

**ANÁLISIS DE CAPACIDAD EN UNA RED HETEROGÉNEA EMPLEANDO
CONTROL DE POTENCIA Y ASIGNACIÓN DE ESPECTRO BASADO EN
TEORÍA DE JUEGOS**



**Sara Nathaly Urbano Buriticá
Jeison Alfredo Ruano Morales**

**Director: Víctor Fabián Miramá Pérez
Universidad del Cauca**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas-GRIAL
Popayán, Julio de 2019**

**ANÁLISIS DE CAPACIDAD EN UNA RED HETEROGÉNEA EMPLEANDO
CONTROL DE POTENCIA Y ASIGNACIÓN DE ESPECTRO BASADO EN
TEORÍA DE JUEGOS**



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

Sara Nathaly Urbano Buriticá

Jeison Alfredo Ruano Morales

Director: Víctor Fabián Miramá Pérez

Universidad del Cauca

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Telecomunicaciones

Grupo de Radio e InALámbricas-GRIAL

Popayán, Julio de 2019

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. CONCEPTOS GENERALES.....	3
1.1 Sistema móvil celular.....	3
1.2 Redes heterogéneas	4
1.3 Interferencia	5
1.4 Control de potencia	6
1.5 Asignación de espectro	6
CAPÍTULO 2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE CONTROL DE POTENCIA Y ASIGNACION DE ESPECTRO BASADOS EN TEORIA DE JUEGOS.....	9
2.1. Teoría de juegos	9
2.1.1 Conceptos de solución para juegos cooperativos	10
2.1.2 Conceptos de solución para juegos no cooperativos.	10
2.1.3 Aprendizaje reforzado.....	11
2.2. Control de potencia	11
2.3 Asignación de espectro	14
CAPÍTULO 3. MODELO DE CONTROL DE POTENCIA Y ASIGNACIÓN DE ESPECTRO CONJUNTO BASADO EN TEORIA DE JUEGOS EN UNA RED HETEROGÉNEA. ...	19
3.1 Desarrollo metodológico.....	19
3.2 Definición del modelo	20
3.3 Diagrama de flujo general del sistema.....	23
3.3.1 Definición del juego.....	24
3.3.2 Descripción del algoritmo.....	26
3.4 Modelo de control Ideal de potencia con asignación aleatoria de frecuencia.....	28
3.4.1 Asignación de espectro.....	28
3.4.2 Modelo de control ideal de potencia	28
CAPÍTULO 4. SIMULACION Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	33
4.1 Limitaciones del sistema	33
4.2 Definición de los escenarios y casos de simulación.	33
4.3 Definición de las características de los escenarios de simulación.	34
4.4 Simulación y análisis de resultados.....	35
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	87
5.1 CONCLUSIONES.....	87

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

5.2 TRABAJOS FUTUROS	88
Apéndice A	89
REFERENCIAS	99

LISTA DE ACRÓNIMOS

ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i> , Línea de Abonado Digital Asimétrica.
ASD	<i>Adaptive Software Developed</i> , Desarrollo Adaptativo de Software.
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
fBS	<i>femto Base Station</i> , Estación Base femto.
FCC	<i>Federal Communications Commission</i> , Comisión Federal de Comunicaciones.
FU	<i>Femto User</i> , Usuario Femto.
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.
IPC	<i>Ideal Power Control</i> , Control Ideal de Potencia.
mBS	<i>micro Base Station</i> , Estación Base micro.
MU	<i>Micro User</i> , Usuario Micro.
NE	<i>Nash Equilibrium</i> , Equilibrio de Nash.
NLOS	<i>Non Line Of Sight</i> , Sin Línea de Vista.

PBS	<i>Personal Base Estation</i> , Estaciones Base Personales.
PC	<i>Power Control</i> , Control de Potencia.
QoS	<i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio.
RL	<i>Reinforcement Learning</i> , Aprendizaje Reforzado.
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 Interferencia más Ruido.
UE	<i>User Equipment</i> , Equipo de Usuario.
UL	<i>Up Link</i> , Enlace Ascendente.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Red heterogénea.....	5
Figura 2.1 Diagrama de flujo del control de potencia basado en GT.....	14
Figura 2.2 Diagrama de flujo asignación de espectro basado en GT.....	18
Figura 3.1 Metodología ADS.....	19
Figura 3.2 Escenario de simulacion.....	21
Figura 3.3 Interferencia presente en el sistema.....	22
Figura 3.4 Diagrama de flujo general del sistema.....	24
Figura 3.5 Diagrama de flujo de asignación de espectro y control de potencia	29
Figura 3.6 Diagrama de flujo de control ideal de potencia.....	32
Figura 4.1 Escenario 1 de simulación.....	36
Figura 4.2 Escenario 1 basado en GT para voz.....	36
Figura 4.3 Variación de probabilidad de estrategia para el UE 25.....	36
Figura 4.4 SINR UE 25.....	37
Figura 4.5 Throughput UE 25.....	38
Figura 4.6 Variación de probabilidad de estrategia UE 373.....	39
Figura 4.7 SINR UE 373.....	39
Figura 4.8 Escenario 1 basado IPC.....	40
Figura 4.9 Probabilidad de degradación sistema basado en GT.....	41
Figura 4.10 Probabilidad de degradación del sistema basado en IPC.....	41
Figura 4.11 Throughput del sistema basado en GT.....	42
Figura 4.12 Throughput del sistema basado en IPC.....	42
Figura 4.13 Niveles de potencia escogidos por los usuarios.....	43
Figura 4.14 Escenario 1 basado en GT para datos.....	44
Figura 4.15 Variación de probabilidad de estrategia para el UE 133.....	44
Figura 4.16 SINR UE 133.....	45
Figura 4.17 Troughput UE 133.....	45
Figura 4.18 Variación de probabilidad de estrategia UE 469.....	46
Figura 4.19 SINR UE 469.....	46
Figura 4.20 Escenario 1 basado en IPC para datos.....	47
Figura 4.21 Probabilidad de degradación del sistema basado en GT.....	47
Figura 4.22 Probabilidad de degradación del sistema basado en IPC.....	48
Figura 4.23 Throughput del sistema basado en GT.....	48
Figura 4.24 Throughput del sistema basado en IPC.....	48
Figura 4.25 Niveles de potencia escogidos por los usuarios.....	49
Figura 4.26 Escenario 1 basado en GT para voz y datos.....	50
Figura 4.27 Variación de probabilidad de estrategia UE 22.....	51
Figura 4.28 SINR UE 22.....	51
Figura 4.29 throughput UE 22.....	51
Figura 4.30 Variación de probabilidad de estrategia UE 127.....	52
Figura 4.31 SINR UE 127.....	52

Figura 4.32 Throughput UE 127	53
Figura 4.33 Variación de probabilidad de estrategia UE 10.....	54
Figura 4.34 SINR UE 10.....	54
Figura 4.35 Escenario 1 basado en IPC para voz y datos.....	55
Figura 4.36 Probabilidad de degradación del sistema basado en GT.	56
Figura 4.37 Probabilidad de degradación del sistema basado en IPC.	56
Figura 4.38 Throughput del sistema basado en GT.	57
Figura 4.39 Throughput del sistema basado en IPC.	57
Figura 4.40 Niveles de potencia escogidos por los UE.	58
Figura 4.41 Escenario 2 de simulación.....	59
Figura 4.42 Escenario 2 basado en GT para de voz.	60
Figura 4.43 Variación de probabilidad de estrategia para el UE 29.....	61
Figura 4.44 SINR UE 29.....	61
Figura 4.45 throughput UE 29.	62
Figura 4.46 Variación de probabilidad de estrategia UE 260.....	63
Figura 4.47 SINR UE 260.....	63
Figura 4.48 throughput UE 260.	64
Figura 4.49 Escenario 2 basado en IPC para voz	64
Figura 4.50 Probabilidad de degradación del sistema basado en GT.	65
Figura 4.51 Probabilidad de degradación del sistema basado en IPC.	65
Figura 4.52 Throughput del sistema basado en GT.	66
Figura 4.53 Throughput del sistema basado en IPC.	66
Figura 4.54 Niveles de potencia elegidos por los UE	67
Figura 4.55 Escenario 2 basado en GT para datos.	68
Figura 4.56 Variación de probabilidad de estrategia para el UE 388.....	69
Figura 4.57 SINR UE 388.....	69
Figura 4.58 Throughput UE 388.	70
Figura 4.59 Escenario 2 basado en IPC para datos.	71
Figura 4.60 Probabilidad de degradación del sistema basado en GT.	71
Figura 4.61 Probabilidad de degradación del sistema basado en IPC.	71
Figura 4.62 Troughput del sistema basado en GT.	72
Figura 4.63 Troughput del sistema basado en IPC	72
Figura 4.64 Niveles de potencia escogidos por los usuarios.....	73
Figura 4.65 Escenario 2 basada en GT para voz y datos.....	74
Figura 4.66 Variación de probabilidad de estrategia UE 46.....	75
Figura 4.67 Variación de probabilidad de estrategia UE 39.....	75
Figura 4.68 Throughput UE 46.	76
Figura 4.69 Throughput UE 39.	76
Figura 4.70 Escenario 2 basado en IPC para voz y datos.....	77
Figura 4.71 Probabilidad de degradación del sistema basado en GT.	77
Figura 4.72 Probabilidad de degradación del sistema basado en IPC.	78
Figura 4.73 Throughput del sistema basado en GT.	78
Figura 4.74 Throughput del sistema basado en IPC.	78

Figura 4.75 Niveles de potencia elegidos por los UE 79

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 4.1 Escenarios y casos de simulación.....	33
Tabla 4.2 Características de los escenarios.....	33
Tabla 4.3 Resultados basados en GT para voz en escenario 1	41
Tabla 4.4 Resultados basados en IPC para voz en escenario 1.....	41
Tabla 4.5 Potencias utilizadas por los UE	45
Tabla 4.6 Resultados basados en GT para datos en escenario 1	47
Tabla 4.7 Resultados basados en IPC	47
Tabla 4.8 Potencias utilizadas por los UE	48
Tabla 4.9 Resultados basados en GT para voz y datos en escenario 1	57
Tabla 4.10 Resultados basados en IPC para voz y datos en escenario 1	57
Tabla 4.11 Potencias utilizadas por los UE	58
Tabla 4.12 Resultados basados en GT para voz en escenario 2.....	66
Tabla 4.13 Resultados basados en IPC para voz en escenario 2.....	66
Tabla 4.14 Potencias utilizadas por los UE ..	67
Tabla 4.15 Resultados basados en GT para datos en escenario 2.....	72
Tabla 4.16 Resultados basados en IPC para datos en escenario 2.....	72
Tabla 4.17 Potencias utilizadas por los UE... ..	73
Tabla 4.18 Resultados basados en GT para voz y datos en escenario 2	78
Tabla 4.19 Resultados basados en IPC para voz y datos en escenario 2	78
Tabla 4.20 Potencias utilizadas por los UE	79
Tabla 4.21 Resumen promedios para cada caso en escenario 1.....	80
Tabla 4.22 Resumen promedios para cada caso en escenario 2.....	80
Tabla 4.23 Características trabajo de grado	80
Tabla 4.24 Capacidad vista como cantidad de usuarios conectados. Voz.....	80
Tabla 4.25 Capacidad vista como cantidad de usuarios conectados. Datos.....	81
Tabla 4.26 Capacidad vista como cantidad de usuarios conectados. Voz y datos	82
Tabla 4.27 Características trabajo de grado	82
Tabla 4.28 Capacidad vista como velocidad de transmisión en voz.	82
Tabla 4.29 Capacidad vista como velocidad de transmisión. Datos.....	83
Tabla 4.30 Capacidad vista como velocidad de transmisión. Voz y datos.	84
Tabla A.1 Voz con IPC. Escenario 1	89
Tabla A.2 Promedios Voz con IPC. Escenario 1	89
Tabla A.3 Voz modelo basado en GT. Escenario 1.....	90
Tabla A.4 Promedios voz modelo basado en GT	90
Tabla A.5 Datos con IPC. Escenario 1	91
Tabla A.6 Promedios Datos con IPC. Escenario 1	91
Tabla A.7 Datos modelo basado en GT. Escenario 1	92
Tabla A.8 Promedios Datos modelo basado en GT	92
Tabla A.9 Voz y Datos con IPC. Escenario 1	92
Tabla A.10 Promedios voz y datos con IPC. Escenario 1	93

Tabla A.11 Voz y datos modelo basado en GT. Escenario 1	93
Tabla A.12 Promedios voz y datos modelo basado en GT	94
Tabla A.13 Voz con IPC. Escenario 2	94
Tabla A.14 Promedios voz con IPC. Escenario 2.....	95
Tabla A.15 Voz modelo con GT. Escenario 2.....	95
Tabla A.16 Promedios voz modelo con GT. Escenario 2	95
Tabla A.17 Datos con IPC. Escenario 2	96
Tabla A.18 Promedios datos con IPC. Escenario 2.....	96
Tabla A.19 Datos modelo con GT. Escenario 2	96
Tabla A.20 Promedios datos modelo con GT. Escenario 2.....	97
Tabla A.21 Voz y datos con IPC. Escenario 2.....	97
Tabla A.22 Promedios voz y datos con IPC. Escenario 2	98
Tabla A.23 Voz y datos modelo con GT. Escenario 2	98
Tabla A.24 Promedios voz y datos modelo con GT. Escenario 2.....	98

INTRODUCCIÓN

El creciente número de usuarios de las comunicaciones globales, hace necesario evaluar cómo cambiarán las infraestructuras de los operadores con el fin de suplir el requerimiento de grandes volúmenes de tráfico de datos[1]; para cubrir estas exigencias, se segmentan las celdas existentes y se evalúa la instalación de un número mayor de estaciones base (BS, *Base Station*) con el propósito de contrarrestar el incremento de la cantidad de dispositivos accediendo a la red y ofrecer una calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*) adecuada al usuario [2].

En consecuencia, ante los nuevos requerimientos planteados por las comunicaciones móviles se introducen redes donde el tamaño de las celdas es diverso; respondiendo al incremento del número de usuarios y a las exigencias presentadas por los servicios de datos y de voz. En una red heterogénea (HetNet, *Heterogeneous Networks*) se tiene la posibilidad de que un dispositivo localizado en una celda pequeña, tenga más de una estrategia de acceso a los servicios, logrando conectarse a la celda más pequeña o a las celdas de tamaño superior.

Pese a los beneficios que traen las HetNet, se presentan problemas debidos a la cantidad de usuarios ubicados en celdas pequeñas, esto debido a que un importante número de usuarios ubicados en celdas adyacentes con BS configuradas de forma similar generan interferencias que dan paso a la degradación de la calidad de los servicios ofrecidos, causando a su vez una reducción de la capacidad del sistema. Para los problemas mencionados se ofrecen soluciones que mejoran el desempeño de las redes, aplicando conceptos y teorías que permitan hacer uso adecuado de los recursos radioeléctricos, como es el caso de la teoría de juegos (GT, *Game Theory*), la cual presenta un buen desempeño en la reducción del impacto de la interferencia sobre la comunicación móvil, mediante la toma de decisiones a partir de ciertos eventos probabilísticos que brindan soluciones mediante la planificación del enrutamiento y la asignación de recursos en redes [3],[4].

Múltiples trabajos se desarrollaron acerca de la mitigación de la interferencia en una red de comunicación móvil heterogénea con el uso de la GT [5], [6]. En la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca se adelantaron trabajos en el estudio de la mitigación de la interferencia realizando control de potencia y además, se realizó el mejoramiento del comportamiento de la red controlando el acceso por espectro.

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 la cobertura y el *Throughput* de una red heterogénea que utilice un algoritmo de asignación de espectro y control de potencia basado en GT.

Este documento se divide en 5 capítulos estructurados de la siguiente manera:

Capítulo 1. Introduce los conceptos básicos relacionados con los sistemas de comunicaciones móviles.

Capítulo 2. Introduce los conceptos básicos respecto a control de potencia, asignación de espectro y relaciones con la GT.

Capítulo 3. Define el modelo de control de potencia y asignación de espectro conjunto basado en teoría de juegos para una red heterogénea y muestra la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto.

Capítulo 4. Caracteriza los escenarios y casos de simulación, describe las pruebas realizadas para cada uno, y análisis de los resultados obtenidos.

Capítulo 5. Expone las conclusiones del desarrollo del proyecto y se presentan recomendaciones para futuros trabajos e investigación en este campo.

CAPÍTULO 1. CONCEPTOS GENERALES

1.1 Sistema móvil celular

Los sistemas de comunicaciones móviles se emplean para el establecimiento de la conexión entre dos terminales o equipos de usuario (UE, *User Equipment*). Estos sistemas cuentan con estaciones base las cuales brindan cobertura a los UE permitiendo la comunicación entre estos.

Inicialmente, la comunicación establecida entre terminales presentaba problemas como altas tasas de errores, retrasos en la transmisión, poca disponibilidad, *jitter*¹, entre otros, que no garantizaban la calidad de servicio deseada [2], debido a que fueron redes centralizadas.

Posteriormente, nace el concepto de celda o célula² como base para un modelo de comunicación descentralizado, que busca la utilización de un esquema o arreglo de células o celdas base para incrementar la región de cobertura y capacidad del sistema o red de comunicación, permitiendo que cuando un usuario establezca un enlace con otro y no se encuentre en la zona de cobertura de dicha celda, la comunicación pase a la celda contigua mientras se mantiene la conexión.

Para el funcionamiento de este tipo de sistemas se requiere de la disposición de múltiples frecuencias radio, que permitan por medio de dos canales diferentes emitir y recibir audio de manera simultánea, por lo cual, la Comisión Federal de Comunicaciones (*FCC, Federal Communications Commission*) [7] autorizó el uso de bandas de frecuencia para dar solución a la necesidad de canales para el desarrollo de las comunicaciones [8], todo debido al incremento de los requerimientos del ancho de banda móvil que ha sido impulsado por los nuevos servicios y capacidades de los equipos móviles actuales, sin olvidar la expectativa en QoS que esperan los usuarios para voz y datos [9].

Las celdas en la actualidad, se adaptan a las nuevas necesidades de los usuarios, nuevas tecnologías y servicios. Estas se clasifican según el tamaño, densidad de usuarios y de las exigencias que se pueden llegar a presentar en ciertas zonas. La clasificación de las celdas según su tamaño es:

- **Macroceldas**

- Celdas principalmente ubicadas en zonas rurales, carreteras y poblaciones de baja densidad de tráfico y que tienen un radio de alcance de 1.5 Km a 20 Km.

¹ Conocido como variación de retardo, ocasiona que los paquetes (voz, datos) sean descartados por el

² Área o región hexagonal con una BS en el centro con un nivel de potencia que delimita la cobertura.

- **Microceldas**

Caracterizadas por ubicarse en entornos urbanos, poseen un radio de alcance de 0.3 Km a 0.7 Km.

- **Picoceldas**

Ubicadas en zonas urbanas con alta densidad de tráfico y son usadas por su capacidad de penetración en interiores de edificios, tienen un radio de alcance desde 30 m a 200 m [10].

- **Femtoceldas**

Son puntos de acceso de bajo consumo de potencia que tienen un rango máximo de cobertura de 50 m [11], estos se conectan al proveedor de servicios a través de la línea de abonado digital asimétrica (*ADSL, Asymmetric Digital Subscriber Line*) y fibra óptica, conocidas también como estación base personal (*PBS, Personal Base Station*) [12].

1.2 Redes Heterogéneas

La constante búsqueda de alternativas para mejorar la capacidad de los sistemas de comunicaciones móviles, permite encontrar en la integración de los diferentes tipos de celdas, tecnologías y demás parámetros para el funcionamiento de una red, resultados que mejoran el desempeño de los servicios provistos por dichos sistemas, a tal integración se le conoce como red heterogénea.

Dentro de las redes heterogéneas se permite el despliegue de macro celdas con celdas pequeñas (picoceldas, femtoceldas) compartiendo el mismo espacio como se observa en la figura 1.1, estas se ubican dependiendo de los servicios requeridos en ciertas zonas y pueden brindar mejores niveles de cobertura y capacidad de la red; además, la QoS requerida para los servicios que utilizan los usuarios puede mejorar, ya que las HetNets pueden facilitar la conexión de UE que se encuentran ubicados en áreas altamente pobladas y que cuentan con obstáculos como edificios y otras construcciones que interfieren en la propagación de las ondas transmitidas y recibidas [13].

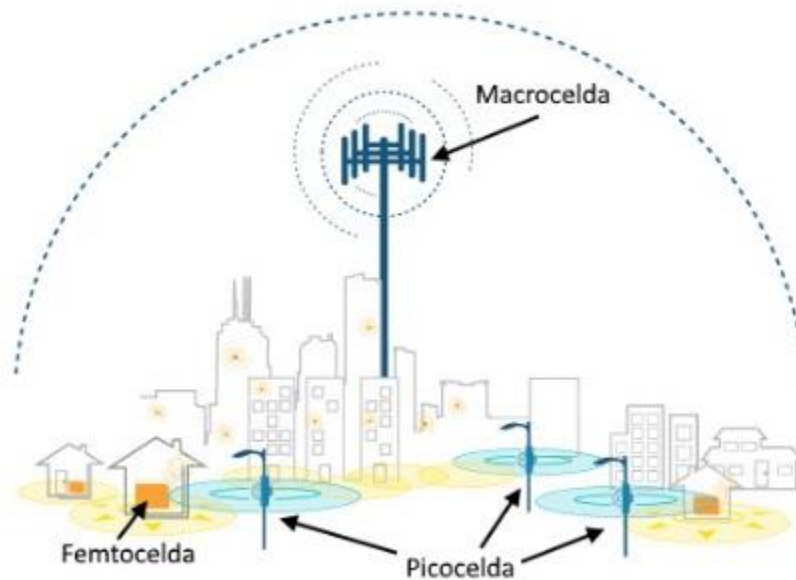


Figura 1.1 Red heterogénea.

1.3 Interferencia

En los sistemas de comunicación móvil, la interferencia es un factor importante a tener en cuenta dado que es un efecto no deseado que afecta de manera sensible el enlace entre dos terminales y se cuantifica a través de la relación de portadora a interferencia (*CIR, Carrier to Interference Ratio*), que mide la relación entre la potencia de la señal útil y la señal interferente. Es importante mencionar que el desempeño de una red se ve limitado por la presencia de este parámetro, por esto se hace imprescindible la utilización de técnicas para mitigar su nivel y mantener la capacidad deseada de la red para cumplir con las exigencias de la comunicación [15].

La presencia de celdas con un radio pequeño en una HetNet da origen a la presencia de interferencia, la cual es generada por BS de diferente clase que limitan la capacidad, cobertura y QoS que alcanza idealmente la red. Por lo tanto, la interferencia se convierte en un factor crítico a controlar en una HetNet [16].

Existen dos tipos de interferencia que afectan a una comunicación, la interferencia co-canal y la interferencia por canal adyacente.

- **Interferencia co-canal**

Se entiende como interferencia co-canal, a las señales que se encuentran en la misma banda de frecuencia que la señal deseada o transmitida, resultando perjudicial para el enlace de comunicación, suele ser el tipo de interferencia que más limita las prestaciones del receptor. Una de las principales causas que da lugar a este tipo de interferencia en un sistema es la distancia a la que se encuentran las celdas o BS interferentes, debido a su cercanía y a que utilizan la misma banda de frecuencia. Para mitigar la interferencia co-canal producida

en una HetNet se plantean mecanismos de coordinación de interferencia como el control de potencia y técnicas de gestión de espectro, con la finalidad de proveer una CIR suficiente y así mantener una calidad aceptable para la comunicación establecida entre los usuarios [17].

- **Interferencia por canal adyacente**

Se presenta cuando hay una distancia espectral insuficiente entre las frecuencias utilizadas en una celda [6]. Este tipo de interferencia deteriora una señal que está en una frecuencia cualquiera debido a la presencia de otra señal que está en una frecuencia cercana.

Para minimizar o atenuar este tipo de interferencia se emplean filtros en recepción y además se realiza una adecuada asignación de canales. Esencialmente los canales se asignan de modo que la separación espectral entre ellos en una determinada celda sea maximizada, esto se logra asignando canales adyacentes en forma sucesiva en la banda de frecuencia a diferentes celdas.

Es importante mencionar que el correcto funcionamiento de un sistema de comunicación se da por el uso de la gestión de recursos radio (RRM, *Radio Resource Management*), que incluye mecanismos y/o procedimientos para garantizar el uso eficiente del espectro electromagnético, controlar la admisión de usuarios al sistema, la congestión y la potencia de transmisión, entre otros [18].

1.4 Control de Potencia

El control de potencia (PC, *Power Control*) es una de las técnicas de la RRM que busca mejorar la calidad de un sistema de comunicaciones y el uso eficiente de la energía, este mecanismo se utiliza en las redes móviles celulares para reducir el impacto de la interferencia entre canales. Esta técnica propone la regulación de la potencia de transmisión de un dispositivo móvil, por la condición de canal y en función de la distancia hasta la BS en la que se encuentra enlazada la comunicación en un momento dado, con el objeto de asegurar una mayor capacidad y QoS a los usuarios. Además, el control de potencia permite minimizar la interferencia co-canal y hacer un uso eficiente de la energía de la batería del equipo móvil.

Es importante mencionar que el control de potencia se lleva a cabo tanto en el enlace ascendente (*UL, Up Link*) como en el enlace descendente (*DL, Down Link*), siendo este último el más crítico por el manejo que se realiza al efecto de la interferencia por móvil cercano-lejano [15].

1.5 Asignación de espectro

El elevado número de conexiones inalámbricas, junto con las políticas de asignación fija del espectro radioeléctrico han reducido significativamente las bandas de frecuencia licenciadas disponibles, evidenciando que el espectro

radioeléctrico es un recurso cada vez más limitado [19]; esto sumado al incremento del número de dispositivos móviles para el servicio de voz y datos, motiva el desarrollo de nuevas estrategias para satisfacer la demanda de ancho de banda que el número creciente de usuarios requiere. Dado lo anterior, se han elaborado estudios en escenarios donde las redes se despliegan con diferentes tipos de celdas, cubriendo distintas áreas y con la coexistencia de distintas tecnologías de acceso radio, más la implementación de algoritmos que permitan hacer un uso eficiente del espectro electromagnético.

Para la asignación de espectro en una HetNet, existen diversos algoritmos que introducen la toma de decisiones mediante la Teoría de Juegos, esta elección se motiva por investigaciones recientes [20], [21], [22], donde se expone que a raíz del uso de esta herramienta se pueden elaborar modelos estratégicos que permitan un reparto más eficiente del espectro radioeléctrico.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

CAPÍTULO 2. CONCEPTOS BASICOS SOBRE CONTROL DE POTENCIA Y ASIGNACION DE ESPECTRO BASADOS EN TEORIA DE JUEGOS.

Este capítulo aborda el concepto de control de potencia y asignación de espectro considerando como base la teoría de juegos que a su vez será el soporte para este trabajo de grado.

2.1. Teoría de juegos

La esencia de la GT es el estudio formal de las interacciones entre varios tomadores de decisiones los cuales tienen conflictos o intereses comunes. Por interacciones se entiende que los otros provocan un impacto en cada tomador de decisión (jugador) y lo que obtendrá de una situación interactiva no solo depende de sus decisiones. En la actualidad, GT se usa en el área de las telecomunicaciones para dar solución a situaciones en donde se busca optimizar los recursos radio disponibles.

Toda situación puede ser modelada por medio de la GT, si se distinguen los siguientes 4 elementos:

- **Juego:** se define como la situación de conflicto que se requiere analizar.
- **Jugador:** individuo y/o agente involucrado en el juego.
- **Estrategias:** se refiere a las acciones que un jugador toma durante el juego planteado; cada estrategia es un plan muy específico donde se da la descripción completa de una forma determinada de jugar, independientemente de lo que hacen los demás jugadores y de la duración del juego [23].
- **Utilidad:** representa el beneficio que alcanza el jugador al implementar una estrategia determinada.

Usualmente se distinguen dos tipos de juegos, el cooperativo y no cooperativo. En el no cooperativo no se pueden celebrar acuerdos vinculantes y exigibles entre los individuos incluidos en los juegos, debido a esta suposición, la teoría de juegos no cooperativa es intrínsecamente individualista. En contraste, el cooperativo analiza situaciones donde tales alianzas son posibles, permitiendo a los jugadores el establecimiento de comunicación, con el fin de hacer acuerdos antes de la obtención de resultados, dando a los participantes información a priori con la que pueden evaluar si la alianza es valiosa para sus intereses. El concepto de “solución” en este tipo de juego se le da a una propuesta que garantice estabilidad y permita alcanzar los resultados deseados por los participantes [24].

Según la forma como los jugadores usan sus estrategias se definen conceptos de solución para los juegos cooperativos y los no cooperativos.

2.1.1 Conceptos de solución para juegos cooperativos

- **Concepto de solución de von Neumann-Morgenstern**

Dado el juego cooperativo entre los jugadores, las utilidades o pagos para estos serán entregadas de manera que sea por lo menos igual a lo que obtendrían si actuaran de manera no cooperativa [25]. Esta estrategia permite mejorar la situación de quienes participan en el juego hasta alcanzar el Pareto superior³.

- **Concepto de solución de Shapley**

Este concepto se caracteriza por buscar una distribución de utilidad o ganancias entre los jugadores que cumplan algunos requisitos ya establecidos, tales como eficiencia, simetría, tratamiento del jugador pasivo y aditividad.

2.1.2 Conceptos de solución para juegos no cooperativos.

- **Equilibrio de Nash**

El concepto de equilibrio de Nash (NE, *Nash Equilibrium*) presenta la idea de que una solución al juego se alcanza cada vez que hay un perfil de estrategias en las cuales la decisión de cada jugador es óptima respecto de la decisión del otro, así, cada jugador está tomando la mejor estrategia posible teniendo en cuenta las de los demás jugadores considerando que todos están cambiando de estrategia de manera colectiva.

En este concepto de solución, cada jugador escoge su mejor estrategia⁴ considerando que conoce las que tomaron las demás, esto implica que no se logre el mejor resultado para todos los jugadores pero si el mejor para cada uno de ellos considerados individualmente.

- **Concepto de estrategias Max Min**

El principio de esta estrategia es maximizar para un jugador la ganancia mínima que puede obtener, es decir, se busca la mejor entre las peores estrategias que estén, de modo que utilizar el concepto Max Min no garantiza la mejor ganancia pero tampoco la mayor pérdida.

- **Equilibrio de satisfacción**

En el equilibrio de satisfacción (SE, *Satisfaction Equilibrium*) la idea es que un jugador esté conforme con una decisión que le permita satisfacer sus necesidades y de igual manera los demás jugadores, de modo que exista un equilibrio si todos están simultáneamente satisfechos porque ninguno de los interesados cambiará de estrategia [26].

³ Se define por Pareto superior aquella situación en la que no es posible mejorar el bienestar de un jugador sin perjudicar algún otro.

⁴ Mejor estrategia es aquella con la se obtienen menos perdidas respecto a otro jugador.

2.1.3 Aprendizaje reforzado

El aprendizaje reforzado (RL, *Reinforcement Learning*) de un jugador consiste en que este aprenda qué acciones debe realizar cuando esté en determinado estado, de manera que pueda maximizar su utilidad en el futuro [27]. En relación con teoría de juegos, el RL es un concepto importante ya que los jugadores, como entes racionales, al implementar métricas de aprendizaje asocian la utilidad obtenida a la acción previamente ejecutada.

Ante esto, la GT se ofrece para satisfacer soluciones para el acceso de los usuarios a los servicios de comunicación que ofrece una red de voz y datos, utilizándolo para abarcar situaciones donde los conflictos o la competencia por el acceso a recursos es inevitable, como es el caso de la utilización del espectro, la potencia de transmisión empleada por un sistema y usuarios, el control de congestión y el control de admisión de usuarios en los sistemas de comunicaciones inalámbricos [28].

Explícitamente, para implementar asignación de espectro y control de potencia, se maneja el concepto de juegos no cooperativos con equilibrio de satisfacción y aprendizaje reforzado, dado que permite utilizar en una red un gran número de usuarios, ofreciendo conceptos de solución equitativos en el sentido en que cada UE escoge y cambia sus estrategias para alcanzar el beneficio que permita satisfacer la necesidad del usuario.

2.2. Control de Potencia

Para mejorar la capacidad total del sistema, existen técnicas de control de potencia, y en aras de avanzar en la obtención de resultados se hace uso de los conceptos de uno de los trabajos previos [5], [6] en donde se define control de potencia implementando un algoritmo basado en teoría de juegos utilizando una representación estratégica no cooperativa que se desarrolla en cada instante de tiempo t , denotado por la ecuación 2.1.

$$G = (N, \{P_n\}, \{U_n\}, \{F_n\}) \quad (2.1)$$

donde,

N Representa el conjunto de usuarios al interior de la micro celda.

P_n es el conjunto de estrategias que corresponden a un grupo de potencias de transmisión disponibles para el UE. En este algoritmo, para cada instante de tiempo t , cada móvil actualiza su potencia de transmisión según un conjunto de probabilidades que tiene una correspondencia uno a uno con el conjunto de potencias establecidas por el sistema [29].

U_n es el beneficio obtenido por el UE al aplicar una estrategia.

F_n es la función de satisfacción impuesta para cada comunicación y está definida por la ecuación 2.2:

$$F_n = \{p_n \in P_n : \Gamma_n + \beta \geq U_n(p_n) \geq \Gamma_n\} \quad (2.2)$$

Donde,

β es un coeficiente de tolerancia a la interferencia.

Además es importante notar que en esta ecuación cada usuario busca alcanzar un umbral Γ_n , el cual corresponde a la relación señal a ruido (SINR, *Signal to Interference Plus Noise Ratio*) establecida para su servicio.

La estación base determina la utilidad alcanzada o la SINR obtenida en el instante anterior y envía este dato al equipo de usuario para que actualice dichas probabilidades [5].

Para la implementación de control de potencia basado en la teoría de juegos, se determinan los siguientes pasos para el desarrollo del algoritmo:

- Para cualquier instante de tiempo t existe un vector de probabilidades $\Pi_n(t) = \{\pi_1(t), \pi_2(t), \dots, \pi_n(t)\}$ que tiene correspondencia uno a uno con los elementos de P_n para el usuario n . Los valores iniciales del vector se escogen de manera arbitraria, de tal forma que la suma sea igual a uno.
- En el instante $t = 0$, cada UE selecciona una potencia de transmisión inicial p_n de acuerdo al elemento con mayor probabilidad del conjunto P_n . La Estación Base determina la utilidad obtenida con la estrategia aplicada y envía esta información al UE para que actualice sus estrategias.
- En el instante $t > 0$, cada UE procede a calcular un valor $b_{n,t}$, el cual se define mediante la ecuación 2.3.

$$b_{n,t} = \frac{M_n + U_{n,t-1} - \Gamma_n}{2M_n} \quad (2.3)$$

Donde M_n es el valor máximo que puede tomar la función de utilidad, $U_{n,t-1}$ corresponde a la utilidad, es decir, la SINR obtenida en el instante anterior y Γ_n es la SINR mínima requerida por el usuario n -ésimo para el servicio [6].

- Partiendo de los resultados obtenidos se actualiza la probabilidad para cada potencia que conforma el conjunto P_n del usuario n , según la ecuación 2.4.

$$\pi_n(t) = \begin{cases} g'(\pi_n(t-1)), & \text{si } \beta \geq U_{n,t} - \Gamma_n \geq 0 \\ g(\pi_n(t-1)), & \text{otro caso} \end{cases} \quad (2.4)$$

Donde β definido anteriormente, se tiene como un parámetro que depende de la tolerancia del sistema a la interferencia, el cual ha sido establecido en 8dB. Las funciones g' y g se definen en las ecuaciones 2.5 y 2.6, respectivamente.

$$g'(\pi_n(t)) = \pi_n(t-1) + \lambda_{n,t} b_{n,t} (1_{\{p_n(t)=p_n\}} - \pi_n(t-1)) \quad (2.5)$$

$$g(\pi_n(t)) = \pi_n(t-1) + \lambda_{n,t} b_{n,t} (1_{\{p_n(t) \neq p_n\}} - \pi_n(t-1)) \quad (2.6)$$

donde, $\lambda_{n,t} = \frac{1}{1+t}$ es la tasa de aprendizaje (RL) para cada UE.

En las ecuaciones 2.5 y 2.6 es posible notar que, si la SINR se encuentra dentro del rango permitido, la probabilidad de la potencia de transmisión elegida se incrementa, con lo cual se mantiene la estrategia adoptada por el UE. En cambio, si la SINR no alcanza o sobrepasa el límite permitido, la probabilidad de la potencia seleccionada disminuye, haciendo que el UE modifique sus estrategias.

La figura 2.1 muestra el diagrama de flujo del control de potencia basado en teoría de juegos que se sigue para cada uno de los UE asociados a las micro estación base (mBS, *micro Base Station*) y femtoceldas del sistema [5].

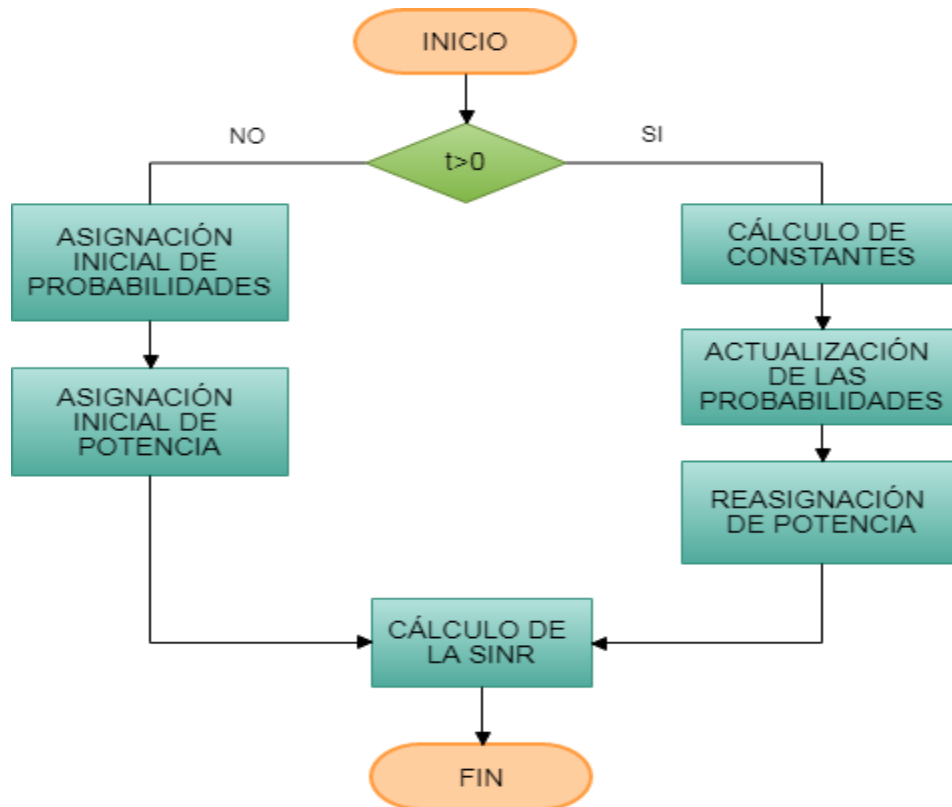


Figura 2.1 Diagrama de flujo del Control de Potencia basado en GT.

2.3 Asignación de espectro

Dentro de las propuestas para mitigar los problemas de asignación de espectro existen numerosos algoritmos. Para este caso, se eligió el algoritmo de estudio basado en la GT el cual fue utilizado en [6] y está caracterizado por manejar el concepto de juegos no cooperativos con equilibrio de satisfacción y que está definido en la ecuación 2.7:

$$G = (K, \{A_k\}_{k \in K}, \{U_k\}_{k \in K}, \{F_k\}_{k \in K}) \quad (2.7)$$

donde,

K es el conjunto de UE presentes en la red.

A_k corresponde al conjunto de estrategias a_k (Espectro disponible).

U_k representa el conjunto de utilidades del juego.

F_k la función de satisfacción, que se define con la ecuación 2.8.

$$F_k = \{a_k \in A_k: \phi_k \geq u_k(a_k) \geq \Gamma_k\} \quad (2.8)$$

donde,

$$\Gamma_k = SINR^{min} \quad (2.9)$$

$$\phi_k = SINR^{min} + \beta \quad (2.10)$$

donde,

$SINR^{min}$ es la SINR mínima requerida por el UE_k para el servicio solicitado.

β es un parámetro que depende de la tolerancia del sistema a la interferencia, el cual ha sido establecido en 8dB, teniendo en cuenta el nivel de SINR que permite alcanzar una comunicación aceptable dentro de los rangos propuestos para el establecimiento de esta [30].

La función de utilidad del juego está dada por la ecuación 2.11:

$$U_k(a_k) = SINR_k = \frac{\alpha_k P_t}{\eta + I_a + I_b} \quad \forall k, p \in K \quad (2.11)$$

$$I_a = \sum_{p=M+1}^N \alpha_p \delta_{f_k f_p} P_t \quad (2.12)$$

$$I_b = \sum_{p=1, p \neq k}^M \alpha_p \delta_{f_k f_p} P_t \quad (2.13)$$

donde,

I_a es a la interferencia que percibe la BS⁵ en la señal transmitida por UE_k, que provocan los UE que no se encuentran dentro de su celda (interferencia intercelular).

I_b es la interferencia que percibe la BS en la señal transmitida por el UE_k, que provocan los UE que se encuentran dentro de su celda (interferencia intracelular).

⁵ Entendida como la BS (micro o femto) en la cual está conectado el UE.

$M = \{1, \dots, m\}$ es el número de UE presentes en la celda donde se encuentra el UE_k .

f_k es la frecuencia portadora asignada al UE_k presente en la red de análisis.

f_p es la frecuencia portadora asignada a cualquier UE presente en la red de análisis diferente a UE_k .

P_t es la potencia de transmisión del UE.

α es la ganancia del sistema experimentada por el UE definida como,

$$\alpha = 10^{\frac{G_{a_{tx}} + G_{a_{rx}} - L}{10}} \quad (2.14)$$

donde,

$G_{a_{tx}}$ es la ganancia de la antena transmisora.

$G_{a_{rx}}$ es la ganancia de la antena transmisora.

L son las pérdidas presentes en el sistema.

η es la potencia de ruido térmico.

$$\eta = 10^{\frac{-174 + 10 \log(BW) + NF + G_{a_{tx}} + G_{a_{rx}}}{10}} \quad (2.15)$$

donde,

BW es el ancho de banda (Hertz).

NF es la figura de ruido establecida en 7 dB [31].

$$\delta_{f_k f_p} = \begin{cases} 1, & f_k - 2BW \leq f_p \leq f_k + 2BW \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.16)$$

donde,

$\delta_{f_k f_p}$ 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 [6].

A continuación, se describe el paso a paso del algoritmo y el diagrama de flujo desarrollado en la figura 2.2, que implementa el modelo de asignación de espectro basado en teoría de juegos:

- 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 ancho de banda (BW , *Bandwidth*), 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 .
- 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 probabilidad⁶ 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 ecuación 2.17.

$$b_{k,t} = \frac{M_k + U_{k,t-1} - \Gamma_k}{2M_k} \quad (2.17)$$

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:

$$\pi_k(t) = \begin{cases} g'(\pi_k(t-1)) & \text{si } \phi_k \geq u_k \geq \Gamma_k \\ g(\pi_k(t-1)) & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.18)$$

Las funciones g' y g se definen en las ecuaciones 2.19 y 2.20, respectivamente.

$$g'(\pi_k(t)) = \pi_k(t-1) + \lambda_{k,t} b_{k,t} \left(\mathbf{1}_{\{a_k(t)=a_k\}} - \pi_k(t-1) \right) \quad (2.19)$$

⁶ Corresponde a la probabilidad de que la estrategia sea elegida.

$$g(\pi_k(t)) = \pi_k(t - 1) - \lambda_{k,t} b_{k,t} (1_{\{a_k(t)=a_k\}} - \pi_k(t - 1)) \quad (2.20)$$

donde, $\lambda_{k,t} = \frac{1}{1+t}$ es la tasa de aprendizaje para cada UE. Las anteriores expresiones, 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 2.2 se ilustra el diagrama de flujo del algoritmo de asignación de espectro basado en GT.

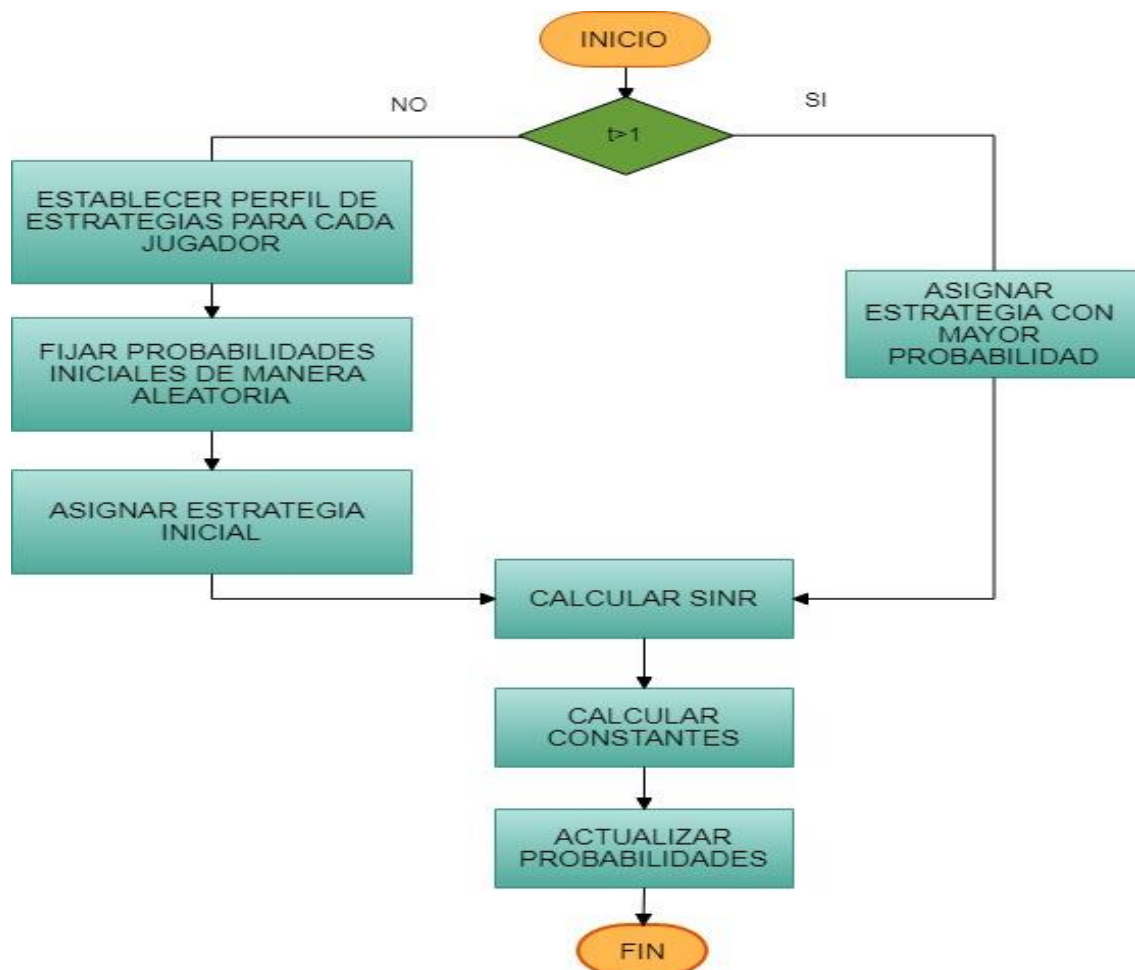


Figura 2.2 Diagrama de flujo Asignación de Espectro basado en GT.

CAPÍTULO 3. MODELO DE CONTROL DE POTENCIA Y ASIGNACIÓN DE ESPECTRO CONJUNTO BASADO EN TEORIA DE JUEGOS EN UNA RED HETEROGÉNEA.

En este capítulo se hace una descripción de las características principales del escenario en donde se implementa control de potencia y asignación de espectro conjunto basado en teoría de juegos en una red heterogénea, además, se hace referencia de los trabajos previos que se establecen como punto de referencia y comparación de los resultados generados.

3.1 Desarrollo metodológico.

La metodología desarrollo adaptativo de software (ASD, *Adaptive Software Development*) tomada para la adaptación del algoritmo de GT en una red HetNet y la obtención del software para ejecutar las simulaciones dentro del desarrollo del trabajo de grado, consta de las etapas mostradas en [32] y se representa en el diagrama de bloques mostrado en la figura 3.1.

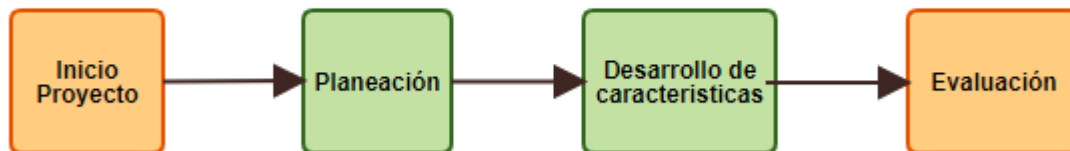


Figura 3.1 Metodología ADS.

- **Inicio de proyecto y planeación.**

Dado que este trabajo de grado es la continuación de dos estudios realizados con antelación [5], [6] de manera preliminar se hace una exploración de los mismos con el fin de determinar características y/o procedimientos tales como herramientas de simulación, codificación del sistema, definición de escenarios y casos de simulación utilizados con la finalidad de planear las bases iniciales para este proyecto.

- **Desarrollo de características.**

En esta etapa se hace la definición del modelo de estudio correspondiente a una red heterogénea y la adaptación del algoritmo basado en GT para la asignación de espectro y control de potencia conjunta.

Para la codificación de la red heterogénea se emplea Matlab haciendo uso de estructuras, por su flexibilidad y fácil manipulación de los parámetros del sistema. Se definen tres estructuras que incluyen las características principales del sistema, la primera es “femtocelda” que contiene información propia tal

como ubicación en el escenario de simulación entre otros parámetros, la segunda es “Usuarios”, la cual contiene información como ubicación, servicio al cual está conectado, frecuencia y nivel de potencia utilizada entre otros valores importantes y por ultimo esta la estructura “microcelda” la cual tiene la ubicación y potencia recibida de los usuarios; por lo que obtenida la implementación se procede al diseño de un plan de pruebas que permita evaluar el algoritmo adaptado.

- **Evaluación.**

En esta etapa que se realiza en el capítulo 4, se ejecuta el plan de pruebas y se hace la evaluación y análisis de los resultados obtenidos de la simulación de red heterogénea con el algoritmo implementado.

3.2 Definición del modelo

Para el estudio de la capacidad de una red heterogénea (HetNet) empleando control de potencia y asignación de espectro conjunta, se realiza una simulación a nivel de sistema en el cual se realiza un análisis global del comportamiento del mismo, donde la HetNet tiene una arquitectura de dos niveles, el nivel superior conformado por una microcelda y el nivel inferior por k número de femtoceldas.

Las características con las que cuenta el sistema son:

- **Tipos de usuarios:** micro Usuarios (mU, *microUser*) los cuales están asociados a la micro estación base y los femto usuarios (FU, *FemtoUser*) conectados al Punto de Acceso Femto (FAP, *Femto Access Point*).
- **Servicios:** Voz y datos en un entorno urbano.
- **Banda de frecuencia:** 1710-1712 MHz.

En la figura 3.2, se ilustra el escenario de simulación que tiene un área de 1 Km^2 en la cual se ubican de manera aleatoria un número fijo de usuarios siguiendo una distribución uniforme.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

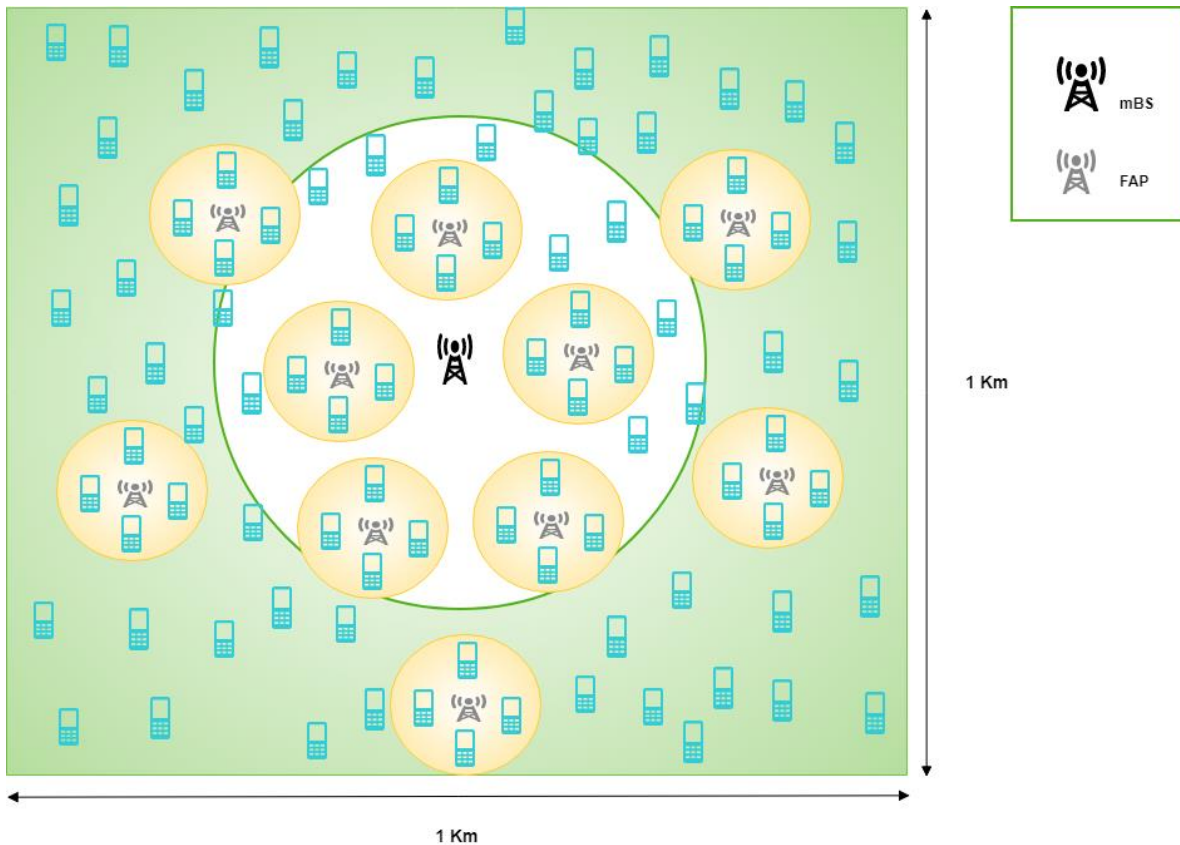


Figura 3.2 Escenario de simulación.

Además, los elementos del escenario tienen valores iniciales establecidos como: potencia de transmisión, ganancia de antena proporcionada por el fabricante y pérdidas de propagación definida por el modelo de propagación para ambientes exteriores e interiores y peatonales, que es válido para enlaces sin línea de vista (NLOS, *Non Line Of Sight*), y describe el peor caso de propagación. Estos parámetros se muestran en el capítulo 4 donde se presenta el desarrollo de las pruebas. El desvanecimiento por Sombra (SF, *Shadow Fading*) se modela mediante una variable aleatoria D con distribución normal y desviación estándar de 5dB [5], de manera que las pérdidas de propagación L quedan representadas por la ecuación 3.1.

$$L[dB] = 49 + 40\log_{10}[d(Km)] + 30\log_{10}[f(MHz)] + D[dB] \quad (3.1)$$

donde,

d : distancia en Km entre los UE y la BS

f : frecuencia en MHz
 D : variable aleatoria

Ahora, en la ecuación 3.2 se tiene mediante balance de enlace que la potencia de recepción de los UE es:

$$P_{Rx}[dBm] = P_{Tx}[dBm] + Ga_{Tx}[dB] + Ga_{Rx}[dB] - L[dB] \quad (3.2)$$

donde,

P_{Tx} potencia de transmisión de la BS.
 Ga_{Tx} ganancia de antena transmisora.
 Ga_{Rx} ganancia de antena receptora.
 L pérdidas de propagación.

Otro elemento a considerar en el estudio del escenario es la interferencia, factor que afecta la red y que hace presencia en el sistema por el reúso de frecuencias y los niveles de potencia similares según sea el caso.

En este caso en particular, hace presencia dos tipos de interferencia, dado que cada BS (mBS o fBS (*femto Base Station*)) se enlazan con los usuarios asociados a su celda e identifican como interferencia las señales de los demás UE que están en otras celdas. Se presenta interferencia co-canal (línea punteada de color azul) a causa del reúso de frecuencias por las BS o redes externas al sistema de estudio, también existe interferencia de canal adyacente (línea punteada de color rojo) presente por efecto causado por otra señal de una frecuencia cercana usada por los BS o UE. Lo anterior se muestra en la figura 3.3.

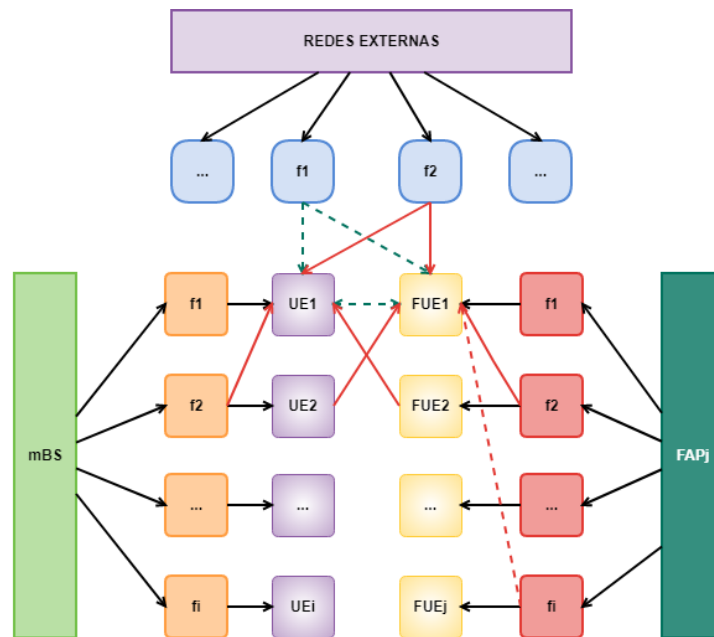


Figura 3.3 Interferencia presente en el sistema.

A continuación se describe el comportamiento general del sistema que modela los escenarios y ejecuta los algoritmos para el desarrollo del presente trabajo de grado.

1. Se ubica una micro estación base (mBS) de 400 m de radio de cobertura, además, de forma aleatoria se disponen en la red k femtobases (fBS) de 50 m de radio de cobertura y n equipos de usuario.
2. Se dispone de manera aleatoria sobre el escenario planteado, k femtoceldas y n equipos de usuario, de modo que cada UE transmita señal teniendo en cuenta efectos de atenuación y desvanecimiento del canal de las señales transmitidas por estos, además, se asocia cada uno a la mBS o FAP más cercana. Para la red se interpreta como interferencia cualquier señal proveniente de otros UE del sistema.
3. Aplicación del algoritmo de asignación de espectro y control de potencia conjunta basado en teoría de juegos al sistema.
4. Calculo de SINR con el fin de determinar el número de usuarios atendidos y obtener la probabilidad de degradación del sistema lo que permite realizar un análisis de capacidad de la red heterogénea.
5. En el bloque de análisis de capacidad se hace referencia a la cantidad de usuarios cubiertos y la velocidad de transmisión o *throughput* de la red que se calcula con la ecuación 3.3 adaptada de la fórmula de capacidad de Shannon.

$$Throughput_{red} = \sum_{n=1}^N BW_{hz} \log_2(1 + SINR_n) \quad (3.3)$$

Donde, n corresponde al número total de UE presentes en la red.

Al ser una simulación a nivel de sistema de tipo estático, el procedimiento descrito se repite para cada UE del sistema, el anterior proceso se ilustra mediante el siguiente diagrama de flujo mostrado en la figura 3.4.

3.3 Diagrama de flujo general del sistema

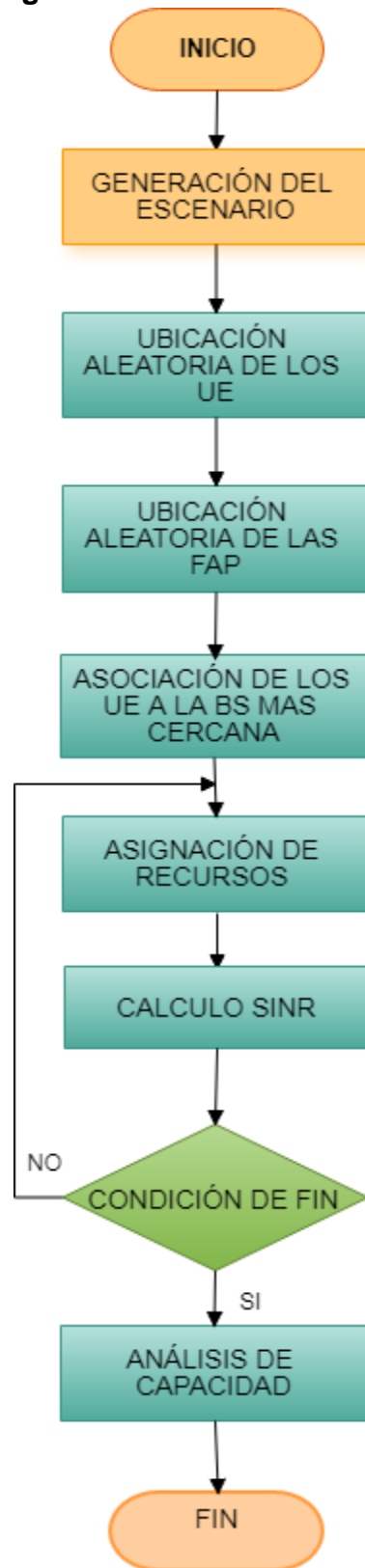


Figura 3.4 Diagrama de flujo general del sistema.

3.3.1 Definición del juego

La ecuación 3.4 muestra la representación del juego G definido para la asignación conjunta de recursos.

$$G = (N, \{P_n\}_{n \in N}, \{U_n\}_{n \in N}, \{F_n\}_{n \in N}) \quad (3.4)$$

donde,

N : representa el conjunto de usuarios al interior de la celda de análisis.

P_n : representa el conjunto de estrategias, conformado por la combinación de 13 niveles de potencia y x valores de frecuencia según el servicio al que está conectado el UE.

U_n : es el conjunto de utilidades del juego, es decir, el beneficio obtenido al aplicar una estrategia $p_n \in P_n$ y está definida por la ecuación 3.5 que corresponde a la SINR alcanzada por cada UE al aplicar la pareja frecuencia-potencia determinada.

$$U_n(p_n) = SINR_n = \frac{\alpha_n P_{tn}}{\eta + i_0 + \sum_{j=1, j \neq n}^N \alpha_j P_{tj}} \quad \forall n, j \in N \quad (3.5)$$

Donde α_n es la ganancia del sistema experimentada por el UE n -ésimo, η es la potencia de ruido térmico, i_0 representa la interferencia co-canal y adyacente que percibe la mBS debida a los usuarios presentes en la red.

F_n : es la función de satisfacción de cada comunicación, y se define mediante la ecuación 3.6.

$$F_n = \{p_n \in P_n : \Gamma_n + \beta \geq u_n(p_n) \geq \Gamma_n\} \quad (3.6)$$

Para la ecuación 3.6 se observa que un usuario es satisfecho si la utilidad obtenida al aplicar una estrategia determinada, iguala o supera ligeramente un valor umbral (Γ_n), el cual corresponde a la SINR establecida para un servicio. La cota superior dada por $\Gamma_n + \beta$, procura causar la menor interferencia posible sobre las comunicaciones de los demás usuarios del sistema. Siendo β un valor de 8 dB, mencionado en el capítulo 2.

Para el diseño del modelo del presente trabajo, basado en teoría de juegos se consideran un conjunto de estrategias de frecuencia, potencia, donde a diferencia de los trabajos previos cuyos procesos son descritos en el capítulo 2, y que para el caso de “Análisis del throughput de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos” se manejaba una potencia para todas las frecuencias que fueron el centro de estudio, mientras que para “Incidencia de un algoritmo de control de potencia en la capacidad de una red heterogénea” se presentó una frecuencia para el estudio de varias potencias.

Ahora, el conjunto de estrategias conformado para la adaptación del algoritmo está conformado por n parejas, cada pareja tiene una frecuencia y una potencia formando una estrategia de manera conjunta con el fin de evaluar el comportamiento a la par de estos dos parámetros y determinar si por medio de la GT, el algoritmo permite que un usuario dentro de la zona de cobertura de la red pueda alcanzar el requerimiento de SINR y conectarse a un servicio dado, luego, la adaptación radica en el establecimiento de las parejas frecuencia-potencia y su posterior uso como un único parámetro basado en su valor de probabilidad conjunta; dicha probabilidad cambia al paso de las iteraciones en donde el algoritmo intenta alcanzar el objetivo o requerimiento.

A continuación se muestra la conformación de las parejas de frecuencia y potencia:

Sea la asignación de frecuencia y de potencia dos eventos independientes, se definen dos vectores que contienen m probabilidades de frecuencia y n probabilidades de potencia de modo que al multiplicar cada elemento del primer vector con todos los elementos del segundo vector se obtengan todas las posibles combinaciones que puedan surgir entre estos vectores, con la finalidad de obtener un tercer arreglo que contenga los valores de las probabilidades conjuntas a partir de los dos primeros vectores, y se muestran en la ecuación 3.9, además se muestran los conjuntos de estrategias definidas por la pareja de frecuencia potencia, así:

Sean,

$$\begin{aligned} \text{frecuencias del sistema} &= [f_1, f_2, f_3, \dots, f_m] \\ \text{Potencias del sistema} &= [p_1, p_2, p_3, \dots, p_n] \end{aligned} \quad (3.7)$$

Las estrategias conjuntas se definen por:

$$\text{Estrategias}(total) = \begin{bmatrix} [f_1 * p_1] & [f_1 * p_2] & [f_1 * p_3] & \dots & [f_1 * p_n] \\ [f_2 * p_1] & [f_2 * p_2] & [f_2 * p_3] & \dots & [f_2 * p_n] \\ [f_3 * p_1] & [f_3 * p_2] & [f_3 * p_3] & \dots & [f_3 * p_n] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [f_m * p_1] & [f_m * p_2] & [f_m * p_3] & \dots & [f_m * p_n] \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Y sean,

$$\begin{aligned} \text{Prob}(frec) &= [p_{f_1}, p_{f_2}, p_{f_3}, \dots, p_{f_m}] \\ \text{Prob}(pot) &= [p_{p_1}, p_{p_2}, p_{p_3}, \dots, p_{p_n}] \end{aligned} \quad (3.9)$$

Las probabilidades conjuntas son:

$$Prob(total) = \begin{bmatrix} [p_{f_1} * p_{p_1}] & [p_{f_1} * p_{p_2}] & [p_{f_1} * p_{p_3}] & \dots & [p_{f_1} * p_{p_n}] \\ [p_{f_2} * p_{p_1}] & [p_{f_2} * p_{p_2}] & [p_{f_2} * p_{p_3}] & \dots & [p_{f_2} * p_{p_n}] \\ [p_{f_3} * p_{p_1}] & [p_{f_3} * p_{p_2}] & [p_{f_3} * p_{p_3}] & \dots & [p_{f_3} * p_{p_n}] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [p_{f_m} * p_{p_1}] & [p_{f_m} * p_{p_2}] & [p_{f_m} * p_{p_3}] & \dots & [p_{f_m} * p_{p_n}] \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Una vez obtenidas las nuevas probabilidades conjuntas (ecuación 3.10), serán tomadas en cuenta al implementar el algoritmo que usa asignación de frecuencia y control de potencia basado en teoría de juegos, además, cada valor generado corresponde a una pareja frecuencia-potencia con un valor de probabilidad inicial, estas representan las estrategias para la implementación del algoritmo en base a la teoría de juegos, procesos los cuales están inmersos en los bloques de asignación inicial de probabilidades para los valores de frecuencia y de potencia, además del bloque de asignación inicial de recursos conjunta del diagrama de flujo mostrado en la figura 3.5.

Este modelo de asignación de frecuencia y control de potencia está basado en un juego no cooperativo que incluye aprendizaje reforzado como técnica para determinar los valores que serán utilizados como conjuntos de frecuencia y potencia encaminados a lograr el objetivo de evaluar el desempeño del sistema móvil celular.

3.3.2 Descripción del algoritmo

El algoritmo considera acciones para $t=0$ y $t>0$ para los cuales se tienen definidos los siguientes procesos:

En $t=0$, se asigna a cada elemento del conjunto de potencias y frecuencias un valor de probabilidad de manera aleatoria donde existe correspondencia uno a uno. Luego, se conforman las nuevas estrategias dadas por la multiplicación de las probabilidades de potencia y frecuencia mencionadas anteriormente, las cuales fueron definidas en la ecuación 3.10 y que serán las estrategias con las que el algoritmo empezara a trabajar.

Para $t>0$, cada UE calcula el valor $b_{n,t}$ que está definido por la ecuación 3.11.

$$b_{n,t} = \frac{M_n + u_{n,t-1} - \Gamma_n}{2M_n} \quad (3.11)$$

donde,

$b_{n,t}$ es un término que indica al UE que tan rápido debe cambiar de estrategia tomada en el instante anterior.

M_n corresponde al máximo valor que puede alcanzar la función de utilidad $u_{n,t-1}$, que es la utilidad obtenida en el instante previo por el UE.

Γ_n es el umbral de satisfacción impuesto para cada servicio.

Luego, se actualiza el vector de probabilidades conjuntas de acuerdo a la función descrita a continuación en la ecuación 3.12.

$$\pi_n(t) = \begin{cases} g'(\pi_n(t-1)), & \text{si } \beta \geq U_{n,t-1} - \Gamma_n \geq 0 \\ g(\pi_n(t-1)), & \text{otro caso} \end{cases} \quad (3.12)$$

Las funciones g y g' se definen en las ecuaciones 3.13 y 3.14, respectivamente.

$$g(\pi_n(t)) = \pi_n(t) + \lambda_{n,t} b_{n,t} (1_{\{p_n(t) \neq p_n\}} - \pi_n(t)) \quad (3.13)$$

$$g'(\pi_n(t)) = \pi_n(t) + \lambda_{n,t} b_{n,t} (1_{\{p_n(t) = p_n\}} - \pi_n(t)) \quad (3.14)$$

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

Con los procesos anteriores, se obtiene el diagrama de flujo del algoritmo de asignación de frecuencia y control de potencia conjunta basado en la GT mostrado en la figura 3.5 y que corresponde a la adaptación del algoritmo, dado que en los trabajos previos solo se trabaja con control de potencia o con asignación de espectro. El procedimiento anterior corresponde al bloque de asignación de recursos del diagrama de flujo general del sistema que se ilustra en la figura 3.4.

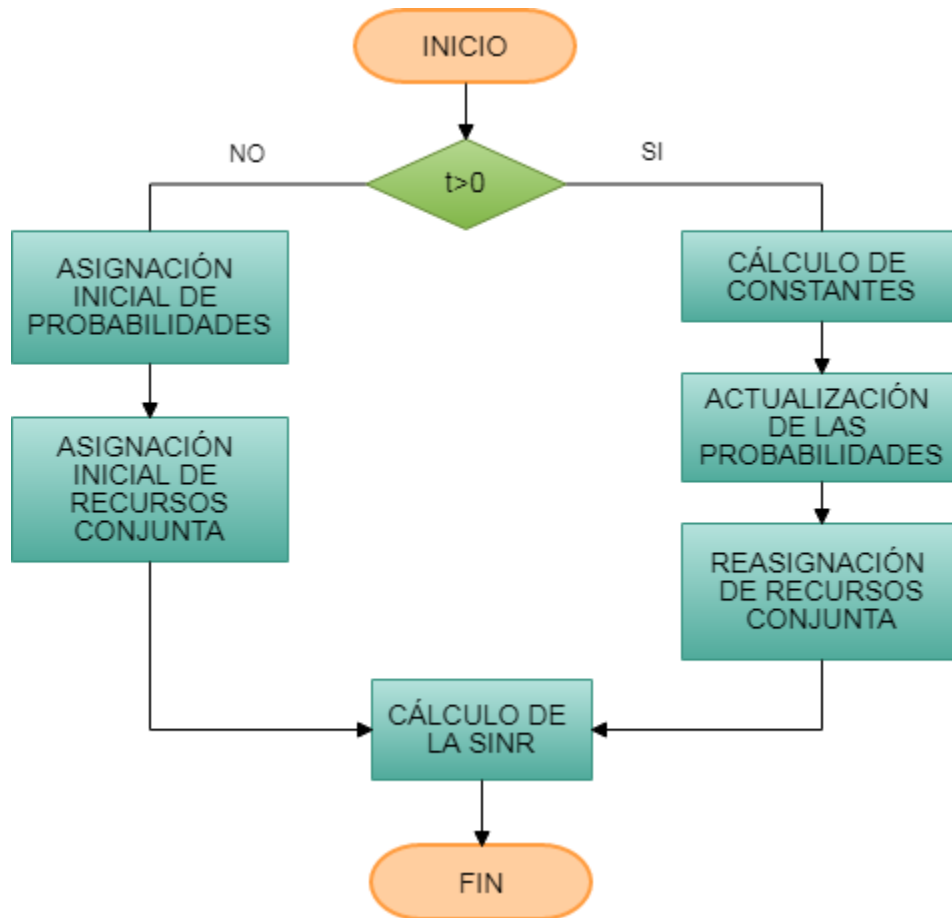


Figura 3.5 Diagrama de flujo de asignación de espectro y control de potencia conjunta basado en GT.

3.4 Modelo de control ideal de potencia con asignación aleatoria de frecuencia.

Para conocer la viabilidad del algoritmo propuesto, es necesario compararlo con uno que no utilice GT, para ello se hace asignación aleatoria de espectro con control ideal de potencia (IPC, *Ideal Power Control*).

3.4.1 Asignación de espectro

En este paso, se asigna a cada UE una frecuencia de manera aleatoria entre el conjunto de recursos disponibles en la red.

3.4.2 Modelo de control ideal de potencia

Para la implementación de IPC, inicialmente se identifica el servicio al cual están accediendo los usuarios y la SINR requerida por este servicio; para lo cual, se busca establecer un nivel adecuado de potencia para transmitir cada uno de los UE para que se pueda igualar la potencia de recepción que percibe la BS de cada uno de ellos, procurando mitigar problemas de interferencia.

En la ecuación 3.15 se define la expresión general de SINR para los UE al interior de la celda de análisis.

$$SINR_i = \frac{\alpha_i P_{ti}}{\eta + \sum_{j=1, j \neq i}^N \alpha_j P_{tj}} \quad i, j \in \mathbb{N} \quad (3.15)$$

Donde, α_i es la ganancia del sistema que experimenta el usuario i , P_{ti} corresponde a la potencia con la cual transmite el usuario i -ésimo, η es el ruido térmico del sistema y N representa el número de usuarios presentes en la celda de análisis.

Para el análisis de control de potencia, se toma el sistema de ecuaciones 3.16, el cual permite determinar la SINR que se requiere por cada UE.

$$\begin{aligned} \eta_1 + \sum_{j=1, j \neq 1}^N \alpha_j P_{tj} &= \frac{\alpha_1 P_{t1}}{SINR_1}, \\ \eta_2 + \sum_{j=1, j \neq 2}^N \alpha_j P_{tj} &= \frac{\alpha_2 P_{t2}}{SINR_2}, \\ &\vdots \\ \eta_N + \sum_{j=1, j \neq N}^N \alpha_j P_{tj} &= \frac{\alpha_N P_{tN}}{SINR_N} \end{aligned} \quad (3.16)$$

En este sistema de ecuaciones se define $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N\}$ como el vector de ganancias del sistema, de tamaño $1 \times N$, $P = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$ como el vector conformado por las potencias requeridas para satisfacer los requerimientos de SINR que solicita cada servicio, $\eta = \{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N\}$ es el vector de ruido térmico de orden $N \times 1$ y se define también $SINR = SINR_1, SINR_2, \dots, SINR_N$ como el vector de orden $N \times 1$ que contiene los requerimientos de SINR para cada UE presente en el sistema. En la ecuación 3.17 se muestra un arreglo matricial de ecuaciones en el cual P constituye el vector de incógnitas.

$$\begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \vdots \\ \eta_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_1}{SINR_1} & -\alpha_2 & \cdots & -\alpha_N \\ -\alpha_1 & \frac{\alpha_2}{SINR_2} & \ddots & -\alpha_N \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 & \cdots & \frac{\alpha_N}{SINR_N} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_N \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Sintetizando el anterior sistema de ecuaciones matricial se obtiene la ecuación 3.18.

$$AP = \eta \quad (3.18)$$

Donde, A es una matriz no singular de orden $N \times N$ que se define en la ecuación 3.19.

$$A = \begin{cases} -\alpha_j & i \neq j \\ \frac{\alpha_i}{SINR_i} & i = j \end{cases} \forall i, j \in \mathbb{N} \quad (3.19)$$

Así, el vector de potencias de transmisión está dado por la ecuación 3.20.

$$P = A^{-1}\eta \quad (3.20)$$

Con la ecuación 3.20 se obtiene el valor de potencia de transmisión que debe ser asignado a cada UE, este análisis considera la interferencia de canal adyacente y co-canal, por eso en la ecuación 3.15 se modifica la expresión inicial de SINR para incluir la interferencia inter-celda que se ocasiona por los usuarios asociados a las demás BS obteniendo la ecuación 3.21.

$$SINR_i = \frac{\alpha_i P_{ti}}{\eta + i_0 + \sum_{j=1, j \neq i}^N \alpha_j P_{tj}} \quad i, j \in \mathbb{N} \quad (3.21)$$

Donde, i_0 es un escalar que representa la interferencia de canal adyacente y co-canal presente en la BS de análisis.

Luego, el sistema de ecuaciones lineales se define en la ecuación (3.22).

$$AP = \eta + i_0 \quad (3.22)$$

Por lo tanto, las potencias de transmisión se obtienen como se muestra en la ecuación 3.23.

$$P = A^{-1}(\eta + i_0) \quad (3.23)$$

En la figura 3.6 se muestra el diagrama de flujo que describe el algoritmo de IPC, en el cual el bloque de color azul es el proceso que lleva a cabo un UE y los bloques de color verde son los procesos que realiza la BS que atiende al UE.

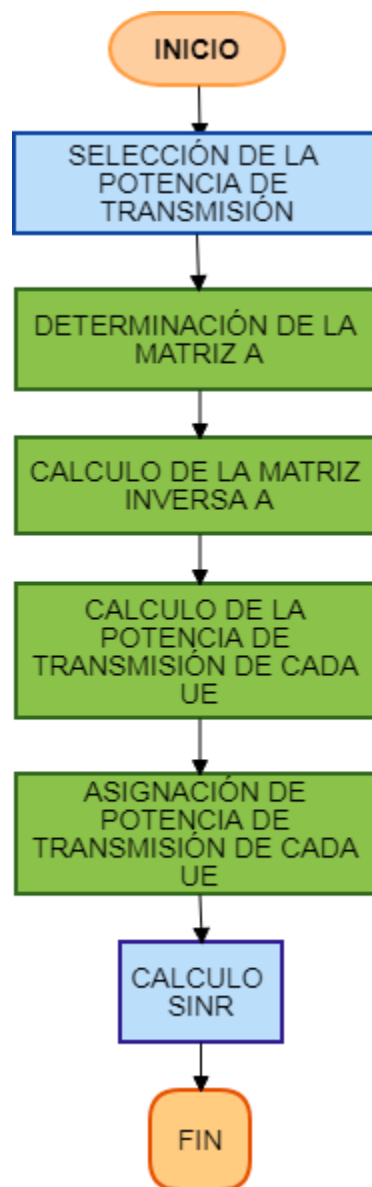


Figura 3.6 Diagrama de flujo de control ideal de potencia.

Una vez obtenidos los diagramas de flujo que describen el funcionamiento de los algoritmos a implementar, se procede a realizar la codificación en la herramienta de simulación Matlab, programa que fue escogido para el desarrollo del código y obtención de resultados de los trabajos previos a este trabajo de grado.

CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los escenarios de simulación y el análisis de resultados teniendo en cuenta las restricciones del sistema que se describen a continuación.

4.1 Limitaciones del sistema

Para simular el escenario se consideraron las siguientes restricciones:

Modelo de propagación: el modelo de propagación utilizado no tiene en cuenta las alturas de los UE ni de las BS, tampoco las pérdidas por lluvia o gases ya que la frecuencia de operación del sistema es menor a 10 GHz.

- Control de potencia en el UL: dado que la condición de interferencias es más crítica en UL que en DL, la implementación del control de potencia se hace solo en este sentido de la comunicación.
- Asignación de frecuencia en el UL: dado que la condición de interferencia es más crítica en UL que en DL, la asignación de espectro se implementa solo en este sentido de la comunicación.
- Movilidad: el sistema diseñado considera a los usuarios estáticos dentro del escenario de simulación.
- 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.
- La asignación de usuarios a las BS (mBS, fBS) se hace de manera aleatoria, siendo la distancia del UE a las estaciones el parámetro considerado para la asociación a las BS.

4.2 Definición de los escenarios y casos de simulación.

A continuación se definen los escenarios y los casos de simulación para la realización de las pruebas en las cuales se implementa un algoritmo de asignación de espectro y control de potencia conjunta basado en GT y otro con asignación aleatoria de espectro y control ideal de potencia.

Para las pruebas se considera un sistema de telecomunicaciones con un área de 1 Km² en el que se tiene una mBS con 400 metros de radio de cobertura, femtoceldas de 50 metros de radio de cobertura y 500 UE ubicados de manera aleatoria siguiendo una distribución uniforme.

En el análisis de capacidad⁷ del sistema se definen los siguientes escenarios y 3 casos de simulación en los cuales la SINR objetivo cambia según el servicio. En cada caso se realiza 1000 repeticiones, además, para cada escenario se trabaja los tres casos mencionados. La tabla 4.1 especifica los escenarios y casos de simulación.

Tabla 4.1 Escenarios y casos de simulación.

Escenarios de simulación		
Característica	Escenario 1	Escenario 2
Área	1 Km ²	1 Km ²
Número femtoceldas	100	150
Radio microcelda	400 m	400 m
Radio femtocelda	50 m	50 m

Para cada escenario, se simulan los siguientes casos:

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

4.3 Definición de las características de los escenarios de simulación.

La tabla 4.2 resume las características técnicas y los parámetros seleccionados para la configuración de los escenarios de simulación propuestos.

Tabla 4.2 Características de los escenarios.

Característica	Valor
Banda de frecuencias	Banda 4 (1710- 1712 MHz)
Servicio implementado	Voz, datos, voz y datos
Requerimiento de SINR	-7 dB para voz,-4 dB para datos

⁷ Capacidad vista como cantidad de usuarios y velocidad de transmisión.

Característica	Valor
Cantidad de UE	500
Potencias de transmisión	33dBm, 29dBm, 25dBm, 21dBm, 17dBm, 13dBm, 9dBm, 5dBm, 1dBm, -3dBm, -7dBm, -15dBm.
Ganancia de antena de la mBS	20dB
Ganancia de antena del UE	0dB
Potencia de ruido térmico	-101.75dBm
Figura de ruido	7.4dB

Las gráficas resultantes de la simulación muestran como varían la SINR de cada UE, probabilidad de las estrategias de cada UE, probabilidad de degradación, *Throughput* del UE y *Throughput* de la red, que son base para el análisis del presente proyecto.

4.4 Simulación y análisis de resultados.

En la ejecución de las pruebas inicialmente se considera el escenario y caso de simulación para cada algoritmo implementado.

Para el análisis de la capacidad en la red heterogénea, de manera preliminar se realizan las pruebas utilizando el algoritmo que implementa asignación de espectro y control de potencia conjunta basado en GT y posteriormente se repite la prueba con asignación aleatoria de espectro e IPC.

A continuación se presentan las pruebas realizadas para los escenarios y casos definidos en la tabla 4.1 para los modelos basados en GT e IPC implementados.

4.4.1 Escenario 1

Para cada uno de los escenarios de simulación, en la figura 4.1 se identifican como UE dentro de la red de análisis los círculos negros y los grises como los UE fuera de esta, los cuadros azules identifican a las femtoceldas y el triángulo negro la mBS respectivamente. Los ejes X y Y del área del sistema corresponden a la distancia medida en metros como se muestra en la figura 4.1.

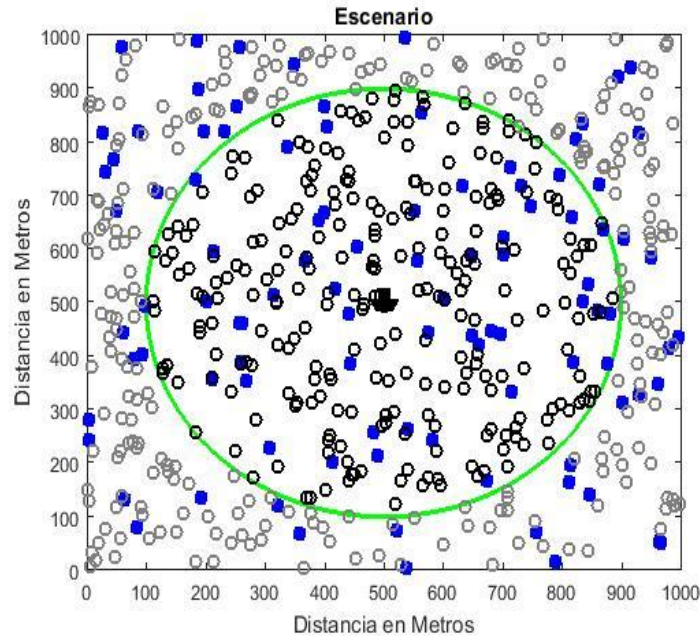


Figura 4.1 Escenario 1 de simulación.

- **Caso 1: voz**

En la figura 4.2 se muestra el resultado de la implementación del algoritmo de asignación de espectro y control de potencia conjunta basado en teoría de juegos para el servicio de voz, donde los círculos rojos corresponden a los usuarios que alcanzaron la SINR requerida, los círculos negros son los que no lograron conectarse al sistema y los de color gris los que están por fuera de la zona de cobertura de la mBS.

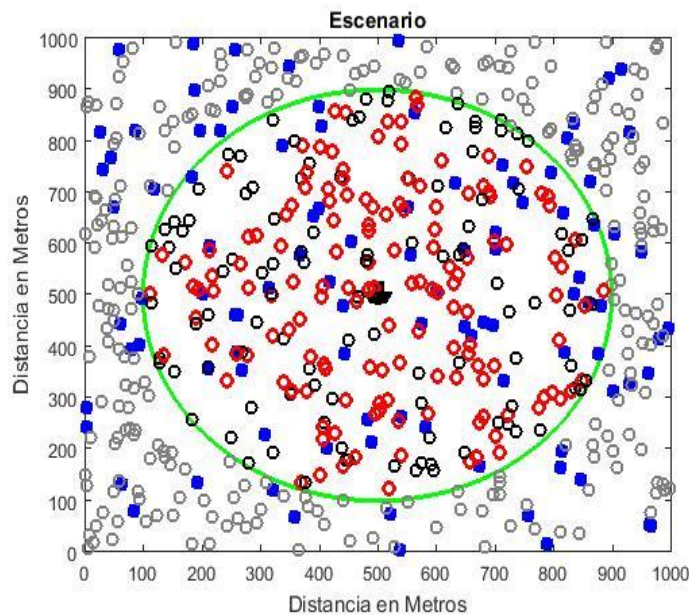


Figura 4.2 Escenario 1 Modelo basado en la GT para voz.

Para este caso, 253 usuarios están en la zona de cobertura de la mBS de los cuales 146 alcanzaron el requerimiento de SINR, lo que corresponde al 57.3% de la totalidad de los usuarios, además, de los 146 el 32.4% corresponden a usuarios conectados a la mBS y el 67.6% a las fBS indicando que los usuarios se conectan con mayor facilidad a estas debido a la proximidad.

La figura 4.3 muestra la variación de probabilidad de estrategias de asignación de espectro y control de potencia conjunta basada en la GT del UE 25, que se encuentra ubicado a 447m de la mBS el cual inicia con una estrategia que mantiene hasta la iteración 120, pero al no alcanzar el nivel de SINR objetivo como se observa en la figura 4.4, el algoritmo hace que la probabilidad elegida disminuya y aumente las demás de modo que se cambie de estrategia intentando alcanzar dicho valor, de nuevo la segunda estrategia elegida no satisface el requerimiento y se modifica en la iteración 250, a partir de la cual se asigna la pareja frecuencia-potencia (1710.15 MHz, -7dBm) con la que el UE obtiene una utilidad dentro del rango establecido como se observa en la curva de variación de SINR donde este parámetro se estabiliza.

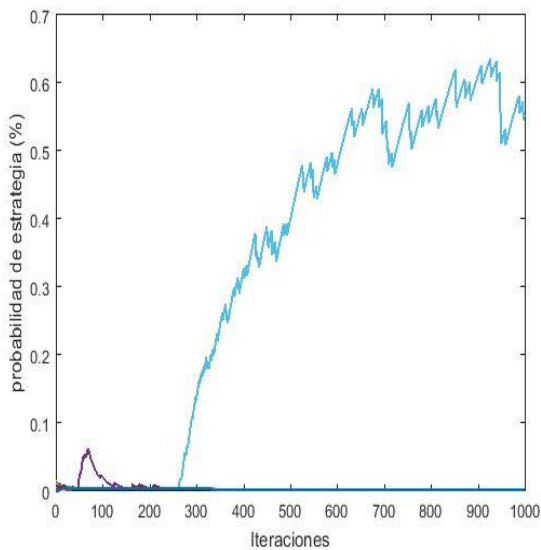


Figura 4.3 Variación de probabilidad de estrategia para el UE 25.

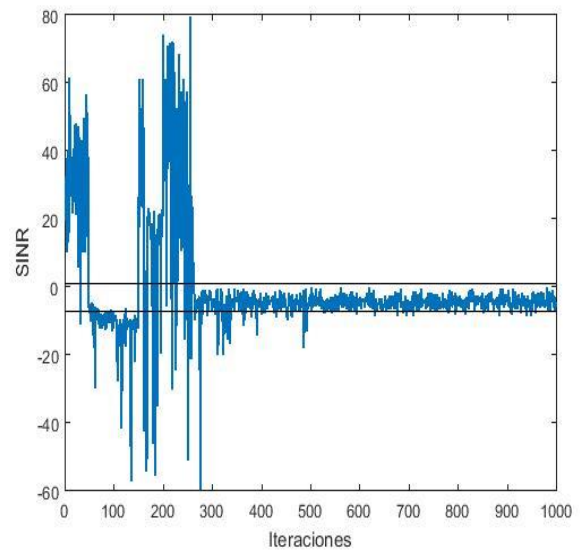


Figura 4.4 SINR UE 25.

La figura 4.5 muestra el *throughput* del UE 25 en donde se puede notar que mejora o decae de acuerdo a los niveles de SINR alcanzados durante la simulación, arrojando un valor inicial de 210 kbps, pero al paso de las iteraciones el algoritmo cambia de estrategias intentando alcanzar el requerimiento de SINR lo que hace que el *throughput* finalmente se estabilice hasta alcanzar un valor medio de 33 kbps.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

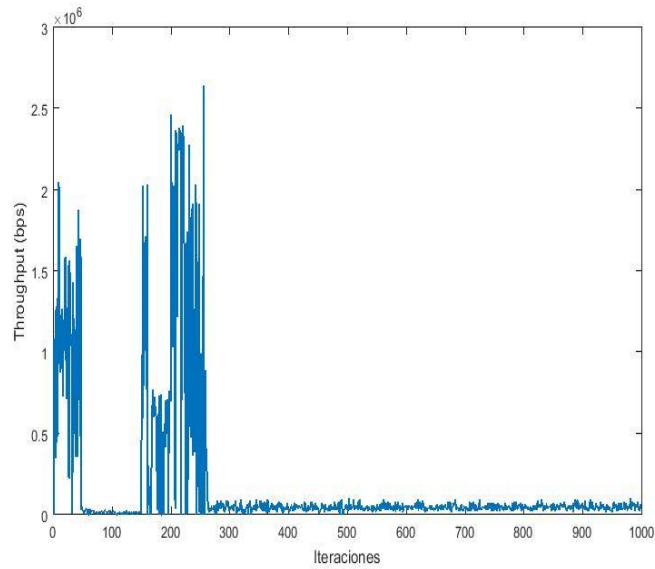


Figura 4.5 *Throughput* UE 25.

En las figuras 4.6 y 4.7, se aprecia la probabilidad de las estrategias de un usuario ubicado a una distancia de 398 m de la mBS y la SINR que alcanza a lo largo del juego. Este UE no logra alcanzar el valor de utilidad requerido debido a las condiciones de interferencia presentes en la microcelda que no le permitieron encontrar la pareja frecuencia-potencia necesaria para alcanzar el valor de SINR objetivo.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

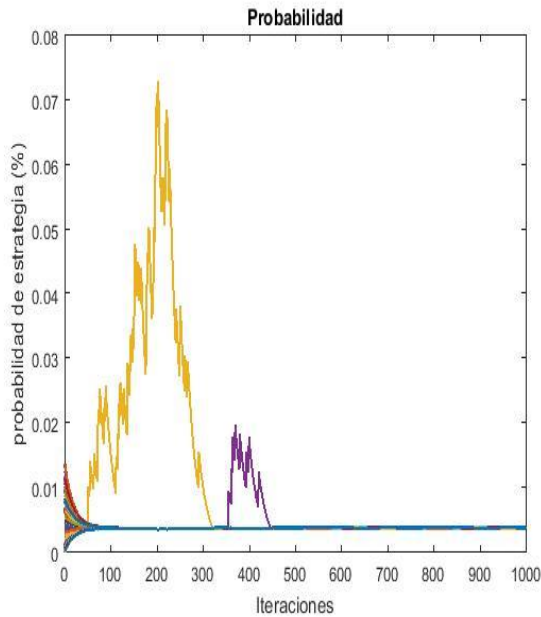


Figura 4.6 Variación de probabilidad de estrategia UE 373.

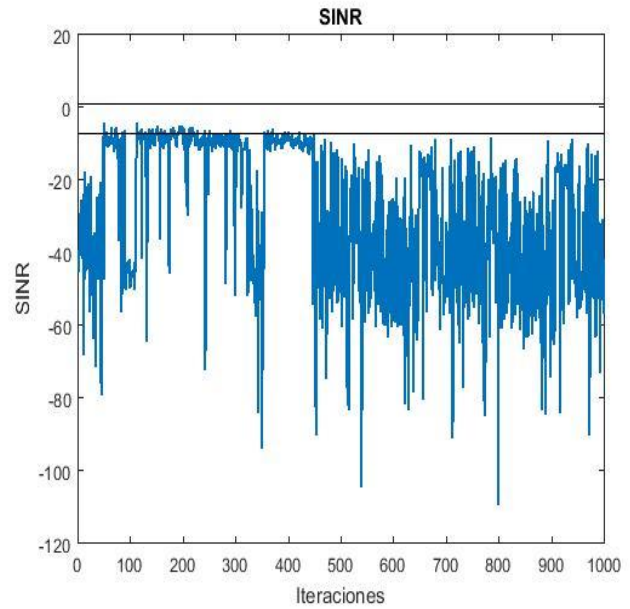


Figura 4.7 SINR UE 373.

En resultado de la implementación de asignación de espectro aleatoria con IPC se obtuvo el escenario presente en la figura 4.8 en donde se conectaron 47 usuarios, resultado que comparado con el algoritmo de asignación de espectro y control de potencia conjunta basado en GT disminuye en 39,6%, dicha reducción se puede evidenciar en las figuras 4.9 y 4.10 de probabilidad de degradación obtenidas para los dos algoritmos implementados donde la que implementa GT tiende a valores cercanos a 55% mientras que el otro se mantiene constante en un valor de 84,5%.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

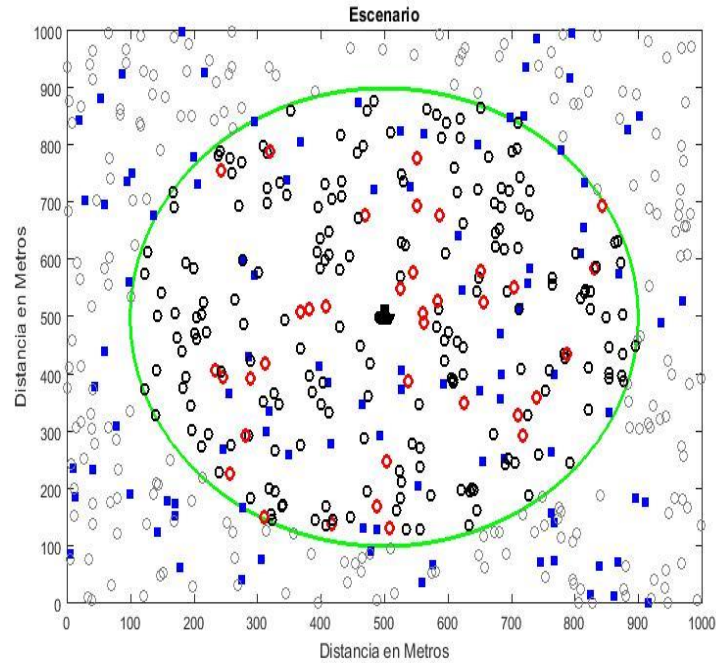


Figura 4.8 Escenario 1. Modelo con IPC servicio voz.

En la figura 4.8 se muestra el escenario de los usuarios generado para el servicio de voz, con el algoritmo de control de potencia ideal. Donde de igual manera los círculos rojos son los UE que alcanzaron la SINR requerida para la conexión al servicio. A continuación, se presentara las probabilidades de degradación para realizar la comparación tanto de IPC como de GT en las figuras 4.9 y 4.10.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

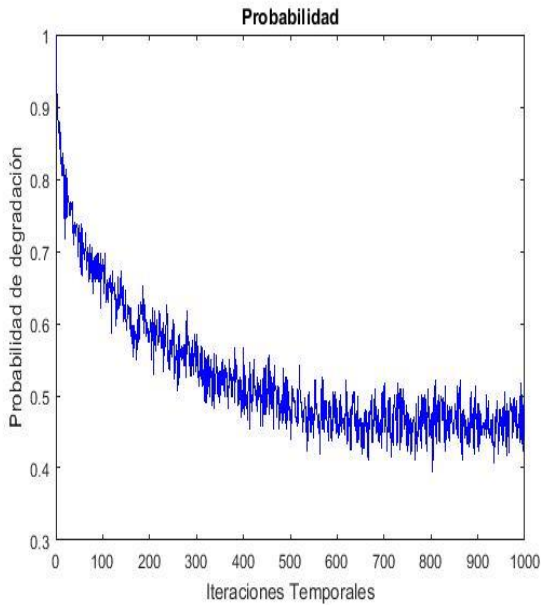


Figura 4.9 Probabilidad de degradación del sistema basado en GT.

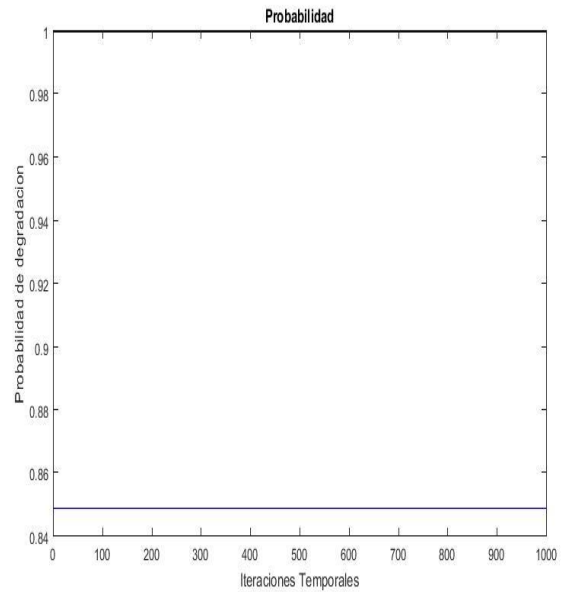


Figura 4.10 Probabilidad de degradación del sistema basado en IPC.

En la figura 4.11 el *Throughput* de la red donde se implementa asignación de frecuencia y control de potencia conjunta basado en GT, inicialmente presenta un valor alto debido a que algunos usuarios conectados presentan valores de SINR elevados, pero el algoritmo hace que dichos usuarios disminuyan tal parámetro de modo que logren alcanzar valores entre la SINR objetivo y la tolerancia y con ello se obtenga un valor estable del *Throughput* en la red tomando un valor medio de 23 Mbps, mientras tanto en la figura 4.12 el resultado medio es 3.5 Mbps representando una diferencia importante.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

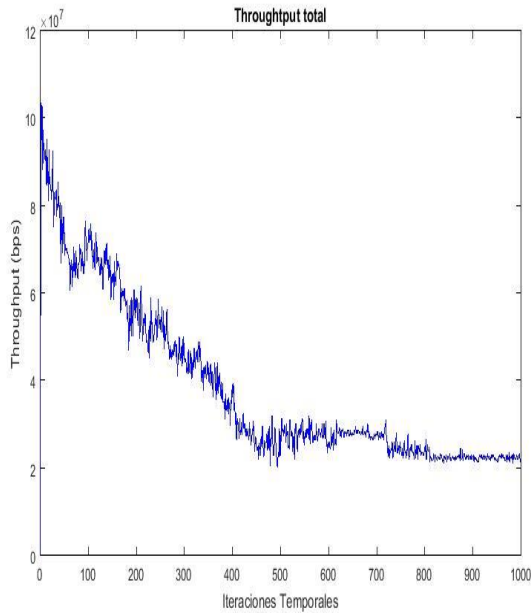


Figura 4.11 *Throughput* del sistema basado en GT.

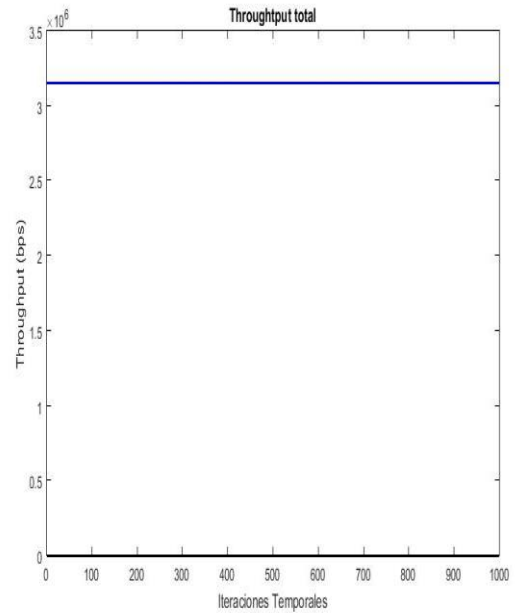


Figura 4.12 *Throughput* del sistema basado en IPC.

Las tablas 4.3 y 4.4 muestran la información recopilada para los dos algoritmos en la prueba el servicio de voz en el escenario 1, en las cuales se puede observar que la mayoría de los usuarios se conectan a las fBS.

Tabla 4.3. Resultados basados en GT. Voz. Escenario 1

In	us_mBS	%us_MBS	us_fBS	%us_fBS	Usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
253	47	32.4	98	67.6	145	57.3	32.242

Tabla 4.4. Resultados basados en IPC. Voz. Escenario 1.

In	us_mBS	%us_MBS	us_fBS	%us_fBS	Usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
266	12	26	35	74	47	17.7	3.57

Para el caso de GT se obtuvo una mayor cantidad de usuarios conectados al sistema, aun así se observa que en GT se presentó una mayor cantidad de UE conectados a la MBS que para el caso de IPC, donde la mayoría de los usuarios se conectaron a las fBS. Además se aprecia una velocidad del sistema es mucho mayor para el algoritmo que implementa GT.

En la figura 4.13, se muestra que el nivel de potencia más común es 33 dBm, valor asociado a los UE más distantes de las BS, sin embargo los niveles bajos de potencia tienen un valor importante al momento de ser elegidos por los usuarios, indicando que el algoritmo escoge un valor de potencia según se requiera para alcanzar el requerimiento de SINR objetivo.

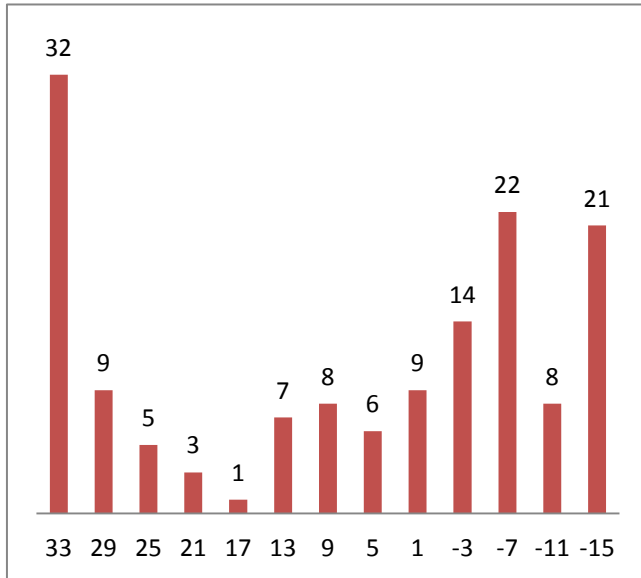


Figura 4.13 Niveles de potencia escogidos por los usuarios.

Promedio usuarios	Potencia (dBm)
32	33
9	29
5	25
3	21
1	17
7	13
8	9
6	5
9	1
14	-3
22	-7
8	-11
21	-15

Tabla 4.5 Potencias utilizadas por los UE

- **Caso 2: datos**

En la figura 4.14 se muestra el resultado de la implementación del algoritmo de asignación de espectro y control de potencia conjunta basado en teoría de juegos para el servicio de datos, los círculos verdes son los UE que lograron establecer conexión, en el escenario se evidencia que pocos usuarios lograron la SINR requerida para el caso de datos de -4, presentándose muchos más puntos negros que verdes dentro de la mBS.

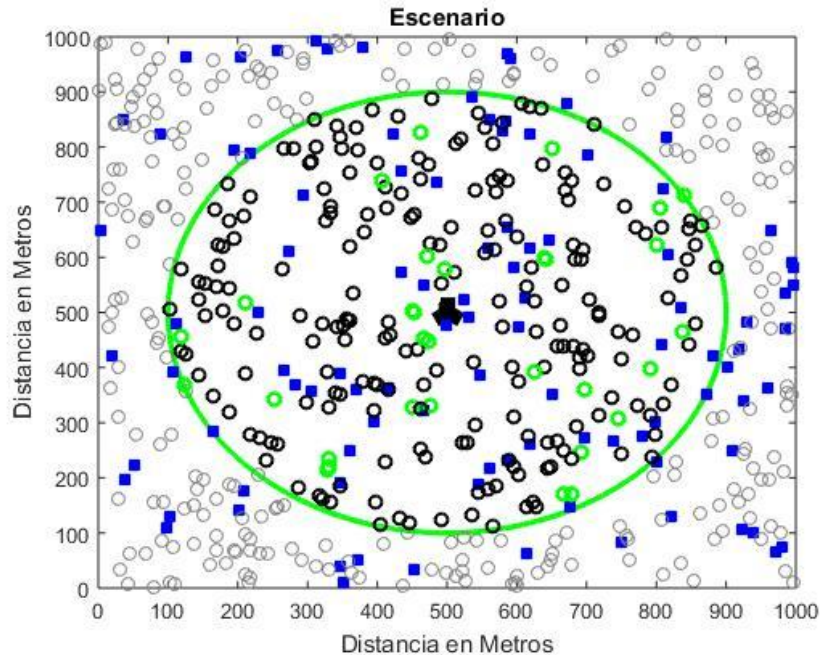


Figura 4.14 Escenario 1 basado en GT para datos.

Para este caso, 242 usuarios están en la zona de cobertura de la mBS de los cuales 29 alcanzaron el requerimiento de SINR, lo que corresponde al 12.8% de la totalidad de los usuarios, además, de los 29 el 6.5% corresponden a usuarios conectados a la mBS y el 93.5% a las fBS indicando que los usuarios se conectan con mayor facilidad a las anteriormente mencionadas por la cercanía a estas.

La figura 4.15 muestra la variación de probabilidad de estrategias de asignación de espectro y control de potencia conjunta basada en GT del UE 133, que se encuentra ubicado a 362m de la mBS, el cual encuentra una estrategia en la iteración 950 y una vez llegada esta iteración se asigna la pareja frecuencia-potencia (1710.1 MHz, 33dBm) con el que el UE obtiene una utilidad dentro del rango establecido como se observa en la curva de variación de SINR donde este parámetro se estabiliza como se muestra en la figura 4.16.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

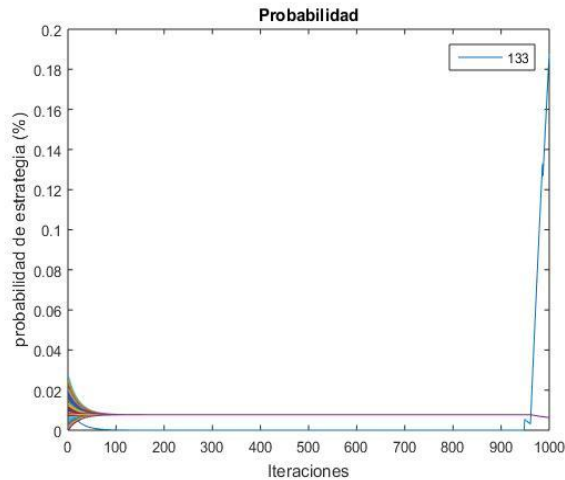


Figura 4.15 Variación de probabilidad de estrategia para el UE 133.

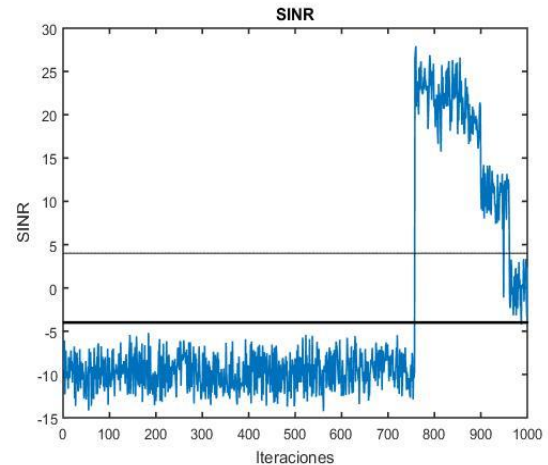


Figura 4.16 SINR UE 133

La figura 4.17 muestra el *Troughput* para el UE 133 en específico, donde se observa que este parametro mejora o decae de acuerdo a los niveles de SINR alcanzados durante la simulación, arrojando un valor inicial de 0.075 Mbps, pero con el paso de las iteraciones, el algoritmo cambia de estrategias intentando alcanzar el requerimiento de SINR lo que hace que el *Troughput* finalmente se estabilice hasta alcanzar un valor medio de 19.8 Mbps.

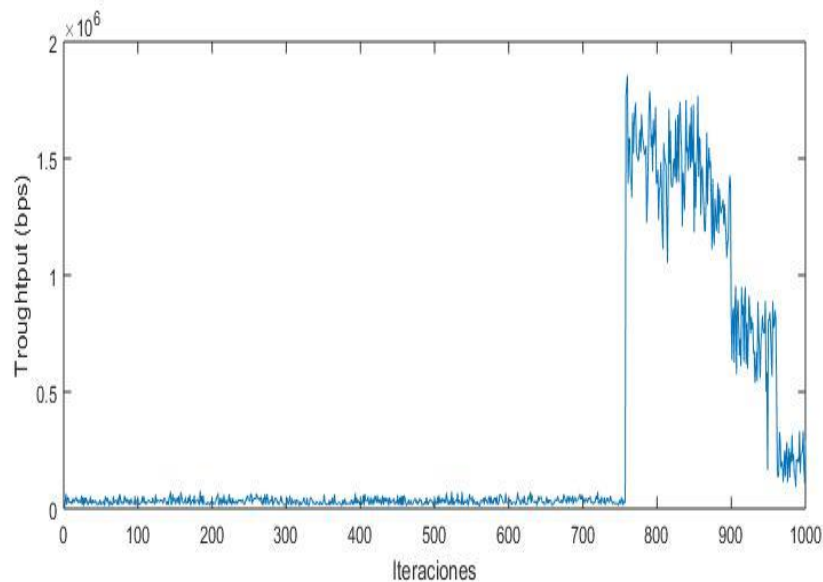


Figura 4.17 *Troughput* UE 133

En la figura 4.18 y 4.19 respectivamente, se observa la probabilidad de estrategia de un usuario ubicado a una distancia de 283 m de la mBS. Este UE no logra

alcanzar el valor de utilidad requerido debido a las condiciones de interferencia presente que no le permitieron encontrar la pareja frecuencia-potencia necesaria.

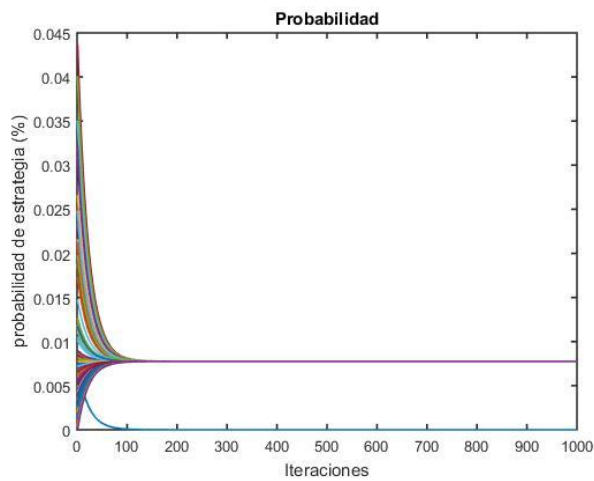


Figura 4.18 Variación de probabilidad de estrategia UE 469

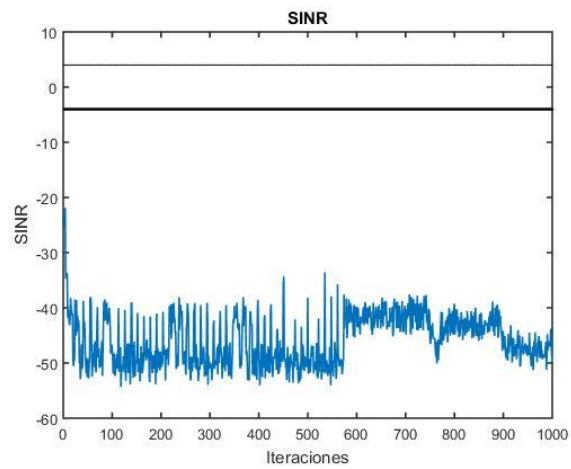


Figura 4.19 SINR UE 469

En la implementación de asignación de espectro aleatoria con IPC se obtuvo el escenario presente en la figura 4.20 en donde se conectaron 61 usuarios, resultado que comparado con el algoritmo de asignación de espectro y control de potencia conjunta basado en GT aumenta en 13,23%, dicho aumento se puede evidenciar en las figuras 4.21 y 4.22 de probabilidad de degradación obtenidas para los dos algoritmos implementados donde la que implementa GT tiende a valores entre el 96% y 98% mientras que el otro se mantiene constante en un valor de 76.5%.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

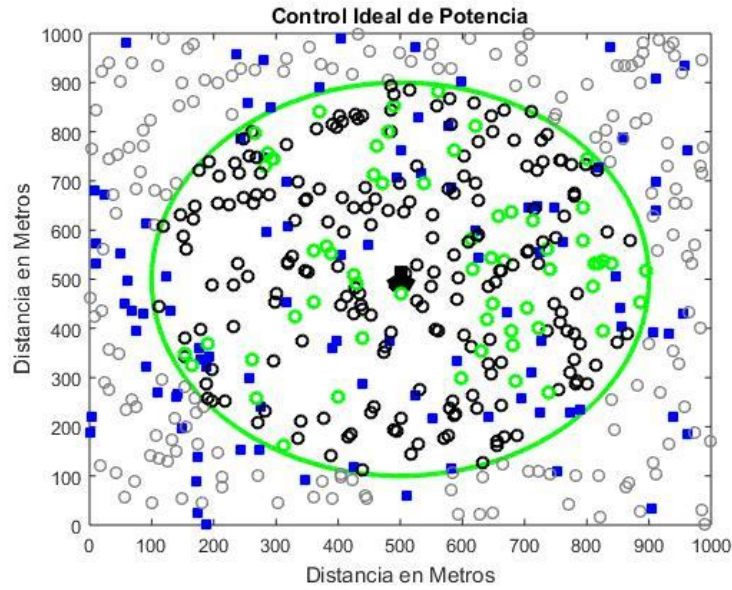


Figura 4.20 Escenario 1 basado en IPC para datos.

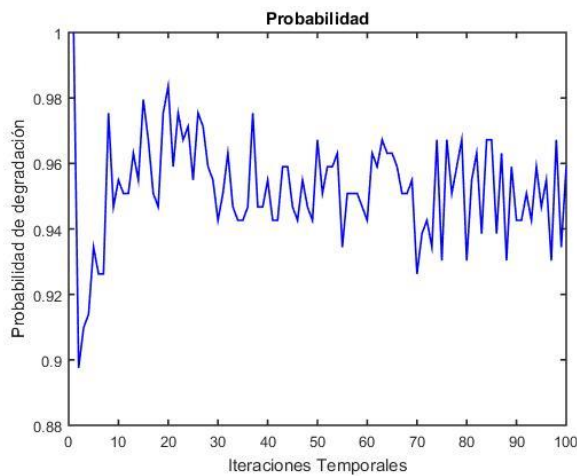


Figura 4.21 Probabilidad de degradación del sistema basado en GT

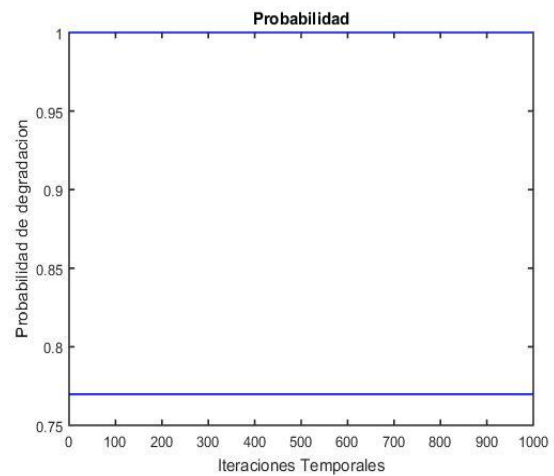


Figura 4.22 Probabilidad de degradación del basado IPC.

En la figura 4.23 el *Throughput* de la red donde se implementa asignación de frecuencia y control de potencia conjunta basado en GT, inicialmente presenta un valor alto debido a que algunos usuarios conectados presentan valores de SINR elevados, pero el algoritmo hace que dichos usuarios disminuyan tal parámetro de modo que logren alcanzar valores entre la SINR objetivo y la tolerancia y con ello se obtenga un valor estable del *Throughput* en la red tomando un valor medio de 85.5 Mbps, mientras tanto en la figura 4.24 el resultado medio es 13.9 Mbps representado una diferencia importante .

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

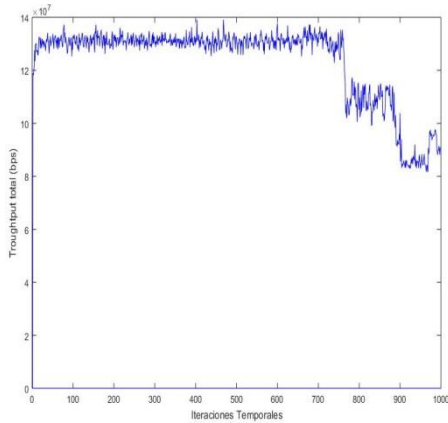


Figura 4.23 *Throughput* del sistema aplicando el modelo basado en GT.

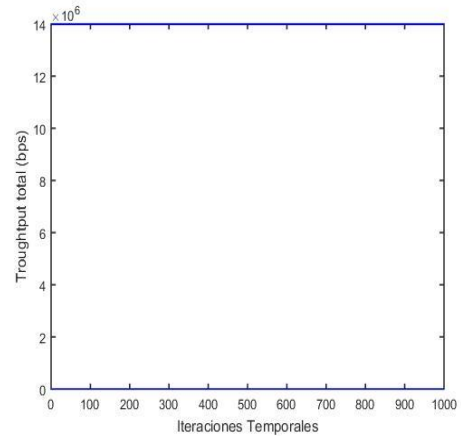


Figura 4.24 *Throughput* del sistema aplicando el modelo basado en IPC

A continuación se muestran las tablas 4.6 y 4.7, donde se muestra la información recopilada para los dos algoritmos de prueba en el servicio de datos para el escenario 1 propuesto, en las cuales se puede observar que la mayoría de los usuarios se conectan a las fBS.

Tabla 4.6. Resultados aplicando el modelo basado en GT. Datos. Escenario 1

In	us_mBS	%us_MBS	us_fBS	%us_fBS	Usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
242	2	6.5	29	93.5	31	9.77	89.3

Tabla 4.7. Resultados aplicando el modelo basado en IPC.

In	us_mBS	%us_MBS	us_fBS	%us_fBS	Usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
265	13	21.3	48	78.7	61	23	13.9

Para las anteriores tablas presentadas se evidencia una disminución de la capacidad de la red con respecto al caso del servicio de voz, el cual fue realizado con las mismas características de red, dado que, de un total de 242 usuarios al interior de la microcelda, solo el 12.8% alcanzo un nivel satisfactorio de SINR, esto debido al requerimiento de SINR mayor que el del servicio de voz. Además, se maneja un número alto de estrategias en el sistema, la presencia de estas hace que este no sea capaz de aprender rápidamente la estrategia que realmente es útil en cada instante de tiempo, permitiendo que en el sistema se trate de escoger la estrategia que presente una mayor potencia con tal de cumplir el requerimiento de SINR. Al presentarse esto se va a tener una mayor interferencia en ese canal y en consecuencia unos niveles de potencia muy altos y una capacidad baja de usuarios conectados al servicio.

Dentro de las pruebas para el servicio de datos realizadas se muestra a continuación en la figura 4.25, los niveles de potencia tomados por los UE y se observa que el nivel de potencia más común es 33 dBm, indicando que el algoritmo escoge un valor de potencia según se requiera para alcanzar el requerimiento de SINR objetivo.

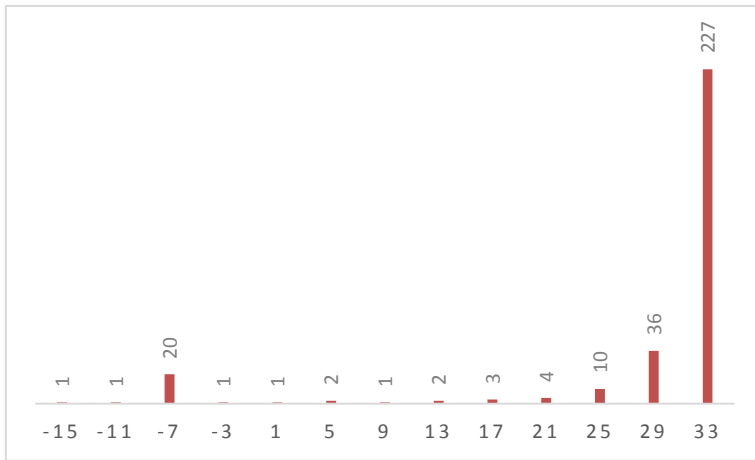


Figura 4.25 Niveles de potencia escogidos por los usuarios para las 10 pruebas realizadas

Promedio usuarios	Potencia (dBm)
1	-15
1	-11
20	-7
1	-3
1	1
2	5
1	9
2	13
3	17
4	21
10	25
36	29
227	33

Tabla 4.8 Potencias utilizadas por los UE

- **Caso3: voz y datos**

En este caso de simulación, en el sistema se ofrece servicio de voz y datos, teniendo en cuenta que a cada UE se le asigna de manera aleatoria requerimientos de SINR de -7 dB para voz o -4 dB para datos respectivamente.

En la implementación del modelo basado en GT, el escenario resultante se presenta en la figura 4.26, donde los círculos rojos representan los usuarios conectados al servicio de voz, los verdes al servicio de datos, los negros son los que no alcanzaron los requerimientos para algún servicio y los círculos de color gris representan usuarios fuera del área de cobertura. El total de UE dentro del radio de cobertura es de 265 lográndose conectarse a un servicio 97, de los cuales 75 se conectaron al servicio de voz y 22 al de datos, notándose que los UE atendidos con el servicio de voz es superior al de datos, esto debido a que los

usuarios del servicio de voz se les facilita encontrar una estrategia adecuada dado que el requerimiento de SINR para voz es más bajo que el de datos.

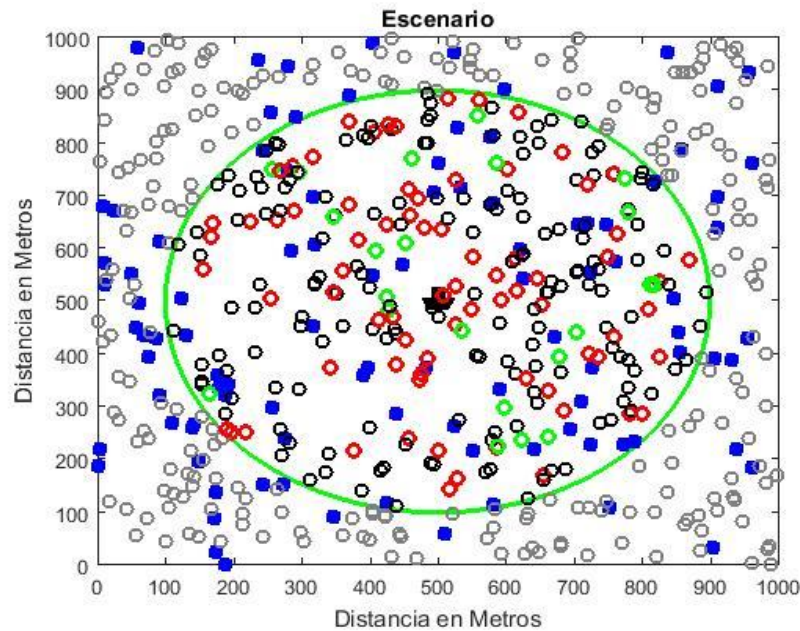


Figura 4.26 Escenario 1 basado en GT para voz y datos.

En las figuras 4.27 y 4.28 se observan la probabilidad de estrategia y SINR para el UE 22, usuario que está conectado al servicio de voz, en el cual se puede notar como el algoritmo escoge de manera preliminar una estrategia intentando llegar y mantenerse en el rango de SINR requerido pero dado a la presencia de más usuarios en el sistema que generan interferencia, en la iteración 200 debe cambiar de estrategia para conseguir la estabilidad deseada, resultado que se puede evidenciar en la gráfica que muestra la variación de la SINR en donde a partir del cambio de estrategia del UE, la utilidad mejora permaneciendo estable en un valor dentro del rango aceptado para voz.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

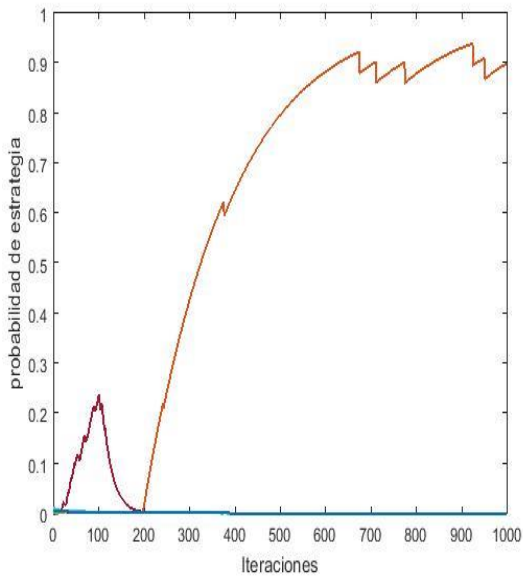


Figura 4.27 Variación de probabilidad de estrategia UE 22.

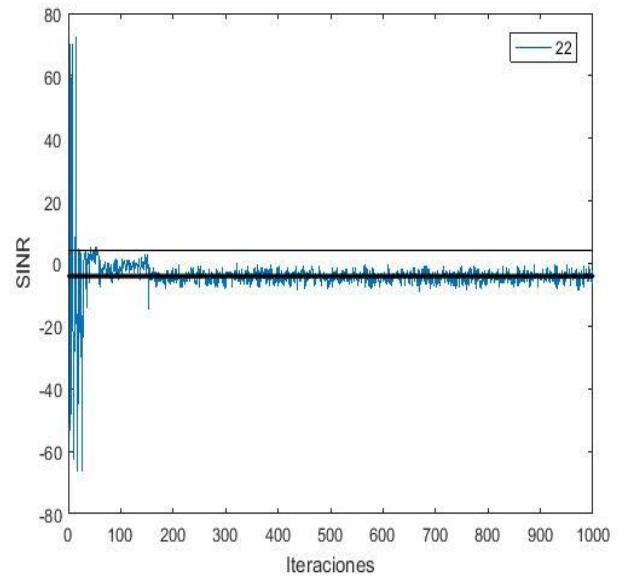


Figura 4.28 SINR UE 22

En la figura 4.29 se observa el *Throughput* para el UE 22, donde al iniciar las iteraciones presenta un valor elevado llegando a 2.2 Mbps en su medida más alta, pero al paso de la simulación el algoritmo ajusta los parámetros intentado llegar a la utilidad esperada lo que afecta la capacidad, la cual llega a un valor de 28.4 Kbps cuando el usuario escoge la estrategia adecuada, que para este caso corresponde a la pareja frecuencia-potencia (1711.25 MHz, 13 dBm).

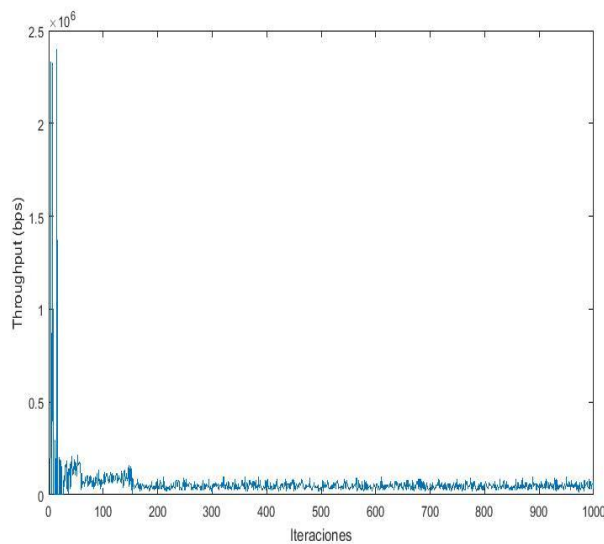


Figura 4.29 throughput UE 22

En las figuras 4.30 y 4.31 se presenta un usuario para el servicio de datos el cual corresponde al UE 127. En las gráficas se puede notar como hasta la iteración 760 este UE no puede elegir ninguna estrategia que le permita disminuir el valor de SINR que permanece por encima del rango aceptado para este caso en particular, dado que la red al tener muchos UE intentando establecer conexión presentan considerables niveles de interferencia lo que hace que exista demora en la elección de la mejor estrategia para llegar al nivel de SINR objetivo.

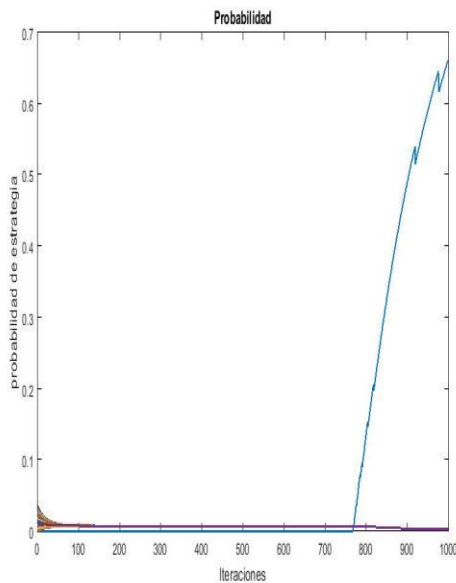


Figura 4.30 Variación de probabilidad de estrategia UE 127.

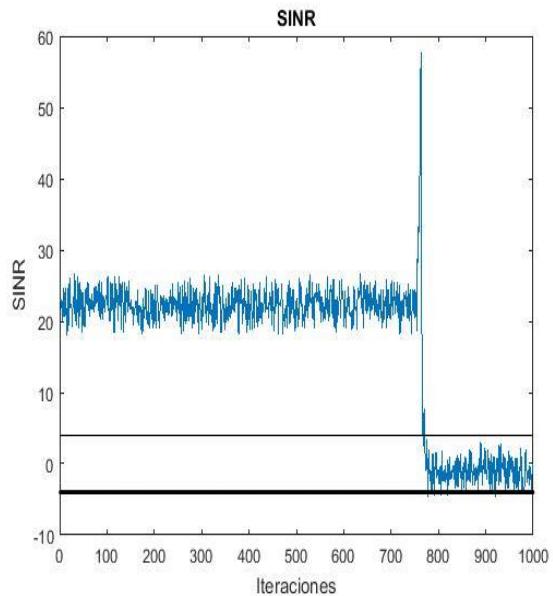


Figura 4.31 SINR UE 127

En la figura 4.32 correspondiente al *Throughput* del UE 127, se puede observar la relación directa con las variaciones de SINR en donde al inicio de las iteraciones el valor de capacidad inicia en un valor de 1.5 Mbps, parámetro que permanece estable hasta la iteración 765 donde presenta un incremento pero inmediatamente disminuye debido los efectos de la interferencia en sistema el algoritmo encuentra la estrategia conformada por la pareja frecuencia-potencia (1710.1 MHz, 33 dBm) lo que hace disminuir el valor de *Throughput* a un valor estable de 200.5 Kbps en donde permanece dentro del rango de SINR permitido.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

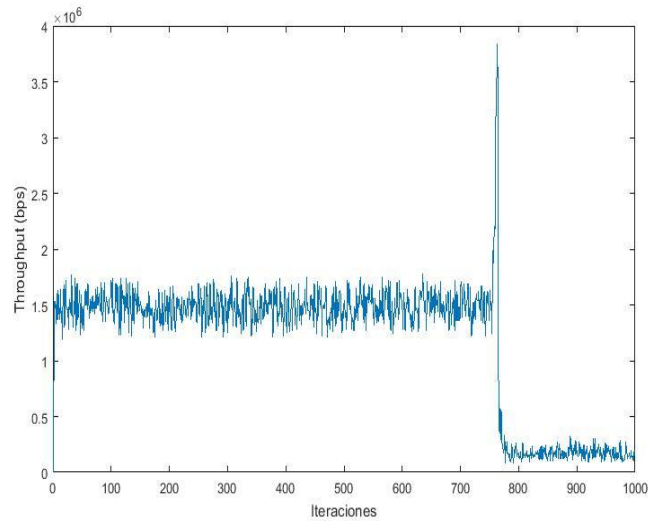


Figura 4.32 *Throughput* UE 127

El resultado para el usuario 10, está representado en las figura 4.33 en la cual se muestra como no puede conectarse a un servicio debido a las condiciones del sistema por lo que el algoritmo no logra encontrar una estrategia óptima para el UE y que lleva a las parejas frecuencia-potencia a converger hacia un mismo valor al paso del total de las iteraciones, acción que no permite alcanzar el valor de SINR objetivo como se representa en la figura 4.34.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

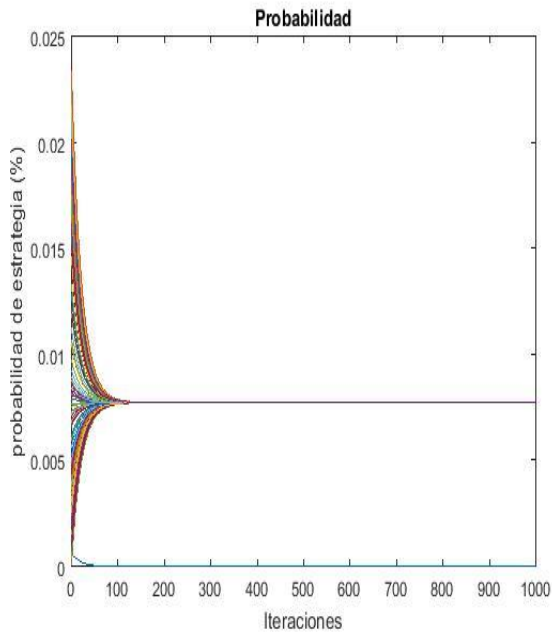


Figura 4.33 Variación de probabilidad de estrategia UE 10.

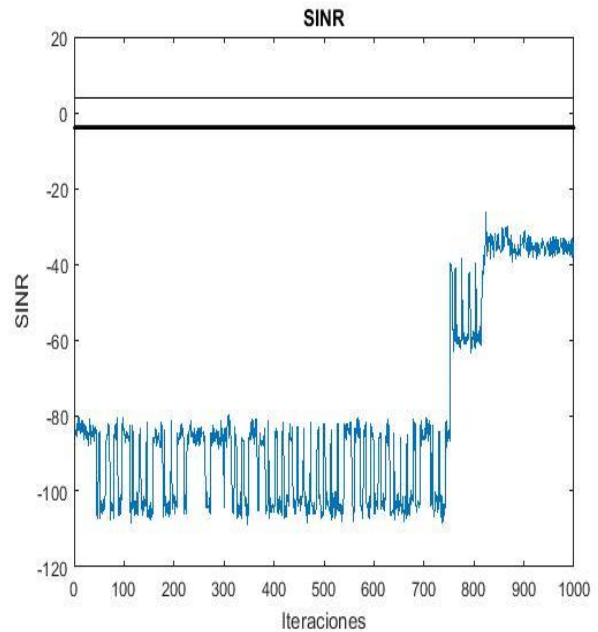


Figura 4.34 SINR UE 10.

En la figura 4.35 se muestra el escenario para voz y datos aplicando asignación aleatoria de espectro y control ideal de potencia en donde 265 usuarios están dentro del radio de cobertura de la mBS, pero solo 58 se conectaron a un servicio, 18 para voz y 40 para datos mostrando una disminución respecto al escenario en donde se aplica asignación de espectro y control de potencia conjunta basado en teoría de juegos.

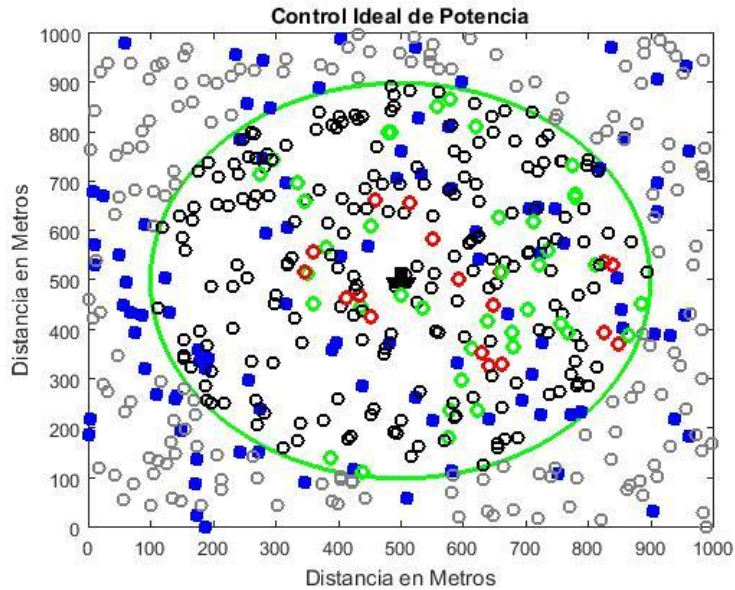


Figura 4.35 Escenario 1 con IPC para voz y datos.

Ahora, se muestra las probabilidades de degradación, en la figura 4.36 se muestra el resultado para asignación de espectro y control de potencia conjunta basado en GT, y en la figura 4.37 la respuesta para asignación aleatoria de espectro con IPC, ratificando la superioridad del primer modelo en términos de capacidad ya que al asignar de manera dinámica frecuencia y potencia para cada usuario, hay mayor posibilidad de que los UE establezcan conexión con el servicio requerido porque el algoritmo está en capacidad de cambiar de estrategia de manera que el UE pueda alcanzar su valor de SINR objetivo.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

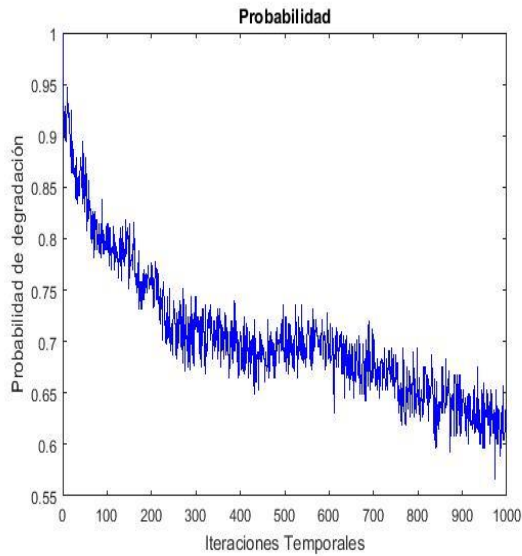


Figura 4.36 Probabilidad de degradación del sistema basado en GT.

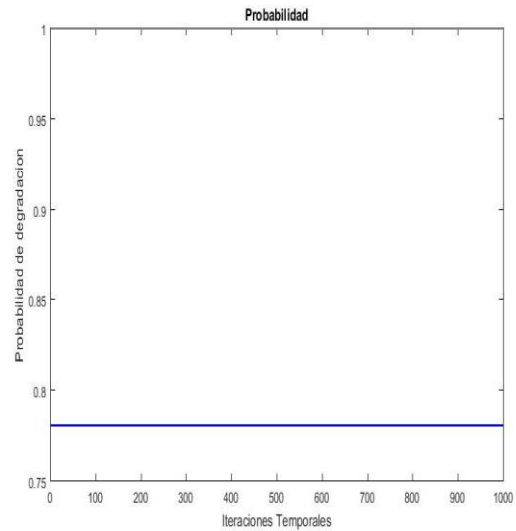


Figura 4.37 Probabilidad de degradación del sistema con IPC.

El *Throughput* de la red, se presenta tanto para el primer modelo implementado con GT como se muestra en la figura 4.38 y el que implementa asignación aleatoria de espectro con IPC en la figura 4.39; en estas ilustraciones se puede evidenciar como para el primer modelo el parámetro medido inicia con un valor alto de 170 Mbps debido a que los usuarios de voz y datos que logran conectarse comienzan con un valor de SINR alto, pero al paso de las iteraciones el algoritmo disminuye este valor intentando llevar a que cada vez más UE estén satisfechos llevando a que alcancen el valor de SINR objetivo y con ello obtener un nivel estable de *Throughput* en la red. Para el primer modelo su valor medio es de 103.4 Mbps mientras que para el segundo modelo el valor alcanzado medio es de 7.7 Mbps.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

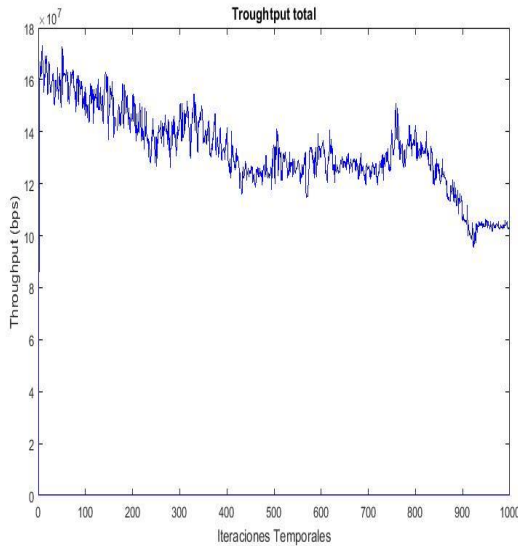


Figura 4.38 *Throughput* del sistema basado en GT.

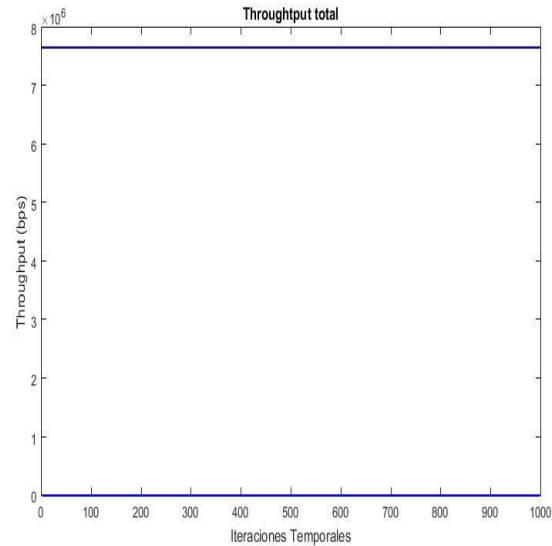


Figura 4.39 *Throughput* del sistema con IPC.

En las tablas 4.9 y 4.10 se presentan los resultados de capacidad de acuerdo a los dos tipos de usuarios existentes en la red.

Tabla 4.9. Resultados basados en GT. Voz y datos. Escenario 1

In	us_mBS	us_fBS	voz	datos	Usuarios	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
265	46	51	75	22	97	36.6	103.4

Tabla 4.10. Resultados basados en IPC. Voz y datos. Escenario 1

In	us_mBS	us_fBS	voz	datos	Usuarios	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
265	12	46	40	18	58	6.8	7.7

De las anteriores tablas se evidencia que de la misma cantidad de usuarios conectados a la red para tanto el caso de IPC como de GT, para GT se observa un 30% más de usuarios conectados a la red, en su mayoría conectados al servicio de datos y a las femtoestaciones. De igual manera la velocidad del sistema es mayor para el algoritmo que implementa GT respecto al de IPC.

En el histograma representado en la figura 4.40, se muestran los niveles de potencia para el modelo implementado con GT, en donde se recopila para 10 pruebas realizadas, el promedio de cuántos de los UE conectados tanto al servicio

de voz o datos eligieron determinada potencia para su estrategia, en donde se puede evidenciar que el nivel de 33 dBm es el valor más utilizado, además, al igual que el voz, este valor sobresale dado que la mayoría de usuarios que se conectaron se ubicaron a distancias grandes de la mBS y no estaban bajo la cobertura de alguna fBS, seguido de -15 dBm y -11 dBm que corresponden a usuarios que se ubicaron a distancias cercanas a la mBS o que estaban dentro del radio de alguna fBS indicando que el algoritmo escoge niveles de potencia acordes a la distancia promoviendo el ahorro en el consumo de las baterías de los UE.

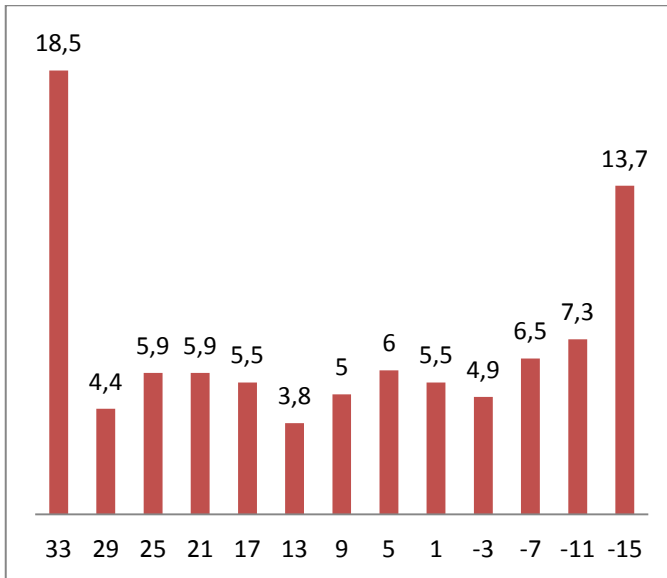


Figura 4.40 Niveles de Potencia escogidos por los UE.

Promedio usuarios	Potencia (dBm)
18.5	33
4.4	29
5.9	25
5.9	21
5.5	17
3.8	13
5	9
6	5
5.5	1
4.9	-3
6.5	-7
7.3	-11
13.7	-15

Tabla 4.11 Potencias utilizadas por los UE.

4.4.2 Escenario 2

La figura 4.41 ilustra el escenario de simulación 2, donde se incrementa el número de femtoceldas a 150, con el objetivo de analizar la capacidad de la red con esta modificación.

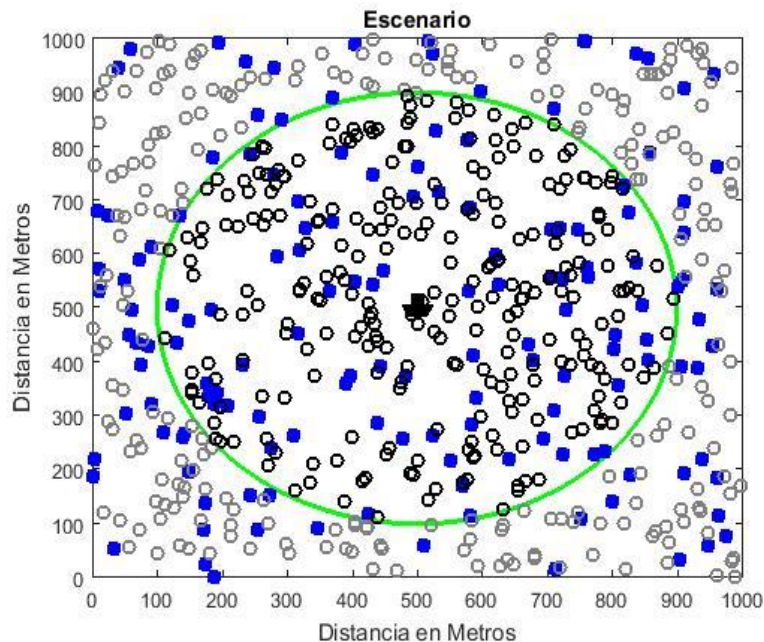


Figura 4.41 Escenario 2 de simulación

- **Caso 1: voz**

En la figura 4.42 se muestra el escenario obtenido al aplicar el modelo basado en GT de donde 171 usuarios son atendidos satisfactoriamente lo que representa un 64.5% de los UE dentro del radio de cobertura de la mBS. Este resultado en términos de capacidad es mayor al mostrado en el escenario 1 para el mismo servicio en un 7.2% indicando que el aumento del número de fBS aumenta la capacidad de la red.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

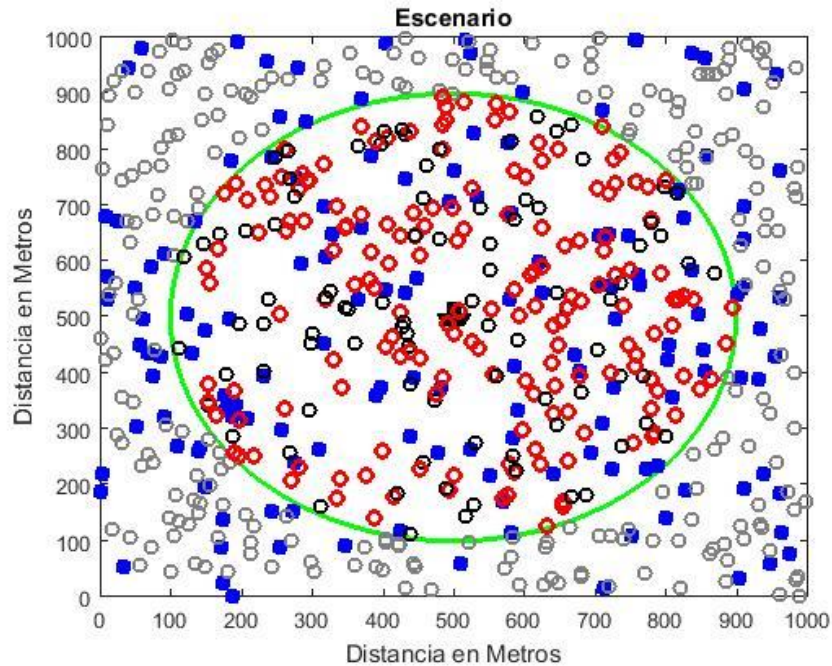


Figura 4.42 Escenario 2 basado en GT para de voz.

A continuación las figuras 4.43 y 4.44, muestran la probabilidad de estrategia y la SINR para un UE 29 que se encuentra a 19 m de la fBS asociada, en donde se puede notar que no puede escoger una estrategia que le permita satisfacer la utilidad esperada, por lo que el algoritmo cambia de estrategia intentando alcanzar este valor, hasta que en la iteración 320, encuentra una pareja frecuencia-potencia (1710.95 MHz, -11 dBm) que le permite alcanzar el valor de SINR objetivo y mantenerse en el umbral como se observa en la figura 4.44.

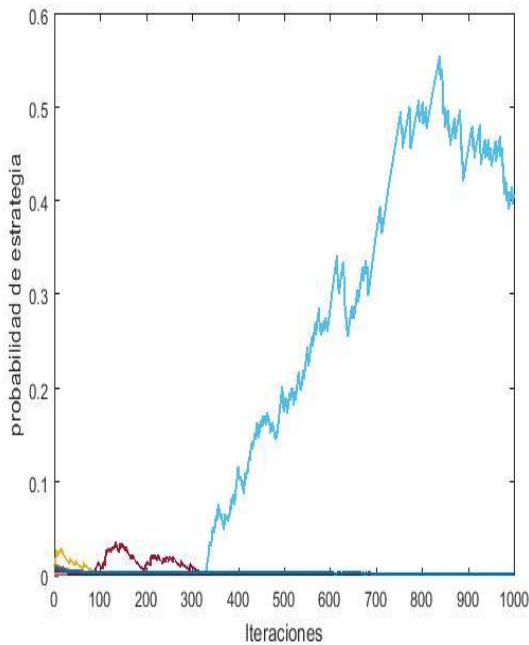


Figura 4.43 Variación de probabilidad de estrategia para el UE 29.

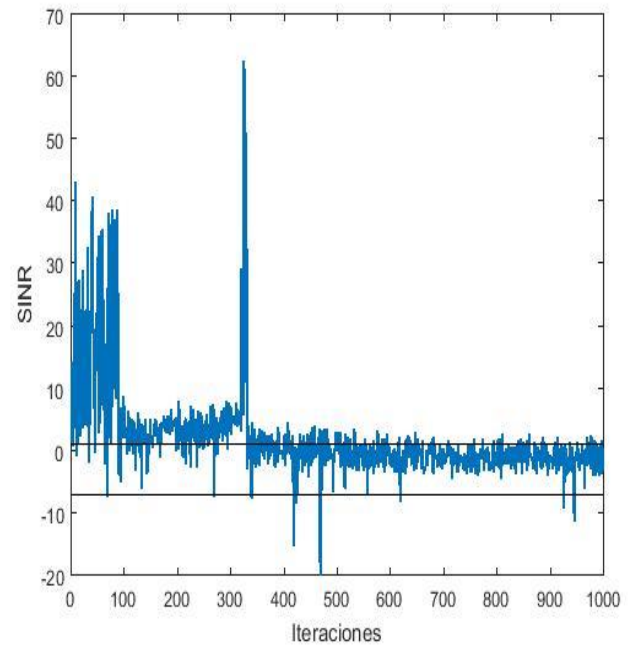


Figura 4.44 SINR UE 29.

De acuerdo con el comportamiento de los valores de SINR alcanzados por este usuario, el *Throughput* alcanzado por este inicia con un valor de 1.45 Mbps pero al cambio de estrategias y por ende de SINR alcanza un valor tope de 2.1 Mbps, pero al no alcanzar aun la utilidad este parámetro decae y cambia hasta alcanzar un valor estable de 56.5 Kbps indicando que el UE está dentro de los márgenes de SINR admitidos por la red por lo que un valor elevado de este parámetro implica interferencia a los demás UE por ende al algoritmo cambia de pareja frecuencia-potencia.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

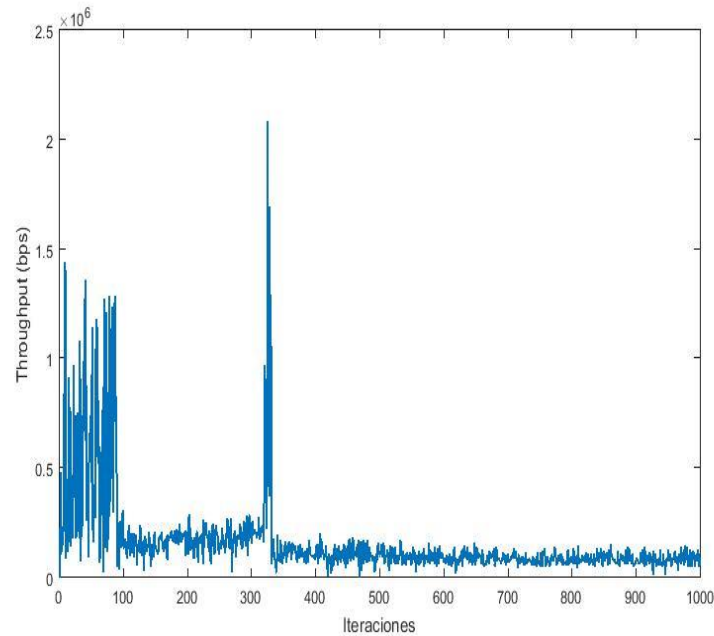


Figura 4.45 *Throughput* UE 29.

Dado el incremento de las fBS, también se incrementa el número de usuarios conectados a estas, ahora está el caso del FUE (*Femto User Equipment*) 260 ubicado a 14 m de la Bs asociada, el cual muestra inconvenientes para escoger una estrategia que le permita alcanzar la utilidad esperada como se muestra en la figura 4.46, por lo que el algoritmo cambia de estrategia intentando llegar al requerimiento desaprendiendo rápidamente con el objetivo de que el UE logre encontrar una estrategia que le permita permanecer con un valor de SINR dentro de los umbrales de la función de satisfacción, dichos cambios se pueden apreciar en las figuras 4.46 y 4.47.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

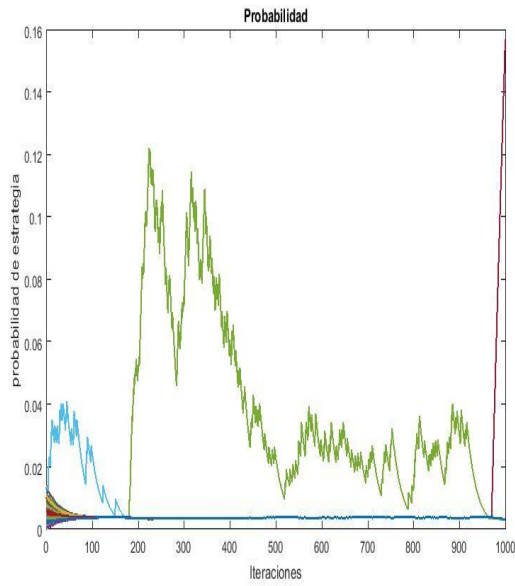


Figura 4.46 Variación de probabilidad de estrategia UE 260.

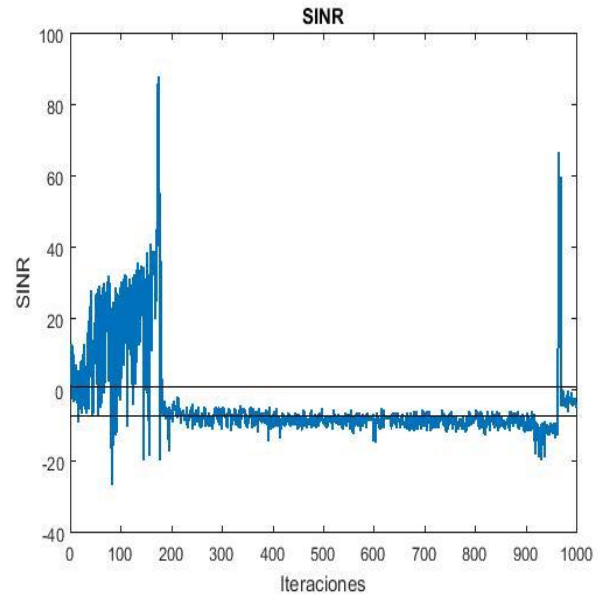


Figura 4.47 SINR UE 260.

Para este UE, la figura 4.48 muestra la variación que tiene el valor de *throughput* al paso de las iteraciones, mostrando un comportamiento similar al de SINR, que presenta cambios debido a que el algoritmo cambia de estrategia intentando llegar a la utilidad requerida. Este usuario tiene un valor de *throughput* inicial de 400 Kbps, pero al paso de las iteraciones alcanza un valor tope de 2.9 Mbps, posteriormente cae hasta aun valor cercano a los 100 Kbps en donde permanece estable hasta que hay un cambio de estrategia implicando una variación en el valor de SINR y por ende en el de *throughput* que se incrementa llegando a un valor de 2.25 Mbps pero, el UE al no llegar al valor de utilidad requerida cambia de nuevo de estrategia conformada por la pareja frecuencia-potencia (1710.25 MHz, -7 dBm) alcanzando el requerimiento de SINR objetivo donde finalmente alcanza un *throughput* medio de 41.7 Kbps.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

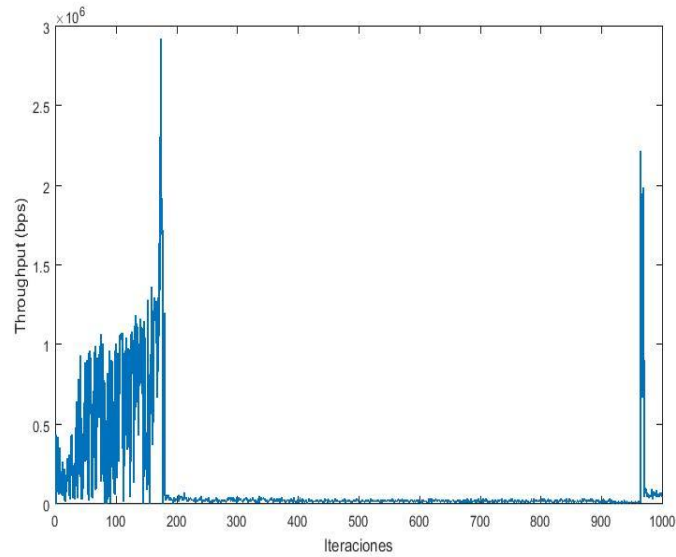


Figura 4.48 *Throughput UE 260.*

Para el caso de asignación aleatoria de espectro con IPC el escenario generado es el que se ilustra en la figura 4.49, en donde se obtuvo una cobertura de 87 usuarios, en la cual se ve una disminución de 31.5% respecto al modelo con GT.

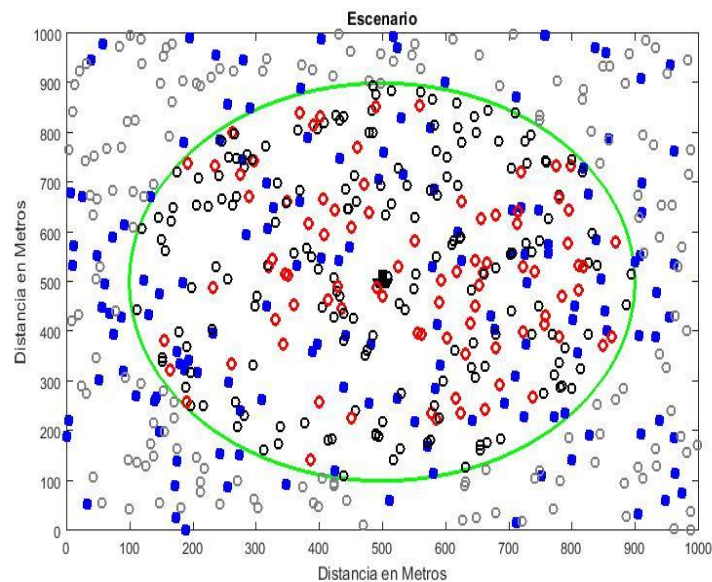


Figura 4.49 Escenario 2 con IPC para voz

En las figuras 4.50 y 4.51 se tienen las curvas de probabilidad de degradación para el modelo que utiliza GT y el que implementa asignación aleatoria de espectro con IPC, en la primera figura la probabilidad decrece de manera

paulatina tendiendo a valores cercanos a 0.3 mientras que en el otro modelo el parámetro medido se mantiene constante en 0.675.

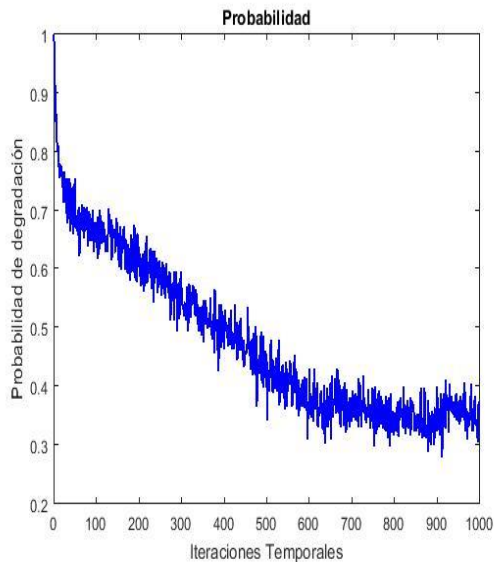


Figura 4.50 Probabilidad de degradación del sistema basado en GT.

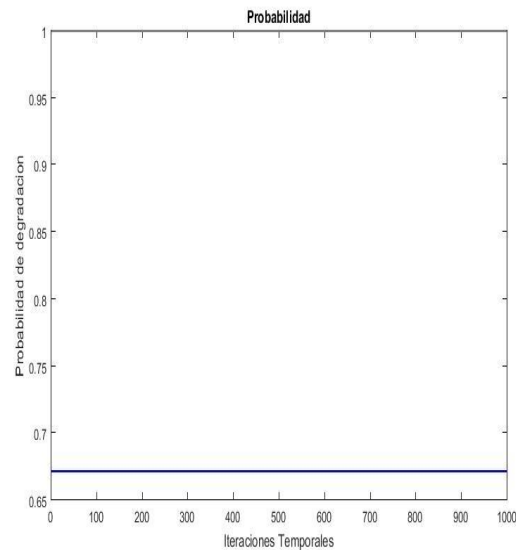


Figura 4.51 Probabilidad de degradación del sistema con IPC.

El *Throughput* total de la red para el modelo que utiliza GT y para el modelo que utiliza asignación aleatoria de espectro con IPC se muestran en las figuras 4.52 y 4.53. En la primera figura se muestra como el *Throughput* de la red inicia con un valor elevado de 130 Mbps, pero dado que el algoritmo busca la mejor estrategia para los UE conectados, este parámetro disminuye según cambian los valores de SINR de los usuarios al alcanzar un valor estable de 32 Mbps, mientras que para el otro modelo el *Throughput* se mantiene estable en un valor de 6,5 Mbps, valores que comparados con los obtenidos en el escenario 1 para el mismo servicio representan un incremento debido a la presencia de más fBS que afectaron la capacidad de la red vista como cantidad de usuarios y velocidad de transmisión.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

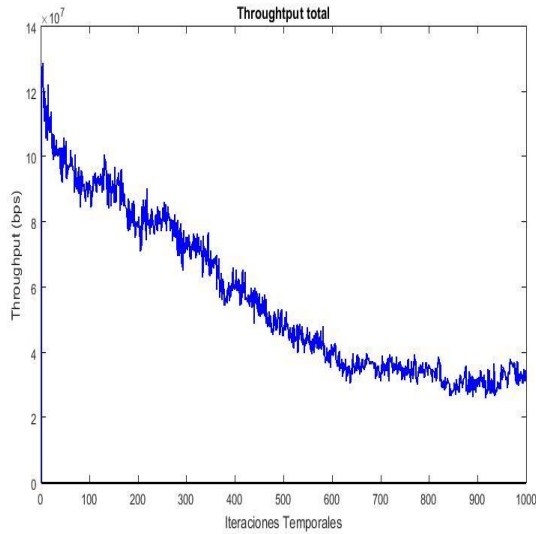


Figura 4.52 Throughput del sistema basado en GT.

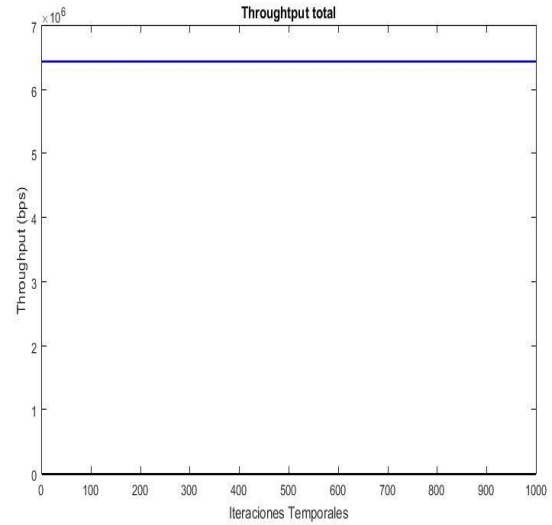


Figura 4.53 Throughput del sistema con IPC.

Tabla 4.12. Resultados aplicando asignación de espectro y control de potencia conjunta basado en GT. Voz. Escenario 2

In	us_mBS	%us_MBS	us_fBS	%us_fBS	usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
265	53	31%	118	69%	171	64.5	32.0

Tabla 4.13. Resultados aplicando asignación aleatoria de espectro con IPC. Voz. Escenario 2

In	us_mBS	%us_MBS	us_fBS	%us_fBS	usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
265	17	20%	70	80%	87	33	6.5

En las tablas anteriores se evidencia de igual manera que para el escenario 1 que se presentan más conexiones de UE para el caso de GT, donde de 265 usuarios dentro de la microcelda se encuentran conectados el 64.5% para el caso de GT, mientras para IPC se cuenta con el 33% de los usuarios. La velocidad del sistema presenta un incremento importante en GT respecto a IPC.

En la figura 4.54 se muestra el resultado promedio para 10 pruebas realizadas para el servicio de voz de los niveles de potencia de transmisión de los usuarios que si cumplen con la SINR objetivo, y que se encuentran conectados a la mBS o a alguna fBS. De esta figura se puede ver que el nivel más utilizado es de -15 dBm con un promedio de 21.8 usuarios, seguido de -11 dBm con 19.6 usuarios como

media, resultado que indica que el algoritmo implementado busca elegir los niveles de potencia beneficiando la vida útil de las baterías de los equipos móviles.

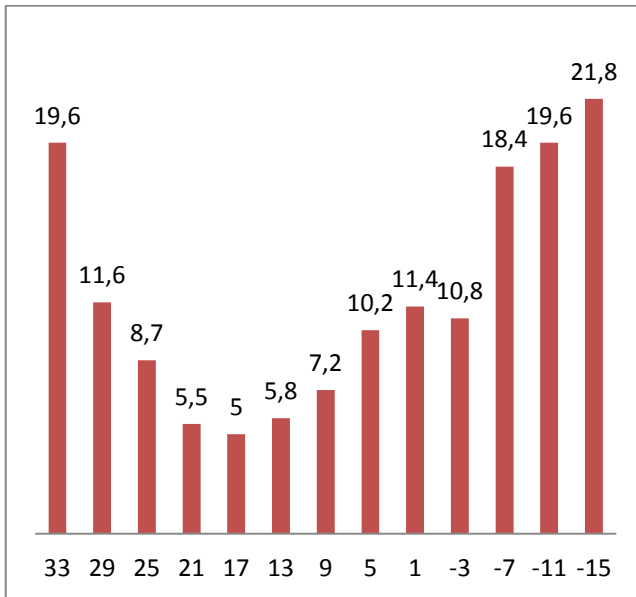


Figura 4.54 Niveles de Potencia elegidos por los UE

Promedio de usuarios	Potencia (dBm)
19.6	33
11.6	29
8.7	25
5.5	21
5	17
5.8	13
7.2	9
10.2	5
11.4	1
10.8	-3
18.4	-7
19.6	-11
21.8	-15

Tabla 4.14 Potencias utilizadas por los UE.

- **Caso 2: datos**

A continuación, se muestra en la figura 4.55 el escenario obtenido al aplicar el modelo basado en GT para el servicio de datos, para esta prueba se obtuvo una conexión de 37 usuarios lo que representa un 14.4% de los UE dentro del radio de cobertura de la mBS. En comparación con el resultado en términos de capacidad obtenido en el escenario 1 se presenta un aumento para el mismo servicio en un 1.6% para este caso particular, indicando que el aumento del número de fBS aumenta la capacidad de la red.

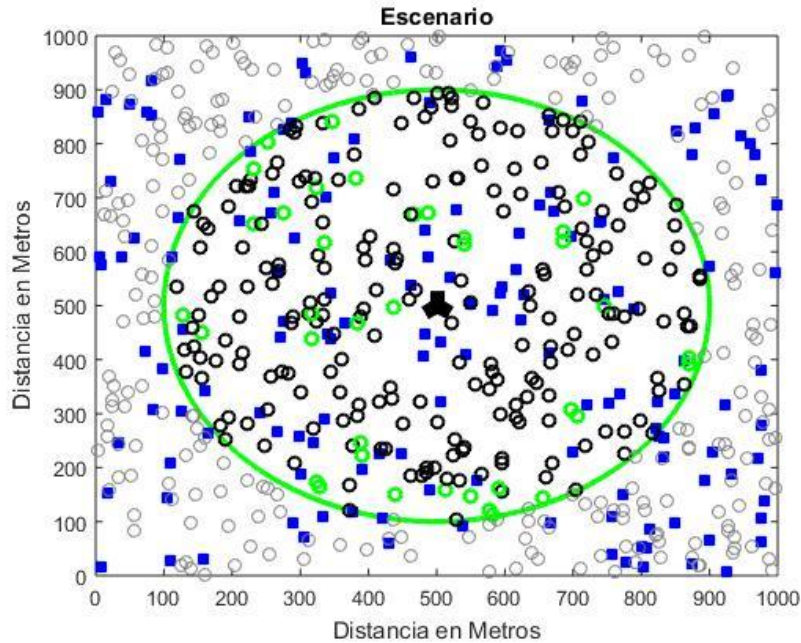


Figura 4.55 Escenario 2 basado en GT para datos.

En las figuras 4.56 y 4.57, se muestra respectivamente la probabilidad de estrategia y la SINR para un FUE que se encuentra a 32.43 m de la BS asociada, en la gráfica de probabilidad se observa que dentro de las primeras 760 iteraciones presenta ciertos inconvenientes para escoger una estrategia adecuada por lo que el algoritmo realiza el cambio de estrategia intentando llegar al requerimiento, una vez realizado el cambio después de la iteración 760 se encuentra una estrategia que le permite satisfacer la utilidad esperada y por consiguiente encuentra una pareja frecuencia-potencia (1710.1 MHz, 33 dBm) que le permite alcanzar el valor de SINR objetivo y mantenerse en el umbral como se observa en la figura 4.56.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

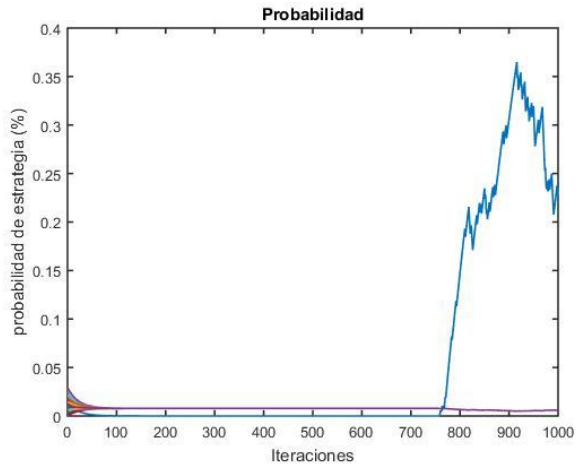


Figura 4.56 Variación de probabilidad de estrategia para el UE 388

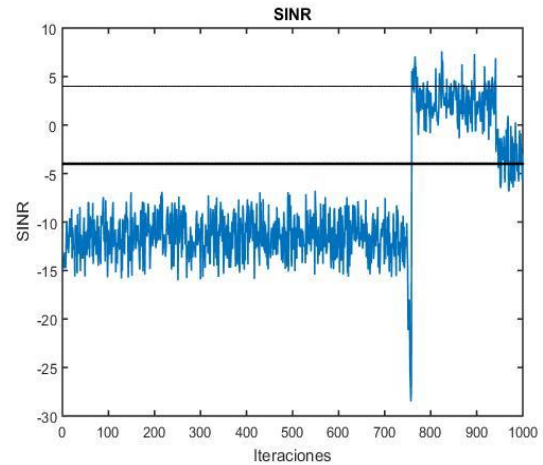


Figura 4.57 SINR UE 388

La figura 4.58 muestra el *Troughput* del UE 388 en donde se puede observar que mejora o decae de acuerdo a los niveles de SINR, presentando un comportamiento similar al presentado por la SINR de acuerdo a la relación que guardan estas dos variables. El usuario tomado tiene un valor inicial de 0.075 Mbps, pero al paso de las iteraciones el algoritmo cambia de estrategias intentando alcanzar el requerimiento de SINR, llegando hasta un valor aproximado de 0.35 Mbps, por ultimo dentro de las iteraciones tomadas se observa que el UE al no llegar al valor de utilidad requerida cambia de nuevo de estrategia, alcanzando el requerimiento de SINR objetivo donde finalmente alcanza un *Troughput* medio de 0.13 Mbps, lo que hace que el *Troughput* finalmente se estabilice hasta alcanzar un valor medio de 0.1126 Mbps.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

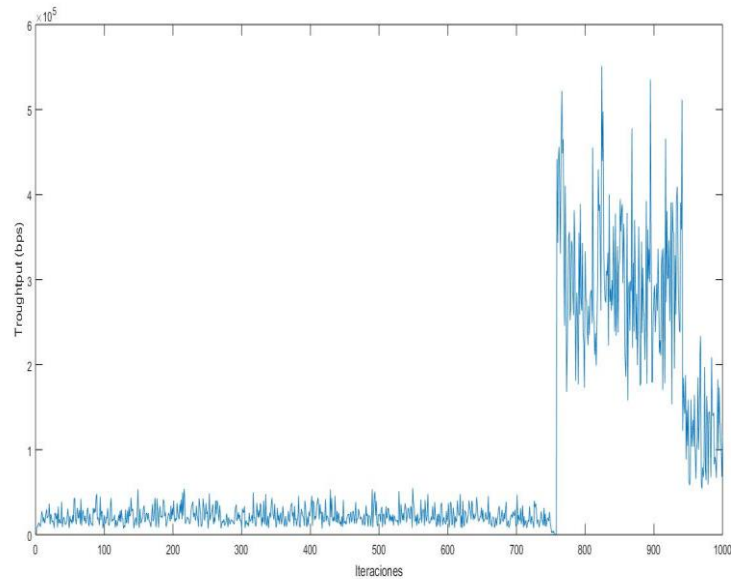


Figura 4.58 *Throughput* UE 388.

La implementación de asignación de espectro aleatoria con IPC, obtuvo el escenario presente en la figura 4.59 para el cual se obtuvo una cobertura de 256 usuarios de los cuales pudieron acceder al servicio 104. En comparación con el resultado obtenido con el algoritmo de asignación de espectro y control de potencia conjunta basado en GT se presenta una disminución para el caso del acceso al servicio de datos del 26.23%, dicha disminución se puede evidenciar a continuación en las figuras 4.60 y 4.61 de probabilidad de degradación obtenidas para los dos algoritmos implementados. Para las gráficas presentadas se observa que en la primera la probabilidad decrece de manera paulatina, llegando en la iteración 1000 hasta valores de 0.84, y para el caso de IPC se mantiene el valor constante de 0.59.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

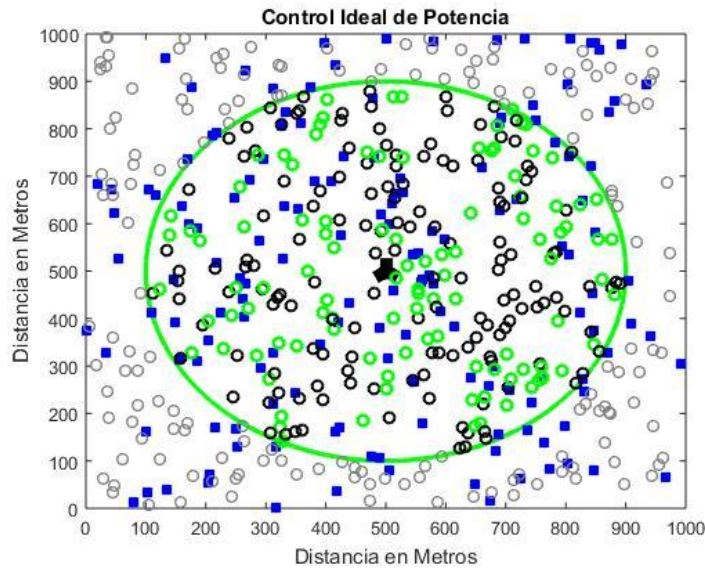


Figura 4.59 Escenario 2 con IPC para Datos.

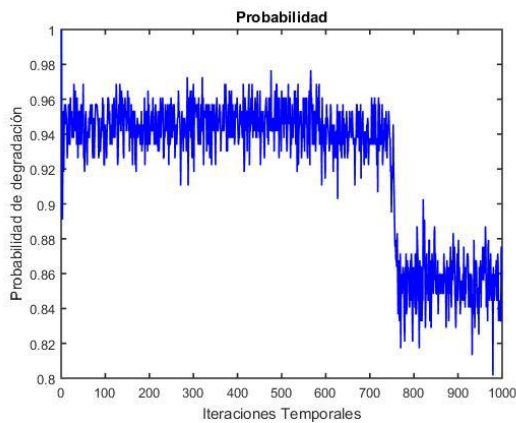


Figura 4.60 Probabilidad de degradación del sistema basado en GT.

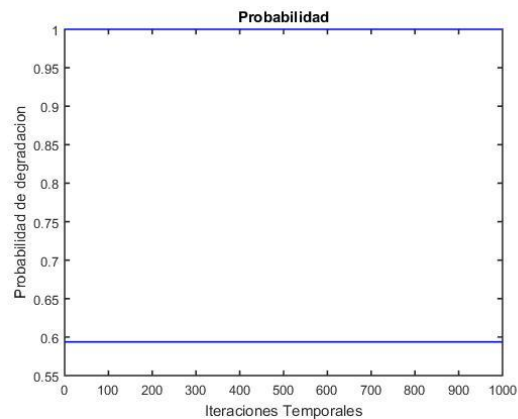


Figura 4.61 Probabilidad de degradación del sistema con IPC.

Las figuras 4.62 y 4.63 presentan el *Throughput* de la red donde se implementa asignación de frecuencia y control de potencia conjunta basado en GT y del sistema aplicando asignación aleatoria de espectro con IPC, respectivamente se observa que para la gráfica relacionada con GT, se tiene un valor inicial de 160 Mbps, además a medida que el algoritmo realiza evaluaciones de la estrategia correspondiente para cada UE conectado, se va presentando una disminución en proporción de los valores de la SINR llegando a un valor de 112 Mbps. Para el comportamiento del modelo con IPC el *Throughput* se mantiene estable en un valor de 271 Mbps, estos valores comparados con los obtenidos en el escenario 1,

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

indican un incremento, esto dado a la presencia de más fBS que afectan la capacidad de la red vista como cantidad de usuarios y velocidad de transmisión.

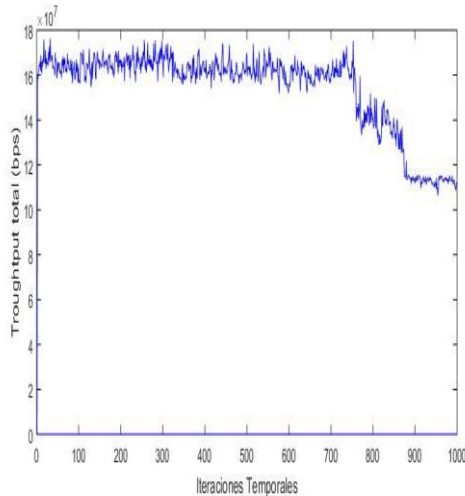


Figura 4.62 *Throughput* del sistema basado en GT.

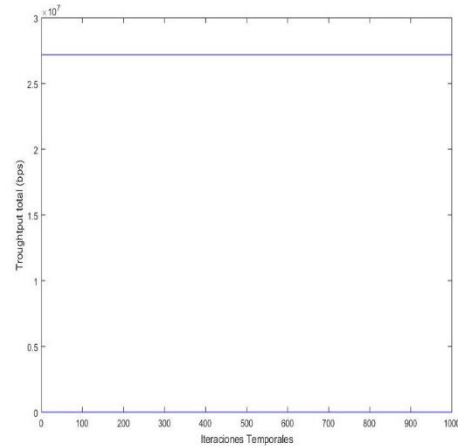


Figura 4.63 *Throughput* del sistema con IPC

En las tablas 4.15 y 4.16, donde se muestra la información de la prueba escogida con los datos de porcentajes de cubrimiento de las redes generadas por los sistemas de GT e IPC para el escenario de prueba 2, de igual manera se realiza la misma aclaración del escenario 1 para el caso 2 del servicio de datos, la cual menciona la incidencia de la SINR y el número de estrategias tomadas para el sistema.

Tabla 4.15. Resultados aplicando asignación de espectro y control de potencia conjunta basado en GT. Datos. Escenario 2

In	us_mBS	%us_MBS	us_fBS	%us_fBS	Usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
257	2	5.4	35	94.6	37	9.77	112.6

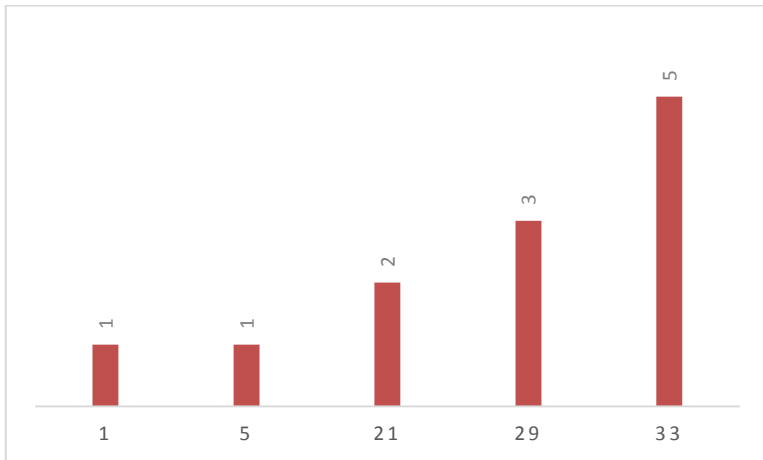
Tabla 4.16 Resultados aplicando asignación aleatoria de espectro con IPC. Datos. Escenario 2

In	us_mBS	%us_MBS	us_fBS	%us_fBS	Usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
256	26	25.0	78	75	104	40.62	271

De las tablas 4.15 y 4.16 se evidencia como para el escenario1, se presenta un mejor comportamiento el caso de IPC donde para GT se presenta un 9.77% de

usuarios cubiertos, mientras para IPC se presenta un 40.62 % de cobertura, para ambos casos se presenta una mayor conexión de los UE a las fBS.

Ahora bien para el análisis de las potencias de los usuarios que se encuentran conectados y cumplen con la SINR objetivo propuesta, se expone la figura 4.64 donde se puede observar que la frecuencia de uso de la potencia de 33 dBm es la más utilizada para las características establecidas para el caso 2.



Promedio usuarios	Potencia (dBm)
1	1
1	5
2	21
3	29
5	33

Tabla 1.17 Potencias utilizadas por los UE.

Figura 4.64 Niveles de potencia escogidos por los usuarios para las 10 pruebas.

- **Caso 3: voz y datos**

En la figura 4.65 se presenta el escenario obtenido con la implementación del modelo basado en GT, en el cual, 240 UE están dentro de la microcelda, donde los UE conectados fueron 106, de los cuales, 91 se conectaron con voz y 15 con datos.

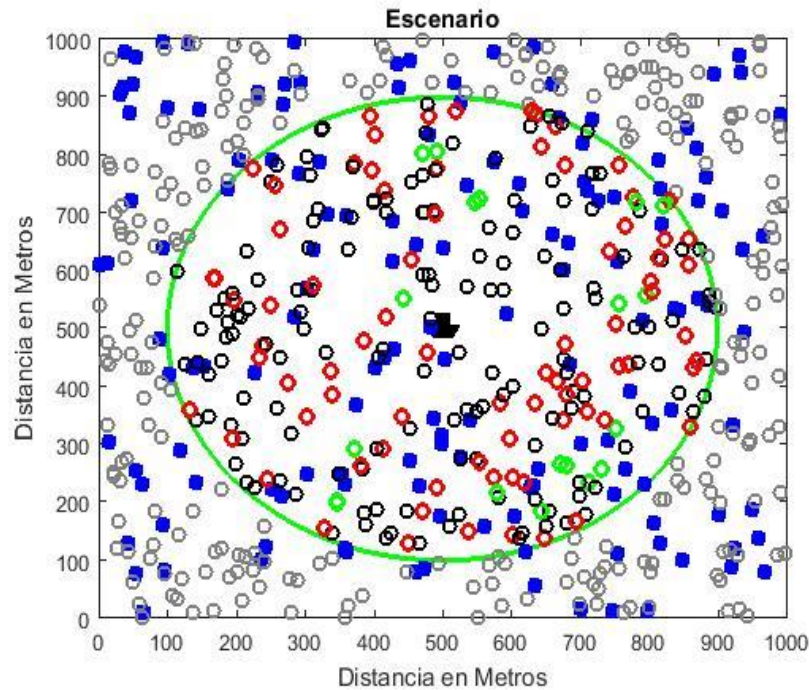


Figura 4.65 Escenario 2 basado en GT para voz y datos

Para este caso, el porcentaje de usuarios atendidos es del 44.2% que comparado con el escenario 1 y el mismo servicio, representa un incremento del 7.6% debido a la presencia de más fBS y que para este caso la cantidad de usuarios dentro de la microcelda es menor lo que reduce la interferencia en esta. Las figuras 4.66 y 4.67 muestran la variación en las probabilidades de estrategias para dos usuarios uno de ellos el UE 46 ubicado a 265 m de la mBS conectado al servicio de voz y el UE 39 a 305 m que accedió al servicio de datos. Estas graficas muestran como el algoritmo basado en GT se comporta para escoger la pareja frecuencia-potencia más conveniente que les permita alcanzar el valor de SINR objetivo según el servicio al que accedieron, observándose que el UE que accedió a voz necesitó cambiar de estrategias en varias ocasiones porque no alcanzaba la utilidad esperada hasta escoger la estrategia correcta (1711.05MHz, 17 dBm), mientras que el UE que accedió a datos tardó en escoger una estrategia efectiva la cual está conformada por la pareja frecuencia-potencia (1710.1 MHz, 33 dBm), notándose como el usuario conectado a datos utiliza un valor de potencia mayor que el que utiliza el de voz.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

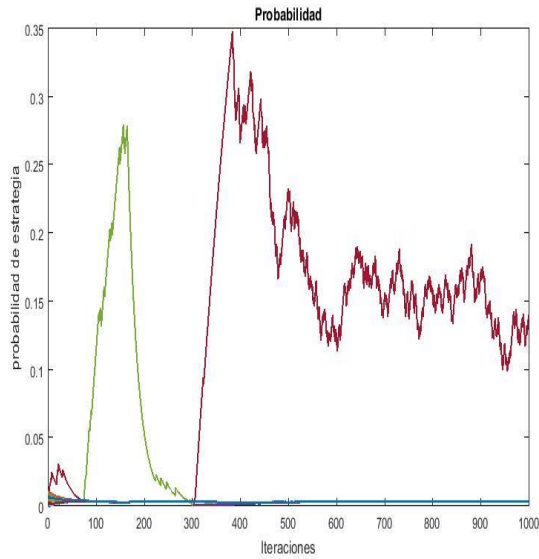


Figura 4.66 Variación de probabilidad de estrategia UE 46.

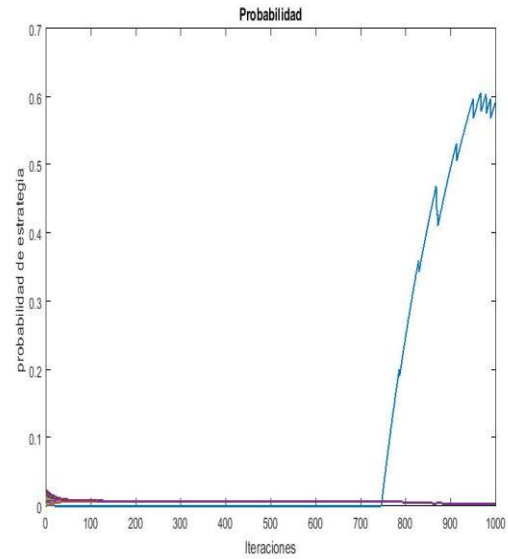


Figura 4.67 Variación de probabilidad de estrategia UE 39.

En las siguientes figuras se presentan el *throughput* para los usuarios cuyas curvas de probabilidad de estrategia se mostró anteriormente, en donde se puede visualizar como este parámetro cambia según el comportamiento del algoritmo al escoger una estrategia y como al paso de las iteraciones logran estabilizarse al encontrar la utilidad requerida al alcanzar un valor de *throughput* medio que se mantiene estable con valores de 37.1 Kbps para el usuario conectado a voz como se ve en la figura 4.68 y de 23.8 Kbps para el que se conectó a datos como se muestra en figura 4.69.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

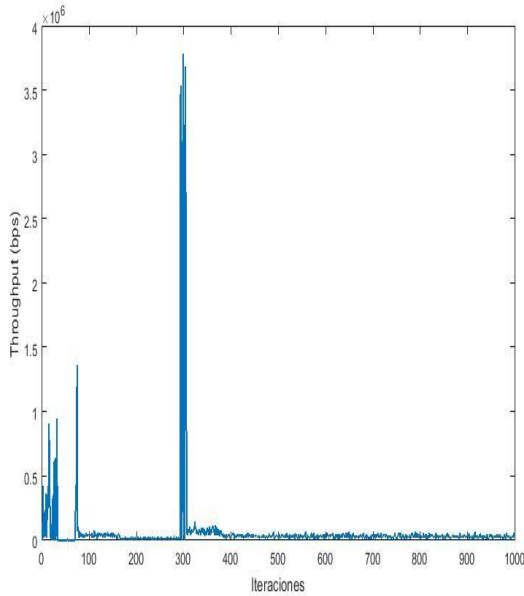


Figura 4.68 Throughput UE 46.

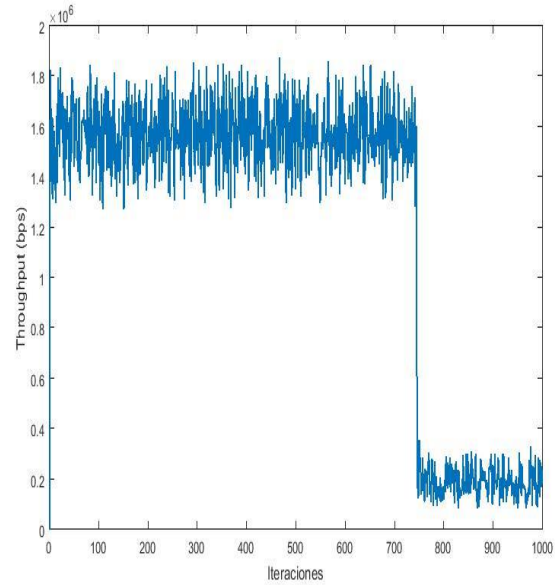


Figura 4.69 Throughput UE 39.

En la implementación de asignación aleatoria de espectro con IPC se obtuvo una cobertura de 56 usuarios lo que equivale al 6.3% de los UE dentro de la microcelda como se observa en la figura 4.70, de los cuales 39 son para voz y 17 para datos, resultados que en comparación con el modelo implementado con GT disminuye en un 37% como se puede observar en la figura 4.71 donde la curva de probabilidad de degradación para el modelo de asignación aleatoria de espectro con IPC muestra que el algoritmo no permite disminuir este parámetro a diferencia del modelo con GT donde la curva de probabilidad de degradación se observa en la figura 4.72.

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

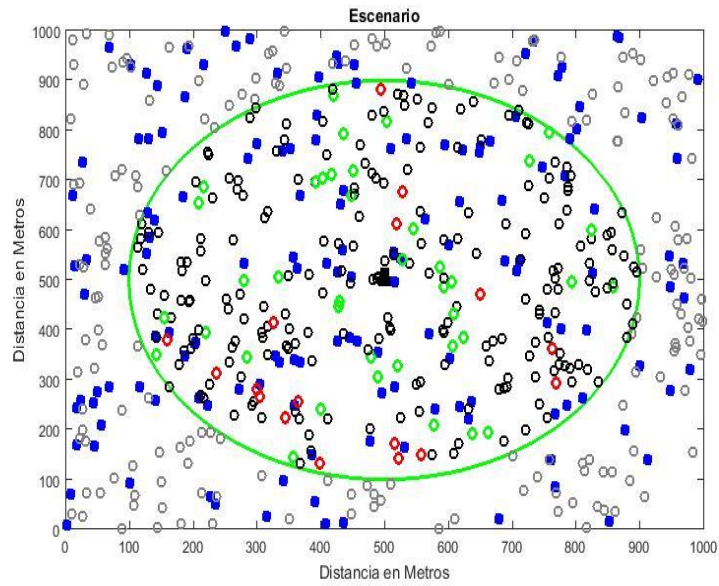


Figura 4.70 Escenario 2 con IPC para voz y datos.

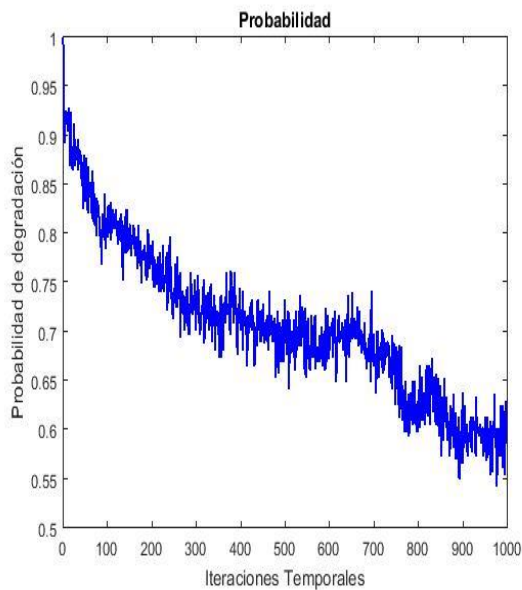


Figura 4.71 Probabilidad de degradación del sistema basado en GT.

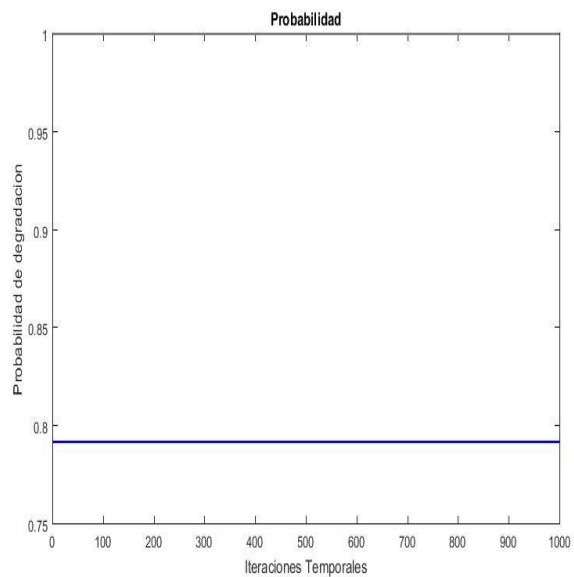


Figura 4.72 Probabilidad de degradación del sistema basado en IPC.

Las figuras 4.73 y 4.74 ilustran el comportamiento del *Throughput* de la red cuando se implementa GT, inicialmente presenta valor elevado y luego una caída variando dentro de unos límites, esto se debe a que algunos UE que se conectan

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

inicialmente presentan una SINR elevada, pero el algoritmo hace que esta baje de manera progresiva 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 111 Mbps a diferencia del método sin GT que obtiene 13.6 Mbps.

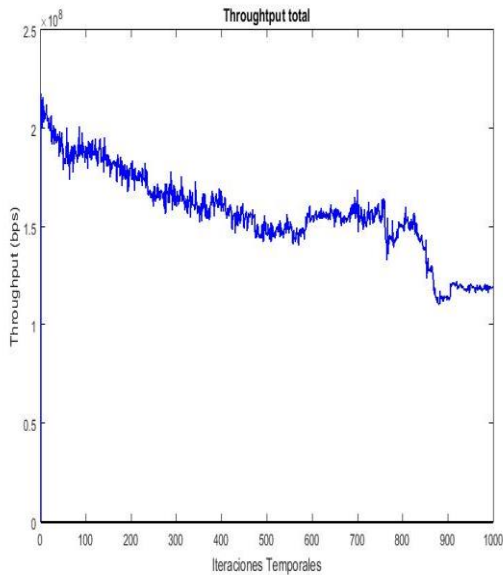


Figura 4.73 *Throughput* del sistema basado en GT.

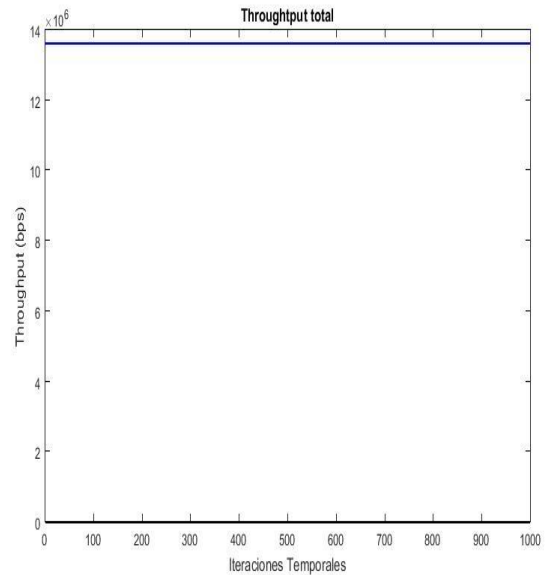


Figura 4.74 *Throughput* del sistema basado en IPC.

Tabla 4.18. Resultados basado en GT. Voz y datos. Escenario 2

In	us_mBS	us_fBS	voz	datos	Usuarios	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
240	30	76	91	15	106	44.2	111.1

Tabla 4.19. Resultados basados en IPC. Voz y datos. Escenario 2

In	us_mBS	us_fBS	voz	datos	Usuarios	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
269	16	40	17	39	56	6.3	13.6

En las tablas 4.18 y 4.19 se muestran los resultados de capacidad para el presente servicio, de donde se puede notar que respecto al escenario 1 los

resultados son mejores tanto en usuarios cubiertos y velocidad de transmisión, resultados debido al incremento del número de femtoceldas en el escenario 2.

De la figura 4.75, el promedio para 10 pruebas con el servicio de voz y datos, la potencia de transmisión más común en la simulación es -15 dBm, luego esta 33 dBm indicando que en el algoritmo algunos usuarios están ubicados a distancias grandes que obligaron a cambiar de nivel de potencia con el fin de alcanzar el valor de SINR objetivo, además, se puede notar que sobresalen entre los niveles más usados también los valores de -15 dBm y -11 dBm indicando que el algoritmo busca elegir potencias bajas para alcanzar el requerimiento lo que resulta como un beneficio en el impacto de la interferencia en la microcelda.

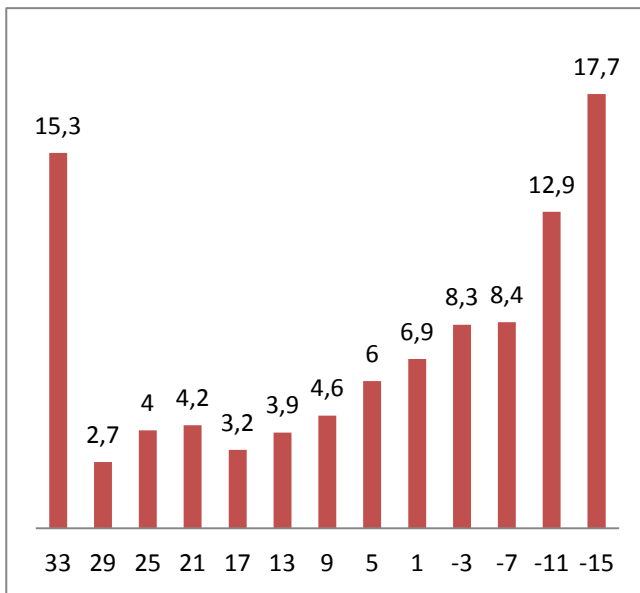


Figura 4.75 Niveles de Potencia elegidos por los UE

Promedio de usuarios	Potencia (dBm)
33	15.3
29	2.7
25	4
21	4.2
17	3.2
13	3.9
9	4.6
5	6
1	6.9
-3	8.3
-7	8.4
-11	12.9
-15	17.7

Tabla 4.20. Potencias utilizadas por los UE.

Las tablas 4.21 y 4.22 contienen un resumen de los resultados obtenidos en los escenarios 1 y 2. Estas tablas evidencian que la capacidad de la red vista como cantidad de usuarios atendidos y velocidad de transmisión es mayor en la implementación del algoritmo de asignación de espectro y control de potencia conjunta basado en GT frente al algoritmo con asignación aleatoria de espectro con IPC, además, se puede ver el impacto que causa el número de fBS presentes en el escenario, en donde no existen grandes variaciones en el números de usuarios cubiertos pero si se presenta un leve incremento en la velocidad de transmisión en el escenario 2 donde el número de fBS aumenta de 100 a 150.

Tabla 4.21. Resumen promedios para cada caso. Escenario 1

	escenario 1					
	caso 1		caso 2		caso 3	
	GT	Con IPC	GT	Con IPC	GT	Con IPC
US atendidos	145	47	31	61	97	58
Velocidad (Mbps)	32	3.57	89.3	13.9	103.4	7.7

Tabla 4.22 Resumen promedios para cada caso. Escenario 2

	escenario 2					
	caso 1		caso 2		caso 3	
	GT	Con IPC	GT	Con IPC	GT	Con IPC
US atendidos	171	87	37	104	106	65.4
Velocidad (Mbps)	32	6.5	112.6	271	111.1	13.95

A continuación, se presenta un análisis comparativo a nivel de resultados en capacidad en las secciones donde se implementó teoría de juegos con los trabajos previos [5], [6] que sirvieron como base para el desarrollo del presente trabajo de grado.

En primer lugar se hace una comparación con el trabajo titulado “Incidencia de un algoritmo de control de potencia en la capacidad de una red heterogénea” [5], donde se presentan resultados en la capacidad vista como cantidad de usuarios conectados para cada servicio.

Principalmente los cambios de parámetros del sistema presentado por “Incidencia de un algoritmo de control de potencia en la capacidad de una red heterogénea”, se presentan a continuación:

Tabla 4.23. Características trabajo de grado “Incidencia de un algoritmo de control de potencia en la capacidad de una red heterogénea” .

Escenarios de simulación			
Escenario 1		Escenario 2	
Área	1 km ²	Área	1 km ²
Número femtoceldas	150	Número femtoceldas	150
Radio microcelda	400 m	Radio microcelda	200 m
Radio femtocelda	40 m	Radio femtocelda	40 m

Caso 1	Caso 2	Caso 3
<ul style="list-style-type: none"> Servicio: voz Sin PC PC basado en GT y en IPC 	<ul style="list-style-type: none"> Servicio: datos Sin PC PC basado en GT y en IPC 	<ul style="list-style-type: none"> Servicio: voz y datos Sin PC PC basado en GT y en IPC

Los principales cambios del sistema es el radio de la microcelda que pasó de 400m a 200m, mientras para el trabajo de grado se mantuvo el radio de 400m. Además, el radio de la femtocelda es menor al del presente trabajo, puesto que el utilizado es de 50m y el del trabajo comparativo es de 40m.

- Servicio: voz**

En la tabla 4.24, se presenta el resumen de resultados de 10 pruebas realizadas para 300 usuarios, para los dos trabajos, donde se puede evidenciar que el presente trabajo presenta una mejora en el número de usuarios atendidos respecto al trabajo previo, dado que al existir una asignación dinámica de recursos para los usuarios, estos tienen mayores posibilidades para alcanzar la SINR objetivo y por ende conectarse al servicio.

Tabla 4.24. Capacidad vista como cantidad de usuarios conectados. Voz.

	Promedio usuarios en el área de cobertura	promedio usuarios atendidos	% promedio usuarios atendidos
Incidencia de un algoritmo de control de potencia en la capacidad de una red heterogénea	255.2	113.5	44.5
Análisis de capacidad de una red heterogénea empleando asignación de espectro y control de potencia basado en GT	253.1	139	55

- Servicio: datos**

De igual manera se presentan los resultados obtenidos para las 10 pruebas realizadas para el servicio de datos en comparación con las variables obtenidas por el trabajo centrado en control de potencia. En la tabla se observa que el

presente trabajo realizando individualmente las pruebas para el servicio de datos prestado evidencia una disminución en la atención a los usuarios respecto al trabajo anterior, información que se puede notar en la tabla 4.25.

Tabla 4.25. Capacidad vista como cantidad de usuarios conectados. Datos.

	Promedio usuarios en el área de cobertura	promedio usuarios atendidos	% promedio usuarios atendidos
Incidencia de un algoritmo de control de potencia en la capacidad de una red heterogénea	252.9	90.3	35.7
Análisis de capacidad de una red heterogénea empleando asignación de espectro y control de potencia basado en GT	256.3	30.8	12

- **Servicio: voz y datos**

En la tabla 4.26 se muestra los resultados para voz y datos, en donde se evidencia que en términos de usuarios cubiertos los dos trabajos no presentan mayores diferencias debido a que el presente trabajo maneja un número mayor de estrategias que pueden causar que muchos usuarios no logren conectarse a algún servicio.

Tabla 4.26. Capacidad vista como cantidad de usuarios conectados. Voz y datos.

	Promedio usuarios en el área de cobertura	promedio usuarios atendidos	% promedio usuarios atendidos
Incidencia de un algoritmo de control de potencia en la capacidad de una red heterogénea	255.6	97.3	38.12

	Promedio usuarios en el área de cobertura	promedio usuarios atendidos	% promedio usuarios atendidos
Análisis de capacidad de una red heterogénea empleando asignación de espectro y control de potencia basado en GT	253.5	98.1	38.71

Ahora, se hace una comparación con el trabajo titulado “Análisis del *Throughput* de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos” [6], donde se presentan resultados en la capacidad vista como velocidad de transmisión para cada servicio.

Principalmente los cambios de parámetros del sistema presentado por “Análisis del *Throughput* de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos”, se presentan a continuación:

Tabla 4.27. Características trabajo de grado “Análisis del *Throughput* de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en teoría de juegos”.

Escenarios de simulación			
Escenario 1		Escenario 2	
Área	1.4 km ²	Área	1.4 km ²
Número femtoceldas	150	Número femtoceldas	100
Radio microcelda	500 m	Radio microcelda	500 m
Radio femtocelda	60 m	Radio femtocelda	60 m
Caso 1		Caso 2	
<ul style="list-style-type: none"> Servicio: voz con BW de 100 KHz. 		<ul style="list-style-type: none"> Servicio: datos con BW de 200 KHz. 	
Caso 3			
<ul style="list-style-type: none"> Servicio: voz y datos con BW de 100 KHz y 200 KHz. 			

Los principales parámetros que varían con respecto al trabajo e grado actual son los siguientes: área de cobertura de $1.4km^2$ con respecto a $1km^2$, radio de la microcelda 500m con respecto a 400m, radio de la femtocelda 60m respecto a 50m.

- **Servicio: voz**

En la tabla 4.28, se presenta el resumen de resultados de 10 pruebas realizadas, para los dos trabajos, donde se puede evidenciar que el presente trabajo presenta una disminución en la el *throughput* medido respecto al trabajo previo, debido a la existencia de un mayor número de estrategias que no permite que el algoritmo pueda escoger rápidamente un valor de frecuencia y potencia que le permita alcanzar la utilidad y que el trabajo previo considera un radio de femtocelda y un margen de tolerancia mayores a los planteados en el presente trabajo.

Tabla 4.28. Capacidad vista como velocidad de transmisión. Voz.

	Promedio usuarios en el área de cobertura	promedio usuarios atendidos	% promedio <i>throughput</i> (Mbps)
Análisis del <i>Throughput</i> de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en GT	345.4	188.5	66.26
Análisis de capacidad de una red heterogénea empleando asignación de espectro y control de potencia basado en GT	242	176	38.1

- **Servicio: datos**

Al igual que en voz, los usuarios atendidos y el *throughput* en el presente trabajo presenta un valor menor que el trabajo previo como se indica en la tabla 4.29 debido a parámetros de configuración de la red que afectan los resultados obtenidos, tales como radios de cobertura y margen de tolerancia.

Tabla 4.29. Capacidad vista como velocidad de transmisión. Datos.

	Promedio usuarios en el área de cobertura	promedio usuarios atendidos	% promedio <i>throughput</i> (Mbps)
Análisis del <i>Throughput</i> de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en GT	347.7	188.68	133.82
Análisis de capacidad de una red heterogénea empleando asignación de espectro y control de potencia basado en GT	243	90	124

- **Servicio: voz y datos**

A diferencia de los anteriores casos, en la tabla 4.30 se muestra los resultados obtenidos al modelar servicios combinados de voz y datos, los datos para el presente trabajo son mejores que los alcanzados en el trabajo previo, considerando que el número de usuario en la microcelda fue menor y que el trabajo previo contempla parámetros distintos en el diseño de la red se destaca que el algoritmo se comporta mejor al implementar los dos servicios de manera combinada logrando obtener un *Throughput* mayor a pesar de que los usuarios en la zona de cobertura sea menor.

Tabla 4.30. Capacidad vista como velocidad de transmisión. Voz y datos.

	Promedio usuarios en el área de cobertura	promedio usuarios atendidos	% promedio <i>throughput</i> (Mbps)
Análisis del <i>Throughput</i> de una red heterogénea que implemente un algoritmo de asignación de espectro basado en GT	341	55.45	102.56

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

Análisis de capacidad de una red heterogénea empleando asignación de espectro y control de potencia basado en GT	235	106	107.2
---	-----	-----	-------

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 CONCLUSIONES

- La implementación de un algoritmo de asignación de espectro y control de potencia conjunta basado en GT mejora la capacidad de la red vista como cantidad de usuarios cubiertos y velocidad de transmisión de manera significativa en comparación al método donde se aplica asignación aleatoria de frecuencia con IPC.
- El elevado número de estrategias hace que el jugador se tarde más en encontrar una pareja frecuencia-potencia que lo satisfaga, lo que en algunos casos no permite alcanzar la utilidad esperada.
- La inclusión del RL en técnicas de asignación de espectro y control de potencia permite que los UE aprendan si una estrategia les genera buenas utilidades.
- Implementar un algoritmo de asignación de espectro y control de potencia basado en juegos no cooperativos utilizando el concepto de solución de SE, permite que los jugadores escojan una estrategia con la cual logran la SINR objetivo y obtienen un buen *Throughput* sin afectar en mayor medida posible a los demás jugadores, dejando que más usuarios puedan conectarse a la red.
- La implementación de un algoritmo de asignación de espectro y control de potencia conjunta basado en GT, presenta mejoras leves en los resultados de usuarios cubiertos y de *Throughput* a nivel de sistema que algoritmos que implemente solo control de potencia o asignación de espectro basado en GT de manera independiente debido al gran número de estrategias utilizadas.
- Al implementar los escenarios de simulación con algunos parámetros diferentes a los planteados por los trabajos previos los resultados obtenidos en el servicio de datos no logran superar los alcanzados para el mismo servicio por los trabajos de referencia.

5.2 TRABAJOS FUTUROS

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

- Implementación de un algoritmo de asignación de espectro y control de potencia basado en teoría de juegos considerando la movilidad de los usuarios con el fin de observar el efecto que tiene en la cantidad de UE conectados y *Throughput* obtenido en la red.
- Aplicación de técnicas de reusó de recursos en una red heterogénea que incorpore varias micro celdas empleando control de potencia basado en teoría de juegos de modo que se haga un uso eficiente de los recursos radio disponibles.
- Implementación de un algoritmo de asignación de espectro y control de potencia 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 y control de potencia 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.
- Implementación de un algoritmo de asignación de espectro y control de potencia que utilice un aprendizaje diferente al aprendizaje reforzado para realizar un análisis comparativo con el presente trabajo de grado.

Apéndice A

En el presente apéndice se muestran los resultados de capacidad obtenidos aplicando asignación de frecuencia y control de potencia conjunta basado en GT y asignación aleatoria de frecuencia con IPC. Para cada caso se realizaron 10 simulaciones para obtener la SINR, usuarios atendidos y el *Throughput*.

A.1 Escenario 1: 100 FAP

- **Caso 1: voz**

En las tablas A.1 y A. 2 se presentan el resumen de las capacidades obtenidas en cada una de las pruebas realizadas para el caso 1 para la asignación aleatoria de frecuencia con IPC, donde la SINR objetivo fue de -7 dB.

Tabla A.1 Voz con asignación aleatoria de *frecuencia* e IPC. Escenario 1

Voz con asignación aleatoria de frecuencia con IPC								
	Total usuarios	Usuarios mBS	%us_MBS	Usuarios fBS	%us_fBS	usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Kbps)
1	266	12	26	35	74	47	17,7	3.571,1
2	265	10	18	47	82	57	21,5	5.921,0
3	254	11	21	42	79	53	20,9	4.873,0
4	247	8	13	55	87	63	25,5	4.958,1
5	260	10	16	54	84	64	24,6	5.221,5
6	265	10	18	47	82	57	21,5	5.921,0
7	235	12	21	45	79	57	24,3	7.890,8
8	256	20	30	46	70	66	25,8	6.877,0
9	241	14	22	50	78	64	26,6	6.959,5
10	244	11	20	45	80	56	22,9	4.072,7

Tabla A.2 Promedios Voz con asignación aleatoria de frecuencia e IPC. Escenario 1

Promedios							
Total usuarios	us_mBS	%us_MBS	us_fBS	%us_fBS	Usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Kbps)
253,3	11,8	20	46,6	80	58,4	23,13	5626,57

En las tablas A.3 y A. 4 se presentan el resumen de las capacidades obtenidas en cada una de las pruebas realizadas para el caso 1 para la asignación de frecuencia y control de potencia conjunta basado en GT, donde se puede evidenciar que el comportamiento en términos de % usuarios cubiertos y velocidad de la red mejora respecto al otro caso en donde se registran los resultados de asignación aleatoria de espectro con IPC.

Tabla A.3 Voz modelo basado en GT. Escenario 1

Voz con GT								
	Total usuarios	us_mBS	%us_MBS	us_FBS	%us_fBS	usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
1	253	47	32,4	98	67,6	145	57,3	32,2
2	229	32	23,3	105	76,7	137	59,8	28,1
3	274	38	26,7	104	73,3	142	51,8	30,9
4	258	30	22,5	103	77,5	133	51,6	31,0
5	265	26	17,8	120	82,2	146	55,1	41,1
6	238	23	16,3	118	83,7	141	59,2	30,5
7	257	27	19,4	112	80,6	139	54,1	42,7
8	247	19	15,0	107	85	126	51	36,7
9	253	32	23,3	105	76,7	137	54,2	35,1
10	257	39	27,1	105	72,9	144	56	32,0

Tabla A.4. Promedios voz modelo basado en GT

Promedios							
Total usuarios	us_mBS	%us_MBS	us_FBS	%us_fBS	Usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
253,1	31,3	22,4	107,7	77,6	139	55,01	34,0395

- **Caso 2: datos**

Para la presentación del resumen de las capacidades obtenidas para las pruebas específicas de asignación aleatoria de frecuencia con IPC, realizadas con las especificaciones dadas para el caso 1, se presentan las tablas A.5 y A.6.

Tabla A.5 Datos con asignación aleatoria de frecuencia e IPC. Escenario 1

Datos con asignación aleatoria de frecuencia con IPC								
	Total usuarios	us_mBS	%us_MBS	us_FBS	%us_fBS	usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
1	265	13	21,3	48	78,7	61	23,01	139,88
2	265	11	18,0	50	82,0	61	23,01	139,88
3	249	1	1,4	32	46,4	69	27,71	198,08
4	249	2	2,6	31	40,3	77	30,92	172,73
5	250	18	25,7	52	74,3	70	28	197,34
6	235	15	23,1	50	76,9	65	27,65	174,25
7	246	14	18,9	60	81,1	74	30,08	172,16
8	229	12	22,6	41	77,4	53	23,14	153,17
9	268	12	15,0	68	85,0	80	29,85	209,33
10	226	8	17,4	38	82,6	46	20,35	150,26

Tabla A.6 Promedios Datos con asignación aleatoria de frecuencia e IPC. Escenario 1

Promedios							
Total usuarios	us_mBS	%us_MB S	us_FB S	%us_fB S	Usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
248,2	10,6	16,6	47	72,5	65,6	26,37	170,75

De igual manera en las tablas A.7 y A.8 se evidencia el resumen de todas las capacidades resultantes de las pruebas tomadas en el escenario de estudio 1, específicamente para las capturadas a partir del algoritmo de asignación de frecuencia y control de potencia conjunta basado en GT. Se evidencia que el comportamiento en términos del % de usuarios cubiertos disminuye por las características de la red presentada para el presente trabajo, mientras que las velocidades obtenidas en comparación con los casos obtenidos de IPC mejoraron.

Tabla A.7 Datos modelo basado en GT. Escenario 1

GT datos								
	Total usuarios	us_mBS	%us_MB S	us_FB S	%us_fB S	usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
1	266	2	7,7	24	92,3	26	9,77	1.028,400

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

2	241	0	0,0	34	100,0	34	14,10	907,67
3	242	2	6,5	29	93,5	31	12,80	893,64
4	262	1	2,9	33	97,1	34	12,9	868,28
5	244	1	3,6	27	96,4	28	11,47	925,97
6	264	3	8,3	33	91,7	36	13,63	849,39
7	251	0	0,0	25	100,0	25	9,96	775,34
8	279	0	0,0	29	100,0	29	10,39	909,02
9	249	2	6,9	27	93,1	29	11,64	877,91
10	265	0	0,0	36	100,0	36	13,58	1.032,6

Tabla A.8 Promedios Datos modelo basado en GT

Promedios							
Total usuarios	us_mBS	%us_MBS	us_fBS	%us_fBS	Usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
256,3	1,1	3,6	29,7	96,4	30,8	12,03	906,82

- **Caso 3: voz y datos**

El resumen de la capacidad obtenida en cada una de las simulaciones realizadas para el tercer caso, se muestran en las tablas A.9 y A.10 para asignación aleatoria de frecuencia con IPC.

Tabla A.9 Voz y Datos con asignación aleatoria de frecuencia e IPC. Escenario 1

Voz y datos asignación aleatoria de frecuencia con IPC										
						usuarios cubiertos				
	Total usuarios	us_mBS	%us_MBS	us_fBS	%us_fBS	voz	datos	Usuarios	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
1	265	12	21	46	79	18	40	58	6,8	7,7
2	246	10	19	42	81	19	33	52	7,7	8,6
3	250	16	23	55	77	33	38	71	13,2	15,8
4	246	9	26	26	74	11	24	35	4,5	7,6
5	264	12	27	33	73	29	16	45	10,98	15,6
6	275	17	29	41	71	18	40	58	6,5	14,2
7	248	10	16	51	84	16	45	61	6,5	11,9
8	254	13	26	37	74	20	30	50	7,9	10,6
9	241	13	21	48	79	21	40	61	8,7	11,2

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

10	265	12	21	46	79	18	40	58	6,8	7,7
-----------	-----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----

Tabla A.10 Promedios Voz y Datos con asignación aleatoria de frecuencia e IPC. Escenario 1

Promedios									
Total usuarios	us_mBS	%us_MB BS	us_F BS	%us_fB S	voz	datos	Usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Kbps)
255,4	12,4	22,9	42,5	77,1	20,3	34,6	54,9	7,958	11,082

El resumen de la capacidad obtenida en cada una de las simulaciones realizadas para el tercer caso, se muestran en las tablas A.11 y A.12 para asignación de frecuencia y control de potencia conjunta basado en GT donde se puede observar que el % de usuarios cubiertos disminuye respecto al caso 1 donde se considera servicio de voz.

Tabla A.11 Voz y Datos modelo basado en GT. Escenario 1

Voz y datos con GT										
						usuarios cubiertos				
	Tot al usu arios	us_m BS	%us _MB S	us_F BS	%us_ fBS	voz	datos	Usuario s	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
1	265	46	47	51	53	75	22	97	36,6	103,4
2	240	34	45	42	55	57	19	76	31,7	106,9
3	240	32	39	51	61	73	10	83	34,6	92,5
4	259	53	48	57	52	94	16	110	42,5	110,6
5	245	38	49	40	51	67	11	78	31,8	108,3
6	237	41	53	37	47	65	13	78	32,9	98,2
7	253	40	37	67	63	83	24	107	42,3	107,3
8	261	32	32	67	68	78	21	99	37,9	118,3
9	259	40	38	65	62	87	18	105	40,5	112,2
10	248	24	29	59	71	72	11	83	33,5	127,5

Tabla A.12 Promedios Voz y Datos modelo basado en GT

Promedios									
Total usuarios	us_mBS	%us_MBS	us_FBS	%us_fBS	voz	datos	Usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Kbps)
250,7	38	40	53,6	60	75,1	16,5	91,6	36,43	108,51

A.2 Escenario 2: 150 FAP

- **Caso 1: voz**

Para el segundo escenario, se presenta los resultados en las tablas A.13 y A.14 para el servicio de voz para las simulaciones realizadas con asignación aleatoria de frecuencia con IPC.

Tabla A.13 Voz con asignación aleatoria de frecuencia e IPC. Escenario 2

Voz con asignación aleatoria de frecuencia con IPC								
	Total usuarios	us_mBS	%us_MBS	us_fBS	%us_fBS	usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
1	265	17	20	70	80	87	33	6,5
2	248	12	20	48	80	60	24,2	6,2
3	261	14	19	60	81	74	28,4	7,5
4	250	15	21	56	79	71	28,4	6,8
5	251	13	14	78	86	91	36,3	7,3
6	248	13	18	61	82	74	29,8	9,4
7	261	9	23	30	77	39	15	3,4
8	265	18	21	67	79	85	32,1	7,1
9	259	17	20	66	80	83	32	8,2
10	245	19	24	60	76	79	32,2	6,1

Tabla A.14 Promedios Voz con asignación aleatoria de frecuencia e IPC. Escenario 2

Promedios							
Total usuarios	us_mBS	%us_MB S	us_FB S	%us_fBS	Usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
255,3	14,7	20	59,6	80	74,3	29,14	6,847

Tabla A.15 Voz modelo con GT. Escenario 2

Voz con GT escenario 2								
	Total usuarios	us_mBS	%us_MBS	us_FBS	%us_fBS	usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
1	265	53	31	118	69	171	64,5	32,0
2	263	49	30	114	70	163	61,9	34,4
3	259	40	25	118	75	158	61	49,4
4	240	36	22	130	78	166	69,2	40,8
5	245	35	21	131	79	166	67	40,0
6	246	49	34	94	66	143	58,1	27,6
7	247	52	34	99	66	151	61,1	29,3
8	217	36	27	99	73	135	62,1	44,1
9	270	48	30	110	70	158	58,5	55,4
10	246	51	35	94	65	145	58,9	33,2

Tabla A.16 Promedios Voz modelo con GT. Escenario 2

Promedios								
Total usuarios	us_mBS	%us_MBS	us_FBS	%us_fBS	Usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)	
249,8	44,9	29	110,7	71	155,6	62,23	33,6828	

- **Caso 2: datos**

Para el segundo escenario analizado se presentan los resultados de las tablas A.17 y A.18 tomados para el servicio de datos, se encuentran respectivamente los captados mediante el algoritmo de asignación aleatoria de frecuencia con IPC y el algoritmo de asignación de frecuencia y potencia mediante GT.

Tabla A.17 Datos con asignación aleatoria de frecuencia e IPC. Escenario 2

Datos con asignación aleatoria de frecuencia con IPC								
	Total usuarios	us_mBS	%us_MBS	us_FBS	%us_fBS	usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
1	256	26	25,0	78	75,0	104	40,62	271,85
2	266	28	23,9	89	76,1	117	43,98	259,89

Análisis de capacidad en una red heterogénea empleando control de potencia y asignación de espectro basado en teoría de juegos

3	255	30	34,1	58	65,9	88	34,50	296,14
4	262	22	22,0	78	78,0	100	38,16	296,140
5	230	20	26,3	56	73,7	76	33,04	242,02
6	256	20	20,4	78	79,6	98	38,28	249,6
7	244	12	15,0	68	85,0	80	32,78	236,76
8	244	11	12,6	76	87,4	87	35,65	209,63
9	260	20	22,7	68	77,3	88	33,84	240,78
10	231	21	29,6	50	70,4	71	30,73	173,42

Tabla A.18 Promedios Datos con asignación aleatoria de frecuencia e IPC.
Escenario 2

Promedios							
Total usuarios	us_mB S	%us_MB S	us_FB S	%us_fb S	Usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
250,4	21	23,2	69,9	76,8	90,9	36,16	247,6

Tabla A.19 Datos modelo con GT. Escenario 2

GT datos								
	Total usuarios	us_mB S	%us_MB S	us_FB S	%us_fb S	usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
1	257	2	5,4	35	94,6	37	14,3	1.126,2
2	253	1	1,9	52	98,1	53	20,9	1.079,9
3	255	0	0,0	32	100,0	32	12,54	1.295,2
4	247	2	5,3	35	92,1	38	15,38	1.427,5
5	243	2	5,6	34	94,4	36	14,81	1.120,9
6	267	0	0,0	48	100,0	48	17,97	1.331,1
7	248	1	2,4	40	97,6	41	16,53	1.242,8
8	253	1	2,9	33	97,1	34	13,43	1.213,2
9	265	3	5,7	50	94,3	53	20	1.328,9
10	265	3	5,7	50	94,3	53	20	1.328,9

Tabla A.20 Promedios Datos modelo con GT. Escenario 2

Promedios							
Total usuarios	us_mBS	%us_MB S	us_FB S	%us_fB S	Usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
255,3	1,5	3,5	40,9	96,3	42,5	16,60	1.249,46

- **Caso 3: voz y datos**

En las tablas A.21 y A. 22 se muestra el resumen de los valores de capacidad obtenidos en cada una de las pruebas realizadas para el caso 3, en donde se asignan diferentes tipos de servicio a los usuarios con asignación aleatoria de frecuencia con IPC.

Tabla A.21 Voz y Datos con asignación aleatoria de frecuencia e IPC. Escenario 2

Voz y datos asignación aleatoria de frecuencia con IPC										
						usuarios cubiertos				
	Total usuarios	us_mBS	%us_MB S	us_F BS	%us_fBS	voz	Datos	Usuarios	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
1	269	16	29	40	71	17	39	56	6,3	13,6
2	264	13	23	43	77	19	37	56	7,2	10,6
3	246	18	31	40	69	31	27	58	12,6	11,2
4	253	21	24	66	76	42	45	87	16,6	16,3
5	246	13	25	40	75	20	33	53	8,1	12,9
6	251	19	28	50	72	32	37	69	12,7	13,0
7	242	23	32	49	68	30	42	72	12,4	15,0
8	269	22	33	44	67	29	37	66	10,8	13,3
9	244	21	30	49	70	19	51	70	7,8	19,4
10	265	18	27	49	73	23	44	67	8,7	14,2

Tabla A.22 Promedios Voz y Datos con asignación aleatoria de frecuencia e IPC. Escenario 2

Promedios										
Total usuarios	us_mBS	%us_MBS	us_FB S	%us_fB S	voz	datos	Usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Kbps)	
254,9	18,4	28,1	47	71,9	26,2	39,2	65,4	10,32	13,95	

Tabla A.23 Voz y Datos modelo con GT. Escenario 2

Voz y datos con GT										
						usuarios cubiertos				
	Total usuarios	us_mBS	%us_MBS	us_FBS	%us_fBS	voz	datos	Usuarios	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)
1	264	20	20	80	80	77	23	100	37,9	134,0
2	239	22	25	65	75	63	24	87	36,4	120,2
3	265	27	26	77	74	76	28	104	39,2	161,8
4	249	22	23	73	77	77	18	95	38,2	147,7
5	264	36	32	77	68	95	18	113	42,8	115,1
6	250	30	34	59	66	75	14	89	35,6	144,2
7	267	27	29	67	71	78	16	94	35,2	127,0
8	246	24	25	71	75	75	20	95	38,6	150,0
9	240	30	28	76	72	91	15	106	44,2	111,1
10	251	33	34	65	66	79	19	98	39	119,0

Tabla A.24 Promedios Voz y Datos modelo con GT. Escenario 2

Promedios										
Total usuarios	us_mBS	%us_MBS	us_FBS	%us_fBS	voz	datos	Usuarios cubiertos	% Usuarios cubiertos	Velocidad del sistema (Mbps)	
253,5	27,1	28	71	72	78,6	19,5	98,1	38,71	133,006	

REFERENCIAS

- [1] O. In, "Seven Ways that HetNets Are a Cellular Paradigm Shift," vol 51, no. 3 March, pp. 136–144, 2013.
- [2] A. U. Ahmed, M. T. Islam, M. Ismail y M. Ghanbarisabagh, "Dynamic resource allocation in hybrid access femtocell network.," *ScientificWorldJournal.*, vol. 2014, p. 539-720, Mar. 2014.
- [3] R. Q. Hu y Y. Qian, "An Energy Efficient and Spectrum Efficient Wireless Heterogeneous Network Framework for 5G Systems," vol. 52, no. 5, May, pp. 94–101, 2014.
- [4] Q. L. Shitong Yuan, "Game theoretical method for sum-rate maximization in full-duplex Massive MIMO Heterogeneous Networks," *Signal Processing*, 2016.
- [5] D. Rosero y A. Jordan, "Incidencia de un Algoritmo de Control de Potencia en la Capacidad de una Red Heterogenea," Universidad del Cauca, 2016.
- [6] C. Narvaez e I. Teran, "Análisis Del Throughput de una Red Heterogénea que Implemente un Algoritmo de Asignación de Espectro Basado en Teoría de Juegos," Universidad del Cauca, 2016.
- [7] Mitel, "The History of the Federal Communications Commission." [Online]. Disponible: <https://www.mitel.com/articles/history-federal-communications-commission-fcc>. [Accedido: 10-Dic-2018].
- [8] "Telefonía Móvil - Radiocomunicaciones Blog Técnico." [Online]. Disponible: <http://www.radiocomunicaciones.net/radio/telefonía-movil/>. [Accedido: 10-Dic-2018].
- [9] P. Wang, W. Song, D. Niyato y Y. Xiao, "QoS-aware cell association in 5G heterogeneous networks with massive MIMO," *IEEE Netw.*, vol. 29, no. 6, pp. 76–82, Nov. 2015.
- [10] A. Sendín Escalona, *Fundamentos de los sistemas de comunicaciones móviles: evolución y tecnologías*. McGraw-Hill, Interamericana de España, 2004.
- [11] M. F. Zurbano, Q. Etecsa, D. De, S. Móviles, V. Clara, y A. Barrero, "Redes Heterogeneas y Virtualización para Incrementar la Capacidad de las Redes Móviles," *Rev. Telem@tica*, vol. 15, no. 1, pp. 47–61, 2016.
- [12] Paul Enrique Guamán y Adrian Fabricio Peñafiel Caceres, "Análisis de la implementación de femtoceldas para mejorar la capacidad de un operador móvil," Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, 2014.

- [13] H. Zhang, X. Chu, W. Guo y S. Wang, “Coexistence of Wi-Fi and heterogeneous small cell networks sharing unlicensed spectrum,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 3, pp. 158–164, Mar. 2015.
- [14] “Redes heterogéneas – EsOpo.” [Online]. Disponible: <https://iie.fing.edu.uy/proyectos/esopo/redes-heterogeneas/>. [Accedido: 10-Dic-2018].
- [15] F. J. Velez, S. Sousa, A. Mihovska y R. Prasad, “Basic limits for LTE-Advanced radio and HetNet optimization in the outdoor-to-indoor scenario,” in *2016 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, 2016, pp. 1–5.
- [16] Young Jin Chun, M. O. Hasna y A. Ghayeb, “Modeling Heterogeneous Cellular Networks Interference Using Poisson Cluster Processes,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 10, pp. 2182–2195, Oct. 2015.
- [17] Y. Li, M. Peng, A. Manzoor y C. Wang, “Co-channel interference in two-tier heterogeneous networks: analytical model and ergodic capacity,” *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 27, no. 1, pp. 101–110, Jan. 2016.
- [18] V. F. Mirama Perez, “Control de Potencia Basado en Teoría de Juegos en Comunicaciones Inalambricas,” Universidad del Cauca, 2012.
- [19] H. Vásquez, C. Hernández, e I. Páez, “Proactive Spectrum Handoff Model with Time Series Prediction Proactive Spectrum Handoff Model with Time Series Prediction,” *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 10, no. 21, pp. 42259–42264, 2006.
- [20] Z. Mlika, E. Driouch y W. Ajib, “A fully distributed algorithm for user-base station association in HetNets,” *Comput. Commun.*, vol. 105, pp. 66–78, Jun. 2017.
- [21] W. Yalong, L. Xi, Z. Heli y W. Ke, “Resource allocation scheme based on game theory in heterogeneous networks,” *J. China Univ. Posts Telecommun.*, vol. 23, no. 3, pp. 57–88, Jun. 2016.
- [22] A. S. M. Z. Shifat, M. Z. Chowdhury y Y. M. Jang, “A game theoretical approach for QoS provisioning in heterogeneous networks,” *ICT Express*, vol. 1, no. 2, pp. 90–93, Sep. 2015.
- [23] P. Alvarez Causelo, *Teoría de Juegos*. Cantabria, España: OpenLibra, 2015.
- [24] M. A. Cardenas y J. M. Chapid, “Implementación de un algoritmo de control de potencia basado en la teoría de juegos en un sistema multicelular limitado por interferencia con portadora única.” Universidad del Cauca, 2015.

- [25] E. Martínez, “Concepto de solución para los juegos cooperativos,” *Anu. jurídico y económico escurialense*, ISSN 1133-3677, N^o. 37, 2004, pags. 409-425, 2004.
- [26] E. Astaiza H, H. F. Bermúdez O., y L. F. Muñoz, “Regiones de eficiencia espectral asociadas a satisfacción de QoS basadas en estrategias de ancho de banda,” *Ing. y Cienc.*, vol. 12, no. 24, pp. 149–168, 2016.
- [27] P. R. Guiraldes, “Aprendizaje Reforzado Orientado a la Toma de Decisiones en el Fútbol Robótico,” Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2009.
- [28] S. Lasaulce y H. Tembine, *Game theory and learning for wireless networks : fundamentals and applications*. Academic Press, 2011.
- [29] V. F. Mirama Perez y V. M. Quintero Florez, “Control de Potencia Basado en Teoría de Juegos en Sistemas de Comunicaciones Inalambricas,” *Rev. GTI*, vol. 15, no. 42, pp. 69–78, 2016.
- [30] M. La Rocca, “laroccasolutions,” 2014. [Online]. Disponible: <http://laroccasolutions.com/training/78-rsrp-and-rsrq-measurement-in-lte/>.
- [31] H. Romo, “Radiocomunicaciones,” Universidad del Cauca, Popayán, 2012.
- [32] “ASD (Adaptive Software Development),” 2012. [Online]. Disponible: adaptivesoftwaredevelopment.blogspot.com.co/. [Accedido: 25-Abril-2019].