

**ANÁLISIS DEL *THROUGHPUT* DE UNA RED HETEROGÉNEA QUE
IMPLEMENTE UN ALGORITMO DE ASIGNACIÓN DE ESPECTRO BASADO EN
TEORÍA DE JUEGOS**



**Carlos Alberto Narváez Muñoz
Johana Isabel Terán Narváez**

**Director
Ing. Víctor Fabián Miramá Pérez**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas – GRIAL
Popayán, Diciembre de 2016**

**ANÁLISIS DEL *THROUGHPUT* DE UNA RED HETEROGÉNEA QUE
IMPLEMENTE UN ALGORITMO DE ASIGNACIÓN DE ESPECTRO BASADO EN
TEORÍA DE JUEGOS**



Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones

**Carlos Alberto Narváez Muñoz
Johana Isabel Terán Narváez**

**Director
Ing. Víctor Fabián Miramá Pérez**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas – GRIAL
Popayán, Diciembre de 2016**

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. REDES MÓVILES HETEROGÉNEAS Y GESTIÓN DE RECURSOS RADIO.....	3
1.1 RED MÓVIL CELULAR.....	3
1.2 REDES HETEROGÉNEAS.....	4
1.3 THROUGHPUT.....	5
1.4 INTERFERENCIA.....	5
1.5 GESTIÓN DE RECURSOS RADIO.....	8
CAPÍTULO 2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE TEORÍA DE JUEGOS.....	10
2.1 ¿QUÉ ES LA TEORÍA DE JUEGOS?.....	10
2.2 DEFINICIÓN DE JUEGO.....	11
2.2.1 ELEMENTOS DE UN JUEGO.....	11
2.3 JUEGOS NO COOPERATIVOS.....	11
2.3.1 Forma normal o estratégica.....	12
2.3.2 Forma extensiva.....	12
2.4 JUEGOS COOPERATIVOS.....	13
2.5 CLASIFICACIÓN DE JUEGOS.....	13
2.6 TIPOS DE ESTRATEGIAS.....	15
2.6.1 Estrategias puras.....	15
2.6.2 Estrategias mixtas.....	15
2.6.3 Estrategias dominantes.....	15
2.7 ÓPTIMO DE PARETO.....	15
2.8 CONCEPTOS DE SOLUCIÓN PARA JUEGOS NO COOPERATIVOS... ..	15
2.8.1 Equilibrio de Nash.....	15
2.8.2 Equilibrio fuerte.....	17
2.8.3 Equilibrio robusto.....	17
2.8.4 Equilibrio de satisfacción.....	17
2.8.5 Concepto de estrategias Max Min.....	18
2.9 APRENDIZAJE REFORZADO.....	18

CAPITULO 3. ESTUDIO DE ALGORITMOS DE ASIGNACIÓN DE ESPECTRO Y SELECCIÓN DEL TIPO DE JUEGO	20
3.1 ALGORITMOS QUE NO UTILIZAN GT	20
3.1.1 Máxima portadora a interferencia	20
3.1.2 Proportional Fair	20
3.1.3 Round Robin.....	21
3.1.4 Max Min	21
3.1.5 Algoritmo distribuido para el control y asignación de recursos utilizando Spectrum Brokers	22
3.2 ALGORITMOS QUE UTILIZAN GT	23
3.2.1 Juego de Asignación de Recursos (JAR) basado en juegos no cooperativos y NE.....	23
3.2.2 Algoritmo de asignación de espectro para radio cognitiva basado en juego cooperativo y concepto de solución de negociación de Nash.....	25
3.2.3 Algoritmo de asignación de recursos utilizando un juego no cooperativo jerárquico basado en el modelo de Stackelberg (modelo líder - seguidor)	27
3.2.4 Asignación de recursos utilizando un juego repetido con información perfecta y punto eficiente estable de Pareto.....	29
3.2.5 Distribución dinámica del espectro en redes radio cognitivas utilizando un juego no cooperativo de forma estratégica de tipo potencial.....	30
3.2.6 Asignación de espectro en redes radio cognitivas basada en una subasta Vickrey Clarke Groves con juegos cooperativos y valor de Shapley ..	32
3.3 SELECCIÓN DEL TIPO DE JUEGO A UTILIZAR.....	34
CAPÍTULO 4. MODELO DE ASIGNACIÓN DE ESPECTRO BASADO EN GT EN UNA RED HETEROGÉNEA.....	38
4.1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA.....	38
4.2 DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL DEL SISTEMA	41
4.2.1 Generar escenario	42
4.2.2 Asociar cada UE a un AE.	42
4.2.3 Asignar espectro.....	43
4.2.4 Calcular Throughput de la red	44
4.2.5 Generar gráficas	44
4.3 DEFINICIÓN DEL ALGORITMO DE ASIGNACIÓN DE ESPECTRO BASADO EN GT.	44
4.3.1 Descripción del algoritmo	46

4.4	SELECCIÓN DE HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN	48
4.5	CODIFICACIÓN DEL SISTEMA	49
4.6	PRUEBAS	49
CAPITULO 5. SIMULACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS.....		50
5.1	DEFINICIÓN DE LAS LIMITACIONES DEL SISTEMA	50
5.2	DEFINICIÓN DE ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	51
5.3	DEFINICIÓN DE CASOS DE SIMULACIÓN.....	51
5.4	DEFINICIÓN DE DATOS Y GRÁFICAS DE SALIDA	52
5.5	EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS.....	53
5.5.1	Escenario 1:150 FAP	53
5.5.2	Escenario 2: 100 FAP	76
5.6	RESUMEN DE RESULTADOS	87
CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS		88
6.1	CONCLUSIONES.....	88
6.2	TRABAJOS FUTUROS	89
APÉNDICE A.....		90
REFERENCIAS.....		118

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1.Elementos basicos en una celda.....	3
Figura 1.2.Configuración de una HetNet.....	4
Figura 1.3.Interferencia co-canal.....	7
Figura 1.4.Interferencia de canal adyacente.....	7
Figura 2.1.Flujo de teoría de juegos.....	10
Figura 2.2.Representación de un juego de forma extensiva.....	13
Figura 2.3.Modelo de aprendizaje reforzado.....	18
Figura 3.1.Procedimientos del JAR.....	24
Figura 3.2.Procesos para la obtención de estrategias del JAR.....	25
Figura 4.1.Escenario de simulación.....	39
Figura 4.2.Interferencias presentes en el sistema.....	40
Figura 4.3.Diagrama general del sistema.....	41
Figura 4.4.Diagrama de bloques. Asignación de espectro sin GT.....	43
Figura 4.5.Diagrama de flujo del algoritmo de asignación de espectro.....	48
Figura 5.1.Primer escenario de simulación caso 1.....	53
Figura 5.2.Resultados obtenidos, escenario 1 - voz.....	54
Figura 5.3.Resultados de un FUE a 20.02 metros del FAP.....	56
Figura 5.4.Curvas de Throughput obtenidas.....	57
Figura 5.5.Resultados de un MUE a 111.4 metros de la MBS.....	59
Figura 5.6.Curvas de Throughput obtenido.....	60
Figura 5.7.Resultados de un MUE a 475.38 metros de la MBS.....	61
Figura 5.8.Curvas de Throughput de un MUE.....	62
Figura 5.9.Curvas de Throughput de la red.....	63
Figura 5.10.Resultados obtenidos, escenario 1 - datos.....	64
Figura 5.11.Resultados de un MUE ubicado a 117.11 metros del FAP.....	65
Figura 5.12.Resultados de un FUE ubicado a 45.04 metros del FAP.....	67
Figura 5.13.Curvas de Throughput de la red.....	68
Figura 5.14.Resultados obtenidos, escenario 1 – voz y datos.....	69
Figura 5.15.Curvas de probabilidad de 2 FUE variando el parametro BW.....	71
Figura 5.16.Throughput obtenido de 2 FUE variando el parametro BW.....	71
Figura 5.17.Curvas de probabilidad de 2 FUE variando el parametro BW.....	73
Figura 5.18.Curvas de Throughput obtenidas.....	74
Figura 5.19.Interferencias ocasionadas a la señal transmitida del UE 272.....	75
Figura 5.20.Resultados obtenidos, escenario 2 - voz.....	77
Figura 5.21.Resultados de un MUE a 157.20 metros de la MBS.....	78
Figura 5.22.Curvas de Throughput de un MUE y MBS.....	79

Figura 5.23. Curvas de Throughput de la red.....	80
Figura 5.24. Resultados obtenidos, escenario 2 - datos	81
Figura 5.25. Resultados de un FUE ubicado a 37.8 metros del FAP	82
Figura 5.26. Curvas de Throughput de un FAP y de la red	83
Figura 5.27. Resultados obtenidos, escenario 2 – voz y datos	84
Figura 5.28. Curvas de Throughput de dos MUE	85
Figura 5.29. Curvas Throughput de la MBS y de la red con GT	86
Figura A.1. Interfaz gráfica para la ejecución de las pruebas	90

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Tipos de celdas pequeñas.....	4
Tabla 2.1. Clases de juegos	14
Tabla 3.1. Juegos del algoritmo de asignación de recursos.....	27
Tabla 3.2. Juego cooperativo vs no cooperativos	35
Tabla 3.3. Comparación de las características del juego	36
Tabla 3.4. Comparación conceptos de solución de juegos no cooperativos	37
Tabla 4.1. Cobertura de UE.....	42
Tabla 4.2. Cobertura de UE final	43
Tabla 5.1. Escenarios de simulación.....	51
Tabla 5.2. Casos de simulación	52
Tabla 5.3. Características técnicas de los escenarios de simulación	52
Tabla 5.4. Resumen de resultados, escenario 1	75
Tabla 5.5. Resumen de resultados, escenario 1 y 2 para el primer caso.....	80
Tabla 5.6. Resumen de resultados, escenario 1 y 2 para el segundo caso	83
Tabla 5.7. Resumen de resultados del caso 3 para los escenario 1 y 2	86
Tabla 5.8. Resumen de resultados al variar BW en el escenario 2.....	87
Tabla 5.9. Resumen del Throughput obtenido en la red – escenario 1 y 2	87
Tabla A.1. Capacidad obtenida. Escenario 1- voz.....	91
Tabla A.2. Throughput de cada AE. Escenario 1 – voz.....	91
Tabla A.3. Frecuencias asignadas a cada UE. Escenario 1 – voz	92
Tabla A.4. Capacidad obtenida. Escenario 1 – datos.....	96
Tabla A.5. Throughput de cada AE. Escenario 1 – datos.....	96
Tabla A.6. Frecuencias asignadas a cada UE. Escenario 1 – datos	97
Tabla A.7. Capacidad obtenida. Escenario 1 – voz y datos	101

Tabla A.8. Throughput de cada AE. Escenario 1 – voz y datos	101
Tabla A.9. Frecuencias asignadas a cada UE. Escenario 1 – voz y datos.....	102
Tabla A.10. Capacidad obtenida. Escenario 2 – voz.....	106
Tabla A.11. Throughput de cada AE. Escenario 2 – voz.....	106
Tabla A.12. Frecuencias asignadas a cada UE. Escenario 2 – voz	107
Tabla A.13. Capacidad obtenida. Escenario 2 – datos.....	110
Tabla A.14. Throughput de cada AE. Escenario 2 – datos.....	110
Tabla A.15. Frecuencias asignadas a cada UE. Escenario 2 – datos	111
Tabla A.16. Capacidad obtenida. Escenario 2 – voz y datos	114
Tabla A.17. Throughput de cada AE. Escenario 2 – voz y datos	114
Tabla A.18. Frecuencias asignadas a cada UE. Escenario 2 – voz y datos.....	115

LISTA DE ACRÓNIMOS

AE	<i>Access Element</i> , Elemento de Acceso.
ALG	<i>Access Level Game</i> , Juego a Nivel de Acceso.
BLG	<i>Backhaul Level Game</i> , Juego a nivel de Backhaul.
BS	<i>Base Station</i> , Estación Base.
BW	<i>Bandwidth</i> , Ancho de Banda.
CIR	<i>Carrier to Interference Ratio</i> , Relación de Portadora a Interferencia.
DL	<i>Down Link</i> , Enlace de bajada.
FAP	<i>Femto Access Point</i> , Punto de Acceso Femto.
FC	<i>Fusion Center</i> , Centro de Fusión.
FUE	<i>Femto User Equipment</i> , Equipo de Usuario Femto.
GT	<i>Game Theory</i> , Teoría de Juegos.
HetNet	<i>Heterogeneous Network</i> , Red Heterogénea.
JAR	Juego de Asignación de Recursos.
LTE-A	<i>Long Term Evolution – Advance</i> , Tecnología de Evolución a Largo plazo Avanzada.
MBS	<i>Micro Base Station</i> , Micro Estación Base.
MS	<i>Mobile Station</i> , Estaciones Móviles.
MUE	<i>Micro User Equipment</i> , Equipo de Usuario Micro.
NE	<i>Nash Equilibrium</i> , Equilibrio de Nash.
NLOS	<i>Non Line of Sight</i> , Sin Línea de Vista.
PF	<i>Proportional Fair</i> , Proporción Justa.
PU	<i>Primary User</i> , Usuario Primario.
QoS	<i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio.

RN	<i>Relay Node</i> , Nodos de Retransmisión.
RRM	<i>Radio Resource Management</i> , Gestión de Recursos Radio.
SE	<i>Satisfaction Equilibrium</i> , Equilibrio de Satisfacción.
SF	<i>Shadow Fading</i> , Desvanecimiento por Sombra.
SINR	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido más Interferencia.
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido.
SU	<i>Secondary User</i> , Usuario Secundario.
UE	<i>User Equipment</i> , Equipo de Usuario.
UL	<i>Up Link</i> , Enlace de subida.
WoLF	<i>Win or Learn Fast</i> , Ganar o Aprender Rápido.

INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de la cantidad de usuarios que desean acceder a un servicio prestado por una red inalámbrica, requiere que en una zona existan múltiples puntos de acceso de diferentes tecnologías, y áreas de cobertura que se solapen entre sí formando redes heterogéneas. Dichas redes permiten que la red esté disponible la mayor parte del tiempo, y que un usuario tenga la opción de escoger la Estación Base (BS, *Base Station*) que ofrece un mejor servicio.

Trabajar en redes heterogéneas, hace que una asignación de espectro de forma estática conduzca a un uso ineficiente del espectro, reduciendo las frecuencias licenciadas para las nuevas tecnologías y servicios emergentes. Por lo que es necesario implementar una asignación de espectro dinámica, que permita a usuarios de menor prioridad acceder al recurso destinado a usuarios con mayor prioridad, sin afectar la calidad de su comunicación.

Por ello, en los últimos años en varias instituciones y organizaciones, se han estudiado diversos métodos y conceptos que tienen como objetivo, encontrar o diseñar un algoritmo de asignación de espectro para redes heterogéneas, uno de ellos ha sido la Teoría de Juegos (GT, *Game Theory*), la cual ha sido utilizada en diferentes ciencias. La aplicación de la GT en las telecomunicaciones ha sido estudiada por múltiples autores en los últimos años, buscando resolver problemas en la asignación de recursos en redes inalámbricas, modelando a los usuarios como jugadores, los cuales compiten constantemente por obtener los mejores recursos, haciendo que usuarios con menor prioridad no tengan acceso a estos.

Con base en lo anterior, el propósito de este trabajo es brindar un aporte a la investigación que se está desarrollando en torno a la implementación de la GT en las telecomunicaciones, analizando el *Throughput* de una red heterogénea que utilice un algoritmo de asignación de espectro basado en GT.

Este documento se divide en seis capítulos estructurados de la siguiente manera:

Capítulo 1. Introduce los conceptos básicos relacionados con los sistemas de comunicaciones móviles, haciendo énfasis en las redes heterogéneas.

Capítulo 2. Introduce los conceptos básicos relaciones con la GT.

Capítulo 3. Presenta un estudio de los métodos y algoritmos de asignación de espectro más relevantes y muestra un análisis comparativo entre ellos.

Capítulo 4. Define el algoritmo de asignación de espectro basado en GT, el concepto solución a implementar y muestra la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto, incluyendo la herramienta software seleccionada.

Capítulo 5. Caracteriza los escenarios y casos de simulación, describe las pruebas realizadas para cada uno, y análisis de los resultados obtenidos.

Capítulo 6. Expone las conclusiones del desarrollo del proyecto y se presentan recomendaciones para futuros trabajos e investigación en este campo.

CAPÍTULO 1. REDES MÓVILES HETEROGÉNEAS Y GESTIÓN DE RECURSOS RADIO

Debido a que en el presente trabajo de grado se implementará un algoritmo de asignación de espectro en redes heterogéneas, es elemental conocer los conceptos básicos de una red móvil celular, la Gestión de Recursos Radio (RRM, *Radio Resource Management*), la capacidad de la red vista como *Throughput*¹ y los tipos de interferencia que se presentan en las redes móviles.

1.1 RED MÓVIL CELULAR

Una red celular, es una red formada por celdas de igual o diferente radio, donde cada una cuenta con su propio transmisor-receptor, conocido como BS. Estas celdas cubren diferentes áreas proporcionando cobertura radio sobre un área más grande que la de una celda, lo cual posibilita el reuso de frecuencias a través del área de cobertura, permitiendo que varios Equipos de Usuario (UE, User Equipment) se conecten a su BS al mismo tiempo.

Los elementos básicos presentes en una celda se visualizan en la figura 1.1.



Figura 1.1. Elementos básicos en una celda. Por los autores.

Las BS se clasifican de acuerdo a la cobertura que proveen, potencia de transmisión y su uso, como se detalla en la Tabla 1.1.

¹ Cantidad de datos efectivos que se pueden transmitir sin errores sobre un canal de comunicación, sin tener en cuenta cabeceras ni bits de control implícitos en las tramas.

Tabla 1.1. Tipos de celdas.

Tamaño de celda	Cobertura	Potencia de transmisión de la BS	Uso
Macro	1 – 30 Km	33 – 43 dBm	Área rural, carreteras, interconexión de poblaciones cercanas.
Micro	0.2 – 2 Km	24 – 33 dBm	Espacios urbanos y rurales. Zonas urbanas con alta densidad de tráfico.
Pico	4- 200 m	13 – 24 dBm	interior de espacios en los que se concentran un elevado número de usuarios, por ejemplo, un edificio de oficinas, un centro comercial, etc.
Femto	< 100 m	1 - 13 dBm	Espacios pequeños como pequeñas oficinas u hogares.

1.2 REDES HETEROGÉNEAS

Una Red Heterogénea (HetNet, *Heterogeneous Network*) es una mezcla de diferentes tipos de tecnologías radio que tienen arquitecturas superpuestas, diferentes soluciones de transmisión y BS de diversas potencias, utilizando macro celdas junto con micro, pico y/o femto celdas, que tienen como propósito brindar cobertura a un área determinada y tienen características específicas que permiten su funcionamiento de manera conjunta y sin problemas, ya que entre ellas existen canales de comunicación, control y procesos de traspaso, que permiten transferir un servicio de una BS a otra cuando la calidad del enlace es insuficiente.

En la Figura 1.2 se muestra una HetNet de telefonía celular, donde inicialmente se tiene una macro celda que provee cobertura a un área en particular, y conforme va aumentando el tráfico o el número de usuarios, se procede a realizar una subdivisión celular creando celdas más pequeñas, para así disponer de mayor capacidad a costa de disminuir el área de cobertura [1].

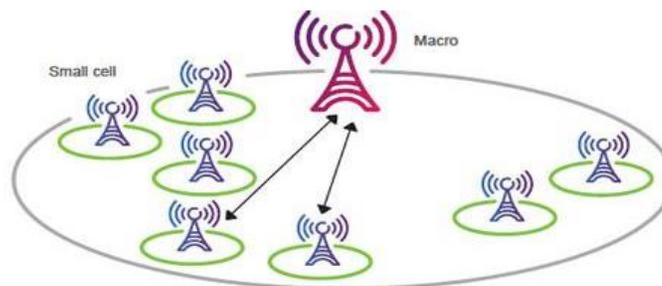


Figura 1.2. Configuración de una HetNet. Tomada de [2].

Los despliegues de nodos de baja potencia en las HetNet se identifican por su corto rango de cobertura pero un alto *Throughput*, sin embargo, para que el sistema sea eficiente, cada uno de estos tiene la capacidad de interactuar con todas las capas de la red celular, realizando tareas de traspaso, manejo de interferencia, facturación y autenticación [3].

En las redes macro celulares los enlaces punto a punto que permiten comunicación entre dos dispositivos están llegando a un límite, ya que el crecimiento del tráfico se ha incrementado en mayor medida. Es por esto que las HetNet representan una manera efectiva para la descarga de tráfico de datos de la red, teniendo en cuenta que inicialmente fueron pensadas para mejorar la calidad de la señal en casas, oficinas entre otros [4].

Las celdas pequeñas permiten garantizar unos niveles de Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) acordes a las expectativas de los usuarios, debido a que al reducir el tamaño de la celda, la capacidad disponible es mayor dentro de su área de cobertura [5]. Es por esto que este tipo de celdas ofrecen una gran facilidad de despliegue a un bajo costo, ya que se pueden implementar para completar la cobertura en zonas con mala recepción de señal, mejorar la cobertura en interiores de edificios o para reforzarla en zonas donde hay gran número de tráfico, mejorando así la experiencia del usuario y aumentando la capacidad de la red vista como *Throughput* [6].

1.3 THROUGHPUT

Dentro de los variados significados que puede tomar la capacidad de una red, se considera aquel que hace referencia a la cantidad de datos efectivos que se pueden transmitir sin errores sobre un canal de comunicación, sin tener en cuenta cabeceras ni bits de control implícitos en las tramas, denominado *Throughput*. Por esta razón, al hallar la tasa de *Throughput* se observa realmente lo que está recibiendo el usuario final en bits por segundo (bps) [7].

La capacidad de la red heterogénea puede disminuir a causa de la presencia de interferencias en los enlaces debido a la cercanía de las frecuencias portadoras asignadas a los usuarios.

1.4 INTERFERENCIA

La interferencia es un fenómeno, que se presenta cuando en el receptor aparece una señal proveniente de otro emisor, distinto a aquel con el que se ha establecido un enlace de comunicación. El impacto de la interferencia en recepción, se cuantifica mediante la Relación de Portadora a Interferencia (CIR, *Carrier to Interference Radio*), la cual mide la relación entre la potencia de la señal útil y la señal interferente. Conforme la interferencia aumenta, el rendimiento de la red se

limita en mayor proporción, por ello es importante tomar medidas utilizando técnicas para disminuir el nivel de interferencia y mantener la capacidad deseada de la red [8].

Todas las comunicaciones inalámbricas están sujetas al fenómeno de interferencia, comúnmente generado por Estaciones Móviles (MS, *Mobile Station*) transmitiendo en áreas cercanas, llamadas en progreso en una celda vecina o BS operando en la misma banda de frecuencia y a potencias elevadas.

A nivel general, la interferencia se puede dividir en intra o inter sistema.

La interferencia intra sistema es aquella en donde la fuente está localizada dentro del mismo sistema, esta se relaciona al equipamiento del sitio, como los osciladores locales, selectividad de los filtros, entre otros, y a aspectos internos del diseño del sistema, tales como, espaciamiento de frecuencias transmisión y recepción, interferencias co-canal y canal adyacente. Para las interferencias co-canal o de canal adyacente el aumento en la potencia de transmisión no es una solución, en lugar a ello debe realizarse una distribución inteligente.

La interferencia inter sistema es aquella provocada por elementos externos al sistema de análisis, contempla las interferencias causadas por otros sistemas ya instalados y las provenientes de otros servicios, como por ejemplo los satélites. Así mismo las procedentes de un sitio distante que pueden formar parte de la misma ruta. Estas interferencias externas al sistema, son solucionadas aumentando la potencia de transmisión de manera controlada [9].

Los tipos de interferencia más habituales que pueden darse en un receptor son:

- Interferencia co-canal: son señales interferentes que se presentan en la misma banda de frecuencia que la señal deseada, resultando altamente perjudiciales. En la Figura 1.3 se muestra el diagrama de interferencia co-canal, donde la señal transmitida por el UE_1 de manera omnidireccional hacia BS_1 , produce y recibe interferencia co-canal por parte del UE_2 , quien transmite su señal de forma omnidireccional hacia BS_2 utilizando la misma frecuencia que UE_1 .

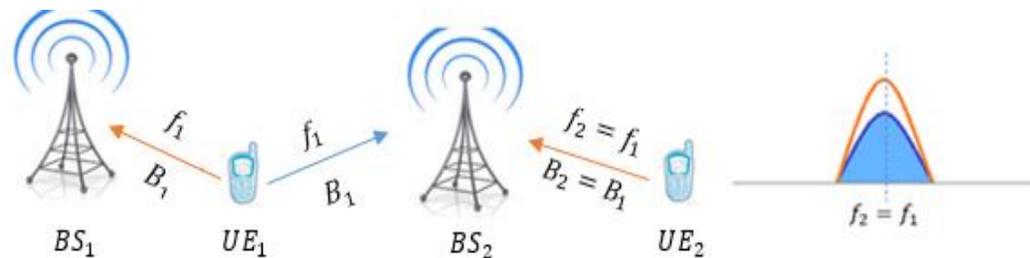


Figura 1.3. Interferencia co-canal. Por los autores.

La interferencia co-canal suele ser el tipo de interferencia que más limita las prestaciones del receptor. Esta interferencia depende de la distancia de reuso a la que se encuentran las celdas interferentes (entre las localizaciones de las BS), debido a que es provocada por el reuso de frecuencias, que hace que existan celdas trabajando en el mismo conjunto de canales.

Una de las formas de disminuir la interferencia co-canal, es separando físicamente las celdas interferentes por una distancia mayor a una mínima, para proveer una CIR suficiente y así mantener una calidad de comunicación aceptable.

- Interferencia por canal adyacente [10]: son niveles de potencia no deseados, provenientes de emisiones de señales situadas en portadoras diferentes de la señal útil que resultan del filtrado imperfecto en recepción, lo que permite a señales con frecuencias cercanas traslaparse en el BW deseado. En la Figura 1.4 se muestra el diagrama de la interferencia de canal adyacente, donde el UE_2 le transmite a BS_2 con una frecuencia cercana a la que está usando el UE_1 , por lo que la señal que transmite el UE_1 hacia su BS, percibe interferencia de canal adyacente por parte de la señal de UE_2 .

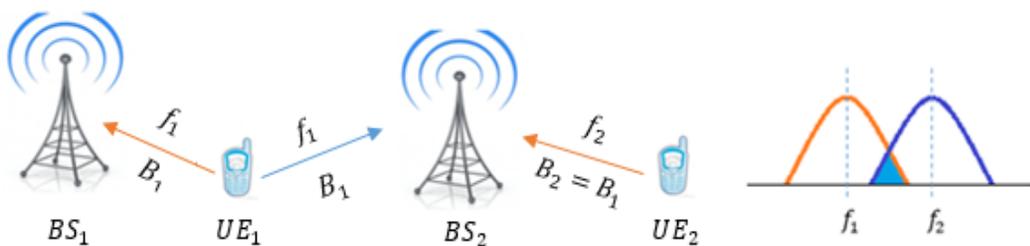


Figura 1.4. Interferencia de canal adyacente. Por los autores.

Este tipo de interferencia se vuelve crítica cuando surge el efecto *near-far* o cercano-lejano, el cual ocurre cuando un móvil cercano a una BS

transmite en un canal adyacente a otro que es utilizado por un móvil lejano, ocasionando en la BS problemas para distinguir al usuario deseado.

La interferencia de canal adyacente se minimiza mediante un filtrado cuidadoso y una adecuada estrategia de asignación de canales. Los canales se asignan de modo que la separación espectral entre ellos en una determinada celda es maximizada. Esto se logra asignando canales adyacentes en forma sucesiva en la banda de frecuencia a diferentes celdas.

En este trabajo de grado se tendrán en cuenta en el sistema, las interferencias mencionadas en el enlace ascendente, ya que en él se reflejan en mayor medida o son más críticos los efectos de dichas interferencias.

Una forma de controlar la interferencia a nivel de sistema, ya sea co-canal o de canal adyacente es realizando una adecuada RRM, que también permite intervenir en ciertas características de transmisión en los sistemas de comunicaciones inalámbricos, como redes celulares y de radio difusión.

1.5 GESTIÓN DE RECURSOS RADIO

Actualmente el proveedor de servicios desea obtener el mayor beneficio suministrando un servicio al mayor número de usuarios posible, y los usuarios desean obtener la mejor QoS posible. Esto implica un aumento en el costo del servicio y en la limitación de la capacidad de la red, pues entre mayor sea el número de usuarios que lo soliciten, se requieren más recursos para asignar, por esto el proveedor debe realizar una adecuada RRM, así como un diseño apropiado del sistema de comunicaciones, capaz de soportar un número de usuarios bajo ciertos requisitos.

La RRM da soluciones a problemas de capacidad de la red con múltiples usuarios y múltiples celdas involucrando estrategias y algoritmos para controlar parámetros tales como: la potencia de transmisión, asignación de usuarios, formación de haz, esquema de modulación, esquema de codificación de errores, y estudio de la infraestructura de la red. La mayoría de los objetivos de la RRM se centran en conseguir una alta capacidad y un mayor *Throughput* para una QoS determinada, por medio de diversas funciones, entre ellas está la de planificar la asignación de recursos [11].

Existen esquemas de RRM dinámicos y adaptativos que ajustan los parámetros de la red radio a la carga de tráfico, posiciones de los usuarios, movilidad del usuario, requerimientos de QoS y densidad de BS. Algunos ejemplos de esquemas de RRM dinámicos son [12]:

- Algoritmos de control de potencia.
- Algoritmos de asignación dinámica del canal, selección dinámica de frecuencia o criterios de traspaso de tráfico adaptativo, permitiendo "respiración celular".
- Asignación dinámica de BW usando esquemas de acceso múltiple de reserva de recursos.
- Radio cognitiva².

Los algoritmos de planificación pueden obtener información para tomar sus decisiones, a través del estado del canal y/o mediante diferentes medidas del tráfico. Estos, se pueden dividir en dos grupos [13]:

- Oportunistas: orientados a maximizar la capacidad de cada usuario, utilizando las condiciones de canal de cada uno en cada instante de tiempo.
- Justos: orientados a minimizar la latencia, se centran más en conseguir una tasa mínima para cada usuario antes que la tasa total, como en el oportunista.

En este caso, se aplica la RRM dinámica desarrollando un algoritmo de asignación dinámica de frecuencia, enfocado en el concepto de teoría de juegos, ya que es un área de las matemáticas que ha sido estudiada en el campo de las telecomunicaciones.

² Forma de comunicación inalámbrica en la que transceptor inteligente puede detectar los canales de comunicación que se están utilizando y los que no se están utilizando, permitiendo al UE pasar a utilizar los canales no empleados [40].

CAPÍTULO 2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE TEORÍA DE JUEGOS

En la vida cotidiana, es común estar en situaciones en las que su resultado no solo depende de las acciones personales, sino también de lo que hacen otras personas, por ejemplo, cuando se participa en una subasta, la negociación de un precio con un vendedor, estas situaciones se pueden modelar como un juego en la GT [14].

La GT ha tenido un gran éxito en muchas áreas tales como la biología, la economía, la política y la informática, por ello su aplicación en las telecomunicaciones ha sido estudiada por múltiples autores en los últimos años, buscando resolver problemas en la asignación de recursos en redes inalámbricas [15]. Sin embargo, aún queda un largo camino por explorar para enriquecer esta teoría y utilizarla en el diseño de algoritmos que se puedan implementar en una red real, conforme a las expectativas de las redes de telecomunicaciones avanzan, basado en supuestos de información y comportamiento, tasa de convergencia, QoS, o complejidad tolerable.

Además, debido a que las redes inalámbricas han tenido una gran evolución en la última década y nuevos modelos de comunicación han aparecido, la GT se ha convertido en un concepto muy importante para analizarlos e incluso diseñarlos.

En la actualidad su implementación se ve cada vez más factible, ya que considerar un terminal como una entidad inteligente, capaz de observar su entorno y reaccionar suficientemente rápido a los cambios, se ha convertido en una suposición más realista con los progresos significativos de procesamiento de señal [14].

2.1 ¿QUÉ ES LA TEORÍA DE JUEGOS?

La GT se define como el estudio formal de las interacciones entre varios jugadores que pueden tener intereses comunes o en conflicto. Por interacciones, se entiende que la decisión tomada por un jugador produce un impacto en los otros jugadores, y lo que él obtiene a partir de una situación interactiva no sólo dependerá de sus decisiones [14].

La GT propone:

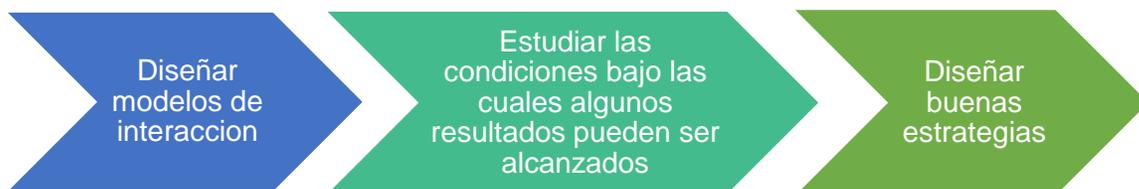


Figura 2.1. Flujo de teoría de juegos. Por los autores.

En resumen, de acuerdo a la Figura 2.1, la GT modela las interacciones entre jugadores con el objetivo de definir diferentes tipos de resultados posibles para la

situación en estudio (conceptos de solución), con el propósito de predecir la(s) solución(es) de un juego bajo supuestos de comportamiento e información dada, así caracterizar todos los posibles resultados del juego, y diseñar buenas estrategias con el propósito de alcanzar algunos de estos resultados [14].

2.2 DEFINICIÓN DE JUEGO

Un juego se define como cualquier situación de decisión, caracterizada por una relación de dependencia estratégica entre dos o más individuos en la cual cada uno de ellos gana o pierde [15]. La GT proporciona definiciones matemáticas de los juegos y su definición depende del carácter considerado.

2.2.1 ELEMENTOS DE UN JUEGO

- **Jugador:** su significado puede ser muy amplio, puede ser un humano, una máquina, un autómat, un animal, una planta, etc. Para la GT aplicada a las comunicaciones inalámbricas, los jugadores de los juegos bajo estudio son "máquinas", tales como BS, computadores, teléfonos móviles, enrutadores, servidores, etc. Se debe tener en cuenta que la naturaleza de la acción o decisión a ser tomada es diferente dependiendo del jugador [14].
- **Estrategias:** es el conjunto de decisiones que pueden ser tomadas en el transcurso del juego [15]. La estrategia de un jugador es un plan de acción para cualquier situación que pueda suceder, determina completamente la conducta del jugador y establece la acción que debe tomar en cualquier momento del juego para cualquier secuencia de acontecimientos hasta ese punto.
- **Utilidad:** representa el beneficio obtenido por el jugador al implementar una determinada estrategia. La utilidad final obtenida por cada jugador depende de las estrategias escogidas por el resto de jugadores.
- **Información disponible:** corresponde al conocimiento que los participantes tienen sobre los datos del juego del resto de jugadores [15].

2.3 JUEGOS NO COOPERATIVOS

Los juegos no cooperativos, también llamados juegos sin transferencia de utilidad, son juegos en los que las metas y estrategias individuales pueden ser identificadas, los jugadores no pueden hacer acuerdos previos, por ende toman decisiones de manera independiente para su beneficio personal, por ello se dice que los jugadores son egoístas. Pero esto no impide que en algunos casos dicha toma de decisiones pueda favorecerlos a todos [14].

Un juego no cooperativo puede ser definido de diferentes formas, las cuales se explican a continuación.

2.3.1 Forma normal o estratégica

La forma estratégica es la forma más utilizada, por ser más conveniente para el análisis matemático y es utilizable tanto para conjuntos de estrategias discretas o continuas³ [14].

El juego de forma estratégica está denotado por la expresión 2.1:

$$\mathcal{G} = (\mathcal{K}, \{\mathcal{S}_i\}_{i \in \mathcal{K}}, \{\mathcal{U}_i\}_{i \in \mathcal{K}}), \quad (2.1)$$

donde, $\mathcal{K} = \{1, \dots, k\}$ es el conjunto de jugadores, $\mathcal{S} = \{\mathcal{S}_1, \dots, \mathcal{S}_k\}$ el conjunto de estrategias disponibles para cada jugador, $\mathcal{S}_i = \{s_{i_1}, s_{i_2}, \dots, s_{i_q}\}$ el conjunto de estrategias del jugador i . La notación suele simplificarse designando por s_i a un elemento arbitrario de \mathcal{S}_i , de este modo (s_1, \dots, s_k) representa una combinación de estrategias, una para cada jugador, lo cual también se conoce como un perfil estratégico, $\mathcal{U} = \{u_1, \dots, u_k\}$ corresponde al conjunto de funciones de pago, donde la función de pagos de cada jugador $u_i = u_i(s_1, \dots, s_k), s_i \in \mathcal{S}_i$ representa la utilidad o pagos obtenidos por el jugador i , que es función de las estrategias elegidas por él y sus oponentes en el juego [14], [16].

2.3.2 Forma extensiva

Corresponde a un juego donde las decisiones son tomadas de manera secuencial, y usualmente se representa mediante un diagrama en forma de árbol.

La Figura 2.2, muestra la representación de este tipo de juego, donde los óvalos azules denotados como J_i ($i = 1, 2, \dots, k$) representan el conjunto de jugadores, los conectores entre cada ovalo, marcados como E_i ($i = 1, 2, \dots, k$) son las acciones posibles que tiene cada jugador y u_1, u_2 y u_3 corresponden a las utilidades de los jugadores 1, 2 y 3 respectivamente al elegir esa cadena de ramas. Cada jugador elige su estrategia de manera secuencial, es decir, en un instante de tiempo sólo un jugador puede escoger o cambiar su estrategia y cada jugador sabe en qué nodo está cuando toma su decisión. Este tipo de juego es llamado juego con información perfecta [17].

³ Una estrategia discreta solo toma valores dentro de un conjunto numerable, una estrategia continua toma un valor fijo dentro de un intervalo determinado.

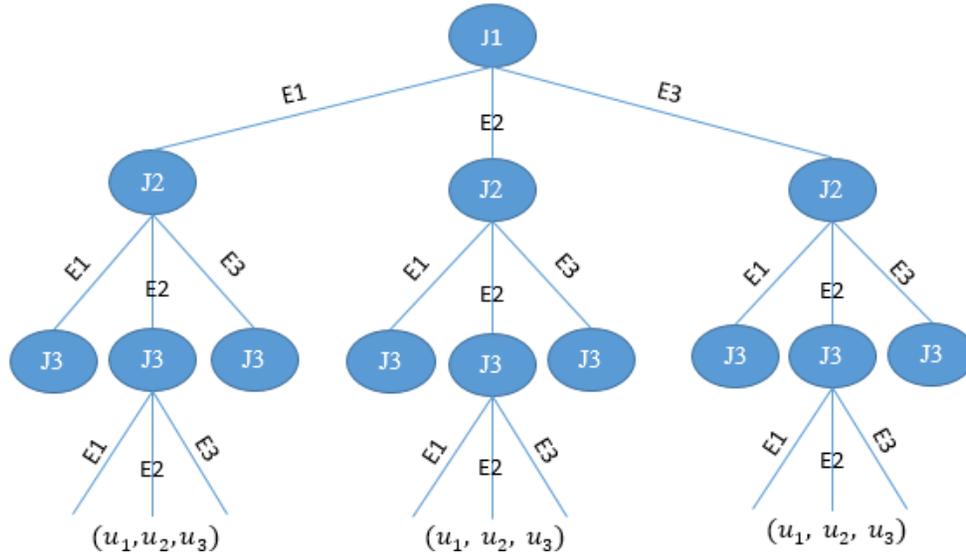


Figura 2.2. Representación de un juego de forma extensiva. Por los autores.

Un juego de forma extensiva está denotado por la expresión 2.2:

$$G = (\mathcal{K}, \mathcal{V}, v_{root}, \pi, \{\mathcal{V}_i\}_{i \in \mathcal{K}}, \{u_i\}_{i \in \mathcal{K}}), \quad (2.2)$$

donde, $\mathcal{K} = \{1, \dots, k\}$ es el conjunto de jugadores, \mathcal{V} el conjunto de nodos o vértices del árbol de representación del juego, v_{root} corresponde al nodo raíz de dicho árbol, π es la función predecesora⁴, $\{\mathcal{V}_i\}_{i \in \mathcal{K}}$ es una partición de \mathcal{V} que identifica las diferentes rutas del árbol y $\{u_i\}$ es la utilidad obtenida por el jugador i -ésimo [14].

2.4 JUEGOS COOPERATIVOS

Un juego cooperativo es un juego en el cual dos o más jugadores no compiten, sino que se esfuerzan por conseguir el mismo objetivo y por lo tanto ganan o pierden en conjunto. En otras palabras, es un juego donde grupos de jugadores (coaliciones) pueden tomar comportamientos cooperativos, pues el juego es una competencia entre coaliciones de jugadores y no entre jugadores individuales.

En los juegos cooperativos es posible que algunos jugadores puedan llegar a acuerdos, los cuales son absolutamente obligatorios y realizables [14].

2.5 CLASIFICACIÓN DE JUEGOS

Además de determinar si el juego a implementar es cooperativo o no cooperativo, es importante caracterizar el juego de una manera más detallada de acuerdo a la

⁴ Función que asigna a cada nodo no inicial la acción que lo conecta con su predecesor inmediato [39].

información conocida por los jugadores, como se desarrolla el juego, y otras características relevantes. La Tabla 2.1 muestra las categorías en las que se puede clasificar un juego [14].

Tabla 2.1. Clases de juegos.

CLASES DE JUEGOS	
Estáticos	Dinámicos
Los jugadores poseen un cierto conocimiento sobre el juego (supuestos de información o de comportamiento). Los jugadores tienen un solo intento para tomar la decisión.	Los jugadores pueden extraer alguna información de sus últimos movimientos, observaciones, estrategias elegidas y tenerla en cuenta para actuales y futuros movimientos.
Estocásticos	
Es un juego dinámico que se identifica por la presencia de un estado en el juego (por ejemplo, las ganancias del canal) que evoluciona (a través del tiempo con más frecuencia y de acuerdo a una regla estocástica determinada).	
Información completa	Información incompleta
Los datos del juego son de conocimiento común para todos los jugadores (en un juego de forma estratégica, los datos del juego corresponden a las acciones disponibles para los jugadores y las funciones de utilidad).	Los juegos que tienen esta característica, se conocen como juegos bayesianos. Los jugadores solo tienen información parcial sobre los datos del juego.
Información perfecta	Información imperfecta
Todos los jugadores conocen perfectamente la historia del juego.	Todos los jugadores no conocen perfectamente la historia del juego. En las comunicaciones, "imperfecta" hace referencia a una situación en la que una cantidad no se conoce perfectamente (por ejemplo, debido a errores de estimación intrínsecos), o algunas cantidades deben ser estimadas.
Suma cero	No suma cero
Los intereses de los jugadores son totalmente contrapuestos. La suma de las utilidades es igual a cero (o una constante). En estos juegos si alguien gana algo, alguien más obligatoriamente tiene que perder.	Los jugadores intentan maximizar sus beneficios sin importar que los demás participantes ganen o pierdan en el intento. Los intereses de los jugadores no son totalmente contrapuestos.

2.6 TIPOS DE ESTRATEGIAS

2.6.1 Estrategias puras

Una estrategia es pura cuando el jugador asigna la probabilidad de 1 a una de las opciones que tiene [14], también se puede definir como un plan determinado con anterioridad, el cual establece la secuencia de movimientos que un jugador realiza durante un juego completo.

2.6.2 Estrategias mixtas

Una estrategia mixta se define por una distribución probabilística sobre un conjunto de estrategias puras. Estas permiten que el jugador no sea vencido fácilmente cuando el oponente es racional⁵, ya que en cada turno el jugador tiene la posibilidad de cambiar de estrategia [18].

2.6.3 Estrategias dominantes

Una estrategia se dice que es dominante, si la utilidad obtenida al usarla es mayor o igual a la obtenida usando otras estrategias, pero si en algún instante el jugador obtiene una mayor utilidad con otra estrategia, la estrategia inicialmente dominante pasa a ser dominada.

Este tipo de estrategias tienen en cuenta que los jugadores son racionales. Un jugador racional no jugará una estrategia dominada y siempre elegirá sus estrategias dominantes, si existen.

2.7 ÓPTIMO DE PARETO

Un concepto muy utilizado en la GT es el óptimo de Pareto, en el que los jugadores involucrados, solo pueden mejorar su utilidad a costa de reducir la utilidad de cualquier otro jugador, es decir, si algo genera beneficio perjudicando al otro se dice que la repartición de dicho recurso corresponde a un óptimo de Pareto [14].

2.8 CONCEPTOS DE SOLUCIÓN PARA JUEGOS NO COOPERATIVOS

2.8.1 Equilibrio de Nash

Por definición, se dice que una combinación de estrategias (una por jugador) es un Equilibrio de Nash (NE, *Nash Equilibrium*) si ningún jugador puede aumentar sus ganancias por un cambio unilateral de estrategia, es decir, cada jugador individual no gana nada modificando su estrategia mientras los otros mantengan las suyas.

⁵ Un jugador se dice que es racional si maximiza su utilidad o utilidad esperada, teniendo en cuenta todos sus conocimientos sobre el juego.

Así, cada jugador está ejecutando la “mejor⁶” estrategia posible teniendo en cuenta las estrategias de los demás jugadores, por ende ninguno deseará modificar individualmente su estrategia [19].

En este concepto de solución se asume que cada jugador conoce y ha escogido su mejor estrategia, y que todos conocen las estrategias de los otros.

Un NE no implica que se logre el mejor resultado para todos los jugadores, sino sólo el mejor para cada uno de ellos considerados individualmente. Es posible que el resultado fuera mejor para todos si los jugadores coordinaran su acción, lo que sucedería en un juego cooperativo [14].

Nash demostró que cuando hay un número finito de jugadores y estrategias, siempre existe un equilibrio [20]. El NE de acuerdo al tipo de estrategias que se implementan en el juego, se clasifica en NE en estrategias puras y NE en estrategias mixtas.

2.8.1.1 NE en estrategias puras

Dado un juego normal $(\mathcal{K}, \mathcal{S}_i, u_i)$, se dice que $\sigma \in \mathcal{S}$ es un NE en estrategias puras si para cada jugador en \mathcal{K} se cumple la expresión 2.3.

$$u_i(\sigma) \geq u_i(\sigma|\sigma^i) \forall \sigma^i \in \mathcal{S}_i, \quad (2.3)$$

donde, $u_i(\sigma|\sigma^i)$ representa la utilidad para el jugador i cuando decide cambiar su estrategia por cualquier otra $\sigma^i \in \mathcal{S}_i$, mientras que los demás jugadores mantienen la estrategia dada por el perfil σ [14].

2.8.1.2 NE en estrategias mixtas

Se dice que un perfil de estrategias mixtas X es un NE, si para cada jugador $i \in \mathcal{K}$ se cumple la expresión 2.4.

$$E_i(X) \geq E_i(X|X^i) \forall X^i \in M_j, \quad (2.4)$$

donde, $E_i(X)$ es el pago esperado que obtiene el jugador i al jugar siempre el perfil de estrategias mixtas X .

Un perfil de estrategias mixtas es NE si ningún jugador puede mejorar su pago cambiando sus estrategias mixtas, cuando el resto de los jugadores se mantienen con la estrategia mixta actual [14].

⁶ La “mejor” estrategia corresponde a aquella con la que menos se pierde teniendo en cuenta al otro jugador, no con la que se obtiene la mayor utilidad, suponiendo racionalidad.

2.8.2 Equilibrio fuerte

El equilibrio fuerte evita que uno o más jugadores deseen cambiar de estrategia de forma unilateral. Se consigue cuando los jugadores cambian de estrategia de manera coordinada, obteniendo posiblemente una mayor utilidad.

Cualquier equilibrio fuerte es un NE óptimo de Pareto e inversamente [14].

2.8.3 Equilibrio robusto

La robustez contra jugadores que cambian la estrategia de equilibrio por otra, es una característica interesante del equilibrio fuerte, pero este no da ningún incentivo para los jugadores "leales" que se adhieren a las estrategias de equilibrio.

Un equilibrio se dice que es robusto (d, ℓ) si es resistente a d jugadores que cambian de estrategia, e inmune⁷ para ℓ jugadores leales.

La existencia de un terminal (mediador) que envíe las recomendaciones adecuadas, es suficiente para inducir el equilibrio robusto en un juego de mediador asistido, sin embargo, la mediación puede ser realizada por medio de la comunicación directa entre los jugadores.

2.8.4 Equilibrio de satisfacción

En el Equilibrio de Satisfacción (SE, *Satisfaction Equilibrium*), un jugador se dice que está satisfecho si juega una estrategia que satisfaga sus necesidades. Una vez que un jugador satisface sus propias necesidades, no tiene interés en cambiar su estrategia, y por lo tanto se observa un equilibrio si todos los jugadores están simultáneamente satisfechos.

El equilibrio de satisfacción se define como un juego de forma estratégica G , que tiene un conjunto de valores de funciones de satisfacción denotado por $\{f_1, f_2, \dots, f_k\}$, donde un perfil estratégico $\mathbf{s}^* = (s_1^*, s_2^*, \dots, s_k^*)$ es un SE si cumple la expresión 2.5.

$$\forall_k \in \mathcal{K}, s_k^* \in f_k(\mathbf{s}_{-k}^*), \quad (2.5)$$

donde, $\mathbf{s}_{-k}^* = (s_1^*, \dots, s_{k-1}^*, s_{k+1}^*, \dots, s_k^*)$, y la función de satisfacción para cada jugador k tiene la siguiente forma:

$$f_k(\mathbf{s}_{-k}^*) = \{s_k \in \delta_k : u_k(s_k, \mathbf{s}_{-k}) \geq \gamma_k\}, \quad (2.6)$$

donde, γ_k es el nivel de utilidad mínima requerida por el jugador k -ésimo [14].

⁷ Inmunidad en este caso, implica que el cambio de estrategias de los demás jugadores no afecta en la utilidad de los jugadores leales.

2.8.5 Concepto de estrategias Max Min

Una estrategia Max Min, es aquella estrategia en la que se maximiza la ganancia mínima que puede obtenerse. Este concepto es importante ya que el NE no tiene en cuenta el factor riesgo y el Max Min si lo incluye. Utilizar el concepto Max Min consiste en que un jugador elija la estrategia que mejor utilidad le proporcione, teniendo en cuenta que el otro jugador escoja la estrategia que provoca la peor utilidad en él.

2.9 APRENDIZAJE REFORZADO

Es una forma de aprendizaje que consiste en aprender a tomar decisiones ante una determinada situación, llevando a los jugadores a realizar acciones adecuadas para lograr un objetivo. Posee dos componentes:

- **Componente selectiva:** involucra la selección de la mejor acción a ejecutar entre varias opciones.
- **Componente asociativa:** las alternativas encontradas se asocian a situaciones particulares en que se toman.

En este entorno los jugadores se modelan como autómatas, quienes por lo tanto no son necesariamente racionales, no se asume que la racionalidad es de conocimiento común, y sólo observan una retroalimentación sobre su propia métrica de rendimiento.

Un jugador está conectado con su entorno percibiendo en cada instante de tiempo t información del estado s en el que se encuentra, entonces decide realizar la acción a , esta salida cambia el estado del entorno a s' y este nuevo estado es transmitido de nuevo al jugador junto con una señal de refuerzo o recompensa r , esta señal r informa al jugador la utilidad de ejecutar la acción a para lograr su objetivo. Esta descripción se muestra en la Figura 2.3.

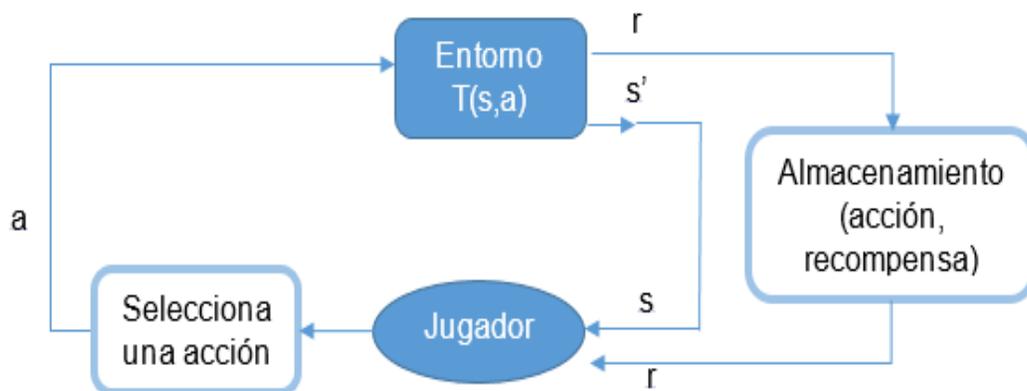


Figura 2.3. Modelo de aprendizaje reforzado. Por los autores.

El aprendizaje reforzado es un comportamiento que mediante un conjunto de acciones que se realizan en cada situación, permite resolver problemas de una forma adecuada, logrando que el jugador no repita acciones que lo perjudiquen.

Debido a que produce una señal de recompensa, esta se divide en inmediata o retardada.

- **Refuerzo inmediato:** se obtiene una señal de recompensa tras cada actuación del sistema y a cada paso esta le indica al jugador si va bien o mal, por lo que el jugador aprende qué acción debe realizar en cada situación específica, para obtener una señal de recompensa positiva después de haber ejecutado la acción anterior.
- **Refuerzo retardado:** el uso de este refuerzo es más complejo, ya que no se posee información del resultado de cada acción, sino una estimación general del comportamiento, es decir, cuando se llega al final el sistema valora si el conjunto de acciones se han ejecutado bien o mal, lo que provoca que sea más difícil detectar el fracaso en los parámetros del sistema. Al ejecutar una acción, el refuerzo obtenido también depende de las acciones realizadas anteriormente [21].

Dentro del aprendizaje reforzado se introduce una variable llamada tasa de aprendizaje, la cual establece si el aprendizaje es rápido o lento y su variación se basa en el principio de Ganar o Aprender Rápido (WoLF, *Win or Learn Fast*), en este método el aprendiz se adapta rápidamente cuando está obteniendo recompensas negativas, y aprende cautelosamente cuando gana debido a que los demás jugadores están cambiando sus estrategias en el mismo instante de tiempo [22].

En el siguiente capítulo se realiza un estudio de diversos algoritmos de asignación de recursos entre ellos algunos que utilizan GT, y además se escoge el tipo de juego y concepto solución a implementar.

CAPITULO 3. ESTUDIO DE ALGORITMOS DE ASIGNACIÓN DE ESPECTRO Y SELECCIÓN DEL TIPO DE JUEGO

La asignación de espectro es un aspecto importante dentro del desarrollo de una red móvil heterogénea, ya que dependiendo de la frecuencia portadora asignada a un UE, este tendrá mejor o peor calidad en su comunicación, además debido a que el espectro radioeléctrico es un recurso cada vez más limitado, es necesario la implementación de algoritmos que permitan hacer un uso eficiente del mismo.

Para identificar un algoritmo basado en GT adaptable para la asignación de espectro en redes heterogéneas, es necesario conocer inicialmente los métodos de asignación de recursos habituales con sus características más relevantes, para posteriormente analizar aquellos que utilizan el concepto de GT, con el fin de resaltar aportes que ayuden en la construcción del algoritmo de asignación de espectro que se implementara en la red.

3.1 ALGORITMOS QUE NO UTILIZAN GT

3.1.1 Máxima portadora a interferencia [13]

Utiliza la información del estado del canal en cada instante para determinar el usuario al que se le deben asignar los recursos. En este caso se asignan recursos a los UE con mejores condiciones de canal, es decir, a aquellos que dispongan de una mejor CIR en el momento de la transmisión.

Se le considera un algoritmo “injusto”, en el que las diferencias de asignación suelen producirse entre UE del borde de la celda y el resto de UE, ya que en el borde hay más interferencias y por tanto, las condiciones de canal son peores que las de un UE de la zona más céntrica de la celda.

En conclusión, lo que pretende este algoritmo es que la suma de velocidades de todos los UE de la celda sea la mejor posible. No se preocupa tanto por cumplir con los requerimientos de QoS de los UE.

3.1.2 Proporción Justa (PF, *Proportional Fair*) [13].

Este algoritmo trata de proporcionar a cada UE una tasa “justa” respecto a la tasa de transmisión total disponible. Se basa en medidas de la calidad del canal para cada UE en cada instante de tiempo, y asigna recursos al UE k^* con la mayor relación entre su tasa de transmisión instantánea disponible r_k y su tasa de transmisión real T_k , a lo largo de un intervalo de tiempo definido n , la cual se encuentra utilizando la expresión 3.1.

$$k^*(n) = \underset{k}{\operatorname{argmax}} \left\{ \frac{r_k(n)}{T_k(n)} \right\}. \quad (3.1)$$

Es un algoritmo adecuado para tráfico en tiempo real, ya que trata de maximizar la capacidad de la red garantizando una tasa mínima de transmisión. Para ello, asigna una prioridad más baja a los UE que ya tienen una tasa de transmisión media más alta, de esta forma permite que los UE con peores condiciones de canal puedan transmitir.

3.1.3 Round Robin [13].

Asigna el mismo número de recursos a cada UE, siguiendo una secuencia de asignación cíclica sin tener en cuenta las condiciones del canal o las posibles prioridades entre UE. Por una parte se considera un algoritmo justo, ya que asigna el mismo número de recursos a cada UE, pero al mismo tiempo, los UE con peores condiciones de canal, dispondrán de menores tasas de transmisión que los UE con mejores condiciones en un instante dado. En este algoritmo la probabilidad de que a un UE se le asignen recursos se encuentra con la expresión 3.2.

$$p_k = \frac{1}{N}, \quad (3.2)$$

donde, N es el número total de UE a tener en cuenta en la asignación.

No es un algoritmo que suela utilizarse en la práctica, se utiliza más como referencia al momento de evaluar otros algoritmos.

3.1.4 Max Min [13].

Este algoritmo, tiene como regla asignar recursos en primer lugar a los UE que menos demanda de recursos tienen.

En primer lugar, asigna recursos a los UE que solicitan un servicio que requiere menor cantidad de recursos, una vez asignados estos recursos, continúa asignando los restantes a los demás UE siguiendo la misma regla, con lo que cada UE tendrá una tasa de transmisión R , que se calcula con la expresión 3.3.

$$R = \frac{\text{Recursos totales disponibles} - \sum \text{Recursos asignados}}{\sum \text{Usuarios insatisfechos}} \quad (3.3)$$

De esta forma siempre se garantiza una tasa de transmisión mínima para cada usuario.

Existe una variante denominada Max-Min *Weighted*, cuyo principio de asignación es el mismo, pero tiene en cuenta ciertos pesos para cada UE. Igual que en el caso anterior, se asignan recursos en primer lugar a los UE que menos demandan, pero normalizados respecto a sus respectivos pesos. Ningún UE recibe más recursos de los que demanda y los UE insatisfechos comparten los recursos restantes en proporción a sus pesos.

3.1.5 Algoritmo distribuido para el control y asignación de recursos utilizando *Spectrum Brokers* [23].

Este algoritmo se utiliza cuando los UE tienen iguales requerimientos de capacidad. Utiliza un *Spectrum Broker*⁸ distribuido para recopilar la información requerida en un tiempo muy corto con rápida convergencia. Asigna tanta capacidad como sea posible para el enlace, de tal manera que la capacidad mínima dada a cualquiera sea la máxima posible.

El algoritmo sigue los pasos mencionados a continuación:

1. Cada enlace e tiene una asignación inicial igual a cero y una bandera booleana que indica si ha escogido algún canal.
2. Posteriormente proporciona un conjunto I_e que representa la interferencia del enlace e .
3. Durante cada iteración, un enlace e debe elegir si escoge un canal o no. Si el enlace no ha elegido un canal y es el que tiene la capacidad más baja entre todos los enlaces que no han elegido, este selecciona un canal al azar del conjunto de canales disponibles, el canal comunica su decisión al conjunto de interferencia, el cual es marcado como un canal escogido y eliminado del conjunto de canales disponibles en cualquier enlace.
4. Si todos los enlaces han realizado una selección de canal, y aún hay canales disponibles, todos los enlaces marcan su bandera con cero.
5. El proceso continúa hasta que no haya más canales disponibles para cualquier enlace.

Se utiliza la desigualdad 3.4 para identificar cuando dos enlaces se interfieren entre si:

⁸ Entidad que permite al operador controlar de forma dinámica la asignación de recursos.

$$x_{e_1}^h + x_{e_2}^h \geq 2 - \beta_{e_1, e_2}; \forall e_1, e_2 \in E, \quad (3.4)$$

donde, E es el conjunto de enlaces, β es la matriz de interferencia, tal que si $\beta_{e_1, e_2} = 1$ los enlaces e_1 y e_2 se interfieren entre si, x_e^h es una variable booleana, que toma el valor de 1 cuando el canal h es utilizado por el enlace e .

3.2 ALGORITMOS QUE UTILIZAN GT

3.2.1 Juego de Asignación de Recursos (JAR) basado en juegos no cooperativos y NE [24].

Este juego está definido por la terna:

$$\text{JAR} = \{N, \mathbb{X}, \{b_i(s)\}_{i \in N}\},$$

donde, N corresponde al conjunto de jugadores, \mathbb{X} al conjunto de estrategias y b_i al beneficio⁹ obtenido por el jugador i al utilizar el perfil de estrategias s .

- Elementos del juego:

Jugadores: son las BS.

Estrategias: recursos disponibles en la BS.

Utilidad: número de UE conectados en la red.

Se debe tener en cuenta que los jugadores son racionales y la información es de conocimiento común.

- Función de utilidad del juego:

$$(\bar{b}_i)_k = \begin{cases} \frac{(x_i)_k}{\sum_{j: j \in \Gamma_k} (x_j)_k} u_k, & u_k > \sum_{j: j \in \Gamma_k} (x_j)_k, \\ (x_i)_k, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.5)$$

donde, $(\bar{b}_i)_k$ es el beneficio medio esperado por el jugador i en el área¹⁰ k , x_i son los recursos que ofrece el jugador i , u_k el número de UE en el área k y $(x_j)_k$ el conjunto de todos los recursos que ofrecen el resto de jugadores presentes en esa misma área.

⁹ En este caso, corresponde al número de recursos asignados.

¹⁰ Las áreas corresponden a zonas de cobertura que estén o no solapadas.

El JAR realiza un análisis denominado obtención de estrategias, mostrado en la Figura 3.1, donde inicialmente establece el escenario (posiciones de las BS y usuarios), a continuación establece la conectividad, determinando que UE pertenecen al área de cobertura de una BS. Luego establece las áreas, para esto a cada UE se le asigna una clave, que corresponde a un número binario, además con esta clave se puede establecer si esa área es superpuesta o no.

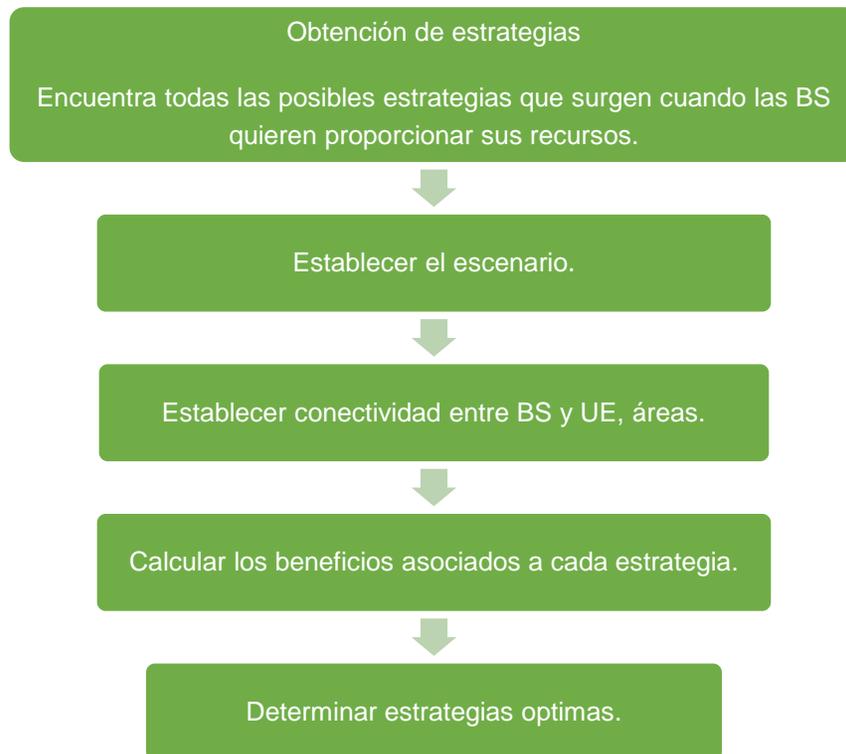


Figura 3.1. Procedimientos del JAR. Por los autores.

Al finalizar, el algoritmo brinda los siguientes datos de salida de la red: BS, áreas no superpuestas, áreas superpuestas y número de UE en cada área.

El JAR, plantea un procedimiento para disminuir el número de estrategias resultantes antes de implementarlo:

1. **Reservar recursos para las estrategias Naive:** las estrategias Naive corresponden a aquellas que la BS asigna a los UE que solo están bajo la cobertura de una BS.
2. **Examinar cantidad de recursos disponibles:** si no hay más recursos, o los recursos son mayores que el número de UE en la zona, no hay estrategias y por ende no se emplea el JAR. Si los recursos son menores que el número de UE presentes en la zona, busca todas las estrategias de

reparto y descarta las estrategias dominadas, como se muestra en la Figura 3.2.

3. **Calcular utilidad:** se calcula la utilidad asociada a cada estrategia, la cual corresponde al número de UE con recursos asignados.
4. **Determinar estrategias óptimas:** se determinan las estrategias óptimas utilizando el NE.

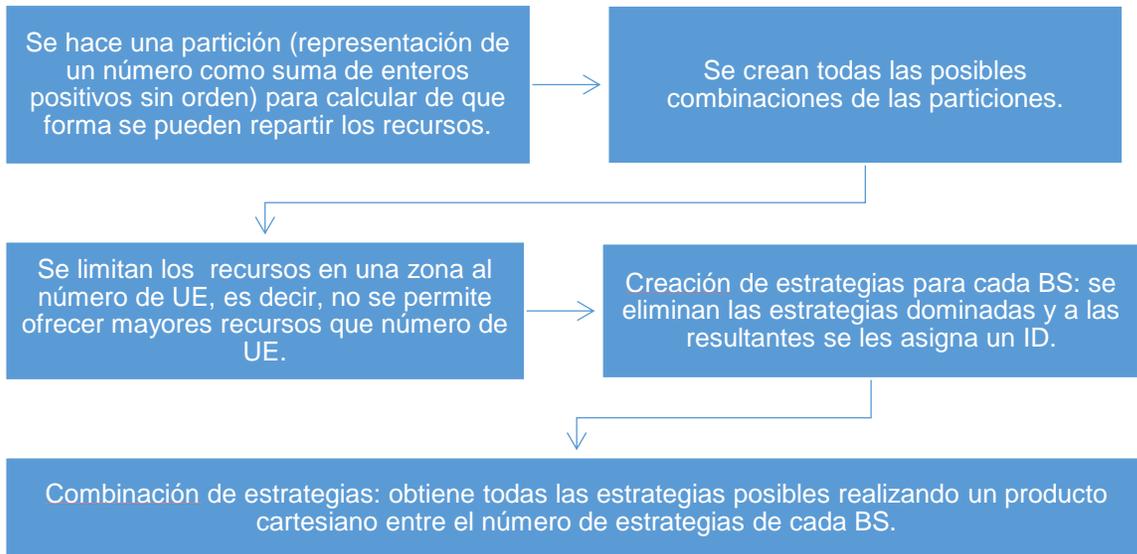


Figura 3.2. Proceso para la obtención de estrategias del JAR. Por los autores.

3.2.2 Algoritmo de asignación de espectro para radio cognitiva basado en juego cooperativo y concepto de solución de negociación de Nash [25].

Este algoritmo maximiza el beneficio de los Usuarios Secundarios (SU, *Secondary Users*), se emplea en un sistema con dos tipos de UE, Usuarios Primarios (PU, *Primary Users*) que corresponden a los UE con mayor prioridad o que se encuentran inicialmente conectados a la red y conforman el sistema primario, y SU, los cuales desean acceder a los recursos que no se están utilizando en el sistema primario.

- El espectro asignado a cada uno de los usuarios en el tiempo $(t + 1)$ viene dado por:

$$b_i(t + 1) = b_i(t) + \alpha_i b_i(t) \frac{\partial U(t)}{\partial b_i(t)} \quad \forall i = 1, \dots, N ,$$

donde, $b_i(t)$ representa el espectro asignado al usuario i en el tiempo t , α_i es la rapidez de aprendizaje, y $\frac{\partial U(t)}{\partial b_i(t)}$ corresponde a la función de utilidad

marginal.

- Elementos del juego:

Jugadores: son los SU, y cada uno de ellos es racional.

Estrategias: recursos compartidos por los PU.

- Función de utilidad del juego suponiendo dos SU:

$$U = ((U_1 - U_{1 \min})^{w_1})((U_2 - U_{2 \min})^{w_2}) , \quad (3.6)$$

donde, $U_{i \min}$ representa el mínimo beneficio del SU i , el cual corresponde al beneficio obtenido cuando el pierde en la “negociación”, U_i el beneficio obtenido por el SU i que esta dado por:

$$U_i = r_i k_i b_i - b_i \left(b_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N b_j \right) , \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (3.7)$$

N : número de SU.

r_i : tasa de transmisión del UE i .

k_i : eficiencia espectral, definida como:

$$k_i = \log_2(1 + Ksnr_i) \quad K = \frac{1.5}{\ln(0.2)/BER_i^{obj}} ,$$

donde, snr_i corresponde a la SNR recibida por el SU i , BER_i^{obj} es la tasa de error de bit objetivo para el SU i , y w_i es la prioridad de compartición de espectro para el SU i , la cual debe cumplir la siguiente condición:

$$\sum_{i=1}^N w_i = 1 \quad , \quad \forall i \in 1, 2, \dots, N$$

El algoritmo opera siguiendo los pasos enumerados a continuación:

1. El PU tiene asignada una porción del espectro.
2. El SU i obtiene en el tiempo $(t + 1)$ a través del canal de control público, la información del espectro disponible como la prioridad de compartición, información sobre la tasa de transmisión y la eficiencia espectral de otros UE en el tiempo (t) .

3. Posteriormente los SU ajustan su espectro compartido basado en la función de utilidad marginal $\frac{\partial U(t)}{\partial b_i(t)}$.
4. Se asigna el espectro a los SU_i con base a w_i .
5. Se repiten los pasos anteriores hasta que se encuentra una solución de Nash, que se obtiene cuando en el juego $b_i(t+1) = b_i(t) \Rightarrow \frac{\partial U(t)}{\partial b_i(t)} = 0$.

3.2.3 Algoritmo de asignación de recursos utilizando un juego no cooperativo jerárquico basado en el modelo de Stackelberg (modelo líder - seguidor) [26].

La aplicación del algoritmo es en redes heterogéneas de retransmisión, en las cuales entran en juego componentes importantes introducidos en la Tecnología de Evolución a Largo Plazo Avanzada (LTE-A, *Long Term Evolution-Advance*), denominados Nodos de Retransmisión (RN, *Relay Node*).

El algoritmo equilibra el *Throughput* de los enlaces de *backhaul* (MS-RN) y acceso (MS-BS), y consta de dos juegos:

- Juego a Nivel de Backhaul (BLG, *Backhaul Level Game*).
- Juego a Nivel de Acceso (ALG, *Access Level Game*).

En la Tabla 3.1 se detalla las características principales de los dos juegos.

Tabla 3.1. Juegos del algoritmo de asignación de recursos.

BLG	ALG
<p>Los RN son los líderes. El juego tiene la siguiente forma:</p> $\Gamma_1 = \left(K, \{A'_k\}_{k \in \mathcal{K}}, \{U'_k\}_{k \in \mathcal{K}} \right),$ <p>donde, K es el conjunto de jugadores, A'_k el conjunto de estrategias (frecuencia y potencia) del jugador k y U'_k el conjunto de funciones de utilidad del jugador k con diferentes estrategias.</p>	<p>Las MS son los seguidores. El juego tiene la siguiente forma:</p> $\Gamma_2 = \left(\mathcal{M}, \{A_i\}_{i \in \mathcal{M}}, \{U_i\}_{i \in \mathcal{M}} \right),$ <p>donde, \mathcal{M} es el conjunto de jugadores, A_i el conjunto de estrategias (frecuencia y potencia) del jugador i y U_i el conjunto de funciones de utilidad del jugador i con diferentes estrategias.</p>

<p>La función de utilidad del juego es:</p> $u'_k = - R'_k - \overline{R}_k , \quad (3.8)$ <p>donde, R'_k es la tasa o velocidad de transmisión del jugador k y \overline{R}_k el límite superior del <i>Throughput</i> de los enlaces RN-MS.</p> <p>El <i>Throughput</i> del enlace de <i>backhaul</i> está dado por la siguiente expresión.</p> $R_{kn} = W_0 \log (1 + b_{kn} SINR_{kn}),$ <p>donde,</p> $SINR_{kn} = \frac{P_{kn}\beta_{kn}}{N_0W_0 + I''_{kn}}$ <p>b_{kn} es igual a 1, cuando el bloque de recursos¹¹ es asignado al enlace BS-RN y cero de lo contrario, P_{kn} es la potencia de transmisión de la BS, β_{kn} la perdida de trayecto entre RN_k y BS en servicio, N_0 la varianza de ruido térmico, W_0 el BW de un bloque de recursos e I''_{kn} la interferencia causada por las BS de las celdas adyacentes.</p> <p>No hay interferencia intracelular ya que las frecuencias portadoras son ortogonales.</p>	<p>La función de utilidad del juego es:</p> $u_i = - R_i - R'_i , \quad (3.9)$ <p>donde, R_i es la tasa de transmisión del jugador i.</p> <p>Para el jugador i, si el nodo de acceso es un RN, i es igual a k, y si es una BS es igual a cero.</p> <p>El <i>Throughput</i> de los enlaces de acceso ($i = k$) y directo ($i = 0$) está dado por la siguiente expresión.</p> $R_{mn}^{(i)} = W_0 \log(1 + b_{mn}^{(i)} SINR_{mn}^{(i)}),$ <p>donde,</p> $SINR_{mn}^{(i)} = \frac{P_{mn}^{(i)}\beta_{mn}^{(i)}}{N_0W_0 + I''_{mn} + I'_{mn}{}^{(i)}}$ <p>$b_{mn}^{(i)} = b_{mn}^{(0)} = 1$ ($b_{mn}^{(i)} = b_{mn}^{(k)} = 1$) indica que el bloque de recursos es asignado al enlace de acceso o directo y cero en otro caso, $P_{mn}^{(i)} = P_{mn}^{(0)}$ ($P_{mn}^{(i)} = P_{mn}^{(k)}$) la potencia de transmisión del nodo de acceso, $\beta_{mn}^{(i)} = \beta_{mn}^{(0)}$ ($\beta_{mn}^{(i)} = \beta_{mn}^{(k)}$) la perdida por trayecto en el enlace, I''_{mn} la interferencia proveniente de las BS y RN en celdas adyacentes e $I'_{mn}{}^{(i)}$ ($i = 0$ o $i = k$) la interferencia intracelular en el enlace.</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

El algoritmo de asignación de recursos inicialmente obtiene información completa del estado del canal con respecto a otros enlaces de *backhaul* con la misma BS, posteriormente, cada MS obtiene información completa del estado del canal de todos los enlaces de acceso con el mismo nodo.

El algoritmo opera siguiendo los pasos enumerados a continuación:

¹¹ Un bloque de recursos se compone de una ranura en el dominio del tiempo y 12 sub portadoras en el dominio de la frecuencia.

1. Asigna bloques de recursos por medio del algoritmo húngaro [27] para los tres enlaces.
2. En el BLG, el líder k estima el posible límite superior del *Throughput* del enlace RN-MS (\overline{R}_k) por el algoritmo *water filling* [28].
3. El líder k escoge la estrategia de asignación basada en R_k para obtener R'_k .
4. Se obtiene el equilibrio en BLG cuando $\overline{R}_k = R'_k$ o son casi iguales.
5. En el ALG, cuando R'_k es establecido, el seguidor k escoge la estrategia que afecta en menor medida al líder k como a los otros seguidores. Realiza la asignación de recursos a las MS que acceden al seguidor k usando el algoritmo de *water filling*.
6. Cada seguidor cambia su estrategia con base al paso anterior, hasta alcanzar un estado estable, llegando al equilibrio del ALG.
7. Cuando se alcanza el equilibrio en los dos juegos finaliza el juego de asignación de recursos.

3.2.4 Asignación de recursos utilizando un juego repetido con información perfecta y punto eficiente estable de Pareto [29].

El juego no tiene en si una función de utilidad, ya que considera un enfoque que no pretende un óptimo con respecto a una función de utilidad subjetiva, sino que es computacionalmente ligero y capaz de encontrar un buen equilibrio entre el rendimiento global (*Throughput*) y equidad entre los flujos.

- Elementos del juego:

Jugadores: son dos entidades funcionales, llamados planificador y asignador de recursos, con conocimiento perfecto del canal. El planificador trabaja en la capa de transporte, lo que le permite distinguir entre los posibles tipos de tráfico y el asignador trabaja en la capa de acceso al medio.

Estrategias: conjunto de valores de D (número de paquetes a enviar al asignador de recursos) que pueden ser propuestos, donde $D \geq L$, L corresponde al número de bloques de recursos que el asignador tiene derecho a asignar, el cual tiene un valor fijo para limitar la interferencia causada a celda vecinas, que debe cumplir la condición, $L \leq L_{max}$ donde

L_{max} corresponde a asignar cada uno de los bloques de recursos. El conjunto de estrategias se define en la expresión 3.10.

$$S_1 = S_2 = \{L, L + 1, \dots, 2L\}, \quad (3.10)$$

El planificador determina qué paquetes son candidatos para brindarles el servicio en la próxima ronda de asignación, y el asignador asocia los paquetes con grupos de sub portadoras multiplexadas por división de frecuencia ortogonal.

A manera general, el juego tiene los siguientes pasos:

1. El planificador y el asignador de recursos eligen al azar un valor de D , el cual influye en toda la asignación. Si $D = L$, el asignador de recursos no tiene grado de libertad en cuanto a que paquetes asignar.
2. Si el valor de D escogido por ambos jugadores es el mismo, D se establece y el juego termina, pero si son diferentes, para determinar un punto de equilibrio, el algoritmo intenta calcular automáticamente un valor eficaz de D , comenzando una fase de negociación hasta que los jugadores elijan un valor en común, teniendo en cuenta toda la historia del juego y que la utilidad de cada jugador es igual a cero cuando no llegan a un acuerdo.
3. El juego termina cuando se encuentra un valor de D , tal que los dos jugadores obtengan su mayor utilidad posible al implementar dicha estrategia, y por ende no deseen cambiarla.

3.2.5 Distribución dinámica del espectro en redes radio cognitivas utilizando un juego no cooperativo de forma estratégica de tipo potencial [30].

El algoritmo realiza una asignación de espectro tal que la interferencia intra e inter sistema es mínima.

El juego está definido por la terna:

$$\Gamma = \{\mathcal{N}, \{S_i\}_{i \in \mathcal{N}}, \{u_i\}_{i \in \mathcal{N}}\}.$$

Es un juego potencial que refleja los incentivos de todos los jugadores debido a cualquier cambio unilateral en la utilidad de un solo jugador, y garantiza la convergencia a un punto de NE siempre y cuando se adopte la estrategia de mejor respuesta. La función potencial viene dada por:

$$V(s'_i, s_{-i}) - V(s_i, s_{-i}) = u_i(s'_i, s_{-i}) - u_i(s_i, s_{-i}) \quad , \quad s'_i \in S_i$$

- Elementos del juego:

Jugadores: son los SU.

Estrategias: canales compartidos por los PU.

Utilidad: corresponde a la interferencia. La función de utilidad mostrada en 3.11, tiene en cuenta el comportamiento egoísta y no cooperativo de los SU, para gestionar la interferencia mediante la selección del mejor canal con mínima interferencia intra e inter sistema.

- Función de utilidad del juego:

$$u_i(s_i, s_{-i}) = - \underbrace{\sum_{j=1, j \neq i}^N G_{ji} p_i \delta_{c_j c_i}}_a - \underbrace{\sum_{j=1, j \neq i}^N G_{ij} p_j \delta_{c_i c_j}}_b \quad (3.11)$$

$$- \underbrace{\sum_{h=1}^M G_{hi}^{HL} p_i \delta_{ch^H c_i}}_c - \underbrace{\sum_{h=1}^M G_{ih}^{LH} p_h^H \delta_{c_i ch^H}}_d,$$

donde, p_i y p_j corresponde a la potencia de transmisión de SU_i y el SU_j respectivamente, G_{ih}^{LH} es la ganancia de enlace entre el PU_h y SU_i , G_{ji} y G_{ij} son las ganancias de enlace entre SU_{ij} y SU_{ji} respectivamente, p_h^H es la potencia de transmisión del PU_h , G_{hi}^{HL} es la ganancia de enlace entre SU_i y PU_h , ch^H es el canal del conjunto de canales disponibles C asignado a PU_h y $\delta_{c_i c_j}$ corresponde a la función delta de Kronecker, que indica si los canales c_i y c_j asignados a los SU son o no los mismos y tiene la siguiente forma:

$$\delta_{c_i c_j} = \begin{cases} 1 & \text{si } c_i = c_j \\ 0 & \text{si } c_i \neq c_j \end{cases}.$$

Cada término de la expresión 3.11 hace referencia a las siguientes variables:

a : interferencia creada por el SU_i a otros SU receptores.

b : potencia de interferencia total recibida por SU_i de otros SU.

c : interferencia creada al PU receptor.

d : interferencia recibida por SU_i de los PU receptores.

La distribución dinámica del espectro se realiza de la siguiente forma:

1. Un SU_i censa los canales disponibles y selecciona un canal c_i del conjunto de canales disponibles C para comunicarse con el receptor

previsto, el canal puede ser utilizado simultáneamente por un PU y un SU. Los SU intentan gestionar la interferencia inter e intra sistema con los términos a y c de la función de utilidad, ya que esta no debe superar los límites de la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*) de las expresiones 3.12 y 3.13:

- SINR recibida en el PU_h receptor:

$$\gamma_h^H = \frac{G_{hh}^{HH} p_h^H}{\sum_{i=1}^N G_{hi}^{HL} p_i \delta_{ch^H c_i} + n_0}, \quad (3.12)$$

donde, G_{hh}^{HH} es la ganancia de enlace entre los PU_h transmisor y receptor y n_0 corresponde a la potencia de ruido en cada receptor.

- SINR medida en el SU_i receptor:

$$\gamma_i = \frac{G_{ii} p_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^N G_{ij} p_j \delta_{c_i c_j} + \sum_{h=1}^M G_{ih}^{LH} p_h^H \delta_{c_i c_h^H} + n_0}, \quad (3.13)$$

donde, G_{ii} es la ganancia de enlace entre el SU_i transmisor y el receptor.

2. Se mide el rendimiento de los PU utilizando la probabilidad de interrupción, que se define como la probabilidad de que la SINR recibida en el PU_h receptor caiga por debajo de cierto umbral:

$$\gamma_h^H < \gamma_h^{objetivo}$$

3. Cuando se tiene un estado estacionario del *Throughput* de la red se llega al NE. Después de llegar al NE se debe utilizar un algoritmo de control de potencia para asegurar que el rendimiento de los PU no se deteriore.

3.2.6 Asignación de espectro en redes radio cognitivas basada en una subasta *Vickey Clarke Groves* con juegos cooperativos y valor de Shapley [31].

Este algoritmo asigna los recursos de espectro equitativamente a cada UE con base a su oferta y necesidades de canal. El juego tiene la siguiente forma:

$$G = (N, v),$$

donde, N corresponde al conjunto finito de jugadores y v a la función característica que asocia a cada coalición un valor $v(s)$ denominado valor de la coalición.

- Elementos del juego:

Jugadores: son los SU.

Estrategias: canales libres del sistema primario.

Utilidad: cantidad que tiene el SU para realizar una oferta.

- Función de utilidad del juego cooperativo:

$$v(s) = |s| \sum_{j=1}^M \left(\frac{1-H\left(\prod_{i \in s} (p_{ij} P_j)\right)}{c(j)} \right), \quad (3.14)$$

donde, $v(s)$ corresponde a la utilidad que los miembros de la coalición (s) pueden ganar sin ayuda de los jugadores fuera de la coalición, s es cualquier coalición en $\{1..N\}$, $|s|$ la cardinalidad del conjunto, $H(\cdot)$ la función de entropía binaria, p_{ij} la probabilidad de detección de PU por el SU_i en el canal j , P_j es la decisión de espectro, 1 cuando el PU está presente en el canal j y -1 en caso contrario, para ello usa la regla de decisión basada en la función lógica OR, $c(j)$ es el número total de SU censando el canal j y M el número de canales en los que se subdivide el espectro.

El algoritmo opera siguiendo los pasos enumerados a continuación:

1. El primer UE en entrar a la red servirá como Centro de Fusión (FC, *Fusion Center*), el cual gestionará la información propia de la coalición y reglas de detección de espectro.
2. Los SU forman coaliciones para censar conjuntamente el espectro. Para detectar la actividad de los PU en los canales, utilizan el método de detección de ciclo estacionario en radio cognitiva.
3. Posteriormente los SU compiten entre ellos para aprovechar el espectro libre, comunicándose entre sí y con el FC por medio de un canal común.
4. Dependiendo de la actividad de los PU reportada por los SU, el FC toma una decisión acerca de la disponibilidad del canal.

5. Se calcula el valor de la coalición, teniendo en cuenta la calidad (probabilidad de detección del PU) y cantidad (número de canales detectados y potencia gastada en detectarlos) del trabajo realizado.
6. Cada SU obtiene su utilidad, calculada con el juego cooperativo.
7. Los SU ofertan por canales libres de acuerdo a sus necesidades de tasa de transmisión. Aquellos con urgente necesidad de transmitir ofertan casi la totalidad de su pago, los que no tienen tanta necesidad de transmitir, ofertan solo una parte de su pago y reservan el resto para cuando tengan mayor necesidad, y aquellos que no deseen transmitir no deben realizar ninguna oferta.
8. El pago que debe hacer el ganador corresponde a la segunda oferta más alta realizada.
9. Las ofertas se re ordenan para asignar los canales que quedaron libres.
10. Se repiten los pasos anteriores, hasta que el FC quede sin canales libres para asignar.

Una vez estudiados los anteriores algoritmos o métodos de asignación, se extraen los conceptos más relevantes de los algoritmos explicados en la sección 3.2.1, 3.2.3 y 3.2.5. Del primero se adoptan algunos de los pasos que sigue el algoritmo, del segundo se tiene en cuenta la fórmula con la cual calculan el *Throughput* en cada enlace, y el último puede ayudar en la definición de las fórmulas para encontrar la SINR y además se resalta la función delta de Kronecker que permite conocer cuando dos usuarios están utilizando el mismo recurso. Todo lo anterior ayuda a la construcción de un nuevo algoritmo que pueda ser implementado en una red heterogénea de varios jugadores.

A continuación se explica el juego a utilizar y sus características, para el desarrollo del algoritmo de asignación de espectro.

3.3 SELECCIÓN DEL TIPO DE JUEGO A UTILIZAR

Para escoger el tipo de juego a utilizar entre cooperativo y no cooperativo, se realiza una comparación con base en tres aspectos, teniendo en cuenta los resultados de los algoritmos previamente estudiados y la teoría del capítulo 2. Dicha comparación se consigna en la Tabla 3.2.

Acorde a la Tabla 3.2 se determina que la implementación de juegos cooperativos solo es viable en redes con pocos usuarios, ya que mientras mayor es el número de

UE, la convergencia a algún equilibrio se vuelve mucho más lenta, por ello en la mayoría de los algoritmos que utilizan juegos cooperativos citados anteriormente, al momento de la simulación utilizan máximo dos pares transmisores-receptores. Por ello, para la realización del algoritmo de asignación de espectro del presente trabajo, se utilizará los juegos no cooperativos, que permiten implementarse en una red con un gran número de UE y ofrecen conceptos de solución que pueden brindar una asignación menos egoísta.

Tabla 3.2. Juego cooperativo vs no cooperativo.

	Juego cooperativo	Juego no cooperativo
Número de jugadores	El número de jugadores es muy limitado, ya que a mayor número de jugadores, mayor nivel de complejidad para llegar a una solución.	No hay restricción alguna frente al número de jugadores, ya que el jugador juega de manera individual. El aumento de jugadores incrementa la complejidad de llegar a una solución pero en menor medida que el cooperativo.
Información de conocimiento común	Gran cantidad de la información que se maneja debe ser de conocimiento común entre los jugadores, además deben estar en constante comunicación para coalicionarse.	La situación más compleja, se presenta cuando el juego es de información completa, en este caso todos los jugadores deben conocer los datos del juego (número de jugadores, estrategias y utilidades) pero no deben tener en cuenta otro tipo de información de los demás.
Conceptos de solución	Posee limitados conceptos de solución, y los existentes, constan de muchos procesos para llegar a un resultado final, lo cual hace que llegar a una solución requiera más tiempo.	Posee diversos conceptos de solución, de los cuales, se puede resaltar que cada uno de ellos tiene un objetivo diferente y toman en cuenta distintos aspectos del juego.

A continuación, para elegir la forma y tipos de estrategias del juego, se elabora la Tabla comparativa 3.3.

Tabla 3.3. Comparación de las características del juego.

CARACTERÍSTICAS	
Forma normal o estratégica	Forma extensiva
Los jugadores eligen sus estrategias de forma simultánea.	Los jugadores eligen sus estrategias de forma secuencial y requiere información perfecta.
Estrategias puras	Estrategias Mixtas
El jugador siempre escoge la misma estrategia.	El jugador puede cambiar su estrategia de acuerdo a la utilidad obtenida.

De acuerdo a las Tablas 2.1 y 3.3, se escoge un juego en forma normal o estratégica, porque al tener gran cantidad de UE la forma extensiva haría que el proceso de elección de estrategias sea lento y dispendioso; dinámico, ya que los jugadores podrán extraer información de sus últimos movimientos para tenerla en cuenta en decisiones actuales y futuras, además el jugador no tendrá un solo intento para tomar la decisión; con información incompleta e imperfecta, ya que se busca que el algoritmo sea rápido, y con ello los jugadores no están interesados en conocer los datos y la historia del juego; de suma variable, porque no se tendrá algo que distribuir, lo que se le asigna a un jugador no se le disminuye a otro, en este caso para que un equilibrio sea una solución debe ser una estrategia no dominada; de estrategias mixtas, ya que los jugadores podrán elegir la mejor a partir de un perfil de estrategias utilizando GT, bajo la consideración de que el oponente es racional.

Para elegir el concepto de solución a utilizar de los juegos no cooperativos, se realiza una comparación de las características más relevantes de cada uno, cómo se implementaría y los problemas que se tendrían que enfrentar.

Se comparan en total nueve conceptos de solución, de los cuales tres de ellos, cumplen con las características del tipo de juego anteriormente escogidas y se acoplan al análisis requerido. En la Tabla 3.4 se muestra la comparación de estos tres conceptos de solución.

Respecto a la información consignada en la Tabla 3.4, se escoge el equilibrio de satisfacción, ya que en este concepto los jugadores no desean conseguir la máxima utilidad, solo es suficiente con satisfacer su necesidad, por ende, consiste en un juego no cooperativo pero que a su vez piensa en el beneficio de todos los jugadores. También una característica relevante, es que no se debe tener en cuenta los cambios de estrategias, ya que cuando el jugador llega a este equilibrio de satisfacción no desea cambiarla.

Tabla 3.4. Comparación conceptos de solución de juegos no cooperativos.

	Equilibrio robusto	Equilibrio fuerte	Equilibrio de satisfacción
Características más relevantes	<p>Evita que los jugadores deseen cambiar de estrategia. El cambio de estrategias de los oponentes no afecta el valor de la utilidad de los jugadores leales. Puede o no usar un mediador para recomendar las estrategias a usar.</p>	<p>Es estable a desviaciones individuales o únicas. Evita que uno o más jugadores deseen desviarse para mejorar sus utilidades. Hace que los equilibrios encontrados sean al mismo tiempo un óptimo de Pareto.</p>	<p>El jugador juega una estrategia que satisface sus necesidades. El jugador no tiene interés en cambiar su estrategia al alcanzar el equilibrio. Se observa un equilibrio si todos los jugadores están simultáneamente satisfechos.</p>
Como se implementaría	<p>Se tendría un "controlador" encargado de conocer cuáles son los jugadores leales y los que cambian de estrategia, para proporcionar las utilidades adecuadas.</p>	<p>Se tendría un perfil de estrategias, tal que ningún miembro desearía cambiar de estrategia para maximizar sus ganancias, ya que con esta obtendrá su mejor utilidad y además no hay otra estrategia que lo mejore sin perjudicar a los otros.</p>	<p>Las BS conocerán la SINR del servicio requerido por los usuarios en su red, para definir cuando sus usuarios están satisfechos, y así escoger la estrategia adecuada. La mejor estrategia corresponderá a aquella que cumpla con la SINR requerida por el usuario.</p>
Problemas	<p>Es complicado mantener las utilidades de los usuarios leales cuando se presentan cambios de estrategias.</p>	<p>Es posible que en cada uno de los escenarios no se pueda encontrar una solución de este tipo, es decir que una estrategia sea NE y óptimo de Pareto al mismo tiempo.</p>	<p>Puede ocurrir que con algunas estrategias de asignación de recursos, la mayor cantidad de usuarios presentes en la red no estén satisfechos.</p>

En el capítulo 4, se realiza una descripción detallada del algoritmo de asignación de espectro basado en GT aplicado a redes heterogéneas.

CAPÍTULO 4. MODELO DE ASIGNACIÓN DE ESPECTRO BASADO EN GT EN UNA RED HETEROGÉNEA

En este capítulo se explica el escenario base general en el que se implementa el algoritmo de asignación de espectro basado en GT, se detalla el procedimiento para ubicar los micro UE y femto UE, y se expone de manera detallada los pasos del algoritmo de asignación de espectro.

4.1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA

Para el análisis del *Throughput* de una red heterogénea que implementa un algoritmo de asignación de espectro basado en GT, se define la realización de una simulación a nivel de sistema¹², en la que se tiene una red de comunicaciones que presenta las siguientes características:

- Arquitectura heterogénea de dos niveles: el nivel superior conformado por una Micro Estación Base (MBS, *Micro Base Station*), y el nivel inferior por j número de Puntos de Acceso Femto (FAP, *Femto Access Point*).
- Proporciona servicio a dos tipos de UE: Micro UE (MUE, *Micro User Equipment*) los cuales están asociados a la MBS y Femto UE (FUE, *Femto User Equipment*) conectados a los FAP.
- Ofrece servicios de voz y datos, en un ambiente urbano.

En la Figura 4.1, se muestra el escenario de simulación, que tiene un área de 1.4 Km^2 , sobre la cual se ubica aleatoriamente determinada cantidad de UE, MBS y FAP.

El escenario consta de:

- Una MBS (celda verde): generalmente su radio de cobertura varía de 0.2 a 2 Km, en este caso se fijara un radio de cobertura de 500 m.
- FAP (celdas naranjas): generalmente su radio de cobertura es menor de 100 metros, en este caso se fijara un radio de cobertura de 60 metros. El número de FAP presentes en la red es fijo.
- UE: el número de UE presentes en la red es fijo.

¹² En una simulación a nivel de sistema se realiza un análisis global del comportamiento del sistema.

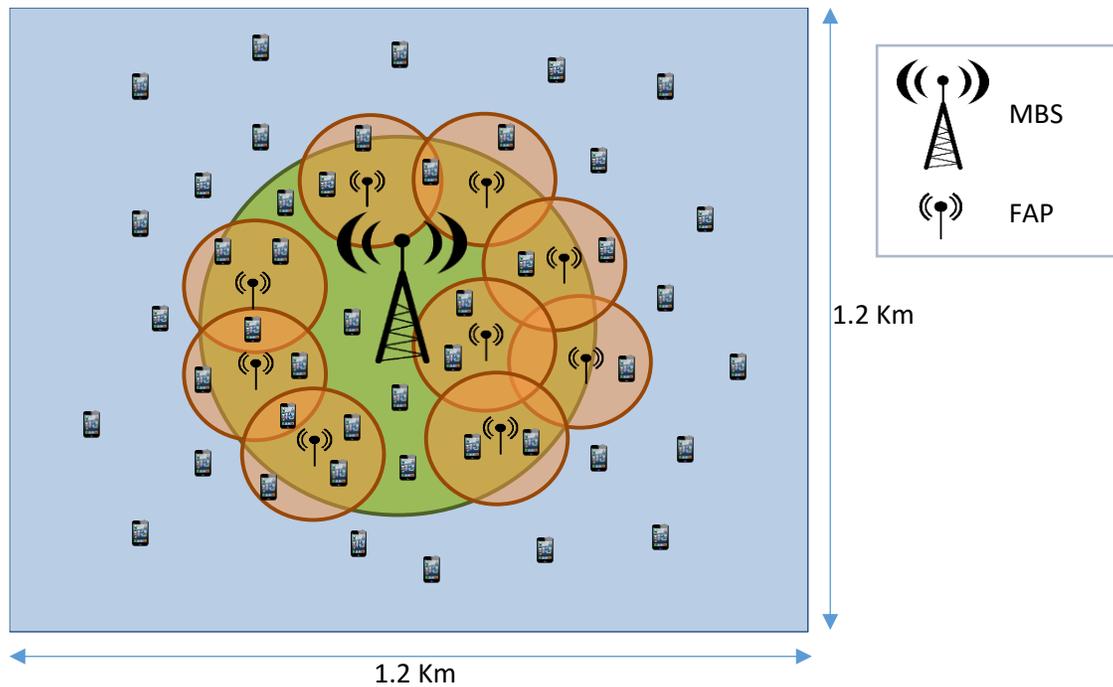


Figura 4.1. Escenario de simulación. Por los autores.

En este escenario, un UE experimenta dos clases de interferencia en la señal transmitida por el UE, una proveniente de los UE dentro de su misma celda y otra que proviene de los UE ubicados fuera de la red de análisis, tal y como se observa en el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 4.2, donde i es el número total de frecuencias portadoras en el sistema, w la cantidad de MUE dentro de la red de análisis, q el número total de UE dentro de un FAP, y j es el número total de FAP.

En la Figura 4.2, se muestran las interferencias que pueden experimentar una MBS o FAP. La línea roja continua, corresponde a la interferencia de canal adyacente y la línea punteada a la interferencia co-canal, causada ya sea por un UE dentro de su misma celda o de una celda contigua. Se debe tener en cuenta que los MUE_1 y $FUE_{1,1}$ tendrán mayor interferencia de canal adyacente o co-canal si los MUE_2 , MUE_3 , $FUE_{1,2}$ y $FUE_{1,3}$ se encuentran a una distancia muy cercana.

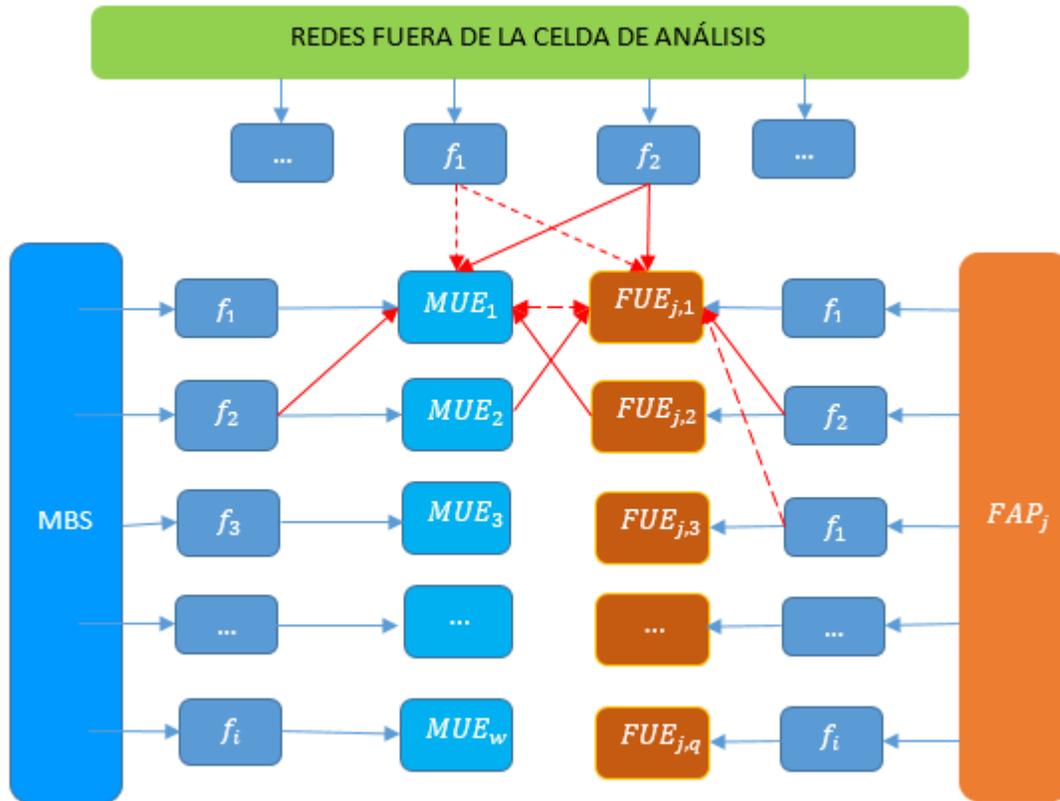


Figura 4.2. Interferencias presentes en el sistema. Por los autores.

Además, los elementos del escenario, tienen algunos valores establecidos, tales como:

- Potencia de transmisión: este valor corresponde a la potencia de transmisión típica del UE.
- Ganancia de las antenas: es un valor intrínseco de la antena utilizada, proporcionado por el fabricante.
- Pérdidas: se utiliza un modelo de propagación para ambientes interiores, exteriores y peatonales. Este modelo es válido para enlaces Sin Línea de Vista (NLOS, *Non Line Of Sight*), y describe el peor caso de propagación. El Desvanecimiento por Sombra (SF, *Shadow Fading*) se modela mediante una variable aleatoria con distribución normal y desviación estándar de 5dB, de manera que las pérdidas de propagación quedan representadas por la expresión 4.1.

$$L [dB] = 49 + 40 \log_{10}[d(km)] + 30 \log_{10}[f(MHz)] + D[dB]. \quad (4.1)$$

- Potencia en recepción: se realiza un balance del enlace. La ecuación se muestra a continuación.

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{aTx} + G_{aRx} - L. \quad (4.2)$$

4.2 DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL DEL SISTEMA

El procedimiento que describe el comportamiento general del sistema se presenta en la Figura 4.3.

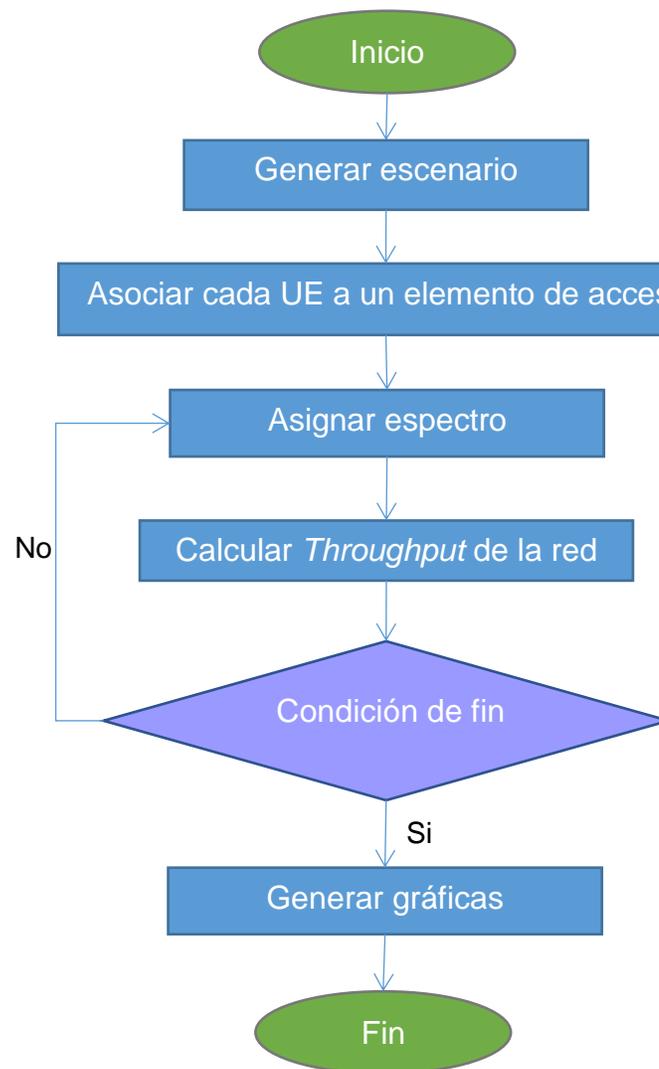


Figura 4.3. Diagrama general del sistema.

4.2.1 Generar escenario

Se despliega una MBS de 500 m de radio de cobertura, j FAP de 80 m de radio de cobertura dentro de la MBS y n UE de manera aleatoria dentro de la red, utilizando una distribución uniforme pseudoaleatoria de enteros.

4.2.2 Asociar cada UE a un elemento de acceso.

1. Obtener Elementos de Acceso (AE, *Access Element*) que brinden cobertura a un UE: en este proceso se determina que UE pertenecen al área de cobertura de dicho FAP o MBS, para ello inicialmente se tiene la Tabla 4.1, que permite identificar a qué AE pertenece cada uno de los UE, etiquetándolo con '1' cuando tiene cobertura con ese AE y '0' en caso contrario.

Tabla 4.1. Cobertura de UE.

		AE				
		MBS	FAP_1	FAP_2	...	FAP_j
UE	U_1	1	0	1		
	...					
	U_n					

Para saber qué UE pertenecen a la MBS o FAP se calcula la distancia entre los pares de coordenadas de ubicación del UE y AE, de la siguiente manera:

- Para identificar si un UE pertenece a la MBS:

$$d_{MBS,u_n} = \sqrt{(x_{u_n} - x_{MBS})^2 + (y_{u_n} - y_{MBS})^2} \leq r_{MBS} ,$$

donde, r_{MBS} corresponde al radio de cobertura de la MBS.

Si la condición se cumple, se tiene que el UE pertenece al área de cobertura de la MBS.

- Para identificar si un UE pertenece a un FAP:

$$d_{FAP_j, u_n} = \sqrt{(x_{u_n} - x_{FAP_j})^2 + (y_{u_n} - y_{FAP_j})^2} \leq r_{FAP_j} ,$$

donde, r_{FAP_j} corresponde al radio de cobertura del FAP_j .

Si la distancia es menor o igual al radio de cobertura del FAP_j , significa que el UE pertenece a su área de cobertura.

2. Establecer enlace: aquí se establece el enlace entre el UE y un AE. De la Tabla 4.1, se escoge el AE al cual el UE se va a conectar teniendo en cuenta la mínima distancia entre ellos, de esta manera al finalizar este proceso se obtiene la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Cobertura de UE Final.

		AE				
		MBS	FAP_1	FAP_2	...	FAP_j
UE	U_1	0	0	1		0
	...					
	U_n	1	0	0		0

4.2.3 Asignar espectro

Para determinar la viabilidad de utilizar un algoritmo de asignación de espectro basado en GT en una red heterogénea, es necesario comparar con un algoritmo que no utilice GT.

4.2.3.1 Asignación de espectro sin GT.

Esta asignación tiene los pasos mostrados en el Figura 4.4.

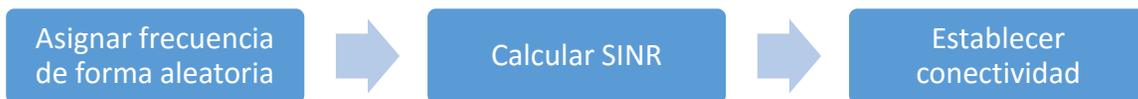


Figura 4.4. Diagrama de bloques. Asignación de espectro sin GT.

A cada UE se le asigna una frecuencia de manera aleatoria entre el conjunto de recursos disponibles en la red, luego se procede a calcular la SINR que alcanza cada UE con la frecuencia asignada y finalmente el UE se conecta al AE si alcanza el nivel mínimo de SINR requerido por el servicio.

Debido a que en este método de asignación no se utiliza una técnica de aprendizaje reforzado ni GT, si el sistema le asigna a un UE una frecuencia y este no alcanza la SINR requerida, el sistema no es capaz de reconocer que no debe asignarle en un futuro este valor de frecuencia.

4.2.3.2 Asignación de espectro con GT

A cada UE se le asigna una frecuencia utilizando el algoritmo de asignación de espectro basado en un juego no cooperativo con equilibrio de satisfacción, el cual se describe de forma detallada en la sección 4.3.

4.2.4 Calcular *Throughput* de la red

Para calcular el *Throughput* de la red se utiliza la expresión 4.3, que corresponde a una adaptación de la fórmula de capacidad de Shannon, que describe cual es la capacidad de un canal para transmitir una señal, delimitada por una potencia de ruido, ancho de banda y potencia finitos.

$$Throughput_{red} = \sum_{k=1}^K BW_{hz} \log_2(1 + SINR_k), \quad (4.3)$$

donde K, corresponde al número total de UE presentes en la red de análisis.

4.2.5 Generar gráficas

En este proceso se obtienen las gráficas que permiten observar, comparar y analizar el comportamiento de la red al implementar un algoritmo de asignación de espectro basado en GT y sin GT.

4.3 DEFINICIÓN DEL ALGORITMO DE ASIGNACIÓN DE ESPECTRO BASADO EN GT.

Como primera medida se deben definir los principales elementos de un juego en el contexto a trabajar:

- **Jugador:** en este caso, los jugadores corresponden a los UE, quienes buscan obtener la mejor¹³ estrategia de asignación de recursos en la red.

¹³ La mejor estrategia corresponde a aquella frecuencia que cumple el SE y con la cual el usuario obtiene la mejor SINR.

- **Estrategias:** es el conjunto de decisiones que pueden ser tomadas en el transcurso del juego y enumeran los movimientos de todos los jugadores para cada situación. En este caso, corresponden al conjunto de frecuencias disponibles en la banda escogida.
- **Utilidad:** representa el beneficio obtenido por el jugador al implementar una determinada estrategia. La utilidad final obtenida por cada jugador depende de las estrategias escogidas por el resto de jugadores. En el presente trabajo la utilidad corresponde a la SINR que proporciona la estrategia implementada.

El juego de asignación de recursos, corresponde a un juego de forma estratégica de la siguiente manera:

$$G = (K, \{A_k\}_{k \in K}, \{U_k\}_{k \in K}, \{F_k\}_{k \in K}), \quad (4.4)$$

donde, K es el conjunto de UE presentes en la red de análisis, A_k corresponde al conjunto de estrategias, U_k representa el conjunto de utilidades del juego, es decir, el beneficio obtenido al aplicar una estrategia $a_k \in A_k$ y F_k la función de satisfacción, la cual se define en la siguiente expresión:

$$F_k = \{a_k \in A_k: \phi_k \geq u_k(a_k) \geq \Gamma_k\}, \quad (4.5)$$

donde,

$$\Gamma_k = SINR^{min}$$

$$\phi_k = SINR^{min} + \beta,$$

donde, $SINR^{min}$ es la SINR mínima requerida por el UE_k para el servicio solicitado y β es un parámetro que depende de la tolerancia del sistema a la interferencia, el cual ha sido establecido en 9.80, teniendo en cuenta el nivel de SINR que permite alcanzar una comunicación aceptable [32].

La función de utilidad del juego es:

$$U_k(a_k) = SINR_k = \frac{\alpha_k P_t}{\eta + I_a + I_b} \quad \forall k, p \in K \quad (4.6)$$

$$I_a = \sum_{p=M+1}^N \alpha_p \delta_{f_k f_p} P_t,$$

$$I_b = \sum_{p=1, p \neq k}^M \alpha_p \delta_{f_k f_p} P_t,$$

donde, I_a corresponde a la interferencia que percibe el AE en la señal transmitida por UE_k , provocada por los UE que no se encuentran dentro de su celda (interferencia intercelular), I_b es la interferencia que percibe el AE en la señal transmitida por el UE_k , provocada por los UE que se encuentran dentro de su celda (interferencia intracelular), $M = \{1, \dots, m\}$ es el número de UE presentes en la celda donde se encuentra el UE_k , f_k la frecuencia portadora asignada al UE_k presente en la red de análisis, f_p la frecuencia portadora asignada a cualquier UE presente en la red de análisis diferente a UE_k , P_t potencia de transmisión del UE y α la ganancia del sistema¹⁴ experimentada por el UE definida como,

$$\alpha = G_{a_{tx}} + G_{a_{rx}} - L[dB]. \quad (4.7)$$

η es la potencia de ruido térmico, que se calcula con la expresión 4.8.

$$\eta = -174 + 10 \log(BW) + NF + G_{a_{tx}} + G_{a_{rx}}, \quad (4.8)$$

donde, BW corresponde al ancho de banda (Hertz), NF la Figura de ruido establecida en 7 dB [33].

$$\delta_{f_k f_p} = \begin{cases} 1, & f_k - 2BW \leq f_p \leq f_k + 2BW \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}, \quad (4.9)$$

donde, $\delta_{f_n f_j}$ es una función a trozos que permite calcular la interferencia intra e inter celular solo cuando la frecuencia asignada a dos UE es igual o cercana.

En este caso una estrategia satisface las necesidades del jugador, si la utilidad obtenida al aplicar una estrategia determinada, iguala o supera un valor umbral (Γ_k), el cual corresponde a la SINR mínima establecida para un servicio. La cota superior dada por ϕ_k , será la SINR del UE que causa la menor interferencia posible sobre las comunicaciones de los demás UE del sistema.

4.3.1 Descripción del algoritmo

- Para el instante $t = 1$ se establece para cada UE un perfil de estrategias equiprobables de manera aleatoria, cuyo número de estrategias está limitado por el BW del servicio a prestar en la red. En el momento en que cada UE tiene su perfil de estrategias, este selecciona una estrategia que corresponde a su frecuencia de transmisión inicial a_k , la cual es el primer elemento del conjunto A_k .

¹⁴ Tiene en cuenta las ganancias y pérdidas que experimenta la señal en el trayecto entre el UE y el AE.

- Para cualquier instante de tiempo existe un vector de probabilidades $\pi_k(t) = \{\pi_1(t), \pi_2(t), \dots, \pi_i(t)\}$ que tiene correspondencia uno a uno con los elementos de A_k para el UE_k . Además, cada UE selecciona una frecuencia de transmisión a_k de acuerdo al elemento con mayor probabilidad¹⁵ del conjunto A_k .
- Para cualquier instante de tiempo, después de que cada UE ha seleccionado su frecuencia de transmisión, el AE determina la utilidad obtenida con la estrategia aplicada y envía esta información al UE para que actualice la probabilidad de sus estrategias, para ello, se procede a calcular el valor $b_{k,t}$ el cual se define mediante la expresión 4.10.

$$b_{k,t} = \frac{M_k + U_{k,t-1} - \Gamma_k}{2M_k}, \quad (4.10)$$

donde, M_k es el valor máximo que puede tomar la función de utilidad, $U_{k,t-1}$ corresponde a la utilidad obtenida en el instante anterior y Γ_k es la SINR mínima requerida por el UE_k para el servicio solicitado.

- Partiendo de los resultados obtenidos se actualiza la probabilidad para cada estrategia que conforma el conjunto A_n del UE_n , de acuerdo a la siguiente función:

$$\pi_k(t) = \begin{cases} g'(\pi_k(t-1)) & \text{si } \phi_k \geq u_k \geq \Gamma_k \\ g(\pi_k(t-1)) & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (4.11)$$

Las funciones g y g' se definen en las ecuaciones 4.12 y 4.13, respectivamente.

$$g'(\pi_k(t)) = \pi_k(t-1) + \lambda_{k,t} b_{k,t} \left(1_{\{a_k(t)=a_k\}} - \pi_k(t-1) \right), \quad (4.12)$$

$$g(\pi_k(t)) = \pi_k(t-1) - \lambda_{k,t} b_{k,t} \left(1_{\{a_k(t)=a_k\}} - \pi_k(t-1) \right), \quad (4.13)$$

donde, $\lambda_{k,t} = \frac{1}{0,1+t}$ es la tasa de aprendizaje para cada UE.

Las expresiones 4.12 y 4.13, aumentan o disminuyen respectivamente la probabilidad de la estrategia seleccionada, con lo cual si el jugador está satisfecho se mantiene la estrategia escogida por el UE y en caso contrario la probabilidad de esta estrategia disminuye, haciendo que el UE cambie de estrategia. En la Figura 4.5 se ilustra el diagrama de flujo del algoritmo de asignación de espectro basado en GT.

¹⁵ Corresponde a la probabilidad de que la estrategia sea elegida.

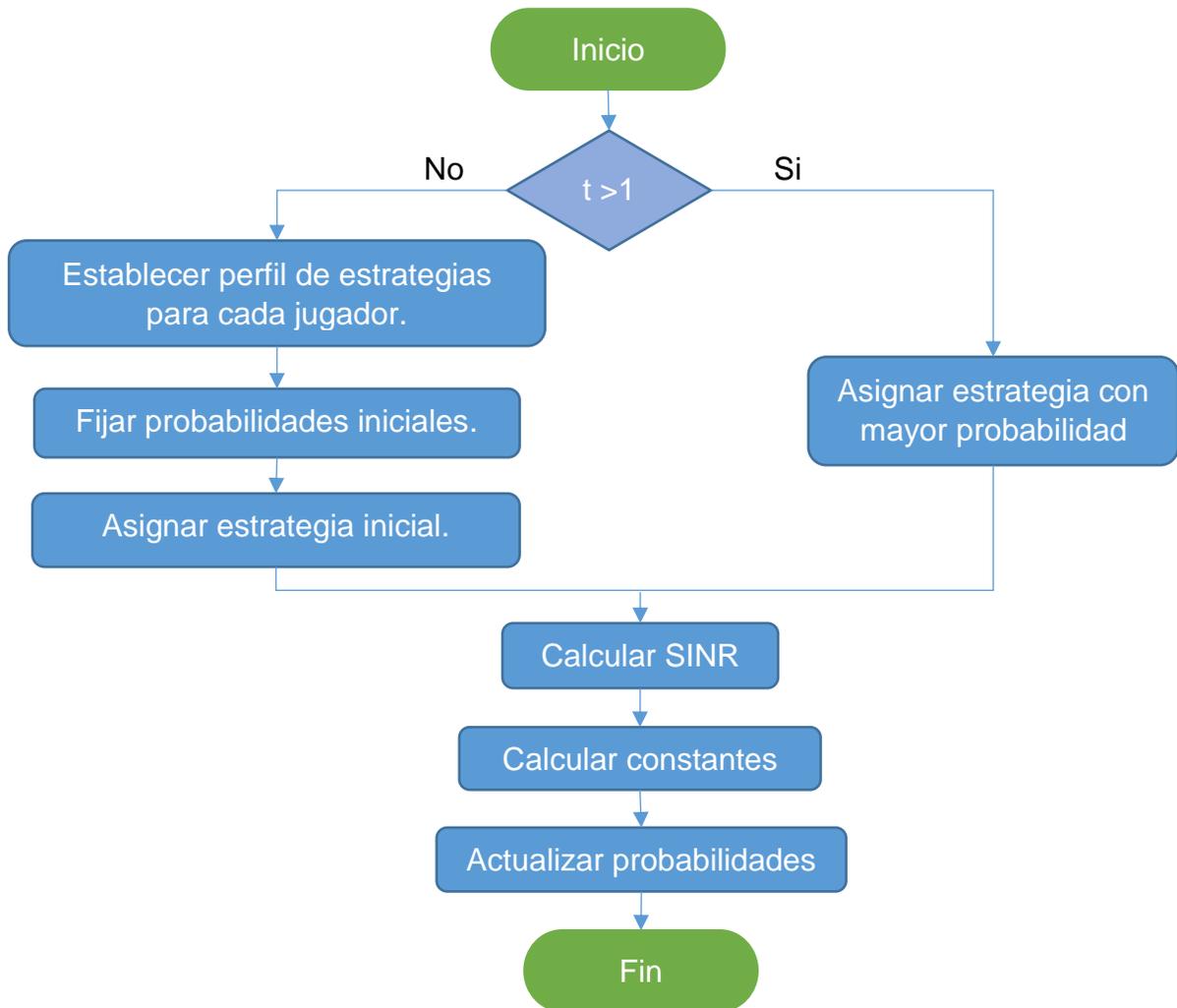


Figura 4.5. Diagrama de flujo del algoritmo de asignación de espectro.

Una vez obtenido el diagrama del algoritmo de asignación de espectro, se procede a la codificación del mismo en una herramienta de simulación, por lo cual es necesario escoger entre las diferentes plataformas existentes para el desarrollo del código y el análisis numérico.

4.4 SELECCIÓN DE HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

Debido a que existen varias herramientas para el análisis numérico, es necesario escoger la más adecuada para el desarrollo del trabajo, para ello se tienen en cuenta las necesidades del proyecto como son: operaciones y funciones matemáticas, elaboración de gráficas, compatibilidad entre versiones para facilitar su reutilización y modificación en trabajos futuros y que tenga un entorno de trabajo agradable. Para esto se analizaron dos opciones Scilab 5.5.2 y Matlab R 2014a las cuales cumplen con los requisitos de programación para el desarrollo del trabajo de grado.

La principal ventaja de Scilab es el hecho de ser de software libre y de código abierto, sin embargo teniendo en cuenta que la Universidad del Cauca tiene las licencias necesarias para trabajar con Matlab y que este software cuenta con mayor reconocimiento frente a la comunidad científica e investigativa, millones de ingenieros y científicos del mundo la usan para analizar y diseñar sistemas y productos [34], se escoge Matlab como la herramienta de simulación para el presente trabajo.

4.5 CODIFICACIÓN DEL SISTEMA

La codificación en Matlab se realiza mediante el uso de funciones para aumentar la funcionalidad del lenguaje Matlab, ya que son muy adecuadas para encapsular secuencias de órdenes que aparecen a menudo. Se establecen cuatro funciones, la primera denominada “Escenario”, que tiene como entrada el tipo de servicio prestado en la red (voz, datos, y voz y datos); la segunda denominada “Recursos”, cuyas salidas son el perfil inicial de estrategias de cada UE dependiendo del servicio requerido, la tercera llamada “calculoSINR”, la cual tiene como entrada las frecuencias asignadas a cada uno de los UE dentro de la red de análisis, y como salidas la SINR de cada UE medida en la BS, la interferencia co-canal y de canal adyacente y la interferencia total en el sistema; por último una denominada “Asignación” cuya entrada corresponde al número de iteraciones y sus variables de salida corresponden al perfil de estrategias de cada UE dependiendo del servicio requerido y la SINR de cada UE obtenida en cada iteración.

Además se emplean estructuras, lo que proporciona mayor flexibilidad y rapidez ya que permite manipular fácilmente los parámetros del sistema. Se definen cuatro estructuras básicas la primera denominada “MBS”, contiene información acerca de la ubicación de la MBS; la segunda llamada “FAP”, contiene información correspondiente a la ubicación de las FAP; una tercera estructura denominada “US”, que posee información de los UE dentro de la red de análisis, como su posición, distancia hacia la MBS y FAP, distancia hacia el AE asociado, una bandera que indica a qué tipo de AE está asociado (MBS o FAP), el AE al cual se encuentra asociado, tipo de servicio al cual desea acceder, ancho de banda, SINR objetivo, pérdidas obtenidas, interferencia y PIRE; y una cuarta estructura denominada “USout”, contiene información de los usuarios que se encuentran por fuera de la red de análisis, como su posición, distancias hacia la MBS y FAP.

4.6 PRUEBAS

En el siguiente capítulo se describen las características de los escenarios, casos de simulación definidos para la ejecución de las pruebas, y se presentan los resultados con su análisis correspondiente.

CAPITULO 5. SIMULACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se lleva a cabo la definición de un plan de pruebas que conlleva a la obtención y análisis de resultados.

El plan de pruebas especifica las variables a probar, como serán ejecutadas y los criterios que se tendrán en cuenta para su comienzo y finalización. El plan de pruebas utilizado, es el resultado de una adaptación realizada al descrito en [35].

Para el inicio de las pruebas se debe tener codificado completamente el algoritmo de asignación de espectro en la herramienta Matlab. Las etapas del plan de pruebas se describen a continuación.

5.1 DEFINICIÓN DE LAS LIMITACIONES DEL SISTEMA

Para obtener una definición exacta del sistema que se desea simular, se determina la interacción del sistema, las restricciones, las variables que interactúan dentro del mismo y las medidas que se van a utilizar para definir el sistema.

Las limitaciones en el sistema a simular, se mencionan a continuación:

- **Modelo de propagación:** el modelo de propagación utilizado no tiene en cuenta las alturas de los UE ni de las BS [36], tampoco las pérdidas por lluvia o gases ya que la frecuencia de operación del sistema es menor a 10 GHz.
- **Potencia:** debido a que en este trabajo no se desea realizar un control de potencia para mitigar la interferencia, sino una asignación de portadora de manera adecuada, todos los UE del sistema transmiten con la misma potencia hacia su BS, para que las señales transmitidas por ellos sean afectadas en mayor medida por la interferencia, y así analizar el peor de los casos; además la cobertura del sistema es limitada por este parámetro.
- **Asignación de frecuencia en el UL:** dado que la condición de interferencia es más crítica en UL que en DL, el algoritmo de asignación de espectro se implementa solo en este sentido de la comunicación.
- **Movilidad:** el sistema diseñado considera a los UE estáticos dentro del escenario de simulación, sin embargo la movilidad se tiene en cuenta en cálculo del *Throughput*, ya que en el modelo de propagación utilizado para ambientes interiores, exteriores y peatonales, se involucra una variable aleatoria con distribución normal y desviación estándar de 5 dB, que simula la aleatoriedad de un canal móvil en cada iteración.

- Traspasos: debido a que en el sistema los UE están fijos en el escenario de simulación, se evita el proceso de traspasos, agregando simplicidad al modelado del sistema y disminuyendo la lógica requerida para la implementación del algoritmo.
- Reutilización de frecuencias: en el sistema diseñado una misma portadora puede ser utilizada por dos o más UE ubicados en la misma o en distintas celdas, esto para analizar el peor de los casos, es decir cuando se presenta mayor interferencia.

5.2 DEFINICIÓN DE ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Los escenarios escogidos y sus características se muestran en la Tabla 5.1. Se considera un sistema de comunicaciones con un área de 1.4 Km^2 , en el que se tiene una MBS de 500 metros de radio de cobertura, 600 UE y 150 o 100 FAP de 60 metros de radio de cobertura, lo cual genera dos escenarios de simulación. Los UE se distribuyen en el escenario de manera aleatoria siguiendo una distribución uniforme de media 600 y varianza igual a 120000.

Tabla 5.1. Escenarios de simulación.

Escenarios de simulación			
Escenario 1		Escenario 2	
Área	1.4 Km ²	Área	1.4 Km ²
Número de UE	600	Número de UE	600
Número de FAP	150	Número de FAP	100
Radio de cobertura MBS	500 m	Radio de cobertura MBS	500 m
Radio de cobertura FAP	60 m	Radio de cobertura FAP	60 m

5.3 DEFINICIÓN DE CASOS DE SIMULACIÓN

Se definen los casos de simulación para la ejecución de las pruebas, en los cuales se implementa un algoritmo de asignación de espectro basado en GT y otro sin GT.

Para analizar la capacidad del sistema, se definen tres casos de simulación, especificados en la Tabla 5.2, en los cuales se prestan servicios diferentes, es decir, el valor de la SINR objetivo y BW varia para cada UE en cada caso.

Tabla 5.2. Casos de simulación.

Casos de simulación		
Caso 1	Caso 2	Caso 3
<ul style="list-style-type: none"> • Servicio de voz con BW de 100 KHz. • Servicio de voz con BW de 200 KHz. 	<ul style="list-style-type: none"> • Servicio de datos con BW de 200 KHz. • Servicio de datos con BW de 300 KHz. 	<ul style="list-style-type: none"> • Servicio de voz y datos con BW de 100 y 200 KHz. • Servicio de voz y datos con BW de 200 y 300 KHz.

5.4 DEFINICIÓN DE DATOS Y GRÁFICAS DE SALIDA

La Tabla 5.3 presenta las características técnicas de los escenarios de simulación propuestos.

Tabla 5.3. Características técnicas de los escenarios de simulación [37].

Característica	Valor
Potencia del UE	23 dBm
Servicio implementado	Voz y datos
Requerimiento de SINR	-7 dB y -4dB
Banda de frecuencias	Banda 4 (1710 MHz - 1712 MHz)
Frecuencias UE fuera de la red de análisis	Valores de frecuencias aleatorios, entre 1710 MHz y 1712 MHz
Ganancia de antena del AE	15.86 dB
Ganancia de antena del UE	-2.14 dB
Figura de Ruido	7 dB

Es importante definir los datos de salida requeridos para realizar un análisis adecuado.

En este trabajo los datos de salida del algoritmo son: distancia hacia el AE que está conectado, perfil de estrategias con su respectiva probabilidad y SINR alcanzada por cada UE en la última iteración.

Las gráficas de salida del sistema muestran como varían los siguientes parámetros respecto al número de iteraciones: SINR de cada UE, probabilidad de las estrategias de cada UE, interferencia adyacente, co-canal y total que experimenta la señal enviada por el UE, *Throughput* del UE, *Throughput* alcanzado en cada AE, y *Throughput* de la red.

5.5 EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS

Para la ejecución de las pruebas se realiza una interfaz gráfica, que permite escoger el tipo de servicio a prestar en la red, el número de iteraciones y el mecanismo de asignación de espectro, muestra el número total de usuarios dentro de la red a analizar, además cuantos y cuales usuarios fueron atendidos en cada uno de los casos de simulación. Dicha interfaz se muestra en el apéndice A.

Para analizar el *Throughput* de una red heterogénea al implementar un algoritmo de asignación de espectro basado en GT, inicialmente se realizan las pruebas utilizando dicho algoritmo y posteriormente se ejecutan sin tener en cuenta el algoritmo basado en GT, cuyos resultados se especifican en el apéndice A.

A continuación se presentan las pruebas realizadas con la implementación del algoritmo basado en GT y la asignación sin GT, realizando este proceso mil veces. Finalmente los datos de salida se encuentran consignados en la Tabla 5.9.

5.5.1 Escenario 1:150 FAP

En cada uno de los escenarios de simulación, como se observa en la figura 5.1, el triángulo verde representa la ubicación de la MBS, los triángulos azules representan los FAP y los puntos rojos y grises, corresponden a los UE dentro y fuera de la red analizada respectivamente. Los ejes X y Y corresponden a la distancia medida en metros.

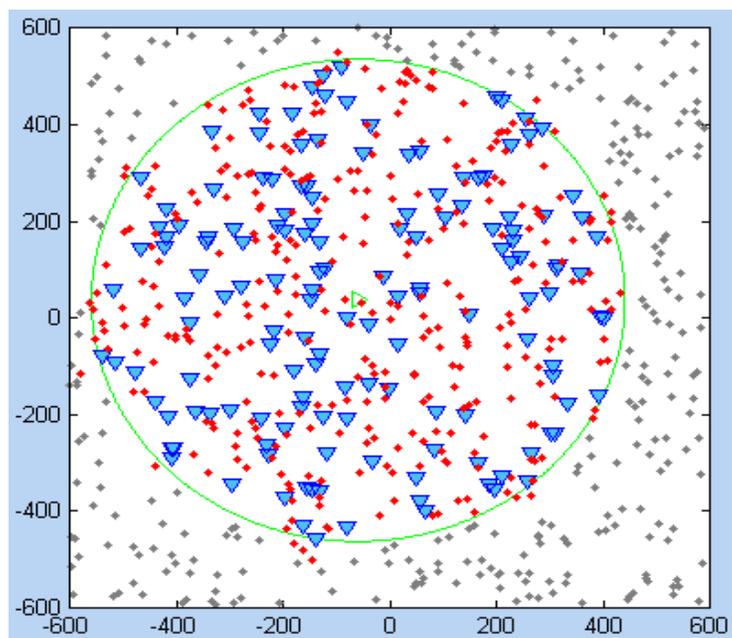
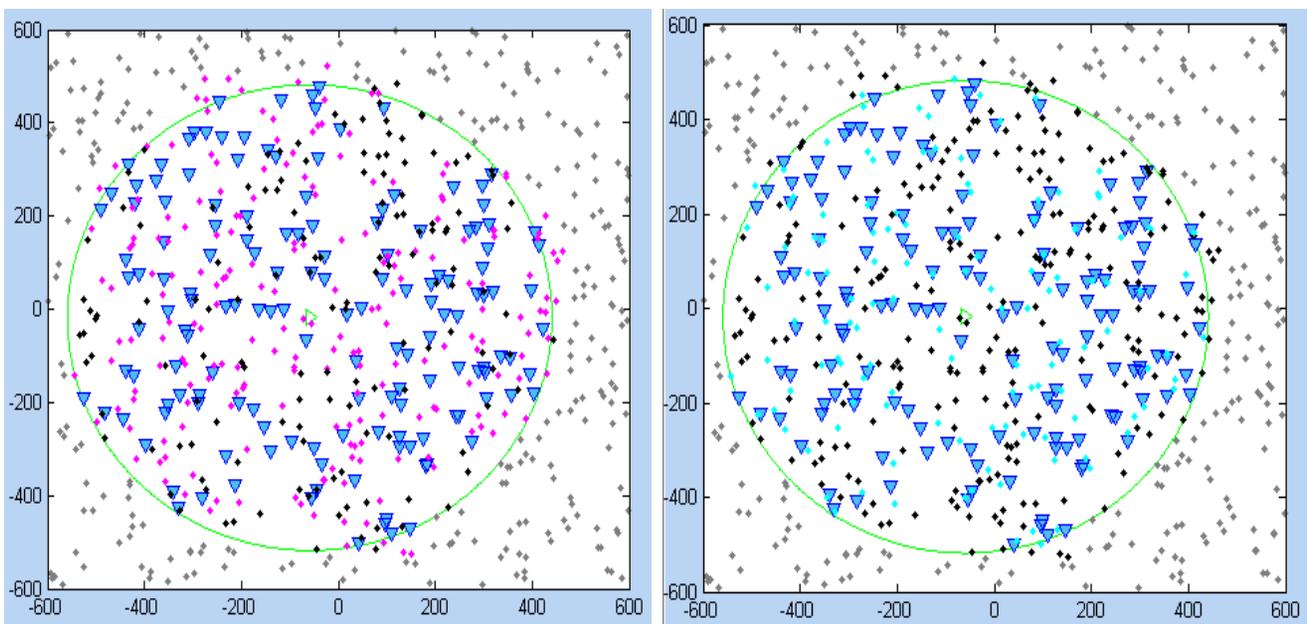


Figura 5.1. Escenario de simulación.

- **Caso 1: voz**

En la Figura 5.2a se muestra el resultado de la implementación del algoritmo de asignación de espectro basado en GT, donde los puntos violeta corresponden a los UE cuyo requerimiento de SINR fue satisfecho, mientras que los puntos negros representan a los UE que no lograron conectarse al sistema.

La Figura 5.2b muestra el resultado de la implementación de asignación de espectro sin GT, donde los puntos azul claro corresponden a los UE cuyo requerimiento de SINR fue satisfecho, mientras que los puntos negros representan a los UE que no lograron conectarse al sistema.



a. Resultados obtenidos con GT

b. Resultados obtenidos sin GT

Figura 5.2. Resultados obtenidos, escenario 1 – voz.

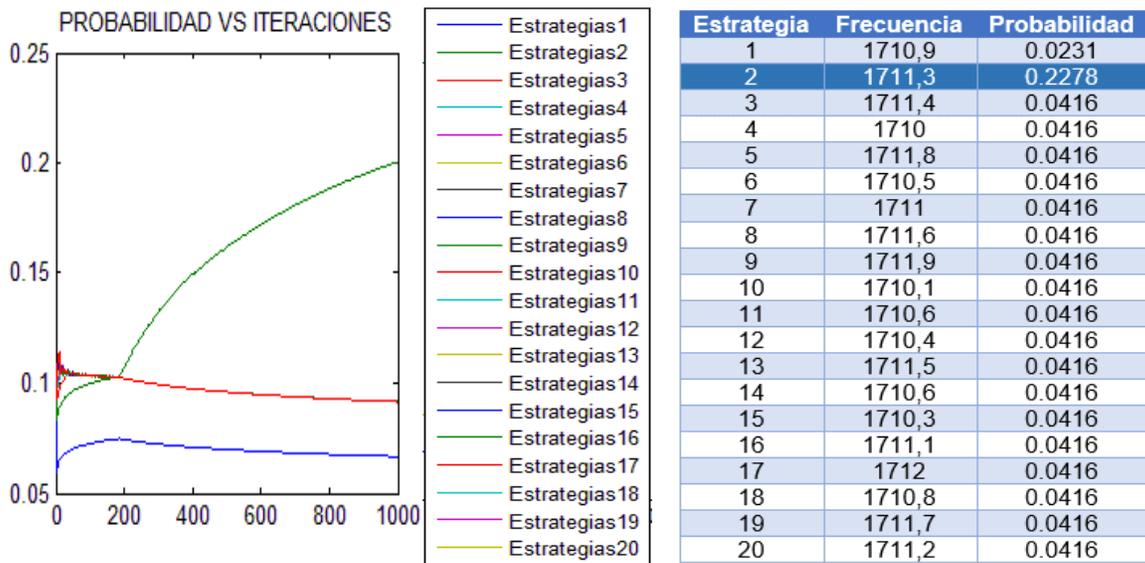
En la Figura 5.2b, de los 350 UE que se encuentran al interior de la red de análisis, 126 son atendidos satisfactoriamente, lo que corresponde a un 36% de la totalidad de UE. En la Figura 5.2a, de los 350 UE que se encuentran al interior de la red de análisis, 210 son atendidos satisfactoriamente, lo que corresponde a un 60% de la totalidad de UE, esto evidencia que la aplicación del algoritmo de asignación de espectro aumenta el número de UE satisfechos, aproximadamente en un 24%, en comparación con las simulaciones sin aplicar GT.

De los 210 UE atendidos con GT, 7 son MUE y 203 son FUE, es decir que 96.66% de los UE atendidos corresponden a FUE. Debido a que en el Enlace de Subida

(UL, *Up Link*) la cobertura se ve limitada por la potencia de transmisión de los UE, las distancias grandes implican que el UE tenga dificultades para conectarse al AE o incluso nunca pueda conectarse, lo cual ocurre con la mayoría de MUE separados a una distancia mayor de 128 metros de la MBS, lo que no sucede con la mayoría de FUE cuya distancia máxima de separación a su FAP es de 60 metros.

La Figura 5.3a muestra la variación de la probabilidad de cada estrategia para un FUE que se encuentra a 20 metros del FAP y su perfil de estrategias, donde su estrategia inicial corresponde a escoger la frecuencia de 1710.9 MHz, con la cual como se observa en la Figura 5.3c, obtiene una SINR que varía fuera de los límites de la función de satisfacción, razón por la cual el algoritmo hace que la probabilidad de dicha estrategia disminuya y aumente la probabilidad de las demás.

Al cabo de 200 iteraciones, el algoritmo asigna una frecuencia de 1711.3 MHz con la cual, la interferencia percibida en el AE logra estabilizarse, tal y como se observa en la Figura 5.3b, permitiéndole cumplir con la SINR objetivo y por ende estar satisfecho. La interferencia que percibe el AE en la señal enviada por el UE es de tipo co-canal y canal adyacente.



a. Variación de probabilidad.

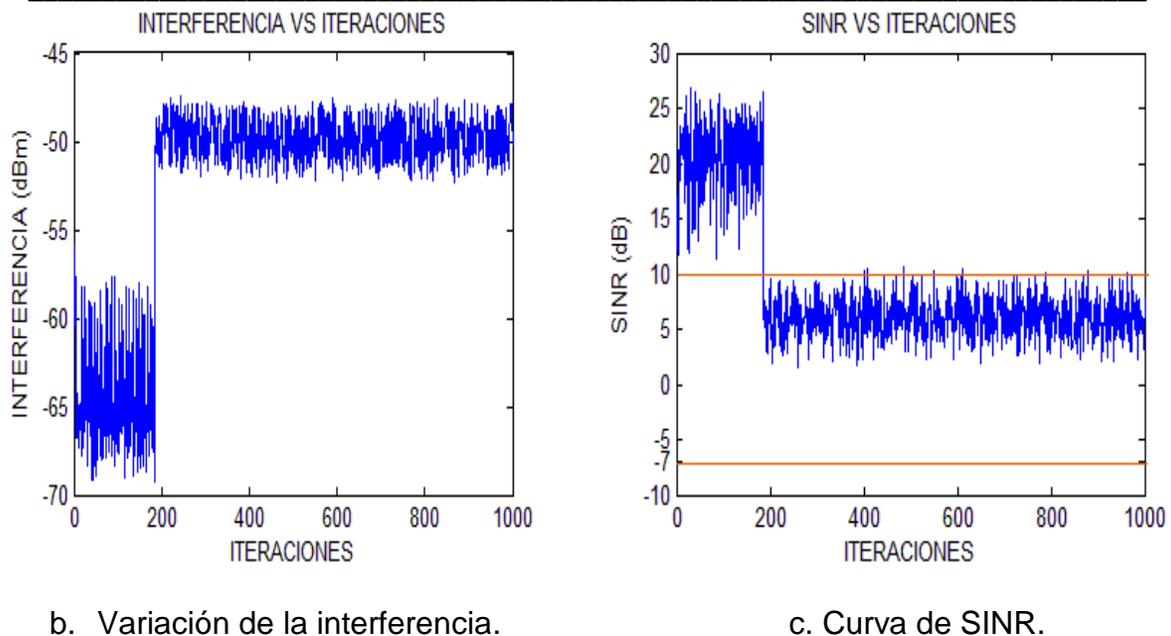


Figura 5.3. Resultados de un FUE a 20.02 metros del FAP.

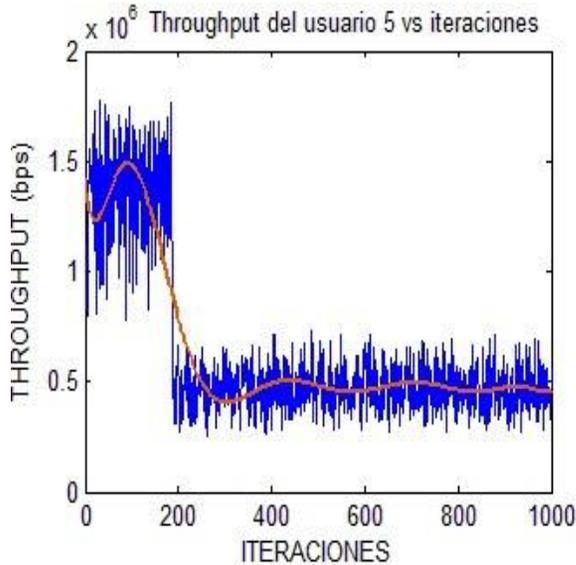
En la Figura 5.4 se muestran las curvas de *Throughput* del UE 5 y del FAP al que pertenece cuando se aplica GT y cuando se realiza una asignación de espectro aleatoria.

En la Figura 5.4a se observa que el *Throughput* de un UE mejora o empeora de acuerdo al nivel de SINR obtenido, en este caso en las primeras 200 iteraciones el nivel de SINR está por encima del umbral, generando un *Throughput* de aproximadamente 14 Mbps, pero debido a que el algoritmo busca realizar la asignación de espectro más “justa” posible, hace que el UE cambie de estrategia hasta que encuentre una que genere un valor de SINR que este entre los límites de la función de utilidad, y no ocasione altos niveles de interferencia en la señal transmitida por los UE cercanos, por consiguiente el *Throughput* alcanzado por el UE disminuye, logrando una estabilidad aproximadamente en 0.5 Mbps.

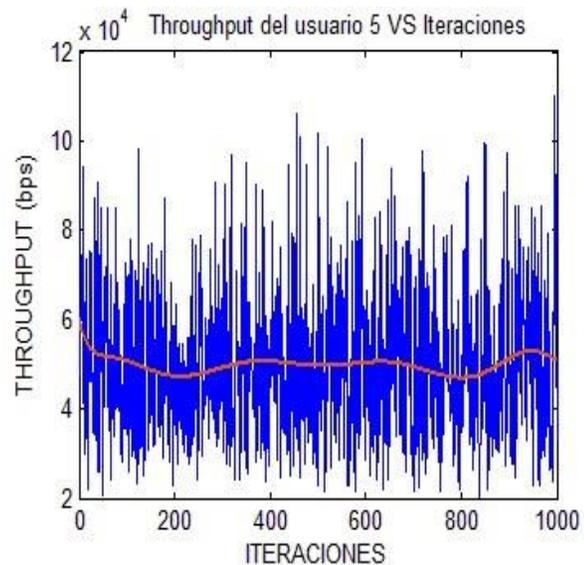
En la Figura 5.4b el *Throughput* obtenido sin aplicar GT tiene un valor medio de 49 Kbps debido a que el valor de frecuencia asignado al UE siempre produce una alta interferencia, ocasionando que nunca logre el nivel de SINR objetivo, ya que el algoritmo no le permite aprender qué frecuencias disponibles le permiten conectarse al servicio requerido, y tener menos percepción de interferencia con los UE dentro y fuera de su celda.

En la Figura 5.4c se muestra la curva de *Throughput* obtenida en el AE 25, el cual brinda servicio a 2 UE, de los cuales todos logran conectarse y por ende en la celda se obtiene un *Throughput* medio de aproximadamente 0.86 Mbps, a comparación

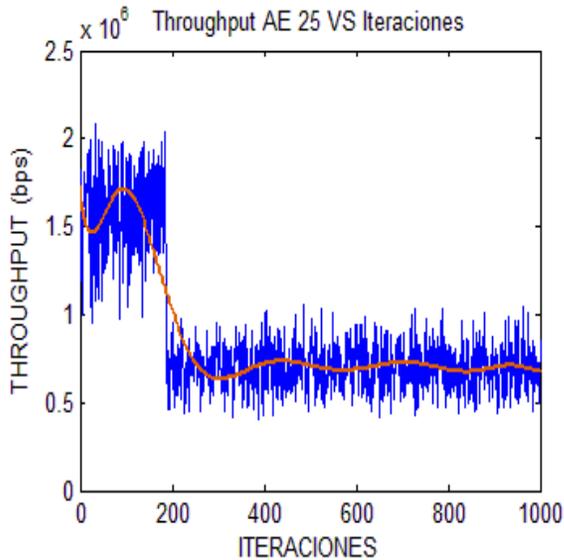
del *Throughput* obtenido en el AE 25 cuando no se utiliza GT, que se presenta en la Figura 5.4d, cuyo valor medio es de aproximadamente 0.44 Mbps, ya que uno de los UE dentro de esta celda nunca logró conectarse generando una reducción en el *Throughput* final obtenido.



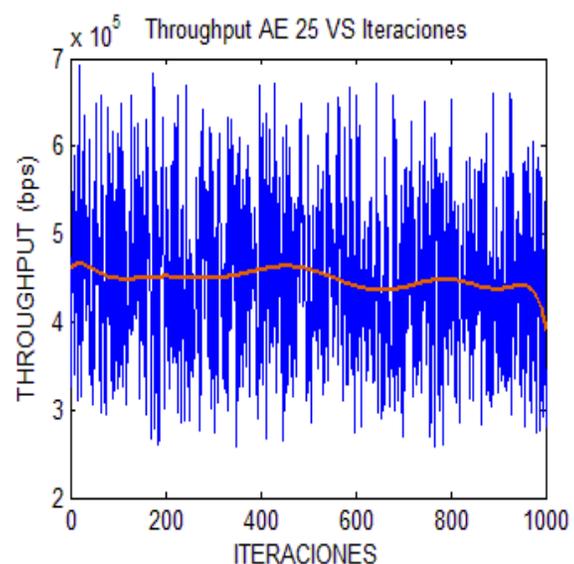
a. Curva de *Throughput* UE con GT.



b. Curva de *Throughput* UE sin GT.



c. Curva de *Throughput* AE con GT



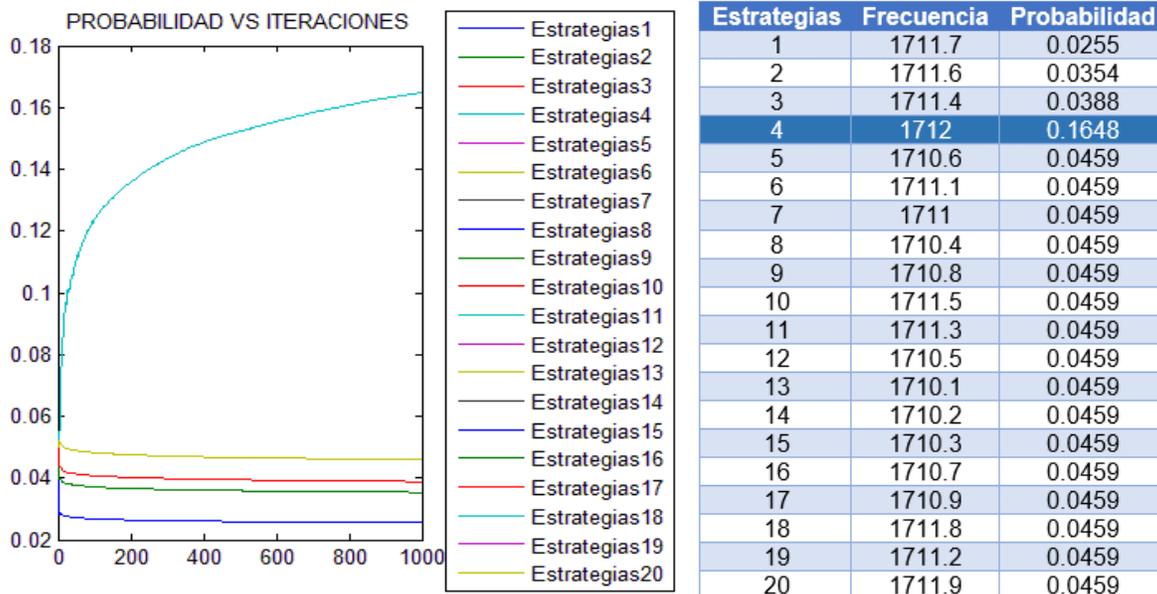
d. Curva de *Throughput* AE sin GT

Figura 5.4. Curvas de *Throughput* obtenidas.

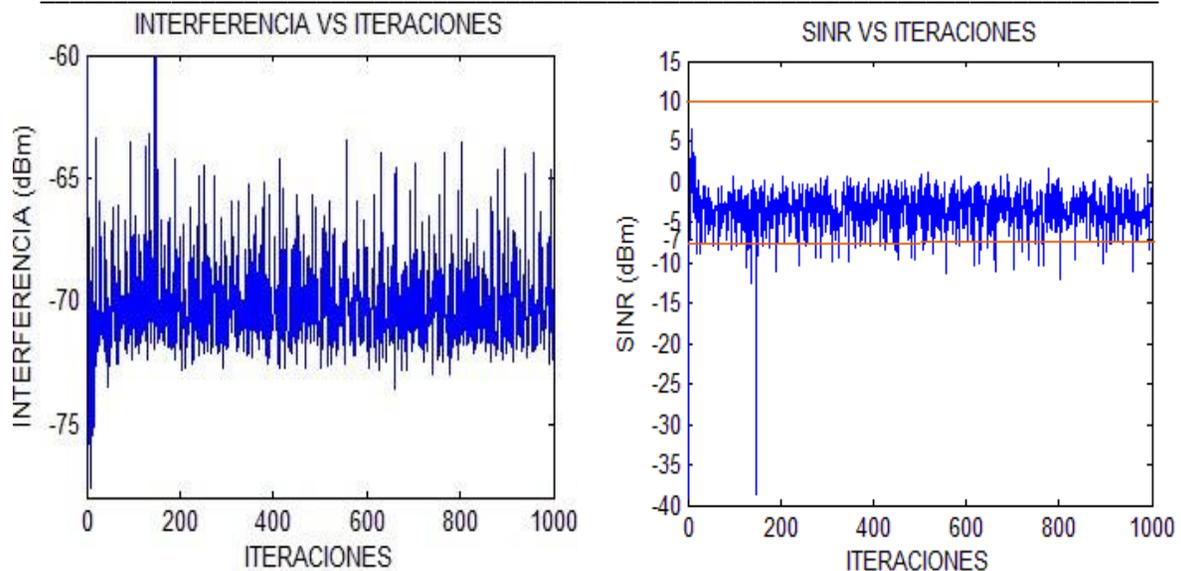
La Figura 5.5a muestra la variación de la probabilidad de cada estrategia para un MUE que se encuentra a 111.4 metros de la MBS y su perfil de estrategias, donde

su estrategia inicial corresponde a escoger la frecuencia de 1711.7 MHz, que como se ve en la Figura 5.5c, obtiene un nivel de SINR por debajo del límite establecido, por lo cual la probabilidad de esta estrategia disminuye y la de las demás aumenta, haciendo que cambie de estrategia y finalmente escoja la frecuencia de 1712 MHz, cuya probabilidad tiene una tendencia creciente y estable, esto sucede porque la tasa de aprendizaje del algoritmo se basa en el principio de WoLF, con la primera estrategia el jugador obtiene una recompensa negativa por lo cual se adapta rápidamente, igual que con la segunda y tercera estrategia, en cambio con la cuarta estrategia empieza a obtener recompensas positivas, por lo que aprende cautelosamente. Por ello se infiere que con el paso del tiempo el algoritmo hace que los cambios de probabilidad sean menos bruscos.

En la Figura 5.5b se observa la variación de la interferencia, la cual nunca se estabiliza en un valor, las posibles causas de este comportamiento son la potencia de transmisión y distancia entre el MUE y la MBS, provocando que el nivel de la señal recibida sea muy débil y cualquier cambio de frecuencia en los UE cercanos produzca alta variación en los niveles de interferencia percibidos afectando los niveles de SINR obtenidos.



a. Curva de Probabilidades.



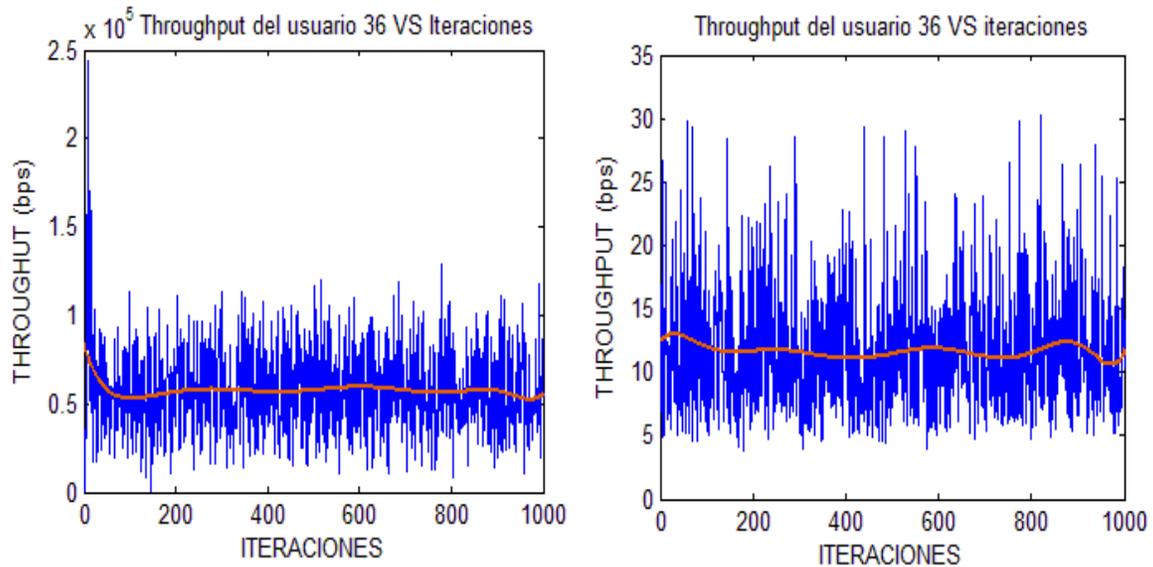
b. Variación de la interferencia.

c. Curva de SINR.

Figura 5.5. Resultados de un MUE a 111.4 metros de la MBS.

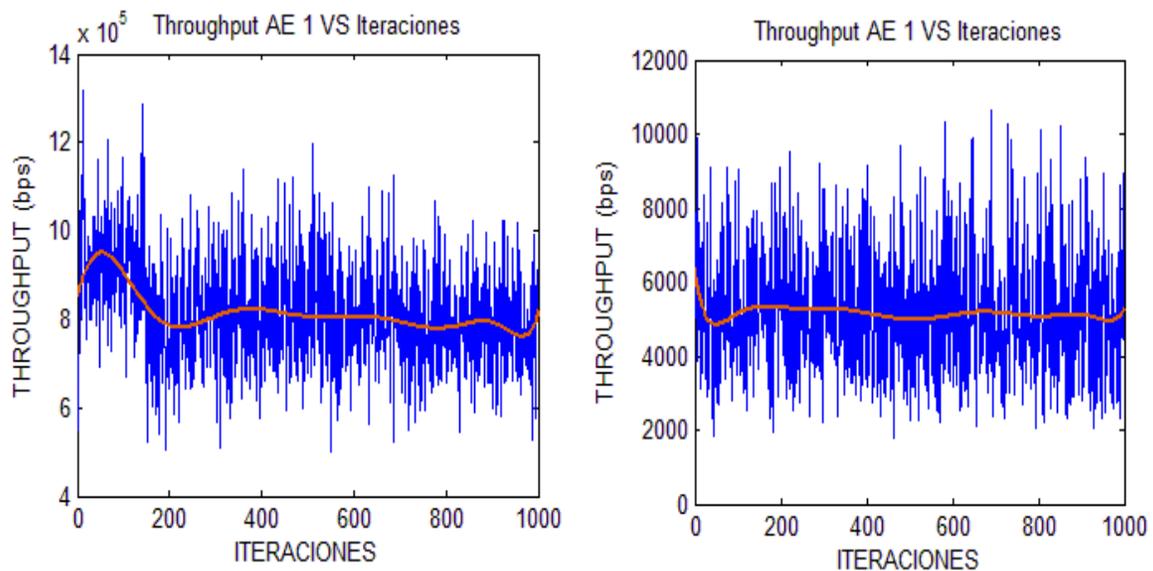
En las Figuras 5.6a y 5.6b se muestra el *Throughput* obtenido por el MUE 36 cuando en la red se utiliza el algoritmo de asignación de espectro basado en GT y sin GT respectivamente, en el primer caso se observa una mejora significativa en el *Throughput* del UE, puesto que cuando se implementa GT a pesar de la distancia a la que se encuentra de la MBS y su limitada potencia de transmisión, este logra encontrar una frecuencia que le permite alcanzar la mayoría de veces la SINR objetivo, lo que no sucede cuando no se implementa GT, donde el UE obtiene una SINR muy por debajo del límite establecido, debido a que la interferencia percibida es mucho mayor reflejándose en los bajos niveles de *Throughput* alcanzados.

En las Figuras 5.6c y 5.6d de igual manera se obtiene un mayor *Throughput* en la MBS cuando se implementa GT donde la media corresponde a 0.81 Mbps, en el cual el *Throughput* alcanzado depende solo de los 7 MUE conectados, mientras que cuando no se implementa GT el *Throughput* medio alcanzado es de 5.11 Kbps, puesto que en este caso solo 1 de los MUE logra conectarse a lo sumo la mitad de las iteraciones.



a. Curva de *Throughput* UE con GT.

b. Curva de *Throughput* UE sin GT.



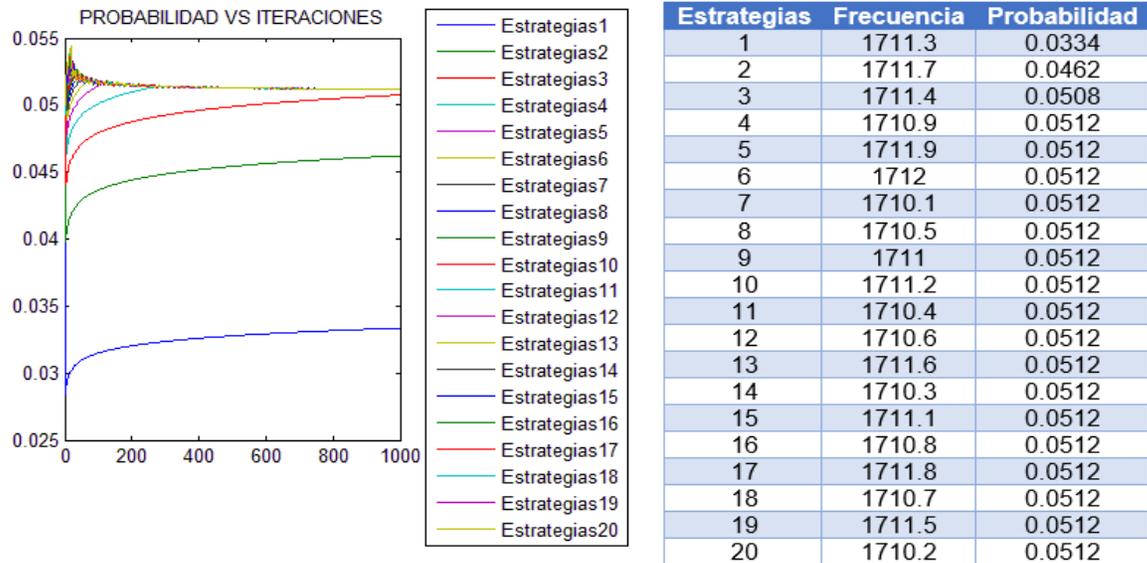
c. Curva de *Throughput* AE con GT

d. Curva de *Throughput* AE sin GT.

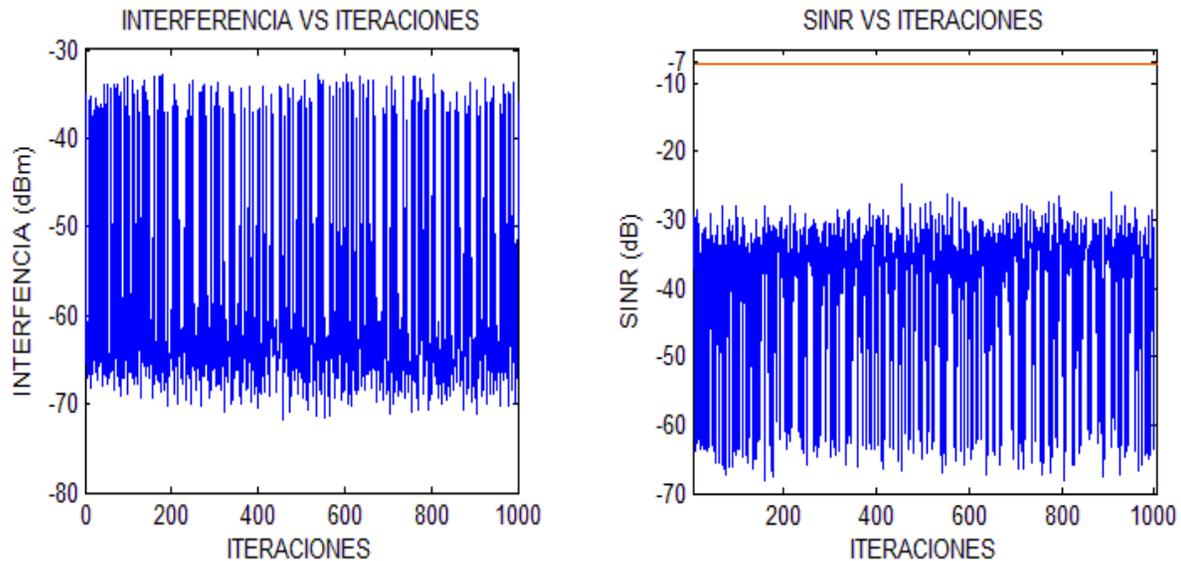
Figura 5.6. Curvas de *Throughput* obtenido.

La Figura 5.7a, muestra la variación de la probabilidad de cada estrategia de un UE ubicado a una distancia de 475.38 metros de la MBS y su perfil de estrategias. Inicialmente el UE escoge la estrategia 1 que corresponde a la frecuencia 1711.3 MHz, con la cual no alcanza la SINR objetivo por lo que disminuye su probabilidad y aumenta la de las demás estrategias, conforme avanzan las iteraciones todas las estrategias tienden a tener el mismo valor en su probabilidad, ya que el UE no logra conectarse con ninguna de ellas debido a que su potencia de transmisión no es

suficiente para que la señal llegue a la MBS, por lo que el algoritmo de asignación de espectro está limitado por la potencia de transmisión del UE, además como se observa en la Figura 5.7b a pesar de probar todas las estrategias posibles, nunca encuentra una frecuencia con la que obtenga un nivel de interferencia bajo, que le permita alcanzar una utilidad por encima de la SINR objetivo como se observa en la Figura 5.7c.



a. Curva de probabilidad.

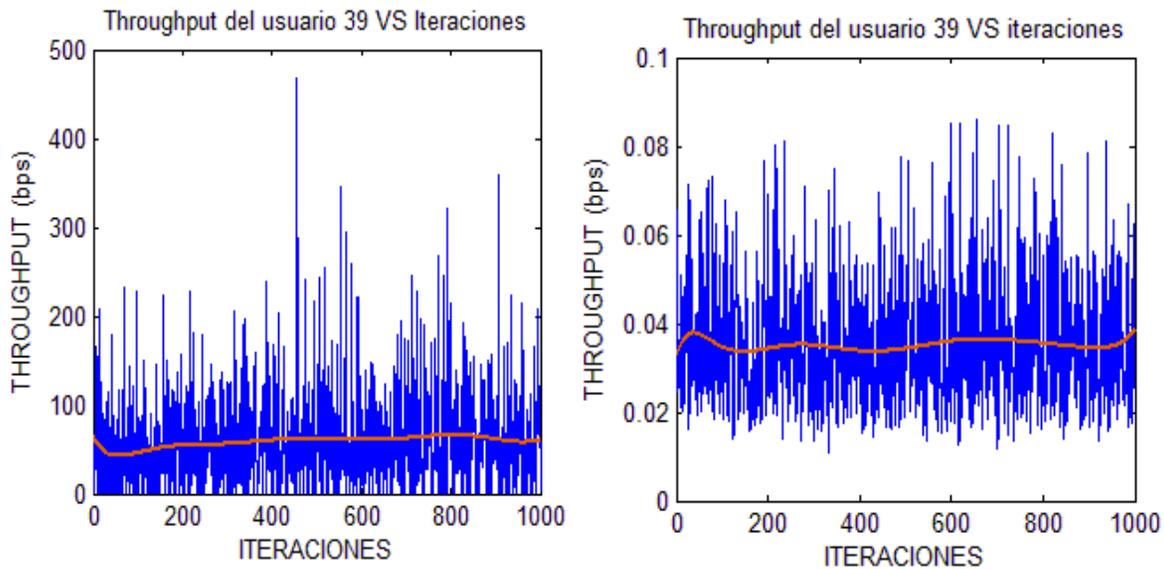


b. Variación de la interferencia.

c. Curva de SINR.

Figura 5.7. Resultados de un MUE a 475.38 metros de la MBS.

En la Figura 5.8 se evidencian las curvas de *Throughput* de un MUE cuando se aplica el algoritmo basado en GT, que corresponde al valor medio de 58.11 bps y sin GT de 0.03 bps, a pesar de que el UE no logra alcanzar el nivel de SINR objetivo para conectarse, se observa que este es superior al obtenido sin GT, debido a que la interferencia percibida es menor. De los 46 UE presentes en la MBS, 39 tienen un comportamiento similar al anterior, es decir, después de un tiempo cambian constantemente de estrategias, lo cual provoca que en algunos UE que si logran conectarse y han escogido una estrategia, no logren una estabilidad entre los límites de SINR establecidos.

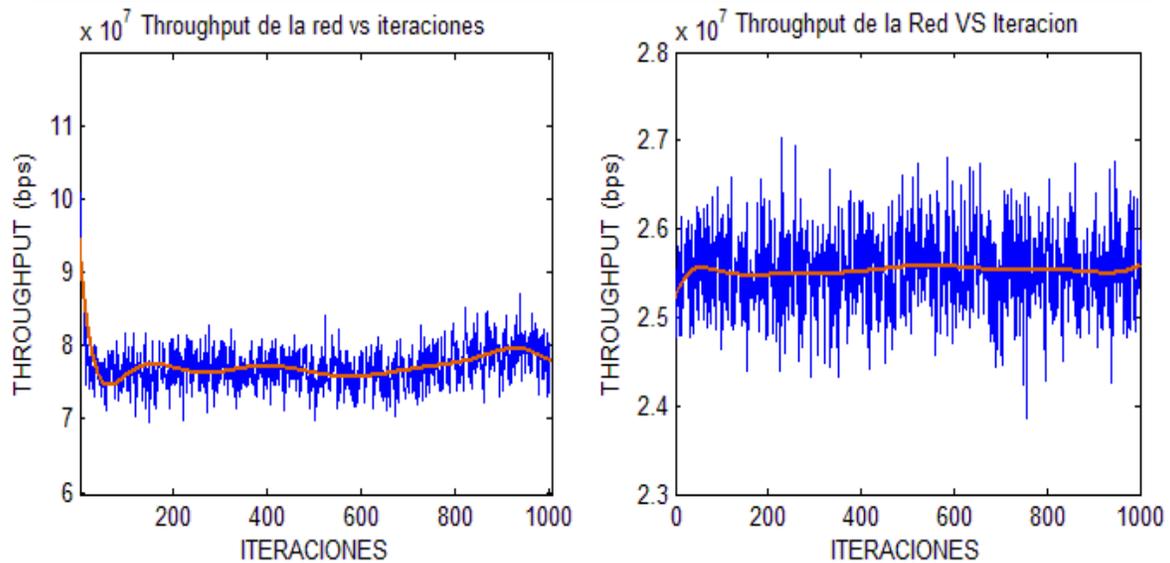


a. Curva de *Throughput* UE con GT.

b. Curva de *Throughput* UE sin GT.

Figura 5.8. Curvas de *Throughput* de un MUE.

En la Figura 5.9a se observa que el *Throughput* de la red cuando se implementa GT inicialmente presenta una caída y después varía dentro de unos límites, esto se debe a que algunos UE que se conectan inicialmente presentan una SINR elevada, pero el algoritmo hace que esta disminuya para lograr que más UE logren alcanzar la SINR objetivo, ya que cuando se implementa el algoritmo se desea que cada vez más UE estén satisfechos, y con ello se obtenga un nivel estable de *Throughput* en la red. Cuando se implementa GT el *Throughput* medio es de 77.2 Mbps a diferencia del método sin GT que obtiene 25.5 Mbps.



a. Curva de *Throughput* red con GT. b. Curva de *Throughput* de red sin GT.

Figura 5.9. Curvas de *Throughput* de la red.

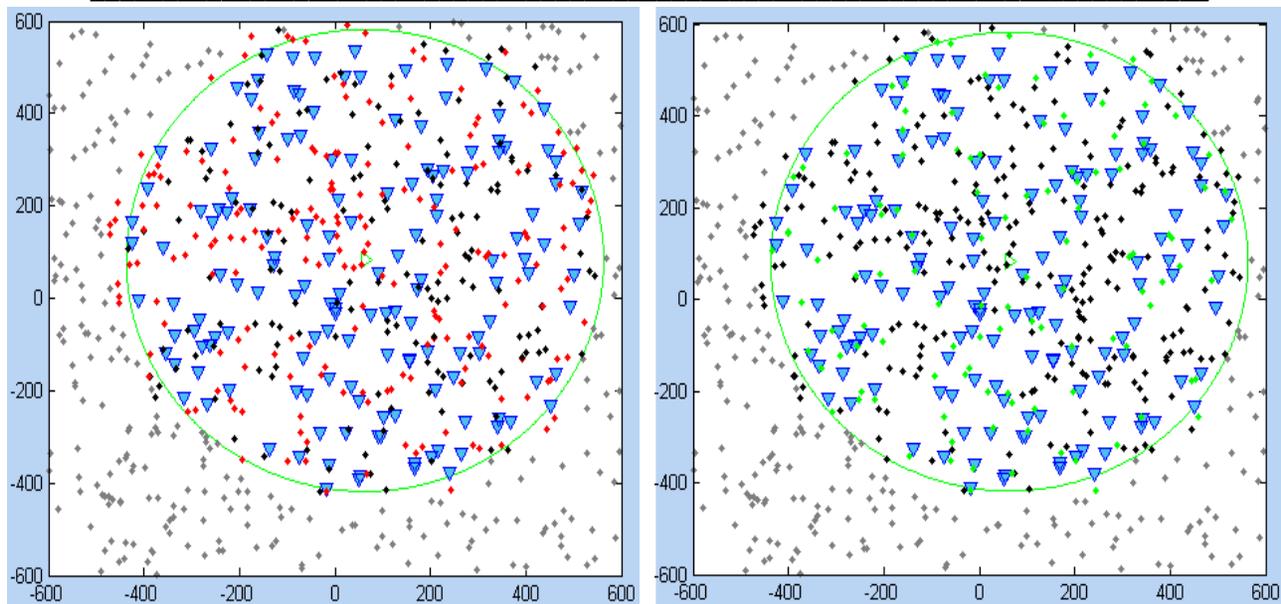
- **Caso 2: Datos**

En la Figura 5.10a se muestra el resultado de la implementación del algoritmo de asignación de espectro basado en GT, donde los puntos rojos en este caso corresponden a los UE cuyo requerimiento de SINR fue satisfecho, mientras que los puntos negros representan a los UE que no lograron conectarse al sistema.

En la Figura 5.10b se muestra el resultado de la implementación de asignación sin GT, donde los puntos verdes corresponden a los UE cuyo requerimiento de SINR fue satisfecho, mientras que los puntos negros representan a los UE que no lograron conectarse al sistema.

En la Figura 5.10b, de los 357 UE que se encuentran al interior de la red de análisis, 115 logran conectarse, lo que corresponde a un 32.21% de la totalidad de UE. En la Figura 5.10a, del total de UE que se encuentran al interior de la red de análisis, 202 logran conectarse, lo que corresponde a un 56.58% de la totalidad de UE, esto evidencia que la aplicación del algoritmo de asignación de espectro también aumenta el número de UE satisfechos en el caso de datos, aproximadamente en un 24.37%, en comparación con las simulaciones sin aplicar GT.

De los 202 UE que logran conectarse, solo 4 de los 36 MUE logran conectarse debido a su potencia de transmisión. El MUE más lejano que logra conectarse, se encuentra a una distancia de 37,65 metros de la MBS.



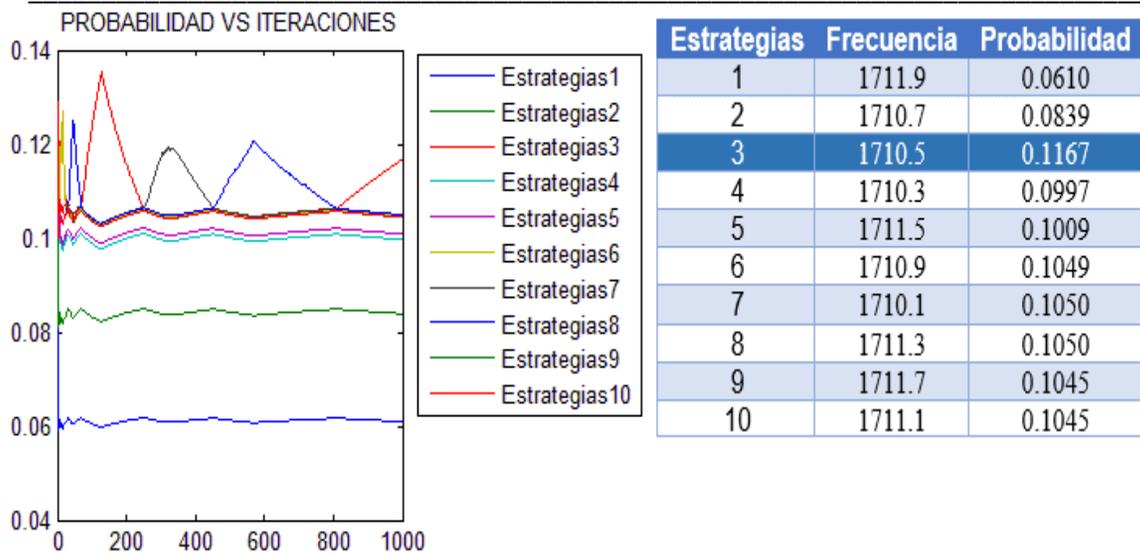
a. Resultados obtenidos con GT

b. resultados obtenidos sin GT

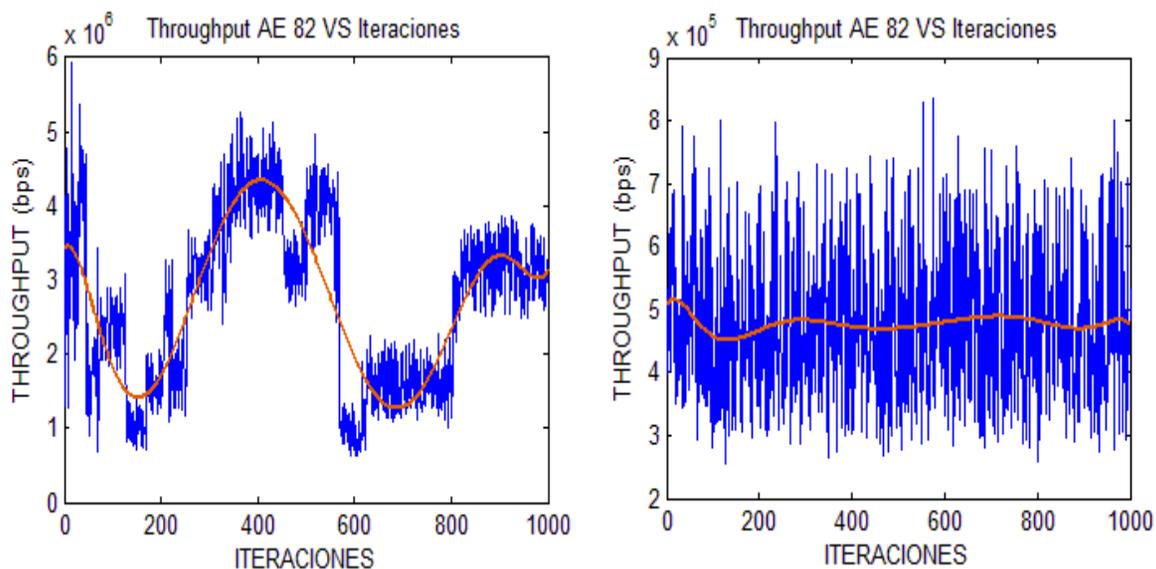
Figura 5.10. Resultados obtenidos, escenario 1 – datos.

La Figura 5.11a muestra la variación de las probabilidad de las estrategias del UE 75 cuando desea acceder al servicio de datos y su perfil de estrategias. Inicialmente el FUE escoge la frecuencia de 1711.9 MHz, con la cual no cumple con el valor de SINR requerido de -4 dB para acceder al servicio, por lo que la probabilidad de esta estrategia disminuye y aumenta la de las demás, el FUE continua escogiendo la estrategia de mayor probabilidad; con varias estrategias logra conectarse, pero debido a que el nivel de interferencia percibido por el AE no logra estabilizarse, el UE cambia nuevamente de estrategia, hasta que al cabo de 800 iteraciones, modifica su estrategia escogida a 1710.5 MHz, la cual le permite tener una SINR dentro de los límites establecidos en las ultimas iteraciones. La relación entre las curvas de interferencia, SINR obtenida por el UE y probabilidades de las estrategias es similar al comportamiento obtenido en el caso 1.

Las Figuras 5.11b y 5.11c muestran el *Throughput* obtenido en el AE cuando se aplica el algoritmo de asignación de espectro basado en GT y la asignación aleatoria, respectivamente. En esta celda se encuentran 6 FUE, de los cuales 5 logran conectarse cuando se aplica GT, a comparación de la red donde no se aplica, en la cual solo uno logra conectarse, por ello el *Throughput* alcanzado en la celda con GT supera al obtenido sin GT, siendo los valores medios 2.69 Mbps y 0.47 Mbps respectivamente.



a. Curva de probabilidad



b. Curva de *Throughput* AE con GT

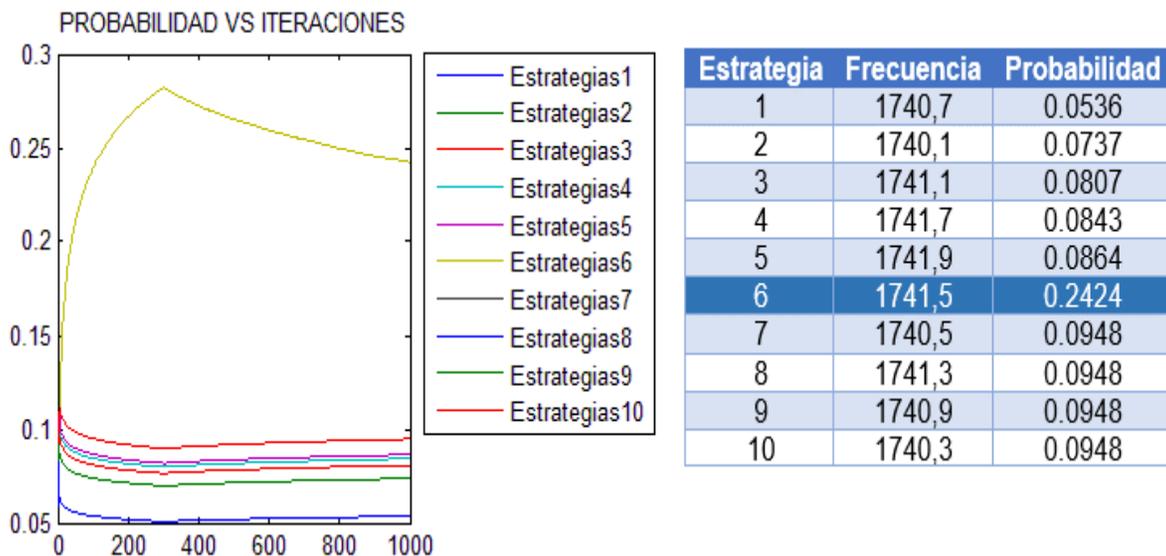
c. Curva de *Throughput* AE sin GT

Figura 5.11. Resultados de un FUE ubicado a 17.11 metros del FAP.

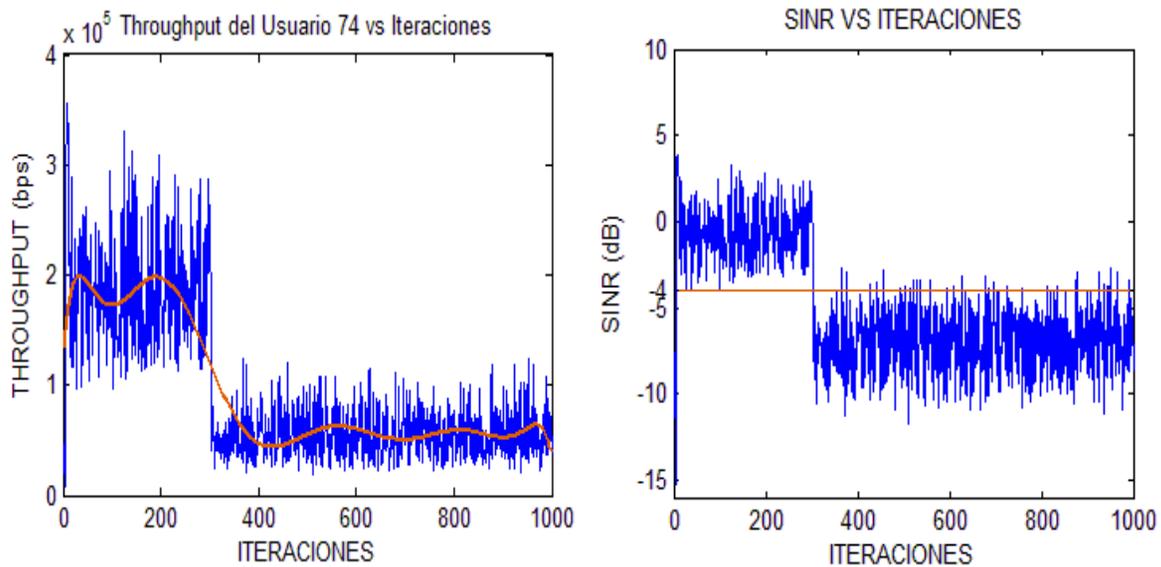
La Figura 5.12a, expone la variación de la probabilidad de las estrategias del UE 74 y su perfil de estrategias, en este caso la estrategia inicial del UE corresponde a la frecuencia de 1740.7 MHz, con la cual alcanza la SINR objetivo en las primeras iteraciones, por ello la probabilidad de esta estrategia aumenta y la de las demás disminuye, el AE empieza a experimentar mayor interferencia cuando el UE utiliza esta frecuencia debido a los cambios de estrategia de los demás jugadores, generando que la SINR obtenida este por fuera de los límites establecidos y por ello la probabilidad de esta estrategia empieza a disminuir.

Además se observa que el paso de las iteraciones influye en la tasa de aprendizaje, por consiguiente en la reasignación de probabilidades, ya que a medida que t aumenta el algoritmo incrementa o disminuye la probabilidad de la estrategia en menor proporción, por ello en este caso, la probabilidad de la estrategia 6 se mantiene como la más alta durante la mayoría de las iteraciones.

En la Figura 5.12b, se observa que el *Throughput* aumenta cuando el jugador utiliza una estrategia cuya utilidad cumple la función de satisfacción, tal y como se observa en la Figura 5.12c, hasta que la SINR del UE empieza a disminuir llegando al punto de obtener una SINR por debajo del límite objetivo, por consiguiente el *Throughput* del UE también disminuye, fijándose en un valor medio de 94.21 KHz. En este caso, el *Throughput* alcanzado al implementar el algoritmo basado en GT supera al obtenido sin utilizar GT, el cual corresponde a un valor medio de 6.67 Kbps, a pesar de que el UE finalmente no logra conectarse, ya que durante todo el desarrollo del juego el jugador nunca cambia de estrategia y por ende no logra mejorar la SINR obtenida la mayor parte del tiempo de aproximadamente -7 dB.



a. Curva de probabilidad.



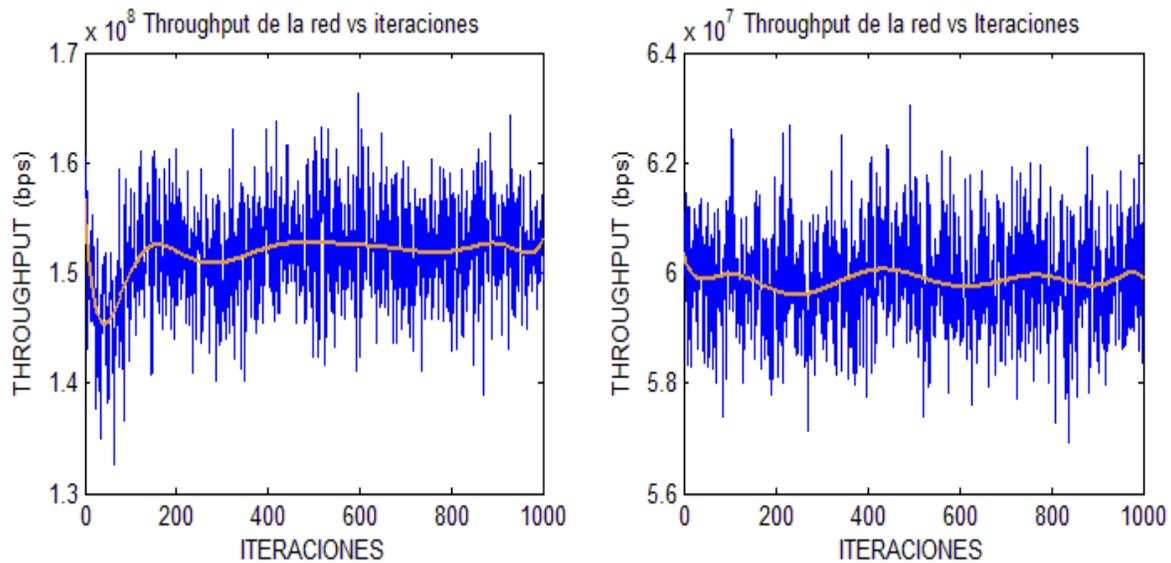
b. Curva de *Throughput* UE con GT.

c. Curva de SINR.

Figura 5.12. Resultados de un FUE ubicado a 45.04 metros del FAP.

La Figura 5.13 muestra el *Throughput* de la red obtenido con y sin GT, en este caso el *Throughput* medio de la red cuando se aplica GT es de 0.15 Gbps, mayor que el obtenido cuando no se aplica GT, el cual corresponde a 59.86 Mbps.

Se observa que el *Throughput* de la Figura 5.13a tiene un comportamiento similar al de la Figura 5.9a, inicialmente la red presenta un alto *Throughput* el cual disminuye, debido a que la SINR obtenida por los UE presentes en la red tiene este comportamiento, ya que algunos UE inicialmente tienen una SINR que supera el umbral de su función de satisfacción, pero como el juego busca evitar que pocos usuarios acaparen los recursos de la red, el algoritmo actúa haciendo que cada UE cambie de estrategia hasta obtener una SINR que se encuentre entre los límites establecidos generando menos interferencias a las señales transmitidas por los UE cercanos.



a. Curva de *Throughput* red con GT

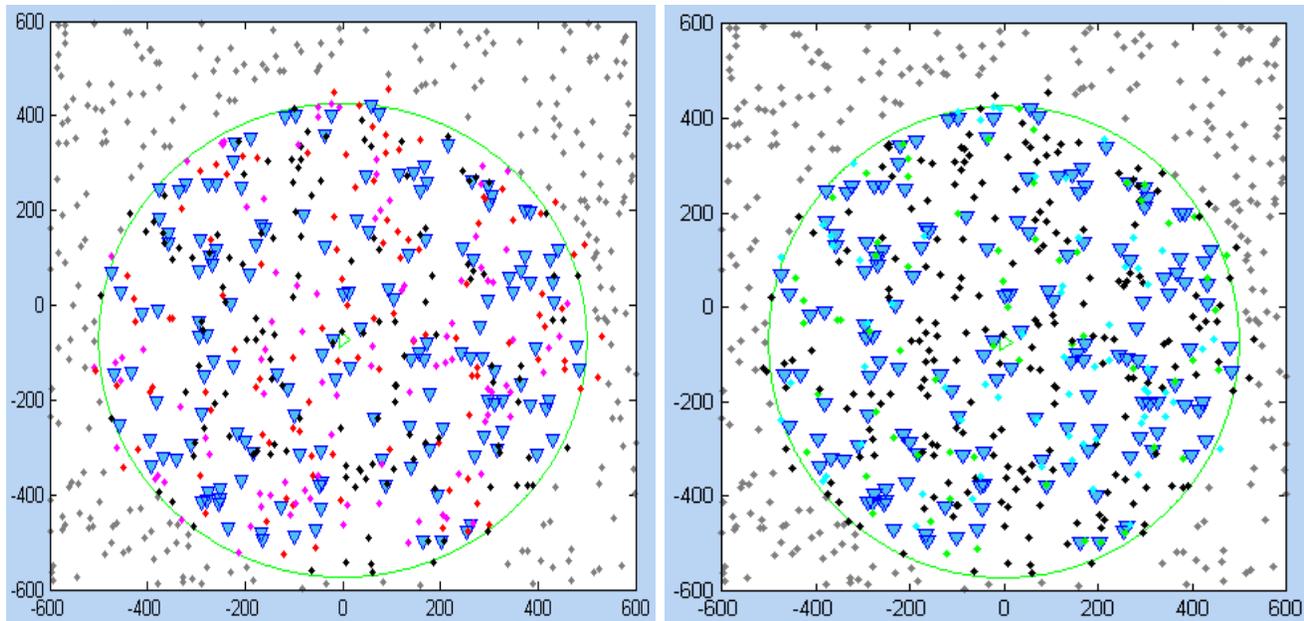
b. Curva de *Throughput* red sin GT

Figura 5.13. Curvas de *Throughput* de la red.

- **Caso 3: voz y datos**

La Figura 5.14a muestra el resultado de la implementación del algoritmo de asignación de espectro basado en GT, donde los puntos violetas (servicio voz) y rojos (servicio datos) corresponden a los UE cuyo requerimiento de SINR fue satisfecho dependiendo del servicio solicitado, y los puntos negros representan a los UE que no lograron conectarse al sistema.

En la Figura 5.14b se muestra el resultado de realizar una asignación de espectro aleatoria, donde los puntos azul claro (servicio voz) y verdes (servicio datos) corresponden a los UE cuyo requerimiento de SINR fue satisfecho dependiendo del servicio solicitado, y los puntos negros representan a los UE que no lograron conectarse al sistema.



a. Resultados obtenidos con GT.

b. Resultados obtenidos sin GT.

Figura 5.14. Resultados obtenidos, escenario 1 – voz y datos.

En la Figura 5.14b, de los 339 UE que se encuentran al interior de la red de análisis, 126 cumplen el nivel de SINR requerido por el servicio, lo que corresponde a un 37.16% de la totalidad de UE. En la Figura 5.14a, de los 339 UE que se encuentran al interior de la red de análisis, 202 cumplen el nivel de SINR requerido por el servicio, lo que corresponde a un 59.58% de la totalidad de UE. Lo anterior evidencia, al igual que en los casos anteriores, que aplicar un algoritmo de asignación de espectro basado en GT en una red que presta dos tipos de servicios, aumenta el número de UE satisfechos, aproximadamente en un 22.42%, en comparación con las simulaciones sin aplicar GT.

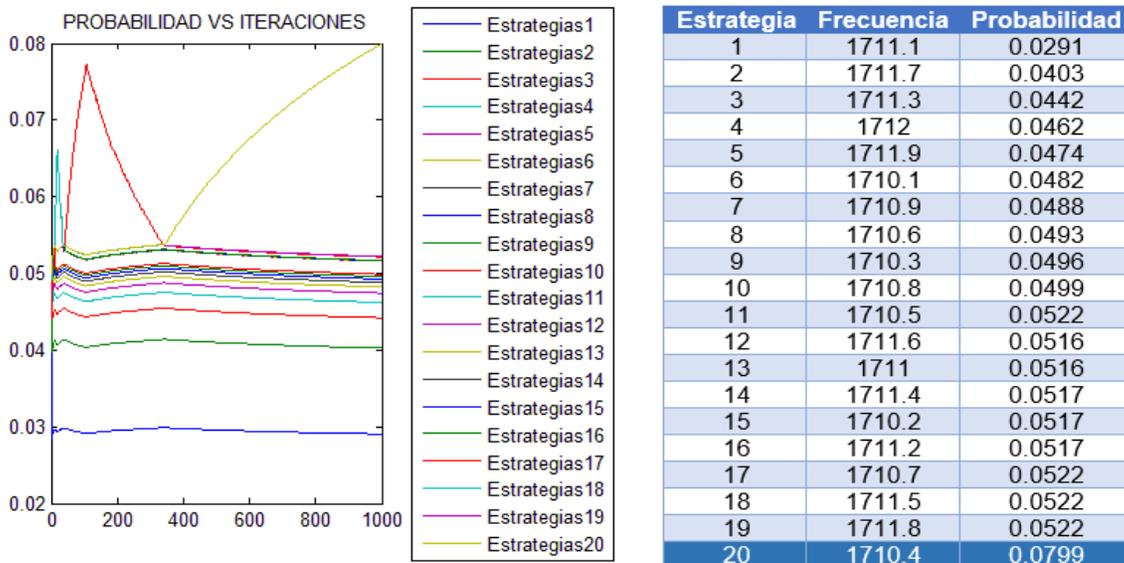
De los 202 UE atendidos, 96 se conectan con voz de los cuales 3 están asociados a la MBS y el resto a los FAP, 106 se conectan con datos y solo 2 están asociados a la MBS. En este caso, pocos MUE que solicitan el servicio de datos logran conectarse, debido a que las grandes pérdidas en la señal causadas por la distancia y la interferencia hacen que sea más difícil alcanzar una SINR objetivo más alta que la del servicio de voz.

Al momento de comparar los resultados obtenidos al brindar dos tipos de servicio en la red con los casos anteriores, el porcentaje de número de UE conectados en este caso, disminuyó para el caso 1 y 2 en un 12.4% y 4.1% respectivamente.

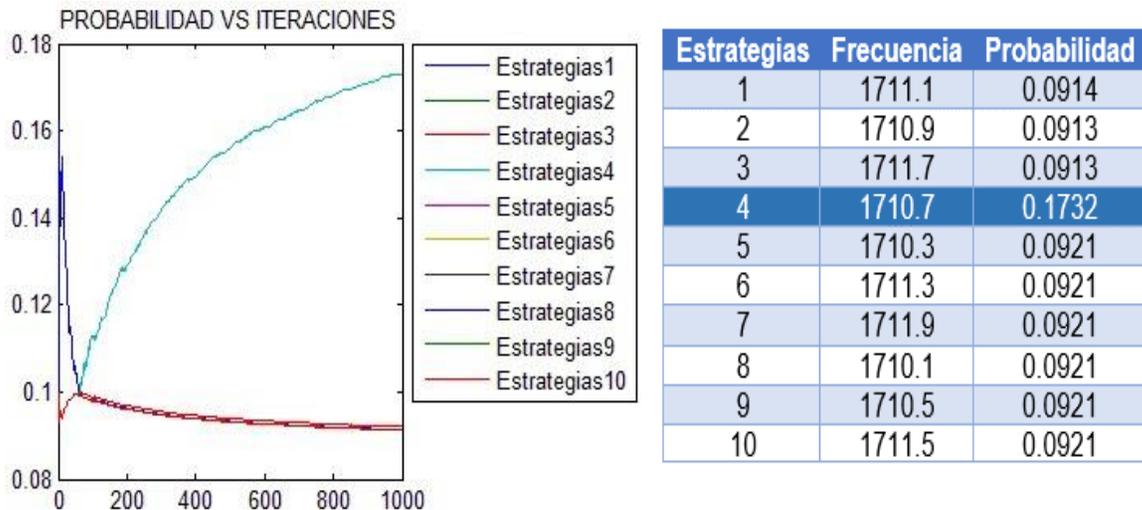
En la Figura 5.15a se muestra el perfil de estrategias y la variación de probabilidad de las estrategias de un FUE, que se encuentra ubicado a 31.25 metros del FAP y

solicita un servicio de voz con un BW de 100 KHz, en este caso el UE cambia de estrategia en repetidas ocasiones intentando encontrar la frecuencia que le permita alcanzar una SINR estable, finalmente escoge la frecuencia de 1710.4 MHz con la que obtiene una SINR dentro de los límites establecidos.

La Figura 5.15b muestra el perfil de estrategias y la variación de probabilidad de las estrategias de un FUE que se encuentra a 36.34 metros del FAP y solicita un servicio de voz con un BW de 200 KHz, en este caso el UE cumple la SINR objetivo con la estrategia inicial, pero iteraciones después el UE ya no está satisfecho por lo que cambia de estrategia y encuentra una que le permite estar satisfecho durante el resto de iteraciones mucho más rápido que el UE que solicita el servicio de voz con un mayor BW, esto se debe a que al otro UE le toma más tiempo encontrar una frecuencia adecuada dentro de su perfil de estrategias mucho más grande.



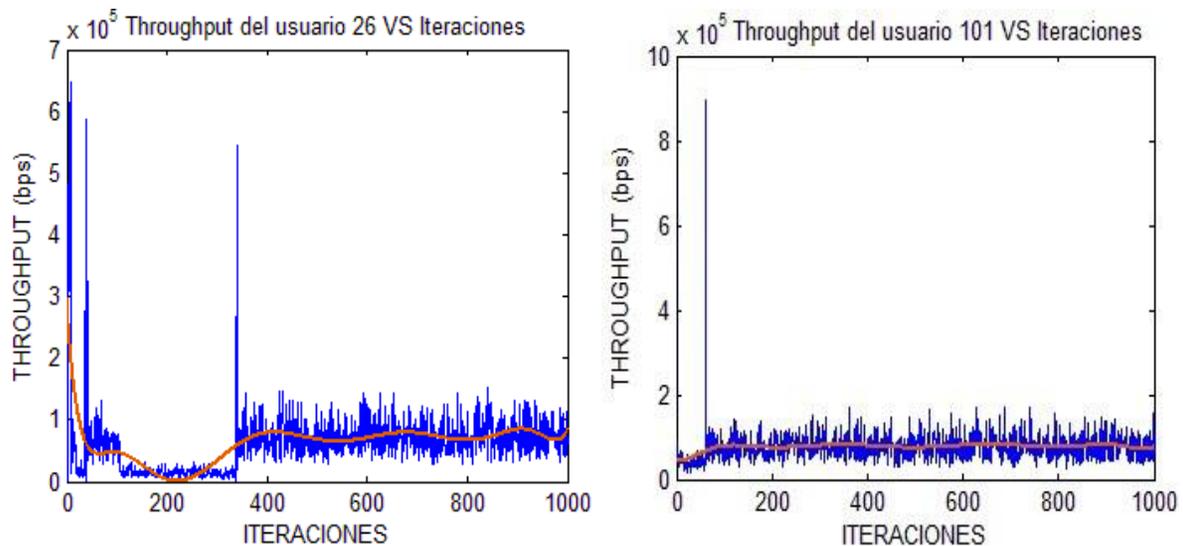
a. Curva de probabilidad.



b. Curva de probabilidad.

Figura 5.15. Curvas de probabilidad de 2 FUE variando el parámetro BW.

En la Figura 5.16 se visualiza el *Throughput* alcanzado por un UE que solicita el servicio de voz con un BW de 100 KHz y 200 KHz. El *Throughput* medio alcanzado en la Figura 5.16a que corresponde a 62.61 Kbps es menor que el alcanzado en la Figura 5.16b, el cual es de 75.4 Kbps, ya que al momento de utilizar un canal más ancho, el UE puede transmitir mayor cantidad de información, lo que se traduce en alcanzar un mayor *Throughput*.



a. Curva de *Throughput* FUE con GT con 100 KHz.

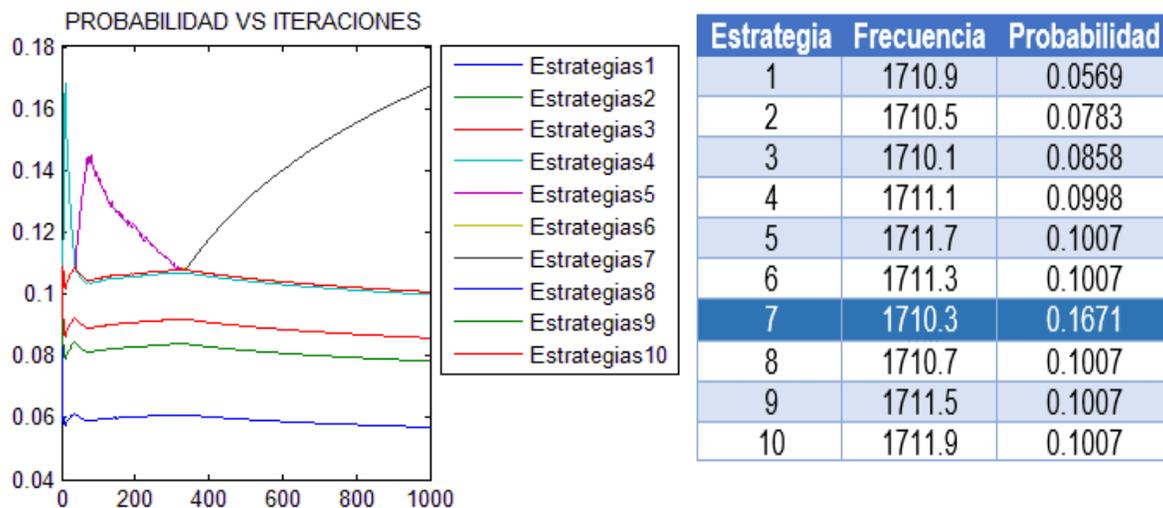
b. Curva de *Throughput* FUE con GT con 200 KHz.

Figura 5.16. *Throughput* obtenido de 2 FUE variando el parámetro BW.

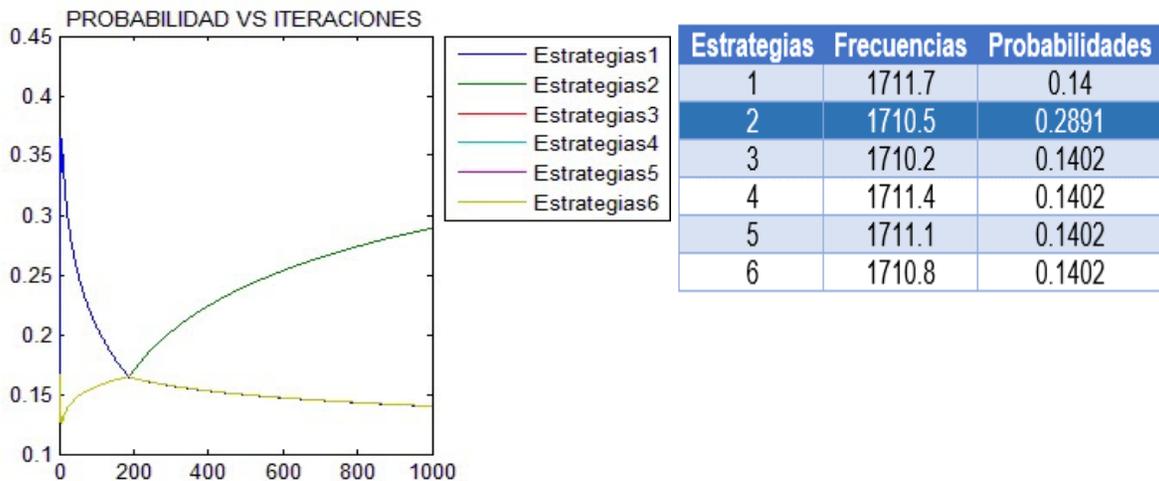
En la Figura 5.17 se muestra la variación de probabilidad de dos FUE que solicitan el servicio de datos ubicados a distancias similares pero con distintos BW para transmitir (200 KHz y 300 KHz).

El FAP 120 presta servicio a 6 FUE de los cuales 4 logran conectarse y el FAP 39 presta servicio a 2 FUE de los cuales solo 1 logra conectarse. Se observa que el FUE que utiliza un BW de 300 KHz, obtiene su mejor estrategia al cabo de aproximadamente 200 iteraciones, mucho más rápido que el FUE que utiliza un BW de 200 KHz, como se observa en la Figura 5.17a, ya que a él le toma menos tiempo variar entre todas sus estrategias.

Por ejemplo, en la figura 5.17b, el UE logra obtener una SINR estable entre los límites establecidos con la estrategia 2, mucho más rápido, que el UE que utiliza un BW menor y por ende tiene un perfil de estrategias más amplio, ya que al existir mayor número de estrategias, le toma más tiempo recorrer todo el perfil de estrategias hasta encontrar una que le permita alcanzar el nivel de SINR requerido.



a. Curva de probabilidad de un FUE ubicado a 21.21 m del FAP 120.



b. Curva de probabilidad de un FUE ubicado a 20.24 m del FAP 39.

Figura 5.17. Curvas de probabilidad de 2 FUE variando el parámetro BW.

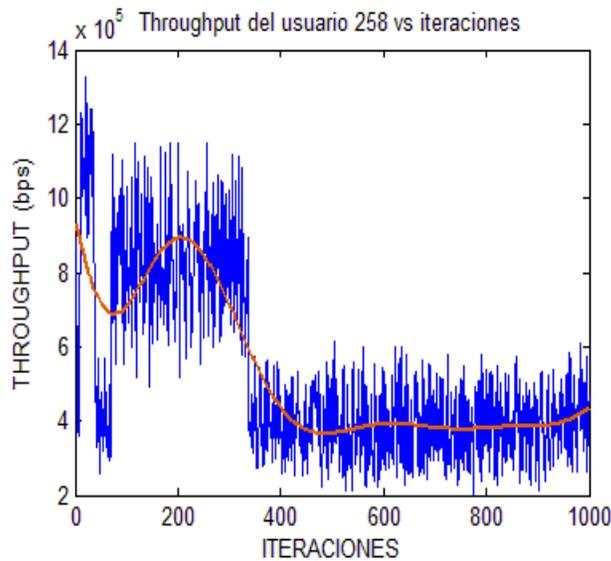
Las Figuras 5.18a y 5.18b permiten comparar el *Throughput* obtenido por dos FUE, que solicitan el servicio de datos con un BW de 200 KHz y 300 KHz respectivamente. En ambas curvas se evidencia el aumento del *Throughput* cuando el FUE escoge finalmente la estrategia que le permite alcanzar de ahí en adelante el nivel de SINR objetivo.

En este caso tener un mayor BW no implica que al escoger la mejor estrategia se alcance un mayor *Throughput*, pero si implica tener un *Throughput* medio mayor durante todo el juego, debido a que al tener menor número de estrategias el UE escoge la mejor frecuencia en menor tiempo, y por ende obtiene una mejora en su nivel de *Throughput* más rápido que el UE que tiene menor BW.

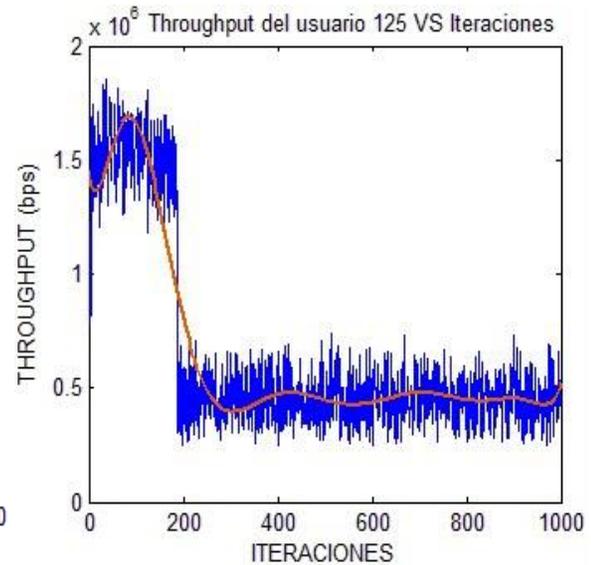
Por otra parte, el UE que tiene mayor número de estrategias, tiene más opciones de escoger una frecuencia que le ofrezca mejor utilidad, por ello así se demore más tiempo en alcanzar la mejor estrategia, escoge una que finalmente le permite alcanzar un *Throughput* más alto que un UE que tiene menos estrategias.

En las figuras 5.18c,d se muestra el *Throughput* obtenido en las redes que prestaron servicios de voz y datos con diferentes BW (100 KHz – 200 KHz y 200 KHz – 300 KHz). En la simulación con BW de 100 y 200 KHz, de los 339 UE dentro de la red de análisis, 202 lograron conectarse, lo que corresponde a un 59.58%, en el escenario con BW de 200 y 300 KHz, de los 340 UE dentro de la red de análisis, 196 lograron conectarse, es decir, un 57.64%. En ambos casos el porcentaje de UE conectados es similar, por lo que de acuerdo a lo mostrado en las figuras 5.18c,d para un requerimiento de SINR de -4 o -7 dB para acceder al servicio de voz o datos,

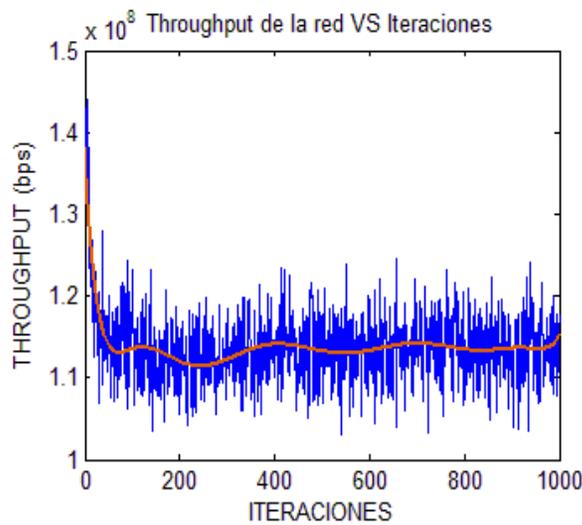
respectivamente, se infiere que el aumento de BW del canal, produce un aumento en el *Throughput* alcanzado por la red debido a que los UE pueden transmitir mayor cantidad de información por unidad de tiempo respecto a un UE que tiene un canal más angosto.



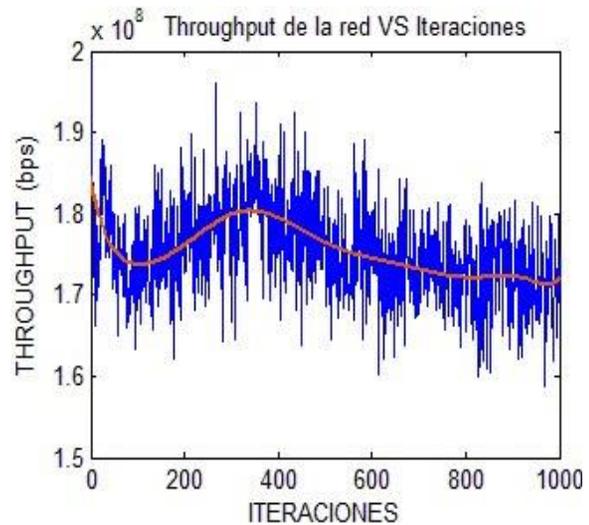
a. Curva *Throughput* del UE 258 con 200 KHz.



b. Curva *Throughput* del UE 125 con 300 KHz.



c. Curva *Throughput* de la red con 100 y 200 KHz.



d. Curva *Throughput* de la red con 200 y 300 KHz.

Figura 5.18. Curvas de *Throughput* obtenidas.

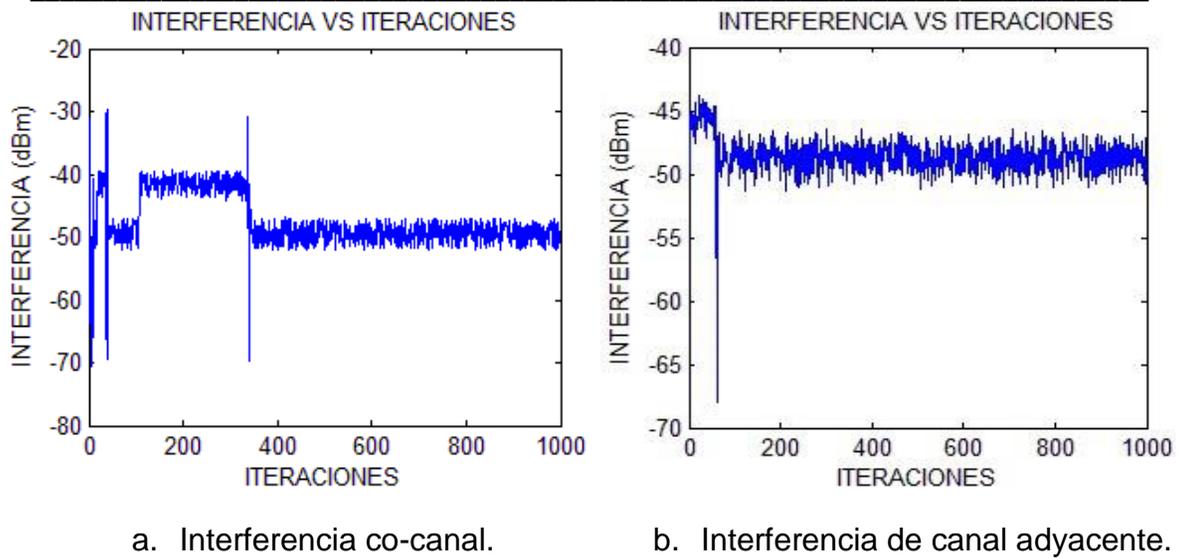


Figura 5.19. Interferencias ocasionadas a la señal transmitida variando BW.

En la figura 5.19 se observa que al aumentar el BW, es decir, disminuir el número de estrategias que tiene el UE, la interferencia tarda menos tiempo en conseguir un valor bajo y estable con lo cual el UE logra estar satisfecho mucho más rápido que el UE que tiene un mayor número estrategias, ya que al tener mayor número de estrategias, hay más posibilidad que el AE perciba interferencia de canal adyacente o co canal de otros UE.

A continuación se muestra un resumen del *Throughput* obtenido en la red en los tres casos de simulación variando el BW cuando se aplica el algoritmo de asignación de espectro basado en GT y cuando se realiza una asignación aleatoria en el escenario 1.

Tabla 5.4. Resumen de resultados, escenario 1.

	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	100 KHz	200 KHz	200 KHz	300 KHz	100 y 200 KHz	200 y 300 KHz
UE dentro de la red	350	367	357	349	339	331
<i>Throughput</i> medio de la red con GT (Mbps)	77.27	83.41	151.7	250.74	112.6	212.63
<i>Throughput</i> medio de la red sin GT (Mbps)	25.52	29.10	59.86	102.5	41.19	86.12

La Tabla 5.4 muestra un resumen de los resultados anteriormente obtenidos en cada uno de los casos, y permite comprobar que en los tres casos de simulación la

implementación de un algoritmo basado en GT incrementa la capacidad de la red, respecto a utilizar un método que no implemente GT.

En el apéndice A, se presenta una Tabla comparativa que permite conocer la frecuencia con la que finalmente transmite cada uno de los UE que logran conectarse al sistema cuando se utiliza GT y el método de asignación aleatorio. Esto permite apreciar que la implementación de un algoritmo de asignación de espectro basado en GT produce que en una celda se presenten menos cantidad de UE utilizando la misma frecuencia, ya que el algoritmo al momento de calcular las probabilidad de cada estrategia tiene en cuenta el nivel de interferencia intra e inter percibido por el UE al utilizar dicha estrategia.

5.5.2 Escenario 2: 100 FAP

- **Caso 1: voz**

En este caso de simulación el número de FAP presentes en la red de análisis disminuye a 100, con el fin de analizar cómo cambia el *Throughput* de la red con esta modificación.

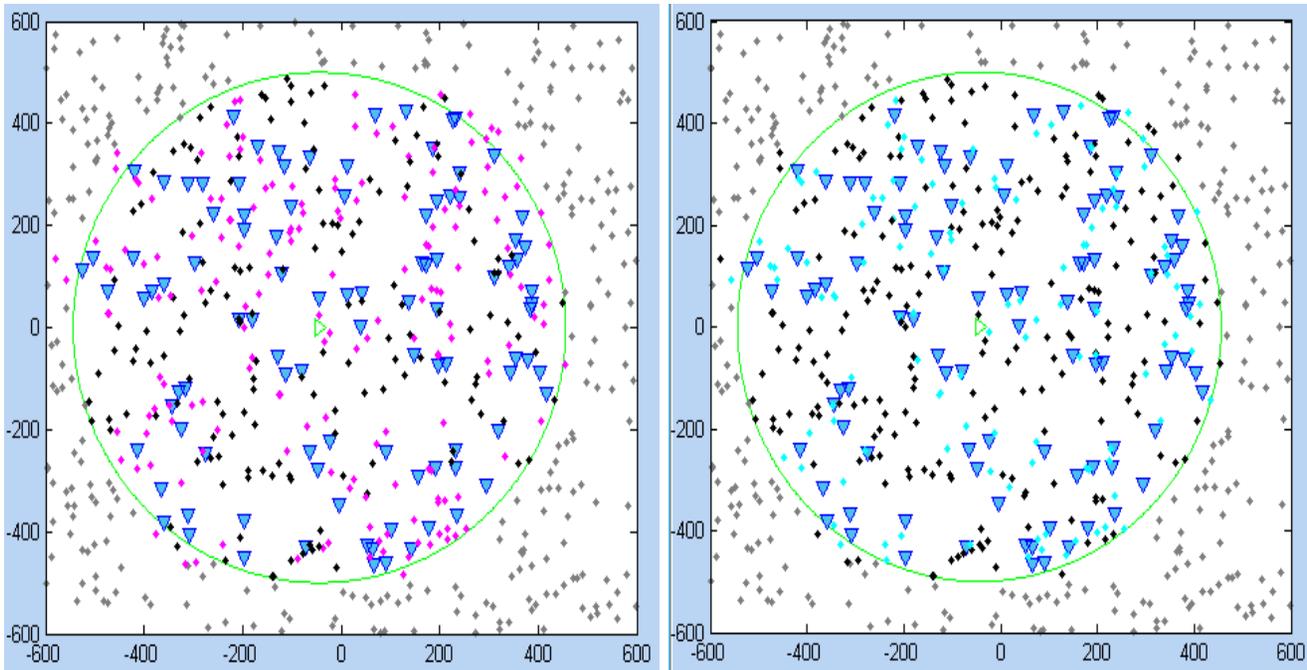
La Figura 5.20 muestra el resultado de la implementación del algoritmo de asignación de espectro basado en GT y del método de asignación de frecuencia aleatorio.

En la Figura 5.20b, de los 326 UE que se encuentran al interior de la red de análisis, 115 logran conectarse, lo que corresponde a un 35.27% de la totalidad de UE. En la Figura 5.20a, del total de UE dentro de la red de análisis, 174 logran conectarse, lo que corresponde a un 53.37% de la totalidad de UE. De los 174 UE atendidos, 3 son MUE y 171 FUE, es decir que 98.27% de los UE atendidos corresponden a FUE. En este caso igual que en el escenario 1, se lograron conectar más UE en la red donde se implementó GT.

En el escenario 2 a comparación del escenario 1, se obtiene un mayor número de MUE, debido a que el número de FAP se reduce de 150 a 100. En el escenario 1 de los 46 MUE dentro de la red análisis, se logran conectar solo 7 de ellos, es decir solo el 15.21% del total de los MUE, mientras que en el escenario 2 de los 81 MUE al interior de la red de análisis, se conectan 3, lo correspondiente al 3.70% del total de los MUE, lo cual indica que reducir el número de FAP dentro de la red, disminuye el porcentaje de MUE conectados debido a que la mayoría de ellos no logran conectarse con la MBS debido a su distancia de separación e interferencia percibida por la MBS por parte de los FUE. Estos datos son consignados en la Tabla 5.9.

Al igual que en el escenario 1, implementar el algoritmo de asignación de espectro basado en GT no es suficiente para que la mayoría de MUE logren conectarse.

Además, en el escenario 1 utilizar el algoritmo de asignación de espectro aumenta el número de FUE conectados, lo que no ocurre en este caso, ya que al disminuir el número de FAP dentro de la red de análisis se disminuye la cantidad de FUE, provocando una reducción de la totalidad de UE conectados en la red.

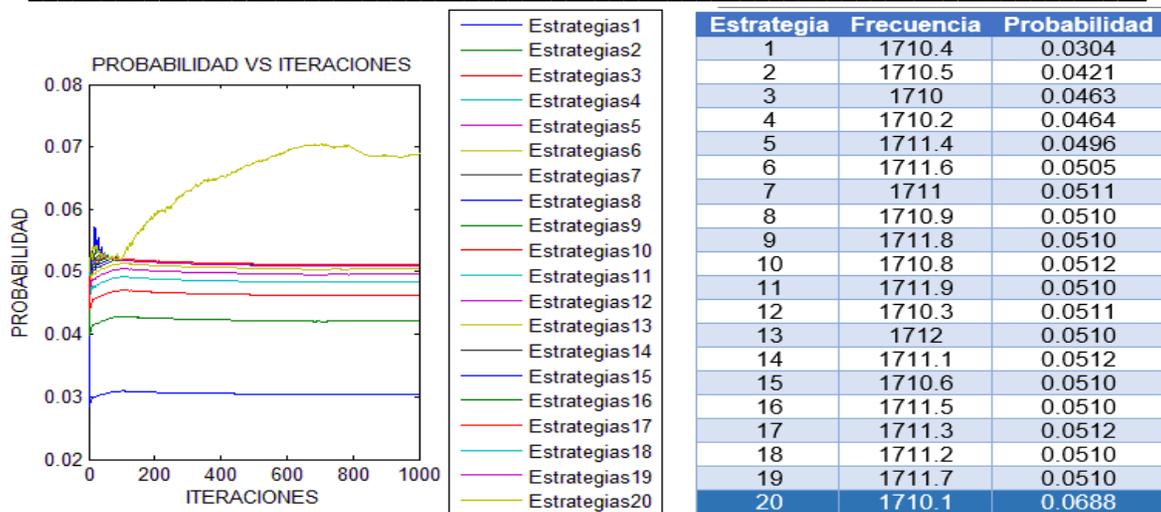


a. Resultados obtenidos con GT.

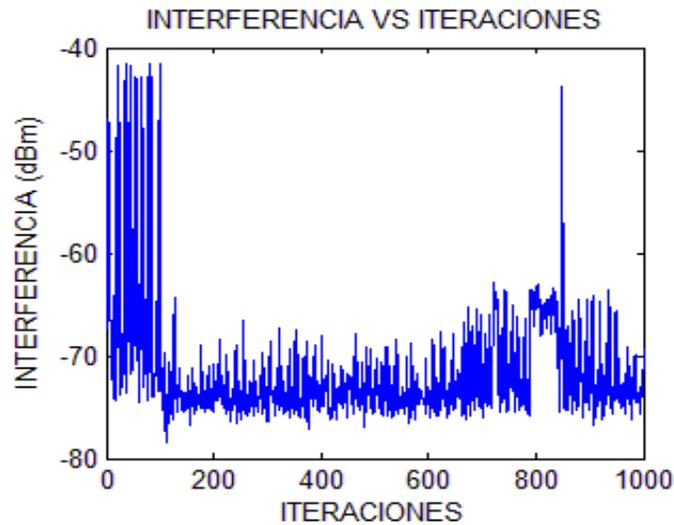
b. Resultados obtenidos sin GT.

Figura 5.20. Resultados obtenidos, escenario 2 – voz.

En la Figura 5.21a se muestra la variación de la probabilidad de cada estrategia para un MUE que se encuentra a 157.20 metros de la MBS y su perfil de estrategias, a comparación del MUE del primer caso en el escenario 1 el cual se encontraba a 111.4 metros de la MBS, este tarda más tiempo en encontrar una frecuencia que le permita alcanzar el nivel de SINR objetivo, pero dicha frecuencia escogida no le permite tener siempre una SINR dentro de los umbrales de la función de satisfacción, esto se debe a que la interferencia mostrada en la Figura 5.21b, presenta en algunas ocasiones altos niveles llegando hasta aproximadamente -45 dB, a comparación del caso 1 en el primer escenario donde el valor de interferencia más grande obtenido en la mayoría de veces es de aproximadamente -60 dB. Como se dijo anteriormente el cambio de probabilidad en las estrategias está relacionado con la interferencia provocada a la señal transmitida en ese momento.



a. Curva de probabilidad.



b. Variación de la interferencia.

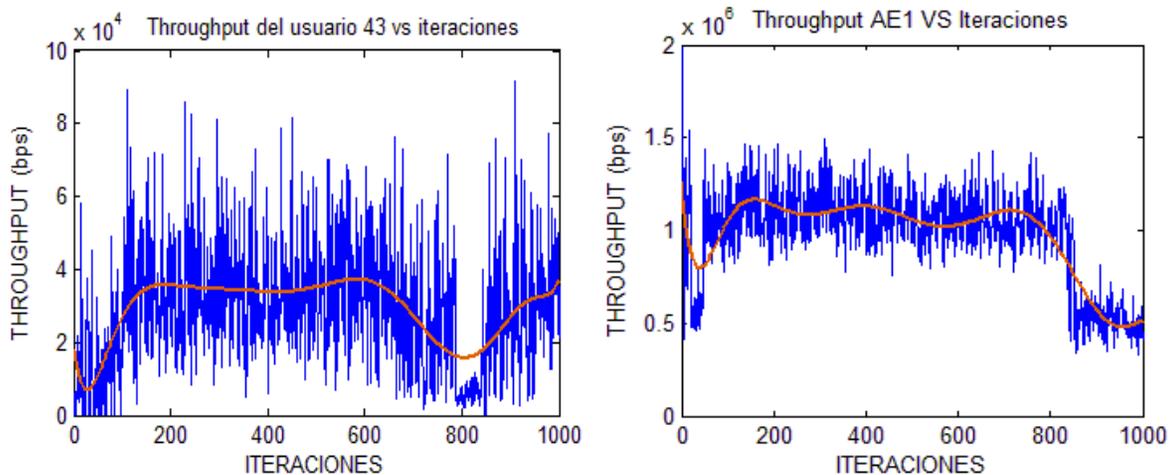
Figura 5.21. Resultados de un MUE a 157.20 metros de la MBS.

En este escenario, la MBS percibe mayor interferencia cuando el MUE se comunica con ella, ya que el número de UE que intentan comunicarse con la MBS es mayor debido a la reducción de FAP en la red.

En este caso al igual que en el escenario 1 se obtiene, que la implementación de un algoritmo de asignación de espectro basado en GT aumenta el *Throughput* de la red.

Respecto al caso 1 del primer escenario, el *Throughput* del UE disminuye, puesto que además de tardar más tiempo en escoger una frecuencia adecuada, cuando la encuentra esta no le permite alcanzar un nivel de SINR estable por encima del umbral de satisfacción y por lo tanto como se observa en la Figura 5.22a, alcanza un *Throughput* medio de aproximadamente 29.3 Kbps que es menor que el del escenario 1 que corresponde a 57.2 Kbps.

Como se ve en la Figura 5.22b, en este escenario el *Throughput* en la MBS tiene un valor medio de 980 Kbps, lo cual indica que subió con respecto al obtenido en el escenario 1, puesto que al tener mayor número de MUE, hay más posibilidades de que un MUE este ubicado a una distancia cercana de la MBS y logre conectarse aportando al *Throughput* obtenido por la MBS.

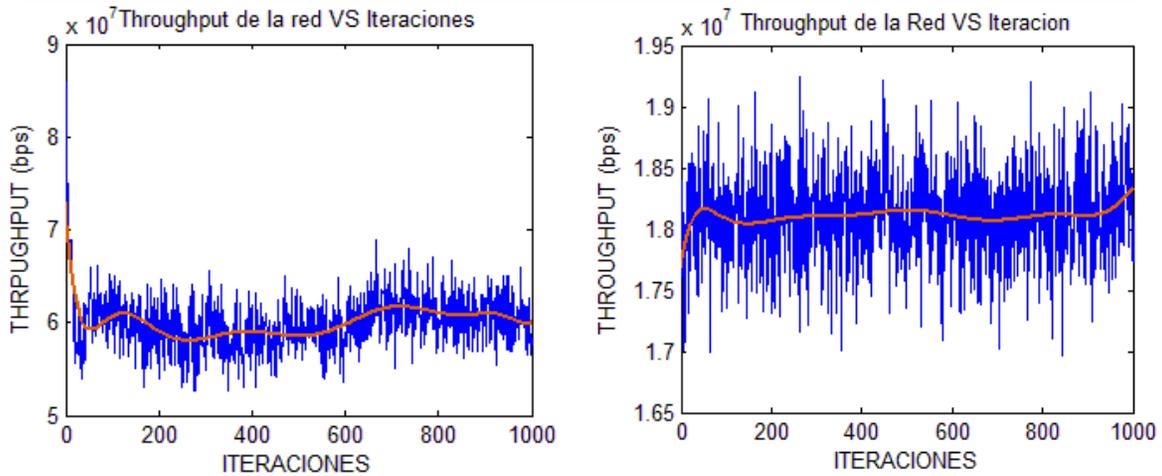


a. Curva *Throughput* UE con GT.

b. Curva *Throughput* AE con GT.

Figura 5.22. Curvas *Throughput* de un MUE y MBS.

En la Figura 5.23 se muestra el *Throughput* obtenido en la red cuando se implementa el algoritmo de asignación de espectro basado en GT y una asignación de espectro aleatoria, en este caso al igual que en el escenario 1, implementar en la red un algoritmo de asignación de espectro mejora el *Throughput* obtenido en la red, obteniendo en las figuras 5.23a,b un *Throughput* medio de 60.04 Mbps y 18.11 Kbps respectivamente. Comparando el *Throughput* medio de la red respecto al obtenido en el escenario 1, se observa en la Tabla 5.9 que al disminuir el número de FAP disminuye el *Throughput* de la red, debido a que el número de UE no conectados que presentan un bajo *Throughput* aumenta.



a. Curvas *Throughput* de la red con GT. b. Curva *Throughput* de la red sin GT.

Figura 5.23. Curvas de *Throughput* de la red.

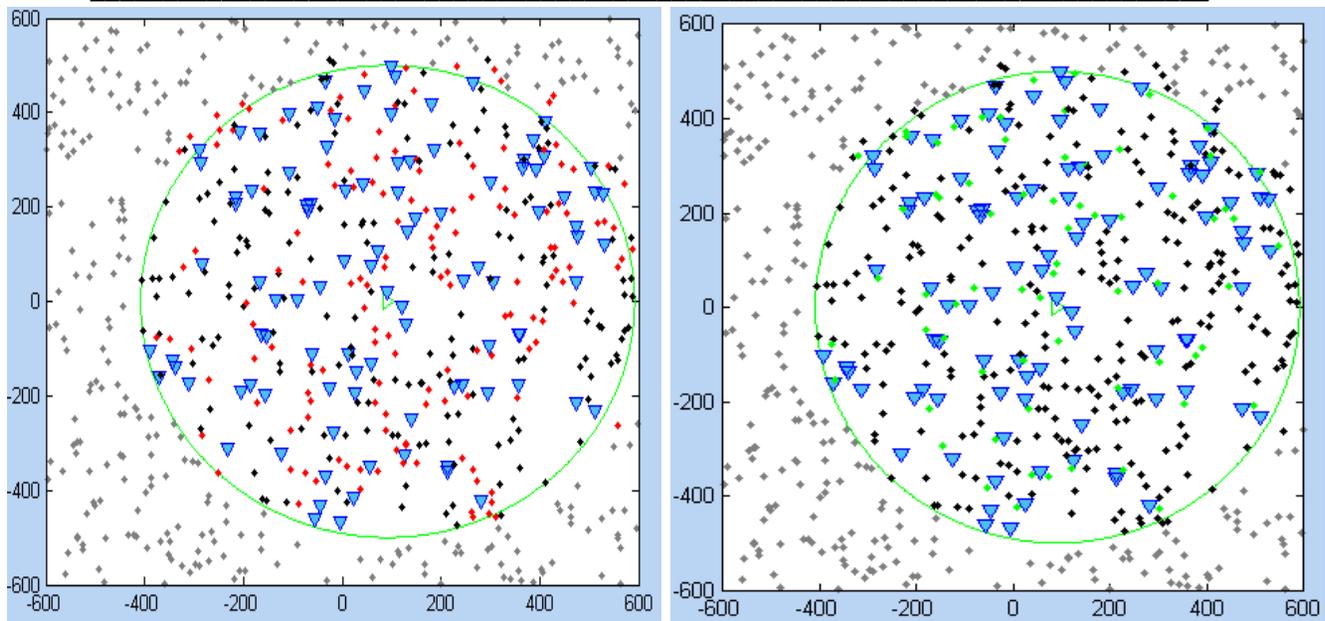
La Tabla 5.5 muestra un resumen de los resultados obtenidos en el escenario 1 y 2 para el caso 1 donde el BW del servicio es de 100 KHz.

Tabla 5.5. Resumen de resultados escenario 1 y 2 para el primer caso.

	Escenario 1			Escenario 2		
	Total	Conectados	%	Total	Conectados	%
MUE	46	7	15.21	81	3	3.70
FUE	304	203	66.77	245	171	69.79
<i>Throughput</i> (Mbps)	77.27			60.04		

- **Caso 2: Datos**

La Figura 5.24 muestra el resultado de implementar en la red el algoritmo de asignación de espectro basado en GT y el método de asignación de espectro aleatorio.



a. Resultados obtenidos con GT.

b. Resultados obtenidos sin GT.

Figura 5.24. Resultados obtenidos, escenario 2 – datos.

En la Figura 5.24b de los 331 UE que se encuentran al interior de la red de análisis, el 20.84% de la totalidad de UE son atendidos satisfactoriamente. En la Figura 5.24a, del total de UE presentes en la red de análisis, el 45.01% son atendidos satisfactoriamente. De los UE atendidos con GT, 2 son MUE y 147 FUE es decir que, 98.65% de los UE atendidos corresponde a FUE. En este caso igual que en el escenario 1, se logran conectar más UE en la red que se implementó GT.

A comparación del escenario 1, en el escenario 2, disminuye el número de MUE conectados, debido a que los UE se despliegan de manera aleatoria en la simulación de cada caso. En el escenario 2, de los 93 MUE dentro de la red de análisis 2 logran conectarse, lo correspondiente al 2.15% del total de MUE, ya que en este caso, solo dos MUE tienen una distancia de enlace menor a 150 metros, mientras que en el escenario 1, nueve UE tiene una distancia de separación menor a 150 metros, de los cuales el MUE conectado más alejado se encuentra a 127 metros.

La Figura 5.25 muestra los resultados obtenidos para un FUE ubicado a 37.8 metros del FAP cuando se aplica el algoritmo de asignación de espectro basado en GT. El comportamiento de la curva de probabilidad 5.25 es similar a las explicadas en el escenario 1, es decir el cambio de estrategia depende de la interferencia percibida en el AE cuando el UE utiliza una determinada frecuencia.

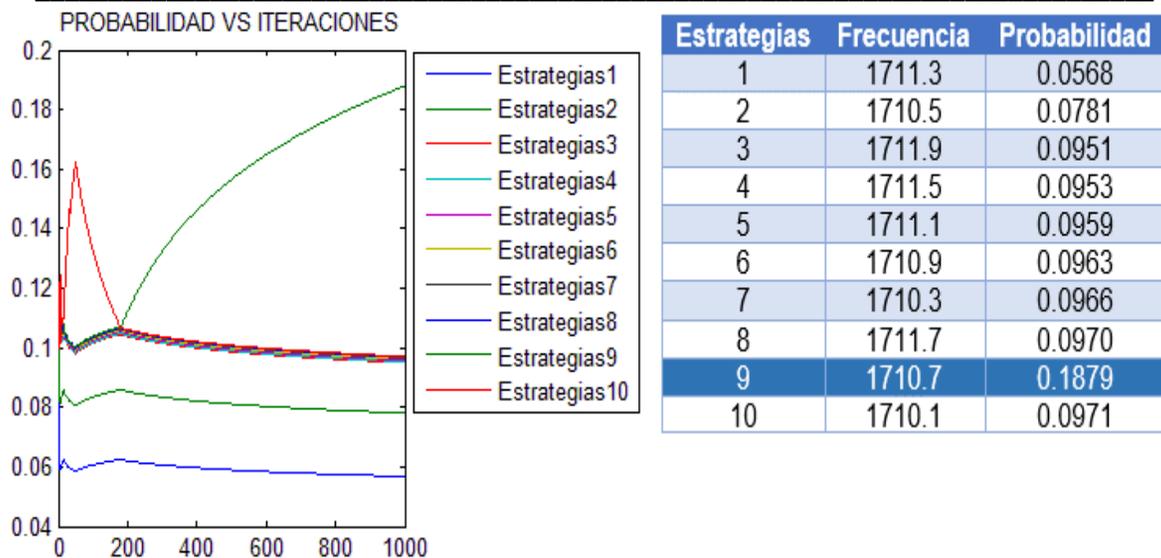
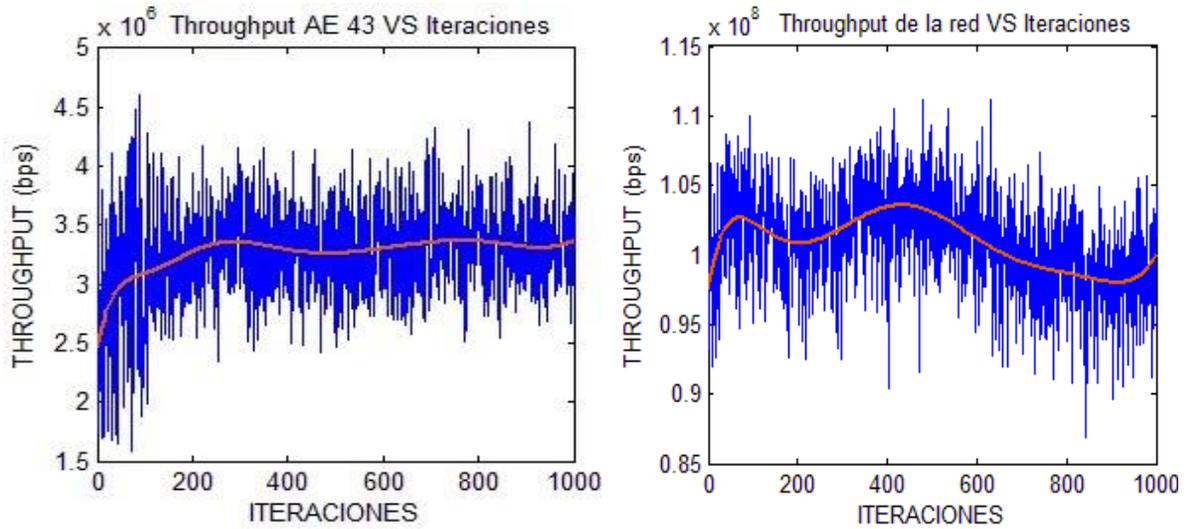


Figura 5.25. Resultados de un FUE ubicado a 37.8 metros del FAP.

La Figura 5.26 presenta la curva de *Throughput* de un AE y de la red al implementar un algoritmo de asignación de espectro basado en GT, el *Throughput* obtenido por el AE 43 que tiene la misma cantidad de FUE conectados que el AE 82 del escenario 1 para el segundo caso, tiene un valor medio de 3.2 Mbps, mientras que el AE 82 tiene un *Throughput* medio de 2.6 Mbps, en este caso al tener menos número de FAP en la red el *Throughput* aumenta debido a que se tiene menor interferencia entre FAP.

En la Figura 5.26b, se muestra el *Throughput* de la red cuando se presta el servicio de datos, cuyo valor medio corresponde a 100 Mbps en ciertas ocasiones algunos FAP presentan un mayor *Throughput* que en el escenario 1, pero debido a que en el escenario 1 los MUE a pesar de que no se logren conectar tienen un *Throughput* mayor que los MUE del escenario 2 que tampoco se conectan, se incrementa el *Throughput* general de la red a 150 Mbps.



a. Curva de *Throughput* del AE con GT.

b. Curva de *Throughput* de la red con GT.

Figura 5.26. Curvas de *Throughput* de un FAP y de la red.

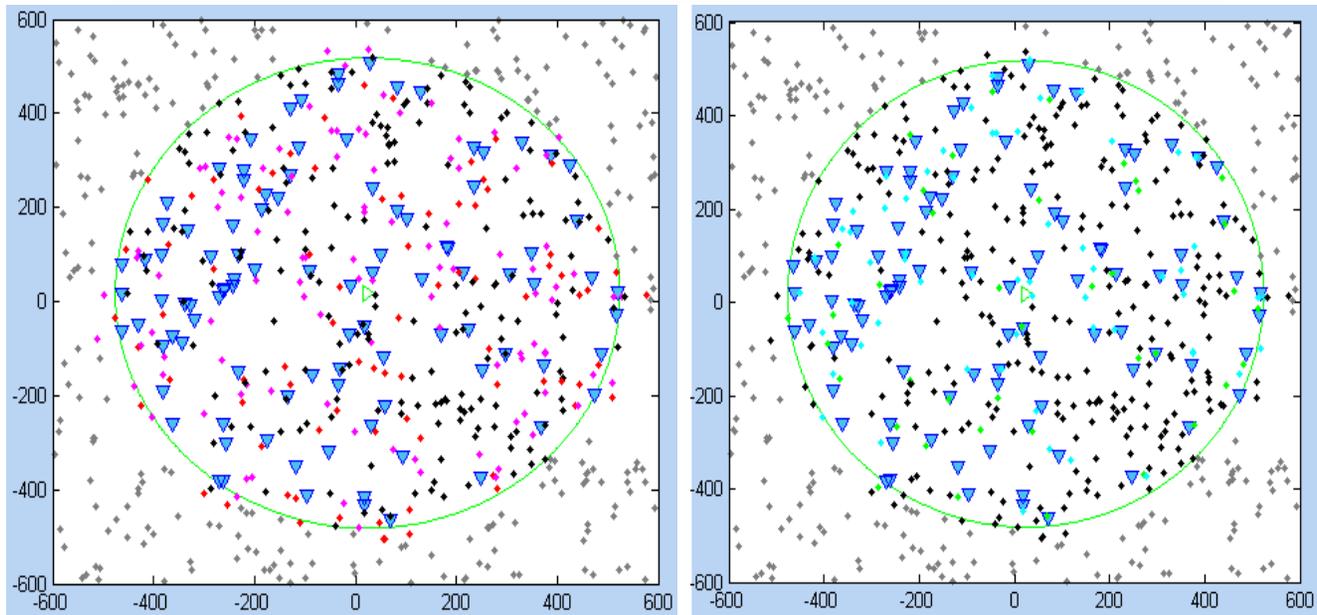
En la Tabla 5.6, se muestra un resumen de los resultados obtenidos en el escenario 1 y 2 al aplicar el algoritmo de asignación de espectro basado en GT.

Tabla 5.6. Resumen de resultados escenario 1 y 2 para el segundo caso.

	Escenario 1			Escenario 2		
	Total	Conectados	%	Total	Conectados	%
MUE	36	4	11.11	93	2	2.15
FUE	321	198	61.68	238	147	61.76
<i>Throughput</i> (Mbps)	150 Mbps			59.8 Mbps		

- **Caso 3: Voz y datos**

En la Figura 5.27 se muestra el resultado de la implementación del algoritmo de asignación de espectro basado en GT y del método de asignación de espectro aleatorio.



a. Resultados obtenidos con GT.

b. Resultados obtenidos sin GT.

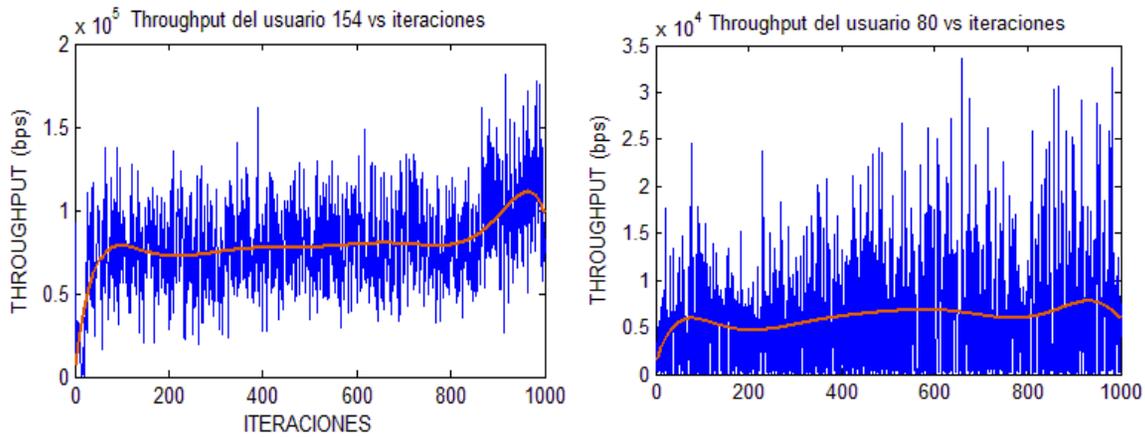
Figura 5.27. Resultados obtenidos, escenario 2 – voz y datos.

En la Figura 5.27b de los 367 UE dentro de la red de análisis, el 27.52 % de la totalidad de UE logran conectarse. En la Figura 5.27a, del total de UE presentes en la red de análisis, el 50.13% logran conectarse, de nuevo se evidencia que la aplicación del algoritmo de asignación de espectro basado en GT en una red que presta dos tipos de servicio aumenta el número de UE satisfechos aproximadamente en un 22.61% en comparación con las simulaciones sin aplicar GT.

Tener menos FAP genera menos interferencia a los FUE, además se evidencia que en general se obtiene menor *Throughput* en la red debido a que la cantidad de MUE aumenta, pero a pesar de esto, el algoritmo de asignación de espectro basado en GT no es suficiente ya que aunque los MUE encuentren una frecuencia con la cual podrían alcanzar los niveles de SINR requeridos, se reitera la necesidad de tener un control de potencia para alcanzar dichos niveles en estos UE.

En la figura 5.28a se visualiza el *Throughput* alcanzado por un MUE que solicita el servicio de voz ubicado a 102.88 metros con un BW de 100 kHz, el *Throughput* medio corresponde a 79.1 kbps que es mayor al obtenido por un MUE ubicado a una distancia similar del escenario 1 para el tercer caso, comportándose de manera similar al *Throughput* obtenido por los UE en los anteriores casos, no obstante en la Figura 5.28b se muestra un MUE ubicado a 154.08 metros que desea acceder al servicio de datos y nunca logra conectarse por ende su *Throughput* es muy bajo. Se observa que aumentar el BW para transmitir produce que los MUE ubicados a

una distancia lejana les sea más difícil alcanzar la SINR objetivo, ya que al aumentar el BW del canal estos perciben mayor potencia de ruido, por ello en esta oportunidad el MUE más lejano que se conecta está ubicado a 80.91 metros.

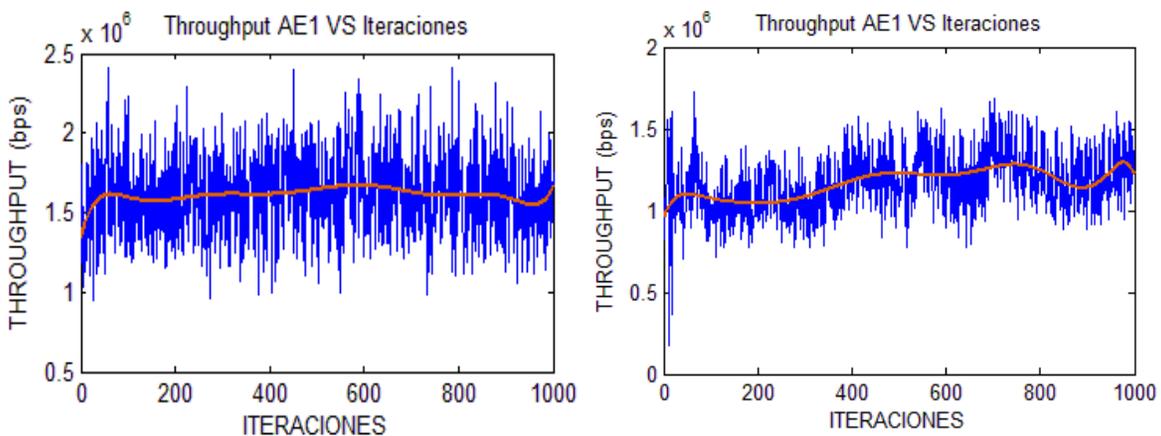


a. Curva *Throughput* del UE 154.

b. Curva *Throughput* del UE 80.

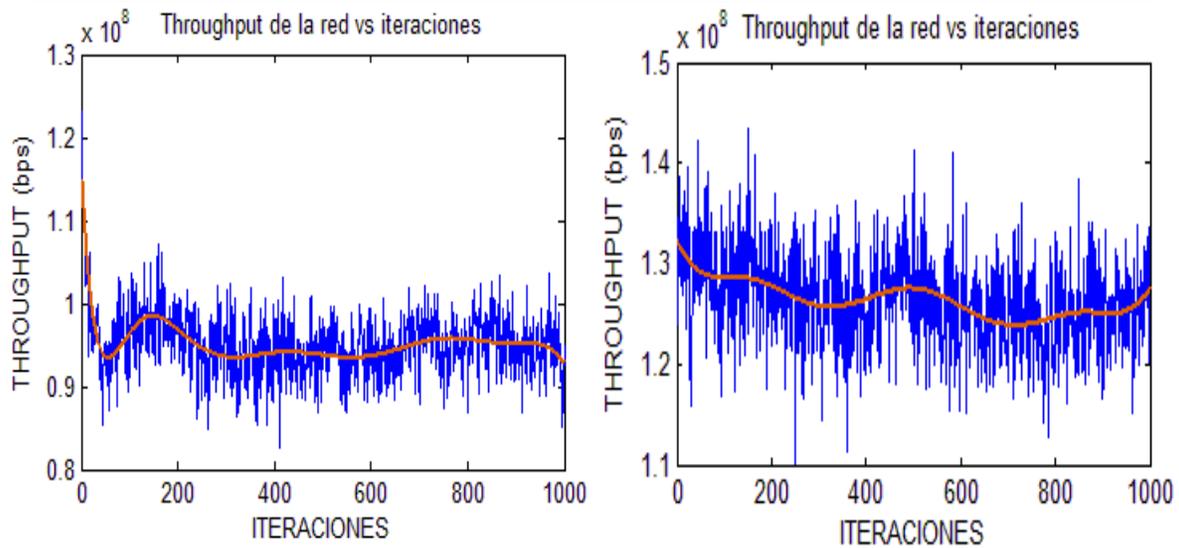
Figura 5.28. Curva *Throughput* de dos MUE.

En las Figuras 5.29a y 5.29b se observa el *Throughput* alcanzado en la MBS cuando se tiene un BW de 100 y 200 KHz, y BW de 200 y 300 KHz, se obtiene que aumentar el BW disminuye el *Throughput* de la MBS. Pero debido a que los FUE presentan menos interferencia por otros FAP, aquellos que logran conectarse logran mayor *Throughput* al aumentar el BW generando un aumento en el *Throughput* general de la red, ya que como se observa en las Figuras 5.29c y 5.29d el *Throughput* medio obtenido corresponde a 95,1 Mbps y 126.4 Mbps respectivamente.



a. Curva *Throughput* del AE con 100 y 200 KHz.

b. Curva *Throughput* del AE con 200 y 300 KHz.



c. Curva *Throughput* de la red con 100 y 200 MHz.

d. Curva *Throughput* de la red con 200 y 300 MHz.

Figura 5.29. Curvas *Throughput* de la MBS y de la red con GT.

En la Tabla 5.7, se muestra un resumen de los resultados obtenidos en los escenarios 1 y 2 al aplicar el algoritmo de asignación de espectro basado en GT.

Tabla 5.7. Resumen de resultados del caso 3 para los escenarios 1 y 2.

	Escenario 1				Escenario 2			
	Total	Conectados		%	Total	Conectados		%
		Voz	datos			Voz	datos	
MUE	39	3	1	10.2	91	1	1	2.19
FUE	300	94	104	66	276	104	78	65.94
<i>Throughput</i> (Mbps)	112.6				95.1			

La Tabla 5.8 muestra un resumen de los resultados anteriormente obtenidos al variar el BW, y permite comprobar que en los tres casos de simulación la implementación de un algoritmo basado en GT incrementa la capacidad de la red, respecto a utilizar un método que no implemente GT.

Tabla 5.8. Resumen de resultados al variar BW en el escenario 2.

	Caso 1		Caso2		Caso 3	
	100 KHz	200 KHz	200 KHz	300 KHz	100 y 200 KHz	200 y 300 KHz
UE dentro de la red	326	335	331	347	367	328
Throughput medio de la red con GT (Mbps)	60.4	107.2	149	193	95.1	126.4
Throughput medio de la red sin GT (Mbps)	0.018	0.95	69	112.1	29.8	48.4

5.6 RESUMEN DE RESULTADOS

La Tabla 5.9, contiene un resumen de los resultados obtenidos en los escenarios 1 y 2. Esta Tabla evidencia que la implementación de un algoritmo de asignación de espectro basado en GT aumenta la capacidad de la red vista como *Throughput*. Adicionalmente muestra el efecto que tiene reducir el número de FAP presentes en la capacidad de la red, puesto que este valor en todos los casos del escenario 2, es menor que los obtenidos en el escenario 1.

Tabla 5.9. Resumen *Throughput* obtenido en la red - escenario 1 y 2.

	ESCENARIO 1						ESCENARIO 2					
	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	GT	Sin GT	GT	Sin GT	GT	Sin GT	GT	Sin GT	GT	Sin GT	GT	Sin GT
Capacidad (Mbps)	77.2	25.5	150	59.8	112	41.1	60	0.01	150	32.5	95.1	29.8
% de UE conectados	60	36	56.5	32.2	59.5	37.1	53.3	35.2	45	20.8	50.1	27.5

Se observa que en los escenarios 1 y 2, en los casos 2 y 3 la red obtiene un mayor *Throughput* que el caso 1 con menor porcentaje de UE conectados, debido a que el nivel mínimo de SINR requerido en el caso 2 es mayor que en el caso 1, por lo que los UE conectados en el segundo caso tienen un mayor *Throughput* que los UE conectados en el primer caso, generando así finalmente mayor *Throughput* en la red.

Por otro lado, los resultados obtenidos en el caso 3 con respecto al 2, evidencian que el *Throughput* alcanzado en la red, es menor con mayor cantidad de UE conectados, ya que los UE presentes en esta solicitan diferente tipo de servicio, por lo que algunos logran conectarse alcanzando una SINR más baja y obtienen un *Throughput* menor, a comparación del caso 2 en el que todos los UE obtiene un mayor *Throughput* puesto que deben alcanzar una SINR más alta.

CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 CONCLUSIONES

- ✓ La implementación de un algoritmo de asignación de espectro basado en GT mejora la capacidad de la red vista como *Throughput* significativamente en comparación a no aplicar ningún método de asignación de espectro.
- ✓ Aplicar la técnica de aprendizaje reforzado en el algoritmo de asignación de espectro basado en GT, con tasa de aprendizaje basada en el principio de WoLF, produce que los UE que obtienen una SINR dentro de los límites establecidos durante las primeras iteraciones, les tome más tiempo cambiar de estrategia en caso de no alcanzar en algún momento la SINR objetivo.
- ✓ Emplear un algoritmo de asignación de espectro basado en GT aumenta el *Throughput* en los FUE, pero no es suficiente para incrementarlo en los MUE, debido a que la distancia de los enlaces y la potencia de transmisión utilizada no le permite alcanzar el nivel SINR requerido, por lo tanto, también es necesario implementar un algoritmo de control de potencia.
- ✓ Disminuir el número de FAP presentes en la red a analizar, reduce la interferencia causada a los FUE, produciendo un aumento en el *Throughput* alcanzado por los FAP pero reduce el alcanzado por la red, debido a que aumenta el número de MUE no conectados.
- ✓ Tener mayor número de estrategias hace que el jugador se tarde más en encontrar una frecuencia que lo satisfaga, pero finalmente conseguirá una que le permitirá obtener un mayor *Throughput*.
- ✓ Implementar un algoritmo de asignación de espectro basado en juegos no cooperativos utilizando el concepto de solución de SE, hace que los jugadores escojan una estrategia que les permite lograr la SINR objetivo y obtener un buen *Throughput* sin afectar en mayor medida posible a los demás jugadores, permitiendo que más usuarios puedan conectarse y tener una asignación menos egoísta.

6.2 TRABAJOS FUTUROS

Con base en lo aprendido durante el desarrollo del trabajo de grado, se proponen los siguientes trabajos:

- ✓ **Implementación de un algoritmo de control de potencia en conjunto con el algoritmo de asignación de espectro desarrollado:** con el fin de mitigar aún más la interferencia intra e inter sistema, y con ello observar el efecto que tiene en la cantidad de UE conectados y *Throughput* obtenido en la red.
- ✓ **Aplicación del algoritmo de asignación de espectro basado en GT en una red heterogénea con varias micro celdas:** con el fin de observar los resultados obtenidos al ejecutar el algoritmo en una red más grande y analizar la capacidad de la red, ya que en el presente trabajo se realizó la asignación sobre una sola micro celda.
- ✓ **Implementación de un algoritmo de asignación que utilice diferentes tipos de juego basado en GT:** en el presente trabajo se aplica el algoritmo de asignación de espectro basado en solo un tipo de juego (juego no cooperativo) tanto para los FUE y MUE, razón por la cual se propone realizar un análisis comparativo, implementando un algoritmo de asignación de espectro que utilice un tipo de juego diferente en los FUE y MUE, con el fin de analizar cómo influye en la capacidad de la red.
- ✓ **Implementar un algoritmo de asignación de espectro basado en GT que utilice otro tipo de aprendizaje reforzado:** en el presente trabajo se aplica el aprendizaje inmediato en el algoritmo de asignación de espectro, por lo cual se propone realizar un análisis comparativo, aplicando el aprendizaje retardado en el algoritmo de asignación de espectro, con el fin de analizar los tiempos de convergencia del sistema y de igual manera la capacidad de la red vista como *Throughput*.

Apéndice A

En el presente apéndice se muestra la interfaz gráfica realizada y los resultados de capacidad obtenidos al aplicar el algoritmo de asignación de frecuencia basado en GT y un método de asignación de espectro aleatoria. Para cada caso se realizaron 10 pruebas, en cada una de las cuales se ejecutó el algoritmo basado en GT 1000 veces y se asignó de forma aleatoria 1000 veces una frecuencia de transmisión para luego obtener la SINR y el *Throughput*. Cabe resaltar que en cada simulación cambio la ubicación de los UE, FAP y la MBS, por ende, también el número de UE dentro de la red de análisis.

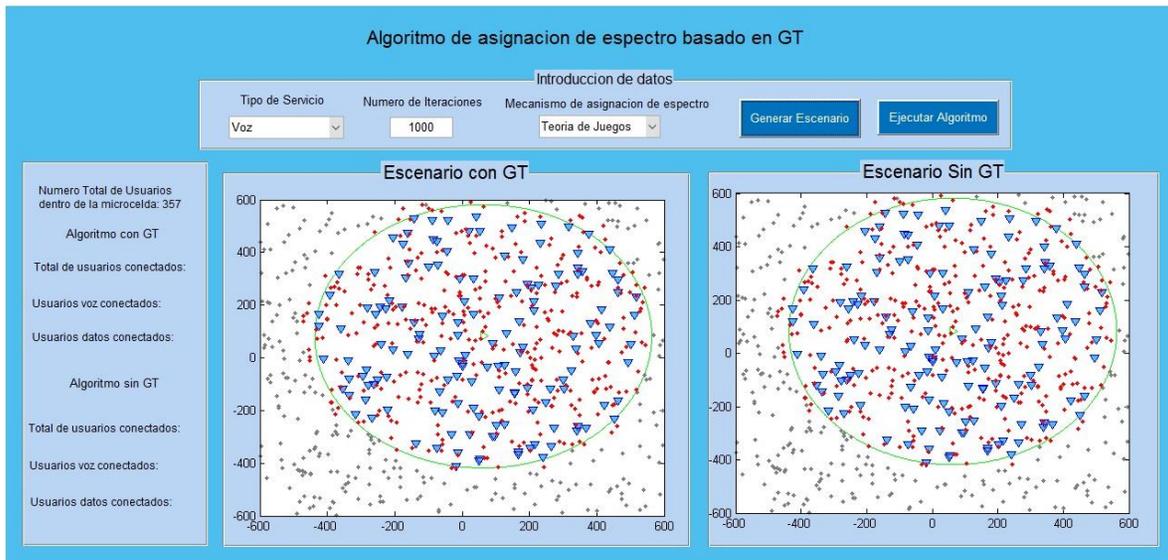


Figura A.1. Interfaz gráfica para la ejecución de las pruebas.

A.1 Escenario 1: 150 FAP

- **Caso 1: voz**

En la Tabla A.1 se presenta el resumen de la capacidad obtenida en cada una de las pruebas realizadas para el caso 1, donde la SINR objetivo es de -7 dB. Se observa que en todas las pruebas realizadas el *Throughput* obtenido al aplicar el algoritmo basado en GT supera al valor obtenido sin GT.

Tabla A.1. Capacidad obtenida. Escenario 1- voz.

Prueba No	Total UE	% UE conectados GT	Throughput medio GT (Mbps)	% UE conectados sin GT	Throughput medio sin GT (Mbps)
1	347	49.5	59.3	33	22.3
2	331	53.6	62.3	32.4	24.5
3	350	60	77.27	36	25.5
4	326	52	62	30	23.9
5	364	57.5	69	31.7	22.3
6	337	47.2	58.8	27.2	21.8
7	344	53.3	65.5	29.8	24.9
8	359	59	71.5	30.1	25.3
9	354	55	66.7	32	25.7
10	342	58.7	70.3	33.7	22.1

Para las pruebas realizadas se obtienen los resultados de capacidad en cada uno de los FAP dentro de la red de análisis. Específicamente para el caso de análisis presentado en el capítulo 5 (Prueba N° 3), dicho resultados se consignan en la Tabla A.2. Se observa que para en cada AE, el *Throughput* es mayor al aplicar el algoritmo de asignación de espectro basado en GT. Los FAP que no se encuentran consignados en la Tabla son aquellos que no tienen ningún UE asociado o no se conectó ningún UE.

Tabla A.2. *Throughput* de cada AE. Escenario 1 – voz.

AE	Throughput GT (Mbps)	Throughput sin GT (Mbps)
1	0.81	0.005
2	0.82	0.56
4	0.37	0.21
5	0.74	0.46
6	0.54	0.24
7	0.40	0.30
8	0.9	0.14
11	0.20	0.18
13	0.46	0.44
14	0.12	0.10
15	0.41	0.18
17	0.67	0.16
18	0.15	0.06
19	0.24	0.17
20	0.15	0.11
21	0.10	0.04
22	0.98	0.05
25	0.86	0.44
26	0.34	0.21
27	0.09	0.01
28	0.22	0.13
29	0.80	0.32
30	0.21	0.13
32	0.15	0.14
33	0.10	0.09
34	0.51	0.14
35	0.69	0.37
37	0.12	0.09
38	0.08	0.04
39	0.22	0.16
41	0.24	0.21
43	0.23	0.16
44	0.55	0.41
45	0.10	0.02
46	0.29	0.12
48	0.34	0.08
49	0.17	0.16
50	0.15	0.11
51	0.72	0.02
52	0.43	0.08
53	0.90	0.13
54	0.11	0.08
55	0.45	0.14
56	0.62	0.03
57	0.13	0.08
58	0.15	0.12
60	0.148	0.06
61	0.58	0.49
64	0.13	0.10
65	0.73	0.51
66	0.43	0.10

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

67	0.12	0.07	94	0.15	0.13	123	0.96	0.37
68	0.29	0.24	95	0.99	0.15	125	0.10	0.07
69	0.08	0.06	96	0.39	0.26	126	0.33	0.28
71	0.82	0.28	98	0.10	0.04	127	0.21	0.02
72	0.16	0.12	99	0.37	0.01	128	0.17	0.09
73	0.29	0.07	101	0.48	0.37	129	0.64	0.19
74	0.22	0.15	102	0.30	0.03	130	0.24	0.23
75	0.19	0.13	103	0.69	0.18	131	0.18	0.08
76	0.24	0.14	105	0.13	0.04	132	0.51	0.16
77	0.51	0.01	106	0.15	0.14	134	0.11	0.07
78	0.28	0.26	107	0.10	0.51	135	0.19	0.14
79	0.49	0.01	108	0.10	0.02	136	0.19	0.10
80	0.30	0.20	110	0.49	0.06	137	0.49	0.29
81	0.26	0.14	111	0.98	0.26	138	0.18	0.08
82	0.17	0.09	112	0.16	0.12	139	0.12	0.02
83	0.41	0.34	113	0.32	0.23	141	0.46	0.10
84	0.20	0.17	114	0.90	0.06	145	0.3	0.29
85	0.13	0.12	115	0.93	0.12	146	0.92	0.11
86	0.89	0.22	116	0.28	0.02	147	0.67	0.58
87	0.14	0.01	117	0.71	0.05	148	0.40	0.32
88	0.09	0.06	118	0.71	0.20	149	0.83	0.10
89	0.84	0.11	119	0.12	0.03	150	0.59	0.23
93	0.30	0.16	122	0.10	0.02	151	0.71	0.35

En la Tabla A.3 se registran para el caso 1, los datos generales de cada UE, como el AE al que están asociados, distancia a la que se encuentra del AE, la frecuencia asignada como resultado de implementar un algoritmo de asignación basado en GT y la frecuencia aleatoria usada en un método sin utilizar GT. Los UE que no están consignados en la Tabla, corresponden a los que no encontraron una frecuencia de transmisión que les permita alcanzar el nivel de SINR requerido por el servicio, con GT y sin GT.

Tabla A.3. Frecuencias asignadas a cada UE. Escenario 1 – voz.

UE	AE	Distancia (metros)	Frec con GT (MHz)	Frec sin GT (MHz)
1	2	37.12	1711.4	-
3	99	23.08	-	1710.3
4	68	28.28	1711.5	1712
5	97	40.01	1711.3	1710.9
6	94	16	-	1710.3
7	124	20.88	1711.7	1710.3
8	60	58.83	1711.2	-
9	129	27.29	1711.1	-
11	144	16.27	1711	1711.2
12	60	24.83	-	1711.4
13	2	48.41	1710.9	-
14	17	20.39	1711.7	1711.2
15	26	23.32	1711.9	-
16	39	17.88	1710.5	1710
17	128	15.23	1710.6	-
18	129	17	-	1710.8
19	137	35.60	1710.5	1711.1
20	42	8.60	-	1711
21	32	31.62	1711.3	-
22	109	27.29	1710.5	-

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

23	128	9.43	1710.6	1711.8	86	87	42.75	1711.4	1711.9
24	15	35.46	1711.6	1710.1	87	136	32.38	1711.1	-
26	51	17.49	1710.5	1711.8	88	54	34.92	1710.3	1711.7
27	67	26.41	-	1710.6	89	73	10	1711.2	1711.9
28	57	24.08	1710.4	-	90	127	11	-	1710.8
29	2	39.20	1710.8	-	92	126	39.59	1711.9	-
30	80	36.89	1711.1	1710.8	93	29	33.06	1710.8	-
31	28	39.62	1710.9	1711	94	59	25.05	1710.9	1712
33	10	23.19	-	1711.5	95	120	31.78	1711	-
34	44	10.63	-	1711.2	97	120	32.24	1711	-
35	134	50.77	1711.6	-	98	107	7.07	-	1710.5
36	1	111.4	1712	-	99	109	3	1711.9	1710.6
37	43	27.89	1711	-	100	132	31.89	-	1710.3
38	49	15.03	-	1710.5	102	44	34.36	1710.5	-
41	35	6.40	-	1710	103	17	39.21	1710.4	-
42	82	30.61	1710.8	1712	104	42	52.40	1711.1	-
43	132	33.54	1711.1	-	105	125	12.36	1711.7	1710.9
45	18	22.82	1711	-	107	145	22.47	1711.3	-
46	10	35.90	1710.6	-	108	72	21.58	1710.1	1711.7
47	80	55.90	1711.9	-	109	145	26.40	1711.3	-
48	51	26	1710.5	1710.3	110	106	41.23	-	1710.5
50	150	14.56	1711.2	1711.2	111	94	51.31	1711.1	1710.6
51	27	25.23	1710.6	1711.9	113	144	14.86	1711	1710
53	84	26.40	1710.9	-	114	50	23.53	-	1711.2
54	37	23.25	1711.9	1710.8	115	64	38.01	1710.9	-
55	56	37	1711.9	-	116	27	40.31	1710.1	-
56	5	24.59	1711.5	1710.3	118	69	56.32	1711.4	-
58	85	56.30	1712	-	119	17	32.57	1710.4	-
59	21	10	-	1710.9	120	134	29.41	1710.5	-
60	81	26.68	1711.9	1710	121	59	21.95	1710.9	1711.2
62	4	1	-	1710.3	122	139	8.24	-	1712
63	117	31.25	1711.2	1711.1	123	124	29.18	-	1710.3
64	50	34.40	1710.9	1710.8	125	88	36.87	1711.2	-
65	14	11.70	-	1710.1	126	74	31.89	1710.6	1711.2
66	150	51.97	1711.8	-	127	53	44.72	1710.8	1711.5
68	118	42.05	1710.6	-	130	123	33.06	1710.5	1712
69	88	15	-	1710	132	1	114.4	1710.5	-
70	123	25.07	1710.6	1711.9	133	77	26.07	-	1710.8
71	1	473.7	-	1711.5	134	23	1	-	1711.1
72	51	34.13	1710.6	-	135	59	46.51	1710.1	-
75	26	11.31	-	1710.8	136	3	58.18	1711.3	-
76	145	35.90	1711.3	-	137	43	16.12	-	1710.3
78	126	26.57	1710.1	1711.9	138	31	48.25	1711.5	-
79	54	47.75	1712	-	139	54	24.69	1710.1	1710.3
81	60	59.03	1710.8	-	141	84	5.38	-	1711.2
84	89	37.69	1710.6	1711.1	142	132	25.07	1710.9	1710.3

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

143	74	39.56	1710.8	-	201	10	46.04	1710.1	-
144	146	44	1711.8	1711.7	202	148	35.22	1710.4	1710.9
146	48	21.02	-	1710	203	70	28.31	1711.4	-
147	56	21.58	1711.4	1711.8	205	71	49.04	1711.7	1712
148	39	51.47	1711.2	-	206	113	21.21	-	1711.7
150	80	30.06	1711.1	1711.2	208	78	51.24	1711.9	-
151	115	18.11	-	1710.8	209	78	34.13	1711.1	-
152	7	47.92	1711.3	1711.8	210	48	18.24	1711.3	1710.6
155	18	24.83	1711	-	211	79	48.02	1710.5	-
156	81	52	1710.1	-	213	67	44.64	1710.1	-
157	2	20	-	1711.1	214	128	38.83	1712	-
158	29	6.70	-	1711	215	19	49.20	1710.1	1711.2
161	29	30.80	1711.7	-	216	117	23.43	1711.1	1711.9
162	41	9.21	1710.8	1710.5	218	17	16.55	1711.6	1710.9
163	116	8.06	-	1710.1	219	132	37.48	1712	-
164	11	39.20	1710.1	-	220	86	19.10	1711.8	1711.9
165	40	28.23	1711.2	1710.3	221	149	11.40	-	1711.2
166	120	19.23	-	1710	222	31	25	-	1711.8
167	88	29.20	1710.1	-	223	150	16.12	1711.3	1710
169	95	36.35	1710.3	1711.8	224	21	52.69	1711.7	-
170	145	13.45	-	1710.1	225	98	50.44	1712	-
172	134	12.04	-	1711.8	226	1	101.1	1710.6	-
173	11	43.93	1711.2	-	227	3	16.27	-	1711.4
174	114	6.70	-	1711.8	231	66	36.49	1710.1	-
175	100	57.48	1710.9	-	235	32	13.60	-	1710.3
176	1	127	1712	1710.3	237	124	49.16	1710.6	-
178	86	14.21	1711.7	1711.5	238	4	36.06	1710.3	-
179	85	36.05	-	1711.8	239	34	43.82	1711.5	1711.8
180	35	42.43	1711	-	240	88	35.90	1711.3	-
181	107	32.06	1710.9	-	241	35	48.76	1711.8	-
182	132	50.56	1710.3	-	242	131	25.96	1710.3	1710
183	150	26.90	1711.5	-	243	82	39.35	1711.7	-
185	41	54.37	1711.1	-	244	27	33.24	1711.7	-
186	81	57.45	1711	-	246	132	33.61	1711.9	-
187	12	19	1710.9	1711	248	48	18.38	1711.3	1711.2
188	96	49.04	1710.8	-	249	73	9.84	1711.2	1710.1
190	11	7.07	-	1710.9	250	90	35.01	1710.1	1710.3
191	12	46.48	1710.3	-	251	27	27.01	1710.8	1710.3
192	42	26.40	1711.3	-	252	81	46.52	1710.8	-
193	139	50.24	1711.5	-	253	1	12.16	1711.7	-
194	12	34.98	1710.4	-	254	16	12.64	-	1710.1
195	109	20.39	1710.1	-	256	106	18.43	1711.4	1711.9
196	60	41.59	1711.7	-	257	60	53.81	1710.8	-
197	106	42.10	1710.1	-	258	29	27.20	1711.7	-
198	30	43.01	1710.1	-	259	48	32	1711.6	-
199	15	32.01	1710.3	1711.9	260	118	14.31	1710.1	1711.5

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

262	41	11.18	1710.9	1710.5	311	112	2	-	1711.2
263	46	50.28	1710.1	-	312	1	12.64	1711.3	-
265	142	10	-	1711.5	313	66	35.84	1712	1711.5
267	21	23.40	1710.9	-	314	15	35.60	1710.4	1710.3
269	9	58.13	1710.8	-	316	111	46.69	1711	1710.5
271	20	42.43	1710.6	1710.6	318	105	45.48	1711.2	1711
273	32	39.82	1712	-	320	23	27.80	1710.8	-
275	33	35.35	1711.2	1711.5	321	61	42.94	1711.2	1711.5
278	38	38.27	1710.9	-	322	124	43.68	1710.1	1711.5
279	9	16.03	-	1711.8	323	92	25.07	1710.9	1711
283	1	118.1	1710.9	-	324	136	32	1711.1	-
284	79	24.41	1711	1710.6	325	21	39.92	-	1711.7
285	151	23.19	1710.6	1710.3	327	68	27.31	1711.6	1710.5
289	105	46.61	1710.1	1711.7	328	117	49.33	1710.4	-
290	39	19.41	1710.4	1710.6	331	86	27.31	1712	-
293	93	31.89	1711.4	1711.2	332	27	21.26	1710.9	1711.5
294	44	27.31	1710.5	-	333	64	21.63	-	1710.1
295	96	43.01	1710.3	1711.5	335	81	30	1712	1710.3
296	57	6	-	1711.2	336	46	11.40	-	1711.7
297	83	3.60	-	1710.3	337	106	25.94	1711.3	1710.3
298	81	53.23	1710.9	-	338	66	50.24	1711.1	-
299	94	29.27	1711.7	-	339	102	18.24	1710.8	1710.3
300	91	40.31	1712	1710	341	25	48.10	1711.8	-
301	42	24.04	1711.3	-	342	29	38.20	1710.9	-
302	2	52.43	1711.5	-	343	39	14.42	1710.5	1710.6
303	100	38.07	-	1710.6	345	20	54.45	1710.3	-
304	83	21.02	1711.3	-	346	127	26.17	1710.4	-
305	109	18.02	1710.1	-	347	23	26.62	1710.9	-
306	102	50.69	1711.7	-	348	78	50.99	1711.8	-
307	108	38.62	1710.1	-	349	147	36.67	-	1710.6
309	15	50.96	1711.8	-	350	30	18.38	-	1711.4
310	118	22.02	1710.4	-					

- **Caso 2: datos**

En la Tabla A.4 se presenta el resumen de la capacidad obtenida en cada una de las pruebas realizadas para el caso 1, donde la SINR objetivo es de -4 dB. Se observa que en todas las pruebas realizadas el *Throughput* obtenido al aplicar el algoritmo basado en GT supera al valor obtenido sin GT. Se observa que el *Throughput* obtenido en este caso es mayor que en el caso 1.

Tabla A.4. Capacidad obtenida. Escenario 1 – datos.

Prueba No	Total UE	% UE conectados GT	Throughput medio GT (Mbps)	% UE conectados sin GT	Throughput medio sin GT (Mbps)
1	345	49.3	144	26.8	47.8
2	364	54.3	149.5	28.9	55.5
3	334	55.2	148.3	31.3	59.3
4	356	53	148	29	52.3
5	367	51.2	149.3	31	52.7
6	357	56.5	150	32.2	59.86
7	324	51.7	147.4	29	49.9
8	353	47.8	146.7	27.7	48.9
9	327	49.4	145	33.4	56.7
10	350	53.5	145	31.8	57.8

Para las pruebas realizadas se obtienen los resultados de Throughput en cada uno de los FAP dentro de la red de análisis. Específicamente para el caso de análisis presentado en el capítulo 5 (Prueba N° 6), dicho resultados se consignan en la Tabla A.5. Se observa de nuevo que para en cada AE, el *Throughput* es mayor al aplicar el algoritmo de asignación de espectro basado en GT. Los FAP que no se encuentran consignados en la Tabla son aquellos que no tienen ningún UE asociado.

Tabla A.5. *Throughput* de cada AE. Escenario 1 – datos.

AE	Throughput con GT (Mbps)	Throughput sin GT (Mbps)
1	0.83	0.06
3	2.50	0.34
4	1.81	1
6	2.23	1.35
7	1.63	1.11
8	1.21	0.70
9	0.48	0.42
11	2.06	0.55
12	0.10	0.001
14	0.32	0.05
15	1.02	0.57
16	1.40	0.54
17	0.71	0.38
19	0.46	0.13
21	0.35	0.15

22	0.50	0.33
23	1.65	0.28
24	0.61	0.03
25	0.86	0.28
26	2.22	0.78
27	1.38	0.62
28	1.42	0.55
29	0.39	0.35
30	0.90	0.22
31	0.96	0.33
32	2.07	0.30
33	0.65	0.13
34	1.61	0.42
35	1.62	0.67
36	1.90	0.35
38	1.07	0.24
39	0.38	0.05
40	0.33	0.14

41	0.94	0.21
42	0.74	0.57
43	0.74	0.15
44	0.33	0.01
45	2.06	0.87
46	0.89	0.09
47	1.24	0.23
49	1.25	0.36
50	0.34	0.04
51	1.38	0.97
52	1.61	0.78
55	1.06	0.48
56	1.10	0.37
57	1.35	0.25
59	1.74	0.57
60	2.47	0.31
61	2.30	0.69
62	1.17	0.26

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

64	1.92	0.63	92	0.76	0.11	126	0.41	0.31
65	1.76	1.10	93	0.13	0.01	127	0.61	0.45
66	1.12	0.43	94	0.75	0.13	128	0.21	0.20
68	1.87	0.47	95	1.06	0.30	129	0.83	0.29
69	0.53	0.25	97	0.85	0.31	130	0.30	0.08
70	1.89	0.68	98	0.20	0.02	131	1.19	0.76
71	0.75	0.23	100	1.61	0.28	132	2.22	0.30
72	1.01	0.42	101	0.38	0.08	133	1.62	0.64
73	0.78	0.09	103	0.50	0.16	134	1.48	0.25
74	1.03	0.51	104	0.71	0.42	135	0.27	0.24
75	0.82	0.30	106	1.81	0.53	136	0.57	0.07
76	2.01	0.94	107	2.17	0.84	137	0.56	0.45
77	0.99	0.36	108	0.33	0.19	138	0.71	0.42
79	0.15	0.05	109	0.65	0.20	139	0.23	0.10
80	1.01	0.27	110	0.19	0.02	140	1.06	0.68
81	1.47	0.40	111	0.40	0.01	142	3.13	0.25
82	2.69	0.47	112	0.45	0.24	143	0.73	0.19
83	1.72	0.37	113	0.68	0.37	144	1.99	0.26
84	2.11	0.65	114	1.74	0.56	145	0.15	0.01
85	0.95	0.56	115	2.83	0.45	146	0.66	0.46
86	0.28	0.25	116	0.24	0.04	147	1.99	0.83
87	2.31	1.05	118	1.59	0.45	148	2.40	0.62
88	0.84	0.31	120	0.37	0.33	149	0.99	0.46
89	1.59	0.35	121	0.16	0.001	150	1.52	1.01
90	1.62	0.27	122	0.53	0.12			
91	1.85	0.30	125	0.32	0.06			

En la Tabla A.6 se registran para el caso 2, los datos generales de cada UE, como el AE al que están asociados, distancia a la que se encuentra del AE, la frecuencia asignada como resultado de implementar un algoritmo de asignación basado en GT y la frecuencia aleatoria usada en un método sin utilizar GT. Los UE que no están consignados en la Tabla, corresponden a los que no encontraron una frecuencia de transmisión que les permita alcanzar el nivel de SINR requerido por el servicio, con GT y sin GT.

Tabla A.6. Frecuencias asignadas a cada UE. Escenario 1 – datos.

UE	AE	Distancia (metros)	Frec con GT (MHz)	Frec sin GT (MHz)
1	106	38.20	1711.7	1711.7
2	41	50.32	1711.5	-
3	88	27.29	1710.5	1710.3
5	57	49.49	1711.9	-
6	34	32.38	1710.7	1710.1
7	41	17.72	-	1710.5
8	118	42.37	1711.9	-
9	14	33.54	1711.7	-
10	135	35.01	1710.3	-
11	145	42.37	1710.9	-
14	14	37.10	1710.9	-
15	1	370.5	-	-
16	84	12.04	1711.5	1710.3
17	131	29.73	1710.9	1710.9

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

18	37	48.27	1711.9	-	89	30	19.72	1711.7	1710.7
19	28	8.60	1710.3	1711.5	91	129	17.20	-	1710.1
20	29	51.47	1711.1	-	92	90	17.69	1710.9	-
21	104	22.02	-	1711.3	93	81	17.20	1711.7	1711.1
22	14	35.17	1710.3	-	94	76	57.24	1710.3	-
23	136	23.25	1711.1	1711.7	95	28	39.40	1711.5	-
25	39	58.69	1711.9	-	97	132	6.40	-	1711.1
27	149	14.76	-	1711.5	98	118	57.24	1710.9	-
28	148	52.47	1710.7	-	101	33	21.21	1711.9	1710.3
33	126	11.66	-	1710.5	102	86	44.77	1710.9	-
34	70	15.03	-	1710.1	103	5	54.67	1711.7	-
38	111	27.80	1711.3	1710.7	104	89	34.13	1711.7	-
40	25	31.06	1710.3	-	105	147	22.02	1711.3	1710.3
41	49	20.61	1710.5	-	106	97	35.35	1710.1	-
43	112	17.49	-	1711.5	107	55	29.20	1711.7	1710.5
45	117	13.60	-	1710.3	109	110	55.71	1710.5	-
47	144	18.24	1710.5	-	111	31	12.08	-	1710.9
49	107	9.21	-	1711.5	113	125	8	1710.1	1710.5
50	40	44.72	1710.7	-	114	37	43.41	1711.3	-
51	132	41.30	1710.9	-	116	14	36.40	1710.3	-
53	13	35.35	1710.3	1711.3	117	105	48.10	1710.1	-
54	66	24.20	1710.7	1710.3	118	49	20.88	1710.3	-
55	99	6.08	-	1710.3	119	84	31.30	1710.9	-
56	96	29.73	1710.3	-	120	14	26.01	1711.3	1710.9
59	144	22.02	1710.3	-	124	89	45.70	1711.1	-
62	146	26	1710.1	1710.5	125	76	24.02	1711.1	1711.7
63	7	3	-	1711.1	126	78	9.43	1711.1	1711.7
64	97	16.55	1711.1	1711.3	127	44	13.92	1711.5	1710.1
66	3	58.07	1711.3	-	128	99	26.90	1711.1	-
67	136	31.95	1711.7	-	129	54	18.43	1711.7	1710.5
68	98	10.19	-	1710.3	130	89	30.61	1710.1	1711.7
71	109	27.78	1711.5	1711.7	131	50	23.32	-	1710.9
72	18	41.23	1711.7	-	133	57	26.57	1711.1	-
73	131	41.78	1710.3	-	134	34	42.75	1710.3	-
75	72	27.73	1710.5	-	135	92	23	1711.5	1710.3
77	99	45.01	1711.9	-	138	129	56.88	1711.9	-
78	64	19.92	-	1710.5	139	111	23.34	-	1711.1
79	107	34.23	1710.9	-	140	133	35.11	1711.9	1710.3
80	76	26.47	1711.1	1710.9	141	32	38.60	1710.1	-
81	14	27.58	1711.3	-	142	11	49.73	1710.3	-
82	115	57.24	1711.3	-	143	128	17.88	-	1710.7
83	111	42.95	1711.7	-	145	3	45.45	1710.1	-
84	10	15.81	-	1711.1	146	41	52.46	1710.5	-
85	73	8.06	-	1711.9	147	30	36.24	1710.7	-
86	90	39	1710.1	-	148	53	58.69	1710.5	-
88	53	53.16	1710.1	-	149	89	39.11	1711.5	-

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

150	81	41.10	1710.7	-	212	123	35.46	1711.5	-
151	102	38.11	1710.1	1710.9	213	49	16.76	1710.9	1710.9
154	18	54.40	1710.7	-	214	21	24.20	1710.9	-
155	35	25.49	1710.1	1710.9	215	86	52.63	1710.1	-
157	145	43.82	1711.3	-	216	87	6.08	-	1710.3
158	97	26	1710.5	-	217	119	50	1710.1	-
159	69	41	1711.7	-	219	69	33.60	1710.1	1710.5
160	55	39.29	1710.1	-	220	91	27.20	-	1710.9
161	38	10.04	-	1711.5	222	140	16.12	-	1711.9
163	27	36.40	1711.1	-	223	27	10.04	-	1710.9
165	40	24.33	-	1710.1	224	94	11.18	-	1710.3
166	136	26.30	1710.3	-	225	25	17.80	1711.7	1711.9
167	123	40.05	1711.1	-	226	122	40.70	1711.5	1711.9
168	110	17.69	-	1711.9	227	88	42.94	1711.9	-
169	88	34.92	1711.3	-	229	57	26.24	1710.3	-
170	48	29.06	1711.7	1710.1	230	56	27.58	1710.3	-
172	121	10.44	-	1710.7	232	12	35.22	1710.3	1710.5
175	40	53.22	1711.9	-	233	21	48.83	1711.7	-
176	57	5.38	-	1710.3	234	88	36.79	1710.1	-
178	72	22.02	-	1711.5	235	91	38.47	1711.3	-
180	115	19.41	-	1710.9	236	2	18.02	1710.1	1710.3
181	104	33.52	1710.9	-	238	79	25.94	1711.5	1710.7
182	140	50.15	1711.3	-	239	41	30.23	1711.1	-
183	99	25.45	1711.1	-	240	136	29.41	1710.1	-
184	87	18.02	1711.3	-	241	113	20.12	1711.9	1710.1
185	68	32.28	1710.7	1711.3	242	101	6.32	-	1710.5
188	97	33.61	1711.9	-	243	6	17.46	-	1711.7
189	1	18.02	1710.3	-	244	145	46.69	1711.9	-
190	85	49.67	1711.9	-	247	103	5.83	-	1710.9
191	71	20.88	-	1711.9	248	85	10.44	-	1711.1
192	151	25.55	1711.5	1711.5	249	131	43.93	1710.1	-
193	117	56.75	1710.5	-	250	57	26.40	1710.3	-
195	58	50.77	1711.7	-	251	56	10	-	1711.9
196	15	19.02	1711.1	1710.7	253	90	14.31	1711.1	1711.1
197	53	54.58	1710.1	-	254	116	46.32	1711.5	-
198	9	42.48	1711.3	-	257	1	37.65	1711.3	-
199	5	25.49	-	1711.7	258	72	19.20	1711.7	1710.7
201	112	59.23	1711.9	-	259	58	23.34	1711.3	1710.7
202	144	11.31	-	1710.7	260	29	27.20	1711.5	1711.9
203	59	20.61	-	1711.7	261	119	18.02	1710.9	1710.1
206	85	45.17	1711.3	-	263	71	58.82	1710.9	-
207	148	28.44	-	1711.7	264	92	56.30	1710.1	-
208	149	46.09	1711.1	-	265	21	21.02	1710.9	1710.1
209	92	39.44	1711.1	-	266	45	20	1710.9	1710.5
210	39	44.77	1710.3	1711.1	272	76	56.30	1710.1	-
211	54	17.88	1711.9	1710.5	273	1	10.63	1710.9	-

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

274	11	59.30	1710.9	-	312	143	12.16	-	1711.1
276	99	44.65	1710.7	-	313	1	29.41	1711.9	-
277	137	56.64	1711.5	-	315	36	50.28	1711.9	-
278	76	42.95	1711.7	-	317	73	29.06	1710.5	-
279	96	53	1711.3	-	320	128	28.84	1711.3	-
280	139	20.51	1711.9	-	321	21	35.11	1711.3	-
281	77	18.11	-	1710.1	323	145	32.69	-	1711.7
283	96	10.81	-	1711.1	324	113	26.92	1711.7	-
284	95	40.60	1710.5	-	325	82	10	-	1710.1
285	83	17.02	1710.3	1711.9	329	65	7.81	-	1711.3
286	66	27.20	1710.7	1711.3	331	37	52.32	1710.3	-
287	124	33.24	1711.3	-	332	129	55.65	1710.7	-
288	116	38.05	1711.9	1711.7	337	108	59.50	1711.9	-
289	52	22.67	1710.3	1711.7	338	121	59.93	1710.1	-
290	130	21.21	1711.7	1711.1	339	117	23.53	1711.3	-
291	79	36.23	1711.9	-	341	60	48.38	1710.1	-
292	140	46.84	1711.1	-	342	90	14.42	1711.3	1711.9
293	8	41.01	1711.5	-	343	97	17	1711.3	1710.1
297	141	20.02	1710.7	1711.9	345	18	41.59	1710.3	-
298	138	28.16	-	1711.5	347	93	39.35	1711.9	-
300	134	18.11	-	1710.9	348	25	40.80	1710.9	-
302	36	32.55	1710.1	1711.3	349	75	12.64	1711.1	1710.9
303	89	49.40	1711.1	-	351	130	29.41	1710.5	-
304	45	19.23	1711.1	1710.1	352	37	53.03	1710.7	-
305	144	43.18	1711.7	-	355	24	41.77	1711.1	-
306	140	49.09	1711.9	-	356	79	50.04	1711.1	-
308	79	27.65	1710.3	1711.7	357	9	20.22	1710.5	1710.3
311	104	32.80	1710.5	-					

- **Caso 3: voz y datos**

En la Tabla A.7 se presenta el resumen de la capacidad obtenida en cada una de las pruebas realizadas para el caso 3. En este caso se les asigna aleatoriamente a los UE el tipo de servicio, donde la SINR objetivo puede ser de -7dB (voz) o -4dB (datos). Igual que en los casos anteriores se observa que en todas las pruebas realizadas el *Throughput* obtenido al aplicar el algoritmo basado en GT supera al valor obtenido sin GT.

Tabla A.7. Capacidad obtenida. Escenario 1 – voz y datos.

Prueba No	Total UE	% UE conectados GT	Throughput medio GT (Mbps)	% UE conectados sin GT	Throughput medio sin GT (Mbps)
1	330	58	109.7	34	32
2	345	57.3	105.2	35.6	33.5
3	353	54	98.4	35	39.3
4	344	53.7	98	32.8	34.9
5	327	57	102.1	36.7	40.5
6	338	49.4	95	31	34
7	331	52.7	97.8	34.2	37.2
8	339	59.5	112.6	37.1	41.19
9	357	57.6	106.3	36.1	39.5
10	346	55.3	100.5	35.3	38.1

Para las pruebas realizadas se obtienen los resultados el *Throughput* en cada uno de los FAP dentro de la red de análisis. Específicamente para el caso de análisis presentado en el capítulo 5 (Prueba N° 8), dicho resultados se consignan en la Tabla A.8. Se observa que para en cada AE, el *Throughput* es mayor al aplicar el algoritmo de asignación de espectro basado en GT. Los FAP que no se encuentran consignados en la Tabla son aquellos que no tienen ningún UE asociado.

Tabla A.8. *Throughput* de cada AE. Escenario 1 – voz y datos.

AE	Throughput con GT (Mbps)	Throughput sin GT (Mbps)
1	0.67	0.01
2	1.38	0.62
3	0.35	0.16
4	0.47	0.13
5	0.49	0.38
6	0.72	0.26
7	2.58	0.19
8	0.10	0.03
9	1.18	0.42
10	0.78	0.26
11	1.38	0.52
13	0.22	0.05
14	1.47	0.08
15	2.38	1.37
16	0.28	0.17
17	1.65	0.23
18	0.87	0.26
19	0.15	0.02
20	1.34	0.73
21	1.21	0.58
22	1.15	0.77
23	1.16	0.25
24	0.29	0.15
26	0.78	0.49
27	2.03	1.21
30	0.91	0.21
31	2.86	1.01
32	0.28	0.06
33	0.07	0.01
34	1.82	1.19
35	0.71	0.10
37	0.46	0.25
39	1.34	0.45
40	1	0.41
41	1.83	0.41
42	1.55	0.85
43	0.13	0.006
44	1.66	1.08
45	0.64	0.15
46	0.41	0.26
47	1.33	0.73
50	0.48	0.01
51	0.51	0.16
52	0.66	0.27
53	1	0.29
54	0.93	0.13
55	0.69	0.30
56	0.24	0.002
57	1.79	0.99
59	0.33	0.14
60	0.32	0.12
62	0.97	0.57
64	0.34	0.26
65	0.14	0.01

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

67	1.22	0.66	92	0.99	0.19	127	1.73	0.80
68	2.02	0.31	96	0.85	0.61	128	0.60	0.17
69	0.19	0.01	100	2.99	0.53	129	0.66	0.26
71	2.02	0.32	101	0.97	0.07	130	1.99	1.03
72	0.47	0.38	102	0.63	0.05	131	0.29	0.20
73	0.46	0.41	104	0.62	0.13	132	1.70	1.20
74	0.57	0.45	105	0.14	0.07	133	0.84	0.19
75	1.77	0.36	106	1.66	0.18	134	0.48	0.27
76	0.24	0.16	108	0.20	0.06	135	0.81	0.36
77	0.32	0.07	109	0.26	0.17	136	1.93	0.67
78	2.03	1.20	110	0.48	0.04	137	0.55	0.20
79	0.17	0.04	111	0.11	0.06	138	1.37	0.41
80	0.18	0.06	112	0.24	0.21	140	0.37	0.22
81	0.52	0.25	113	0.80	0.30	141	1.38	0.20
82	1.65	1.17	114	1.57	0.48	142	2.17	0.96
83	1.43	0.34	115	0.29	0.26	143	0.72	0.15
84	1.45	0.38	119	0.38	0.13	145	0.23	0.15
86	0.32	0.20	120	0.29	0.09	146	0.64	0.21
87	0.75	0.36	121	1.21	0.46	147	1.83	1.27
88	0.75	0.35	123	0.31	0.20	148	2.32	0.008
89	0.25	0.14	124	0.76	0.17	150	0.94	0.57
90	0.08	0.05	125	0.88	0.34	151	0.69	0.36
91	1.19	0.29	126	0.94	0.51			

En la Tabla A.9 se registran para el caso 3, los datos generales de cada UE, como el AE al que están asociados, distancia a la que se encuentra del AE, la frecuencia asignada como resultado de implementar un algoritmo de asignación basado en GT y la frecuencia aleatoria usada en un método sin utilizar GT. Los UE que no están consignados en la Tabla, corresponden a los que no encontraron una frecuencia de transmisión que les permita alcanzar el nivel de SINR requerido por el servicio, con GT y sin GT.

Tabla A.9. Frecuencias asignadas a cada UE. Escenario 1 – voz y datos.

UE	AE	Distancia (metros)	Frec con GT (MHz)	Frec sin GT (MHz)
1	52	23.19	1710.3	-
2	26	24.08	1710.9	1710.3
3	126	43.65	1710.8	-
4	97	44.01	1711.3	-
5	137	49.04	1710.4	-
6	30	48.05	1710.9	-
7	14	51	1711.7	-
8	14	59.46	1711.1	-
9	22	36.68	1711.3	-
11	67	11.04	-	1710.3
12	7	24	1710.5	1710.3
13	113	33.60	1711.1	1710.1
15	123	38.11	1710.9	-
19	21	13	1710.9	1710.8
20	117	54.58	1710.5	-
21	148	38.01	1711.5	-
22	78	7.61	-	1712
23	58	23.34	1711.7	-
24	108	42.43	1711.2	-
25	40	40.81	1711.1	1711.3

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

26	18	5	1710.4	1711.5	86	2	35.35	-	1710.3
27	36	16.64	1711.1	1711.9	87	102	31	1711.9	-
28	43	31.14	1711.3	1711.2	90	96	13.41	-	1711.2
29	91	42.72	1711.4	-	91	55	27.29	1711.9	1711
30	135	22.47	1710.3	1711.9	92	15	32.20	1710.1	1710.9
31	92	21.09	1710.3	1710.3	93	52	25.49	1711.1	-
32	69	41.01	1710.1	-	94	122	22.36	1711.4	1711.4
33	83	26.83	1710.3	1711.3	95	33	22.02	1711.7	-
34	51	57.42	1710.6	-	96	137	41.78	1710.3	1711.2
35	126	25.45	1711.9	-	98	144	42.04	1712	1710
36	132	49.04	1711.9	-	99	24	7.07	1711.1	1710.1
37	151	55.44	1711.7	-	100	95	31.04	1712	1710.6
38	86	16.15	-	1711.1	101	125	43.18	1711.1	-
39	127	31.01	1710.3	-	102	45	39.31	1711.7	-
40	24	38.11	1710.1	-	103	35	22.36	1710.9	1710.9
41	116	51.42	1710.1	-	104	146	40.36	1711.9	-
42	81	39.01	1711.3	1710.7	105	96	51.19	1710.9	-
43	30	4.12	-	1711.3	106	102	22.62	1710.6	1710.9
44	12	18.02	1711.1	1711.5	107	141	47.51	1710.1	-
45	57	15.62	-	1710.3	108	80	54.81	1710.9	-
48	87	4	-	1710.7	111	39	21.84	1710.7	1711.7
49	52	31.82	1710.4	-	112	26	23	1710.8	1711.5
50	143	18.97	-	1710.3	113	142	41.34	1710.9	-
55	23	25	1711.3	1710.6	115	1	96.82	1711.9	-
56	14	52.47	1710.7	-	116	77	2.82	1711.1	1710.7
57	88	20.61	-	1710.6	118	22	11.40	-	1710.3
58	1	149.72	1711.5	-	119	122	48.41	1710.5	-
59	12	46.84	1710.3	-	120	67	40.79	1710.9	-
60	85	7	-	1711.7	122	69	35.51	1711.3	-
61	38	33.42	1710.5	-	124	3	44.59	1710.1	-
62	145	42.72	1711.7	-	126	91	32.3110	1711.5	-
63	119	58.05	1710.1	-	127	97	54.3323	1710.4	-
66	11	14.31	-	1710.6	128	69	30.0167	1711.3	1710.9
70	100	37.21	1712	-	131	116	28.4429	1711.1	-
71	52	52.61	1711.7	-	132	4	9.4868	-	1710.6
74	63	16.55	-	1710.7	134	125	35.4401	1710.1	-
75	138	15	-	1711.7	138	146	50.5371	1710.5	-
76	82	34.98	1710.5	1710.6	139	106	25.9615	-	1711
78	124	27.51	1711.9	1711.3	140	57	24.7588	1710.5	-
79	58	9.21	-	1711.5	141	147	39.9249	1711.1	1711.1
80	30	29.15	1710.7	-	142	35	35.1710	1711.9	-
81	5	16.64	-	1710	143	100	33.5261	1710.3	-
82	28	41.14	1711.9	1710.1	144	52	28.4429	1711.1	-
83	20	15.62	-	1710.9	146	76	7.0711	-	1710.3
84	6	13	-	1710.6	148	90	35.1283	1710.5	1712
85	74	11.40	-	1710.3	150	150	25.4951	1710.3	1710.9

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

151	110	52.7731	1711.4	-	216	146	28.6356	1710.1	-
152	101	39.8246	1710.1	1711.4	217	24	48.7647	1711.9	-
153	22	41.7253	1710.9	-	218	113	37.7359	1711.3	1710.1
154	79	13.1529	-	1711.7	221	7	48.1041	1711.3	-
155	26	33.8378	1710.6	-	222	95	24.1868	1712	1710.6
156	148	2	-	1711.5	223	82	54.5619	1710.1	-
157	49	23.3238	1710.7	-	224	127	21.5407	1711.1	1711.5
160	50	31.0644	1711.5	1710.1	225	58	25.0799	1711.5	-
161	54	36.0139	1711.5	1710.3	226	23	47.5395	1710.1	-
162	122	26.0768	1711.9	1711.4	227	46	18.1108	-	1711.5
164	64	36.1248	1710.6	1710.6	228	62	46.1736	1711.6	1710.5
165	95	58.1378	1710.9	-	229	120	27.2947	1712	1711.9
168	137	51.4198	1711.9	-	230	38	18.8680	1711.3	1711.9
169	21	26.4008	1711.7	-	231	37	35.4401	1710.9	1711.5
170	27	56.1427	1710.4	-	232	120	42.4500	1711.1	-
172	108	8.9443	-	1711.4	234	83	43.0116	1711.3	-
174	139	41.1096	1710.9	-	235	99	10.2956	-	1710.3
175	35	29.5466	1711.5	-	236	29	37.0540	1710.5	-
176	47	22.0227	1711.3	1711.1	237	69	40.3113	1711.9	-
177	4	23.3452	1711.5	-	238	142	23.7697	1711.5	1710.1
178	18	36.4005	1710.6	-	241	105	27.2947	1711.3	1710.3
179	52	19.2354	1710.9	1711.3	242	142	21.4709	1711.5	1711.7
181	53	31.0161	1711.4	-	243	1	84.4038	1711	-
182	95	43.0116	1710.3	-	244	127	19.6977	1710.9	1710.9
185	52	43.1045	1710.5	-	245	3	24.1868	1710.3	1711.4
187	23	23.3452	1711.3	1711.7	246	41	25.8070	1710.7	1711.7
188	1	147.7566	1710.1	-	247	9	25.9422	1711.9	1710.5
189	138	21.9545	1711.7	-	248	22	25.1794	1710.3	-
192	71	6.0828	-	1710	249	125	55.4617	1711.1	-
193	131	53	1710.4	-	250	139	4.4721	-	1711.3
195	36	13.4164	1711.1	1711.3	251	33	16.5529	1711.8	1710.9
196	67	29.2746	1710.8	-	252	61	19.8494	-	1710.1
198	100	22.2036	1710.8	1711.5	253	80	42	1710.3	1711.2
199	146	18.6011	-	1711.1	254	83	24.0832	1710.5	1711.3
200	103	14.3178	-	1710.6	255	38	20.2237	1711.4	1711.2
201	132	31.7805	1710.9	1710.9	256	58	28.0179	1711.6	-
203	104	10	-	1711.7	257	42	27.2947	-	1710.7
204	140	17.4642	-	1711	258	120	21.2132	1710.5	1710.1
207	48	14.2127	-	1711.9	260	91	8.0623	-	1711.2
208	3	25.4951	1710.5	-	262	56	26.2488	1711.2	1711.9
209	130	35.3553	1710.6	1710	263	125	50.4777	1711.3	-
210	36	44.7772	1710.5	-	264	125	46.6905	1711.3	-
211	120	30.2324	1710.5	-	265	23	56.8859	1710.7	-
213	8	34.2053	1710.6	1710.3	266	146	44.9444	1710.5	-
214	99	36.6879	1710.3	-	267	60	36.4005	1710.4	1710.5
215	3	20.5183	1710.4	1711.5	270	68	35.3836	1710.3	1710.5

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

271	104	31.2410	1710.3	-	304	98	11.0454	-	1711.2
273	27	24.6982	-	1711.3	305	126	29.4109	1711.9	-
274	27	32.6497	1710.5	-	309	3	37.8550	1711.1	-
275	125	13.4536	-	1711.1	311	128	32.2800	1710.1	1710.1
277	13	14.1421	-	1710.3	312	39	55.1543	1711.9	-
278	116	9.0554	-	1710.9	313	119	52.3450	1710.5	-
279	16	37	1710.9	-	314	110	26.9258	-	1711.5
280	97	58.6003	1710.4	-	315	131	31.0644	1711.1	1710.1
282	90	28.4605	1710.4	1711	316	94	57.3149	1710.5	-
284	108	35	1711.1	-	317	26	48.2597	1711.7	-
285	133	25.0200	1711.7	1710.5	318	126	18.2483	1711.7	1711.9
286	110	43.0116	1711.9	-	320	38	40.4969	1711.2	-
287	128	35.0571	1710.1	1711.4	322	41	33.2415	1710.5	-
288	88	49.2544	1712	-	323	149	16.1245	-	1711.9
292	97	31.1127	1711	1710.8	324	134	29.9666	1711.3	1711.2
293	57	50.5371	1711.1	-	325	109	7.6158	-	1711.5
294	29	21.9545	-	1710.9	326	6	43.1711	1710.8	-
295	70	27.7308	-	1711.7	327	101	54.4243	1710.9	-
296	124	27.2029	1712	1711.7	328	107	45.2217	1710.1	1711.2
297	127	53.2259	1711.7	-	330	119	2.8284	-	1710.7
298	76	51.2250	1711.3	-	331	119	57.2451	1710.5	-
299	89	31.2410	1710.7	1710.5	334	26	27.2947	1710.8	1711.2
300	37	54.7449	1711.9	-	335	23	50.6952	1710.4	-
301	76	14.5602	1711.1	-	336	31	22.4722	-	1710.3
302	6	25.2982	1710.9	-					

A.2 Escenario 2: 100 FAP

- **Caso 1: voz**

En la Tabla A.10 se presenta el resumen de la capacidad obtenida en cada una de las pruebas realizadas para el caso 1, cuando en la red de análisis se reducen el número de FAP a 100 y donde la SINR objetivo es de -7 dB. Se observa que en todas las pruebas realizadas el *Throughput* obtenido al aplicar el algoritmo basado en GT supera al valor obtenido sin GT.

Tabla A.10. Capacidad obtenida. Escenario 2 – voz.

Prueba No	Total UE	% UE conectados GT	Throughput medio GT (Mbps)	% UE conectados sin GT	Throughput medio sin GT (Mbps)
1	347	48	57.6	32	0.015
2	326	53.3	60.04	35.2	0.018
3	331	51.2	58.3	34.4	0.016
4	325	49.7	57.2	35	0.021
5	364	46.5	55	27.9	0.018
6	337	45.2	53.8	30	0.014
7	344	53	59.1	29.8	0.017
8	359	50.9	58	28.7	0.015
9	354	47	54.7	31	0.019
10	342	48.6	56.4	34.2	0.014

Para las pruebas realizadas se obtienen los resultados de capacidad en cada uno de los FAP dentro de la red de análisis. Específicamente para el caso de análisis presentado en el capítulo 5 (Prueba N° 2), dicho resultados se consignan en la Tabla A.11. Se observa que para en cada AE, el *Throughput* es mayor al aplicar el algoritmo de asignación de espectro basado en GT. Los FAP que no se encuentran consignados en la Tabla son aquellos que no tienen ningún UE asociado.

Tabla A.11. *Throughput* de cada AE. Escenario 2 – voz.

AE	Throughput con GT (Mbps)	Throughput sin GT (Mbps)
1	0.98	0.01
2	0.82	0.37
3	0.45	0.15
4	0.32	0.17
6	0.80	0.44
7	1.52	0.38
8	0.53	0.12
9	0.46	0.14
10	0.93	0.27
11	0.21	0.18
13	0.12	0.01
14	0.62	0.28
15	1.12	0.73
16	0.48	0.16
17	0.16	0.02
18	0.89	0.36
19	0.47	0.14
20	0.52	0.14
21	0.02	0.01
22	0.39	0.05
23	1.27	0.56
25	1.07	0.16
26	0.22	0.13
27	0.38	0.24
28	0.56	0.17
30	0.99	0.44
31	1.02	0.56
33	0.43	0.03
34	0.27	0.20
35	0.04	0.01
36	1.22	0.47
37	1.04	0.66
38	0.51	0.13
39	0.39	0.19
40	1.15	0.61
41	0.41	0.16
42	1.28	0.39
43	0.49	0.13
45	0.83	0.18
46	0.28	0.21
47	0.46	0.20
48	0.45	0.23
49	1.42	0.38
50	0.82	0.13
51	0.34	0.02
52	1.31	0.22
54	1.40	0.28
55	0.17	0.10
56	0.48	0.22
57	0.09	0.03
58	1.19	0.79
59	0.66	0.11
60	0.30	0.23
61	0.72	0.31

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

62	1.22	0.51	75	1.31	0.20	89	0.68	0.02
63	0.15	0.13	77	0.48	0.14	90	0.63	0.01
64	0.82	0.10	78	0.68	0.17	92	0.34	0.01
65	0.47	0.28	79	0.80	0.19	93	0.37	0.02
66	1.13	0.52	80	1.01	0.27	95	1.08	0.05
67	0.20	0.16	81	0.84	0.02	96	0.38	0.01
68	1.26	0.32	82	0.07	0.003	97	0.35	0.02
69	0.65	0.16	83	0.25	0.02	98	0.44	0.01
70	0.54	0.008	84	0.37	0.009	99	0.61	0.02
72	0.32	0.29	85	1.34	0.04	100	0.48	0.01
73	0.48	0.17	87	0.30	0.02	101	0.7123	0.025198
74	0.09	0.07	88	0.59	0.02			

En la Tabla A.12 se registran para el caso 1, los datos generales de cada UE, como el AE al que están asociados, distancia a la que se encuentra del AE, la frecuencia asignada como resultado de implementar un algoritmo de asignación basado en GT y la frecuencia aleatoria usada en un método sin utilizar GT. Los UE que no están consignados en la Tabla, corresponden a los que no encontraron una frecuencia de transmisión que les permita alcanzar el nivel de SINR requerido por el servicio, con GT y sin GT. Se obtiene que el porcentaje de MUE conectados disminuye con respecto al escenario 1.

Tabla A.12. Frecuencias asignadas a cada UE. Escenario 2 – voz.

UE	AE	Distancia (metros)	Frec con GT (MHz)	Frec sin GT (MHz)
3	94	43.18	1711.0	-
5	69	37	1711.7	1711.2
6	31	44.94	1710.3	-
7	41	9.89	-	1710.6
8	89	53.46	1711.4	-
9	73	26.24	1710.1	1712
12	29	40.22	1711.3	1712
13	22	33.83	-	1712
14	41	39.56	1711.2	-
15	25	46	1710.9	1711.7
16	97	19.10	1711.2	1710.3
17	26	50.56	1711.4	-
18	64	29.52	1710.1	-
19	46	47	1710.4	-
20	36	42.9	1710.6	1712
22	64	51.8	1711.8	-
24	79	44.5	1710.3	-
25	92	23.02	1710.9	1711.4
28	64	52.34	1711.7	-
29	51	45.89	1711.3	-
30	52	39.20	1711.5	1710.3
32	32	15.65	-	1710
33	1	22.82	1711.1	-
34	69	49.33	1711.2	-
37	98	27.20	1.710.3	1711.4
38	60	5	-	1710.6
39	44	21.84	1711.1	1712.0
40	6	4.12	1711.1	1710
41	31	33.06	1710.9	-
42	64	34	1710.1	1710.8
46	98	35.3	1711.4	-
47	68	13.9	-	1710.9
49	63	19	1711.1	1711.5
50	59	49.7	1710.6	-
51	15	33.6	1710.4	1710.6
57	23	36.064	1710.6	1712
58	59	9	-	1710.6
60	72	33.97	-	1710.5
61	51	16.40	-	1711.5
63	70	21.93	1710.4	1711.1

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

64	73	49.49	1711.1	-	140	74	49.98	1711.8	-
65	57	15.52	1711.3	1711.8	141	87	6.7	-	1711.8
66	18	46.32	1710.1	-	142	20	45.04	1710.4	-
67	52	57.45	1710.6	-	148	96	42.19	1711.7	-
68	53	42.43	1711.8	-	150	76	39.62	-	1710.5
69	1	28.23	1710.1	-	151	14	27.45	1711.7	1710.9
70	73	37.12	1711.0	-	152	50	20.61	1711.8	1710
71	11	55.94	1711.3	-	153	101	18.43	1712.0	1711.9
74	82	49.09	1710.4	-	154	79	27.29	1710.9	1711.9
76	67	22.67	-	1710.6	155	18	35.01	1710.1	1711.0
77	94	53.26	1711.2	-	157	16	7.2	1711.9	1710.6
78	49	42.20	1711	-	158	50	42.01	1710.5	-
82	95	59.03	1711.2	-	159	61	27.65	-	1710.8
83	79	36.68	1711	1711.2	161	87	29.27	1711.5	-
86	19	59.61	1711.3	-	164	3	51.41	1710.4	-
87	68	33.06	1711.1	-	165	22	28.30	1710.3	1710.1
89	62	28.17	1710.6	1710.8	166	84	38	1710.1	-
90	45	42.19	-	1711.2	168	27	28.42	1710.1	-
91	43	27.07	1711.4	1710.1	169	18	51.08	1711.4	-
95	37	17	1711.2	1711.9	170	64	55.57	1711.1	-
97	33	3.162	-	1711.2	172	41	42.52	1710.1	-
101	64	43.56	1711.1	-	173	31	34.92	1710.9	-
103	6	52.20	1711.8	-	174	66	52.81	1710.5	1710
104	91	34.88	1710.5	1711.1	175	10	43.17	1711.4	17100
105	38	12.04	-	1710.3	176	5	20.51	1711.9	17103
107	81	20.61	1710.3	1710.6	178	27	34.23	1710.6	-
108	72	54.34	1711.4	-	181	53	36.24	1.711.3	-
110	75	42.42	1710.4	1711.5	183	57	12.20	1711.2	1711.5
111	18	41.10	1710.8	-	184	15	29.68	1710.3	1710.3
112	29	58.52	1711.6	-	185	95	38.63	1710.4	1711.4
113	67	58.85	1711.0	-	186	73	18.43	1710.1	1710.3
116	31	24.18	1711.2	1711.7	187	55	22.13	1711.6	1710.8
118	71	23.34	1711.7	1712.0	188	13	55.86	1711.0	-
120	99	16.64	-	1710.9	189	86	51.42	1711.8	-
121	24	40.36	1711.1	1710.3	190	83	43.82	1710.6	1710.1
122	10	45.60	1711.2	-	191	30	15.26	1711.1	1711.9
123	15	47.43	1711.4	-	192	20	45	1712.0	-
124	18	33.28	1710.4	1711.5	193	99	30.23	1711.7	-
126	18	38.20	1711.1	-	195	32	27.29	1710.9	-
127	34	31.30	1711.2	1710.1	200	8	13.41	-	1711.5
129	74	28.84	1711.5	1710.6	201	18	34.20	1710.9	1711.2
131	96	32.20	1711.1	1710.9	202	78	13.03	-	1710.8
133	80	58.54	1711.1	-	203	28	48.41	1710.4	-
134	44	42.43	1712	-	206	91	28.86	1711.4	1711.9
135	25	47.26	1710.9	1710.3	208	27	45.89	1710.5	-
136	55	43.56	1710.5	-	209	26	4.4	1711	1711.2

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

210	6	50.10	1710.4	-	272	77	4.1	-	1711.4
211	89	55.31	1711.2	-	276	75	48.46	1710.5	1711.9
212	19	43.41	-	1710.6	277	34	46.04	1710.6	-
213	80	53.60	1712	-	278	46	24.18	1711.3	1.710.6
214	54	49.24	1710.5	-	279	91	33.24	1711.5	1.711.4
215	11	5.6	-	1711.7	280	94	37.73	1711.1	1710.3
217	89	55.9	1711.2	-	281	53	48.05	1.710.4	-
218	94	35.8	1.710	1710.3	283	63	15.13	1711.2	1711.1
219	1	24.02	1711.4	-	284	16	51.88	1710.5	-
220	53	25.41	1711.4	1710.9	285	93	56.08	1710.1	-
221	58	57	1712	-	286	35	14.31	-	1711.2
222	27	7.6	-	1711.9	287	43	31.7	1711.4	-
228	24	35.90	-	1710.3	289	53	21.94	1711.5	1711.7
231	100	17.80	1711.2	17112	292	52	56.75	1711.6	1710.5
232	90	32.55	-	1710.6	293	26	35.69	1711.2	-
233	93	54.08	1711.3	-	295	65	27.20	1711.5	1711.0
236	61	43.26	1710.1	-	296	41	32.01	110.3	-
237	43	22.80	1711.5	1710.6	298	13	46.64	1711.5	1711.5
238	65	24.20	1711.5	1710.6	300	33	26.62	1711.8	-
241	14	32.24	1711.7	1710.1	301	76	48.37	1711.4	-
242	3	21.09	-	1710.6	303	39	59.03	1710.9	-
245	74	23.08	1711.4	1711.9	304	88	37	1711.5	1710.1
248	58	28.65	1710.5	1711.2	306	65	30.67	1711.4	1710.1
249	46	24.08	1711.2	1710.5	307	49	21.54	-	1711.7
250	28	21.37	-	1711	309	72	57.87	1711.1	-
251	85	15.26	1710.5	1712	310	47	19.20	-	1710.3
253	33	20.59	1711.7	-	311	74	36.05	1710.6	-
254	2	28.63	1710.1	1710.5	312	89	14	-	1711.1
255	91	36.05	1710.4	-	313	95	52.34	1711.9	-
258	20	24.18	-	1710.8	314	19	51.08	1711.8	1711.2
259	96	31.25	111.2	1710.8	316	98	33.61	1711.3	1711
260	21	35.35	111.0	1712	317	84	23.43	1711.2	1710.9
263	93	14.14	-	1711.9	320	94	40.05	1710.5	1710.3
264	45	30.80	1711.7	1711.5	321	95	53.07	1710.3	-
267	13	38.20	1711.5	1710.6	322	41	34.01	1711	-
268	80	18.11	1710.4	1711.4	325	12	19.10	-	1710.1
269	49	36.05	1710.9	-	326	100	18.02	1711.1	1710.8
270	7	50.92	1710.3	-					

- **Caso 2: datos**

En la Tabla A.13 se presenta el resumen de la capacidad obtenida en cada una de las pruebas realizadas para el caso 2, cuando en la red de análisis se reducen el número de FAP a 100 y donde la SINR objetivo es de -4 dB. Se observa que en

todas las pruebas realizadas el *Throughput* obtenido al aplicar el algoritmo basado en GT supera al valor obtenido sin GT.

Tabla A.13. Capacidad obtenida. Escenario 2 – datos.

Prueba No	Total UE	% UE conectados GT	<i>Throughput</i> medio GT (Mbps)	% UE conectados sin GT	<i>Throughput</i> medio sin GT (Mbps)
1	331	45	150	20.8	32.5
2	350	39	129.3	19.2	30.4
3	331	44	141.3	17.3	28.3
4	326	43.5	140.7	15.7	23.4
5	364	41.3	138	19	31
6	337	42.6	140.6	18.6	29.6
7	344	40.8	139.2	17.5	27.5
8	359	41	138.5	17.8	26.9
9	354	44.3	147.4	15.6	23.2
10	342	42	139	19.5	30.8

Para las pruebas realizadas se obtienen los resultados de capacidad en cada uno de los FAP dentro de la red de análisis. Específicamente para el caso de análisis presentado en el capítulo 5 (Prueba N° 1), dicho resultados se consignan en la Tabla A.14. Se observa que para en cada AE, el *Throughput* es mayor al aplicar el algoritmo de asignación de espectro basado en GT. Los FAP que no se encuentran consignados en la Tabla son aquellos que no tienen ningún UE asociado.

Tabla A.14. *Throughput* de cada AE. Escenario 2 – datos.

AE	<i>Throughput</i> con GT (Mbps)	<i>Throughput</i> sin GT (Mbps)
1	16.17	0.02
2	10.10	0.40
3	0.53	0.09
4	13.01	0.45
5	17.39	0.76
6	15	0.95
7	0.26	0.04
8	0.20	0.05
9	19.04	0.62
10	19.86	0.32
11	0.16	0.09
12	0.64	0.31
13	16.94	0.30
14	10.81	0.26
15	11.55	0.60
16	0.72	0.12
17	11.99	0.68
18	16.43	0.32
19	0.70	0.29
20	0.87	0.53
21	14.04	0.37
22	21.60	0.92
23	25.94	0.99
24	24.18	0.68
25	0.70	0.39
26	16.07	0.34
27	17.85	0.91
28	0.74	0.11
29	0.98	0.38
30	0.85	0.22
31	0.66	0.55
32	0.70	0.25
33	0.53	0.11
34	15.71	0.43
35	15.68	0.42
36	12.62	0.44
37	18.14	0.54
38	18.03	0.41
39	23.16	0.56
40	0.41	0.38
41	0.63	0.22
42	20.06	0.33
43	3.2	0.65
44	0.34	0.05
45	12.68	0.37

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

46	0.28	0.03	65	0.92	0.31	84	0.46	0.10
47	16.01	0.35	66	11.41	0.46	85	26.05	10.3
48	0.64	0.37	67	11.29	0.35	86	18.74	0.46
49	24.84	11.1	68	18.11	0.53	87	22.25	14.2
50	24.01	0.74	69	24.84	0.60	88	24.25	0.83
51	0.82	0.31	70	0.67	0.31	89	0.32	0.03
52	0.97	0.51	71	0.10	0.05	90	19.51	0.02
53	0.42	0.23	72	16.37	0.59	91	16.17	0.40
54	0.21	0.06	73	0.71	0.46	92	10.10	0.09
55	0.90	0.05	74	18.22	0.66	93	0.53	0.45
56	0.60	0.24	75	29.48	13.1	94	13.01	0.76
57	14.53	0.58	76	0.46	0.06	95	17.39	0.95
58	0.41	0.38	77	20.21	0.63	96	15	0.04
59	0.83	0.27	78	16.15	0.28	97	0.26	0.05
60	0.92	0.27	79	14.10	0.28	98	0.20	0.62
61	0.90	0.63	80	11.40	0.43	99	19.04	0.32
62	14.34	0.78	81	20.70	0.36	100	19.86	0.09
63	10.35	0.35	82	11.42	0.30	101	0.16	0.31
64	20.46	0.49	83	16.23	11.1			

En la Tabla A.15 se registran para el caso 2, los datos generales de cada UE, como el AE al que están asociados, distancia a la que se encuentra del AE, la frecuencia asignada como resultado de implementar un algoritmo de asignación basado en GT y la frecuencia aleatoria usada en un método sin utilizar GT. Los UE que no están consignados en la Tabla, corresponden a los que no encontraron una frecuencia de transmisión que les permita alcanzar el nivel de SINR requerido por el servicio, con GT y sin GT.

Tabla A.15. Frecuencias asignadas a cada UE. Escenario 2 – datos.

UE	AE	Distancia (metros)	Frec con GT (MHz)	Frec sin GT (MHz)
1	52	51.15	1711.9	-
5	83	44.94	1710.1	-
8	23	44.04	1711.5	-
9	100	24.41	1710.9	-
12	61	17.49	1711.3	1711.1
14	6	44.38	1710.3	-
15	95	14.03	1710.5	-
19	87	28.07	1710.5	1711.1
22	33	52.4	1711.9	-
24	70	43.70	1711.9	1710.5
27	96	19.10	1711.5	1711.7
34	12	12.80	-	1711.9
37	23	21.40	1711.1	1711.5
38	38	34.66	1711.3	-
40	61	31.40	-	1711.3
41	96	31.06	1710.7	-
43	66	8.063	-	1710.1
44	83	44.72	1711.7	-
45	99	40.05	1711.5	-
48	73	37.85	1710.7	1710
50	89	32.80	1711.5	-
51	43	38.05	1710.5	-
54	42	34.88	1710.5	1710
55	49	57.55	1710.9	-
57	32	50.60	1710.7	-
58	94	9.055	-	1711.7
60	27	44.55	1711.9	-
63	29	46.87	1710.5	-

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

64	68	12.53	-	1710.9	156	36	8.246	-	1710.1
65	54	14.86	-	1710.3	158	101	30.01	1711.1	1711.7
67	39	39.45	1710.5	-	159	83	53.14	1711.3	-
68	63	54.57	1711.9	-	160	61	27.16	1710.1	-
70	56	37.80	1710.7	-	161	43	35.35	1711.3	-
72	13	44.40	1711.9	1711.7	162	11	22.13	1710.7	1710
73	16	25	1710.5	1711.1	165	35	18.02	1711.1	1711.7
74	89	32.24	1711.3	-	166	98	25.70	1710.3	1711.9
77	38	40.31	1710.5	-	167	60	38.27	1710.1	-
80	89	40.71	1711.9	-	169	49	41.59	1711.3	-
81	53	39.20	1710.9	-	170	62	31.01	1710.5	1710.7
83	95	17.26	-	1710.3	171	75	53.53	1711.9	-
87	43	9.219	1711.7	1710.7	173	9	46	1711.1	-
89	12	37.33	1711.7	-	174	40	42.72	1710.9	1711.1
90	71	36.13	1710.7	1710.1	175	96	17.11	1711.7	1710.3
91	57	44.10	1710.9	1710.3	176	12	36.35	1711.1	-
94	52	13.92	-	1711.9	179	38	28.01	-	1711.3
95	66	58.52	1711.7	-	180	53	30.52	-	1711.7
98	14	28.79	1711.7	-	183	87	47.01	1711.5	-
99	35	48.50	1711.9	-	185	75	38.07	1711.3	-
100	85	50	1710.5	-	188	99	13.03	1711.1	1710.1
106	31	48.33	1711.3	-	190	100	17	-	1710.9
108	33	22.02	-	1711	191	78	59.23	1710.5	-
109	23	41.30	1710.7	-	194	17	51.62	1711.3	-
110	25	59.90	1711.1	-	196	9	19.41	1710.5	1710.3
111	49	48.01	1710.5	-	198	15	50	1711.9	-
113	15	44.38	1711.5	-	199	55	53.85	1710.1	-
115	50	58.83	1711.9	-	202	74	25.70	1710.3	1711.7
117	37	37.20	1710.3	-	204	21	17.02	1710.9	1710.5
118	89	47.01	1710.1	-	205	1	63.15	1711.9	-
127	38	36.68	1710.5	-	206	99	57.42	1711.9	-
129	55	25.61	1711.7	1710	207	99	56.61	1711.9	-
131	89	21.58	1710.7	-	208	24	44.29	1711.3	-
133	93	42.05	1711.5	-	209	37	26.68	1710.7	1710
136	95	28.31	1710.1	-	210	69	27.85	1711.5	-
140	52	36.05	1710.5	-	211	28	26.47	1710.7	1710.9
142	14	13.41	-	1711.9	212	25	50.44	1711.5	-
143	74	51.61	1711.3	-	213	89	26.40	1710.9	-
145	49	19.41	-	1710	214	92	47.50	1711.1	-
146	96	26.47	1711.1	-	215	87	50.01	1710.9	-
148	33	57.03	1711.1	-	218	58	19.10	1711.3	1711.5
149	49	53.23	1710.9	-	219	33	48.10	1711.9	-
150	66	43.17	1710.1	-	220	76	28.01	1710.5	1711
151	90	56.64	1711.9	-	222	19	16.55	1710.1	1711.1
153	87	43.56	1711.3	-	224	4	26.57	-	1710.9
154	67	52.17	1711.5	-	229	8	54.12	1710.3	-

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

230	62	37.12	1710.1	-	281	50	19.92	-	1710.5
232	63	57.27	1711.9	-	283	39	31.76	1710.3	-
233	88	28.31	1710.5	1711.5	284	32	17.80	-	1711.9
235	39	18.68	-	1710.1	285	22	17.26	-	1710.7
236	1	48.38	1711.5	-	287	42	47.38	1711.7	-
237	99	49.76	1710.3	-	288	63	43.18	1710.7	-
240	17	34.05	-	1711.7	291	90	58.59	1711.3	-
241	16	45.35	1711.1	-	296	99	15.62	-	1711.3
242	61	43.41	1710.9	-	297	60	24.33	1711.1	1711.1
243	25	26.90	1710.3	1710.9	298	6	47.43	1710.3	-
245	42	50.32	1711.1	-	299	3	39.81	1711.5	-
246	9	19.69	1710.5	1710.5	300	74	28.16	1710.7	1711.3
247	2	29.27	1710.5	1710.1	301	29	48.16	1710.5	-
251	64	41.88	1711.9	-	305	86	10.81	-	1711.5
252	17	41.18	1710.1	-	306	87	36.67	1711.9	-
254	56	21.84	1710.3	1710.3	307	43	37.12	1710.7	-
255	96	22.20	1710.3	-	309	19	25.49	1710.9	-
257	2	30.88	1710.1	1711.5	310	49	46.01	1710.1	-
258	3	14.03	1710.1	1711.9	311	44	22.67	1710.5	1710.9
260	32	51.10	1711.7	-	314	42	56.64	1710.1	-
265	67	35.46	-	1710.1	315	7	34	1710.1	1710.7
266	75	37.12	1711.3	-	316	62	47.38	1711.7	-
268	11	26.40	1710.9	-	317	43	49.25	1710.2	-
269	77	24.75	1710.3	1711	318	86	47.01	1711.7	-
270	46	21.09	-	1710	320	72	19.72	-	1710.9
271	12	51.35	1710.7	-	324	89	40.79	1710.1	-
272	64	21.54	1710.3	1711.1	325	81	6.708	-	1711.3
274	78	51	1711.9	-	328	75	45	1710.9	-
275	3	34.65	1710.7	-	329	27	32.75	1711.5	1710.1
277	32	47.16	1711.1	-	330	93	32.01	-	1711.7
279	80	55.75	1710.7	-					

- **Caso 3: voz y datos**

En la Tabla A.16 se presenta el resumen de la capacidad obtenida en cada una de las pruebas realizadas para el caso 3, cuando en la red de análisis se reducen el número de FAP a 100 y donde la SINR objetivo para algunos usuarios es de -7 dB y para otros de -4dB. Se observa que en todas las pruebas realizadas el *Throughput* obtenido al aplicar el algoritmo basado en GT supera al valor obtenido sin GT.

Tabla A.16. Capacidad obtenida. Escenario 2 – voz y datos.

Prueba No	Total UE	% UE conectados GT	Throughput medio GT (Mbps)	% UE conectados sin GT	Throughput medio sin GT (Mbps)
1	365	45.8	89.5	26.1	27.7
2	343	44	88.4	24.3	24.2
3	338	49.3	93.3	27	28.6
4	346	50	94.6	26.8	26.5
5	363	48.3	92	25.2	24
6	328	49	93.1	23.4	22.7
7	357	47.2	91.7	26	24.5
8	345	45.6	89	29.8	31.3
9	367	50.1	95.1	27.52	29.8
10	350	47	91.5	25	24.7

Para las pruebas realizadas se obtienen los resultados de Throughput en cada uno de los FAP dentro de la red de análisis. Específicamente para el caso de análisis presentado en el capítulo 5 (Prueba N° 9), dicho resultados se consignan en la Tabla A.17. Se observa que para en cada AE, el *Throughput* es mayor al aplicar el algoritmo de asignación de espectro basado en GT. Los FAP que no se encuentran consignados en la Tabla son aquellos que no tienen ningún UE asociado.

Tabla A.17. *Throughput* de cada AE. Escenario 2 – voz y datos.

AE	Throughput con GT (Mbps)	Throughput sin GT (Mbps)
1	1.6	0.22
2	1.48	0.59
3	1.71	0.16
5	0.77	0.29
6	1.24	0.55
7	0.73	0.30
8	0.33	0.24
10	0.88	0.21
12	1.95	0.33
13	2.40	1.58
14	0.28	0.25
15	1.48	0.33
16	0.49	0.09
18	1.73	0.71
19	0.88	0.09
21	2.47	0.49
23	1.61	0.30
24	0.57	0.03
25	0.71	0.02
26	0.62	0.23
27	1.92	0.22
28	0.60	0.12
29	0.19	0.03
31	2.30	0.21
32	1.46	0.30
33	0.68	0.36
34	1.77	0.78
35	0.81	0.15
36	0.50	0.003
37	0.92	0.48
38	0.68	0.24
39	2.40	0.21
40	1.35	0.20
41	0.29	0.08
42	1.64	0.06
44	1.20	0.28
45	0.21	0.19
48	1.88	0.79
49	1.16	0.48
50	0.19	0.13
51	0.34	0.05
52	0.70	0.38
53	0.25	0.20
54	2.62	1.16
56	1.29	0.30
57	0.50	0.28
58	1.17	0.20
59	0.78	0.38
60	0.59	0.45
61	0.26	0.17
62	1.88	0.48
63	0.76	0.18
64	0.24	0.18
66	1.12	0.21
68	1.40	0.36
69	0.83	0.55
70	3.37	0.20

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

71	0.34	0.30	80	0.39	0.14	91	2.61	0.35
72	2.18	0.009	81	1.21	0.24	92	0.29	0.11
73	1.63	0.48	83	0.62	0.08	94	1.54	0.91
74	0.33	0.08	84	0.64	0.13	95	0.06	0.03
75	0.67	0.03	85	0.71	0.21	97	1.42	0.56
76	0.59	0.05	86	0.68	0.53	98	0.27	0.22
77	0.20	0.17	87	0.94	0.13	100	1.17	0.22
78	0.22	0.08	88	0.50	0.26	101	0.52	0.24
79	0.75	0.42	90	1.61	0.89			

En la Tabla A.18 se registran para el caso 3, los datos generales de cada UE, como el AE al que están asociados, distancia a la que se encuentra del AE, la frecuencia asignada como resultado de implementar un algoritmo de asignación basado en GT y la frecuencia aleatoria usada en un método sin utilizar GT. Los UE que no están consignados en la Tabla, corresponden a los que no encontraron una frecuencia de transmisión que les permita alcanzar el nivel de SINR requerido por el servicio, con GT y sin GT.

Tabla A.18. Frecuencias asignadas a cada UE. Escenario 2 – voz y datos.

UE	AE	Distancia (metros)	Frec con GT (MHz)	Frec sin GT (MHz)
3	72	12.64	-	1711.7
4	25	35.35	1711.0	-
5	45	34.52	1711.9	1711.2
6	26	39.81	1710.5	-
7	77	12.64	-	1711.7
9	101	56.14	1710.4	-
11	72	48.05	1711.8	-
12	61	24.41	1711.7	1711.1
13	49	5	-	1710.9
14	80	42.42	1711.8	-
20	14	29.42	1711.5	1711.9
21	11	44.41	1710.9	-
27	4	36.34	1711.3	1710.3
28	17	35.01	1710.1	1712.0
30	43	41.30	1711.0	-
32	48	24.33	1710.3	1711.9
33	56	33.61	1711.8	-
34	24	5.65	-	1710.3
35	11	33.83	1710.9	-
38	62	41.67	1710.5	-
39	21	21.63	1711.9	1710.1
40	99	42.94	1711.2	-
41	61	48.41	1710.1	-
42	80	26.41	1711.1	1711.3
44	42	12.08	-	1710.3
45	42	48.05	1710.1	-
46	62	45.22	1710.5	-
48	66	25.05	1711.1	-
49	100	23.85	1711.0	1710.8
50	73	23.60	-	1710.1
51	27	51.66	1710.5	-
52	98	48.33	1711.6	-
55	23	15.55	-	1710.7
57	5	12.80	1711.9	1710.3
58	50	6.40	-	1710.5
59	40	48.33	1711.9	-
60	57	27.89	1711.5	-
62	8	42.63	1711.1	-
63	19	52.20	1711.7	-
68	93	21.54	1710.1	-
69	56	22.47	1711.7	1710.5
71	26	42.04	1711.7	-
72	97	32.20	1710.1	-
73	27	36.12	1711.1	-
75	11	42.01	1712	-
77	26	32.01	1711.1	1710.3
78	61	42.10	1710.3	-
82	99	57.48	1711.9	-
85	52	40.60	1710.9	-
86	78	38.05	1710.7	-

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

88	58	55.97	1711.3	-	160	54	8.0623	-	1711.5
91	98	57.14	1711.8	-	163	85	33.2415	1710.5	-
93	39	33.13	1711.9	1711.3	166	98	24.1868	1710.3	1710.8
94	59	34.92	1710.3	-	167	98	33	1710.9	-
95	53	59.81	1711.3	-	169	48	49.0918	1710.5	-
96	7	16.97	-	1710.9	171	85	30.1496	1710.3	-
97	34	6.403	-	1711.8	172	51	17	1711.2	1711.2
98	96	20.80	1710.9	-	173	74	39.4081	1710.5	-
99	36	20.80	-	1710.5	175	51	46.4004	1710.1	-
100	91	6.08	1710.3	1710.1	177	66	11.1803	-	1711.1
102	85	2.23	-	1711.5	178	48	42.8019	1711.5	-
103	85	35.73	1711.7	-	180	54	32.0156	1711.3	-
105	44	49.40	1711.3	1711.8	182	97	29.0689	1711.3	1711.5
106	75	59.81	1710.1	-	184	71	57.0088	1710.1	-
109	31	12.64	-	1710.1	189	92	21.3776	1711.3	1711.9
110	20	44.01	1710.5	-	191	97	50.2494	1711.7	-
113	23	26	1711.8	-	193	97	46.6905	1710.5	-
114	95	15.29	1710.1	1712	194	30	48.0416	1710.9	-
117	38	52.63	1710.6	-	195	97	21.3776	1711.4	1711.5
119	96	15.52	1711	-	196	23	50.1597	1710.1	-
120	98	50.91	1711.9	-	197	30	45.0999	1711	-
122	58	35.12	1710.5	-	198	59	26.8328	1710.6	1711.4
123	19	35.01	1711.3	1710.6	200	62	42.4500	1710.9	-
124	9	42.45	1710.1	-	201	47	24.0832	-	1710.3
125	10	33.54	1710.4	1711.1	202	99	17.8885	-	1710.5
126	10	44.82	1710.3	-	203	14	32.7567	1711.4	1711.5
130	60	26.07	1711.1	1711.2	205	3	15.1327	-	1710.3
132	54	55.10	1711.7	-	206	11	41.4005	1711.3	-
133	100	51.62	1710.3	-	207	75	20.8087	1711.8	1711.2
134	85	30.01	1711.7	-	208	37	34.5398	1710.7	1711.5
135	66	51.35	1711.3	-	209	43	16.0312	-	1710.6
136	62	49.67	1710.1	-	212	36	28.8617	1711.7	-
137	68	12.16	-	1711.9	216	93	28.3019	1710.9	-
138	101	32.75	1710.6	-	217	9	10.7703	-	1711.7
139	17	48	1710.4	-	219	33	43.8406	1710.5	-
141	100	49.51	1710.8	-	220	87	36.1248	1711.7	1711.2
143	92	21.26	1711.3	1710.6	222	53	40.2492	-	1710.5
144	4	46.14	1710.7	-	223	27	6.3246	1711.9	1711.5
146	5	58.30	1711.5	-	225	77	52.3927	1711.8	1712
147	90	21.37	-	1711.5	227	54	33.5410	1711.3	-
150	30	24.18	1711.9	-	229	81	33.6155	-	1710.8
151	73	56.29	1710.6	-	233	81	24.7386	1710.3	1711.9
153	82	14.86	-	1711.7	236	2	35.4401	1710.9	1711.7
154	1	102.88	1710.4	-	237	8	44.1022	1711.2	-
156	19	57.558	1711.1	-	238	23	43.1856	1710.1	-
158	61	47.801	1711.3	-	240	67	4.2426	-	1711.3

Análisis del Throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos

242	89	40.4969	1710.5	-	299	84	45.6508	1710.1	-
243	20	30	1710.7	1711.9	300	65	54.4243	1711.8	-
245	14	51.4296	1710.1	-	301	52	22.6716	-	1710.1
246	67	37	1711.1	-	303	78	24.0416	1711.1	1711.7
247	40	31.0161	-	1711.3	304	34	46.0977	1711.5	-
248	84	36.7967	1711.3	-	305	4	28.8617	1711.7	1711.5
249	5	42.1070	1711.1	-	306	43	50.4480	1711	-
250	25	12	-	1711.5	307	97	57.9741	1710.9	-
254	94	25.9422	-	1710.3	308	57	35.1141	1711.7	-
256	11	37.8550	1710.3	-	309	53	51.9230	1711.7	-
257	76	35.7771	1711.7	-	311	20	39.1152	1710.6	1711.5
258	91	16.4924	1710.5	-	313	10	37.1214	1711.5	-
259	71	16.4012	-	1711.2	315	100	25.2982	1711.1	1710.8
260	101	23.4094	1711.1	1711.7	316	86	33.2866	1712	1710.6
261	83	43.1711	1710.3	-	318	69	19.1050	1711.7	1710.5
263	96	6.0828	-	1711.2	319	61	27.6586	1711.7	1710.5
264	64	26.4197	-	1711.1	322	5	12.2066	1711.9	1710
265	66	27.4591	1711.1	-	323	56	40.8044	1711.6	-
266	70	14.4222	-	1710.3	324	98	29.1548	1710.4	1710.9
268	43	56.8243	1710.7	-	325	93	10	1710.3	1711.7
270	56	49.3660	1711.6	-	326	42	28.1603	1710.6	-
272	12	22.3607	-	1710.6	329	26	25	1711.2	1710.6
274	48	38.4838	1710.5	-	330	24	45.3100	1711.1	-
275	54	31.6228	1711.2	-	331	77	22.0227	1710.1	-
276	91	41.6293	1712	-	333	19	28.3019	1711.3	1711.1
277	33	25.4951	-	1710.5	335	21	38.0526	1711.8	-
278	66	37.1214	1711	-	336	11	43.0116	1711.3	-
279	78	59.4390	1711.9	-	339	62	23.7697	1711.3	-
280	26	32.6497	1711.6	-	340	1	80.9197	1711.9	-
281	18	39.6232	1711.7	1710.3	347	89	4.1231	-	1711.5
282	58	30.8058	1710.3	1710.1	348	76	18.3576	1711.5	1711.3
284	9	21.9317	1711	-	349	37	42.8019	1710.6	1711.1
285	46	36.7151	1711.2	1711.2	352	20	54.0833	1711	-
286	8	56.4358	1711.6	-	353	8	52.6118	1711.5	-
287	41	58.5235	1710.1	-	356	38	13.9284	-	1710.3
288	62	5.0990	-	1710.3	357	16	44.2719	1711.3	1710.1
289	70	49.7393	1710.7	-	358	30	11.1803	-	1711.7
290	57	5.8310	-	1711.5	360	63	47.5395	1710.7	1710.3
292	40	55.0364	1710.1	-	363	38	33.2415	1710.8	-
295	28	18.0278	1710.9	1710.7	364	65	32.6497	1711.9	1710.5
296	48	31.0161	1710.3	-	365	54	35	1710.5	-
298	37	42.0476	1710.1	1710.9	367	9	49.4773	1710.4	-

REFERENCIAS

- [1] J. M. Huidobro, «Redes heterogéneas. La solución para LTE.,» Noviembre 2013.
- [2] Ericsson, «Todo vuelve al backhaul: soluciones que brindan soporte a la calidad de experiencia integral superior (QoE) para la implementación de la red heterogénea,» 29 Abril 2013. [En línea]. Available: http://www.ericsson.com/ar/news/2013-04-29-backhaul-es_254740124_c. [Último acceso: 22 Marzo 2016].
- [3] M. Lopez Benitez, «Algoritmos de selección de tecnologías de acceso radio en redes heterogeneas de comunicaciones móviles de cuarta generación,» Elche, 2006.
- [4] E. Apú Picado, «Análisis de las tecnologías de Redes Heterogéneas (HetNet) en los sistemas móviles,» San José, 2012.
- [5] M. Noordman, «The Role of small cells in heterogeneous networks,» *Ericsson*, p. 6, 2012.
- [6] J. Velasco, «Small cells, el mosaico con el que construir las redes del futuro,» Blogthinkbig, 3 Enero 2013. [En línea]. Available: <http://blogthinkbig.com/small-cells-mosaico-redes-futuro/>. [Último acceso: 23 Marzo 2016].
- [7] S. G. Pinzon Barrios , «Predicción de la tasa de Throughput en una red inalámbrica,» Bucaramanga, 2005.
- [8] O. Sallent Roig y J. Perez Romero, Fundamentos de diseño y gestion de sistemas de comunicaciones moviles celulares, Barcelona, 2014.
- [9] J. M. Hernando Rabanos, L. Mendo Tomás y J. M. Riera Salis, Transmisión por radio, Septima ed., Madrid: Editorial Universitaria Ramón Areces, 2013.
- [10] O. Sallent Roig, J. L. Valenzuela Gonzalez y R. A. Comes, Principios de comunicaciones moviles, Barcelona, 2003.
- [11] C. M. Ramirez Casañas, «Contribuciones a la gestión de los recursos radio en redes móviles de celulares de radio paquetes con soporte de calidad de servicio,» Las Palmas de Gran Canaria, 2011.
- [12] M. Guowang, Z. Jens, W. S. Ki y B. S. Slimane, Fundamentals of Mobile Data Networks, Cambridge: Cambridge University Press, 2016.

- [13] V. Cornejo Garcia, «Estrategias de asignación de recursos para el DL en LTE,» Getafe, 2013.
- [14] S. Lasaulce, H. Tembine y M. Debbah, *Game Theory and Learning for Wireless Networks: Fundamentals and Applications*, USA: Academic Press, 2011.
- [15] C. Lopez de la Torre, «Aplicación de la teoría de juegos en el balanceo de carga y asignación de precios en redes de acceso heterogéneas,» Cantabria, 2013.
- [16] F. Fernandez Rodriguez, «Teoría de juegos: análisis matemático de conflictos,» Las Palmas de Gran Canaria, 2005.
- [17] J. Alejandro, «Republica: Juegos normales y extensivos,» 4 Julio 2008. [En línea]. Available: <http://empresayeconomia.republica.com/herramientas/juegos-normales-y-extensivos.html>. [Último acceso: 19 Enero 2016].
- [18] E. Bustos, «Teoría de juegos,» Ciudad de Mexico, 2010.
- [19] B. Guerrien, «El equilibrio de Nash,» eumed.net, [En línea]. Available: <http://www.eumed.net/cursecon/libreria/bg-micro/5b.htm>. [Último acceso: 21 Enero 2016].
- [20] H. Varian, *Análisis micro económico*, Michigan: Antoni Bosh, 1998.
- [21] G. UTPL, «Wordpress,» 8 Agosto 2008. [En línea]. Available: <https://advancedtech.wordpress.com/2008/08/08/aprendizaje-por-refuerzo/>. [Último acceso: 17 Febrero 2016].
- [22] M. Bowling y M. Veloso, «Multiagent learning using a variable learning rate,» *Artificial Intelligence*, nº 136, pp. 215-250, 2002.
- [23] R. C. Hincapie, L. Betancur Agudelo, C. Gomez, A. Galvis Quintero y R. Bustamante Miller, «Análisis de la capacidad para Spectrum Brokers distribuido en redes heterogéneas,» de *Capacity Analysis for Distributed Spectrum Brokers in Heterogeneous Networks*, Medellin, 2014.
- [24] C. López de la torre, «aplicación de la teoría de juegos en el balanceo de carga y asignación de precios en redes de acceso heterogéneas,» Santander, 2013.
- [25] L. Ma y Z. Qi, «Nuevo algoritmo de asignación de espectro para radio cognitiva basado en un juego cooperativo,» de *A New Algorithm of Spectrum Allocation for Cognitive Radio Based on Cooperative Game*, Nanjing, 2010.

- [26] G. Feng y Y. Jia, «Game-Theoretic Hierarchical Resource Allocation for Heterogeneous Relay Networks,» de *Game-Theoretic Hierarchical Resource Allocation for Heterogeneous Relay Networks*, Shapingba, 2014.
- [27] B. S. López, «Ingeniería Industrial,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/investigaci%C3%B3n-de-operaciones/problemas-de-asignaci%C3%B3n/>. [Último acceso: 18 8 2016].
- [28] X. Sean Zhou, Y. Rui y T. S.Huang, «Water-Filling: A novel way for Image structural feature extraction,» Illinis.
- [29] L. Anchora, L. Canzian, L. Badia y M. Zorzi, «Una caracterización de asignación de recursos con un enfoque de teoría de juegos dirigido a los sistemas LTE,» de *A Characterization of Resource Allocation in LTE Systems Aimed at Game Theoretical Approaches*, Padova, 2010.
- [30] T. Kamang Wahyu, M. Wayan, Widyawan y S. Sela, «Enfoque a la teoría de juegos para distribución dinámica del espectro en redes radio cognitivas,» de *A Game-Theoretic Approach for Dynamic Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks*, Yogyakarta, 2013.
- [31] R. Jayaprakash , E. Jan y K. Visa, «Asignación de espectro en redes radio cognitivas basado en una subasta con teoría de juegos cooperativos,» de *Cooperative Game Theory and Auctioning for Spectrum Allocation in Cognitive Radios*, Espoo, 2011.
- [32] M. La Rocca, «laroccasolutions,» 4 4 2016. [En línea]. Available: <http://laroccasolutions.com/training/78-rsrp-and-rsrq-measurement-in-lte/>. [Último acceso: 14 5 2016].
- [33] H. A. Romo, «Radiocomunicaciones,» Departamento de Telecomunicaciones, Popayan, 2012.
- [34] C. Corner, «MathWorks,» [En línea]. Available: https://www.mathworks.com/academia/student_version/details.html. [Último acceso: 25 5 2016].
- [35] R. Coss Bu, Simulación un enfoque práctico, Noriega.
- [36] European Telecommunications Standards Institute, «Selection Procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS,» pp. 39-41, 1998.
- [37] Nokia Solutions and Networks, «LTE FDD Link Budget,» 2014.

- [38] A. E. Alvarado Segovia, «Análisis y evaluación del Throughput máximo en sistemas de transmisión con modulación y codificación adaptativa utilizando el límite de Gallager,» Valparaíso, 2012.
- [39] M. Whinston y J. Green, «Elementos básicos de juegos cooperativos,» Lima, 2011.
- [40] Universidad Autónoma de México, «¿Que es la radio Cognitiva?,» de *Radio Cognitiva*, México, p. 17.