calidad general de la red. Es decir, el algoritmo mantiene las condiciones de usuarios altas, lo que significa que todos los usuarios pueden alcanzar altas tasas de transferencia de datos. En escenarios con una alta densidad de usuarios, los esquemas particionados logran mayor atención de usuarios, pero velocidades de datos menores. Como consecuencia este esquema puede aplicarse en escenarios donde no se requieran altas tasas de transmisión. Mientras que en los esquemas compartidos se puede lograr una mayor capacidad general en la red, por una mayor reutilización de canales a costa de la atención a los MUE que son afectados en gran medida por los enlaces interferentes de los FUE. Lo que indica que para aprovechar el beneficio de este esquema para altas densidades de usuarios es necesario utilizar técnicas de coordinación adicionales (tales como, el reuso de frecuencia fraccional o reuso de frecuencia suave [66] no consideradas en este trabajo). No obstante, la coordinación de interferencia mejora la cantidad de MUE atendidos por este esquema, lo que indica una tendencia a una asociación de usuarios total por las FBS (escenario que no fue considerado).

Respecto a las técnicas de asociación consideradas, los resultados muestran una tendencia a favor de la asociación por distancia, tanto si se utiliza o no se utiliza coordinación de interferencia. Es decir, en un escenario heterogéneo en donde cada usuario tiene distintos requerimientos de QoS, distintas trayectorias de los enlaces de comunicación (desvanecimiento por trayectorias múltiples), diferentes pérdidas por trayectoria (LOS/NLOS) y las transmisiones interferentes varían constantemente, mantener la distancia de transmisiones lo más cortas posible (UE-BS) por medio de la asociación por distancia logra una mayor cantidad de usuarios atendidos respecto a tener una mayor fuerza de la señal con la asociación por pérdidas por trayectoria.

En general, los resultados han demostrado que es posible mantener enlaces de comunicación para el incremento de usuarios previsto por medio de las redes móviles UDN.

Sin embargo, para lograr altas tasas de datos y una comunicación confiable, es necesario implementar técnicas de coordinación de interferencia. De lo contrario, los usuarios móviles no podrán alcanzar las tasas deseadas, y la variabilidad del entorno podría ocasionar pérdidas constantes en las transmisiones. Además, los esquemas particionados deberían implementarse en conjunto con una alta densificación de la red para aprovechar los beneficios de la reutilización y de la mitigación de interferencia que estos proveen a los usuarios asociados a las FBS.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

6.1 Resumen del trabajo

En el proceso de mejorar las capacidades de los sistemas Móviles, la heterogeneidad de las redes, así como la compartición armónica de recursos entre ellas han sido dos de las estrategias fundamentales para lograr las metas propuestas en cada nueva generación. Se espera que los recientes sistemas 5G conecten a personas, cosas, datos, aplicaciones, sistemas de transporte y ciudades a través de una comunicación inteligente. El aumento del tráfico y la velocidad requeridos para la red 5G requerirán tecnologías espectralmente más eficientes, así como espectro adicional, más allá del que actualmente utilizan los sistemas 3G y 4G. De entre las tecnologías o estrategias propuestas para mejorar el uso del espectro, atender el aumento anticipado en el tráfico, la cantidad de dispositivos, los servicios, así como la demanda de mejor accesibilidad y experiencia del usuario, se encuentra la densificación de la red. Sin embargo, esta densificación no está exenta de retos y áreas de oportunidad que deben identificarse y abordarse para garantizar un ecosistema móvil viable para el futuro.

El desempeño de la UDN está restringido por la cantidad de usuarios y por la interferencia entre celdas (inter-cell). Este incremento de interferencia se debe a que los nodos de baja potencia que atienden las FBSs están más cercas unos de otros, y a la reutilización del espectro entre ellas para incrementar la eficiencia espectral. Uno de los objetivos principales de la densificación de la red es transferir a los usuarios de una concurrida macrocelda a un conjunto de FBSs.

En este trabajo se propuso un método de asignación de recursos que reduce la interferencia en los enlaces descendentes causada por el número masivo de usuarios y BSs. Para ello, se modeló el problema de asignación de potencia como un problema de optimización en el que su objetivo es maximizar la capacidad de la red y al mismo tiempo identificar la influencia de la densidad de usuarios, estaciones base, radios de cobertura sobre el diseño de UDNs.

La estrategia de asignación de potencia se evaluó bajo dos escenarios de reutilización de espectro: compartido y particionado. En el esquema de espectro compartido los usuarios Macrocelular y Femtocelular comparten todo el espectro disponible en la red, mientras que en el esquema particionado el ancho de banda total se divide y distribuye entre las dos redes, garantizando una reducción inicial de la interferencia entre ellas.

Los resultados obtenidos muestran que al aplicar una coordinación de interferencia en un esquema compartido se mejora la capacidad de la red a costa de una reducción en la cantidad de usuarios atendidos, esto debido al alto nivel de interferencia que se genera por la compartición del espectro. Mientras que, con el esquema particionado, la estrategia de coordinación de interferencia permite que el sistema atienda al 100% de los usuarios a costa de una reducción de la capacidad de la red, debido a que se reducen los recursos espectrales disponibles para compartir entre la red femtocelular. Estos resultados permiten establecer que existe un marcado compromiso entre la capacidad que puede ofrecer la red UDN y el porcentaje de usuarios que puede atender con un limitado conjunto de recursos. Sin embargo, aplicar una estrategia de coordinación de interferencia mediante la asignación eficiente de potencia es posible mejorar estos resultados.

6.2 Conclusiones

Dados los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- Con respecto a las estrategias de asociación de usuarios a celdas, ya sea por distancia o por pérdidas por trayectoria, se concluye que la forma en la que los usuarios seleccionan alguna estación base para establecer su comunicación no influye significativamente sobre la capacidad individual de los usuarios en la UDN, pero sí en la cantidad de usuarios que la red puede atender. Para que la femtocelda logre atender a un mayor número de usuarios es recomendable, con base a los resultados obtenidos en este trabajo, asociar a los usuarios a la estación base más cercana (esto es, asociación por distancia) para evitar que la interferencia proveniente de otras BS afecte negativamente su comunicación.
- Lograr un despliegue de FBSs en el que las distancias entre UE-BS sean lo mínimo posible le permite a la UDN, bajo un esquema de compartición de espectro, aprovechar mejor los recursos. Sin embargo, en escenarios en los que las FBS ofrecen radios de cobertura de poca distancia, la interferencia co-tier es un factor que se vuelve difícil de coordinar entre mayor es la densidad de usuarios. Por otra parte, en un esquema particionado es posible lograr mejores niveles de capacidad, siempre y cuando la cantidad de FUE sea mayor que la cantidad de MUE. Bajo este esquema particionado es menos complejo coordinar la interferencia co-tier y lograr una mayor cantidad de canales con niveles de *SINR* aceptables para transmitir.
- La densificación de BS aumenta la capacidad general de la red al activar más BS, descargar a la MBS y reutilizar más recurso en la red femtocelular. Sin embargo, para aumentar la atención total de los usuarios es necesario aplicar esquemas de partición de espectro en el diseño de una red UDN.

Con respecto a las preguntas de investigación planteadas en el problema de investigación se identifica lo siguiente:

- ¿Cuáles deberían ser las condiciones de despliegue de nodos de baja potencia para que la coordinación de interferencia en una Red Ultra-Densa mejore la capacidad de la red?

Para que los usuarios se beneficien del despliegue de una Red Ultra-Densa, los nodos de baja potencia (FBS) deben atender a una cantidad de usuarios mayor que la red Macrocelular incrementando así la cantidad de recursos reutilizados en la red. Además, es posible que los usuarios mejoren sus niveles de transferencia de datos y mantengan altos niveles de QoS. Sin embargo, con el crecimiento inminente de usuarios es necesario aplicar técnicas de coordinación de interferencia que mantengan los enlaces con niveles altos de *SINR*. Con el fin de minimizar la interferencia potencial que perciben los usuarios, las estaciones base deben distribuirse con una distancia mínima entre ellas, evitando estaciones base contiguas y cubriendo la mayor parte de la cobertura de la macrocelda con el propósito de que sea posible asociar la mayor cantidad de usuarios a las femtoceldas. Es decir, los resultados mostraron que la capacidad de la red y la atención a usuarios aumenta cuando la cantidad de estaciones base también aumenta. No obstante, al asociar a los usuarios atendidos por la macrocelda a femtoceldas cercanas a ellos es posible obtener resultados similares en capacidad de la red y atención de usuarios siempre y cuando se coordinar eficientemente la asignación de potencia, aun en escenarios con menores densidades de estaciones base.

- ¿De qué manera influye la estrategia de asignación de potencia sobre los esquemas de partición y compartición de espectro en una Red Ultra-Densa (UDN)?

La estrategia de asignación de potencia logra incrementar la capacidad y la cantidad de usuarios atendidos bajo los esquemas de partición y compartición con respecto a asignar potencias iguales a todos los enlaces de comunicación. Sin embargo, bajo los esquemas compartidos se observa un mayor impacto, debido a que en este esquema la interferencia inter-celular afecta a una gran cantidad de usuarios, por lo que al aplicar la estrategia de asignación de potencia mejora notablemente la capacidad y la atención de los mismos. Por otro lado, en los esquemas de partición en escenarios de baja densidad, la atención de usuarios se mantiene alta al mitigar la interferencia inter-celular, incluso cuando no se aplica la estrategia de coordinación de potencia. Sin embargo, cuando la densidad de usuarios aumenta, también lo hace la interferencia intra-celular, provocando que la cantidad de usuarios atendidos disminuya considerablemente respecto a cuando se utiliza la estrategia de coordinación de potencia propuesta.

6.3 Limitantes

Las limitantes encontradas en el modelo UDN analizado, son las siguientes:

- El GA aplicado como técnica de optimización, no cuenta con un mecanismo para reasignar canales que no cumplen con las QoS mínima para considerarse transmitibles. Los canales se asignan a cada usuario en una etapa anterior a la asignación de potencia de acuerdo con sus condiciones de propagación sin considerar la interferencia que se pueda generar y no es posible reasignarlos durante los ciclos del GA.
- El modelo de asignación de potencia propuesto maximiza la capacidad general de la red. Sin embargo, las demandas individuales de los usuarios no se tomaron en cuenta, por lo que, aunque los resultados muestren que los usuarios son atendidos y se aumente la capacidad de la red, no es posible determinar si las tasas de transmisión de los usuarios son suficientes para satisfacer sus necesidades.
- Este estudio se enfocó solamente en optimizar algunos parámetros técnicos de diseño de una UDN, y no se consideraron factores económicos en el modelo, los cuales podrían ser de interés significativo para los operadores de redes.

6.4 Contribuciones

En esta sección se resumen las contribuciones obtenidas de este trabajo de tesis.

- Se desarrolló una metodología experimental de cómo aplicar un algoritmo genético para resolver el problema de asignación de potencia en una red UDN tomando en cuenta la equidad y la interferencia potencial.
- Se determinó el compromiso entre capacidad y porcentaje de atención a usuarios bajo los esquemas de compartición y partición de espectro.
- Se realizó un análisis numérico sobre la influencia que ejercen diferentes parámetros como; radio de cobertura de las femtoceldas, densidad de usuarios y BSs y calidad de servicio, en el diseño de una red UDN.

6.5 Trabajo futuro

Las investigaciones que se pueden realizar para continuar con este trabajo son las siguientes:

- En este trabajo se demostró que aplicar control de potencia mejora la capacidad y la atención en una red UDN. Este rendimiento, sin embargo, está limitado por la tasa de crecimiento de los usuarios. La asignación conjunta, no individual, de recursos puede mejorar las condiciones de los usuarios, por lo que sería necesario desarrollar y evaluar un algoritmo de asignación de recursos conjunto y evaluar su desempeño en una red UDN tomando en cuenta el servicio ubicuo y el cumplimiento de las demandas de tasas de datos de los usuarios.
- Los resultados mostraron que la red logra una mayor capacidad al asociar una gran cantidad de usuarios a las celdas femtocelulares. Sin embargo, esta asociación también activa más BS provocando que se generen mayores niveles de interferencia en la red. Por lo que es necesario incluir estrategias de reasignación de BS y eficiencia energética para controlar la potencia total de la red.
- El trabajo actual considera una red UDN. Sin embargo, se tiene previsto que el despliegue masivo de celdas trabaje en conjunto con tecnologías de mm-Wave y MIMO. Por lo que, para investigaciones futuras la implementación de estas tecnologías debe ser considerada.

Referencias

- [1] Nisha Panwar, Shantanu Sharma, Awadhesh Kumar Singh, A survey on 5G: The next generation of mobile communication, *Physical Communication*, Volume 18, Part 2, March 2016, 64-84.
- [2] J. Lee et al., "Spectrum for 5G: Global Status, Challenges, and Enabling Technologies," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 3, pp. 12-18, MARCH 2018.
- [3] T. S. Rappaport et al., "Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!," in *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, 2013.
- [4] K. Chandra, A. S. Marcano, S. Mumtaz, R. V. Prasad and H. L. Christiansen, "Unveiling Capacity Gains in Ultradense Networks: Using mm-Wave NOMA," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, no. 2, pp. 75-83, June 2018.
- [5] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, C. I. I and Z. Wang, "Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 9, pp. 74-81, September 2015.
- [6] M. Kamel, W. Hamouda and A. Youssef, "Ultra-Dense Networks: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 4, pp. 2522-2545, Fourthquarter 2016.
- [7] J. Chen, Z. Gao and Q. Zhao, "Load-aware dynamic spectrum access in ultra-dense small cell networks," 2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), Nanjing, 2015, pp. 1-5
- [8] Y. Teng, Y. Wang and K. Horneman, "Co-Primary spectrum sharing for denser networks in Local Area", 2014 9th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM), Oulu, 2014, pp. 120-124.
- [9] N. Bhushan et al., "Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 82-89, February 2014.
- [10] I. P. Belikaidis, A. Georgakopoulos, E. Kosmatos, V. Frascolla and P. Demestichas, "Management of 3.5-GHz Spectrum in 5G Dense Networks: A Hierarchical Radio Resource Management Scheme," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, no. 2, pp. 57-64, June 2018.
- [11] J. G. Andrews, X. Zhang, G. D. Durgin and A. K. Gupta, "Are we approaching the fundamental limits of wireless network densification?" in *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 10, pp. 184-190, October 2016.
- [12] Z. Zhang, G. Yang, Z. Ma, M. Xiao, Z. Ding and P. Fan, "Heterogeneous Ultradense Networks with NOMA: System Architecture, Coordination Framework, and Performance Evaluation," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, no. 2, pp. 110-120, June 2018.
- [13] V. M. Nguyen and M. Kountouris, "Performance Limits of Network Densification," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 6, pp. 1294-1308, June 2017.

- [14] J. Qiu et al., "Hierarchical Resource Allocation Framework for Hyper-Dense Small Cell Networks," in *IEEE Access*, vol. 4, pp. 8657-8669, 2016.
- [15] X. Tang, P. Ren, F. Gao and Q. Du, "Interference-Aware Resource Competition Toward Power-Efficient Ultra-Dense Networks," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 12, pp. 5415-5428, Dec. 2017.
- [16] M. Ding, D. López-Pérez, G. Mao, P. Wang, and Z. Lin, "Will the area spectral efficiency monotonically grow as small cells go dense?" in *Proc. IEEE Glob. Commun. Conf. (GLOBECOM)*, San Diego, CA, USA, Dec. 2015, pp. 1–7.
- [17] J. Ghosh, D. Nalin, K. Jayakody, and M. Qaraqe, "Downlink capacity of OFDMA-CR based 5G femtocell networks," *Physical Communication*, 2018.
- [18] A. G. Gotsis, S. Stefanatos and A. Alexiou, "Optimal user association for Massive MIMO empowered ultra-dense wireless networks," 2015 *IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, London, 2015, pp. 2238-2244.
- [19] M. I. Kamel, W. Hamouda and A. M. Youssef, "Multiple association in ultra-dense networks," 2016 *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, 2016, pp. 1-6.
- [20] Enrique R. Bastidas-Puga , Guillermo Galaviz & Ángel G. Andrade (2017): Evaluation of SINR Prediction in Cellular Networks, *IETE Technical Review*, DOI: 10.1080/02564602.2017.1331760
- [21] S.-M. Cheng, W. C. Ao, F.-M. Tseng, K.-C. Chen, "Design and analysis of downlink spectrum sharing in two-tier cognitive femto networks", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 5, pp. 2194-2207, Jun. 2012.
- [22] K. Balachandran et al, 'Cell Selection with Downlink Resource Partitioning in Heterogeneous Networks', *Proc. IEEE. Int. Workshop on Heterogeneous Networks*, Kyoto, June 2011.
- [23] J. Yun and K. G. Shin, "Adaptive interference management of OFDMA femtocells for co-channel deployment," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 29, no. 6, pp. 1225-1241, Jun. 2011.
- [24] P.-H. Huang, H. Kao, W. Liao, "Cross-tier cooperation for optimal resource utilization in ultra-dense heterogeneous networks", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, pp. 11193-11207, Dec. 2017.
- [25] N. Naderializadeh, O. Orhan, H. Nikopour and S. Talwar, "Ultra-Dense Networks in 5G: Interference Management via Non-Orthogonal Multiple Access and Treating Interference as Noise," 2017 *IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Toronto, ON, 2017, pp. 1-6.
- [26] W. Yao, J. Li, B. Tan and S. Hao, "Interference management scheme of ultra-dense network based on clustering," 2017 *IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, Chengdu, 2017, pp. 374-377.
- [27] Y. Chen, Z. Yang and H. Zhang, "Opportunistic-based dynamic interference coordination in dense small cells deployment," 2017 *IEEE 28th Annual International Symposium on*

Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Montreal, QC, 2017, pp. 1-5.

- [28] X. Tang, P. Ren, F. Gao and Q. Du, "Interference-Aware Resource Competition Toward Power-Efficient Ultra-Dense Networks," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 12, pp. 5415-5428, Dec. 2017.
- [29] W. Li and J. Zhang, "Cluster-based resource allocation scheme with QoS guarantee in ultra-dense networks," in *IET Communications*, vol. 12, no. 7, pp. 861-867, 4 24 2018.
- [30] M. Zhang, X. Yang, T. Xu and M. T. Zhou, "Congestion-aware user-centric cooperative base station selection in ultra-dense networks," 2017 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Nanjing, 2017, pp. 1-6.
- [31] M. A. Adedoyin and O. E. Falowo, "QoS-based radio resource management for 5G ultra-dense heterogeneous networks," 2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), Oulu, 2017, pp. 1-6.
- [32] Y. Ye, H. Zhang, X. Xiong and Y. Liu, "Dynamic Min-Cut Clustering for Energy Savings in Ultra-Dense Networks," 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall), Boston, MA, 2015, pp. 1-5.
- [33] P. H. Huang, H. Kao and W. Liao, "Cross-Tier Cooperation for Optimal Resource Utilization in Ultra-Dense Heterogeneous Networks," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 12, pp. 11193-11207, Dec. 2017.
- [34] S. Lin, J. Yu, W. Ni and R. Liu, "Radio Resource Management for Ultra-Dense Smallcell Networks: A Hybrid Spectrum Reuse Approach," 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Sydney, NSW, 2017, pp. 1-7.
- [35] I. Shgluof, M. Ismail and R. Nordin, "Semi-Clustering of Victim-Cells Approach for Interference Management in Ultra-Dense Femtocell Networks," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 9032-9043, 2017.
- [36] Z. Ding, P. Fan and H. V. Poor, "Impact of User Pairing on 5G Nonorthogonal Multiple-Access Downlink Transmissions," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 8, pp. 6010-6023, Aug. 2016.
- [37] D. Chen, T. Jiang, Z. Zhang, "Frequency partitioning methods to mitigate cross-tier interference in two-tier femtocell networks", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 5, pp. 1793-1805, May 2015.
- [38] Estrada, R., Jarray, A., Otrók, H., & Dziong, Z. (2013). Base station selection and resource allocation in macrofemtocell networks under noisy scenario. *Wireless Networks: The Journal of Mobile Communication, Computation and Information*, 20(1), 115–131.
- [39] S.-M. Cheng W. C. Ao F.-M. Tseng K.-C. Chen "Design and analysis of downlink spectrum sharing in two-tier cognitive femto networks" *IEEE Trans. Veh. Technol.* vol. 61 no. 5 pp. 2194-2207 Jun. 2012.
- [40] M. Qutqut and H. Hassanien, "Mobility management in wireless broadband femtocells," *Tech. Reports* 2012-590, Queen's University, July 2012.

- [41] Burtseva, Larysa, and Frank Werner. "Using Mathematical Tessellation to Model Spherical Particle Packing Structures." *International Journal of Mathematics, Game Theory, and Algebra* 24.2/3 (2015): 249.
- [42] M. Haenggi, *Stochastic Geometry for Wireless Networks*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2012.
- [43] S. Singh, F. Baccelli and J. G. Andrews, "On Association Cells in Random Heterogeneous Networks," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 70-73, February 2014.
- [44] 3GPP TR 36.912 V2.0.0, "3GPP; Technical Specification Group Radio Access Network; Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA (Release 9)," Aug. 2009.
- [45] D. Fooladivanda and C. Rosenberg, "Joint Resource Allocation and User Association for Heterogeneous Wireless Cellular Networks," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 1, pp. 248-257, January 2013.
- [46] A. Khandekar, N. Bhushan, J. Tingfang and V. Vanghi, "LTE-Advanced: Heterogeneous networks," 2010 European Wireless Conference (EW), Lucca, 2010, pp. 978-982.
- [47] D. López-Pérez, X. Chu, and I. Guvenc, "On the expanded region of picocells in heterogeneous networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 6, no. 3, pp. 281–294, Jun. 2012.
- [48] S. A. Ahmad and D. Datla, "Distributed power allocations in heterogeneous networks with dual connectivity using backhaul state information," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 8, pp. 4574–4581, Aug. 2015.
- [49] J. Zhang, Q. Zeng, T. Mahmoodi, A. Georgakopoulos, and P. Demestichas, *LTE Small Cell Enhancement by Dual Connectivity*, Wireless World Res. Forum, Zürich, Switzerland, Nov. 2014.
- [50] S. C. Jha, K. Sivanesan, R. Vannithamby, and A. T. Koc, "Dual connectivity in LTE small cell networks," in *Proc. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Austin, TX, USA, Dec. 2014, pp. 1205–1210.
- [51] Kawser, Mohammad & Farid, Hasib & R. Hasin, Abduhu & M. J. Sadik, Adil & K. Razu, Ibrahim, "Performance Comparison between Round Robin and Proportional Fair Scheduling Methods for LTE", *International Journal of Information and Electronics Engineering*, 2012, pp. 678-681.
- [52] M. Ding, D. Lopez-Perez, H. Claussen, M. A. Kaafar, "On the Fundamental Characteristics of Ultra-Dense Small Cell Networks", *IEEE Network*, vol. 32, no. 3, pp. 92-100, May/June 2018.
- [53] Gross, James & Bohge, Mathias. (2006). *Dynamic Mechanisms in OFDM Wireless Systems: A Survey on Mathematical and System Engineering Contributions*. TKN Technical Report.
- [54] A.Y. Zomaya and M. Wright, "Observation on Using Genetic Algorithms for Channel Allocation in Mobile Computing," *IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems*, vol 13, no. 9, pp. 948-962, Sept. 2002.

- [55] L. He, X. Su, J. Zeng and Y. Kuang, "Joint resource allocation method in heterogeneous wireless networks based on genetic algorithm," 2012 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Huangshan, 2012, pp. 1-5.
- [56] H. Marshoud, H. Otrok, H. Barada, R. Estrada, A. Jarray and Z. Dziong, "Resource allocation in macrocell-femtocell network using genetic algorithm," 2012 IEEE 8th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), Barcelona, 2012, pp. 474-479.
- [57] Y. B. Reddy, N. Gajendar, P. Taylor and D. Madden, "Computationally Efficient Resource Allocation in OFDM Systems: Genetic Algorithm Approach," Fourth International Conference on Information Technology (ITNG'07), Las Vegas, NV, 2007, pp. 36-41.
- [58] Z. Zhao, Z. Peng, S. Zheng and J. Shang, "Cognitive radio spectrum allocation using evolutionary algorithms," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 9, pp. 4421-4425, September 2009.
- [59] R. Estrada, H. Otrok and Z. Dziong, "Resource allocation model based on Particle Swarm Optimization for OFDMA macro-femtocell networks," 2013 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS), Kattankulathur, 2013, pp. 1-6.
- [60] M. Adedoyin and O. Falowo, "Joint optimization of energy efficiency and spectrum efficiency in 5G ultra-dense networks," 2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), Oulu, 2017, pp. 1-6.
- [61] N. Sivanandam, S & Deepa, S N. (2008). *Introduction to Genetic Algorithms*.
- [62] Lozano, Manuel & Herrera, Francisco & Cano, José. (1970). *Replacement Strategies to Maintain Useful Diversity in Steady-State Genetic Algorithms*. 10.1007/3-540-32400-3_7.
- [63] Craenen, Bart & Eiben, A & Marchiori, Elena. (2001). *How to Handle Constraints with Evolutionary Algorithms*. 10.1201/9781420035568.ch10.
- [64] Sorsa, A., Leiviskä, K. *Real-coded genetic algorithms and nonlinear parameter identification*. IS 2008 - IEEE International Conference on Intelligent Systems, Varna, Bulgaria, September 6-8, 2008.
- [65] J. Deissner and G. Fettweis, "A study on hierarchical cellular structures with inter-layer reuse in an enhanced GSM radio network," in *Proc. IEEE Int. Workshop MoMuC*, 1999, pp. 243–251.
- [66] H. E. E. O. M. Elfadil, M. A. I. Ali and M. Abas, "Fractional frequency reuse in LTE networks," 2015 2nd World Symposium on Web Applications and Networking (WSWAN), Sousse, 2015, pp. 1-6.